

Dr. A. Harling, F. Schlimpert:

Praxisorientierte Modellierung und Validierung der Zusammenhänge zwischen den Materialkennwerten von Wellpappe, den Parametern der Rillwerkzeuge und dem Rillergebnis, um die geforderten Eigenschaften an eine Rillung gezielt umzusetzen und fundierte Qualitätsbeurteilungen treffen zu können  
(Rillen Wellpappe)

Papiertechnische Stiftung (PTS)  
Pirnaer Straße 37  
D – 01809 Heidenau  
[www.ptspaper.de](http://www.ptspaper.de)

Download-Information:

Diese Studie steht auf der Homepage der PTS zum Download bereit:  
[www.ptspaper.de/forschungsdatenbank](http://www.ptspaper.de/forschungsdatenbank)

Ansprechpartner:

Dr. Antje Harling  
Tel. (03529) 551-663  
[antje.harling@ptspaper.de](mailto:antje.harling@ptspaper.de)

Dipl.-Ing. Franziska Schlimpert  
Tel. 0341/3076-2496  
[franziska.schlimpert@htwk-leipzig.de](mailto:franziska.schlimpert@htwk-leipzig.de)

Papiertechnische Stiftung PTS  
Institut für Zellstoff und Papier IZP  
Pirnaer Straße 37  
01809 Heidenau

Hochschule für Technik, Wirtschaft und  
Kultur Leipzig  
Gustav-Freytag-Straße 42  
04277 Leipzig

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das Forschungsvorhaben IGF 21804 BR der kooperierenden Forschungseinrichtungen 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. Dafür sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Unser Dank gilt außerdem den beteiligten Firmen der Wellpappe- und Zulieferindustrie für die Unterstützung der Arbeiten.



**Praxisorientierte Modellierung und Validierung der Zusammenhänge zwischen den Materialkennwerten von Wellpappe, den Parametern der Rillwerkzeuge und dem Rillergebnis, um die geforderten Eigenschaften an eine Rillung gezielt umzusetzen und fundierte Qualitätsbeurteilungen treffen zu können**

Dr. A. Harling, F. Schlimpert

**Inhalt**

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Abstract</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Versuchsdurchführung</b>	<b>9</b>
4.1	Technische Qualität der Rillung	9
4.2	Geometrie der Rillung	12
4.3	Schadlosigkeit der Rillung	16
4.4	Rillempfehlungen	17
<b>5</b>	<b>Materialauswahl und Aufstellung eines Prüfkonzeptes sowie grundlegende Materialcharakterisierung entsprechend des Prüfkonzeptes</b>	<b>19</b>
5.1	Materialauswahl	19
5.2	Prüfkonzept	19
5.3	Materialcharakterisierung der Wellpappenrohapiere	20
5.4	Materialcharakterisierung der Wellpappen	23
5.5	Sorteneinstufung nach DIN 55468-1	32
5.6	Zusammenfassung der Ergebnisse der Materialcharakterisierung – Fazit	32
<b>6</b>	<b>Konzeption und Umsetzung der Rillbarkeitsprüfung sowie Realversuche zur Rillbarkeit und zur Erstellung optimierter Rillungen</b>	<b>33</b>
6.1	Technische Qualität der Rillungen	33
6.2	Geometrie der Rille und der Wulst	35
6.3	Schadlosigkeit der Rillung	36
6.4	Erstellung von Spezifikationen für die Auslegung der Rillwerkzeuge in Abhängigkeit zum Rillverfahren	38
6.5	Standardisierter Prüfablauf und Auswertungsroutine zur reproduzierbaren objektiven Bewertung	44
6.6	Fazit	46
6.7	Optische Auswertung des Faltvorgangs mittels Digital Image Correlation	47

<b>7</b>	<b>DoE und Datenanalyse zur Erstellung eines mathematisch statistischen Modells sowie Entwicklung eines modellbasierten Bewertungskonzeptes zur Rillbarkeit</b>	<b>50</b>
7.1	Aufbau eines mathematisch statistischen Modells und Datenanalyse	50
7.2	Vorhersage der Qualität von Rillungen mittels des mathematisch statistischen Modells	55
7.3	Bewertung der Regressionsanalysen sowie des Vorhersagetools für Rillqualitäten	59
<b>8</b>	<b>Aufbau und Validierung eines Simulationsmodells zum Rillen von WP</b>	<b>60</b>
8.1	Auswahl des Simulationsprogramms und des Materialmodells	60
8.2	Laborproben und -versuche	62
8.3	Modellerstellung	64
8.4	Ergebnisse des Modells	68
8.5	Zusammenfassung	73
<b>9</b>	<b>Erstellung von Leitfäden</b>	<b>74</b>
	<b>Literatur</b>	<b>76</b>

## 1 Zusammenfassung

<b>Thema</b>	Praxisorientierte Modellierung und Validierung der Zusammenhänge zwischen den Materialkennwerten von Wellpappe, den Parametern der Rillwerkzeuge und dem Rillergebnis, um die geforderten Eigenschaften an eine Rillung gezielt umzusetzen und fundierte Qualitätsbeurteilungen treffen zu können.
<b>Ziel des Projektes</b>	<p>Das Ziel des Forschungsvorhabens war die Erarbeitung einer praxisrelevanten Wissensgrundlage zum Rillen von Wellpappe, welche die Zusammenhänge und Phänomene beim Verarbeitungsprozess Rillen beschreibt. Zentral beziehen sich die Erkenntnisse aus dem Wirken der einzelnen Faktoren, ausgehend von den verwendeten Wellpappenroh-papieren, der Wellpappensorte, den Rillwerkzeugen und Rillbedingungen, die das Rillergebnis beeinflussen. Nur durch die genauen Kenntnisse über die Zusammenhänge zwischen diesen Faktoren, lassen sich Rillfehler bzw. Qualitätsprobleme vermeiden, da eine gezielte Einflussnahme auf die identifizierten Haupteinflussgrößen möglich ist.</p>
<b>Ergebnisse</b>	<p>Die Ergebnisse des IGF-Forschungsvorhabens gliedern sich in drei verschiedene Teilbereiche.</p> <p><b>Fokussierung auf die Rillgeometrie</b></p> <p>Die Analysen 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 Variant der Messer- und Gegenzurichtungsgeometrien betrachten.</p> <p><b>Einfluss der Materialparameter auf das Rillergebnis</b></p> <p>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 vereinzelt und eventuell auch schwer zu ermittelnden Parametern abhängt.</p> <p><b>Rillung auf dem Wellenberg</b></p> <p>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 folgend die geringsten Fehler.</p>

**Schlussfolgerung**

Im Rahmen des Projekts wurde ein hoher messtechnischer Aufwand betrieben, um einen Datensatz zu generieren, der die Zusammenhänge zwischen:

- Materialparametern an der Wellpappe und Wellpappenrohpapieren,
- verschiedenen Rillparametern und
- objektiven und subjektiven Rillqualitäten

aufzeigen kann. Mit Hilfe dieser Zusammenhänge konnte ein Leitfaden ausgearbeitet werden, welcher für einwellige Wellpappen Anwendung finden kann. Die gewonnenen Erkenntnisse sind im Folgenden kurz und prägnant zusammengefasst und geben Hinweise für eine gute Verarbeitung einer Wellpappe im Prozess des Rillens mit dem Fokus auf objektive Rillqualitäten, wie den Faltfaktor. Neben der genannten Kriterien existiert nun auch ein Tool zur Vorhersage dieser Eigenschaften.

**Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsthemas für kleine und mittlere Unternehmen (kmU)**

Die Erkenntnisse über die Vorhersagbarkeit des Rillergebnisses, die Haupteinflussfaktoren auf das Rillergebnis, die Bewertungskriterien der Rillqualität können sofort nach Projektende und Veröffentlichung des Abschlussberichts von Wellpappenrohpapierherstellern, Wellpappenherstellern sowie Verarbeitern genutzt um umgesetzt werden. Die Unternehmen werden ohne zusätzliche Investitionskosten in der Lage sein, bereits durch optimierten Materialauswahl für die Konstruktion und Dimensionierung ihrer Packmittel Rillprobleme, die zu Reklamationen und Maschinenstillständen führen, zu minimieren, wodurch unmittelbar Kosten gespart werden. Auf Seiten der Wellpappenrohpapier- und Wellpappenhersteller erlauben vor allem die Erkenntnisse der materialeseitigen Haupteinflussfaktoren die Anpassung ihrer Produkte hinsichtlich verbesserter Rillbarkeitseigenschaften.

**2 Abstract****Theme**

Practice-oriented modelling and validation of the relationships between the material characteristics of corrugated board, the parameters of the creasing tools and the creasing result in order to implement the required properties of a creasing in a targeted manner and to be able to make well-founded quality assessments.

**Project objective**

The aim of the research project was to develop a practical knowledge base for creasing corrugated board, which describes the interrelationships and phenomena in the creasing process. The findings are centred on the effects of the individual factors that influence the creasing result, starting with the corrugated base paper used, the type of corrugated board, the creasing tools and the creasing conditions. Creasing errors and quality problems can only be avoided by having precise knowledge of the relationships between these factors, as it is possible to exert a targeted influence on the main influencing variables identified.

---

**Results**

The results of the IGF research project are divided into three different areas.

**Focussing on the creasing geometry**

The analyses have shown that the correlations between the creasing results and the creasing parameters in particular were very pronounced. Accordingly, the creasing knife and, if used, the counter-dressing should always be adapted to the material. As the creasing parameters play a measurable role in the creasing quality, developments must be advanced beyond the project that also consider different creasing geometries and any improvements in this area by varying the blade and counter-dressing geometries.

**Influence of the material parameters on the creasing result**

It is possible to determine a large number of material parameters on corrugated board and its base paper. The data analysis has shown that these parameters exhibit high correlation coefficients to the creasing qualities. In general, however, no measurement method explicitly stood out from the large number of methods used. However, this can also be seen as an advantage in the future, as the further development of the prediction model does not depend on individual parameters that may be difficult to determine.

**Creasing on the wave crest**

The metrological investigations have already shown that the location of the creasing has an influence on the creasing quality. With the help of the FEM model, it was possible to define that creasing on the crest of the wave is the gentlest form of processing for the material. In contrast to valley or intermediate creasing, the resulting stresses are the lowest and therefore show the fewest defects.

---

**Conclusion**

As part of the project, a great deal of metrological effort was made in order to generate a data set that shows the relationships between:

- the material parameters on the corrugated board and the corrugated base paper,
- various creasing parameters and
- the objective and subjective creasing qualities

can be shown. With the help of these correlations, a guideline could be developed which can be used for single wall corrugated board. The knowledge gained is summarised briefly and concisely below and provides tips for good processing of corrugated board in the creasing process with a focus on objective creasing qualities such as the folding factor. In addition to the criteria mentioned, there is now also a tool for predicting these properties.

---

---

**Economic  
relevance of this  
research subject  
for small and  
medium enter-  
prises (SME)**

The findings on the predictability of the creasing result, the main factors influencing the creasing result and the evaluation criteria for creasing quality can be utilised and implemented by corrugated base paper manufacturers, corrugated board manufacturers and converters immediately after the end of the project and publication of the final report. The companies will be able to minimise creasing problems that lead to complaints and machine downtimes without additional investment costs by optimising the choice of materials for the design and dimensioning of their packaging materials, thus saving costs directly. On the part of corrugated base paper and corrugated board manufacturers, it is above all the knowledge of the main influencing factors on the material side that allows them to adapt their products with regard to improved creasability properties.

---

### 3 Einleitung

#### **Aktuelle Zahlen zum Wellpappenmarkt**

Das in den letzten Jahrzehnten zu verzeichnende erhöhte Umweltbewusstsein sowie ökonomische Erwägungen haben in der Papierindustrie zu wesentlichen Änderungen in der Produktionstechnologie geführt. Diese betreffen insbesondere die Reduzierung der spezifischen Abwassermenge durch Einengung der Wasserkreisläufe, die Steigerung der Altpapiereinsatzquote, die zunehmende Veredelung der Papiere (z. B. durch Streichen), die Erhöhung der Papiermaschinengeschwindigkeit und den vermehrten Einsatz von Additiven im Produktionsprozess.

Gleichzeitig hat sich die Altpapierqualität immer weiter verschlechtert. Aufgrund der z. T. sehr hohen Preise und der schlechten Verfügbarkeit einzelner Sorten muss häufig auf schlechtere Sorten ausgewichen werden.

Die gleichzeitige Steigerung der Anforderungen an Produktqualität und Produktivität einerseits und die schlechtere Rohstoffqualität andererseits erfordern unter diesen Randbedingungen die Entwicklung immer neuer Verfahren zur produktverträglichen Vermeidung von Reststoffen.

#### **Notwendigkeit des Forschungsprojektes für KMU**

Die hohen Qualitätsanforderungen an anspruchsvolle Wellpappverpackungen fordern eine wissenschaftliche Betrachtung des Prozessschrittes Rillen von Wellpappe mit Flachwerkzeugen. Die vorliegenden Forschungsarbeiten bestätigen die Vielzahl von Einflussgrößen auf eine optimale Ausführung von Biegestellen und deren Relevanz in der Wertschöpfungskette „Wellpappverpackung“. Eine umfassende Nutzung des gewonnenen Wissens für eine gezielte Auslegung von Rillungen an Wellpappe steht aber noch aus, da insbesondere eine Differenzierung und Quantifizierung der einzelnen Einflussgrößen bislang mangels geeigneter Mess- bzw. Prüfmethode nicht möglich ist. Validierte Kenngrößen bilden darüber hinaus die Grundlage für den Aufbau einer geeigneten Prognosemethode und Norm zur Rillfähigkeit von Rohpapieren sowie Wellpappe, eine optimale Werkzeuggestaltung (inklusive Rillparameter), optimale Umgebungsbedingungen und eine angepasste Abpacktechnik (Maschinenbau). Obwohl das Rillen mit oszillierend arbeitenden Werkzeugen im Vordergrund dieser Forschungsarbeit steht gilt es eminente Unterschiede zum Rillen mit Rotationswerkzeugen herauszuarbeiten und gegenüberzustellen.

#### **Arbeitshypothese basierend auf dem Forschungsziel**

Die Funktionalität von Wellpappenverpackungen ist in starkem Maße von der Ausführung der durch Rillen und Biegen bzw. Falten erzeugten Schachtelkanten abhängig. Dabei stehen insbesondere eine einwandfreie Optik, festigkeitsrelevante Eigenschaften sowie die konkrete Scharnierwirkung der Rillung im Fokus. Das Ziel des Forschungsvorhabens ist die Erarbeitung einer praxisrelevanten Wissensgrundlage zum Rillen von Wellpappe die die Zusammenhänge und Phänomene beim Rillen beschreibt. Zentral beziehen sich die Erkenntnisse aus dem Wirken der einzelnen Faktoren, ausgehend von den verwendeten Wellpappenrohpapieren, der Wellpappensorte, den Rillwerkzeugen und Rillbedingungen, die das Rillergebnis beeinflussen. Die genaue Kenntnis über die Zusammenhänge zwischen diesen Faktoren, liefert die Möglichkeit, Rillfehler bzw. Qualitätsprobleme zu vermeiden.



---

Die Arbeitshypothese zur Lösung des Problems basiert auf der Grundlage einer zu schaffenden Datenbasis, aus der mittels mathematisch statistischer Methoden die Haupteinflussfaktoren auf das Rillverhalten identifiziert werden. Um das Forschungsziel zu erreichen, bedarf es umfangreicher Materialuntersuchungen zur Charakterisierung der Wellpappenrohpa-piere, der ausgewählten Wellpappen sowie der Charakterisierung des Rillverhaltens einschließlich der Ergebnisbewertung. Über die geschaffene Daten-basis kann anschließend eine Sensitivitätsanalyse zur Identifikation der Haupteinflussfaktoren hinsichtlich des Rillverhaltens durchgeführt werden. Durch die Auswahl verschiedener Wellpappensorten und -qualitäten kann ein mathematisch statistisches Modell aufgebaut werden, mit dem auch Prognosen zur Rillbarkeit anderer Wellpappen möglich sind, die sich in ihren Eigenschaften innerhalb des betrachteten Versuchsraumes bewegen. Eine durch Regressionsanalyse erstellte Polynomfunktion macht diese Ergebnisprognose entsprechend berechenbar. Des Weiteren tragen die Erkenntnisse bezüglich der identifizierten Haupteinflussfaktoren vor allem dazu bei, ein FEM-Modell zu entwickeln und dieses entsprechend zu parametrisieren. Mit dem entwickelten und validierten Simulationsmodell lassen sich das Rillverhalten und die Wirkweise von Rillvorrichtungen auf die Wellpappe abbilden und prognostizieren. Durch das Zusammenführen der Ergebnisse entsteht ein Bewertungskonzept für Wellpappen hinsichtlich der Rillbarkeit. Darin enthalten ist eine gezielte Auswahl von Rillgeometrien und Rillparametern sowie neuartiger Möglichkeiten der Fehler- und Ursachenanalyse, einschließlich der Klassifizierung von Rillfehlern zur Lösung von Rillproblemen.

Als Einzelergebnisse werden im Hinblick auf einwellige, zweiseitige Wellpappe nach Abschluss des Vorhabens vorliegen:

- Mathematisch-statistische Modellierung und Validierung der Zusammenhänge zwischen Materialkennwerten, Rillbedingungen und Rillergebnis, durch die eine ganzheitliche Beschreibung des Rillverhaltens von Wellpappe erfolgt,
- Praxistaugliche Methodenentwicklung zur einfachen und sicheren Prognose und Bewertung der Rillbarkeit von Wellpappen,
- Erarbeitung eines validierten FEM-Modells zur Prognose der Rillbarkeit,
- Begriffs- bzw. Klassenbildung zur Definition von Bewertungskriterien als Grundlage einer fundierten Qualitätsbeurteilung der Rillung (visuell und messtechnisch),
- Richtlinien zur gezielten Abstimmung von Wellpappe und Rillbedingungen,
- Handlungsempfehlung zur Fehlerbehebung / Ergebnisoptimierung und
- Empfehlungen zur Werkzeugdimensionierung (z. B. Rilllinienbreite, Gummierung neben der Rilllinie, Kombination Perforations- und Rilllinie).

## 4 Versuchsdurchführung

### 4.1 Technische Qualität der Rillung

#### Messgeräte

Folgende Hersteller stellen Messgeräte für die Biegeprüfung an Wellpappe her:

1. **Kögel** (im folgenden Messsystem 1.1 genannt):

Im Rahmen des Forschungsprojektes fand der an der HTWK vorhandene FRK-Quicktester 2002.01 Anwendung.

2. **Zwick** (im folgenden Messsystem 1.2 genannt):

Ebenfalls an der HTWK vorhanden und für Vorversuche im Forschungsvorhaben eingesetzt wurde die 2-Punkt-Biegevorrichtungen.

3. **Lorentzen & Wettre** (im folgenden Messsystem 1.3 genannt):

Für ausführliche Untersuchungen stand dieses Gerät der HTWK leider nicht zur Verfügung. Das prinzipielle Wirkprinzip und die Einsatzfähigkeit für Wellpappe konnte bei einem im PbA vertretenen Unternehmen getestet werden.

4. **Einbau für die UPM** (im folgenden Messsystem 1.4 genannt):

- A Die Vorrichtung wurde seitens der PTS im Rahmen des Projekts angeschafft und für 2-Punkt-Biegeversuche an der Universalprüfmaschine eingesetzt.

#### Messaufbau

##### Messsystem 1.1

Die grundlegenden Anforderungen an das entsprechende Messsystem werden in der DIN 19304:2021-04 beschrieben.

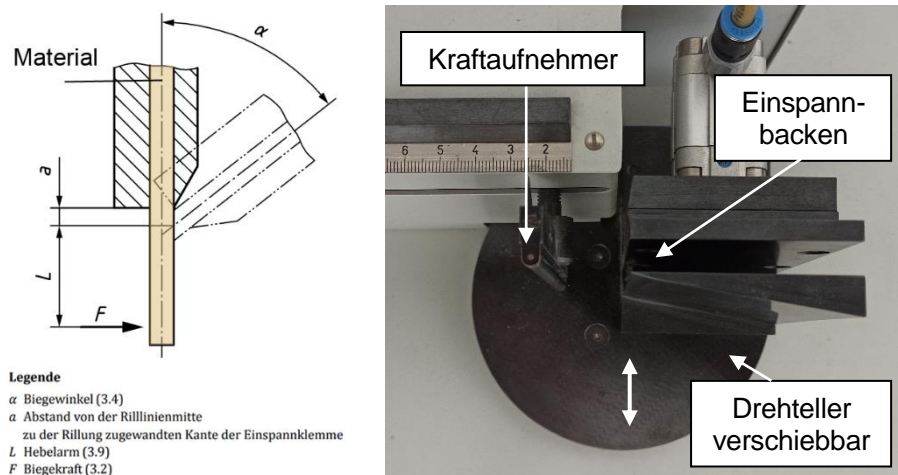


Abbildung 1: Aufbau Messsystem [1] sowie Darstellung d. Messsystems 1.1

**Prinzip**

Das Kraftmesssystem erfasst im Abstand ( $L=25\pm 1$  mm) von der Rilllinienmitte die bei der Biegung um den Biegewinkel  $\alpha$  von mind.  $90^\circ$  auftretende Biegekraft ( $F$ ). Es muss sichergestellt sein, dass die Rilllinienmitte der Proberillung mit der Drehachse zusammenfällt. Der Abstand ( $a$ ) von der Rilllinienmitte zu der zugewandten Kante der Einspannklemme muss mindestens 1 mm betragen. Der Abstand muss so gewählt werden, dass es im Biegewinkelbereich bis  $90^\circ$  zu keiner zusätzlichen Druckbelastung der Probe durch die Klemmbacken kommt. Andernfalls muss der Abstand  $a$  vergrößert werden. Es erfolgt die Aufzeichnung der Absolutwerte der Biegekraft im gesamten Biegewinkelbereich sowie die Aufzeichnung des Biegekraft-/Biegewinkel-Diagramms wie in Abbildung 2 dargestellt.

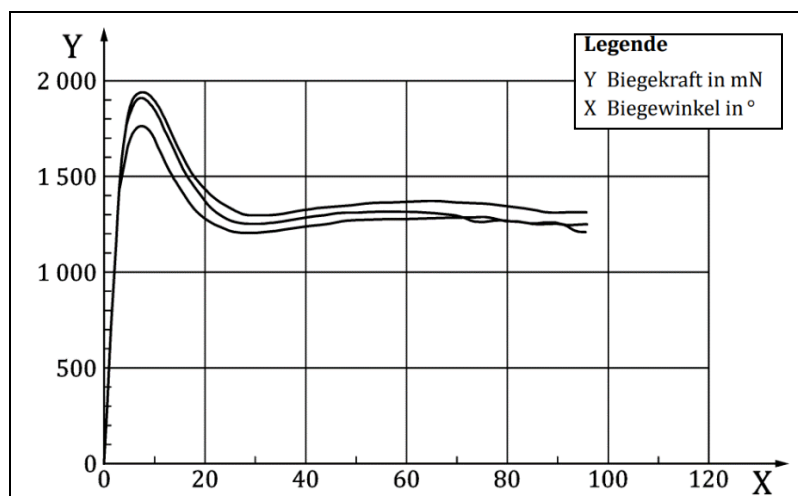


Abbildung 2: Biegekraft-/Biegewinkel-Diagramm [1]

Das Kraftmesssystem muss die Klasse 1 nach DIN EN ISO 7500-1:2018-06 erfüllen. Die Messung erfolgt in längs und quer zum Wellenlauf. Zur Bestimmung des Faltfaktors sind gerillte und ungerillte Proben in gleicher Richtung und Anzahl zu prüfen.

**Bewertung**

Die getesteten Messsysteme 1.1 und 1.2 unterscheiden sich in der Ausführung der Einspannung der Proben. Die DIN liefert keine Vorgaben bezüglich der Position des Drehpunkts. Beim Messsystem 1.1 sorgt ein verschiebbarer Drehteller (siehe Abbildung 1) dafür, dass unabhängig von der Materialdicke der Drehpunkt an der Außendecke der Probe liegt. Bei der Prüfung von ungerillten Proben am Messsystem 1.2 wurde eine nicht parallele Probenführung (siehe Abbildung 8) und die Ausbildung einer zweiten Biegestelle beobachtet. Eine fehlerbehaftete Messwertaufzeichnung für die Biegearbeit an ungerillten Proben und damit die Beeinflussung des daraus errechneten Faltfaktors konnte für das Messsystem 1.2

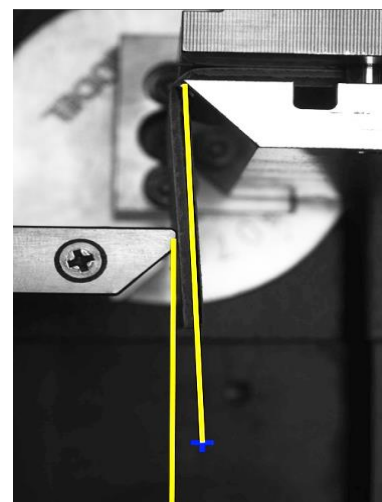


Abbildung 3: Messsystem 1.2

nicht ausgeschlossen werden.

**Messverfahren** Die folgenden Parameter wurden unter Verwendung der genannten Messmethode und dem benannten Messsystem ermittelt:

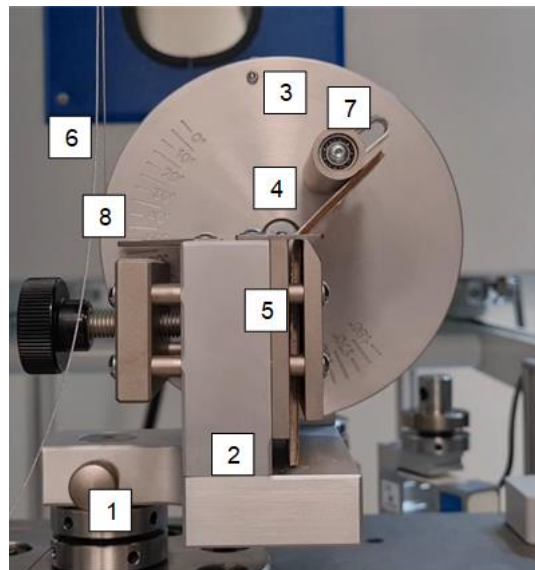
Tabelle 1: Parameter, Messmethode und -system zur Ermittlung des Biegegewiderstands

Parameter	Messmethode	Messsystem
Biegegewiderstand	DIN 19304; DIN 55437-3	1.1
Biegekraft	DIN 19304; DIN 55437-3	1.1
Faltfaktor (f)	DIN 19304; DIN 55437-3	1.1
Biegewinkel ( $\alpha$ )	DIN 19304; DIN 55437-3	1.1
erster Peak ( $F_g$ )	DIN 19304; DIN 55437-3	1.1
Biegearbeit (W)	DIN 19304; DIN 55437-3	1.1

### Messaufbau

#### Messsystem 1.4

Die im Projekt entwickelte und angeschaffte Prüfvorrichtung wurde so konzipiert und gefertigt, dass Sie in einer Universal-Zug-Prüfmaschine verwendet werden kann. Die Vorrichtung besteht im Wesentlichen aus folgenden Komponenten (siehe Abbildung 4).



- 1 Adapter zum Montieren in eine Universalprüfmaschine
- 2 Gestell zur Aufnahme weiterer Funktionskomponenten
- 3 Drehbar mit dem Gestell verbundene Scheibe
- 4 Zentrischer Drehpunkt
- 5 Probeneinspannung mittels Schraubklemmbacke
- 6 In der Umfangnut aufgewickelte Drahtsehe
- 7 Hebel zur Aufbringung des Biegemoments auf die Probe
- 8 Verdrehwinkelanzeige

Abbildung 4: Prüfvorrichtung zur Ermittlung des Faltfaktors nach DIN 19304

Die Vorrichtung wird über eine Bolzenführung in die Prüfmaschine montiert und anschließend mit einem Stift und einer Kontermutter fixiert. Das Gestell beinhaltet eine Probenhalterung für die Wellpappe sowie eine zentrisch drehbar gelagerte Scheibe an einem vertikalen Arm. Im Umfang der Scheibe ist eine Nut eingearbeitet, auf welche eine Stahlsehe aufgewickelt ist. Senkrecht zur Scheibe ist ein Bolzen in einem Langloch montiert, welcher bei Prüfbeginn an der

Probe kraftlos anliegt. Das Langloch ermöglicht die Abstandseinstellung zum Drehpunkt der Scheibe und den daraus resultierenden Hebelarm bzw. Hebelkraft. Das lose Ende der Stahlsehne wird mit dem beweglichen Traversenbalken der Universalprüfmaschine, über eine entsprechende Bolzenpaarung, verbunden. Die Scheibe ist zusätzlich mit einer Winkelskala versehen, welche über einen, am Gestell befestigten Zeiger abgelesen werden kann. Zum Ausführen der Prüfung wird ein rechteckiger, nach DIN gefertigter rechteckiger Probekörper mittels Probeneinspannung fixiert. Durch einen weggesteuerten Abzug der Stahlsehne durch die Universalprüfmaschine wird die Scheibe in Rotation versetzt. Der Hebelarm fungiert als Mitnehmer und Überträgt die Rotation auf die Probe. Als Resultat wird die Probe am oberen Ende der Einspannung um eine Kante gebogen. Die Prüfmaschine ist so konfiguriert, dass Sie die Probe den DIN Vorgaben entsprechend, mit einer Prüfgeschwindigkeit von  $9^\circ/\text{s}$  biegt. Die Prüfung wird automatisch, bei Erreichen eines Prüfwinkels von  $90^\circ$ , beendet. Die dabei auftretenden Zugkräfte werden durch die Universalprüfmaschine ermittelt.

### Auswertung

Die Software der Universalprüfmaschine wurde an die Prüfung insofern angepasst, dass der Traversenweg durch das Verhältnis - Abzug zu Scheibendurchmesser - in einen Winkel umgerechnet wird. Die auftretenden Kräfte bilden in Kombination mit dem Abstand des Biegehebels zur Drehachse die Biegekräfte. Das Ergebnis ist ein Biegekraft-Winkel-Diagramm des Prüfungsvorgangs (siehe Abbildung 5).

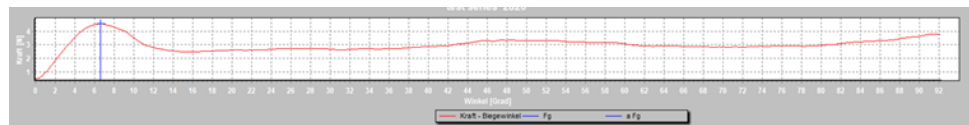


Abbildung 5: Biegekraft-Winkel-Diagramm

Das Integral dieses Graphen, in den Grenzen von  $0^\circ$  bis  $90^\circ$ , bildet die Biegearbeit. Diese wird von gerillten und ungerillten Proben desselben Materials verglichen. Hierzu wird der Quotient aus den Biegearbeiten gebildet, welches den Faltfaktor darstellt. Die Biegekraft multipliziert mit dem Probenquerschnitt ergibt das Biegeverhalten. Diese Faktoren können als Vergleichsfaktoren zum quantifizierten Vergleich unterschiedlich gerillter Materialien genutzt werden.

## 4.2 Geometrie der Rillung

### Vorgehen

Die Vermessung der im Material erzeugten Rillung erfolgte mit dem Ziel, die Abformgenauigkeit zwischen Rillwerkzeug und geformter Rillung näher zu bestimmen und das Rillergebnis mit Maßzahlen zu beschreiben, um die Datenbasis für das zu entwickelnde Modell solide stützen zu können.

## Messgeräte

Es wurden Messgeräte der folgende Hersteller betrachtet:

1. **Keyence** (im Folgenden Messsystem 2.1 genannt):

Im Rahmen des Forschungsprojekts fand für Vorversuche das an der HTWK vorhandene 3D-Profilometer Keyence VR-3000 Anwendung.

2. **Peret** (im Folgenden Messsystem 2.2 genannt):

Im Rahmen des Forschungsprojekts fand das an der HTWK vorhandene Messgerät Corcheck Anwendung.

## Messaufbau und Prinzip

### Messsystem 2.1 Keyence VR-3000

Beim 3D-Profilometer Keyence VR-3000 erfolgt die Erfassung der Höhenunterschiede mithilfe der Streifenlichtprojektion, einer Variante des Lichtschnittverfahrens. Aus einer Beleuchtungsquelle werden Streifen in unterschiedlichen Breiten auf das Objekt projiziert (Abbildung 6). Bei Höhenunterschieden wird das streifenlichtprojizierte Bild in Relation zum Höhenunterschied auf dem Objekt verzeichnet. Wenn der Beleuchtungswinkel gegenüber der optischen Achse der Kamera festgelegt ist, kann der Höhenunterschied des Objektes anhand der Gleichung  $h = d / \tan$  berechnet werden. Die Größe  $d$  bezeichnet dabei den durch den Höhenunterschied des Objekts verursachten Versatz des Projektionslichts [2]. Die Auflösung beträgt  $0,01 \mu\text{m}$ . Es können sowohl die Innenseite (Rille) wie auch die Außenseite (Wulst) vermessen werden.

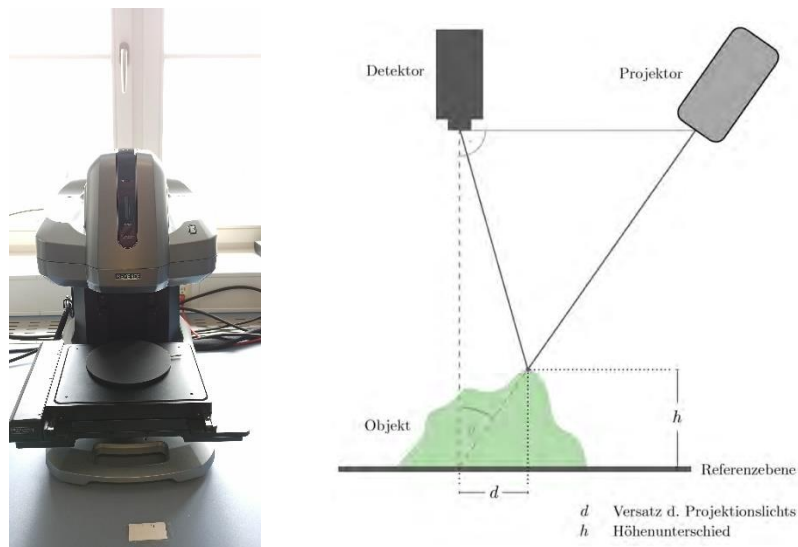


Abbildung 6: 3D-Profilometer Keyence VR-3000 und Messprinzip

Nach Aufnahme der Oberflächentopografie können mithilfe softwarebasierter Messwerkzeuge (z. B. Messung von Linie – Punkt, Messung des Winkels) in wählbaren Messintervallen Kennwerte ermittelt werden. Es sind Referenzpunkte zu definieren.



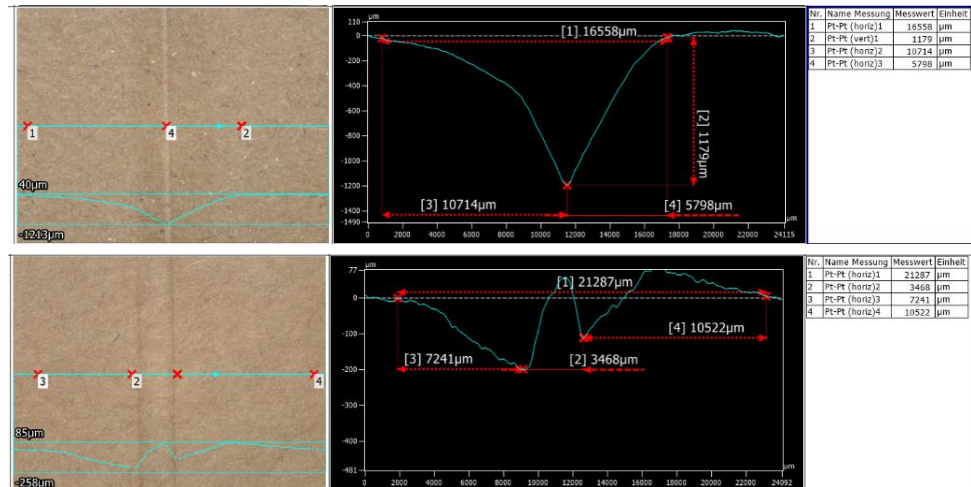


Abbildung 7: Visualisierung und softwaregestützte Vermessung von Rille und Wulst mit 3D-Profilometer Keyence VR-3000

**Messaufbau und Prinzip**

Messsystem 2.2 Corrcheck

Das Corrcheck ist ein mobiles Handmessgerät zur Vermessung von Rillen und Unebenheiten auf Wellpappe, das auf die Probe aufgelegt wird. Ein Laser projiziert senkrecht zur Rille eine Linie auf die Materialoberfläche.

Das reflektierte Licht wird von einer Kamera erfasst, die optisch so ausgerichtet ist, dass die verfügbare Apertur in die Tiefe blickt. Da das Sichtfeld der Kamera begrenzt ist, muss das Messbild schrittweise erstellt werden. Dazu wird das Corrcheck in einer Halterung definiert über die Probe geführt. Es werden fünf Einzelbilder aufgenommen und diese zu einem Gesamtbild zusammengesetzt. Die Auflösung beträgt laut Herstellerangaben 1 µm. Die Vermessung des erstellten Profilbilds der Rille erfolgt automatisch per Software.

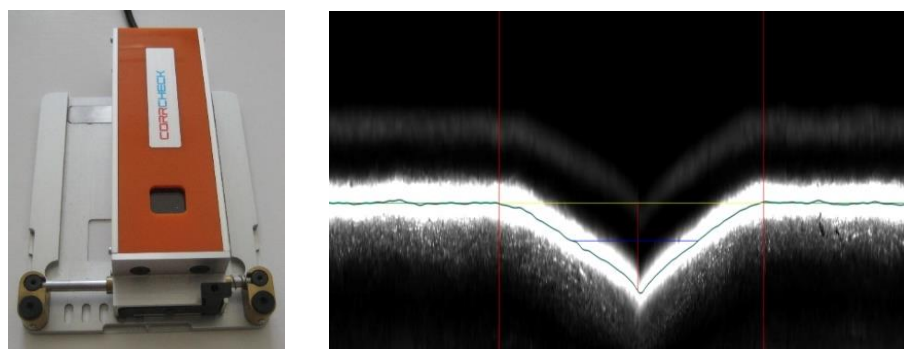


Abbildung 8: links - Messgerät 2.2 Peret Corrcheck verfahrbar in einer Halterung, rechts - berechnetes Profilbild der Rille

Die Datenausgabe beinhaltet folgende geometrische Parameter der Rille (ergänzend siehe auch Abbildung 9):

Tabelle 2: Messparameter für die Geometrie der Rille bei Corrcheck [3]

<b>D</b>	<b>Rillentiefe</b> in mm [Depth]	Länge des Lots vom tiefsten Punkt der Rille bis zur festgelegten Bezugslinie der Wellpappenoberfläche ( $z_0$ )
<b>W</b>	<b>Rillenbreite</b> in mm [Width]	Abstand zwischen Anfangs- und Endpunkt der Rille als maximale Öffnung des Rillenprofils an der Wellpappenoberfläche
<b>W2</b>	<b>Rillenbreite 2</b> in mm [Width 2]	Rillenbreite bei der Tiefe, an der die Querschnittsfläche der geformten Rille (grün) horizontal halbiert wird
<b>C</b>	<b>Kavität</b> in mm <sup>2</sup> [Cavity]	Querschnittsfläche der geformten Rille über die Rillenbreite W2
<b>S</b>	<b>Symmetrie</b> in mm [Symmetry]	x-Abstand des Schwerpunkts der Fläche unterhalb W2 relativ zur x-Koordinate des tiefsten Punkts der Rille

Aufgrund des limitierten Sichtfelds der Kamera und deren Ausrichtung zur Erfassung tieferliegender Strukturen ist die Aufnahme erhabener Verformungen nicht möglich. Die beim Hohlritzen mittels Gegenzurichtung eingebrachte Wulst kann mit diesem Messgerät nicht vermessen werden.

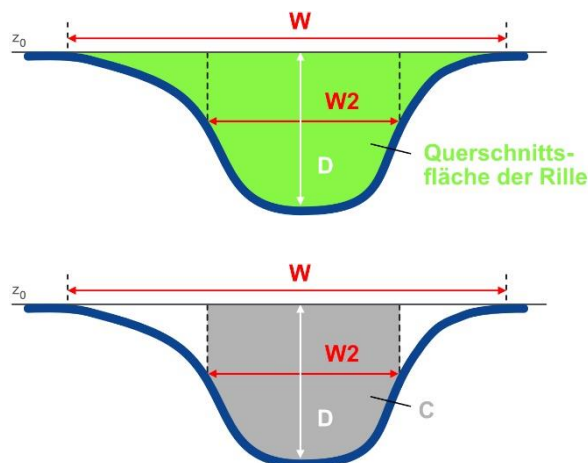


Abbildung 9: Geometrische Parameter der Datenausgabe beim Corrccheck

### Bewertung

Bei Messsystem 2.1 ist der Zeitaufwand für die Aufnahme und Auswertung der Kennwerte höher als bei Messsystem 2.2.

Die mit dem Versuchswerkzeug erzielten Geometrien von Rille und Wulst variieren in Form, Breite und Tiefe. Bei der Wulst zeigt sich zudem, dass die Ausformung im Material an sehr unterschiedlichen Positionen bezogen auf die Materialoberfläche erfolgt (siehe Abbildung 10).



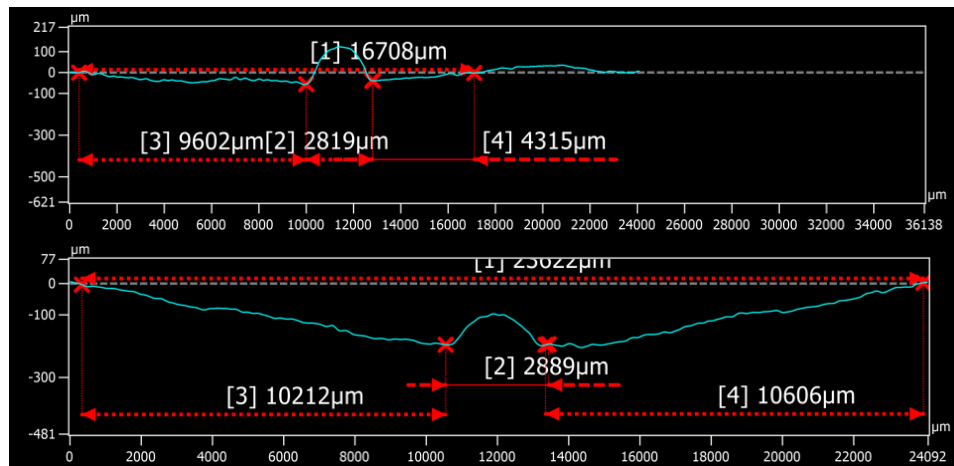


Abbildung 10: Aufnahme des Messsystem 2.1 mit verschiedenen Positionen der Wulst relativ zur Materialoberfläche – oben: erhaben, unten: vertieft

Diese Variationen erfordern bei Messsystem 2.1 eine händische Anpassung der Referenzpunkte in der Messsoftware, d.h. es konnte kein einheitlicher Referenzrahmen für alle Rillproben festgelegt werden. Um die Aussagekraft der Messwerte nicht zu gefährden, wurde sich daher für die Ermittlung der Parameter der Rille mit dem in der Praxis verfügbaren und für Wellpappanwendungen erprobten Messsystem 2.2 entschieden, auch wenn damit auf die Vermessung der Wulst verzichtet werden musste. Messsystem 2.2 sichert aufgrund seiner automatischen Vermessung jedes Profilbilds eine für das zu entwickelnde Modell erforderliche vergleichbare Datenbasis.

### 4.3 Schadlosigkeit der Rillung

#### Risse als Fehlerbild

Risse beeinträchtigen das Biegeverhalten der Rillung und können ein qualitätsmindernder Faktor sein. Im Gegensatz zu Faltschachtelkarton existiert für Wellpappe keine Normvorgabe zur Bewertung des Aussehens einer Rillung. In Vorversuchen wurde geprüft, ob eine messtechnische Erfassung von Rissen möglich ist, um die Methode der visuellen Begutachtung zu objektivieren.

Herausforderung beim Erfassen von Fehlerbildern ist die mitunter geringe Sichtbarkeit der Schädigungen im Fasermaterial, insbesondere wenn Risse verdeckt in der Rille liegen und mit einer senkrechten Beleuchtung der Materialoberfläche nicht ausgeleuchtet werden können.

#### Methoden und Messgeräte

Folgende beiden Methoden wurden betrachtet:

- Visuelle Begutachtung nach VDW-Prüfkatalog [4] (im Folgenden Methode 3.1 genannt)
- Grafitpulver-Methode und 3D-Profilometer Keyence VR-3000 (im Folgenden Methode 3.2 genannt)

---

**Methodenablauf** Visuelle Begutachtung nach VDW-Prüfkatalog

Unter 3.2 Verarbeitungsmerkmale / Laufnummer 5 „Ausbildung der Rillung“ erfolgt eine Bewertung nach der Prüfmethode *Sichtprüfung* mit der Unterteilung „außen geplatzt“ und „innen geplatzt“ sowie einer Bewertung in zwei Dimensionen (ja/nein). Für die Begutachtung ist auf eine angemessene Beleuchtung zu achten.

Grafitpulver-Methode und 3D-Profilometer Keyence VR-3000

Die **Grafitpulver-Methode** [5] kam zur Verbesserung der Sichtbarkeit von Rissen im Deckenpapier zum Einsatz. Für die messtechnische Ermittlung der Materialschädigungen wurde das **3D-Profilometer Keyence VR-3000** (Messsystem 2.1) genutzt.

Es erfolgt die Einfärbung der Rillproben mit Grafitpulver. Durch Ändern der Auftragsrichtung wird das Pulver in den Riss eingetragen. Die eingefärbten Proben werden mit der Fotofunktion von Messsystem 2.1 (Beschreibung siehe 5.3) fotografiert. Beleuchtungsbedingungen und der Objektausschnitt sind konstant. Zur Verstärkung der Sichtbarkeit der Risse erfolgt in einem Bildbearbeitungsprogramm die Umwandlung der Fotos in Graustufenbilder [5]. Zur Auswertung der Graustufenbilder ist ein entsprechender Algorithmus zu programmieren.

---

**Bewertung** Visuelle Begutachtung nach VDW-Prüfkatalog

Die visuelle Begutachtung von Proben ist eine einfache und wenig zeitaufwendige Methode. Vorteil beim Bewerten von Proben mit dem Auge ist, dass die Probe in alle Richtungen gedreht und aus verschiedenen Perspektiven begutachtet werden kann, sodass auch ungünstig gelegene Risse ausgeleuchtet und identifiziert werden können.

Grafitpulver-Methode und 3D-Profilometer Keyence VR-3000

Das für die Auswertung der erzeugten Graustufenbilder notwendige Programm war nicht vorhanden und hätte im Rahmen des Forschungsprojekts erarbeitet werden müssen. Dies war aus Zeitgründen nicht möglich.

Somit war keine zuverlässige messtechnische Ermittlung von Rissen und Schäden an gerillten Deckenpapieren möglich, sodass die Bewertung der Schadlosigkeit durch visuelle Begutachtung in Anlehnung an den VDW-Katalog [4] mit einer differenzierten Fehlerbildbeschreibung erfolgte.

---

#### 4.4 Rillempfehlungen

Es konnten keine wissenschaftlichen Arbeiten bzw. Untersuchungen zur Ermittlung von Werkzeugparametern beim Rillen von Wellpappe ermittelt werden. Basierend auf Materialdaten wurden für die Erstellung von Spezifikationen zur Werkzeugauslegung sowohl Online Tools als auch Informationen von Werkzeugbauern eingeholt und miteinander verglichen.

---

**Online Tools**

Zur Ermittlung von geeigneten Werkzeuggeometrien an den 11 Wellpappen wurden die folgenden Online Tools (siehe Tabelle 3) verwendet und verglichen:

Tabelle 3: Übersicht der untersuchten Online Tools

Anbieter	Website	Bezeichnung
CITO-System GmbH	<a href="https://www.cito.de/de/DE/boxline/rillzurichtungen/cito-abakus_online/wellpappe/">https://www.cito.de/de/DE/boxline/rillzurichtungen/cito-abakus_online/wellpappe/</a>	Online Tool 1
Jürgen Jeurink GmbH & Co	<a href="https://www.jeurink.eu/technische-daten/kalkulator-wellpappe/">https://www.jeurink.eu/technische-daten/kalkulator-wellpappe/</a>	Online Tool 2
ManMat (C&K Extrusions Ltd.)	<a href="https://www.manmat.com/calculator">https://www.manmat.com/calculator</a>	Online Tool 3
Daiso Europ	<a href="https://www.daiso-net.com/en/products/diecut/g-tape_setting_calculation/corrugated-board">https://www.daiso-net.com/en/products/diecut/g-tape_setting_calculation/corrugated-board</a>	Online Tool 4

**Werkzeugbauer**

Um die Praxisrelevanz der durch die Online Tools ermittelten Werkzeugempfehlungen zu prüfen, wurden zusätzlich für alle 11 Wellpappen Rillempfehlungen bei den in Tabelle 4 genannten Werkzeugherstellern abgefragt.

Tabelle 4: Übersicht der befragten Werkzeughersteller

Anbieter	Website	Bezeichnung
Franz Berger Laser-Bandstahlschnitte GmbH & CO.KG	<a href="https://www.fb-lasertechnik.de">https://www.fb-lasertechnik.de</a>	Hersteller 1
Marbach Stanzformtechnik in Geyer GmbH	<a href="https://www.marbach.com/de">https://www.marbach.com/de</a>	Hersteller 2
HANS KOLB Wellpappe GmbH + Co. KG	<a href="http://www.kolb-wellpappe.com">www.kolb-wellpappe.com</a>	Hersteller 3
SCHELLING AG	<a href="http://www.birki.ch">www.birki.ch</a>	Hersteller 4

## 5 Materialauswahl und Aufstellung eines Prüfkonzeptes sowie grundlegende Materialcharakterisierung entsprechend des Prüfkonzeptes

### 5.1 Materialauswahl

#### Vorgehen

Für das vorliegende Forschungsvorhaben wurden in Zusammenarbeit der Forschungsstellen und 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 Materialverfügbarkeit identifiziert und beschafft. Sowohl die verwendeten Decken- und Wellenpapiere als auch die gefertigten Wellpappbogen wurden für die Prüfung der Materialeigenschaften zusammengestellt (siehe Abbildung 11). Ziel war es, Wellpappen zu beschaffen, die repräsentativ für die eingesetzten Materialien bei Primär-, Sekundär und Transportverpackungen stehen.

Bez.	Welle	Außendecke		Welle		Innendecke		Sorte DIN 55468-1
		Papier	g/m <sup>2</sup>	Papier	g/m <sup>2</sup>	Papier	g/m <sup>2</sup>	
<b>Hersteller 1</b>								
WP-01	B	Testliner White Top Light Coated	140	Recycled Fluting 1	100	Kraftliner White Royal 2000	135	1.02
WP-02	B	Testliner White Top 2000	135	Recycled Fluting 1	100	Testliner 3 Brown	120	1.02
<b>Hersteller 2</b>								
WP-03	B	weißgedeckter (top) Testliner, gestrichen	180	Halbzellstoff	125	Testliner Weiß	120	1.03
WP-04	B	Brauner Testliner 3	130	Wellenstoff	100	Brauner Testliner 3	130	1.10
WP-05	B	Weißer Top Testliner, gestrichen	140	Wellenstoff	100	Testliner Weiß	120	1.01
WP-06	E	Brauner Testliner 1	170	Wellenstoff	100	Brauner Testliner 1	170	
WP-07	EB*	Kraftliner weiß	120	Halbzellstoff	125	Kraftliner braun	170	
<b>Hersteller 3</b>								
WP-08	B	Testliner braun TL	135	Wellenstoff WE	135	Testliner braun TL	135	1.04
WP-09	B	Kraftliner braun KL	135	Wellenstoff WE	125	Testliner braun TL	135	1.04
WP-10	C	Testliner braun TL	135	Wellenstoff WE	90	Testliner braun TL	135	
WP-11	C	Testliner weiß CS	140	Fluting FL	150	Testliner braun TL	160	

\* Zwischendecke: TL 1 braun (135 g/m<sup>2</sup>)

\* 2.Welle: Halbzellstoff (125 g/m<sup>2</sup>)

Abbildung 11: Materialauswahl - Auflistung der Wellpappen und zugehörigen Wellpappenrohapiere

### 5.2 Prüfkonzept

#### Grundlagen

Neben der Materialauswahl erfolgte zudem die Versuchsplanung und gleichmäßige Aufteilung der Arbeiten, die im Rahmen der grundlegenden Materialprüfung in AP 2 bearbeitet wurden. Hierzu zählen Methoden der Basischarakterisierung (nach CEPI) sowie weitere für die Sorteneinstufung (nach DIN 55468-1) der Wellpappe relevante Methoden. Die ausgewählten Prüfverfahren sollten insbesondere der Ermittlung von Kennwerten dienen, die im Zusammenhang mit dem Materialverhalten beim Rillen von Wellpappe stehen (AP 4).

**Schema**



**5.3 Materialcharakterisierung der Wellpappenrohpa-piere**

**Flächenbezogene Masse**

Die Bestimmung der flächenbezogenen Masse erfolgte nach DIN EN ISO 536:2020-05 [6] mittels Analysenwaage der Fa. Sartorius mit einer Genauigkeit von 1/1000 g. Die Prüffläche betrug 100 cm<sup>2</sup>. Aus 20 Einzelmesswerten wurde ein Mittelwert in g/m<sup>2</sup> gebildet.

In Abbildung 12 sind hinsichtlich der flächenbezogenen Masse die jeweiligen Mittelwerte und Standardabweichungen für alle Wellpappenrohpa-piere und Klimastufen dargestellt. Mit dem Anstieg der Luftfeuchtigkeit von 50 % auf 80 % nimmt die flächenbezogene Masse zu. Trocknere Luft dagegen zeigt keine signifikanten Unterschiede.

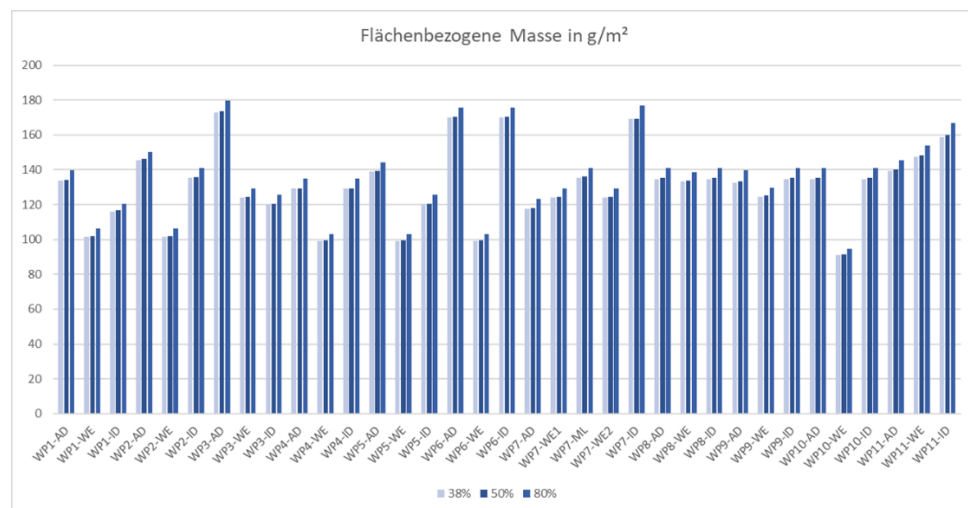


Abbildung 12: Messwerte für die flächenbezogene Masse der Wellpappenrohpa-piere nach DIN EN ISO 536 bei verschiedener Umgebungsfeuchtig-keit

**Dicke**

Die Bestimmung der Dicke erfolgte nach DIN EN ISO 534:2012-02 mittels Mik-rometer der Fa. Lorentzen & Wettre. Aus 20 Einzelwerten wurde ein Mittelwert gebildet. Mit dem Anstieg der Luftfeuchtigkeit von 50 % auf 80 % nimmt die Dicke zu. Trocknere Luft dagegen zeigt wie schon bei der flächenbezogenen

Masse keine signifikanten Unterschiede.

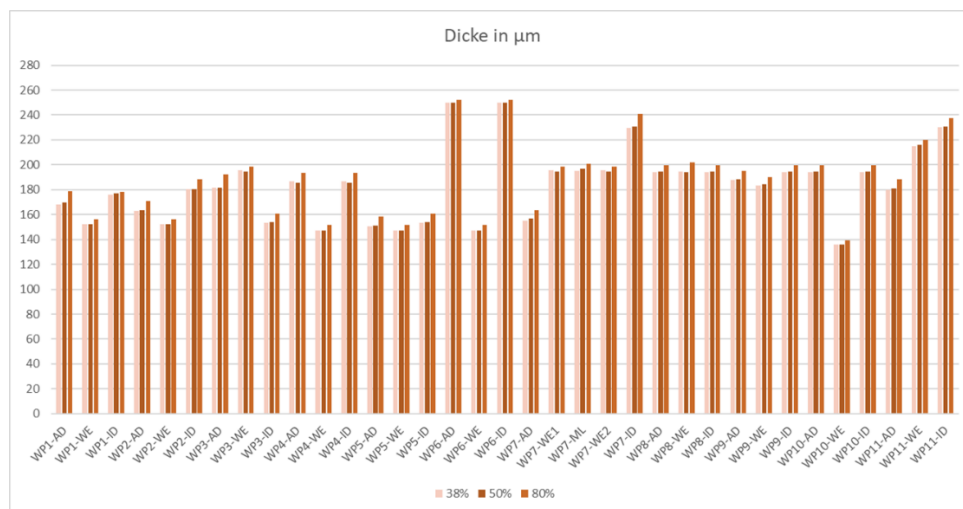
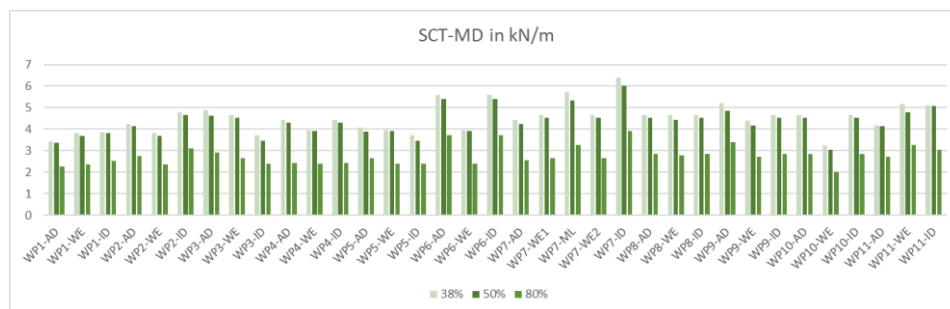


Abbildung 13: Dickenmesswerte der Rohpapiere nach DIN EN ISO 534 bei verschiedener Umgebungfeuchtigkeit

**Streifenstauchwiderstand (SCT)**

Die Bestimmung des Streifenstauchwiderstandes (engl. Short-span Compression Test, SCT) erfolgte nach DIN 54518:2022-01 mit dem Compression Strength Tester STFI 93381 3-1 der Fa. Lorentzen & Wettre. Der SCT ist definiert als die auf eine Probenbreite von 15 mm bezogene maximale Stauchbruchkraft in kN/m, welche die Probe einer festgelegten Stauchung in der Blattebene entgegensetzt. Es wurden 20 Materialstreifen in Längs- und Querrichtung geprüft und aus 20 Einzelmesswerten ein Mittelwert je Prüfrichtung berechnet.

Abbildung 14 zeigt die ermittelten SCT-Werte der einzelnen Wellpappenrohpa-piere in MD und CD bei unterschiedlichen Klimastufen. Mit der Änderung der Luftfeuchtigkeit von 50 % auf 80 % nimmt die Festigkeit ab. Änderungen von 38 % auf 50 % sind gering, aber meist abfallend.



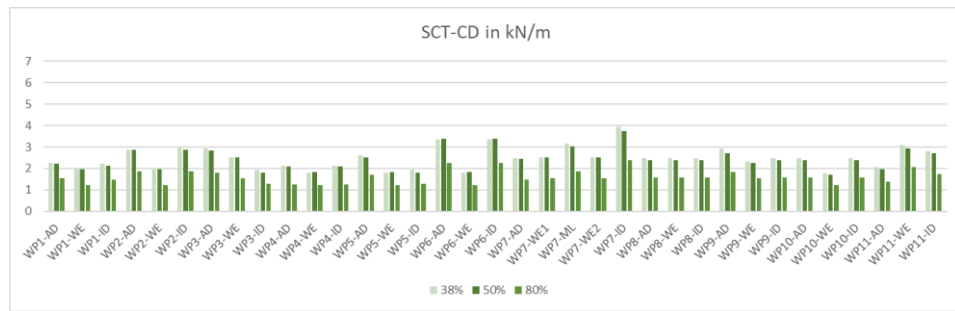


Abbildung 14: SCT-Werte nach DIN 54518:2022-01 der Wellpappenrohapiere in MD (o.) und CD (u.)

**Wasseraufnahme vermögen (Cobb)**

Die Wasseraufnahme wurde nach dem Cobb-Verfahren nach DIN EN ISO 535:2023-06 mit dem Saugfähigkeitstester sft 03pkte der Fa. IGT Testing Systems bestimmt. Der Cobb-Wert beschreibt die Menge an Wasser, die Papier oder Pappe innerhalb einer definierten Prüfzeit aufnimmt.

Es wurde die jeweilige Probenfläche benetzt und die Massedifferenz vor dem Kontakt mit deionisiertem Wasser und nach 60 s Kontaktzeit bestimmt. Das Ergebnis wurde in g/m<sup>2</sup> berechnet und angegeben, wobei ein niedriger Cobb-Wert bedeutet, dass Wasser nur schwer in das Material eindringt, ein hoher Wert, dass Wasser leichter eindringt. Es wurden 5 Einzelmessungen pro Seite durchgeführt und daraus ein Mittelwert errechnet.

In Abbildung 15 sind die Cobb-Werte jeweils für Ober- und Unterseite der Wellpappenrohapiere dargestellt. Muster ohne Wertangabe haben den Cobb-Test nach 60 s Wässerungszeit aufgrund von Durchdringung nicht bestanden.

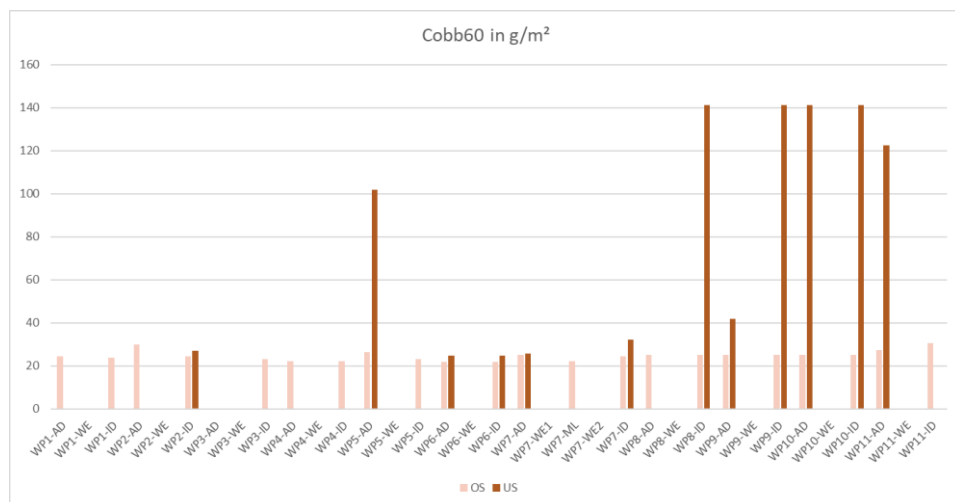


Abbildung 15: Cobb-Werte nach DIN EN ISO 535:2023-06 für Oberseite (OS) und Unterseite (US)

**Berstfestigkeit**

Die Bestimmung der Berstfestigkeit nach Mullen erfolgte nach DIN EN ISO 2759:2014-10 mit dem Berstdruckprüfgerät für Pappe Typ 1853401 der Frank-PTI GmbH. Die Berstfestigkeit gibt den Widerstand an, den eine

kreisförmig eingespannte Probe einem gleichmäßig ansteigenden Druck bis zum Bersten entgegengesetzt. Der Prüfdruck wird durch das Aufwölben einer Prüfmembran erzeugt. Der maximal erreichte Druck wird als Berstfestigkeit in kPa angegeben. Es wurden 10 Einzelmessungen auf jeder Prüfseite durchgeführt und aus insgesamt 20 Einzelwerten ein Mittelwert gebildet.

Abbildung 16 zeigt die Messwerte für die Berstfestigkeit der Wellpappenrohre. Es ist ersichtlich, dass mit Änderung der Luftfeuchtigkeit von 50 % auf 80 % die Festigkeit in der Regel abnimmt. Ausnahmen bilden u. a. die Muster WP2-ID und WP7-ID. Trockenere Luft (38 % r. F.) zeigt meist noch höhere Festigkeiten.

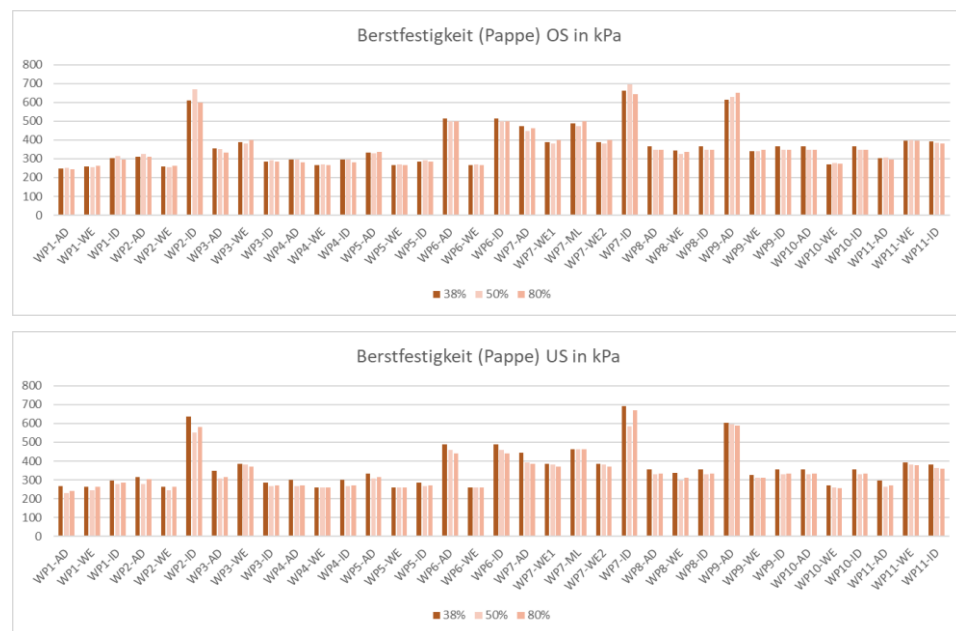


Abbildung 16: Berstfestigkeit nach DIN EN ISO 2759 für die Oberseite (o.) und Unterseite (u.) der Wellpappenrohre

## 5.4 Materialcharakterisierung der Wellpappen

**Flächenbezogene Masse** Die Bestimmung der flächenbezogenen Masse der Wellpappen erfolgte nach DIN EN ISO 536:2020-05. Aus 20 Einzelmesswerten wurde ein Mittelwert in  $\text{g}/\text{m}^2$  gebildet.

Die Abbildung 17 zeigt die normkonform ermittelten Messwerte für die flächenbezogenen Massen nach DIN EN ISO 536:2020-05 [6] der 11 untersuchten Wellpappen bei drei Klimastufen.



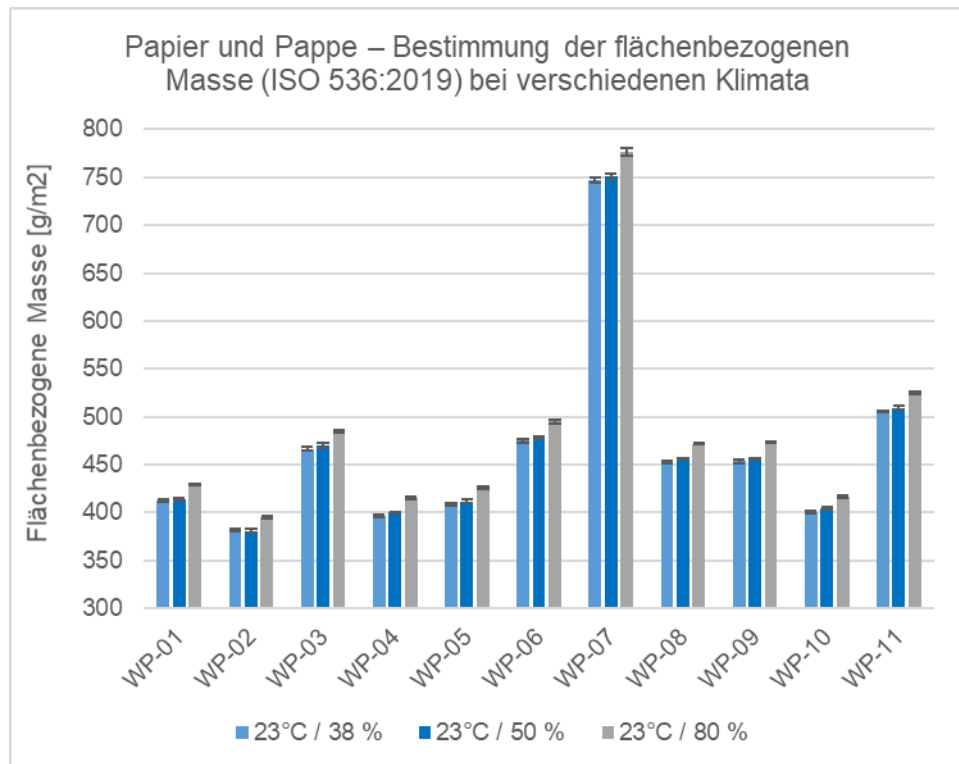


Abbildung 17: Messwerte für flächenbezogene Masse nach DIN EN ISO 536:2020-05

**Dicke**

Die Bestimmung der Dicken der Wellpappen erfolgte nach DIN EN ISO 534:2012. Aus 20 Einzelwerten wurde ein Mittelwert gebildet.

Die Abbildung 18 zeigt die normkonform ermittelten Messwerte für die Wellpappendicken nach DIN ISO 3034:2016-08 [7] der 11 untersuchten Wellpappen bei drei Klimastufen.

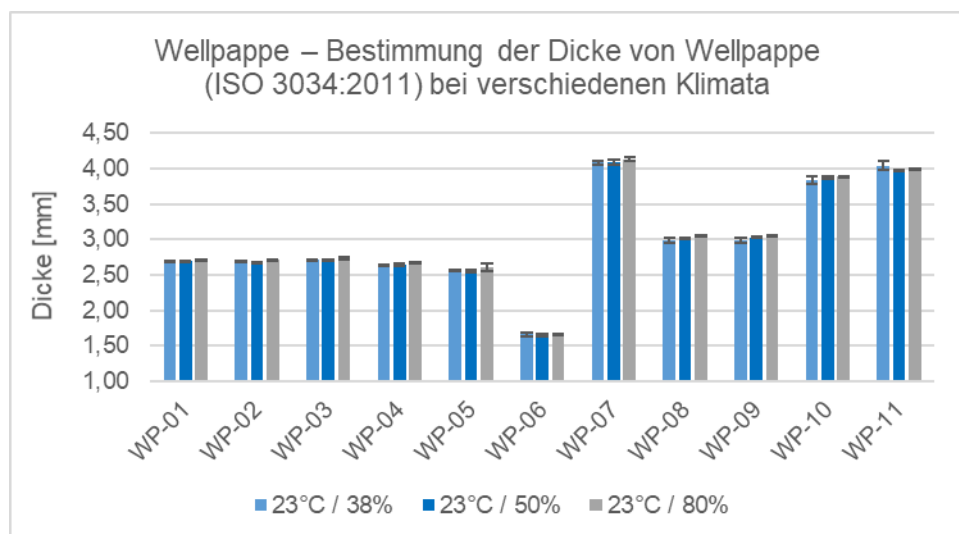


Abbildung 18: Dickenmesswerte nach DIN ISO 3034:2016-08

Bei allen Wellpappen waren die gemessenen Unterschiede der Wellpappendicke zwischen den einzelnen Klimastufen nicht signifikant.

### Kantenstauchwiderstand (ECT)

Der Kantenstauchwiderstand (ECT) wurde nach DIN EN ISO 3037:2013-12 geprüft und gibt den maximalen Widerstand in kN/m an, den eine Wellpappe einer in Richtung der stehenden Wellen wirkenden Kraft entgegensetzt. Es wurden 10 Einzelmessungen durchgeführt und daraus ein Mittelwert gebildet.

Die Abbildung 19 zeigt die normkonform ermittelten Messwerte für den Kantenstauchwiderstand nach DIN EN ISO 3037:2013-12 [8] der 11 untersuchten Wellpappen bei drei Klimastufen.

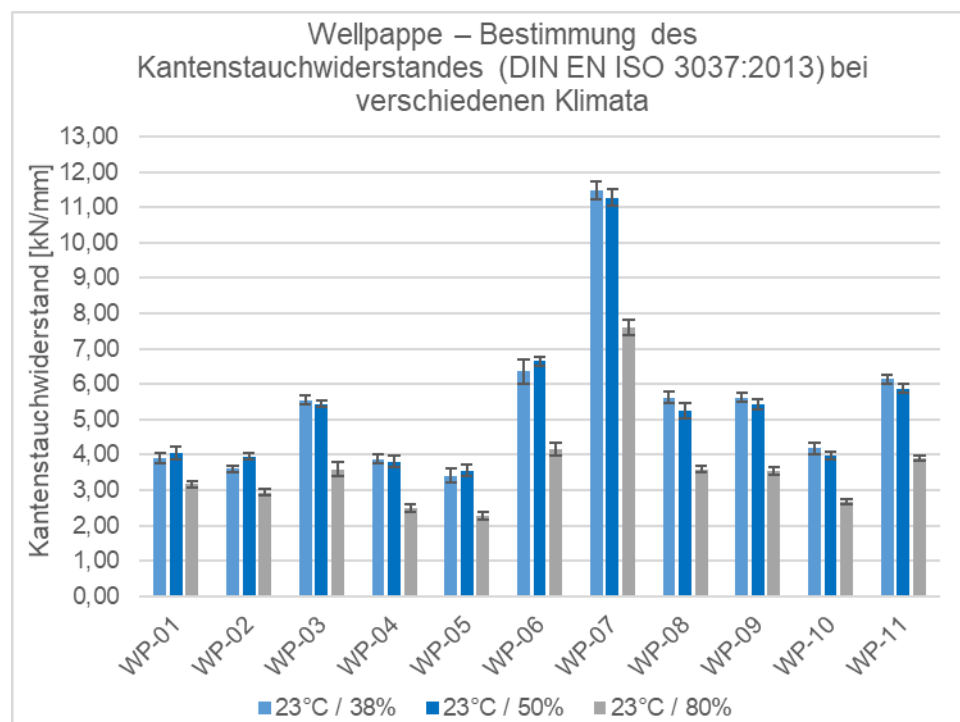


Abbildung 19: Messwerte für den Kantenstauchwiderstand nach DIN EN ISO 3037:2013-12

### Flachstauchwiderstand (FCT)

Die Ermittlung des Flachstauchwiderstands von Wellpappe (FCT) erfolgte nach DIN EN ISO 3035:2012-02. Der Flachstauchwiderstand gibt den maximalen Stauchdruck in kPa an, mit der eine einseitige bzw. einwellige Pappe senkrecht zur Wellenstruktur belastet werden kann, bevor die Struktur vollständig kollabiert. Im Druckversuch wurden 10 Proben mit einer Grundfläche von 100 cm<sup>2</sup> bei einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit von 12,5 mm/min geprüft. Aus den 10 Einzelmessungen wurde ein Mittelwert berechnet.

Die Abbildung 20 zeigt die normkonform ermittelten Messwerte für den Flachstauchwiderstand [9] der 11 untersuchten Wellpappen bei drei Klimastufen.

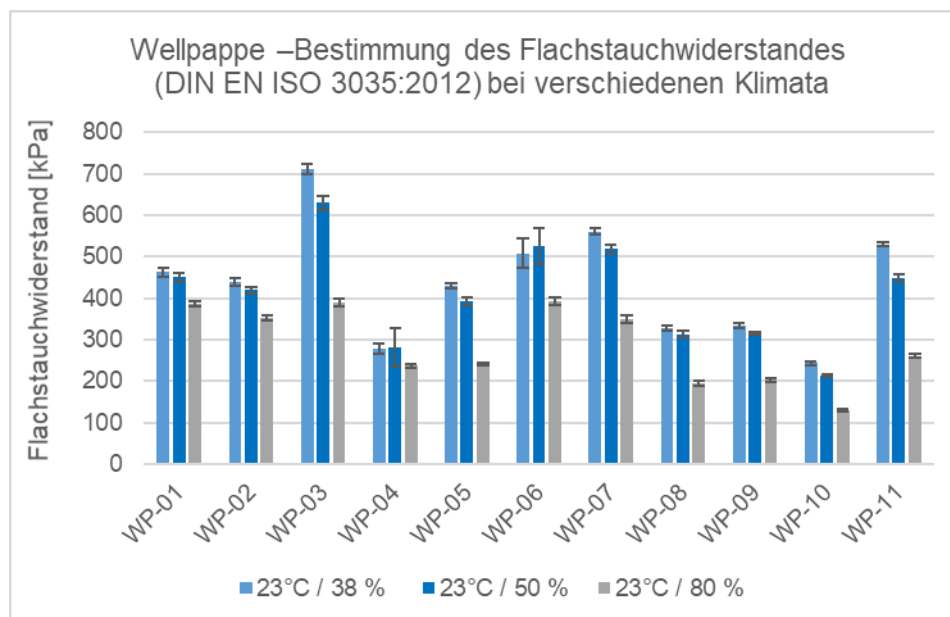


Abbildung 20: Messwerte für den Flachstauchwiderstand nach DIN EN ISO 3035:2012-02

### Biegesteifigkeit (Balkenmethode)

Die Bestimmung der Biegesteifigkeit nach der Balkenmethode (4-Punkt-Verfahren) wurde nach DIN 53121:2014-08 durchgeführt. Dazu wurde ein 4-Punkt-Biegesteifigkeitsprüfgerät (Bending Stiffness Tester) verwendet. Die Messungen erfolgten ausschließlich im elastischen Bereich. Die hierfür notwendigen Belastungsgewichte wurden in einem Vorversuch ermittelt. Es wurden 10 Messungen in Maschinenlauf- und 10 Messungen in Querrichtung durchgeführt. Aus 10 Einzelmessungen wurde je ein Mittelwert in Nm errechnet.

Die Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen die normkonform ermittelten Messwerte für die Biegesteifigkeit [10] der 11 untersuchten Wellpappen bei drei Klimastufen.

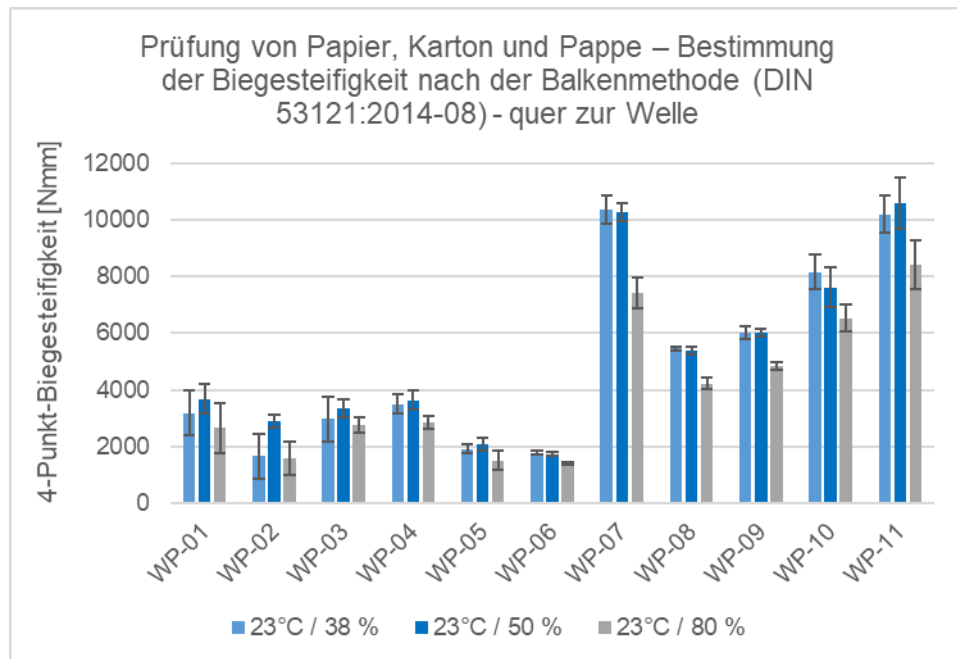


Abbildung 21: Messwerte für die Biegesteifigkeit quer zur Welle nach DIN 53121:2014-08

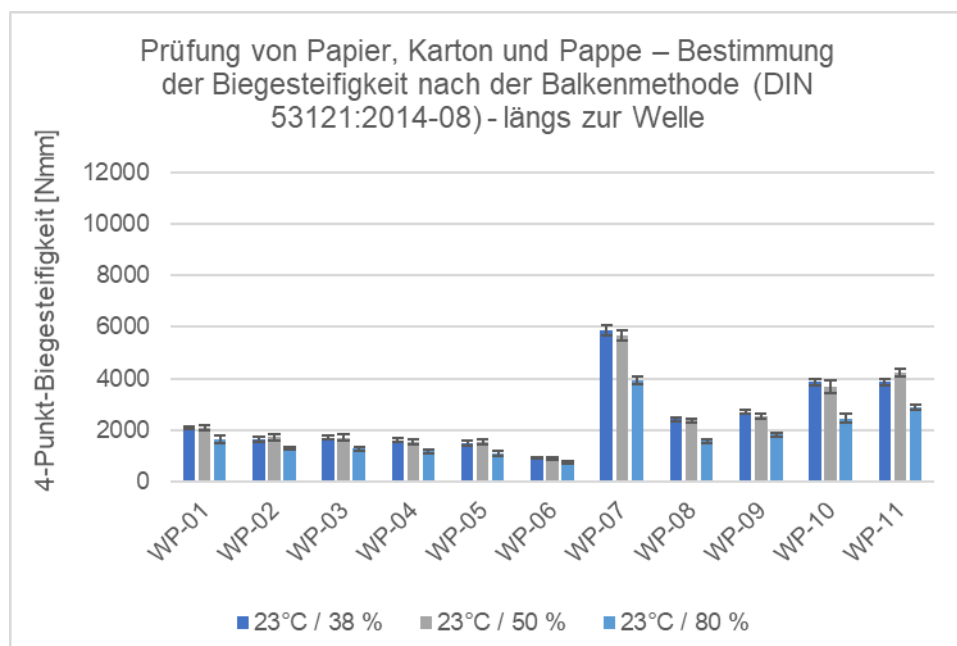


Abbildung 22: Messwerte für die Biegesteifigkeit längs zur Welle nach DIN 53121:2014-08

### Berstfestigkeit

Die Bestimmung der Berstfestigkeit nach Mullen erfolgte nach DIN EN ISO 2759:2014-10 mit einem Berstdruckprüfgerät für Pappe. Die Berstfestigkeit gibt den Widerstand an, den eine kreisförmig eingespannte Probe einem gleichmäßig ansteigenden Druck bis zum Bersten entgegensetzt. Der Prüfdruck wird durch das Aufwölben einer Prüfmembran erzeugt. Der maximal erreichte Druck wird als Berstfestigkeit in kPa angegeben. Es wurden 10 Einzelmessungen auf jeder Prüfseite durchgeführt und aus insgesamt 20 Einzelwerten ein Mittelwert gebildet.

Die Abbildung 23 zeigt die normkonform ermittelten Messwerte für die Berstfestigkeit [11] der 11 untersuchten Wellpappen bei drei Klimastufen.

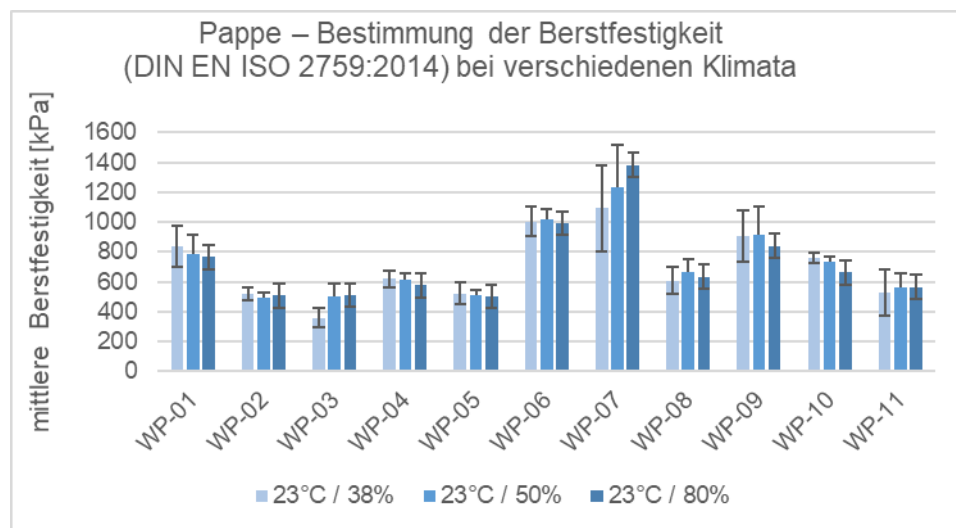


Abbildung 23: Messwerte für die Berstfestigkeit nach DIN EN ISO 2759:2014-10

### Durchstoßarbeit

Die Bestimmung der Durchstoßarbeit erfolgte nach DIN 53142-1:2014-12 an einem Durchstoßprüfgerät mit Pendelschlagwerk. Die Durchstoßarbeit gibt die verbrauchte Energie an, die zum Durchstoßen von Wellpappe mit einem definierten, pyramidenförmigen Durchstoßkörper aufgewendet wird. Der gemessene Wert wird in J angegeben.

Es wurden 10 Proben jeweils gegen die Ober- und Unterseite geprüft, davon 5 Proben je Prüfseite mit der Laufrichtung parallel zur Drehachse des Pendels und 5 Proben mit der Laufrichtung im rechten Winkel zur Drehachse des Pendels. Aus insgesamt 20 Einzelwerten wurde ein Mittelwert errechnet.

Die Abbildung 24 und Abbildung 25 zeigen die normkonform ermittelten Messwerte für die Durchstoßarbeit [12] der 11 untersuchten Wellpappen bei drei Klimastufen.

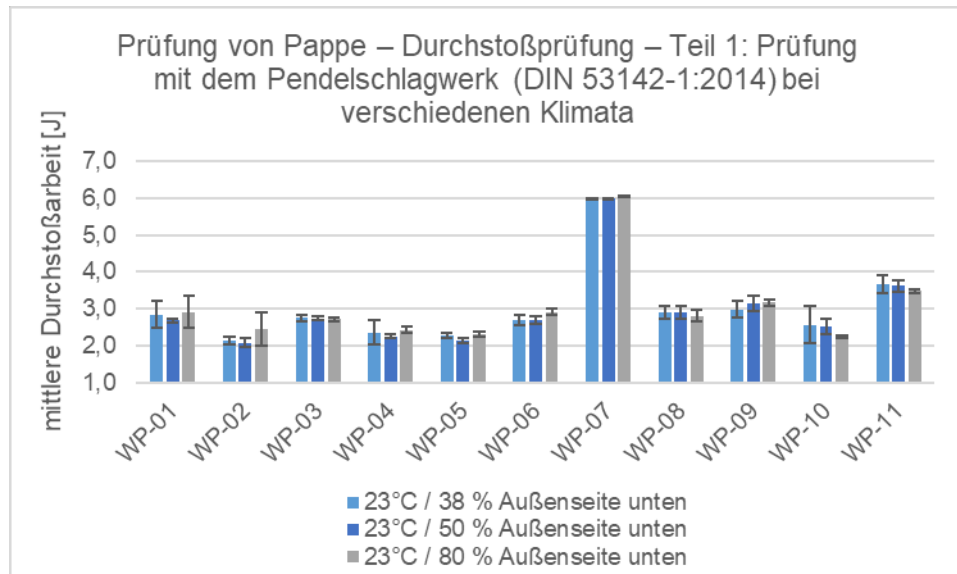


Abbildung 24: Messwerte der Durchstoßprüfung für die Außendecke nach DIN 53142-1:2014-12

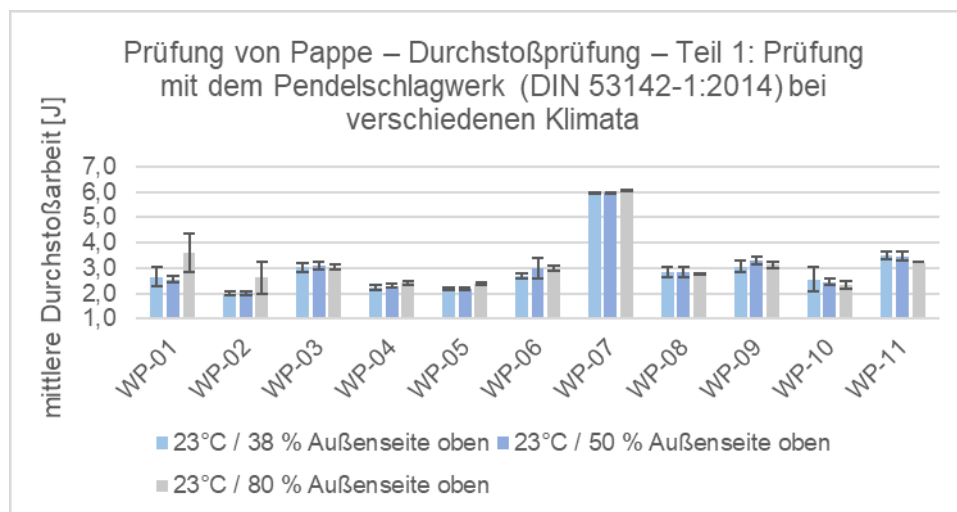


Abbildung 25: Messwerte der Durchstoßprüfung für die Innendecke nach DIN 53142-1:2014-12

**Pin-Adhesion-Test (PAT)**

Die Haftfestigkeit der Verklebung der Wellpappe wurde anhand der Stiftmethode in Übereinstimmung mit der FEFCO-Methode Nr. 11 bestimmt. Bei der Haftfestigkeit der Verklebung (PAT) wird die reine Kraft zum Trennen der Verklebung in N sowie die daraus berechnete Haftfestigkeit PAT in N/m angegeben. Nach FEFCO Nr. 11 erfolgt die Umrechnung entsprechend der nachfolgenden Formel:

$$PAT = F/L$$

PAT = Haftfestigkeit der Verklebung in N/m

F = Kraft zum Trennen der Klebverbindung in N

L = Gesamtlänge der Klebelinien in m

Abbildung 26 zeigt die normkonform ermittelten Messwerte für die PAT-Tests an den 11 untersuchten Wellpappen bei drei Klimastufen. Mit der Änderung der Luftfeuchtigkeit von 50 % auf 80 % nimmt die Festigkeit der Verklebung ab. Ausnahmen bilden die Muster WP1 AD-WE und WP2 AD-WE.

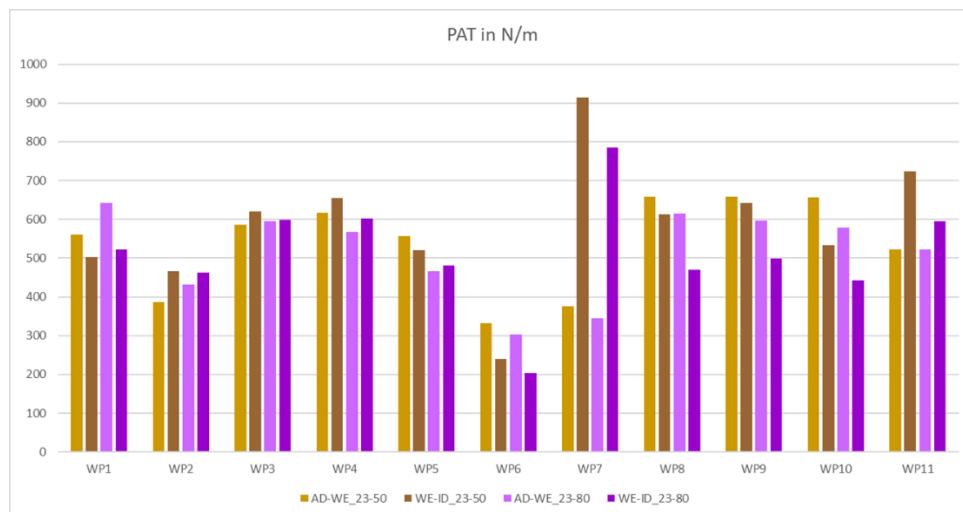


Abbildung 26: PAT-Messwerte nach FEFCO Nr. 11

**Knickwiderstand**

Die Messungen wurden an einer Universalprüfmaschine mit eingebauter 3-Punkt-Biegesteifigkeitsprüfvorrichtung nach DIN 54608 durchgeführt. Die Probenmaße, der Durchmesser des Druckkopfes und die Messlänge richteten sich nach den Wellenprofilen der zu prüfenden Wellpappen. Aus den 10 Einzelmesswerten je Seite und Richtung wurde die Knickkraft in N und der Knickwiderstand in Nmm berechnet.

In Abbildung 27 und Abbildung 28 sind die Knickwiderstände der Wellpappen jeweils für Ober- und Unterseite in MD und CD dargestellt. Mit der Änderung der Luftfeuchtigkeit von 50 % auf 80 % nimmt die Festigkeit ab.

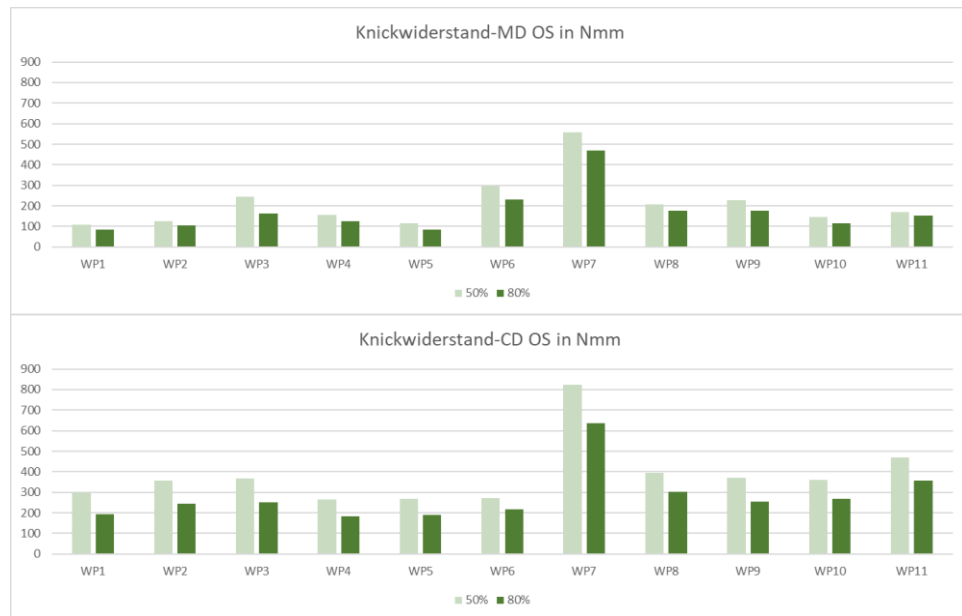


Abbildung 27: Knickwiderstand der Oberseite der Wellpappen in MD (o.) und CD (u.)

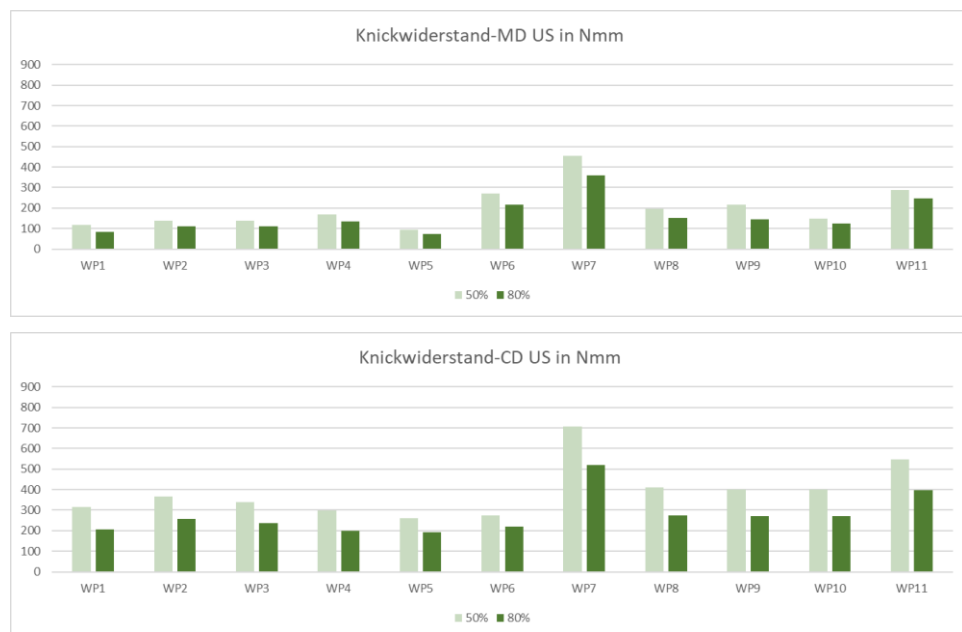


Abbildung 28: Knickwiderstand der Unterseite der Wellpappen in MD (o.) und CD (u.)

**Zusatz**

Zusätzlich zu den oben dargestellten Prüfungen wurden die Flachstachwiderstände an den labormäßig gewellten Wellenpapieren nach DIN EN ISO 7263-1:2019-04 ermittelt. Hierfür ergaben sich allerdings keine verwertbaren Ergebnisse, da bis auf ein Muster alle Kipper aufwiesen.



## 5.5 Sorteneinstufung nach DIN 55468-1

**Sorteneinstufung** Basierend auf den erhobenen technischen Werten für den Kantenstauchwiderstand, die Durchstoßarbeit und die Berstfestigkeit erfolgt normkonform [13] die Einordnung der Wellpappen in Sorten.

Tabelle 5: Sorteneinstufung der untersuchten Wellpappen nach DIN 55468-1

Wellpappe	Sorte nach DIN 55468-1
WP-01	`1.02
WP-02	`1.02
WP-03	`1.03
WP-04	`1.10
WP-05	`1.01
WP-06	`1.05
WP-07	`2.06
WP-08	`1.04
WP-09	`1.04
WP-10	`1.02
WP-11	`1.04

## 5.6 Zusammenfassung der Ergebnisse der Materialcharakterisierung – Fazit

**Kennwertdatenbank** Als Basis für die Korrelation zu den Qualitätsparametern der Rillung wurde ein umfangreicher Datensatz sowohl an den Wellpappen als auch ihren jeweiligen Rohpapieren generiert, welcher sich insbesondere aus in der Praxis angewendeten Standardprüfmethoden ergibt. Dies stellt sicher, dass in einem späteren Leitfaden zur Analyse der Materialien nur Messmethoden Einzug halten, die genormt und dadurch in der Industrie anerkannt und bekannt sind. Die Messungen haben zudem die Klimaabhängigkeit des Werkstoffs nachgewiesen, mit steigenden Umgebungsfeuchten gehen in der Regel sinkende Festigkeitswerte einher.

## 6 Konzeption und Umsetzung der Rillbarkeitsprüfung sowie Realversuche zur Rillbarkeit und zur Erstellung optimierter Rillungen

### 6.1 Technische Qualität der Rillungen

Normkonform kann die Beurteilung der technischen Qualität von Rillungen sowohl für Faltschachtelkarton [14] als auch für Wellpappe [1] messtechnisch über die Bestimmung des Faltfaktors erfolgen.

Im Gegensatz zur messtechnischen Ermittlung von Kennwerten durch die Normverfahren erfolgt in der Praxis hauptsächlich eine Bewertung analog dem VDW Katalog nach dem Prüfmerkmal 3.2 / Laufnummer 5. Dieses beschreibt die „Ausbildung der Rillung“ mit der Unterteilung „außen geplatzt“ und „innen geplatzt“ sowie einer Bewertung in zwei Dimensionen (ja/nein) [4].

#### DIN 19304:2021-04

Für Wellpappe existiert mit der DIN 19304:2021-04 seit 2021 eine Leitlinie, die Verfahren und Randbedingungen für die messtechnische Beurteilung der Qualität von Rillungen festlegt (siehe auch Kap. 5). Diese Leitlinie ist für flachliegende, gerillte Proben aus Wellpappe anzuwenden. Die Beurteilung soll über die Bestimmung des Faltfaktors  $f$  oder des Biegegewiderstandes oder über eine Interpretation der grafischen Darstellung des Kraftmaximums in Abhängigkeit vom Biegewinkel  $\alpha$  erfolgen.

#### Parameter

Normkonform erfolgte die Prüfung der technischen Qualität der Rillung an Wellpappe durch die Beurteilung folgender Messgrößen [1]:

**Biegegewiderstand** – Kennwert berechnet aus Biegekraft ( $F$ ) bezogen auf Probenbreite, anzugeben in mN/mm.

**Biegekraft ( $F$ )** – Umformkraft, die während des Falt-/Biegevorganges von flachliegenden, gerillten Proben aus Wellpappe auftritt, anzugeben in mN.

**Faltfaktor ( $f$ )** – Schwächung der Wellpappe in der Rillzone.

$$f = W_g / W_u \times 100$$

$W_g$  = Arbeit einer gerillten Probe

$W_u$  = Arbeit einer ungerillten Probe

**Biegewinkel ( $\alpha$ )** – Winkel, um den die Probe in der Rillung gebogen wird, anzugeben in °.

**erstes Biegekraftmaximum bzw. erster Peak ( $F_g$ )** – Kraft, bei der die Biegekraft  $F$  das erste Maximum erreicht, in N.

**Biegearbeit ( $W$ )** – berechnete Fläche unter der Kurve bei der Biegeprüfung von 0° bis einschließlich 90°, anzugeben in Nmm.

Die Skala in Abbildung 29 verdeutlicht die Bedeutung ermittelter Faltfaktoren. Der Skalenwert 100 % entspricht einem nicht veränderten Biegewert einer ungerillten Probe. Ein Skalenwert von 0 % entspricht einem »theoretisch« „perfektem“ Scharnier«, das praktisch jedoch nicht erreichbar ist. Angaben zu

empfohlenen Faltfaktoren für Wellpappe konnten in der Literatur nicht gefunden werden.

optimale Faltfaktoren für Rillung längs bzw. quer zum Wellenlauf nicht definiert

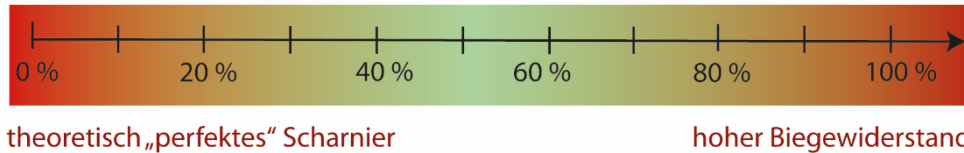


Abbildung 29: Bewertung ermittelter Faltfaktorenwerte berechnet nach DIN 19304

### Bewertung

Bei der Fragestellung, welche Parameter zu einer fundierten Qualitätsbeurteilung von Rillungen herangezogen werden können, erfolgte eine intensive Auseinandersetzung mit der DIN-Norm 19304:2021-04 für Wellpappe und der DIN-Norm 55437- 3:2021-12 für Faltschachtelkarton. Dabei wurden Unterschiede zwischen den beiden Normen deutlich, die nicht nachvollziehbar sind und den Anwender verwirren. Diese betreffen die drei Bereiche:

1. Begriffe und Definitionen
2. Kenngrößen und Berechnungen
3. Inhaltliche Fragen
  - Versuchsdurchführung
  - Berechnung des Faltfaktors
  - Qualitätsbewertung

Trotz der beschriebenen Unklarheiten wurden an den untersuchten Materialien die bei der Biegeprüfung von der Norm geforderten Parameter erhoben.

### VDW-Katalog

Das Prüfkriterium Laufnummer 4 „Positionierung der Rillung“ korrespondiert mit der Messgröße Biege widerstand. Wird die Prüfmethode „Rillung knickt nicht an der vorgesehenen Stelle“ mit ja bewertet, ist dies gleichbedeutend mit hohen Biege werten und einem hohen Faltfaktor. (DIN 19304)

### Biegeprüfung

Geräte zur Biegeprüfung nach DIN-Norm sind in wellpappeverarbeitenden Unternehmen nicht Standard. Im Produktionsumfeld erfolgt die Bewertung des Biege widerstandes nach dem Stanzprozess durch Bewertung des Prüfkriteriums Laufnummer 4 nach VDW-Katalog.

### Messmethode

Von den beschriebenen Messmethoden wurde das Messsystem 1.1 eingesetzt und die ermittelten Parameter ausgewertet. Dieses Messsystem bietet den großen Vorteil eines in Bezug auf die Materialdicke einstellbaren Drehpunktes. So lag der Drehpunkt bei den Biegeversuchen aller Materialien (unabhängig von der Materialdicke) konstant in der Biegestelle an der Außenseite des Deckenliners. Nachteilig an dem an der HTWK Leipzig verfügbaren Messsystem 1.1 ist eine alte Softwareversion, die nur eine sehr eingeschränkte Ausgabe von

Kenngrößen und Messkurven ermöglicht. Basierend auf den vom Messsystem verfügbaren ASCII-Daten war die Programmierung einer Auswertsoftware notwendig. Der dadurch entstandene sehr hohe zeitliche Aufwand für die Datenauswertung war bei Erstellung des Projektantrages nicht vorhersehbar.

## 6.2 Geometrie der Rille und der Wulst

Durch die Erfassung der geometrischen Kenngrößen der im Material ausgeformten Biegestelle sollte die Möglichkeit geprüft werden, Zusammenhänge zwischen gewählten Werkzeugparametern und Rillergebnissen besser belegen zu können. Ziel war die Erfassung der Abformgenauigkeit der Rillwerkzeugparameter im Material Wellpappe.

### Hohlrillen

Unterschieden wird das Hohlrillen vom Vollrillen durch die zum Einsatz kommenden Rillwerkzeuge. Beim Hohlrillen bereitet ein in die Rillnut der Gegenzurichtung arbeitendes Messer die Biegestelle vor. Die Biegestelle ist im Material durch das Vorhandensein einer Rille und einer Wulst gekennzeichnet.

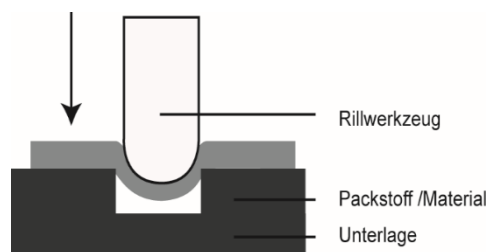


Abbildung 30: Prinzip des Hohlrillens

### Parameter

Basierend auf den vorgestellten Messmethoden wurden für die Bewertung der Abformgenauigkeit der Rille folgende in Abbildung 36 dargestellte Parameter unter Verwendung des Messsystems 2.2 ermittelt.

Parameter Rille [3]

Rillentiefe  $D$  [mm]

Rillbreite ( $W$ ) [mm]

Rillbreite 2 ( $W2$ ) [mm]

Symmetrie  $S$  [mm]

Kavität  $C$  [mm<sup>2</sup>]

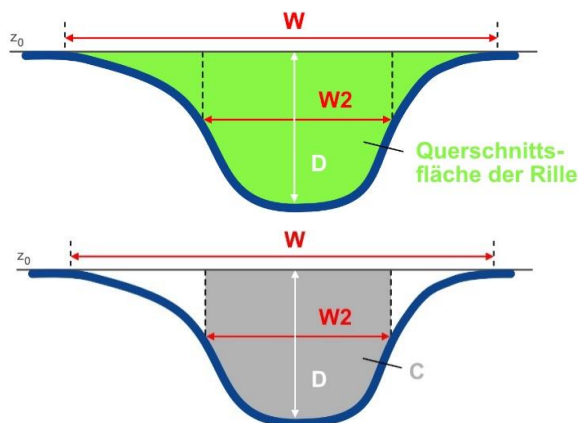


Abbildung 31: Messparameter Messsystem 2.2

### Abformgenauigkeit im Material

Mit dem Messsystem 2.2 existiert für Wellpappe ein Gerät, das im Produktionsumfeld die Ermittlung, Bewertung und Kontrolle von Parametern zur Abformgenauigkeit nach dem Stanzprozess ermöglicht. Der Einsatz dieses Geräts ist in wellpappeverarbeitenden Unternehmen nicht Standard.

---

<b>Messmethode</b>	Von den zuvor beschriebenen Messsystemen wurden das Messsystem 2.2 eingesetzt und die ermittelten Parameter ausgewertet. Vorteile des Messsystems sind die einfache und schnelle Ermittlung der Kennwerte. Das Gerät ist im Vergleich zu anderen Messsystemen kostengünstig in der Anschaffung und seine Anwendung im Produktionsumfeld erlaubte den Rückschluss einer Relevanz der verfügbaren Kenngrößen. Ein weiterer Vorteil ist die automatisierte, messtechnische Auswertung der Kenngrößen, womit das händische Setzen von Referenzpunkten, wie für Messsystem 2.1 nötig, entfällt.
--------------------	--

---

<b>Bewertung</b>	Die Messungen mit Messsystem 2.2 zeigen, dass die Abformgenauigkeit der Werkzeugparameter im Material nicht analog abbildbar ist. Aufgrund der Parameteranzahl bei Werkzeugen zum Hohlrillen, der Materialinhomogenität und dem Rückstellverhalten nach dem Rillprozess sind die ermittelten Werte nicht als Absolutwerte zu betrachten. Ermittelte Relationen und Unterschiede zeigen Tendenzen und Trends, die in das Modell (AP 7) einfließen.
------------------	---

---

### 6.3 Schadlosigkeit der Rillung

Für eine umfassende Bewertung der hergestellten Rille ist das Biegeverhalten (Biegegegenstand) und das Aussehen der hergestellten Rille (Beschädigungen, geometrische Form) zu beurteilen. Im Gegensatz zu Faltschachtelkarton existiert für Wellpappe keine Normvorgabe zur Bewertung des Aussehens einer Rillung.

---

<b>VDW-Katalog</b>	Unter der Laufnummer 5 „Ausbildung der Rillung“ erfolgt eine Bewertung nach der Prüfmethode Sichtprüfung mit der Unterteilung „außen geplatzt“ und „innen geplatzt“ und einer Bewertung in zwei Dimensionen (ja/nein).
--------------------	--

---

<b>Parameter</b>	Folgende Parameter des VDW-Katalogs wurden für die visuelle Bewertung übernommen und in ihrer Bewertungsskala von Nominalskala zu Ordinalskala erweitert.
------------------	---

#### außen geplatzt

<b>Note</b>	<b>Beschreibung</b>
0	Kein Riss
2a	Riss Außendecke in der Wulst – durchgehend
2b	Riss Außendecke in der Wulst – teilweise
2c	Riss Außendecke neben der Wulst – durchgehend
2d	Riss Außendecke neben der Wulst – teilweise.
3a	Riss Innendecke senkrecht zur Rillung
3b	Riss Außendecke senkrecht zur Rillung
4a	Position Biegestelle
5a	Mikrorisse Außendecke
7a	Außendecke – teilweise geschnitten
7b	Außendecke – durchgehend geschnitten

---

---

**innen geplatzt**

Note	Beschreibung
0	Kein Riss
1a	Riss Innendecke in der Rille – durchgehend
1b	Riss Innendecke in der Rille – teilweise
1c	Riss Innendecke neben der Rille – durchgehend
1d	Riss Innendecke neben der Rille – teilweise.
6a	Innendecke – teilweise geschnitten
6b	Innendecke – durchgehend geschnitten
4a	Position Biegestelle
8a	Falten innen

Zusätzlich wurde der Parameter Fehleranteil eingeführt.

$$\text{Fehleranteil (FA)} = (\text{Anzahl fehlerhafter Proben}) / \text{Probenumfang} * 100 \%$$

Anhand der beschriebenen Messverfahren wurde zusätzlich geprüft, ob aussagekräftige Parameter aus der Bildbewertung (Messmethode 3.2) generiert werden können.

---

**Bewertung**

Insbesondere für die Datenerhebung im AP 5 sind zweidimensionale Bewertungen (Bewertung nach VDW-Katalog) nicht zielführend. Durch Erweiterung der Nominalskala der Bewertungskriterien des VDW-Katalogs hin zu einer Ordinalskala sind Aussagen über Gleichheit/Ungleichheit von Merkmalsausprägungen sowie Ordnungsrelationen (größer – kleiner) darstellbar. Das Maß der Unterschiede wird dabei nicht erhoben [15].

Eine messtechnische Erfassung bzw. Bewertung der Schadlosgkeit der Rillung in Anlehnung an Methode 3.2 war vielversprechend. Jedoch lag kein geeigneter Auswertungsalgorithmus für die aufgenommenen Probenbilder vor. Der zeitliche Aufwand für die Entwicklung eines geeigneten Auswertungsprogramms hätte das Ziel des Forschungsprojekts gefährdet. Aus diesem Grund konnte Methode 3.2 nicht genutzt werden.

---

**Sichtbare  
Materialschädigungen**

Im Produktionsumfeld erfolgt die Bewertung von sichtbaren Materialschädigungen nach dem Stanzprozess durch Bewertung des Prüfkriteriums Laufnummer 5 nach VDW-Katalog. Geräte zur Ermittlung und Quantifizierung der sichtbaren Materialschädigungen und deren Ausprägung sind für Wellpappverarbeitenden Unternehmen nicht verfügbar.

---

**Messmethode**

Von den beschriebenen Messmethoden wurde die visuelle Bewertung eingesetzt und ausgewertet. Die für die Modellierung (AP 7) vorteilhafte Rissbewertung mit Verhältnisskalen/-werten konnte wegen der fehlenden Auswertsoftware für Methode 3.2 nicht angewendet werden. Eine Entwicklung ist möglich, aber außerhalb der Modellierungsaufgabe wären die ermittelten Daten (z. B. in Form eines prozentualen Anteils des Risses an der Prüffläche) nicht relevant für eine Qualitätsbewertung in der Produktionspraxis, da hier allein das Vorhandensein einer Schädigung relevant ist (ja/nein-Bewertung).

---

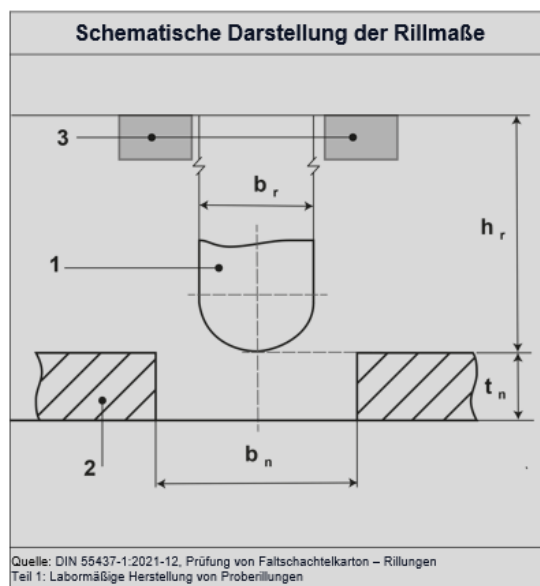
### 6.4 Erstellung von Spezifikationen für die Auslegung der Rillwerkzeuge in Abhängigkeit zum Rillverfahren

Die Konstruktion und die Leistungsmerkmale des Rillwerkzeugs spielen eine entscheidende Rolle bei der Erzielung optimaler Rillergebnisse. Alle Parameter müssen dabei präzise aufeinander abgestimmt werden. Um eine ideale Rillung zu gewährleisten, werden Werkzeuge benötigt, deren Rillgeometrie auf die Materialdaten der Wellpappe abgestimmt ist.

#### Werkzeugseitige Rillgeometrien

Mit den Begriffsbestimmungen der DIN 55437-1:2021-12 existiert für Rillwerkzeuge für den Werkstoff Faltschachtelkarton eine standardisierte Terminologie. Für Wellpappe liegen derzeit keine Vorgaben (Begriffsdefinition und Berechnungsformeln) des Deutschen Institut für Normung e. V. vor. Orientiert an der DIN 55437-1:2021-12 erfolgte eine Einordnung der in der Praxis für Wellpappe verwendeten Begrifflichkeiten für Rillwerkzeuge.

Die nachfolgende Abbildung 32 zeigt die beim Hohlrillen mit Flachbettwerkzeugen vorherrschende Geometrie mit den entsprechenden Einflussgrößen.



#### Riller (1)

- **Rillhöhe (hr) [mm]**  
Rillmesserhöhe
- **Rillerdicke (br) [pt oder mm]**  
Rillmesserbreite
- **Profilform Riller**

#### Gegenzurichtung (2)

- **Rillnutbreite (bn) [mm]**  
Gegenzurichtung Kanalbreite
- **Rillnuttiefe (tn) [mm]**  
Gegenzurichtung Kanaltiefe
- **Art der Gegenzurichtung**  
Pertinax, Kanalfertignuten,  
Stanzrillplatten, Härte

Abbildung 32: Rillgeometrie Hohlrillen mit Flachbettwerkzeugen [16]

Werkzeugseitig wird diese Geometrie wie in Abbildung 33 dargestellt umgesetzt. Die Rillung erfolgt mithilfe des Rillers (auch als Rillmesser oder Rilllinie bezeichnet) und einer Nut in einem dünnen und harten Werkstoff, der als Gegenzurichtung (auch Rillmatrize oder Gegenstempel) bezeichnet wird. Die Rilllinien sind gemeinsam mit den Schneidlinien in einer Trägerplatte montiert. Um den Rillprozess zu unterstützen, werden zusätzlich Auswerfmaterialien (Gummierung) verwendet. Diese sind ebenfalls auf der Trägerplatte befestigt. Auf dem Gegenstanzblech befindet sich die entsprechende Gegenzurichtung.

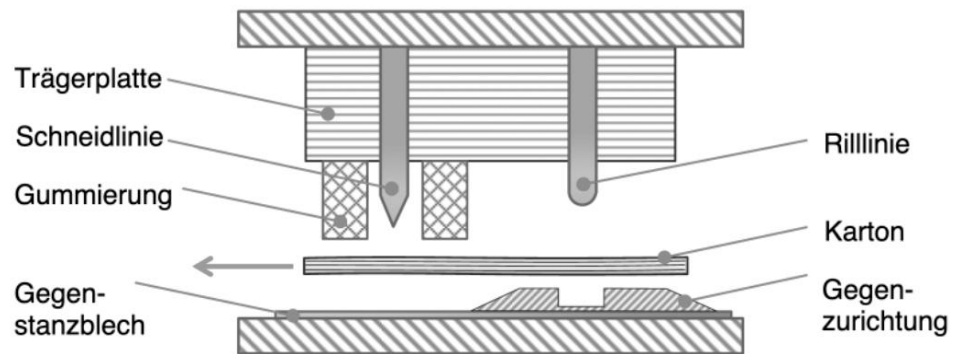


Abbildung 33: Werkzeuggeometrie und -komponenten [17]

In Abhängigkeit von den Materialdaten der Wellpappe wird in der Praxis hauptsächlich Einfluss auf die in Abbildung 32 dargestellten, den Riller beschreibenden Parameter (Rillerhöhe, Rillerbreite) genommen; bei der Gegenzurichtung sind es hauptsächlich die Parameter Rillnutbreite und Rillnuttiefe. Über Parameter wie Material, Härte und Geometrie kann eine weitere Differenzierung der Gegenzurichtung erfolgen. Da zunehmend verschiedenste Gummierungen der Rilllinien im Werkzeugbau eingesetzt werden, empfiehlt es sich, auch diesen Parameter durch Angaben wie Breite, Höhe und Art (Typ, Profilform, Material, Härte) näher zu spezifizieren.

## Materialdaten

Als Grundlage für die Dimensionierung des Rillwerkzeugs wurden die folgenden Materialdaten (inklusive Angaben zur Ermittlung/Toleranzen) ermittelt.

### 1. Komprimierte Materialdicke

### 2. Wellenart

- nach DIN 55468-1:2021-01  
Packstoffe – Wellpappe – Teil 1: Anforderungen, Prüfung

### 3. Papierqualitäten

- Capi ContainerBoard 2022  
Liste der Europäischen Wellpappen Papiere

Die durchgeführte Recherche ergab, dass sowohl für Online Tools als auch für Rillwerkzeughersteller die komprimierte Materialdicke der Wellpappe für die Ermittlung von Rillempfehlungen herangezogen wird. Im Rahmen unserer Recherche zeigte sich jedoch, dass die Ermittlung der komprimierten Materialdicke mit unterschiedlichen Methoden erfolgt.

#### Variante 1

Kompression der Wellpappe durch „Walzen“ mit Hilfe eines Stifts auf einer festen Unterlage, anschließend Messen mit Messschieber

#### Variante 2

Errechnet aus Einzelblattstärken

#### Variante 3

Errechnet aus flächenbezogener Masse der Einzelpapiere mal herstellereigenem Faktor



Die Abbildung 39 zeigt die nach den drei Verfahren ermittelte komprimierte Materialdicke für die untersuchten B-Wellen. Abhängig von der Methode zur Ermittlung der komprimierten Materialdicke zeigen sich bei den verschiedenen Materialien Abweichungen im Bereich von 0,5 mm bis 1,0 mm. Die ermittelten Abweichungen sind für die Werkzeugherstellung insofern relevant, als dass ihre Ausprägung zu unterschiedlichen Rillempfehlungen führen kann. Dies gilt sowohl für die Berechnungen mit Online Tools als auch für die Empfehlungen von Werkzeugherstellern. Bei der Entscheidung für eine Variante zur Ermittlung der komprimierten Materialdicke sind ferner die Ergebnisse aus AP5 zu berücksichtigen.

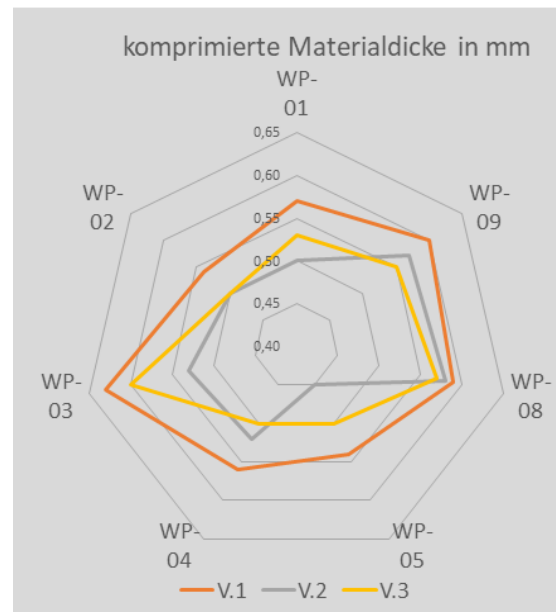


Abbildung 34: Von der Ermittlungsmethode abhängige Schwankungen der komprimierten Materialdicke

Diese zeigen, dass die Einzelblattstärke und die flächenbezogene Masse der Einzelpapiere standardisiert messbar sind. Variante 2 und Variante 3 erfordern aber aufgrund ihrer Klimaabhängigkeit die Angabe des Prüfklimas. Basierend auf den drei dargestellten Methoden wurden für die Erstellung des Testrillwerkzeugs sowohl Rillempfehlungen von Online Tools als auch Rillempfehlungen von Werkzeugbauern eingeholt und miteinander verglichen.

#### **Nutzung von Online Tools zur Auslegung der Rillwerkzeuge**

Als Ergebnis der Bewertung der vorgestellten vier Online Tools ist festzuhalten, dass ihre Eignung zur Konfiguration von Rillwerkzeugen sehr unterschiedlich ist. Während zwei Tools nach Eingabe von Materialdaten das gesamte Produktsortiment aufzeigen, geben zwei weitere Online Tools „wirkliche“ Empfehlungen für geeignete Rillgeometrien (teils mit Alternativen). Die Berechnungsgrundlagen werden bei diesen beiden Herstellern schlüssig dargestellt.

Unsere Recherche belegte aber das Problem einer fehlenden, einheitlichen Terminologie zur Spezifikation von Materialdaten und Rillwerkzeugen.

#### **Auslegung der Rillwerkzeuge nach Empfehlungen von Werkzeugherstellern**

Als Grundlage für die Rillempfehlung diente den Herstellern analog zu den Online Tools die komprimierte Materialdicke. Zusätzlich fordern einige Hersteller weitere Informationen zum Material wie Wellenart und Papierqualitäten. Als mögliche Fehlerquellen wurden vage Begrifflichkeiten, fehlende Angaben zum Ermittlungsverfahren sowie den Randbedingungen (Klimata, Vorgehensweise bei der Ermittlung) und uneinheitliche, interne Vorgehensweisen im Unternehmen identifiziert.

**Untersuchungsrahmen** Für 11 Wellpappen wurden Rillempfehlungen bei den zuvor genannten 4 Online Tools und 4 Herstellern abgefragt. Die Tabelle 6 zeigt beispielhaft die Rillempfehlungen für alle untersuchten B-Wellen.

Tabelle 6: Rillempfehlungen aller Anbieter für alle untersuchten B-Wellen (pt – DTP-Punkt, KN – Rillkanal [Höhe x Breite])

	WP-01	WP-02	WP-03	WP-04	WP-05	WP-08	WP-09
Online Tool 1 Variante 1	3pt x 23,20 mm KN 0,60 x 2,10 mm	2pt x 23,30 KN 0,50 x 1,50	3pt x 23,20 KN 0,60 x 2,10	3pt x 23,20 KN 0,60 x 2,10	2pt x 23,30 KN* 0,50 x 1,50	3pt x 23,20 KN 0,60 x 2,10	3pt x 23,20 KN 0,60 x 2,10
Online Tool 1 Variante 2	-	3pt x 23,20 KN 0,60 x 2,10	-	-	3pt x 23,20 KN 0,60 x 2,10	3pt x 23,20 KN 0,60 x 2,10	3pt x 23,20 KN 0,60 x 2,10
Online Tool 2 Variante 1	2pt 0,55 x 1,81	2pt 0,55 x 1,81	2pt 0,65 x 2,01	2pt 0,55 x 1,81	2pt 0,55 x 1,81	2pt 0,60 x 1,91	2pt 0,60 x 1,91
Online Tool 2 Variante 2	3pt 0,55 x 2,15	3pt 0,55 x 2,15	3pt 0,65 x 2,31	3pt 0,55 x 2,15	3pt 0,55 x 2,15	3pt 0,60 x 2,25	3pt 0,60 x 2,25
Hersteller 1 Variante 1	3pt x 23,20 rund KN* 0,60 x 2,10	3pt x 23,20 rund KN* 0,60 x 2,10	3pt x 23,20 rund KN* 0,60 x 2,10	3pt x 23,20 rund KN* 0,60 x 2,10	3pt x 23,20 rund KN* 0,60 x 2,10	3pt x 23,20 rund KN* 0,60 x 2,10	3pt x 23,20 rund KN* 0,60 x 2,10
Hersteller 1 Variante 2	4pt x 23,00 rund KN* 0,80 x 3,00	4pt x 23,00 rund KN* 0,80 x 3,00	4pt x 23,00 rund KN* 0,80 x 3,00	4pt x 23,00 rund KN* 0,80 x 3,00	4pt x 23,00 rund KN* 0,80 x 3,00	4pt x 23,00 rund KN* 0,80 x 3,00	4pt x 23,00 rund KN* 0,80 x 3,00
Hersteller 2	3pt x 23,00 P* 0,70 x 2,20	3pt x 23,00 P* 0,70 x 2,20	3pt x 23,00 P* 0,70 x 2,20	3pt x 23,00 P* 0,70 x 2,20	3pt x 23,00 P* 0,70 x 2,20	3pt x 23,00 P* 0,70 x 2,20	3pt x 23,00 P* 0,70 x 2,20
Hersteller 3	3pt x 23,10 KN* 0,60 x 2,70	3pt x 23,10 KN* 0,60 x 2,70	3pt x 23,10 KN* 0,60 x 2,70	3pt x 23,10 KN* 0,60 x 2,70	3pt x 23,10 KN* 0,60 x 2,70	3pt x 23,10 KN* 0,60 x 2,70	3pt x 23,10 KN* 0,60 x 2,70
Hersteller 4	3pt x 23,00 keine Angaben	3pt x 23,00 keine Angaben	3pt x 23,00 keine Angaben	3pt x 23,00 keine Angaben	3pt x 23,00 keine Angaben	3pt x 23,00 keine Angaben	3pt x 23,00 keine Angaben

Die komprimierte Materialdicke von B-Wellen liegt typischerweise in einem Bereich von 0,4 mm bis 0,5 mm. Exemplarisch für die WP-02 zeigt die grafische Darstellung in Abbildung 35: Rillempfehlungen für WP-02, dass über alle Empfehlungen die Parameter Rillerbreite, Rillerhöhe, Gegenzurichtungsbreite und Gegenzurichtungstiefe schwanken. Teilweise sind die Abweichungen durch die unterschiedlichen Varianten zur Ermittlung der komprimierten Materialdicke begründet.

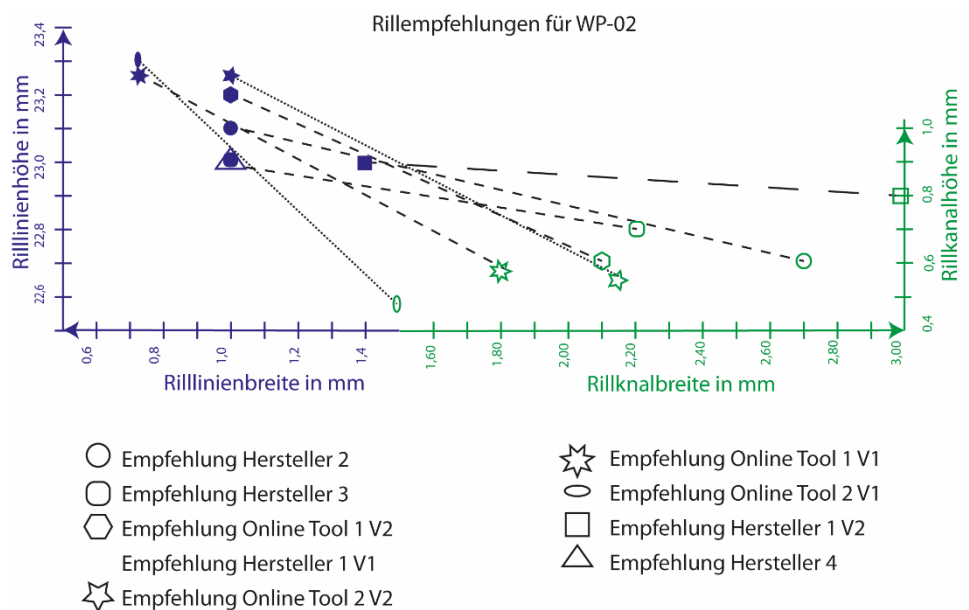


Abbildung 35: Rillempfehlungen für WP-02

**Berechnungsgrundlagen**

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden die in der Praxis angewandten Berechnungsgrundlagen für die Werkzeugparameter recherchiert und betrachtet. [18, 19, 20, 21, 22, 23, 24]

**Riller**

- $hr = \text{Schneidlinienhöhe} - \text{komprimierte Materialdicke}$

$hr$  = Rillerhöhe in mm

Schneidlinienhöhe = Standard  $\pm$  23,80 mm

- Rillerdicke / Rillmesserbreite ( $br$ ) in pt oder mm

Die Festlegung der Rillerdicke ist hauptsächlich abhängig von der Materialdicke. Bei B-Wellen im Flachbettstanzen beträgt sie zumeist 1,05 mm, in Rotativen Stanzen 1,42 mm [25].

**Gegenzurichtung**

- $bn = br + \text{komprimierte Materialdicke} * 2$

$bn$  = Rillnutbreite / Gegenzurichtung Kanalbreite in mm

- $tn = \text{komprimierte Materialdicke}$

$tn$  = Rillnuttiefe / Gegenzurichtung Kanaltiefe in mm

Die Recherche erbrachte keine Ergebnisse in Hinblick auf wissenschaftliche Untersuchungen zu Kenngrößen und Berechnungsformeln von geeigneten Rillgeometrien für Wellpappe. Es ist davon auszugehen, dass sich die genannten Berechnungsformeln auf Erkenntnisse zum Rillen von Faltschachtelkarton stützen. Das Rillverhalten von Faltschachtelkarton ist seit 1964 beschrieben [26].

Die Abbildung 41 verdeutlicht die auftretenden Beanspruchungen im Karton: Zug-, Druck- und Scherspannung. Die Unterschiede aufgrund der Faserlaufrichtung in MD und CD sind im Gegensatz zu Wellpappe gering.

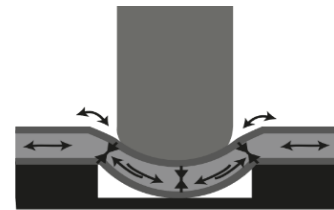


Abbildung 36: Wirksame Kräfte beim Rillen von Faltschachtelkarton

Bei Wellpappe sind die Einzellagen (Liner) zwar homogen, aber das Gesamtsystem ist im Vergleich zu Faltschachtelkarton deutlich inhomogener. Die Untersuchungen im Forschungsprojekt zeigten, dass das Materialverhalten von der Lage der Rille zur Welle (längs oder quer) abhängt, siehe Abbildung 37. Bei längs zur Welle gerillten Proben konnte zusätzlich der Einfluss der Rillposition in Bezug zur Wellengeometrie (Wellenberg, Wellental, zwischen Wellenberg und Wellental) nachgewiesen werden. Dadurch ist die Reproduzierbarkeit von Rillungen an Wellpappe eingeschränkt. Die in der Norm angegebene Mindestprobenanzahl von 3 Proben wird in diesem Zusammenhang kritisch betrachtet. Ein ausreichend großer Probenumfang (vor allem längs zur Welle) erhöht die Wahrscheinlichkeit alle Einspannzustände abzubilden.

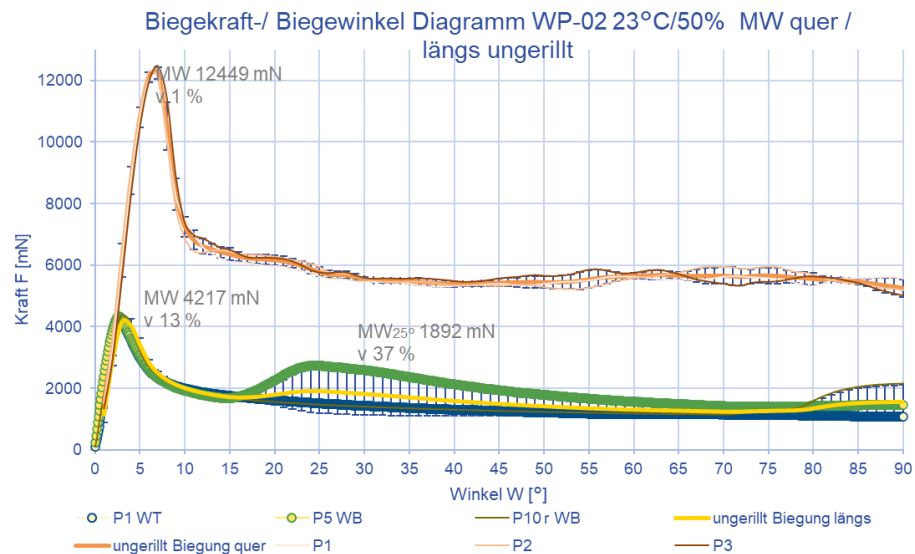


Abbildung 37: Unterschiedliche Biegekurven längs und quer zur Welle gerillter Proben

Um den Prozess des Hohlrillens und das Materialverhalten bei sich verändernden Rillparametern besser nachvollziehen zu können, kann eine auf das Hohlrillen ausgelegte FEM-Modellierung (AP 5) helfen.

### Testwerkzeug

Nach umfangreichen Recherchen und ersten Tests mit einem für mehrere Wellenarten angelegten Werkzeug wurde basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen ein für die verschiedenen B-Wellen optimiertes Testwerkzeug hergestellt. Ziel war die Abbildung mehrerer Rilleempfehlungen bei systematischer Variation der Werkzeugparameter *Rillhöhe*, *Rillbreite*, *Rillkanalbreite* und *Rillkanalhöhe*. Zusätzlich wurden durch die Hersteller zwei Arten von Gegenzurichtungen empfohlen. Die Ausführungen aus Pertinax oder als Kanalfertignuten wurden durch den Parameter Art der Gegenzurichtung berücksichtigt und werden durch die Merkmale *Materialart* bzw. *Härte* im Untersuchungsrahmen beschrieben.

Die Erstellung des Testwerkzeuges erfolgte unter Berücksichtigung der Kennwerte für die Mindestprobengröße [1] und die maximale Werkzeuggröße. Die Beschränkung der Werkzeuggröße entstand nicht durch den zum Stanzen eingesetzten Krause Stanztiegel, sondern durch die Abmessungen der für die Konditionierung des Materials verfügbaren Klimaschränke.

Für das Testwerkzeug ergab sich damit eine maximale Arbeitsfläche von 500 mm x 380 mm. Da im Forschungsprojekt verschiedene Geräte für die Biegeprüfung zum Einsatz kamen, wurde die normkonforme Biegelänge von 25 mm pro Probe gewählt. Das Testwerkzeug (siehe Abbildung 38) ermöglichte die Herstellung von Proben mit 50 variierenden Rillparametern.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Rilller 3pt x 23,00	GZ 1 Senkrecht 0,7 x 1,5	GZ 1 Senkrecht 0,7 x 1,6	GZ 1 Senkrecht 0,7 x 1,7	GZ 1 Senkrecht 0,7 x 1,8	GZ 1 Senkrecht 0,7 x 1,9	GZ 1 Senkrecht 0,7 x 2,0	GZ 1 Senkrecht 0,7 x 2,1	GZ 1 Senkrecht 0,7 x 2,2	GZ 1 Senkrecht 0,7 x 2,3	GZ 1 Senkrecht 0,7 x 2,4
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	GZ 1 Senkrecht 0,7 x 2,5	GZ 1 Senkrecht 0,7 x 2,6	GZ 1 Senkrecht 0,7 x 2,7	GZ 1 Senkrecht 0,7 x 2,8	GZ 1 Senkrecht 0,7 x 2,9	GZ 1 Senkrecht 0,7 x 3,0	GZ 1 Senkrecht 0,7 x 3,1	GZ 1 Senkrecht 0,7 x 3,2	GZ 1 Senkrecht 0,7 x 3,5	GZ 1 Senkrecht 0,7 x 4,0
Rilller 3pt x 23,20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	GZ 1 Senkrecht 0,7 x 5,0	GZ 1 Senkrecht 0,7 x 2,3	GZ 1 Senkrecht 0,7 x 2,2	GZ 1 Senkrecht 0,7 x 2,1	GZ 2 V1 0,8 x 3,0	GZ 2 V3 0,8 x 2,7	GZ 2 V6 0,6 x 2,1	GZ 2 V2 0,6 x 2,1	ohne GZ	ohne GZ
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Rilller 4pt x 23,00	GZ 2 V1 0,6 x 3,0	GZ 2 V1 0,6 x 2,7	GZ 2 V1 0,6 x 2,5	GZ 2 V1 0,6 x 2,3	GZ 2 V3 0,6 x 2,1	GZ 2 V3 0,6 x 1,9	GZ 2 V3 0,6 x 1,7	GZ 2 V3 0,6 x 1,6	GZ 2 V3 0,6 x 1,5	GZ 2 V1 0,6 x 1,4
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
	GZ 2 V1 0,8 x 5,0	GZ 2 V1 0,8 x 4,0	GZ 2 V5 0,8 x 3,5	GZ 2 V1 0,8 x 3,2	GZ 2 V3 0,8 x 3,0	GZ 2 V3 0,8 x 2,7	GZ 2 V3 0,8 x 2,5	GZ 2 V3 0,8 x 2,3	GZ 2 V3 0,8 x 2,1	GZ 2 V1 0,8 x 1,9

Abbildung 38: Erstelltes Testwerkzeug mit Rillparameterkombinationen

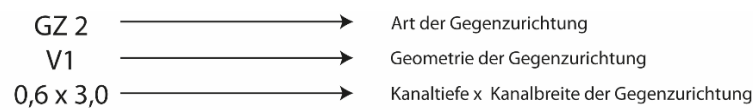


Abbildung 39: Erläuterung Rillparameter der Gegenzurichtung

### 6.5 Standardisierter Prüfablauf und Auswertungsroutine zur reproduzierbaren objektiven Bewertung

Die Praxispartner (Stanzformenbauer, wellpappeverarbeitende Unternehmen) beschreiben beim Hohlrippen durch Inlinefertigung die in Abbildung 40 dargestellten Abläufe bei der Herstellung und Überprüfung von Rillungen im Produktionsumfeld. Zudem sind die klimatischen Einflussfaktoren zwischen den Arbeitsschritten dargestellt.

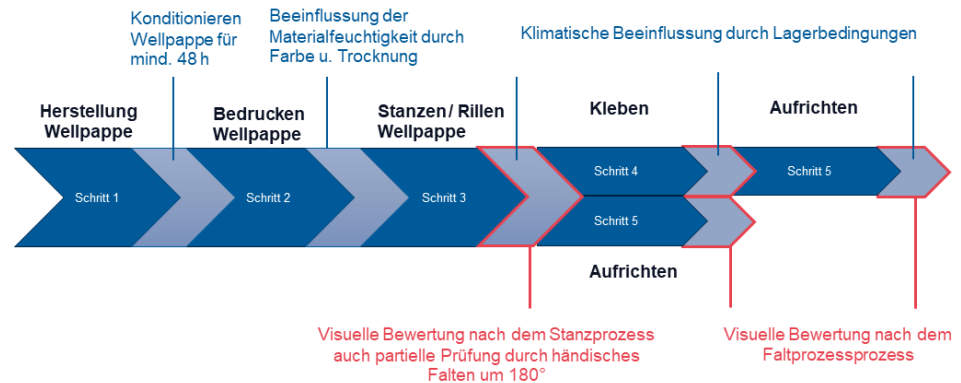


Abbildung 40: Prozessablauf bei der Herstellung u. Überprüfung von Rillungen

Papierfasern als Grundbestandteil der zu Wellpappe verarbeiteten Papiere/Liner sind die Ursache für das hydrophile Verhalten der Wellpappe. Die Änderung von Temperatur und Feuchtigkeitsparametern führt zu einer Veränderung der Werkstoffparameter.

**Prüfablauf**

Basierend auf den Erkenntnissen aus der Praxis, der Vorversuche und Recherchen sowie unter Einbezug der erarbeiteten Bewertungsmethodik für Rillergebnisse wurde folgender, in Abbildung 41 dargestellter, Prüfablauf entwickelt.

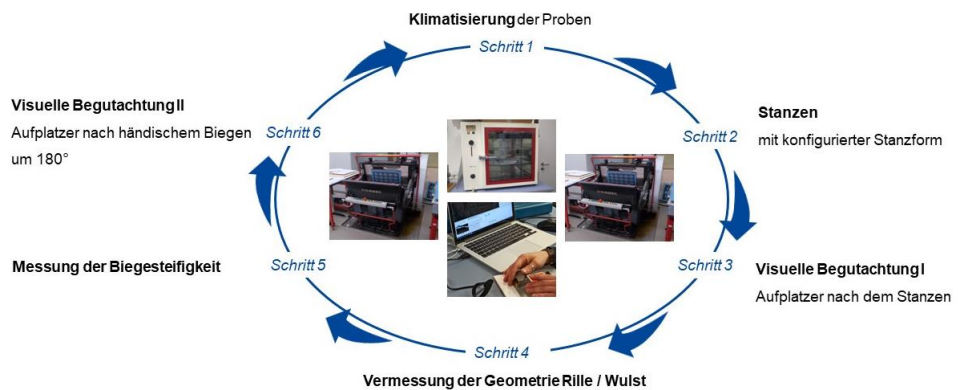


Abbildung 41: Für die Datenerhebung (AP6) entwickelter Prüfablauf

Um klimatisch bedingte Einflüsse im Materialverhalten beim Rillprozess auszuschließen, erfolgte in einem **ersten Schritt** die Klimatisierung (48 Stunden, Normklima) der Wellpappbögen.

Mit konfigurierten Stanzformen erfolgte in einem **zweiten Schritt** die Herstellung von Rillproben mit variierenden Rillparametern. Dazu wurden die klimatisierten Proben gestanzt. Um produktionsnahe Rillbedingungen zu gewährleisten, erfolgte die Herstellung der Stanzung/ Rillung auf einem mit Kurbelgetriebe arbeitenden Stanztiegel der Firma Krause.

Mit **Schritt 3**, der ersten visuellen Beurteilung, wurden Fehler beim Formen der Rille erfasst. Die Dokumentation und Auswertung der Schädigungen auf der

Innen- und Außenseite der Wellpappe erfolgte anhand der in Kap 8.3 dargestellten Fehlerbeschreibung.

Mit dem Ziel, die Abformgenauigkeit zwischen Rillwerkzeug und der im Material ausgeformten Rille zu erfassen, wurde im **Schritt 4** die Geometrie der Rille gemessen.

Auch bei der Biege widerstandsermittlung (**Schritt 5**) galt es den Einfluss auf das Materialverhalten durch klimatisch bedingte Veränderungen auszuschließen. Daher erfolgte die Vermessung der Biege widerstände an den in Schritt 2 hergestellten Rillproben in klimatisierten Zustand (Normklima).

**Schritt 6** diente der Erfassung von Fehlern beim Falten der Rille durch eine zweite visuelle Beurteilung der Innen- und Außenseite der Wellpappe anhand der erarbeiteten Bewertungsmethode. Es wurden Fehler, die beim Falten der Biegestelle um 180° auftreten, erfasst.

#### Untersuchungsrahmen

Im Ergebnis einer iterativen Vorgehensweise, bei der in einem ersten Vorversuch mit dem ersten Werkzeug 5 Wellpappen bei 3 Klimastufen gerillt, visuell bewertet und auf ihren Biege widerstand geprüft wurden, erfolgte eine Optimierung der Bewertungskriterien und des Prüfablaufs zu der oben dargestellten Version.

Mit dem für B-Wellen konfigurierten zweiten Werkzeug wurden an den Materialien WP-02, WP-04, WP-08, WP-09 je 50 Parametersets geprüft. Da die Vorversuche ein deutlich unterschiedliches Materialverhalten der Wellpappe bei längs und quer zum Wellenlauf gerillten Proben zeigte, wurde, angepasst an die DIN-Vorgabe (mindestens 3 Proben [1]), der Probenumfang pro Richtung erhöht. Insbesondere bei der Rillung von Proben längs zum Wellenlauf sollte dadurch sichergestellt werden, dass ausreichend Proben mit unterschiedlicher Rillposition (Wellenberg, Wellental, zwischen Wellenberg und Wellental) geprüft werden. Pro Rillparameterset (siehe Kap 8.4) wurden längs zum Wellenlauf 15 Proben und quer zum Wellenlauf 8 Proben gestanzt. Ziel war die Erhebung der Biege steifigkeit an 12 Proben längs zum Wellenlauf und 6 Proben quer zum Wellenlauf.

## 6.6 Fazit

#### Parameter Technische Qualität der Rillungen DIN 19304:2021-04

Zur Klärung wurden den Vertretern und Vertreterinnen des Normungsausschusses die im Forschungsprojekt identifizierten Fragen zugestellt. Auch über das Projektende hinaus wird durch den Austausch mit dem zuständigen Arbeitsausschuss NA 074-02-03 AA „Physikalisch-technische Prüfverfahren für Papier und Pappe“ im DIN-Normenausschuss Papier, Pappe und Faserstoff (NPa) eine Klärung angestrebt.

#### Biegeprüfung

Als Datengrundlage für die Bearbeitung der AP 4, AP 5 und AP 7 sind Bewertungen in zwei Dimensionen (siehe VDW-Katalog) nicht zielführend. Daher erfolgte die Bewertung der technischen Qualität anhand der nach DIN 19304:2021-04 zu erhebenden Kenngrößen der Biegeprüfung.

---

<b>Sichtbare Materialschädigungen</b>	Für die Modellierung (AP 5) ist eine messtechnische Erfassung/Bewertung der Schadlosigkeit der Rillung wünschenswert. Derzeit sind solche Messsysteme in der wellpappeverarbeitenden Industrie nicht verfügbar. Eine Erweiterung des Skalenniveaus erfolgte mit dem Ziel, verschiedene Fehlerbilder zu erfassen.
<b>Berechnungsgrundlagen Werkzeugparameter</b>	Das Materialverhalten von Faltschachtelkarton und Wellpappe während des Rillens unterscheiden sich. Untersuchungen im Forschungsprojekt zeigen für Wellpappe ein deutlich unterschiedliches Materialverhalten beim Rillen in Abhängigkeit der Rillposition und der Richtung zum Wellenlauf. Daher ist eine Übertragbarkeit der Kenngrößen und Faktoren in den Berechnungsformeln von Faltschachtel auf Wellpappe ungewiss und wissenschaftlich zu überprüfen.
<b>Prüfablauf</b>	Mit Einsatz eines standardisierten Prüfablaufes konnten für jedes der 50 Rillparametersets je Wellenlaufrichtung (längs- und quer) 50 Qualitätsparameter erhoben werden. Diese wurden dem Projektpartner als Datengrundlage für AP 4, AP 5 und AP 7 zur Verfügung gestellt.

---

## 6.7 Optische Auswertung des Faltvorgangs mittels Digital Image Correlation

---

<b>Kamerabasierte Untersuchungen während der Faltfaktorbestimmung</b>	Die Durchführung der Prüfung von Wellpappe – Rillungen nach DIN 19304 wurde zusätzlich mit einem Kamerasystem unterstützend aufgezeichnet und ausgewertet. Dazu wurde die Methode der optische Dehnfeldanalyse genutzt. Dies ist ein Unterverfahren der digitalen Bildkorrelation (engl.: digital image correlation DIC). Bei der DIC wird die Oberfläche des zu messenden Objektes mit einem zufälligen Punktemuster versehen, um so die Relativbewegungen der einzelnen Punkte während der mechanischen Prüfung, und der damit einhergehende Gestaltänderung, zu ermitteln. Geschieht dies bei flachen Proben in der Ebene, kann mit einer 2D-Bildaufnahme gearbeitet werden. Diese besteht nur aus einem Kamerasystem, welches senkrecht zur Ebene platziert wird. Bei den zu untersuchenden Proben handelt es sich um 3-Dimensionale Proben, da aber jeweils nur die, der Kamera zugewandte Profilansicht, ausgewertet werden soll, kann diese Technik verwendet werden. Wellpappe, bestehend aus Naturfasern, verfügt von sich aus weitestgehend über eine ausreichende Oberflächentopographie, welche von einem geeigneten Kamerasystem ermittelt werden kann. Somit entfällt die Notwendigkeit der Erzeugung einzelner Punkte zur Auswertung. Die Auswertung erfolgte mit einer Bildrate von 0,1 fps (frames per second). Die Abbildung 42 zeigt auszugsweise die Durchführung der Prüfung in den Stadien Ausgangszustand (0°), Biegung (45°) und das Ende der Prüfung nach Erreichen des Endzustandes (90°). Zusätzlich wurde der Bereich der Einspannung als Detailansicht zu den drei festgelegten Stadien beigefügt. Das Programm VEDDAC 7 der Chemnitzer Werkstoffmechanik GmbH ermöglicht es, die Bilddaten auszuwerten.
---	---

Die Auswertung ermöglicht die Ermittlung von Verschiebungsfeldern, lokalen Dehnungsfeldern, Biegelinien, Wegverläufen (Trajektorien) und/oder lokalen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen. Im aufgezeigten Beispiel wurden die Translation in x- und y-Richtung in Relation zum Referenzfeld als Graphen pro

---



Bildaufnahme dargestellt. Die Ausgabe der Echtzeitdaten pro Bild ermöglicht zusätzlich die rechnerische Überlagerung der x und y-Translation zur Bestimmung des Kreisbogens.

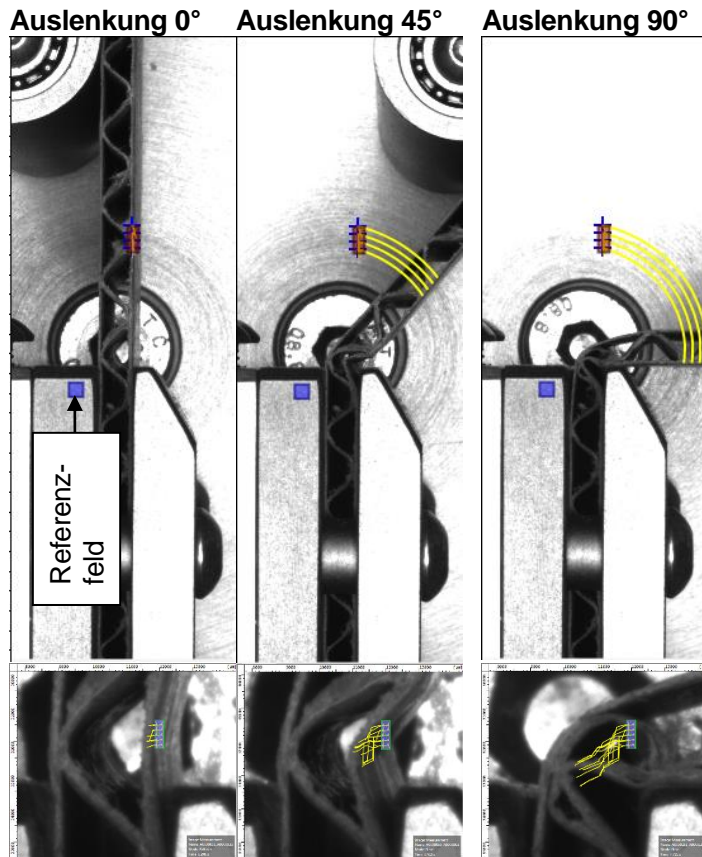


Abbildung 42: Pfadverschiebung von Messpunkten zur Darstellung einer möglichen Auswertung mittels DIC

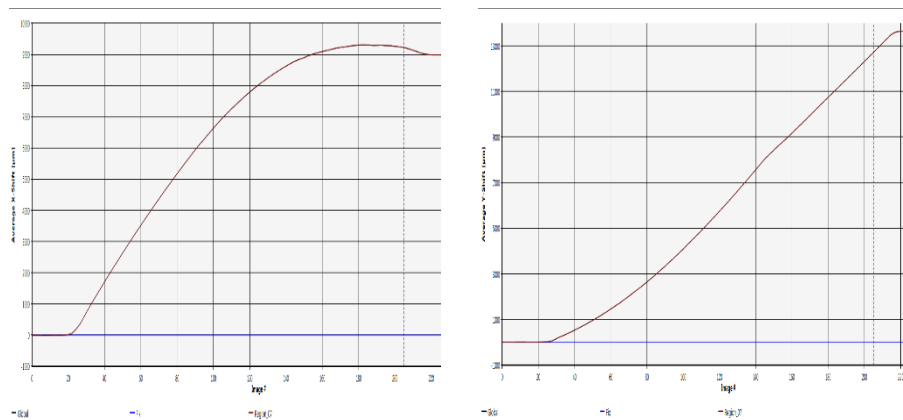


Abbildung 43: x- (links) und y-Verschiebung (rechts) pro Bildaufnahme

---

**Erkenntnisse aus den Versuchen**

Die Analysen der insbesondere lokal stattfindenden Verformungen während des Faltvorgangs lassen u. a. Rückschlüsse darauf zu, welchen Einfluss die Position der Rillung und auch die Position des Faltens haben. Es konnte mit Hilfe des Kamerasystems nachgewiesen werden, dass die Einspannposition der Wellpappe, insbesondere für die Referenzproben, welche nicht gerillt sind, von entscheidender Bedeutung ist. Je nachdem ob auf einem Wellenberg, einem -tal oder in einer Zwischenposition eingespannt wurde, verformt sich das Material unterschiedlich, was auch in den messtechnisch ermittelten Kurven zu erkennen ist. Im dargestellten Fall klappt die Innendecke in die Wellpappe hinein und es kann eine Kraft-Weg-Kurve ohne Unregelmäßigkeiten aufgezeichnet werden. Weitere Versuche an anderen Einspannpositionen zeigten eine Verformung, bei der die Innendecke aus der Wellpappe heraus knickte und sich somit als zusätzlicher Widerstand beim Falten in die Ermittlung der Kurve einbrachte. Dies führte zu einem erkennbaren Anstieg der Kurve nach dem ersten Peak.

---

## 7 DoE und Datenanalyse zur Erstellung eines mathematisch statistischen Modells sowie Entwicklung eines modellbasierten Bewertungskonzeptes zur Rillbarkeit

### 7.1 Aufbau eines mathematisch statistischen Modells und Datenanalyse

---

#### Analyse-Tool

Sowohl die Datenanalyse zur Bestimmung der Zusammenhänge zwischen den Materialparametern, den Rillbedingungen und den Qualitätskenngrößen als auch die Vorhersage von Rillqualitäten kann mithilfe eines Tools umgesetzt werden. Zum Einsatz kam hierbei das Data-Mining-Computerprogramm Neural Designer. Dieses ist im Einsatz für allgemeine Zwecke des (automatisierten) maschinellen Lernens. Es enthält Werkzeuge zur Regressionsanalyse und Mustererkennung. Neural Designer basiert dabei auf einem künstlichen neuronalen Netz, das in der Open-Source-Programmbibliothek OpenNN entwickelt wurde. Über eine grafische Benutzeroberfläche wird die Eingabe von Daten ermöglicht; ebenso werden Interpretationen und Vorhersagen von Ergebnissen verwaltet und dargestellt. Die Software kann den mathematischen Ausdruck des neuronalen Netzes zudem exportieren, um in einer beliebigen Programmiersprache oder einem Computersystem verwendet zu werden. Dies ermöglicht die Entwicklung eines allgemein verwendbaren Tools zur Vorhersage der Rilleigenschaften.

---

#### Datengrundlage

In den vorherigen Arbeitspaketen wurde ein umfassender Datenpool aufgenommen, bestehend aus Parametern die sich aus den Messungen an den Wellpappen selbst, als auch den Wellpappenroh-papieren ergeben haben. Neben diesen Materialkennwerten wurden zudem die verschiedenen systematisch variierenden insg. 21 Rillbedingungen in den Datensatz sowie die ermittelten Rillqualitäten aufgenommen.

Die Anzahl der Wellpappen sowie die Anzahl der unterschiedlichen Rillbedingungen (= Inputs) ergibt hierbei die Zeilenanzahl der Datensatzes. In der Theorie würde dieser bei zehn Wellpappen und 21 Rillbedingungen aus 210 sogenannten Inputzeilen bestehen. Aufgrund des daraus entstehenden immensen Umfangs an Rillversuchen und Qualitätsbestimmungen wurde festgelegt auf Messungen an Wellpappen zu verzichten, die ähnliche Eigenschaften bei der Aufnahme der Materialparameter gezeigt haben. Der dem Modell zugrunde liegende Datensatz besteht daher aus vier Wellpappen inkl. je 21 verschiedenen Rillbedingungen zu insg. 84 Samples. Die Anzahl der Inputspalten ergibt sich aus den gemessenen Parametern an den Wellpappen und Rohpapieren, den Rillbedingungen und den Qualitätsparametern zu insg. 159.

Zur Datenanalyse standen somit insgesamt 13.356 Daten zur Verfügung (vgl. Abbildung 44).

---

	1	2	3	4	5	6	7	8	...	159
1	382.15	381.3	395.5	2.680833333	2.671666667	2.716666667	1635	1670	...	0
2	382.15	381.3	395.5	2.680833333	2.671666667	2.716666667	1635	1670	...	49.1787577
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
84	453.5	455.9	473.2	2.9911	3.0284	3.053	2706	6022	...	36.9552785

Columns: 159      Samples: 84

Abbildung 44: Datenmatrix für die Datenanalyse

**Korrelationskoeffizienten**

Zur Bewertung von Korrelationszusammenhängen ist es notwendig die berechneten Korrelationskoeffizienten korrekt zu bewerten. Hierbei sind sowohl die Größe als auch die Richtung der Korrelation ( $-1 \leq r \leq 1$ ) entscheidend (vgl. Abbildung 45).

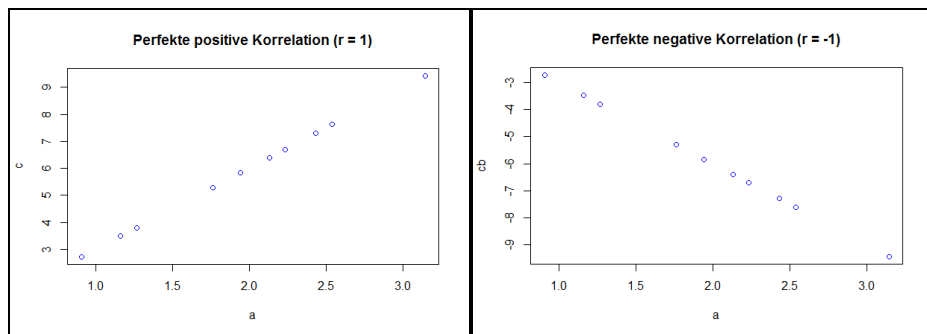


Abbildung 45: Perfekte positive Korrelation ( $r = 1$ , links) und perfekte negative Korrelation ( $r = -1$ , rechts)

Wohingegen es bei der Bewertung der Richtung der Korrelation einfach ist, zwischen positiven und negativen Zusammenhängen zu unterscheiden gibt es bei der Bewertung der Größe der Korrelation unterschiedliche Ansätze. Unterschieden wird hierbei insbesondere in dem Fakt, ob für die zu untersuchenden Zusammenhänge bereits Korrelationen gefunden wurden und wie groß die nutzbaren Datenräume sind. Unterschiedliche Ansätze zeigen hierbei die Korrelationen nach Cohen (1988) und nach Nachtigall & Wirtz (2004), welche in Tabelle 7 dargestellt sind.

Tabelle 7: Korrelationskoeffizienten nach Cohen sowie Nachtigall & Wirtz

Korrelation	Cohen, 1988	Nachtigall & Wirtz, 2004
groß	> 0,5	> 0,9
moderat	> 0,3	> 0,7
klein	> 0,1	> 0,5

Hierbei geht Cohen von der Untersuchung von Korrelationen für einen unbekanntem Datenraum mit zum Teil wenigen Daten aus, weshalb dieses Kriterium auch folgend für die Definition von kleinen, moderaten und großen Korrelationen genutzt wird.

**Korrelationsmatrix  
x der Inputs**

Im ersten Schritt der Datenanalyse wurde eine Untersuchung der Korrelationen innerhalb des Datenraums der Eingangsvariablen durchgeführt. Ziel hierbei ist das Erkennen und Ausschließen von sogenannten Scheinkorrelationen. Diese ergeben sich zwischen Parametern, die schon in der Aufnahme der Materialkennwerte untereinander zusammenhängen. Als Beispiel sei hier genannt, dass dickere Papiere in vielen Fällen auch höhere flächenbezogene Massen aufweisen, soweit sie in einem ähnlichen Prozess hergestellt und einen gleichen (Schicht-) Aufbau haben. Sollten diese Parameter folgend einen Einfluss auf die Zielgröße(n) haben, würde sich eine doppelte Korrelation zeigen, obwohl die beiden Eingangsparameter nicht unabhängig voneinander sind (vgl. Abbildung 46).

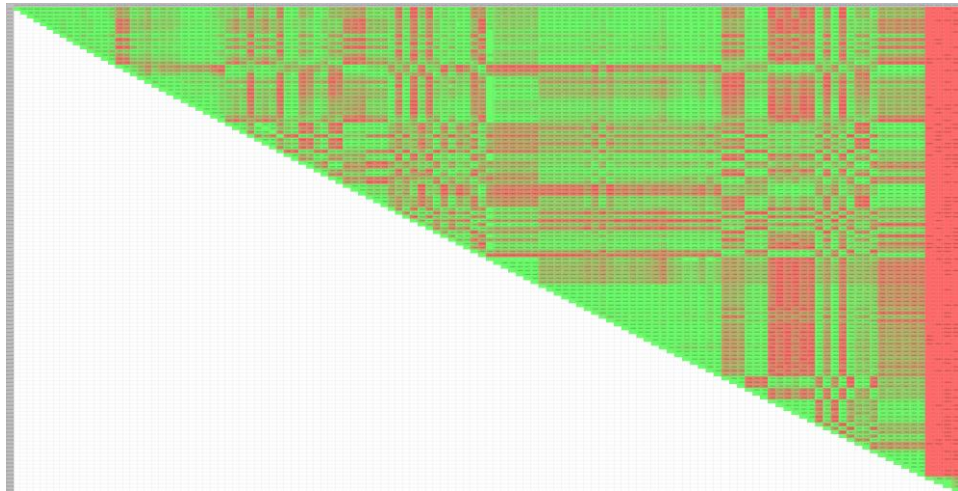


Abbildung 46: Korrelationsmatrix des Neural Designer für alle Inputvariablen

Es zeigte sich, dass die gewählten Materialparameter in großem Umfang in einer Abhängigkeit zueinanderstehen. Lediglich die letzten vier Spalten sind komplett voneinander unabhängig, was sich daraus ableiten lässt, dass dies die angewendeten Rillbedingungen waren (Rillmesserbreite, Rilltiefe sowie Breite und Tiefe der Gegenzurichtung). Die folgenden Sensitivitätsanalysen müssen mit dem Blick auf diese Matrix bewertet werden.

Im nächsten Schritt wurde eine Analyse der Zusammenhänge zwischen den Inputvariablen und den Zielgrößen durchgeführt. Hierbei wurde zwischen den Zielgrößen des Faltfaktors und den Visuellen Fehlern unterschieden.

**Sensitivitätsanalyse Faltfaktor**

Bei der Sensitivitätsanalyse des Faltfaktors zeigten sich bei insgesamt vier Parametern große Korrelationen (nach Cohan). Diese vier Parameter waren jedoch ausschließlich im Bereich der Rillparameter zu finden und lagen im Bereich von 0,63 bis 0,78. Die Sensitivitätsergebnisse der Materialparameter ergaben allesamt Korrelationskoeffizienten unter 0,47 (vgl. Abbildung 47).

Die zehn größten Korrelationen im Bereich der Materialparameter waren:

- Flächenbezogene Masse der Wellpappen in allen drei Klimastufen
- ECT bei 23°C / 38 % r. F.
- Knickwiderstand gegen die Oberseite in MD bei 23°C / 80 % r. F.
- SCT in MD bei 23°C / 80 % r. F.
- Berstfestigkeit gegen die Oberseite bei 23°C / 38 % r. F. und 23°C / 50 % r. F.
- S-Test in MD 23°C / 38 % r. F. und 23°C / 50 % r. F.

Es ist jedoch in Abbildung 47 deutlich zu erkennen, dass die Korrelationen der weiteren Materialparameter in einem ähnlichen Bereich liegen, sodass die Anzahl der relevanten Werkstoffkennwerte ausgesprochen hoch und die Abstufung zwischen den Parametern gering ist.

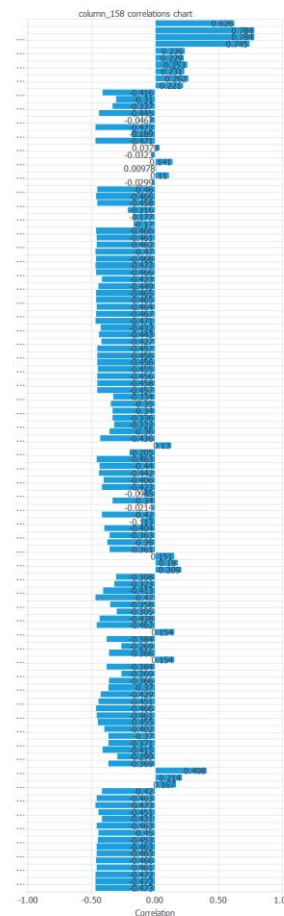


Abbildung 47: Korrelationen Faltfaktor

**Bewertung der Faltfaktoranalyse**

Kein einziger Materialparameter (weder an der Wellpappe, noch den Rohpapieren) zeigt sehr hohe Korrelation. Alle finden sich im Bereich moderat wieder. Hohe Korrelationen ergeben sich nur zu den Rillparametern. Diese Erkenntnis stimmt jedoch mit dem Stand der Wissenschaft überein. Die größten Unterschiede in der Absenkung des Faltfaktors werden durch die genutzten Rillbedingungen erzielt. Positiv an dem Umstand, dass die ermittelten Materialparameter zu einem Großteil ähnliche, nahezu hohe Korrelationen aufweisen ist, dass bei einer Minimierung der notwendigen Parameter für eine Vorhersage der Rillqualität mittels eines Künstlichen Neuronalen Netzes auf eine große Anzahl an Parametern zurückgegriffen werden kann und für die Auswahl eine Vielzahl an Optionen bereitsteht.

**Sensitivitätsanalyse Visuelle Fehler**

Analog zur Sensitivitätsanalyse für den Faltfaktor wurden Korrelationen im Bereich der Visuellen Fehlerbilder 2a und 2 b (nach Biegen um 180°) durchgeführt:

- 2a Riss Außendecke in der Wulst – durchgehend
- 2b Riss Außendecke in der Wulst – teilweise

Die Größe der Korrelationen zeigte sich wie folgt:

- 2a zeigt ausschließlich kleine Korrelationen und
- 2b hat vereinzelte wenige moderate Korrelationen.

Im Detail soll folgend auf das Fehlerbild 2b eingegangen werden. Hierfür ergaben sich aus folgenden Messverfahren Parameter mit Korrelationen > 0,35:

- FCT bei 23°C / 38 % r. F. und bei 23°C / 80 % r. F.
- PAT bei 23°C / 50 % r. F. und bei 23°C / 80 % r. F.
- Knickwiderstand gegen die Unterseite in MD bei 23°C / 80 % r. F.
- Dicke der Wellpappe bei allen Klimastufen
- S-Test in MD bei 23°C / 38 % r. F.
- Berstfestigkeit gegen die Ober- und Unterseite bei allen Klimastufen

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Festigkeitskennwerte aus Bestfestigkeit und PAT die größten Korrelationen zeigten. Im Gegensatz zum Faltfaktor korrelieren die Rillparameter jedoch nicht mit dem visuellen Fehlerbild 2b:

- Rillmesserhöhe 0,10
- Rillmesserbreite -0.09
- Gegenzurichtungshöhe -0.09
- Gegenzurichtungsbreite -0.24

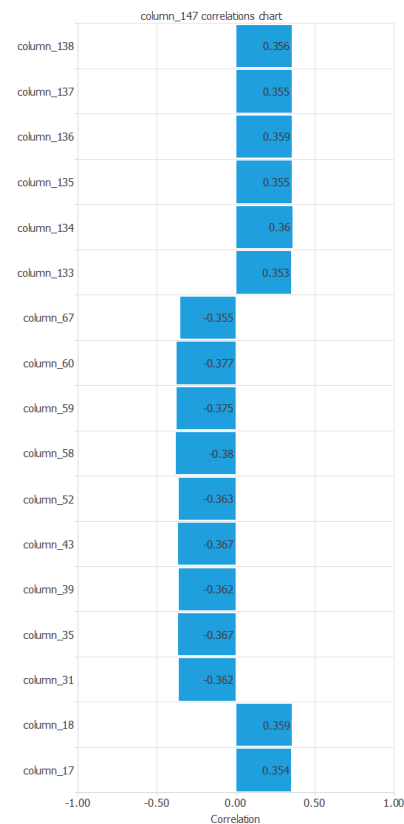


Abbildung 48: Details Korrelation Visuelles Fehlerbild 2b

**Bewertung der visuellen Fehleranalyse**

Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse zeigte keine ausreichend hohen Korrelationen, um den Einfluss der Materialparameter oder Rillbedingungen auf das visuelle Fehlerbild bewerten zu können. Dies liegt vorrangig jedoch daran, dass die Bewertung des visuellen Fehlerbildes kein objektiv messbares Ergebnis liefert. Die Einschätzung des Versagens bzgl. Riss in der Außendecke ist vom Nutzer abhängig und unterscheidet sich demnach schon in ihrer Qualität enorm.

---

Zudem sind die Bewertungsrichtlinien, ob ein Riss vorliegt oder nicht, ob dieser zudem durchgehend ist oder nur teilweise nicht wirklich klar zu definieren, sodass die fehlenden Korrelationen einer unzureichenden Objektivierung des Bewertungsmaßstabs zuzuschreiben sind. Zudem gibt es für das Kriterium des visuellen Fehlerbildes nur den Maßstab ja oder nein, d. h. es ist kein abgestufter Parameter wie der Faltfaktor, sondern ein 0- oder 1-Kriterium.

---

### **Einschätzung der Korrelationsergebnisse**

Die im Neural Designer durchgeführten Korrelationsuntersuchungen zeigten unterschiedlich starke Ausprägungen in den Zusammenhängen zwischen den Eingangsparametern, welche aus den Materialkenngrößen und den Rillparametern bestanden, und den Qualitätskenngrößen des Faltfaktors und des Visuellen Fehlerbildes. Beim Faltfaktor als objektiv und messtechnisch erfassbares Kriterium zeigten sich größere und physikalisch nachvollziehbare Korrelationen, wohingegen beim mit subjektiven Einflüssen behafteten visuellen Fehlerbild nur unzureichende Korrelationen gefunden wurden. Ist muss daher bereits zu diesem Stand der Auswertung davon ausgegangen werden, dass die folgende Vorhersage der Qualitätsparameter für den Faltfaktor besserer Ergebnisse erzielen wird, als für das visuelle Fehlerbild.

## **7.2 Vorhersage der Qualität von Rillungen mittels des mathematisch statistischen Modells**

---

### **Einsatz des Künstlichen Neuronalen Netzes**

Das Vorgehen zum Aufbau und zur Nutzung eines Künstlichen Neuronalen Netzes zur Vorhersage der Rillqualitäten wird folgend grob beschrieben. Es wird jedoch nicht näher auf Details im Bereich Künstliche Neuronale Netze eingegangen, da die Nutzung des KNN im Tool Neural Designer automatisiert abläuft und programmiertechnische Fragen in der Beschreibung zur Software nachgelesen werden können:

1. Bestimmung der Eingangsvariablen
2. Definition der Zwischenlagen und Neuronenzahlen
3. Definition der Aktivierungsfunktion
4. Definition des Zielparameters
5. Anlernen des Netzes (Trainingsdatensatz)
6. Überprüfung mittels Fehlerwerts sowie Berechnung des Testdatensatzes

Zur Bestimmung der Eingangsvariablen wird als Richtwert die Größe der jeweiligen Korrelation angewendet. Nicht alle der über einhundert Eingangsvariablen wurden für die Erstellung des Vorhersagemodells genutzt. Dies würde schlussendlich dazu führen, dass das Modell fortlaufend mit allen Parametern untersetzt werden muss und zur Vorhersage einzelner Rillqualitäten eine sehr hohe Anzahl an Messverfahren zum Einsatz kommen müsste. Dies würde dem Gedanken eines vereinfachten Prognosemodells entgegenstehen. Demnach wurden Schritt für Schritt die Parameter aus als Eingangsvariablen eliminiert, die die geringsten Korrelationen aufgezeigt haben.

Für technische Anwendungen, wie es das Rillen von Wellpappe ist, war das

---



Ergebnis, dass die Anzahl von drei Zwischenlagen die besten Ergebnisse für ein KNN erzielt. Diese Anzahl an Zwischenlagen wurde daher bei der Modellbildung als Startwert gewählt aber ebenso, wie die anderen Einstellungen (u. a. die Neuronenzahl) kontinuierlich unter Berücksichtigung der Modellgüte variiert (vgl. Abbildung 49).

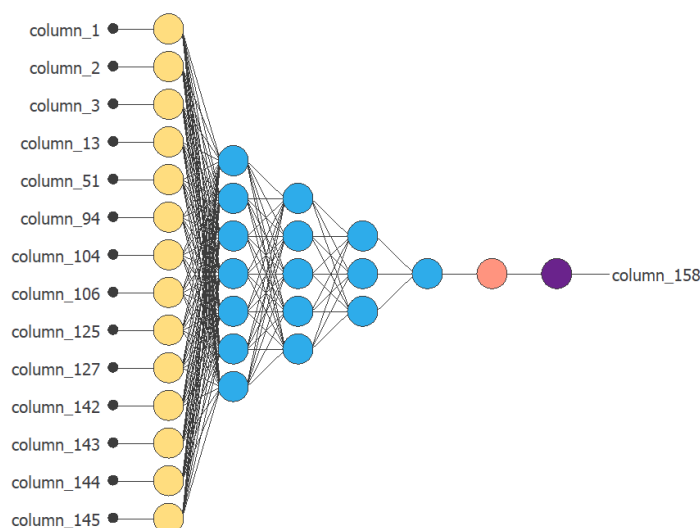


Abbildung 49: Beispiel eines schematischen Aufbaus eines KNN

Nach der Definition des zu ermittelnden Zielparameters wurde das Netz mit Hilfe des Datenpools angelernet, wobei hier unterschieden wird in Trainings- und Testdatensatz. Die Aufteilung hierbei liegt im Bereich 80:20, was bedeutet, dass 80 % des Datensatzes zum Anlernen des Netzes genutzt wird und das angelebnete Netz dann anhand der weiteren 20 % der Daten in seiner Güte bewertet wird. Das Anlernen des Netzes geschieht hierbei in einem mehrstufigen Prozess, die Durchläufe zur Modelloptimierung enden hierbei beim Erreichen eines definierten Gütwerts.

Im Folgenden wurden mehrere Netze hinsichtlich unterschiedlicher Zielparameter (Faltfaktor, Visuelle Fehler) und unter stetiger Verringerung der Eingangsparameter trainiert und bewertet.

### Vorhersage des Faltfaktors

Zunächst wurde der Faltfaktor als Zielparameter des KNN definiert. Nach Umsetzung der beschriebenen Schritte konnten in diesem Bereich sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Nach 220 Iterationsschritten wurde ein Fehlerwert für den Trainingsdatensatz von 0,00422 erreicht (vgl. Abbildung 50), was sich auch in einer sehr hohen Vorhersagegüte/Korrelation im Testdatensatz zeigt (vgl. Abbildung 51).

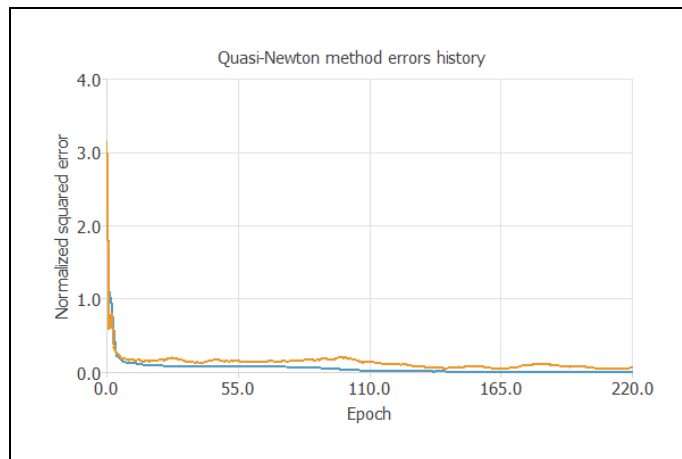


Abbildung 50: Schrittweise Entwicklung und Fehleranalyse des KNN

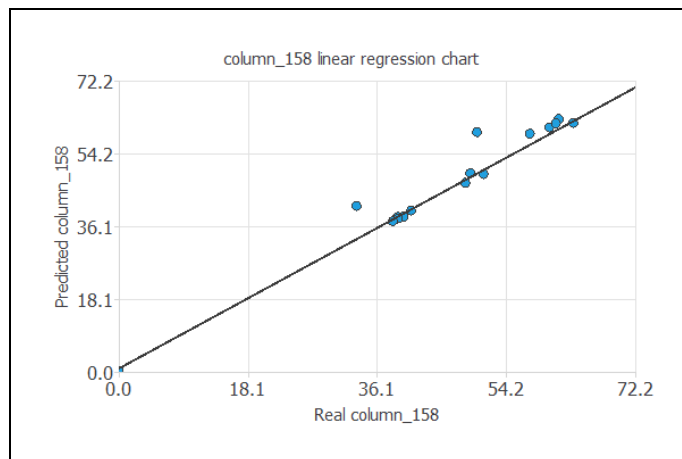


Abbildung 51: Regressionsanalyse der Vorhersage des Testdatensatzes

Zur Vorhersage des Faltfaktors wurde hierbei im letzten Schritt lediglich auf die 14 unter Kapitel 7.1 definierten Inputs mit den höchsten Korrelationen zurückgegriffen.

### Vorhersage der Visuellen Fehler

Wie bereits aufgrund der Ergebnisse der Korrelationsanalysen erwartet, ist die Genauigkeit des Modells zur Vorhersage der visuellen Fehler nicht ausreichend groß. Dieser Umstand ist auch bei Nutzung aller Parameter mit Koeffizienten  $> 0,25$  gegeben. Eine Vorhersage ist insbesondere wegen des subjektiven und sprunghaften Zielparameters nur bedingt aussagekräftig (vgl. Abbildung 52).

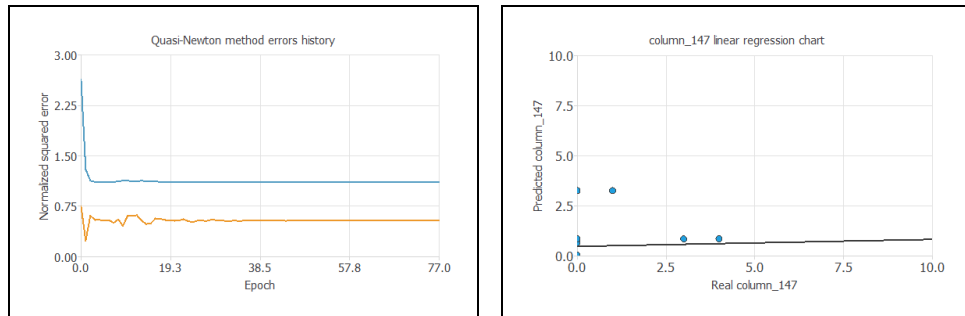


Abbildung 52: Fehleranalyse des Anlernens des Netzes (links) sowie Vorhersage des Testdatensatzes (rechts) für den visuellen Fehler

Das Anlernen des Netzes wird nach 77 Iterationsschritten abgebrochen und zeigt folgend ein normalisiertes Fehlerquadrat von  $> 1,0$  im Trainingsdatensatz. Das Bild der Vorhersage des Testdatensatzes zeigt daher große Abweichungen.

### Minimierung der Eingangsparameter

Ziel des Prognosemodells ist es mit Hilfe weniger Methoden der Materialcharakterisierung mit Wissen der Rillparameter auf die Güte der Rillbarkeit zu schließen. Hierbei stehen folgende Randbedingungen im Fokus:

- Sicherstellung einer ausreichend hohen Modellgenauigkeit,
- Durchführung der Methoden im Normklima,
- Bevorzugung einfacher Messmethoden,
- Nutzung von Messmethoden an der WP ggü. Messungen am Rohpapier sind vorzuziehen.

Insbesondere die Nutzung von Messmethoden im Normklima und an den Wellpappen soll folgend kurz erläutert werden: Die im Projekt durchgeführten Messreihen im Trocken- und Feuchtklima waren notwendig, um die Einflüsse der Materialfeuchte auf das Rillergebnis zu untersuchen. Einer praktischen Anwendbarkeit der Prognosemethode würden sie jedoch im Weg stehen, da eine umfangreiche Konditionierung und Prüfung von Materialien im Laboralltag zu hohen Kosten und langwierigen Prüfungen führen würde. Demnach sollten bei der Minimierung der Eingangsparameter bei ähnlichen Korrelationskoeffizienten diese zur Eliminierung ausgewählt werden, die abseits des Normklimas angesetzt waren. Wellpappeverarbeitern wird es zudem zukünftig nicht immer problemlos möglich sein die Wellpappenrohpa-piere vom Lieferanten in der Art zu erhalten, wie es im vorliegenden Projekt der Fall war. Meist ist es den Anwendern daher nur möglich die Wellpappe selbst zu untersuchen. Aus diesem Grund sollte das Modell neben dem Normklima einen weiteren Fokus auf die Kennwerte der Wellpappe setzen.

### 7.3 Bewertung der Regressionsanalysen sowie des Vorhersagetools für Rillqualitäten

---

**Fazit**

Der den Auswertungen zu Grunde liegende Datensatz hat gezeigt, dass eine abschließende Bewertung der wahrscheinlichen Rillqualitäten nur bedingt möglich ist. Hierbei ist 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 Faltens 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 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 möglich ist zeigt die Vorhersage des Faltfaktors. Hier war es möglich gezielt aus einer Vielzahl an Materialkennwerten die Wichtigsten zu definieren und mit Hilfe dieser Parameter ein vereinfachtes Prognosemodell zu erstellen.

## 8 Aufbau und Validierung eines Simulationsmodells zum Rillen von WP

---

**Zielstellung** Für die Untersuchung geometrischer Einflussfaktoren sollte der Rillprozess unter Verwendung eines geeigneten Materialmodells für Papierwerkstoffe unter Verwendung der Finite-Elemente-Methode modelliert werden. Die Modellerstellung beschränkte sich dabei auf das Stanzzrillen einwelliger Wellpappen und die Bestimmung von Materialkennwerten anhand üblicher, papiertechnischer Mess- und Prüfverfahren sowie auf Basis passender Literaturquellen.

---

### 8.1 Auswahl des Simulationsprogramms und des Materialmodells

**Simulationsprogramm** Aufgrund des bereits implementierten Materialmodells für Papier sowie der umfassenden Unterstützung verschiedener Elementtypen, insbesondere von Schalenelementen, wurde LS-DYNA als Simulationsprogramm ausgewählt. Das hier 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. Im Rahmen der Modellerstellung wurden Effekte durch Delamination jedoch aufgrund des moderaten Flächengewichts als vernachlässigbar angenommen und auf die entsprechende Erweiterung verzichtet.

Die Erstellung der Geometrie, die Vernetzung sowie die Erstellung des Modells über sog. „Keywords“ wurde mit der Anwendung LS-PrePost durchgeführt. Es sei darauf hingewiesen, dass innerhalb der Anwendung keine Maßeinheiten vergeben werden können und daher durchweg auf konsistente Größenordnungen für alle physikalischen Parameter geachtet werden muss. Für das Modell wurden durchweg die in Tabelle 8 aufgeführten Maßeinheiten verwendet.

Tabelle 8: Verwendete Maßeinheiten für das Modell in LS-PrePost

Masse	Länge	Zeit	Kraft	Spannungen
g	mm	ms	N	MPa

---

**Materialmodell** Ein verbreitetes Materialmodell für Papierwerkstoffe wurde im Wesentlichen von Xia et al. [27] erarbeitet, um die charakteristischen anisotropen Materialeigenschaften von Papier bei elastischen und plastischen Deformationen abzubilden.

Dabei werden dem Papier drei Hauptrichtungen zugeordnet. MD, die Maschinenrichtung, CD, die Querrichtung und ZD, welche senkrecht zu MD und CD und dementsprechend senkrecht zur Blattebene steht. Die Faserorientierung liegt in der Blattebene und dort wiederum herstellungsbedingt überwiegend in der Maschinenrichtung, sofern es sich nicht um Laborblätter handelt. Je nach Beschaffenheit kann das Papiermaterial (bspw. Karton) auch aus mehreren Zell- und Holzstoffschichten zusammengesetzt sein und eine Sandwichstruktur einzelner Lagen mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften aufweisen. Diese Lagen sind an den Grenzflächen miteinander verbunden und neigen bei Schubbeanspruchungen zur Delamination. Die grundlegende Struktur wird in Abbildung 53 veranschaulicht.

---

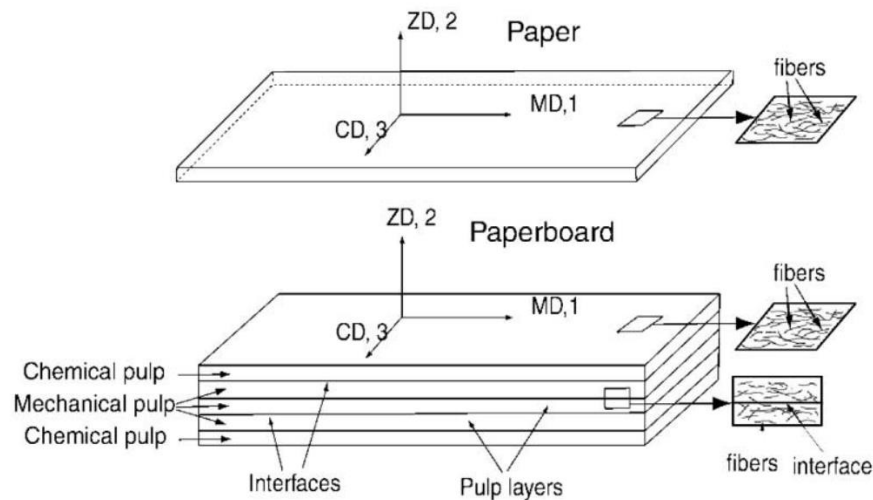


Abbildung 53: Strukturen von Papierwerkstoffen nach Xia et al. [27]

Das in LS-DYNA implementierte Materialmodell für Papier ist eine Kombination aus den Materialmodellen von Xia et al. [27] und Nygard's et al. [28]. Für Volumenelemente wurden die Materialmodelle praktisch vollständig übernommen, für Schalenelemente wurden die Modelle geringfügig abgeändert.

Den verwendeten Schalenelementen liegt ein hypoelastischer Materialansatz zugrunde, somit verhalten sich die Spannungen im elastischen Bereich linear zu den Dehnungen und entsprechen nicht dem eigentlichen, hyperelastischen Verhalten von Papierwerkstoffen. Der Deformationsgradient  $D$  wird hierbei additiv in einen elastischen Anteil  $D^e$  und einen plastischen Anteil  $D^p$  zerlegt:

$$D = D^e + D^p .$$

Die Ratenform des Cauchy'schen Spannungstensors ist dabei folgendermaßen definiert, wobei  $C$  eine orthotropische Elastizitätsmatrix nach Hooke repräsentiert:

$$\dot{\sigma}_{Cauchy} = CD^e .$$

Darüber hinaus können die Schalenelemente keine plastischen Deformationen in ZD abbilden. Lediglich die zuvor beschriebenen linear-elastischen Verformungen bei Zugbeanspruchung sowie die nichtlinear-elastischen Verformungen bei Druckbeanspruchung werden berücksichtigt. Elastische und plastische Deformationen durch Schubspannungen senkrecht zur Blattebene werden weiterhin abgebildet.

Für weitere Informationen zum in LS-DYNA implementierten Materialmodell für Papier sei auf die Dokumentation der in LS-DYNA enthaltenen Materialmodelle [29] verwiesen.

## 8.2 Laborproben und -versuche

### Materialien

Grundlage für das Modell und die dazugehörigen Laborversuche bildete eine einwellige Wellpappe mit B-Welle sowie die dazugehörigen Wellpappenrohpa-piere vor der Verarbeitung. Der obere und untere Liner der Wellpappe bestanden dabei aus dem gleichen Rohpapier. Grundlegende Kennwerte der Wellpappe sind in Tabelle 9 aufgeführt, Daten zu den Rohpapieren in Tabelle 10.

Tabelle 9: Kennwerte der Wellpappe

Welle	Teilung (h, t)	Dicke	Liner OS	Welle	Liner US
B	2,57 mm, 6,41 mm	3,05 mm	135 g/m <sup>2</sup> Testliner braun	135 g/m <sup>2</sup> Wellen- stoff	135 g/m <sup>2</sup> Testliner braun

Tabelle 10: Kennwerte der Rohpapiere

Papier	Flächenbez. Masse	Dicke	Scheinbare Dichte
Liner OS, US	135,1 g/m <sup>2</sup>	195 µm	692,8 kg/m <sup>3</sup>
Welle	133,5 g/m <sup>2</sup>	194 µm	688,1 kg/m <sup>3</sup>

### Zugversuche

Für die Zugversuche nach DIN ISO 1924-2 wurde ein L&W Tensile Tester verwendet. Anstelle der üblichen Prüfgrößen wurden die Rohdaten des Prüfgeräts in Form von Kraft-Weg-Kurven erfasst. Es wurden in Abweichung zur Norm nur 6 Probenstreifen je Richtung und Probe geprüft.

### Druckversuche bzw. modifizierter SCT

Zur Bestimmung der Druckfestigkeit der Proben wurde ein modifizierter Streifenstauchwiderstandsprüfer von Frank-PTI verwendet. In Abweichung zur Prüfnorm DIN 54518 betrug die Einspannlänge für die Proben 5 mm und es wurden je Probe und Richtung 6 Probenstreifen geprüft. Anstelle der üblichen Prüfgrößen wurden Kraft-Weg-Kurven erfasst.

### Rillversuche

Für die Rillung wurden Wellpappenzuschnitte mit einer Länge von 150 mm und einer Breite von 30 mm verwendet. Diese wurden je nach gewünschter Rillposition in eine Marbach Laborstanze (Typ I) eingelegt, positioniert und unter Verwendung der in Tabelle 11 beschriebenen Werkzeuge gerillt. Bilder der Laborstanze und der Werkzeuge sind in Abbildung 54 dargestellt.

Tabelle 11: Abmessungen der verwendeten Rillwerkzeuge

Rillmesserbreite	Rillnutbreite	Rillnuttiefe
1,05 mm bzw. $r = 0,5025$ mm	2,5 mm	0,5 mm

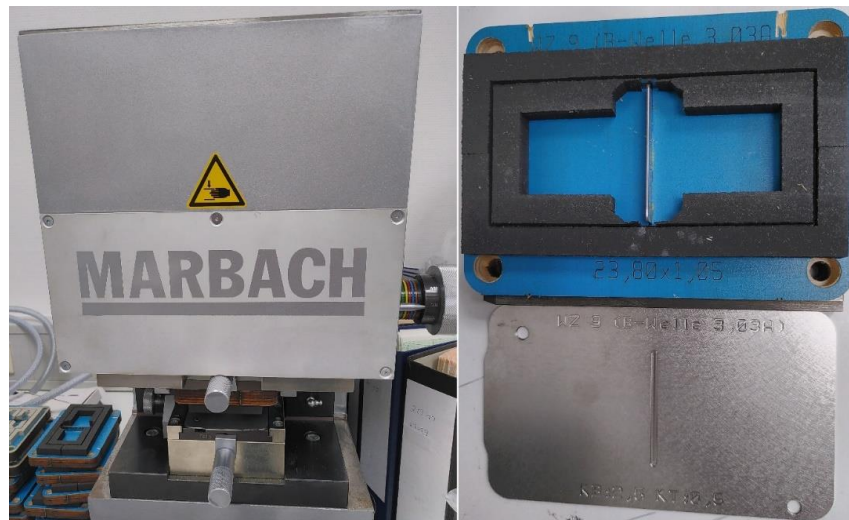


Abbildung 54: Marbach Laborstanze (l.) und verwendetes Rill- und Stanzwerkzeug (o. r.) sowie die dazugehörige Gegenzurichtung (u. r.).

Gemessen ab der Oberseite der Wellpappenprobe betrug der Vorschubweg des Rillmessers 2,65 mm. Es wurden je Orientierung und je Position je zwei Proben gerillt, wie in Tabelle 12 aufgeführt ist.

Tabelle 12: Probenanzahl für jeweilige Rillposition und Orientierung

Orientierung zur Welle	Position		
	Wellenberg	Wellental	Zwischen
Parallel	2	2	2
Quer	2		

**Vermessung der Rillproben**

Die Vermessung der Rillproben erfolgte mittels eines Keyence Makroskop VR-3200 Profilmeters innerhalb einer Gesamtmessfläche von 16 mm • 8 mm. Zur Vermessung der Rilllinie sowie der Rillwulst wurden pro Probe und Seite je zwei Linienprofile erfasst. In Abbildung 55 sind diese Linienprofile für die Unterseite einer Rillprobe (Berg) beispielhaft aufgeführt.

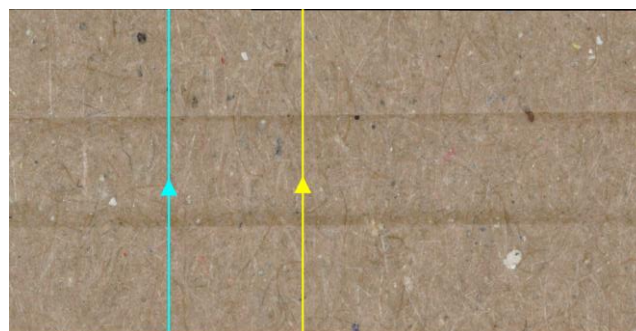


Abbildung 55: Linienprofile zur Vermessung der Rillwulst einer Berggrillung



### 8.3 Modellerstellung

**Modellgeometrie** Die Geometrie des Modells wurde unter Verwendung der durch LS-PrePost bereitgestellten Werkzeuge erstellt. Die beiden Liner wurden vereinfacht als Ebenen angenommen. Unter Berücksichtigung von Wellenteilung und Wellenhöhe wurde zunächst eine Sinusfunktion definiert, die dann zur Erzeugung der Welle extrudiert wurde:

$$Y(x) = 1,225 \sin\left(\frac{2\pi x}{6,4}\right).$$

Die Dicke der Liner und der Welle wurde über die Dicke der Schalenlemente entsprechend der jeweiligen Rohpapiere definiert. Um die Geometrie für unterschiedliche Rillpositionen parallel zur Welle nicht jeweils neu erzeugen zu müssen, wurde die Welle länger gestaltet als die Liner und je nach Bedarf relativ zu den Linern verschoben. Die äußeren Abmessungen der erzeugten Wellpappengeometrien sind in Tabelle 13 aufgeführt.

Tabelle 13: Äußere Abmessungen der erzeugten Wellpappengeometrien in LS-PrePost

	Länge in mm	Höhe in mm	Tiefe in mm
Parallel	40	3,05	3
Quer	20	3,05	13,8

Das Rillmesser wurde durch einen Zylinder mit dem Radius  $r = 0,5025$  mm modelliert, die Gegenzurichtung als einfache Platte mit einem Kanal, dessen Abmessungen den in Tabelle 11 aufgeführten Werten entsprechen. Die Profilansicht der Modellgeometrie für eine Bergrillung ist in Abbildung 56 dargestellt.

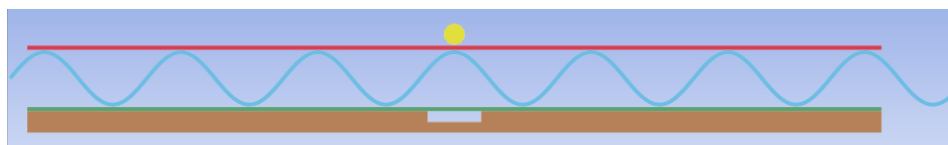


Abbildung 56: Profilansicht der Modellgeometrie einer Bergrillung in LS-PrePost

### Vernetzung der Geometrie

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 mit ca. 0,15 mm<sup>2</sup> feiner vernetzt wurden als die Welle mit ca. 0,25 mm<sup>2</sup>. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Liner sich bei Kontakt mit den Rillwerkzeugen möglichst gut an deren Kanten und Radien anpassen sollen. Die Vernetzte Geometrie einer Bergrillung ist in Abbildung 57 dargestellt.

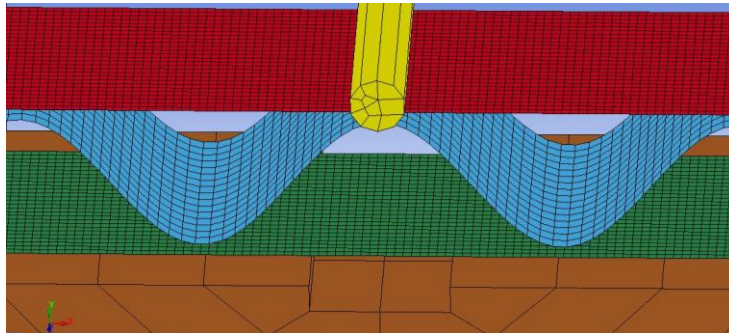


Abbildung 57: Vernetzte Geometrie einer Bergrillung

### Elemente

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. Das Schema eines vollintegrierten Schalenelements mit fünf Integrationspunkten durch die Dicke ist in Abbildung 58 dargestellt. Ein unterintegriertes Element verfügt demgegenüber lediglich über eine zentrale Integrationsachse.

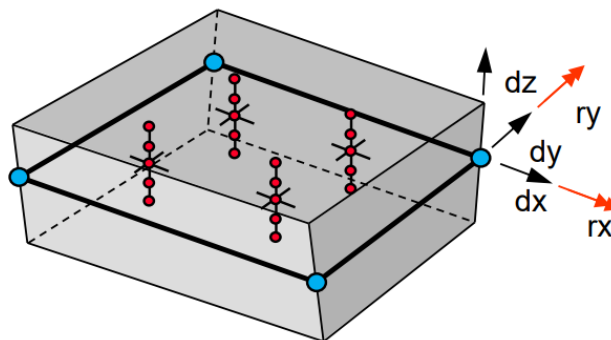


Abbildung 58: Vollintegriertes Schalenelement (Typ 16) [30]

Für eine korrekte Abbildung des lokale Materialkoordinatensystems des Papiers (MD, CD, ZD) auf den Schalenelementen, wurden die Normalenvektoren der Schalenelemente sowie deren Hauptrichtungen angepasst. Die lokalen Material-

koordinaten einzelner Schalenelemente sind beispielhaft in Abbildung 59 dargestellt, dabei entspricht  $A = MD$ ,  $B = CD$  und  $C = ZD$ .

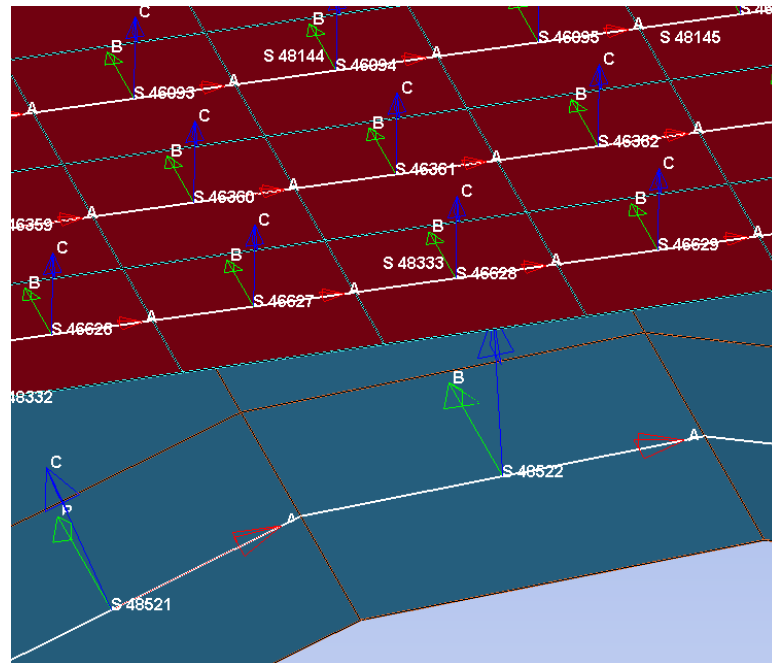


Abbildung 59: Lokale Materialkoordinatensysteme der Schalenelemente

#### Randbedingungen

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 unter Berücksichtigung der verwendeten Rillwerkzeuge festgelegt.

Um die Fixierung durch die Gummiederhalter 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. Die Randbedingungen der Parallelrillungen sind in Abbildung 60 und Abbildung 61 dargestellt.

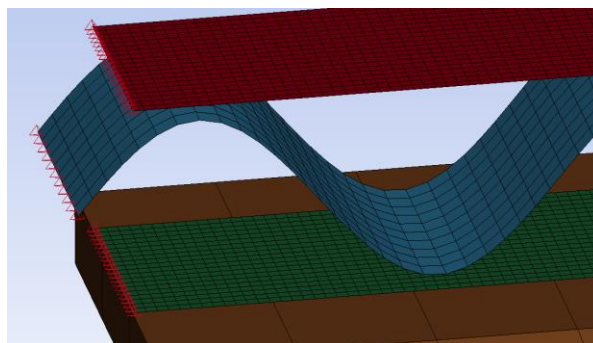


Abbildung 60: Fest eingespannte Knoten der CD-Ränder

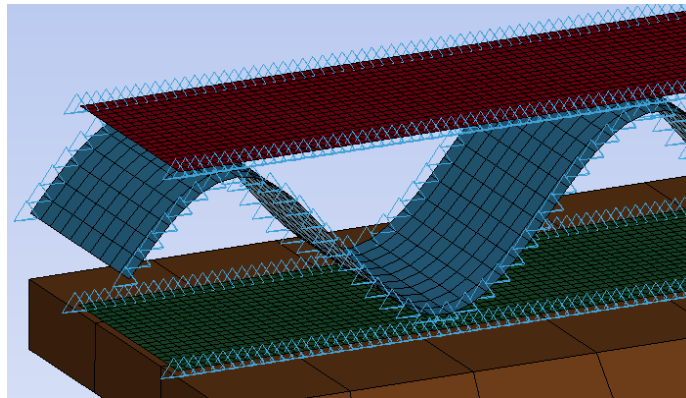


Abbildung 61: Knoten der MD-Ränder mit rotativer Fixierung und translatorischer Fixierung in CD

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 mit 20 mm vergleichsweise kurz ist.

**Parameter für das Materialmodell**

Das Materialmodell „274-PAPER“ wird in LS-PrePost über Materialkarten mit den notwendigen Parametern gefüllt. Eine ausgefüllte Materialkarte für den oberen Liner ist in Abbildung 62 dargestellt.

TITLE							
Top_Liner							
MID	RO	E1	E2	E3	PR21	PR32	PR31
11	6.940e-04	6378.0000	2267.0000	64.000000	0.1190000	0.0	0.0
G12	G23	G13	E3C	CC	TWOK		
1487.0000	20.000000	46.000000	0.5000000	20.000000	4.0000000		
S01	A01	B01	C01	S02	A02	B02	C02
11.800000	17.000000	226.00000	1460.0000	3.7000000	7.0000000	186.00000	203.00000
S03	A03	B03	C03	S04	A04	B04	C04
4.3000002	6.0000000	247.00000	375.00000	4.0999999	7.0000000	490.00000	0.0
S05	A05	B05	C05	PRP1	PRP2	PRP4	PRP5
1.7000000	3.0000000	557.00000	0.0	0.5000000	0.1333000	0.5000000	0.1333000
ASIG	BSIG	CSIG	TAU0	ATAU	BTAU		
0.0	0.0	0.0	1.4000000	9.0000000	2.0000000		

Abbildung 62: Ausgefüllte Materialkarte für den oberen Liner

Insbesondere Parameter in ZD, aber auch Schubspannungen in der Blattebene können nur begrenzt oder unter hohem Aufwand experimentell ermittelt werden. Einflüsse einiger Parameter in ZD wurden weitgehend vernachlässigt, während andere Parameter, die für den Algorithmus des Materialmodells relevant sind, auf Basis vorangegangener Arbeiten bestimmt bzw. angenommen wurden. Plastische Verformungen in ZD können durch Schalenelemente in LS-DYNA generell nicht abgebildet werden.

## 8.4 Ergebnisse des Modells

### Modellierung der Zug- und Druckversuche

Die durchgeführten Zug- und Druckversuche wurden jeweils anhand eines einfachen Modells unter Verwendung der ermittelten Materialparameter der Liniere nachgebildet. Ein Vergleich der jeweils erhaltenen Spannungs-Dehnungs-Kurven mit den experimentellen Daten ist in Abbildung 63 und Abbildung 64 dargestellt. Mit Ausnahme der Zugversuche in MD zeigten die Modelle eine gute bis sehr gute Übereinstimmung mit den Messungen.

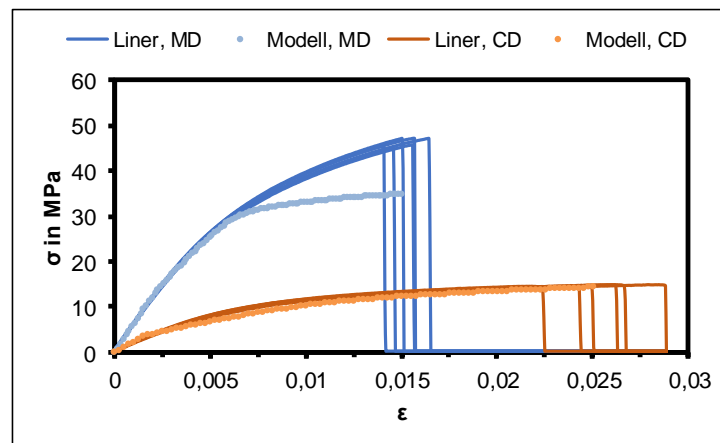


Abbildung 63: Gemessene und modellierte Spannungs-Dehnungs-Kurven der Zugversuche an den Linierepapieren

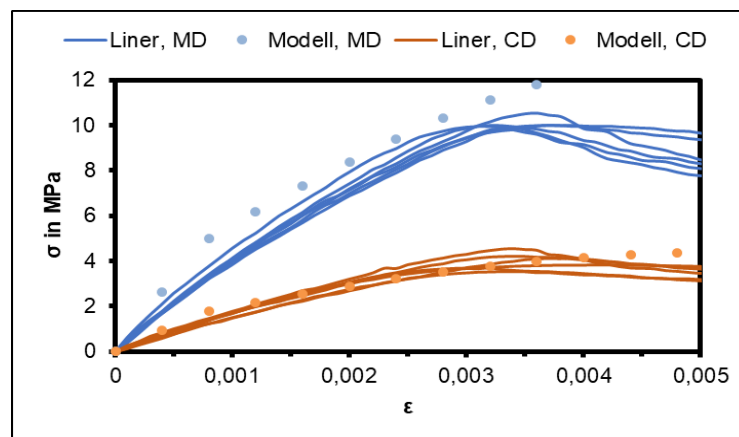


Abbildung 64: Gemessene und modellierte Spannungs-Dehnungs-Kurven der Druckversuche an den Linierepapieren

Während die modellierte Spannungs-Dehnungs-Kurve für die Zugversuche in CD nahezu vollständig mit den gemessenen Kurven übereinstimmt, weicht die modellierte Kurve in MD ab einer Dehnung von etwa 0,6 % deutlich von der gemessenen Kurve ab. Diese Abweichungen sind auf die Infolge der Querkontraktion auftretenden Druckspannungen in CD zurückzuführen. Die Druckspannungen in CD überschreiten dabei für mehrere Elemente die initiale Fließgrenze und führen dadurch zu zusätzlichen plastischen Deformationen im Modell.

**Qualitative  
Bewertung der  
modellierten  
Rillversuche**

Grundsätzlich zeigten die Modelle für die jeweiligen Rillpositionen der Parallelrillungen eine gute qualitative Übereinstimmung mit den Laborproben. In Abbildung 65, Abbildung 66 und Abbildung 67 werden unter Verwendung der Laborstanze erzeugte Rillproben für die Berg-, Tal und Zwischenrillung den jeweiligen modellierten Proben nach der Deformation gegenübergestellt. Korrespondierende Merkmale, hier vorwiegend Knicke in der Welle, wurden mit den gleichen Nummern gekennzeichnet.

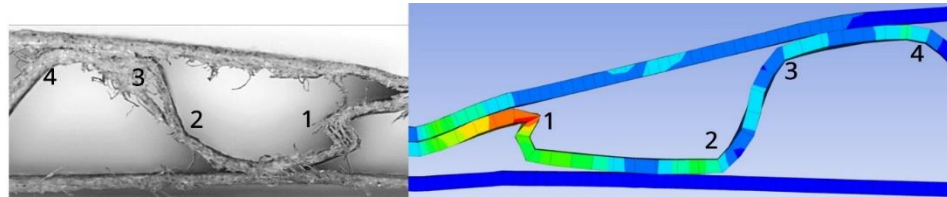


Abbildung 65: Vergleich der Deformationen in Probe und Modell einer Berggrillung inkl. effektiver plastischer Deformationen

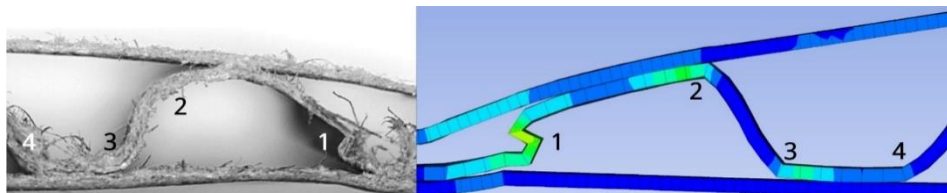


Abbildung 66: Vergleich der Deformationen in Probe und Modell einer Talrillung inkl. effektiver plastischer Deformationen

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 Wellpappe 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 Berggrillung. Die in der Praxis asymmetrische Rillwulst der Zwischenrillung ist im Modell lediglich angedeutet, wie aus Abbildung 67 hervorgeht.

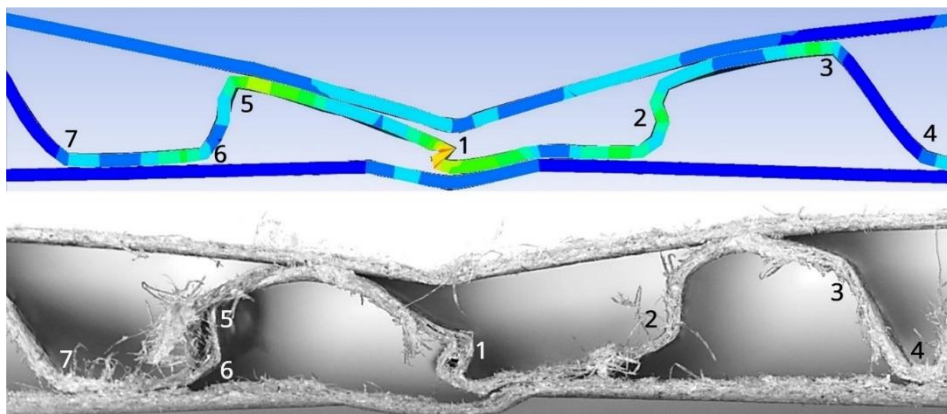


Abbildung 67: Vergleich der Deformationen in Probe und Modell einer Zwischenrillung inkl. effektiver plastischer Deformationen



---

Für die Rillungen quer zur Welle waren visuelle Vergleiche der Deformationen in Welle und Linern nicht ohne Zerstörung der Proben möglich, daher wurden Messungen des Profilometers für qualitative Vergleiche herangezogen. Das Modell der Querrillung zeigt, dass eine Wellenflanke im Verlauf des Rillprozesses mehrfach geknickt wird und sich dabei in mehreren Lagen übereinander faltet, wie in Abbildung 68 dargestellt ist. Das aufgebaute Material wird durch das Rillmesser in den unteren Liner gedrückt und erzeugt periodisch wiederkehrende plastische Verformungen.

In Folge der Querrillung treten dabei entlang der gesamten Länge der modellierten Probe auf in beiden Richtungen bleibende Veränderungen der Wellenhöhe auf.

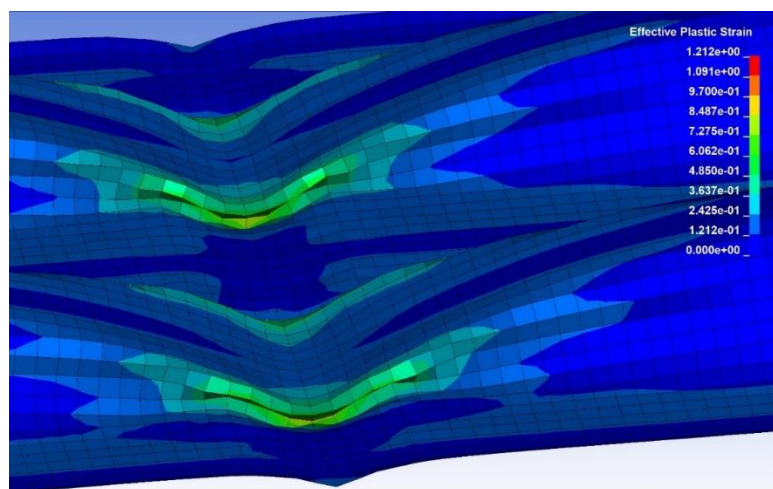


Abbildung 68: Mehrfach geknickte Wellenflanken im Modell einer Querrillung inkl. effektiver plastischer Deformationen

Abbildung 69 zeigt eine Gegenüberstellung eines gemessenen Höhenprofils des unteren Liners einer Querrillung und des korrespondierenden Modells, das unter Verwendung einer ähnlichen Farbskala dargestellt wird.

Das modellierte Höhenprofil der Rillwulst weist dabei den gleichen qualitativen Verlauf auf wie die gemessenen Profile, was nahelegt, dass die im Modell auftretenden Deformationen weitgehend den Deformationen in der Praxis entsprechen.

---

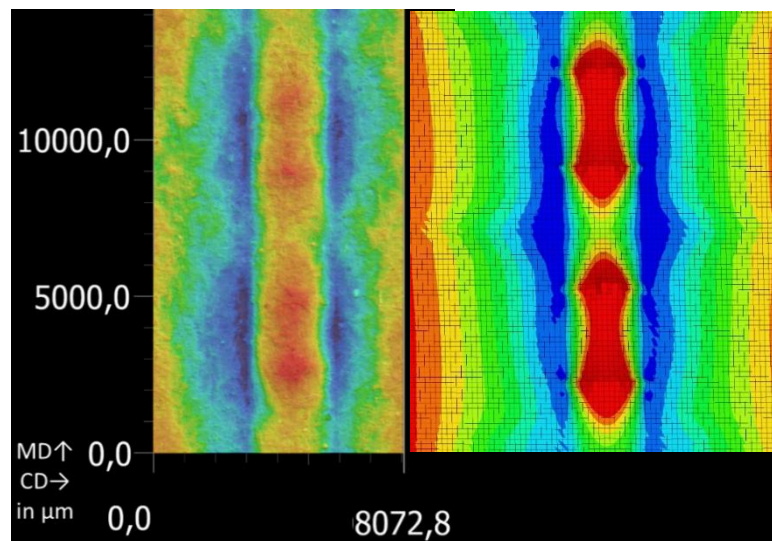


Abbildung 69: Gegenüberstellung der gemessenen und modellierten Höhenprofile der Rillwulst einer Querrillung

#### Diskussion des Modells im Hinblick auf Rillprozesse in der Verarbeitung

Mit Blick auf die Optimierung des Verarbeitungsprozesses und des Materialeinsatzes sollen die beiden „Extremfälle“ der Berg- und Talrillung näher betrachtet werden.

In Abbildung 70 sind für beide Fälle die modellierten MD-Spannungen eines Elements im oberen Liner, welches sich mittig unterhalb des Rillmessers befindet, über den Vorschubweg abgebildet. Es zeigt sich, dass die MD-Spannungen im Verlauf der Talrillung nicht nur einen deutlich größeren initialen Anstieg aufweisen, sondern darüber hinaus auch ein höheres globales Maximum als bei der Berggrillung. Das erste lokale Maximum der Talrillung spiegelt dabei die Stelle innerhalb des Vorschubwegs wider, ab der sich der untere Liner unter Ausbildung einer Rillwulst erstmals plastisch verformt.

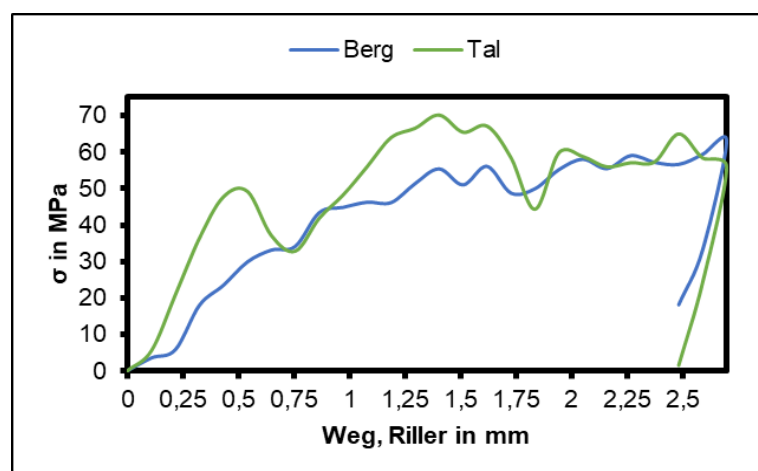


Abbildung 70: Modellierete MD-Spannungen eines Elements unterhalb des Rillmessers im Verlauf



In Abbildung 71 und Abbildung 72 sind die MD-Spannungen im oberen Liner einer Berg- und Talrillung einander am globalen Spannungsmaximum der Talrillung (ca. 1,28 mm Vorschub) gegenübergestellt.

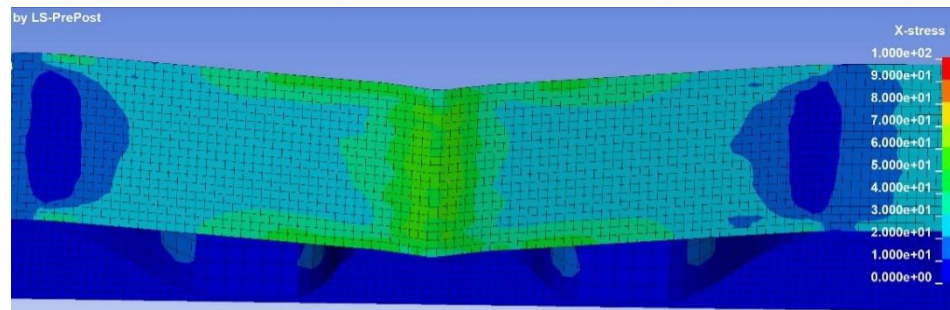


Abbildung 71: Modellierte MD-Spannungen (MPa) im oberen Liner einer Berggrillung bei 1,28 mm Rillmesservorschub

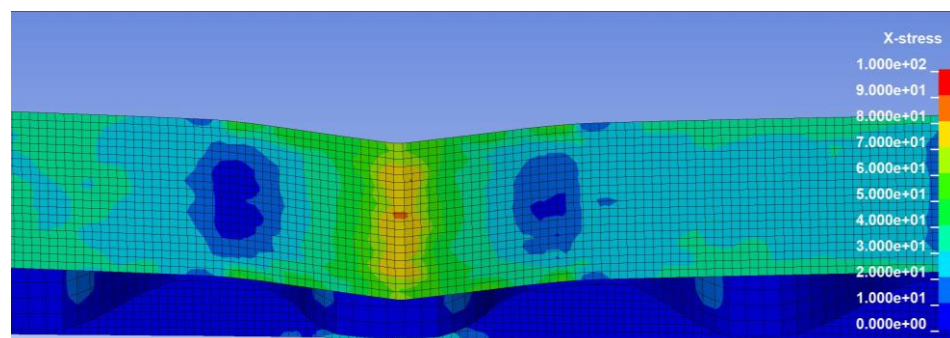


Abbildung 72: Modellierte MD-Spannungen (MPa) im oberen Liner einer Talrillung bei 1,28 mm Rillmesservorschub

Ob die häufigeren Deckenrisse bei der Talrillung vorwiegend durch das höhere globale Maximum oder den höheren initialen Anstieg der Spannungen verursacht werden, konnte auf Basis des Modells nicht geklärt werden.

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 etwaiger zusätzlicher Faserstoffeinsatz zur Vermeidung von Deckenrissen könnte bei gleichzeitig konsistenten Rill- und Faltergebnissen eingespart werden. Zwischenrillungen sollten schon allein aufgrund ihrer asymmetrischen Ausbildung (vgl. Abbildung 67) 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.

Für die Modellierung größerer Wellpappenstrukturen eignet sich das Modell jedoch aufgrund des hohen Detailgrads und der dadurch bedingten hohen Rechenzeit nur eingeschränkt. Für eine makroskopische Beschreibung der mechanischen Eigenschaften von Wellpappen bieten sich Homogenisierungsansätze als effiziente Option an.

---

## 8.5 Zusammenfassung

---

### **Bewertung der erstellten Modelle**

Moderne Simulationsprogramme ermöglichen unter Verwendung umfassender Materialmodelle mittlerweile eine vergleichsweise einfache Modellierung von Umformprozessen in der Papierverarbeitung.

Die erstellten Modelle zur Abbildung des Stanzrillens einwelliger Wellpappen zeigten bei den auftretenden Deformationen eine gute qualitative Übereinstimmung mit den Laborproben. Die Finite-Elemente-Methode eignet sich zur Analyse geometrischer Einflussfaktoren unter nichtlinearen Bedingungen. Dementsprechend sind die Modelle in besonderem Maße für relative Vergleiche zur Optimierung geometrischer Parameter geeignet. Dabei kann es sich um die Geometrien oder die Vorschubwege der Rillwerkzeuge handeln, die angelegten Rillkräfte oder die Struktur der Wellpappe selbst.

Darüber hinaus können geometrisch bedingte Schwachstellen im Werkstück anhand der Modelle zuverlässig identifiziert und lokales Versagen prognostiziert werden. Für quantitative Vorhersagen oder Vergleiche der auftretenden Materialspannungen sind die Rillmodelle aufgrund der Randbedingungen nicht geeignet. Grenzbelastungen der Struktur, beispielsweise der Liner, könnten jedoch ebenfalls anhand relativer Vergleiche abgeschätzt werden.

---

### **Empfehlungen auf Basis des Modells**

Für eine ordentliche materialwissenschaftliche Beschreibung von Papierwerkstoffen sind neue, standardisierte Prüfverfahren zur Ermittlung verschiedener Materialparameter wie etwa Querkontraktionszahlen, Schubfestigkeiten in der Blattebene sowie Schubfestigkeiten senkrecht zur Blattebene erforderlich. Übliche papiertechnische Vergleichswerte finden hier keine Anwendung.

Im Hinblick auf die Verarbeitung zeigt sich anhand des Modells, dass für die Parallelrillung eine Einbringung der Rilllinie auf dem Wellenberg mit der geringsten Beanspruchung des Werkstücks einhergeht. Die entsprechende Positionierung der Rillwerkzeuge würde eine bestmögliche Vermeidung von Deckenrissen, eine ggf. damit einhergehenden Optimierung des Materialeinsatzes und allgemein konsistente Rillergebnisse sicherstellen

---

## 9 Erstellung von Leitfäden

Ziel des Arbeitspakets war die Zusammenfassung aller Erkenntnisse aus den vorherigen Arbeitspaketen und die Erstellung eines kurzen und anwenderfreundlichen Leitfadens in Form von Anwendungsempfehlungen. Es wurden drei Kernaspekte formuliert, die für eine gute Rillbarkeit von Wellpappen zu beachten sind (vgl. Anhang A.1). Dieser Leitfaden wird nach Projektende öffentlich zugänglich auf der Homepage der PTS zur Verfügung stehen.

### Zusammenfassung

Es existiert ein Datensatz, der die Zusammenhänge zwischen:

- den Materialparametern an der Wellpappe und den Wellpappenrohpapieren,
- verschiedenen Rillparametern und
- den objektiven und subjektiven Rillqualitäten

aufzeigen kann. Mit Hilfe dieser Zusammenhänge konnte dieser Leitfaden ausgearbeitet werden, welcher für einwellige Wellpappen Anwendung finden kann. Die gewonnenen Erkenntnisse sind kurz und prägnant zusammengefasst und geben Hinweise für eine gute Verarbeitung einer Wellpappe im Prozess des Rillens mit dem Fokus auf objektive Rillqualitäten wie den Faltfaktor.

Neben den Kriterien, die im Leitfaden zusammengefasst sind, existiert nun auch ein durch die PTS anwendbares Tool auf Basis von Künstlichen Neuronalen Netzen zur Vorhersage dieser Eigenschaften in der Software Neural Designer.

### Leitfaden

Zur Umsetzung optimaler Rillungen sind **die folgenden drei Kriterien zu beachten** und die Erkenntnisse der Forschungsergebnisse umzusetzen:

1. **Materialauswahl**
2. **Rillgeometrie**
3. **Rillposition**



### 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. Die Analyse der Schadensfälle hat aufgezeigt, dass insbesondere **Materialien mit hohem Dehnvermögen** zu stabilen Rillprozessen führen.

---

**Fokussierung auf die Rillgeometrie** Die Analysen 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.

---

**Rillung auf dem Wellenberg** Die messtechnischen Untersuchungen haben 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.

---

**Fazit** Eine Kombination aus Wellpappenrohpaperen mit einer hohen Dehnfähigkeit, auf das Material abgestimmte Rillparameter und die Rillung auf dem Wellenberg ist zur Umsetzung von Rillungen einer hohen Qualität zielführend.

---


## Literatur

- 1 Deutsches Institut für Normung e.V. Prüfung von Wellpappe – Rillungen. 85.080.30. Aufl. Berlin: Beuth Verlag; 2021 April 2021 [Stand: 17.08.2022].
- 2 Müller Paul. Messmittelfähigkeit von Systemen zur Oberflächenstrukturanalyse [Bachelorarbeit]. Leipzig: Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig.
- 3 Lukas Pescoller. CORRCHECK Manual Deutsch: v1.5.4.docx; 2023.
- 4 Verband der Wellpappen-Industrie e.V., Hrsg. Prüfkatalog für Verpackungen aus Wellpappe: Prüfmerkmale und Fehlerbewertung für Packmittel aus Wellpappe. Darmstadt; 01.2021.
- 5 Hünninger J. Charakterisierung der Einflussfaktoren und des Umformprozesses beim Reliefprägen von Karton [Dissertation]. Dresden: Technische Universität Dresden; 2021.
- 6 Deutsches Institut für Normung e.V. Papier und Pappe – Bestimmung der flächenbezogenen Masse. Berlin: Beuth Verlag; 2020. (Bd. 85.060) Mai 2020 [Stand: 17.08.2022].
- 7 Deutsches Institut für Normung e.V. Wellpappe – Bestimmung der Dicke von Wellpappe (ISO 3034:2011). 2. Aufl. Berlin: Beuth Verlag; 2016. (Bd. 85.080.30) August 2016 [Stand: 17.08.2022].
- 8 Deutsches Institut für Normung e.V. Wellpappe – Bestimmung des Kantenstauchwiderstandes (Verfahren für ungewachste Kanten) (ISO 3037:2013). 3. Aufl. Berlin: Beuth Verlag; 2013. (Bd. 85.060) Dezember 2013 [Stand: 17.08.2022].
- 9 Deutsches Institut für Normung e.V. Wellpappe – Bestimmung des Flachstauchwiderstandes (ISO 3035:2011). 4. Aufl. Berlin: Beuth Verlag; 2012. (Bd. 85.080.30) Februar 2012 [Stand: 17.08.2022].
- 10 Deutsches Institut für Normung e.V. Prüfung von Papier, Karton und Pappe – Bestimmung der Biegesteifigkeit nach der Balkenmethode. 2. Aufl. Berlin: Beuth Verlag; 2014. (Bd. 85.060) August 2014 [Stand: 17.08.2022].
- 11 Deutsches Institut für Normung e.V. Pappe – Bestimmung der Berstfestigkeit (ISO 2759:2014). 4. Aufl. Berlin: Beuth Verlag; 2014. (Bd. 85.060) Oktober 2014 [Stand: 17.08.2022].
- 12 Deutsches Institut für Normung e.V. Prüfung von Pappe – Durchstoßprüfung – Teil 1: Prüfung mit dem Pendelschlagwerk. 3. Aufl. Berlin: Beuth Verlag; 2014. (Bd. 85.060) Dezember 2014 [Stand: 17.08.2022].
- 13 Deutsches Institut für Normung e.V. Packstoffe – Wellpappe – Teil 1: Anforderungen, Prüfung. Berlin: Beuth Verlag; 2021. (Bd. 85.080.30) 01.2021 [Stand: 17.08.2022].
- 14 Deutsches Institut für Normung e.V. Prüfung von Pappe – Rillungen – Teil 3: Bestimmung der technischen Qualität. Berlin: Beuth Verlag; 2008. (Bd. 85.060) Mai 2008 [Stand: 17.08.2022].
- 15 PD Dr. Robert Feustel. Methodenportal Uni Leipzig; 2020/2021.
- 16 Deutsches Institut für Normung e.V. Prüfung von Faltschachtelkarton – Rillungen Teil 1: Labormäßige Herstellung von Proberillungen. Berlin: Beuth Verlag; 2021. (Bd. 85.060) Dezember 2021 [Stand: 17.08.2022].
- 17 Erik W. 5.3.3 Rilllinien und die einzelnen Vorgänge beim Rillen; 2019. Verfügbar unter: <https://mediencommunity.de/content/533-rilllinien-und-die-einzelnen-vorg%C3%A4nge-beim-rillen>.

- 18 Jeurink Jürgen. Kalkulator Wellpappe. Verfügbar unter: <https://www.jeurink.eu/technische-daten/kalkulator-wellpappe/>.
- 19 C&K Extrusions Ltd. Size Calculator [Stand: Februar 2023]. Verfügbar unter: [www.manmat.com/calculator](http://www.manmat.com/calculator).
- 20 CITO-Abakus: Wellpappe: Rechenhilfe Rillzurichtung. Verfügbar unter: [https://www.cito.de/de/DE/boxline/rillzurichtungen/cito-abakus\\_online/wellpappe/](https://www.cito.de/de/DE/boxline/rillzurichtungen/cito-abakus_online/wellpappe/).
- 21 G-Tape setting calculation. Verfügbar unter: [https://www.daiso-net.com/en/products/diecut/g-tape\\_setting\\_calculation/corrugated-board](https://www.daiso-net.com/en/products/diecut/g-tape_setting_calculation/corrugated-board).
- 22 HANS KOLB Wellpappe GmbH + Co. KG. Arbeitsanweisung Rilllinien- / Zurichtungskombinationen; 24.5.2023.
- 23 SCHELLING AG. Merkblatt für den Stanzformenbau; 10.5.2023.
- 24 Stefan Rost. Errechneten Rillwerten für die einzelnen B-Wellen; 26.9.2022.
- 25 Whitsitt W. J., McKee R. C. (1966): Investigation of an Improved Device for Evaluating the Cracking Potential of Linerboard. IPC Project 1108–29.
- 26 Heine. Untersuchungen über die Rillbarkeitseigenschaften von Faltschachtelkartonen. Verpackungsrundschau: 9–14.
- 27 Q. S. Xia, M. C. Boyce, und D. M. Parks, „A constitutive model for the anisotropic elastic-plastic deformation of paper and paperboard“ in International Journal of Solids and Structures Volume 39, Issue 15, July 2002, Pages 4053-4071. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(02\)00238-X](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(02)00238-X)
- 28 M. Nygård, M. Just, und J. Tryding, „Experimental and numerical studies of creasing of paperboard“, Int J Solids Struct, Bd. 46, Nr. 11–12, S. 2493–2505, Juni 2009, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2009.02.014.
- 29 Livermore Software Technology (LST), „LS-DYNA ® KEYWORD USER’S MANUAL VOLUME II - Material Models“, 2022. Verfügbar unter: [www.lstc.com](http://www.lstc.com)
- 30 A. Haufe, K. Schweizerhof, und P. Dubois, „Properties & Limits: Review of Shell Element Formulations Developer Forum“, Filderstadt/Deutschland: Developer Forum 2013.

## Anhang A.1

IGF 21804 „Rillen von Wellpappe“



**Leitfaden zur Umsetzung qualitätsgerechter Rillungen an einwelligen Wellpappen**

Es existiert ein Datensatz, der die Zusammenhänge zwischen:


- den Materialparametern an der Wellpappe und den Wellpappenrohpapieren,
- verschiedenen Rillparametern und
- den objektiven und subjektiven Rillqualitäten

aufzeigen kann. Mit Hilfe dieser Zusammenhänge konnte dieser Leitfaden ausgearbeitet werden, welcher für einwellige Wellpappen Anwendung finden kann. Die gewonnenen Erkenntnisse sind kurz und prägnant zusammengefasst und geben Hinweise für eine gute Verarbeitung einer Wellpappe im Prozess des Rillens mit dem Fokus auf objektive Rillqualitäten wie den Faltfaktor.

Neben den Kriterien, die im Leitfaden zusammengefasst sind, existiert nun auch ein durch die PTS anwendbares Tool auf Basis von Künstlichen Neuronalen Netzen zur Vorhersage dieser Eigenschaften in der Software Neural Designer.

Zur Umsetzung optimaler Rillungen sind **die folgenden drei Kriterien zu beachten** und die Erkenntnisse der Forschungsergebnisse umzusetzen:

1. **Materialauswahl**
2. **Rillgeometrie**
3. **Rillposition**



<b>Einfluss der Materialparameter auf das Rillergebnis</b>	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. Die Analyse der Schadensfälle hat aufgezeigt, dass insbesondere <b>Materialien mit hohem Dehnvermögen</b> zu stabilen Rillprozessen führen.
<b>Fokussierung auf die Rillgeometrie</b>	Die Analysen haben gezeigt, dass die Korrelationen der Rillergebnisse insbesondere zu den Rillparametern stark ausgeprägt waren. Demnach sollten <b>Rillmesser und, wenn eingesetzt, Gegenzurichtung immer dem Material angepasst</b> werden.
<b>Rillung auf dem Wellenberg</b>	Die messtechnischen Untersuchungen haben gezeigt, dass der Ort der Rillung einen Einfluss auf die Rillqualität hat. Mit Hilfe des FEM-Modells war es möglich zu definieren, dass <b>Rillungen auf dem Wellenberg</b> die für das Material schonendste Verarbeitungsform sind.
<b>Fazit</b>	Eine Kombination aus Wellpappenrohpapieren mit einer hohen Dehnfähigkeit, auf das Material abgestimmte Rillparameter und die Rillung auf dem Wellenberg ist zur Umsetzung von Rillungen einer hohen Qualität zielführend.

