

Toma Schneider

PTS-Forschungsbericht IK-VF 190003

Erweiterung der Prognosefähigkeit von mechanischem Strukturverhalten,
durch Bestimmung werkstoffmechanischer Kennwerte an
faserbasierten Werkstoffen mittels neuartiger Messmethodik

Krümmungswiderstandsmessung / Curvature Resistance Test - CRT

Ansprechpartner

Toma Schneider

Telefon: 03529-551 714

E-Mail: toma.schneider@ptspaper.de

T. Schneider:

Erweiterung der Prognosefähigkeit von mechanischem Strukturverhalten, durch Bestimmung werkstoffmechanischer Kennwerte an faserbasierten Werkstoffen mittels neuartiger Messmethodik

(Krümmungswiderstandsmessung nach dem Ringprinzip)

Curvature Resistance Test according to the Ring Method - CRT

PTS-Forschungsbericht **IK-VF 190003**

November 2021

Papiertechnische Stiftung (PTS)
Pirnaer Straße 37
D - 01809 Heidenau
www.ptspaper.de

Download-Information:

Diese Veröffentlichung steht auf der Homepage der PTS zum Download bereit:
www.ptspaper.de/forschungsdatenbank

Ansprechpartner:

Toma Schneider
Tel. (03529) 551-714
toma.schneider@ptspaper.de

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Ergebnisse wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens VF 190003 gewonnen, das im Programm zur "Förderung von Forschung und Entwicklung bei Wachstumsträgern in benachteiligten Regionen" mit finanziellen Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) über den Projektträger EuroNorm Gesellschaft für Qualitätssicherung und Technologie mbH aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert wurde. Dafür sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Unser Dank gilt außerdem der SIG Combibloc GmbH für die Probenbereitstellung und für die freundliche Unterstützung bei der Projektdurchführung.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Abstract	4
3	Einleitung.....	7
4	Umformen und Eigenschaften von Karton-Verbundwerkstoffen	10
5	Umsetzung der neuartigen Messmethode Krümmungswiderstand.....	14
6	Charakterisierung des plastischen Biegens und Faltens	19
7	Parametergenerierung für makroskopische Materialmodelle	24
8	Validierung der Materialparameter	29
9	Validierung per Makrostrukturmodell	31
10	Fazit und Ausblick.....	36
	Literatur.....	37

1 Zusammenfassung

Thema	Bereitstellung mechanischer Materialparameter zum Charakterisieren und Parametrisieren der Umformeigenschaften von papierbasierten Verbundwerkstoffen auf Basis der neuen Messmethodik „Krümmungswiderstandsmessung - Curvature Resistance Test CRT.“
Ausgangssituation	Das Biegen und Falten sind die am Häufigsten angewandten Umformprozesse zur Herstellung dreidimensionaler Makrostrukturen aus flächigen, papierbasierten Halbzeugen. Eine Optimierung bestehender und Erschließung neuer Anwendungsgebiete bedarf daher, in Verbindung mit rechnergestützten Konstruktionswerkzeugen, mechanischen Verhaltensmodellen unter plastischer Materialbeanspruchung. Für Karton und papierbasierte Verbundmaterialien existieren weder einsatzbereite Materialmodelle noch zugehörige Messprinzipie.
Zielstellung	<p>Das Forschungsvorhaben zielt auf eine grundhaft verbesserte Möglichkeit zur Materialdimensionierung und Biegestellenauslegung von gefalteten Kartonstrukturen auf Basis materialwissenschaftlich und simulativ begründeter Werkzeuge unter dem Gebot eines drastisch verringerten Materialeinsatzes. Dazu ist ein vereinfachtes, das äußere Umformverhalten beschreibende makroskopische Materialmodell zu entwickeln, welches das Belastungsverhalten unter plastischer Biegebeanspruchung einschließlich innerer Strukturbrüche wiedergeben kann.</p> <p>Zur Parametrisierung des Modells wird nachfolgend eine neue Messmethodik entwickelt, per Prüfstand praktisch erprobt und durch numerische Modelle, in Form von FEM-Simulationen, im Abgleich mit Experimenten verifiziert.</p>
Materialmodell für Karton und Verbunde	Das entwickelte makroskopische Materialmodell dient dem Aufbau und der Untersuchung von Makrostrukturen unter äußerer Lasteinwirkung. Dazu ist es erforderlich, das Verhalten unter Zug-, Druck-, Biege- und Schubbeanspruchung abzubilden. Karton und darauf basierende Verbundwerkstoffe besitzen ein orthotropes und vorzeichenabhängiges Materialverhalten. Es ist nicht möglich, die unterschiedlichen Beanspruchungsarten mit nur einem makroskopischen Modell abzubilden. Daher besteht ein Standard-Parametersatz aus 16 lastspezifischen Teilmodellen. In der praktischen Anwendung und bei der Umformung durch Biegen und Falten kann die Belastung meist auf eine Hauptbeanspruchung reduziert und als einachsiger Spannungszustand abgebildet werden. Dieses Vorgehen wurde erfolgreich bei der Parametererhebung und Parametrierung von Makromodellen erprobt.

Messmethodik Krümmungswiderstand nach dem Ringprinzip

Zur Parametererhebung wurde ein neues Messprinzip entwickelt. Dabei wird ein aus einem langen Probestreifen gebildeter Ring kontinuierlich im Durchmesser verkleinert und die Übertragungsfunktion von Drehmoment zu Krümmung aufgezeichnet. Die mit Messgliedern versehene Einspannung des einen Streifenendes ist möglichst ortsnah an der Führung des anderen Streifenendes platziert, welches nachfolgend einem gesteuerten Abzug zugeführt wird. Diese Anordnung ermöglicht in Abgrenzung zu bestehenden Anordnungen die Realisierung großer Krümmungen mit geringen Krümmungsgradienten in Biegebalkenrichtung, bei geringen Verformungsanteilen aus Querkraftschub sowie das Aufbringen großer plastischer Krümmungen.

Prüfstand Krümmungswiderstand

Zur Umsetzung der neuen Messmethodik wurde eine Versuchseinrichtung entwickelt, mit welcher Karton und Verbundmaterialien mit Dicken von 0,3 bis 0,7 mm hinsichtlich ihrer plastischen Biegeeigenschaften und des lokalen Falzens parametrisiert werden können. Dazu sind Probestreifen mit 60 mm Breite und in Abhängigkeit ihrer Elastizität mit circa 500 bis 1.500 mm Länge erforderlich. Durch eine aktive Probenausrichtung wird ein seitliches Verlaufen der Probe bei Abzug minimiert. Die entwickelte Software zur Steuerung und Datenverarbeitung unterstützt den Bediener bei der Nutzung der Messeinrichtung und legt den Messschrieb als Datei im Tabellenformat ab.

Charakterisierung des plastischen Biegens und Falzens per CRT

Mittels Krümmungs-Drehmoment-Kurve des Curvature-Resistance-Tests (CRT) können flächige Materialien hinsichtlich ihres plastischen Biegeverhaltens charakterisiert werden. Von der Kurve können die elastische Grenzkrümmung sowie die maximale plastische Krümmung ohne lokalen Biegebruch und die zugehörigen Biegeradien abgeleitet werden. Eine Normierung der Kurve auf das maximale Biegemoment bei Biegebruch ermöglicht einen Vergleich unterschiedlich steifer und dicker Materialien hinsichtlich ihres Umformverhaltens bei weggesteuerten Zwangsumformungen. Dabei ist eine Einordnung nach Art des Biegebruches zwischen den Grenzen flächiges Knautschen und lokales Brechen möglich.

Parameterbereitstellung für makroskopische Materialmodelle

Die makroskopischen Materialmodelle zur Beschreibung innerer Beanspruchung werden auf Basis der äußeren Lastreaktionen und inverser Methoden berechnet. Die Kombination von ermitteltem innerem Beanspruchungsverhalten und homogenem Materialaufbau weist dabei eine vergleichbare äußere Lastreaktionen wie das abzubildende Material mit real mehrlagigem, inhomogenem Aufbau auf. Insbesondere die inneren Strukturänderungen beim Übergang vom Biegen zum Falten können so indirekt abgebildet werden. Die Berechnungsalgorithmen wurden als Software in Form von Konvertierungstools umgesetzt. Auf der Grundlage eines Krümmungs-Drehmoment-Verlaufes und der Materialdicke wird die Spannungs-Dehnungs-Kurve des makroskopischen Ersatzmaterialverhaltens für Biegung berechnet und in einem für die FEM Software ANSYS®-APDL lesbaren Format bereitgestellt. Auf Basis eines Mesostrukturmodells und einer Ähnlichkeitshypothese können auf Basis des Krümmungsverhaltens und des Zugversuches alternative Spannungs-Dehnungs-Kurven für plastische Druckbeanspruchung bereitgestellt werden.

**Erfolgreiche
Validierung
per Minimalmo-
delle der Prüfver-
fahren**

Es wurden FEM-Modelle der Prüfanordnungen von Krümmungswiderstand und Biegesteifigkeitsmessung entwickelt. Mit diesen wurden auf Basis des Ersatzmaterialverhaltens die Arbeitsdiagramme für virtuelle Materialprüfungen berechnet. Im Abgleich mit dem Experiment konnte eine gute Prognosefähigkeit des Umformverhaltens beim Biegen und Falten nachgewiesen werden.

**Prognose des
mechanischen
Verhaltens einer
Makrostruktur**

Die Eignungen von Messmethodik und lokaler, lastabhängiger Materialparameterauswahl konnten durch erfolgreichen Abgleich eines experimentellen Stauchversuchs einer Getränkepackung mit der numerischen Prognose auf Basis der berechneten Materialparameter nachgewiesen werden.

2 Abstract

Subject	Providing mechanical material parameters to characterize and parameterize the forming properties of paper-based composites based on a new measurement methodology called Curvature Resistance Test – CRT.
Initial situation	Bending and folding are the most frequently applied forming processes to produce three-dimensional macrostructures from flat, paper-based semi-finished products. Optimization of existing and development of new application areas requires, in conjunction with computer-aided design tools, mechanical behaviour models under plastic material stress. For cardboard and paper-based composite materials, neither ready-to-use material models nor corresponding measurement principles exist.
Objective	<p>The research project aims at a fundamentally improved possibility for material dimensioning and bending line design of folded cardboard structures on the basis of material-scientific and simulative justified tools and under the requirement of a drastically reduced material input. For this purpose, a simplified macroscopic material model describing the external forming behaviour is to be developed, which can reproduce the load behaviour under plastic bending stress including internal structural fractures.</p> <p>To parameterize the model, a new measurement methodology is developed, tested in practice on a test rig and verified by numerical models in the form of FEM simulations compared with experiments.</p>
Material model for cardboard and composites	The macroscopic material model developed is used to build and investigate macrostructures under external load. For this purpose, it is necessary to represent the behaviour under tensile, compressive, bending and shear loads. Cardboard and composite materials based on it show an orthotropic and sign-dependent material behaviour. It is not possible to represent the different types of stress with one macroscopic model, therefore a standard parameter set consists of 16 load-specific sub-models. In practical applications and in forming by bending and folding, the load can usually be reduced to a main stress and represented as a uniaxial stress state. This procedure has been successfully tested in the parameter collection and parameterization of macrostructure models.
Measurement methodology Curvature Resistance Test - CRT	A new measuring principle was developed for parameter collection. A ring formed from a long test strip is continuously reduced in size and the transfer function from torque to curvature is recorded. The clamping of one end of the strip, which is provided with measuring elements, is placed as close as possible to the guide rail of the other end of the strip, which is subsequently fed to a controlled haul-off. In contrast to existing arrangements, this arrangement makes it possible to realize large curvatures with low curvature gradients in the direction of the bending beam, with low deformation components from transverse force shear and to apply large plastic curvatures.

Test rig curvature resistance

To implement the new measurement methodology, a test facility was developed with which cardboard and composite materials with a thickness of 0.3 to 0.7 mm can be parameterized with regard to their plastic bending properties and local folding. For this purpose, test strips with a width of 60 mm and, depending on their elasticity, with a length of approximately 500 to 1500 mm are required. Active specimen alignment minimizes lateral movement of the specimen during pull-off. The control and data processing software developed supports the operator in the use of the measuring device and stores the measurement record as a file in table format.

Characterization of plastic bending and folding by CRT

By means of a curvature-torque curve, flat materials can be characterized with respect to their plastic bending behaviour. From the curve, the elastic limiting curvature as well as the maximum plastic curvature without local bending fracture and the associated bending radii can be derived. Normalization of the curve to the maximum bending moment at bending fracture enables a comparison of materials of different stiffness and thickness with respect to their forming behaviour during displacement-controlled forced deformation. A classification according to the type of bending fracture between the limits of flat crumpling and local fracture is thus possible.

Parameter generation for macroscopic material models

Based on the external load responses and inverse methods, a macroscopic material model is calculated to describe the internal stresses. The combination of the determined residual stress behaviour and homogeneous material structure exhibits a comparable external load behaviour as the real multilayer material. In particular, the internal structural changes during the transition from bending to folding can be indirectly represented in this way. The calculation algorithms were implemented as software in the form of conversion tools. Based on a curvature-torque curve and the material thickness, the stress-strain curve of the macroscopic equivalent material behaviour for bending is calculated and provided in a format readable by the FEM software ANSYS®-APDL.

Based on a meso structure model and a similarity hypothesis, alternative stress-strain curves for plastic compressive loading can be provided based on the curvature behaviour and the tensile test.

Successful validation per minimal models of material test procedures

FEM models of the test setup of curvature resistance and bending stiffness measurement were developed. These were used to calculate the working diagrams for virtual material tests based on the equivalent material behaviour. In comparison with the experiment, a good predictive ability of the forming behaviour during bending and folding was demonstrated.

Prediction of the mechanical behaviour of a macrostructure

The suitability of the measurement methodology and local load-dependent material parameter selection was demonstrated by comparing an experimental compression test of a beverage package with a numerical prediction model based on the calculated material parameters.

Acknowledgement

The research project VF 190003 was funded by the German Federal Ministry of Economic Affairs and Energy BMWi in the programme for the "Promotion of Research, Development and Innovation in disadvantaged areas" based on the decision of the German Parliament and carried out under the umbrella of Euro-Norm in Berlin. We would like to express our warm gratitude for this support.

Supported by:



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Energy

on the basis of a decision
by the German Bundestag

We would also like to express our thank to SIG Combibloc GmbH for providing proper samples as well as for supporting project performance.

3 Einleitung

Entwicklungs- tendenzen und Herausforderun- gen

Die heutige Papierindustrie zählt zu den Branchen, welche Energie- und CO₂-intensive Prozesse einsetzen [1]. Um die ambitionierten Klimaziele der EU zu erreichen, bedarf es nicht nur einer Energie-Reduktion bei der Herstellung des Halbzeuges Papier, sondern auch dessen zielgerichteten und effizienten Einsatzes. Des Weiteren wachsen die Qualitätsanforderungen in der Stückgutverarbeitung, einhergehend mit häufigen Produktwechseln (Industrie 4.0) und geringen Losgrößen. Dieses erfordert teils neue und deutlich flexiblere Fertigungsverfahren sowie auch beschleunigte und kostengünstigere Produktentwicklungen.

Ein primärer Baustein zur Bewältigung dieser Herausforderungen ist eine genaue Kenntnis des Verhaltens von Halbzeugen und darauf basierenden Produkten. Dies umfasst im Besonderen das Materialverhalten bei der Verarbeitung von mehrlagigen, faserbasierten Flachformgütern, wie beispielsweise Karton und Verbundmaterialien. Das Ziel eines effizienten Materialeinsatzes erfordert Kenntnisse zum mechanischen Strukturverhalten der aus Faserverbundwerkstoffen geformten Produkte, wie z.B. Verpackungen oder Bauteile für Leichtbaukonstruktionen [2]. In Abgrenzung zu anderen verarbeitenden Branchen, wie der Metall- und Kunststoffindustrie, findet bisher kaum eine gezielte Produktentwicklung mit Hilfe von computergestützten Entwicklungswerkzeugen (CAE) statt. Als eine wesentliche Ursache kann die unzureichende Verfügbarkeit einfacher Materialmodelle und zugehöriger Messprinzipie erkannt werden.

Bedarf an Prog- nosemodellen

Für die Distribution und Konsumtion von Konsumgütern werden häufig selbsttragende Verpackungsstrukturen aus Faserverbundwerkstoffen (z.B. Verbundkartone mit Kunststoffbarriere) eingesetzt. Zum Sichern einer reproduzierbaren Geometrieausbildung beim Formen der Verpackung erfolgt eine Faltlinienvorbereitung in Form des Einbringens von Rilllinien. Das Ziel der nachfolgenden maschinellen Umformprozesse sollte eine plastische Umformung entlang der Faltlinien bei möglichst nur elastischer Verformung der angrenzenden Bereiche sein. Dies ist in der Realität durch Restriktionen wie Bauraum, Zugänglichkeit und Ausbringung nur ungenügend realisierbar. Des Weiteren sind die durch Faltpattern definierten Mechanismen oftmals überbestimmt und erfordern zum Ausformen der Zielgeometrie auch plastische Verformung außerhalb der Faltlinien. Diese plastischen Verformungen können die Tragfähigkeit der Verpackung vermindern und auch ein lokales Materialversagen durch Bruch von Barrieren verursachen. Ein Lokalisieren und Quantifizieren der Beanspruchung ist bei komplexen Strukturen nicht ohne weiteres möglich, hier können Prognosemodelle auf Basis von CAE-Werkzeugen unterstützen. Durch numerische Simulationen kann die Materialbeanspruchung während der Umformung und dem Gebrauch prognostiziert werden, Variantenstudien erfolgen oder günstige Randbedingungen in Form von Werkzeug-Geometrien synthetisiert werden. Diese Option wird heutzutage noch unzureichend genutzt, stattdessen werden Strukturprobleme oftmals durch einen erhöhten Materialeinsatz kompensiert.

Messtechnik und Anwendung

In der Papierindustrie sind unterschiedlichste Messmethoden zur Charakterisierung einzelner Halbzeuge oder Produkteigenschaften bekannt. Speziell zum Verhalten unter mechanischen Lasteinwirkung und dem Verarbeitungsverhalten gibt es umfangreiche Messanordnungen. Diese bilden jedoch zu meist nur eine Kennzahl auf Basis einer festgelegten Probengeometrie ab und

besitzen damit nur eine vergleichende Aussagekraft. Eine erforderliche Unterteilung in elastische und plastische Verformungsanteile oder eine Angabe zur Relation der Verformungsanteile erfolgt in der Regel nicht. Die erhobenen Parameter werden im Allgemeinen zur Überwachung zuvor festgelegter Grenzen für das Qualitätsmanagement benutzt. Für Produkt- und Prozessoptimierungen werden derartige Daten daher selten herangezogen. In der Regel erfolgen diese Anpassungen auf heuristischem Wege mit Hilfe empirischer Validierung.

Der häufigste Umformprozess zur Bildung dreidimensionaler Strukturen ist das Biegen inklusive dem Falten entlang durch z.B. per Rillprozess prädisponierten Biegelinien. Zur Parametrisierung der Vorgänge und Eigenschaftsänderungen werden unterschiedliche Biegesteifigkeitsmessungen, wie die Zwei- und Dreipunktbiegung, die dynamische Biegebalkenmethode und die Faltfaktormessung eingesetzt. Diese Messungen liefern einen Parameter zur Beschreibung der elastischen Steifigkeit, welcher aus einer Verschiebung, dem Integral der Krümmung, abgeleitet werden oder ermitteln eine Relation der erforderlichen Umformarbeit mit und ohne Faltlinienvorbereitung.

Defizite vorhandener Messtechnik

Maschinelle Umformprozesse werden in der Regel durch weggesteuerte Umformprozesse realisiert. Dabei wird die Biegebeanspruchung durch eine Querkraftbelastung induziert. Für schubsteife Materialien und geometrisch schlanke Biegebalken kann man diese Beanspruchung mittels der Zwei- und Dreipunktbiegung nachbilden und die anteilige Schubverzerrung vernachlässigen. Für kartonbasierte Werkstoffe gilt dies jedoch nicht, der erhobene Umformweg setzt sich anteilig aus Biegung und Scherung zusammen. Des Weiteren entspricht der Biegeanteil des Umformweges dem Integral der lokalen Krümmung, welche wiederum nichtlinear mit der lokalen Biegemomentbeanspruchung verknüpft ist. Nur zu Beginn der Messung liegt ein linearer Verlauf der Biegemomentbelastung vor. Eine Bestimmung des plastischen Materialverhaltens unter Biegebeanspruchung bedürfte eines inversen Verfahrens auf Basis einer Ableitung der Messkurve. Mit akzeptablem Konfidenzintervall ist dies nicht realisierbar und somit ungeeignet zum Parametrisieren. Ohne Kenntnis der lastabhängigen Verformungsrelationen im flächigen Werkstoff ist auch keine Bestimmung der lokalen Übertragungsfunktion der Rill- und Faltlinie möglich. Die Messung der plastischen Drucksteifigkeit per short crush test (SCT) ist durch ein prinzipbedingtes anteiliges Gleiten der Probe in die Aufnahmebacken und einem seitlichen Ausknicken gekennzeichnet und damit systematisch fehlerbehaftet sowie geometrisch begrenzt.

Einsatzbereitschaft bestehender Materialmodelle

Es gibt Modellentwicklungen auf unterschiedlichen Strukturebenen: von mikroskopischen Strukturmodellen im Bereich von Einzelfasern und Faser-Faserbindungen über mesoskopische Modelle mit einzelnen Stofflagen und Interlagenverbindungen bis zu makroskopischen Modellen für eine integrale Betrachtung mit angenommenem Kontinuumsverhalten [3]. Einsatzhemmnisse für Mikro- und Mesostrukturmodelle sind die umfangreichen erforderlichen Parameter zum Quantifizieren des Interaktionsverhaltens zwischen den diskreten Modellelementen. Dafür stehen derzeit keine anwendungsbereiten Messmethoden zur Verfügung. Makroskopische Strukturmodelle erfordern eine lastart- und richtungsabhängige Parametrisierung. Für einachsigen Zug und Druck kann dabei auf bestehende Prüfverfahren zurückgegriffen werden

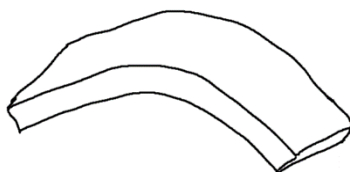
(DIN EN ISO 1924-2 [4] u. SCT, in Anlehnung an DIN 54518 [5]). Schubeigenschaften können teils invers bestimmt werden [6]. Für Biegung sind keine konkreten Lösungen bekannt, hier setzt das Forschungsprojekt an.

4 Umformen und Eigenschaften von Karton-Verbundwerkstoffen

Umformprozesse Biegen und Falten

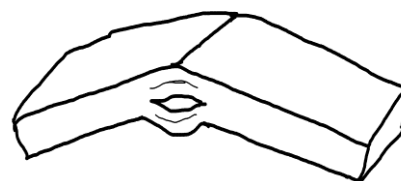
Zur Formung komplexer 3D-Strukturen, beispielsweise von Verpackungen aus Karton-Verbundwerkstoff, werden häufig mehrere 2D-Umformungen wie Biegen und Falten kombiniert (siehe Abbildung 1). Dabei wird in Abgrenzung zum ebenfalls möglichen 3D-Tiefziehen ein lokaler Beanspruchungszustand im Material generiert, welcher vereinfacht als einachsiger Spannungszustand abgebildet werden kann. Eine Ursache ist darin begründet, dass Papier im Vergleich zu anderen flächigen Halbzeugen eine geringe Bruchdehnung aufweist und damit nur bedingt 3D-formbar ist. Ein äußerlich bruchfreier Übergang zwischen angrenzenden Umformungen ist mittels geringen Umformradien realisierbar. Eine Ausführungsvariante zum Generieren geringer Kantenradien bei mehrlagigen flächigen Halbzeugen ist das Falten. Dabei erfolgt nach einer teils mehrfachen, innerlichen Querschnittsauflösung ein Biegen der verbliebenen Restquerschnitte unter Ausbildung eines Faltgelenkes. Die Querschnittsauflösung durch Materialversagen erfolgt dabei zumeist durch Delaminieren der einzelnen, inneren Lagen des Kartons, welche geringere Festigkeiten als die Deck- und Rücklage aufweisen. Dieses Verhalten unter Biegebeanspruchung grenzt Verbundwerkstoffe von Monowerkstoffen mit homogener Mesostruktur ab, bei welchen das Materialversagen unter plastischer Biegung üblicherweise durch Zugbrüche im Bereich der Materialoberfläche gekennzeichnet ist.

Biegen



- plastische Dehnungen
- Fließen infolge von Mikrostrukturbrüchen
- keine Delamination durch Mesostrukturbrüche
- nur relativ große Kantenradien erzielbar

Falten



- Delamination durch Mesostrukturbrüche (Schub und Zug)
- Querschnittsauflösung per Materialverschiebungen
- Faltgelenkausbildung (Biegeumformung der Teilquerschnitte)
- geringe Kantenradien realisierbar

Abbildung 1: Biegen und Falten von Faserverbundwerkstoffen [7]

Aufbau von Karton und abgeleiteten Verbundmaterialien

Karton ist aus mehreren Faserstofflagen meist unterschiedlicher Steifigkeit und Festigkeit aufgebaut. Das Ziel einer hohen Biegesteifigkeit bei geringem Materialeinsatz wird dadurch erreicht, dass innere Lagen mit geringerer Dichte, Steifigkeit und Festigkeit mit äußeren Lagen hoher Steifigkeit und Festigkeit verbunden werden. Das zugrunde liegende Prinzip entspricht dem Doppel-T-Träger im Stahlbau. Kartonwerkstoffe weisen wie ihre einzelnen Materiallagen ein orthotropes Materialverhalten auf und reagieren unterschiedlich auf Zug- und Druckbeanspruchung. Bei Verbundwerkstoffen auf Kartonbasis werden weitere Materiallagen zur Erfüllung unterschiedlichen Funktionen, wie Barriere gegen Flüssigkeiten, Gase, Aromen und Licht durch Beschichtung mit Metallen und Kunststoffen hinzugefügt. Daraus folgt ein zumeist unsymmetrischer Lagenaufbau (siehe Abbildung 2).

Der Karton ist für die mechanische Tragfunktion der zu bildenden Struktur maßgeblich. Da die oberflächennahen Bereiche das größte Widerstandsmoment gegen Biegung generieren, trägt die Beschichtung von Materialverbunden insbesondere bei Biegebeanspruchungen relevant mit. Die Herstellung von Karton erfolgt durch ein Gauschen mehrerer nasser Papierbahnen vor der Presspartie. Die sich im Endprodukt ausbildenden Festigkeiten der Interlagenverbindungen sind dabei geringer als innerhalb einer Lage. Dies bewirkt das für Karton typische Delaminationsverhalten unter Biegebeanspruchung.

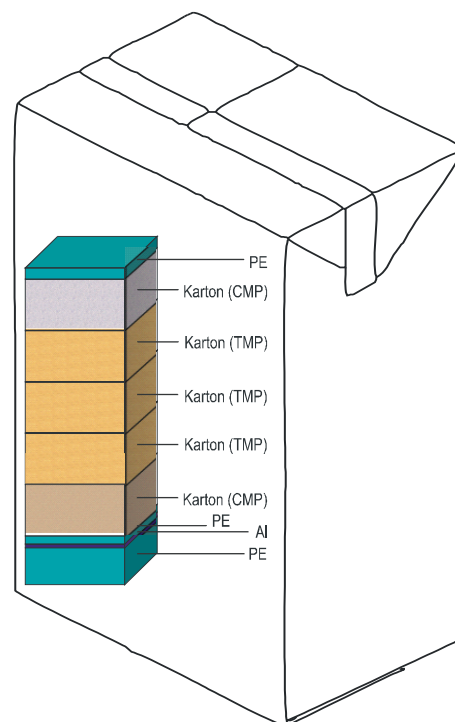


Abbildung 2: Aufbau eines Verbundes für Getränkekarton-Verpackungen; PE = Polyethylen, CMP = Chemimechanical pulp, TMP = Thermomechanical Pulp, Al = Aluminium

Materialverhalten unter einachsiger Belastung

Die Standardversuche zum Parametrisieren des Materialverhaltens erfolgen unter einachsigen Belastungen in Faserrichtung (MD) und quer zur Faserrichtung (CD). Bei mesoskopischer Betrachtung des Materials erfolgt eine Abbildung des Verhaltens einzelner Lagen und deren Interaktionen. Durch herkömmliche Messprinzipie können nur äußere, integrale Belastungen erfasst und auf makroskopische Beanspruchungsgrößen überführt werden. Diese makroskopischen Beanspruchungen bilden dabei eine mittlere Beanspruchung über alle Lagen ab und ermöglichen keinen Rückschluss auf lokale Beanspruchungen sowie plastische Dehnungen oder partielles Versagen (siehe Abbildung 3). Die Funktion des makroskopischen Ersatzmaterialverhaltens besteht in der Wiedergabe des Verformungsverhaltens unter äußerer Lasteinwirkung, dafür sind keine Kenntnisse zu inneren meso- und mikroskopischen Strukturänderungen erforderlich.

Für den plastischen Zug- und Druckversuch besteht in guter Näherung ein linearer Zusammenhang zwischen der äußeren Belastung in Form einer Kraft-Weg-Kurve $F = f(\Delta l)$ und der inneren, makroskopischen Beanspruchung in Form des Spannungs-Dehnungs-Diagrammes $\sigma_x = f(\varepsilon_x)$ (siehe Formel 4.1 und 4.2). Dabei wird ein unter Belastung konstanter Querschnitt und eine in Lastrichtung konstante Kraft und Dehnung angenommen.

$$\Delta l(x) = \varepsilon_x(x) * l_0(x); \Delta l = \varepsilon_x * l_0, \quad (4.1)$$

$$F_x(x) = br(x) * \int_0^{s_G} \sigma_x(x) dy; F_x = br * s_G * \sigma_x \quad (4.2)$$

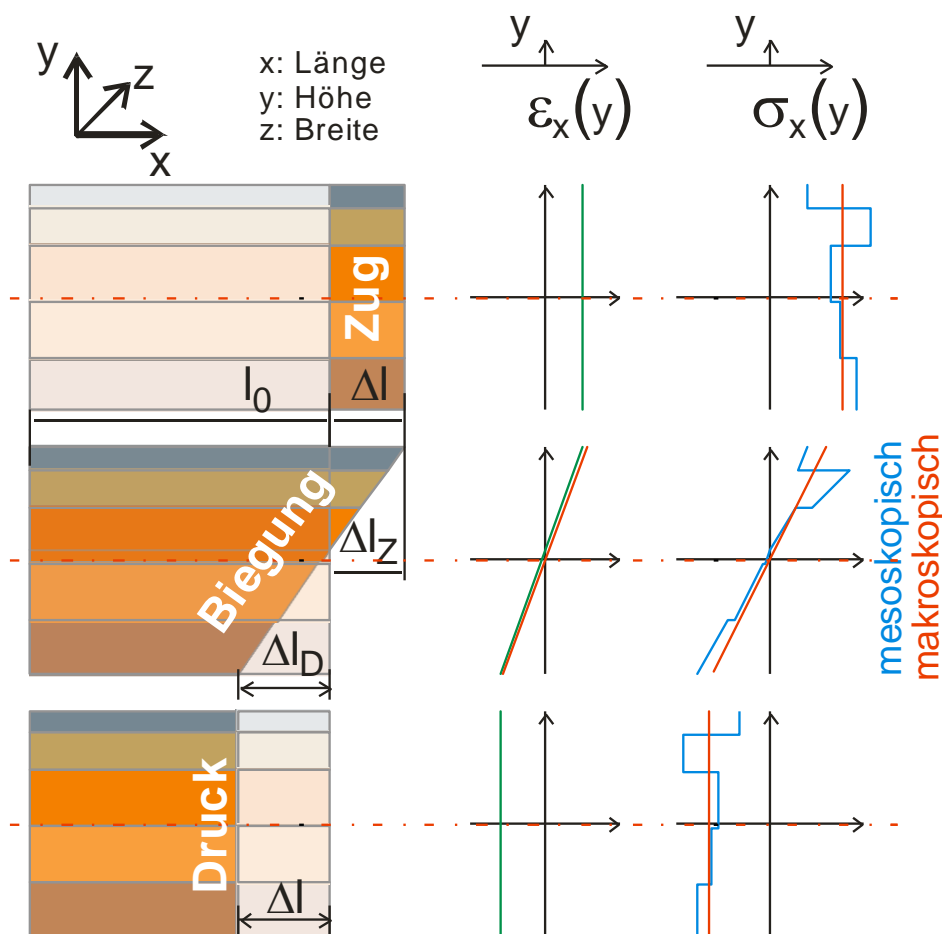


Abbildung 3: Einachsige Beanspruchung eines mehrlagigen Verbundes, Größen der Beanspruchung für unterschiedliche Modellmaßstäbe

Im Rahmen dieses Projektes soll ergänzend zur plastischen Zug- und Druckbeanspruchung das Materialverhalten unter plastischer Biegebeanspruchung bestimmt werden. Die folgenden Formeln 4.3 bis 4.5 beschreiben dabei die Übertragungsfunktionen von Beanspruchung zu Belastung bei Biegung.

$$Kr(x) = \arctan\left(\frac{2 * \epsilon_{x\max}(x)}{s}\right) \approx \left(\frac{2 * \epsilon_{x\max}(x)}{s}\right) \tag{4.3}$$

$$\varphi_b = \int_0^l Kr(x)dx, \tag{4.4}$$

$$M_b(x) = b * \int_{-\frac{s}{2}}^{\frac{s}{2}} y * \sigma_x(x, y)dy. \tag{4.5}$$

Bei Biegung nach dem Zwei- und Dreipunktprinzip ist die lokale Belastung abhängig von der x- und y-Position in Biegebalkenlänge. Der erhobene Biegewinkel φ_b (Formel 4.4) repräsentiert das Integral, der von der x-Position abhängigen Krümmung (Formel 4.3) und dem von der x-Position abhängigen Biegemoment

(Formel 4.5), dem Integral im Querschnitt wirkender Spannungen mal Hebelänge in Relation zur Entfernung der Biegeachse. Im Bereich linearelastischer Verformung kann die Belastung in eine makroskopische Spannungs-Dehnungs-Abhängigkeit (E-Modul) überführt werden. Zur Bestimmung der plastischen Spannungs-Dehnungs-Kurve mittels Biegesteifigkeitsmessung fehlen Randbedingungen. Ein zweimaliges, numerisches Differenzieren diskreter Parameterkurven mit digitalem Rauschen liefert im Ergebnis keine verwertbaren Materialparameter mehr.

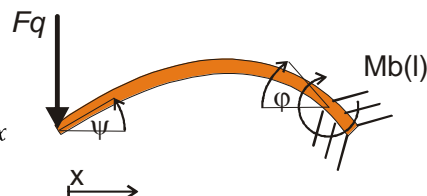
Alternative Biegegeometrie

Die Ermittlung des plastischen Biegeverhaltens bedarf einer Zuordnung von lokaler Krümmung und Biegemoment. Da diese Krümmung bei der Zwei- und Dreipunktbiegung nur als integraler, partieller Biegewinkel erfasst wird, ist diese Anordnung ungeeignet. Im Prinzip bedarf es einer mehrfachen Anreicherung des Belastungszustandes nahe der Einspannung, welches im Ideal der Formung eines Ringes entspricht.

Bisher: Biegewiderstandstest / creasability-test

$\Delta\varphi, Fq(\varphi), NB: \Delta l, \Delta\psi$

$$\varphi + \psi = v'(l) = \int_0^l \frac{-Mb(x)}{EI} dx = \int_0^l Kr(x) dx$$

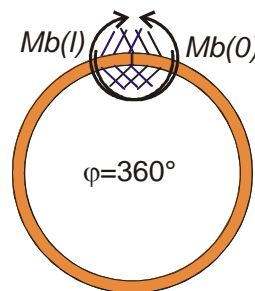


Informationsverlust durch unvollständige Erhebung und Integration

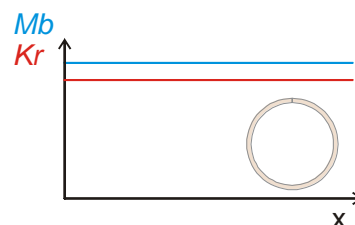
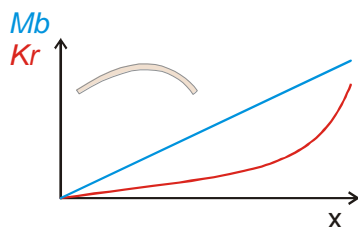
Neu: Messung des Krümmungswiderstandes

$\Delta l, Mb(Kr), \varphi = konst.$

$$Kr(l) = \left(\frac{\varphi'}{l_0 - \Delta l} \right)$$



direkte Erfassung des mechanischen Übertragungsverhaltens



Mb: Biegemomentbelastung entlang der Probe

Kr: mgl. Krümmungsverteilung bei plastischen Materialverhalten

Abbildung 4: Vergleich von Umform-Geometrien und Lastverteilungen

5 Umsetzung der neuartigen Messmethode Krümmungswiderstand

**Messanordnung
- Ringprinzip**

Zur Messung des Krümmungswiderstandes (Curvature Resistance Test – CRT) wird aus einer streifenförmigen Karton-Probe ein zylinderförmiger Ring geformt. Dabei sollte der Anfangsdurchmesser des Ringes so groß gewählt werden, dass keine plastische Verformung des Probenkörpers erfolgt. Bei üblichen Karton-Grammaturen entspricht dies einem Durchmesser von etwa 0,5-1 Meter. Das eine Ende des Ringes wird in einer Einspannung (siehe Abbildung 5) mit der Möglichkeit zur Drehmomentmessung in der Ebene des Ringes fixiert. Das andere Ende des Kartonstreifens wird möglichst ortsnah zur ersten Einspannung durch eine zur ersten Einspannung parallele Führung geschoben. Hinter der Führung befindet sich fluchtend ein steuerbarer Abzug. Mit diesem wird der Streifen durch die Führung gezogen, wobei eine Reduktion des Ringdurchmessers erfolgt. Auf Grundlage der Abzugsposition wird die mittlere Krümmung und per DMS-Vollbrücke ein dem Drehmoment proportionales Spannungssignal aufgezeichnet.

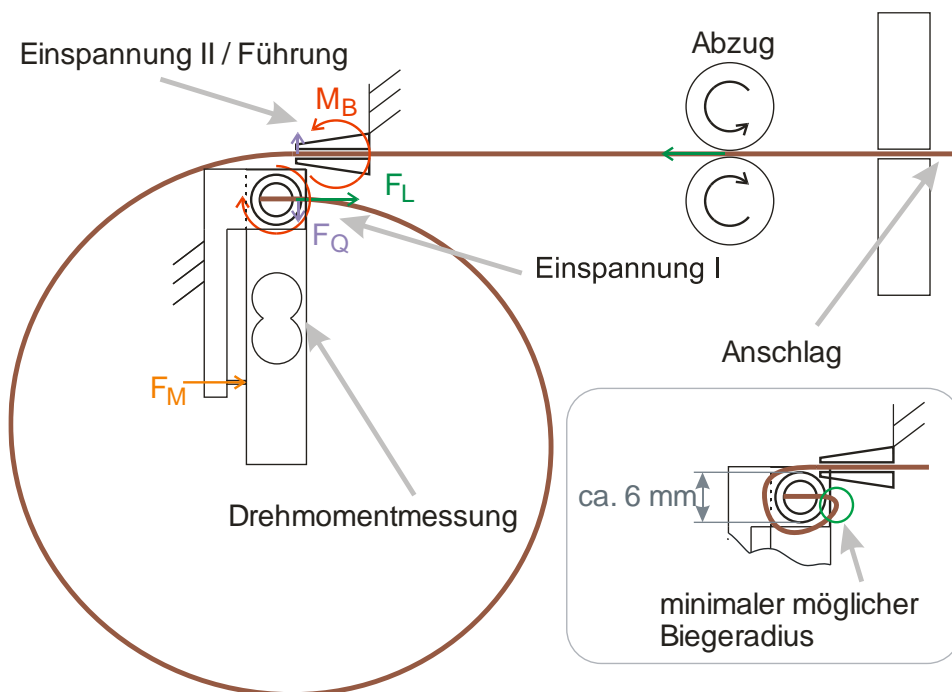


Abbildung 5: Probenanordnung Messmethodik Krümmungswiderstandsmessung nach dem Ringprinzip (Curvature Resistance Test – CRT)

In Abgrenzung zu bestehenden Biegesteifigkeitsmessungen liegt zu Beginn der Messung eine nahezu querkraftfreie Biegung ohne Schubverformung vor. Bei abnehmendem Durchmesser des Proberinges steigt der Fehlereinfluss aus dem bauraumbedingten Versatz der Einspannungen an. Dadurch treten steigende Längs- und Querkräfte auf, welche zu einer Überlagerung mit Querkraft-Biegung und Schubverformung führen. Durch eine zusätzliche Erfassung der Querkräfte kann die lokal wirkende Biegebeanspruchung auch für große, plastische Krümmungen ermittelt werden. Die Schubverformung wirkt nur indirekt indem sie die erforderlichen Querkräfte zur Ausformung des Versatzes der Einspannung senkt. Durch begleitende Untersuchungen kann der systematische Fehler im Bereich sehr hoher Krümmungen auf bis zu -10 % der überlagerten Querkraftbiegung abgeschätzt werden. In Relation zur lokal wirkenden gesamt-

ten Biegebeanspruchung beträgt dieser Fehler bei Biegebruch von Kartonwerkstoffen weniger als $\pm 0,5\%$. Als einfache Kompensation kann bei der Berechnung der lokalen Biegebeanspruchung ein Korrekturfaktor für beide Richtungen des Einspannungsversatzes benutzt werden.

Realisierung – Prüfstand Krümmungswiderstand

Mit dem entwickelten Prüfstand (siehe Abbildung 6) können Materialproben in Form von Streifen mit einer Breite von 60 mm und Dicke von 0,35 - 0,7 mm sowie einer Länge von 0,5 - 2,0 m gemessen werden. Wesentliche Funktionalitäten neben der Erhebung der Reaktionskräfte und Momente in der Einspannung bei gesteuertem Abzug sind:

- Kompakte Probenspannung durch konzentrische Ringe mit Spalt
- Ausrichtung des Probenkörpers per beweglicher Banden
- schlupfarter Abzug mit pneumatischem Andruck
- reibungsreduzierte Probenführung
- Kalibrierung per Softwaretool unter Schwerkraftnutzung
- schaltbarer Probenanschlag und Sensorik Probenende
- Ansteuerung und Bedienung über eigene Software (Windows-PC).

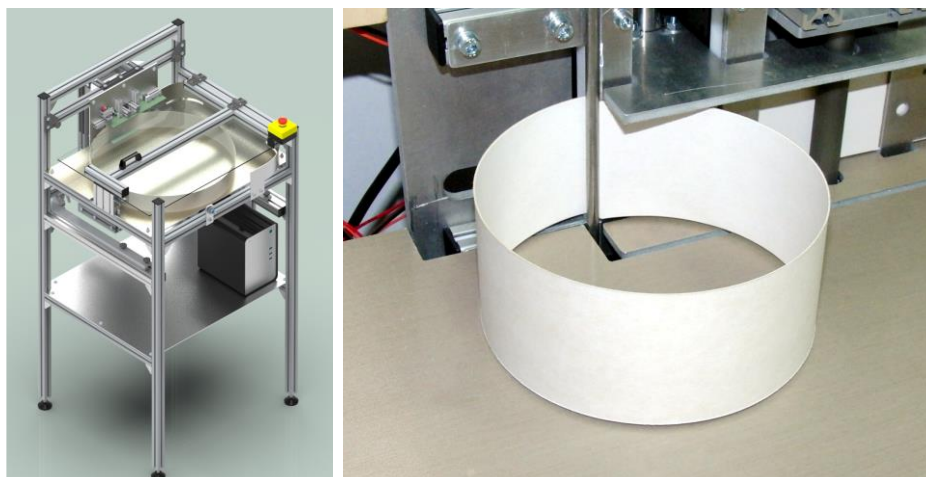


Abbildung 6: Prüfvorrichtung Krümmungswiderstand (links) und eingespannter Probenkörper (rechts) beim Curvature Resistance Test – CRT.

Probenkörper- vorbereitung

Die streifenförmigen Probenkörper werden mit einem Messer mit zwei parallelen Klingen im Abstand von 60 mm, welches über einen Schlitten geführt wird, zugeschnitten. Für einen großen Messbereich unter elastischer Krümmung sollten die Proben möglichst lang sein. Der Probentisch ist für bis zu 2 m lange Proben ausgelegt. Vor der Messung ist die gestreckte Länge des Probenstreifens zu bestimmen. Wenn nur relativ kurze Proben zugeschnitten werden können, ist es zulässig, diese um 160 mm am abzugsseitigen Ende zu verlängern, da dieser Abschnitt nicht mit gemessen wird. Die Biegesteifigkeit von Karton ist abhängig von der Materialfeuchte, daher ist eine Klimatisierung der Proben gemäß DIN EN 20187:1993-11 [8] erforderlich.

**Parameter-
erhebung**

Die Software zur Krümmungswiderstandsmessung leitet den Prüfprozess durch Anweisungen und Abfragen zur Probeneinspannung und Parametereingabe. Nach Abschluss jeder Messung wird eine zu Tabellenkalkulationen kompatible Messwertdatei abgespeichert. Die Messung erfolgt mit möglichst konstanter Krümmungs- und somit Dehnungsgeschwindigkeit, dazu können die Krümmungsgeschwindigkeit und die maximale Krümmung über das Bedienpanel (siehe Abbildung 7) vorgegeben werden.

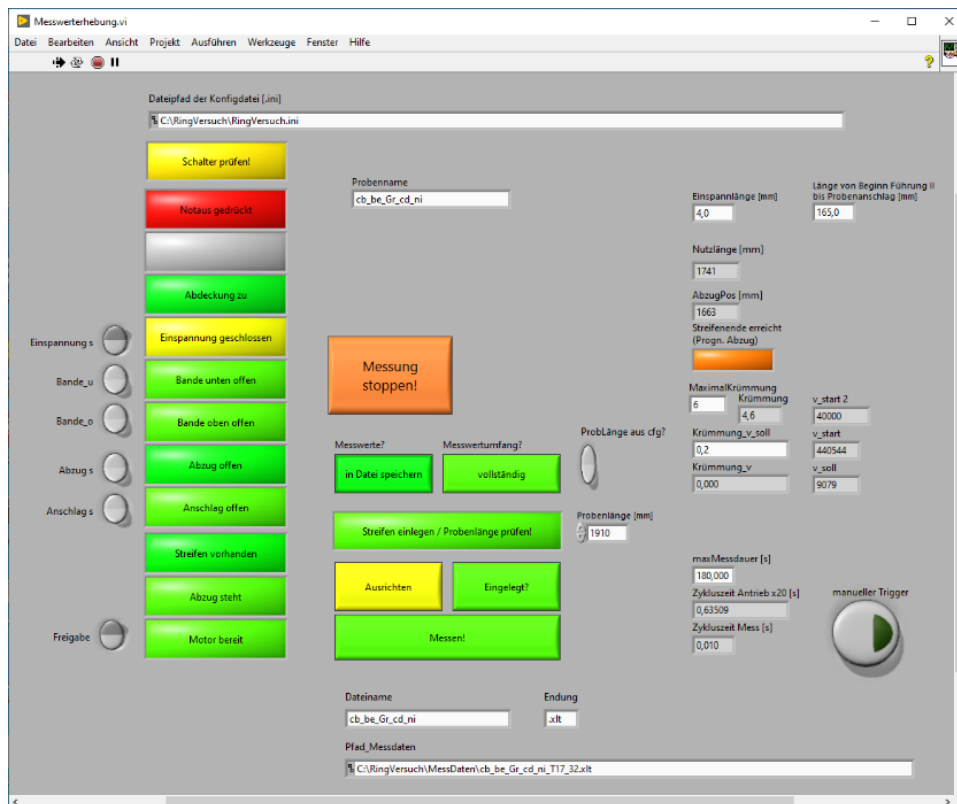


Abbildung 7: Bedienpanel Krümmungswiderstandstest - CRT

**Signalqualität
und Reprodu-
zierbarkeit**

In Abbildung 8 sind die Mittelwertkurven und die Fehlerschranken (einfache Standardabweichung) für zehn Messungen des Krümmungswiderstandes dargestellt. Das Messprinzip weist eine gute Reproduzierbarkeit zur Erfassung des Biegemomentes auf. Die Messkurven beginnen in Abhängigkeit des Durchmessers des geformten Ringes mit einer Mindestkrümmung größer als null. Des Weiteren sind die ersten Messwerte zu verwerfen, da der Kraftstoß zur Beschleunigung der Probe von den Messgliedern zur Erfassung von Biegemoment und Einspannkräften erfasst wird.

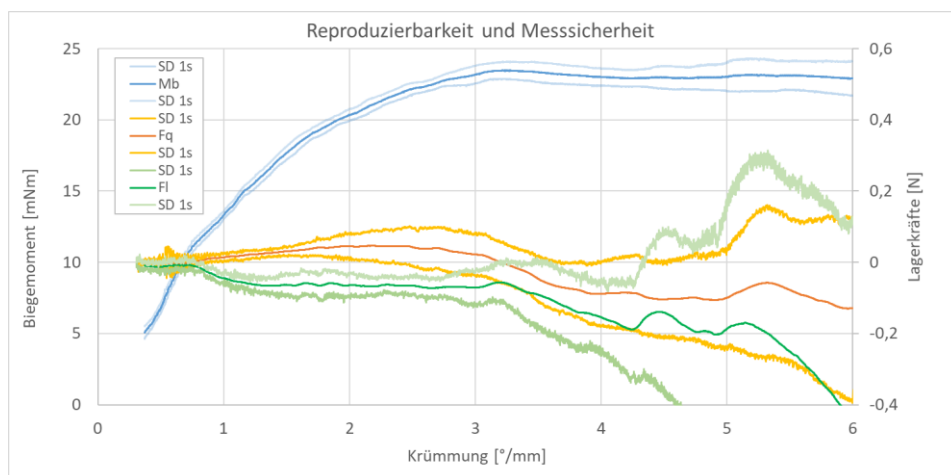


Abbildung 8: Mittelwert mit Fehlerschranken Krümmungswiderstand MD, Mb = Rektionsmoment in der Einspannung, Fq = Querkraftreaktion in der Einspannung, FI = Längskraftreaktion in der Einspannung, dazu farblich zugeordnet jeweils SD 1s = Standardabweichung mit Ein-Sigma-Grenze

Die gemessenen sehr geringen Lagerkräfte (rechte Ordinate in Abbildung 8) resultieren zu Beginn der Messung aus dem Überwinden der Haftreibung der Probe mit dem Probentisch (Stick-Slip-Effekt). Während der Messung steigen die Lagerkräfte betragsmäßig an, da der Versatz der Einspannungen an Einfluss gewinnt. Eine direkte Verwendung der Einspannkräfte zur Bestimmung der Querkraftbiegung ist auf Grund der vergleichbaren Beträge von Wert und Standardabweichung nicht möglich. Die Kraftkurven können jedoch zur Identifikation von lokalen Biegebrüchen herangezogen werden. Dies ist insbesondere bei Materialien mit einer Neigung zum flächigen Knautschen von Bedeutung, da derartige Materialien kein signifikantes Absinken des Biegemomentes bei Bruch aufweisen. Beim Versagen nimmt die geometrische Abweichung vom idealen Ring zu, damit steigt der Biegeanteil aus Querkraftbiegung an, welches als Anstiegsänderung in den Kraftkurven wiedergegeben wird.

Systematischer Messfehler bei anteiliger Querkraftbiegung

Die Prüfvorrichtung erfasst das Biegemoment in der Einspannung (in Abbildung 9 blauer Graph bei x-Position = 0 %). Bei einer anteiligen Querkraftbiegung wird somit ein geringfügig größeres Biegemoment als das durchschnittlich wirksame erfasst. Dabei erfolgt keine Zuordnung zur realen Krümmung an Position 0, sondern zur mittleren Krümmung, abgeleitet aus dem Vollwinkel und der wirksamen Streifenlänge. Der Anteil des systematischen Fehlers steigt mit der Zunahme des relativen Einspannungsversatzes und dem Anteil plastischer Verformung. Für Materialien mit großem elastischen Biegeanteil vor dem ausgeprägten Biegebruch kann ohne Berücksichtigung dieser Fehler die Übertragungsfunktion $Biegemoment = f(Krümmung)$ direkt von den Messwerten abgeleitet werden. Für Materialien mit großen plastischen Biegeanteilen und schwach ausgeprägtem Bruchverhalten ist eine Korrekturrechnung auf Basis einer Verformungsprognose durchzuführen, um die reale Übertragungsfunktion $Biegemoment_{real} = f(Krümmung)$ zu erhalten. Eine Umsetzung erfolgte im Rahmen der Softwareentwicklung zur

Parameterisierung der Übertragungsfunktionen für flächiges Biegen und lokales Falten.

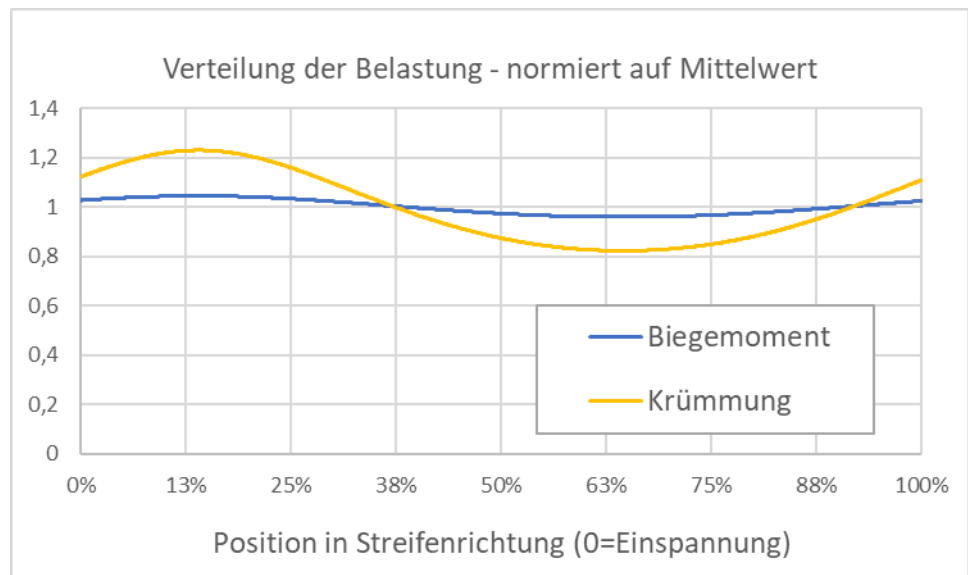


Abbildung 9: Lokale Belastungen beim plastischen Biegen

6 Charakterisierung des plastischen Biegens und Faltens

Bisherige Methoden

Etablierte Prüfverfahren quantifizieren nur die elastische Verformung unter Querkrafteinleitung. Für Karton und Verbundwerkstoffe sind die Biegesteifigkeitsmessung nach der 2-Punkt-Biegung (Biegesteifigkeit L&W 5° - DIN 53121 [9] / Biegesteifigkeit Taber 15° - Tappi T489 10) etabliert. Bei diesen Verfahren wird die Kraft ermittelt, welche zur Auslenkung der Probe um den vorgegebenen Winkel erforderlich ist. Der ermittelte Steifigkeitswert entspricht dem Produkt von gemessener Kraft und wirksamer Ausgangslänge dividiert durch den Auslenkwinkel. Dieser Steifigkeitsparameter ist jedoch nicht unabhängig von der Probenlänge. Ein wesentlicher Anteil der Probenverformung basiert auf Scherung, dabei ist der Scherwinkel im Gegensatz zum Biege­winkel unabhängig von der Probenlänge. Bei kleinem Schlankheitsgrad des Biegebalkens, in Form von Länge zu Probendicke (aspect ratio), konnte durch Experimente an Kartonwerkstoffen ein Schubanteil des Verformungswinkels von bis zu 25 % nachgewiesen werden. In Abbildung 10 ist der Einfluss der aspect ratio bei einer Biegung von Karton mit MD-Beanspruchung in Vergleich mit einem relativ schubsteifen Material, wie Stahl, abgebildet.

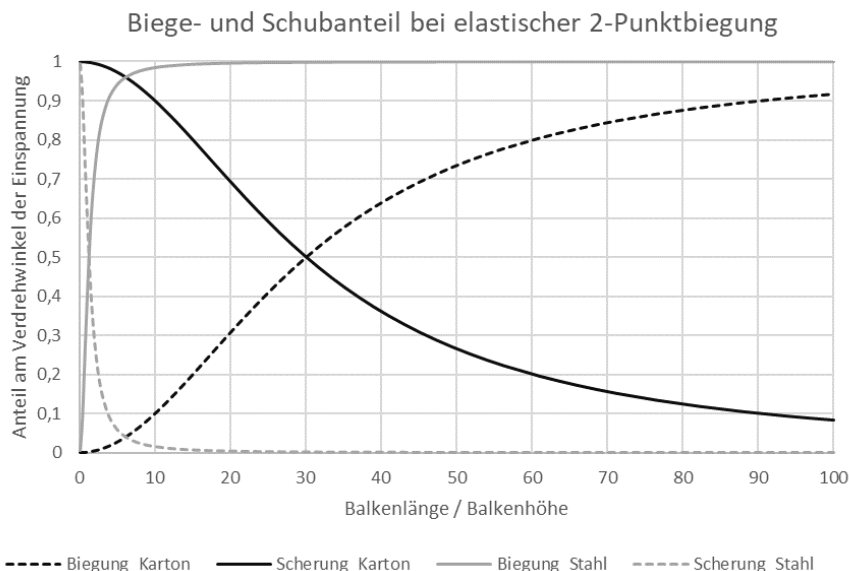


Abbildung 10: Anteile von Biege- und Schubverformung bei 2-Punktbiegung

In Konsequenz ist für schubweiche Materialien die Bezeichnung des per 2-Punkt-Biegung ermittelten Parameters als Biegesteifigkeit teils irreführend. Mit der neuen Methode Krümmungswiderstandsmessung (Curvature Resistance test – CRT) kann eine quasi reine Biegesteifigkeit ermittelt werden.

Mit der 2- und 3-Punkt-Biegung kann auch das plastische Materialverhalten und das Biegebruchmoment erfasst werden. Eine standardisierte Auswertung und Beschreibung sind nicht etabliert. Es gelten die gleichen Einschränkungen durch Schubverformung wie bei der elastischen Probenverformung.

Auf Basis der 2-Punktbiegung werden der Biege­widerstand, dies entspricht etwa dem Biegebruchmoment, und der Faltfaktor von Rillungen ermittelt (DIN 55437-3 11). Bei diesem Verfahren sind keine gesonderte Betrachtung und Zuordnung der Verformungsanteile aus flächigen Biegen, Schubverformung und lokaler Verdrehung in der Faltlinie möglich.

Es ist festzustellen, dass derzeit eingesetzte Prüfungen für Biege- und Falteigenschaften abhängig von der Probengeometrie sind und nur vergleichende Aussagen innerhalb einer Gruppe ähnlicher Halbzeuge bereitstellen.

Charakterisierung des plastischen Biegens

Aus dem Messschrieb (siehe Abbildung 11) können direkt die Grenze der elastischen Krümmung und die Biegebruchkrümmung sowie die zugehörigen Biegemomente abgelesen werden. Der für Biegeumformungen oft benötigte Biegeradius berechnet sich zu $r_B = 360^\circ / (2\pi * \text{Krümmung})$. Die Krümmung im Diagramm entspricht der angenommenen mittleren Krümmung auf Basis des Vollwinkels geteilt durch die wirksamen Probenlänge. Nach einem Biegebruch ist der von der Faltung verursachte Faltwinkel vom Vollwinkel zu subtrahieren. Da dies bei den Mess-Rohdaten noch nicht erfolgt, werden Krümmungen größer als die maximal mögliche Biegekrümmung dargestellt. Der Quotient aus Biegemoment M_b und Krümmung Kr (in Rad/mm) entspricht dem Widerstandsmoment gegen Biegung in Form des Produktes aus E-Modul und Flächenträgheitsmoment I_{zz} . Das E-Modul für Biegebeanspruchung bei makroskopischer Betrachtung berechnet sich damit zu:

$$E = 12 * M_b / (Kr * b * s_G^3), \tag{6.1}$$

mit der Probenbreite b und der Gesamtdicke s_G .

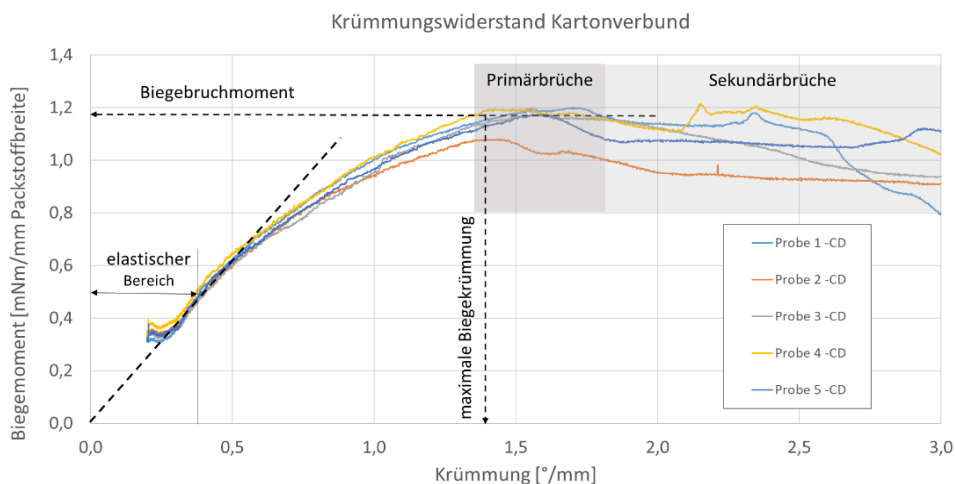


Abbildung 11: Messschrieb Krümmungswiderstand für ein Muster

Charakterisierung für weggesteuerte Umformprozesse

Umformprozesse zielen auf das Generieren einer definierten Zielgeometrie ab und werden fast ausschließlich durch Zwangsumformungen mit geometrisch bestimmten Werkzeugen unter Querkraftbiegung realisiert, welche um mehrere Größenordnung höhere Umformkräfte und -momente als erforderlich aufbauen können. Einer schädigungsarmen Umformung muss deshalb auf Grundlage geometrischer Parameter beurteilt werden. Auf Basis üblich erhobener Festigkeitskennwerte ist keine Aussage möglich, jedoch ist der materialeigene plastische Verlauf der Steifigkeitskurve für die Geometriebildung von Bedeutung. Die Übertragungsfunktion $Biegemoment = f(Krümmung)$ charakterisiert die Ausbildung des Krümmungsgradienten und damit die Verformung unter Biegung. Das maximal wirksame Biegemoment entspricht dem Biegebruchmoment, die Übertragungsfunktion wird auf dieses normiert. Dies ist dahingehend bedeutsam, als dass sich unterschiedliche Materialien mit unterschiedlicher Dicke und Biegesteifigkeit,

jedoch ähnlichem normierten Krümmungswiderstandsverlauf, bei Zwangsumformungen unter Biegung auch ähnlich verhalten. Dieser geometrieunabhängige Materialvergleich auf Basis der Krümmungswiderstandsmessung ermöglicht eine deutliche Verkürzung der Entwicklungszeiten bei Substitutionen von Halbzeugen. Als Beispiele sind das Umformen im Faltschacht, das sichere Aufstellen von flachen Mantelzuschnitten und das Rillen (vgl. Abbildung 12) zu nennen.

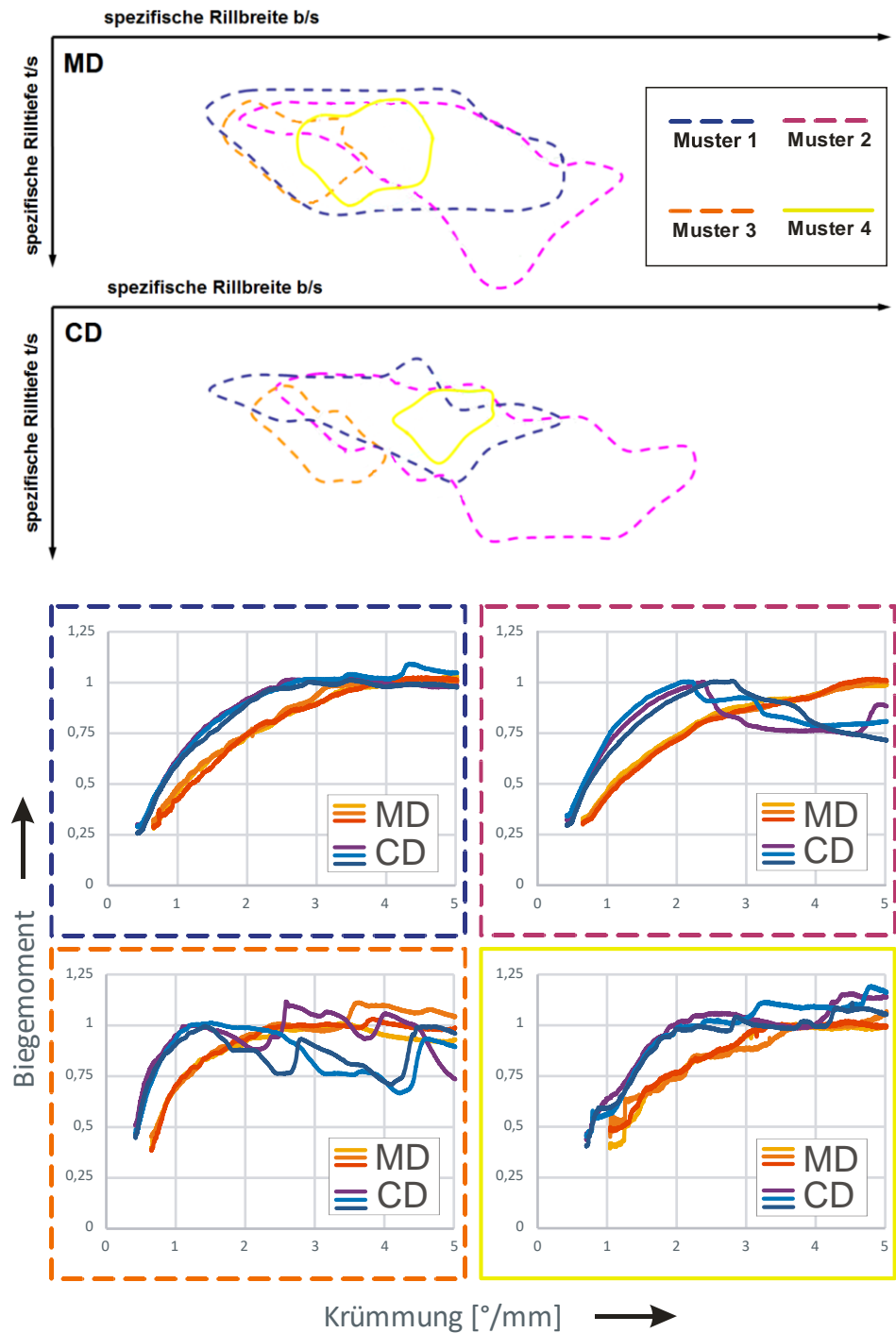


Abbildung 12: Rillbarkeit (nach Matheas, [6], oben) sowie zugeordneter, normierter Krümmungswiderstand (unten).

Die Biegestellenvorbereitung durch Rillen ist ein weggesteuerter Umformprozess. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde auf Basis der normierten Kurven eine erste Untersuchung zur Korrelation von Rillbarkeit und Krümmungswiderstand durchgeführt. Es zeigt sich, dass Materialien mit einem großen plastischen Krümmungsbereich und schwach ausgeprägtem Bruchverhalten einem großen Rillbarkeitsbereich aufweisen. Diese Korrelation kann auch auf die Tiefziehbarkeit übertragen werden und wird in einem parallel an der Forschungsstelle laufenden Projekt **[Fehler! Textmarke nicht definiert.]** in Verbindung mit weiteren Materialprüfverfahren gesondert untersucht.

Realer Krümmungs- und Faltwiderstand

Es wurden Methoden zur Korrektur des wachsenden Fehlereinflusses des Einspannungsversatzes und zur Bestimmung des diskreten Faltwinkels in der Biegebruchzone entwickelt. Eine wesentliche Voraussetzung ist die Beschreibung von Materialkurven und Übertragungsfunktionen mittels eindeutiger Funktionen. Als Ansatzfunktionen wurden unterschiedliche Sigmoid-Funktionen mit bis zu 5 Parametern gewählt. Auf Basis eines mehrdimensionalen Fehlerquadratverfahrens werden die funktionsbeschreibenden Parameter so bestimmt, dass die Fehlerquadratsumme zwischen Messwerten und Ersatzfunktion ein Minimum annimmt. Je nach Lage des Minimums wird jeder einzelne Parameter relativ oder absolut variiert.

Mittels minimalen FEM-Modells wird auf Basis des Euler-Bernoulli-Biegebalkens eine Geometrie mit großen Verformungen in der Ebene auf Basis der Kraft- und Momentrandbedingungen berechnet. Diese Berechnung erfolgt feindiskret über die gesamte Probenlänge auf Basis der sich entwickelnden Krümmungswiderstandskurve. Durch ein iteratives Vorgehen wird die Kurve so entwickelt, dass die berechnete Geometrie bzw. der berechnete Einspannungsversatz möglichst nahe dem realen Versatz liegt. Eine Erweiterung dieses inversen Ansatzes wird ebenfalls zur Bestimmung des Faltwinkels bei Vorliegen eines lokalen Biegebruchs angewendet. Dabei sind zwei Voraussetzungen zu erfüllen: Die Krümmungswiderstandskurve für dieses Material ohne lokale Biegewidstandsminderung liegt vor und der Ort der Biegewidstandsminderung bezüglich der Einspannung ist bekannt. Dabei ist eine Positionierung der Biegestellenvorbereitung mit vergleichbarem Abstand zwischen Einspannung und erfolgtem Bruchort der unbehandelten Probe von Vorteil. Die stetige Ersatzfunktion des Krümmungswiderstandes ist in der Realität nur bis zur Bruchkrümmung gültig (siehe Abbildung 13).

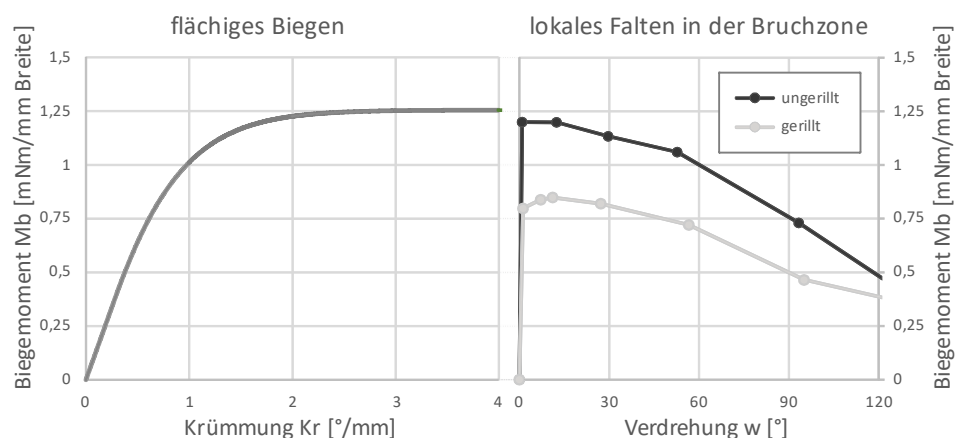


Abbildung 13: Übertragungsfunktionen für Biegen und Falten

7 Parametergenerierung für makroskopische Materialmodelle

Makrostrukturmodelle für FEM-Abbildungen

Zur Untersuchung des mechanischen Verhaltens von Makrostrukturen aus flächigen Werkstoffen hat sich eine Modellierung mit Schalenelementen bewährt (siehe Abbildung 14). Diese Elemente besitzen in Abgrenzung zu Volumenelementen Verdrehungsfreiheitsgrade. Auf dieser Basis ist die Abbildung von Rillungen durch Kopplung mit diskreten, nichtlinearen Rotationsfedern mit geringem Aufwand realisierbar.

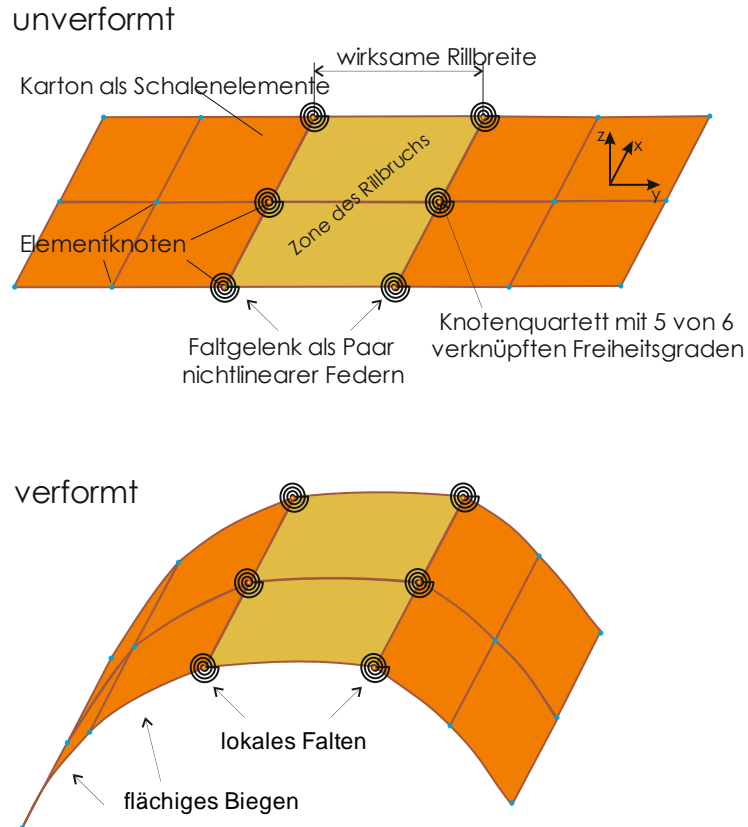


Abbildung 14: Mechanisches Ersatzmodell für flächiges Biegen und lokales Falten

Zur Parametrisierung der Schalenelemente ist ein meso- oder makroskopisches Materialmodell erforderlich. Das makroskopische Materialmodell für plastische Biegung wird per Spannungs-Dehnungs-Kurve definiert. Dies erfordert eine Transformation der erhobenen Drehmoment-Krümmungs-Kurven. Die Parameter der nichtlinearen Federn zur Abbildung von Rillungen können direkt von der ermittelten Drehmoment-Winkel-Kurve unter Beachtung der wirksamen Elementkantenlänge abgeleitet werden.

Inverse Methode zur Bestimmung der plastischen Materialkurve Biegung

Das makroskopische Materialverhalten der inneren Beanspruchung kann mit der Übertragungsfunktion $\sigma_x(x, y) = f_1(\varepsilon_x(x, y))$ beschrieben werden. Die Krümmungswiderstandsmessung liefert die Übertragungsfunktion der äußeren Belastung und Verformung.

Die Kopplung innerer Beanspruchungen mit äußeren Belastungen beschreiben die Formeln 4.3 und 4.5 (siehe Abschnitt 4). Durch Umstellung von 4.3 wird die Maximaldehnung für symmetrische Biegung aus der Krümmung bestimmt und davon die lokale Materialdehnung

$\varepsilon_x(x, y) = \varepsilon_{x_{max}}(x) * y = \tan(Kr(x)) * s / 2 * y$ abgeleitet. Eine analoge Umstellung der Formel 4.5 nach σ_x ist nicht möglich, da das Drehmoment als Skalar vorliegt. Zur Lösung des Problems wird invers vorgegangen. Für f_1 wird ein Startanstieg bestimmt auf dessen Basis der Eingangsgröße $Kr(x)$ ein dem Experiment identisches Drehmoment zugeordnet werden kann. Die Krümmungswiderstandsmessung beginnt im elastischen Bereich, dabei liegt ein linearer Spannungsverlauf über der Querschnittsdicke des Materials vor. Der Übertragungsfaktor zwischen Spannung σ_x und Dehnung ε_x kann über 6.1 (siehe Abschnitt 6) direkt bestimmt werden und dient als Startanstieg der Kurvenentwicklung. Mittels eines Algorithmus unter Nutzung verschachtelter Schleifen wird bei diskret ansteigender Krümmung, respektive zugeordneter Dehnung, das resultierende Drehmoment berechnet und mit dem experimentellen abgeglichen. Eine Annäherung an das Solldrehmoment erfolgt durch Anpassung des lokalen Anstieges am Ende der sich entwickelnden Spannungs-Dehnungs-Kurve.

Die Algorithmen wurden per Software umgesetzt und liefern auf Basis eines Inputs des Drehmoment-Krümmungs-Verlaufes (in Form einer Tabellen-Datei) und der Materialdicke eine zugeordnete Spannungs-Dehnungs-Kurve. Als Output wird eine Datei erzeugt, welche direkt als Materialparameterkurve in die FEM-Software ANSYS®-APDL importiert werden kann.

Alternative Bereitstellung der Drucksteifig- keitskurve

Das Generieren plastischer Druckbeanspruchungen an dünnen Materialproben ist nicht trivial. Bei im Verhältnis zur Materialdicke langen Materialproben knicken diese Proben bereits im Bereich elastischer Beanspruchung seitlich aus. Daher wird die Drucksteifigkeit mit kurzer Probenlänge im Bereich von 0,7 mm (SCT - short crush test) bis 5 mm (modifizierter SCT, Universalprüfmaschine) gemessen. Bei einer Universalprüfmaschine ist auf eine exakte Ausrichtung und Führung der Probeneinspannung zu achten; daher werden zu diesem Zweck gesonderte Prüfvorrichtungen wie das SCT-Gerät bevorzugt. Bei kraftschlüssig angebundenen Materialproben findet während des Zug- oder Druckversuches immer eine anteilige Verschiebung der Probe in den Spannbacken statt. Deshalb entspricht der Verfahrweg der Spannbacken nicht der absoluten Dehnung der freien Probenlänge. Beim Zugversuch kann dies in der Regel durch die relativ große Probenlänge vernachlässigt oder per Extensometer korrigiert werden. Beim einachsigen Druckversuch kann die Materialverschiebung in die Spannbacken betragsmäßig größer als die Stauchung der freien Probe sein. Bauraumbedingt kann kein herkömmliches Extensometer eingesetzt werden. Eine Alternative stellt die zweidimensionale Digitale Bildkorrelation (DIC) / Optische Dehnfeldanalyse (ODA) dar, mit welcher eine Fehlerkorrektur möglich ist.

Bei einer Biegebeanspruchung liegt eine kombinierte Zug- und Druckbeanspruchung vor, somit kann bei homogenem Materialaufbau unter makroskopischer Betrachtung auf Basis der Materialkurven zweier Beanspruchungsfälle die Materialkurve für den dritten Beanspruchungsfall berechnet werden. Die neuartige Krümmungswiderstandsmessung stellt nun die Materialkurve zur Biegebeanspruchung zur Verfügung und ermöglicht bei vorliegendem Zugversuch eine Berechnung der plastischen Drucksteifigkeitskurve. Der Algorithmus zur Berechnung erfolgt feindiskret entlang der Materialkurven durch Abgleich von wirkenden Längskräften und Drehmomenten im Lastquerschnitt unter Nutzung inverser und iterativer Methoden. In Abbildung 15 ist die berechnete Materialkurve der per SCT gemessenen und per DIC / ODA korrigierten Kurve gegenübergestellt. Bei Biegebeanspruchung erfolgt ein Ausknicken des unter Druckbeanspruchung stehenden Bereichs bei größeren

Dehnungsbeträgen. Das Ausknicken erfolgt erst nach Delamination in Form des Biegebruches.

Eine direkte Anwendung der entwickelten Drucksteifigkeitsberechnung ist für mehrlagigen Karton und Verbundwerkstoffe nicht möglich, da die Steifigkeitsverteilung bei mesoskopischer Betrachtung (siehe Abbildung 3) berücksichtigt werden muss. Abgesehen vom aufwendigen Separieren des Verbundes in Einzellagen sind keine herkömmlichen Messmethoden zur Messung des Steifigkeitsverhaltens einzelner Lagen ohne Auflösung des Verbundes bekannt.

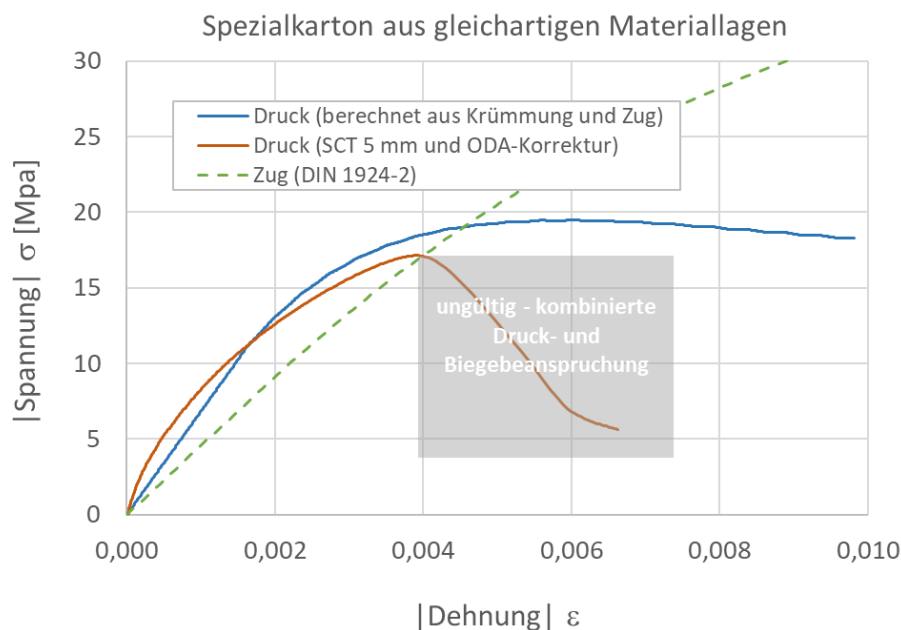


Abbildung 15: Vergleich unterschiedlich ermittelter Materialkurven für Druck

Es wurde die Annahme getroffen, dass das Steifigkeitsverhalten näherungsweise über jeweils eine Master-Materialkurve für Zug- und Druckbeanspruchung sowie zwei Proportionalitätsfaktoren pro Materiallage beschrieben werden kann. Dabei skalieren die Proportionalitätsfaktoren die Masterkurve in Dehnungs- und Spannungsrichtung. Das Verhalten der zusätzlichen Beschichtungen bei Verbunden kann aus Datenbanken entnommen werden. Die zweite Annahme beruht darauf, dass die Zugsteifigkeitsproportionen auf die Drucksteifigkeitsproportionen übertragbar sind. Karton und darauf basierende Verbunde besitzen zumeist einen unsymmetrischen Lagenaufbau und deshalb ein von der Faltrichtung abhängiges Krümmungsverhalten. Dieser Umstand kann zur Bestimmung möglicher Proportionalitätsfaktoren genutzt werden. Bei richtiger Wahl der Proportionalitätsfaktoren wird auf Basis der Krümmungswiderstandsmessungen unter Einschluss der Ober- und Unterseite eine identische integrale Drucksteifigkeitskurve für den Karton-Verbund berechnet.

Die Umsetzung des Verfahrens zur Bestimmung der plastischen Drucksteifigkeitskurve von Kartonverbundmaterial bedarf somit der Spannungs-Dehnungs-Kurven für Zug und für Biegung nach Innen und Außen des Verbundes und die Zug- und Druckkurven für mögliche zusätzliche Lagen sowie die Angabe der Dicken der Einzellagen. Die Wahl der Proportionalitätsfaktoren kann zu Beginn der Berechnung auf Erfahrung beruhen. Die Kartoninnenlage besitzt zumeist eine geringe Festigkeit aber höhere Bruchdehnung. Es wurde ein

Programmablauf entwickelt, welcher auf Grundlage dieser Daten Drucksteifigkeitskurven für Kartonverbundmaterial ermittelt.

Last- und richtungsabhängiges Materialverhalten

Zur makroskopischen Beschreibung des plastischen Materialverhaltens in Abhängigkeit der Belastungsrichtung und -art. sind mehrere Kurven erforderlich. Bei einem symmetrischen Lagenaufbau sind drei Kurven zur Beschreibung pro Hauptlastrichtung erforderlich (vgl. Abbildung 16). Bei unsymmetrischen Lagenaufbau kann das Biegeverhalten unter Einschluss von Deck- oder Rücklage unterschiedlich ausgeprägt sein. Insbesondere bei Verbundmaterialien sind daher zwei unterschiedliche Kurven zur Beschreibung der Biegebeanspruchung pro Faserorientierung erforderlich.

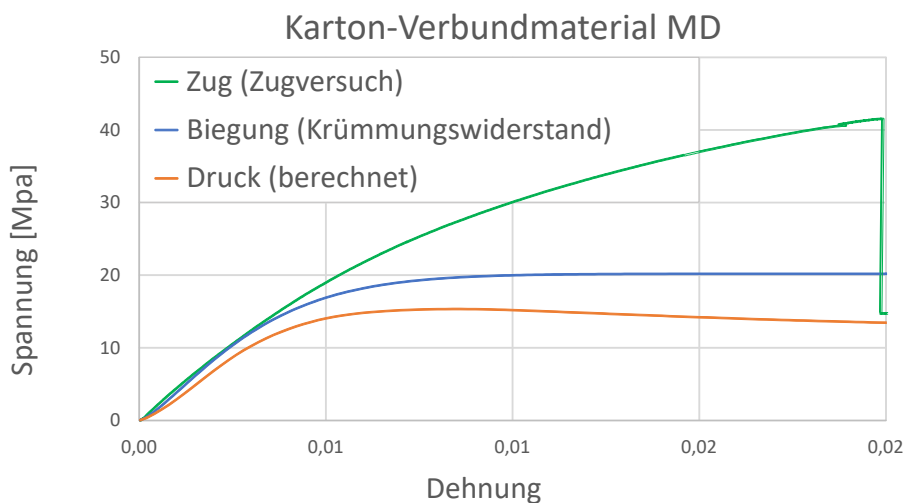


Abbildung 16: Materialkurven zur Beschreibung der Hauptbeanspruchungen

Schubsteifigkeitsbestimmung

Kartonbasierte Werkstoffe besitzen eine vergleichsweise geringe Schub- zu Zug- und Biegesteifigkeit. Die Schubverformung durch Querkrafteinleitung kann, bei geringen Länge- zu Dickenverhältnis des wirksamen Biegebalkens, gegenüber der Biegeverformung dominieren (vgl. Abbildung 10). An der PTS wurde eine Vorrichtung zur direkten Messung der Out-of-Plane-Schubsteifigkeit entwickelt [6]. Die Messung erfordert eine vergleichsweise aufwendige Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung.

Bei der Querkraftbiegung (2-Punkt-Biegung) bildet der Umformwinkel im Bereich kleiner Verformungen die Summe aus Biege- und Schubverformung ab [12]. Bei bekanntem E-Modul gegen Biegung E_B (Formel 6.1, siehe Abschnitt 6) kann das Schubmodul G berechnet werden.

Die Umsetzung der 2-Punkt-Biegung erfolgt in der Regel durch Verdrehung der Einspannung. Der wahre Biegewinkel φ_{bieg} an der Einspannung beträgt in Abhängigkeit der Biegekraft F_b :

$$\varphi_{bieg} = 4 * F_b * l^2 / (E_B * b * s_G^3), \text{ mit Biegebalkenlänge } l. \tag{7.1}$$

Der Schubwinkel berechnet sich aus der Differenz des Verdrehwinkels der Einspannung φ_{Einsp} und des berechneten Biegewinkels φ_{bieg} auf Grundlage des Krümmungswiderstandes bei identischem breitenspezifischen Biegemoment.

$$\varphi_{Schub} = \varphi_{Einsp} - \varphi_{bieg} \tag{7.2}$$

Das Schubmodul G folgt mit dem Korrekturfaktor k für quaderförmige Querschnitte zu:

$$G = F_b / (b * s_G * k * \varphi_{\text{Schub}}) = Mb / (l * b * s_G * 0,83 * \varphi_{\text{Schub}}) \quad (7.3)$$

Dieses Prinzip kann auch mit der 3-Punktbiegung genutzt werden. Dabei geht die wirksame Biegebalkenlänge mit der dritten Potenz in die Rechnung ein und hat damit ein großes Potential für systematische Fehler, insbesondere da die Probe auf den Auflagern mit relativ großen Radien abrollt. Für übliche Kartone zur Herstellung von Getränkekarton-Verpackungen wurde ein Biege- zu Schubsteifigkeitsverhältnis E/G von 2.500 (MD) bis 6.000 (CD) berechnet. Mit Probemessungen an Test- und Kraftlinern durch 2-Punktbiegung unter Variation der Biegebalkenlänge und 3-Punktbiegung unter Variation der Biegebalkendicke, konnten Schubsteifigkeitsverhältnisse E/G von ca. 1.000 - 2.000 abgeschätzt werden. Per Out-of-Plane-Messung innerhalb des IK VF-Projektes 12007 Materialparameter [6] wurde im Mittel ein um eine Größenordnung größeres Schubmodul ermittelt. An dieser Stelle wird weiterer Forschungsbedarf deutlich.

8 Validierung der Materialparameter

Modellierung von Materialprüfverfahren

Zur Validierung der berechneten Parametersätze für die FEM-Simulation wurden die Prüfverfahren Krümmungswiderstand, sowie 2- und 3-Punkt-Biegung als numerische FEM-Modelle aufgebaut (siehe Abbildung 17). Zur Abbildung des lokalen Faltens wurde jeweils nur eine diskrete Faltlinie im Modell veranlagt. Da bei der 2- und 3-Punkt-Biegung der Ort der Lasteinleitung veränderlich ist, wurde dies über eine Kontaktmodellierung nachgebildet.

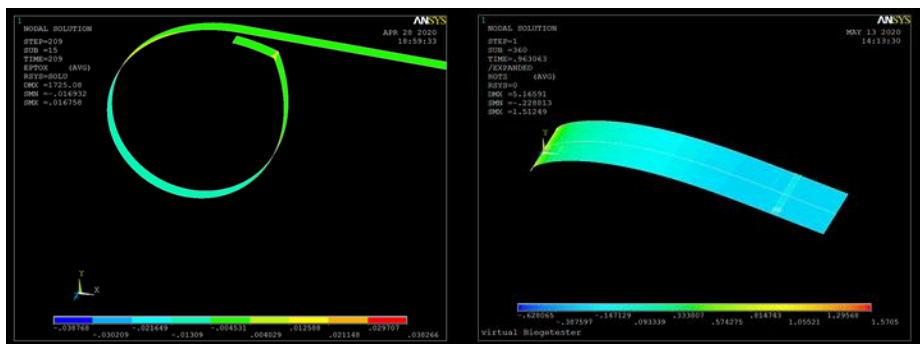


Abbildung 17: Numerische Prognosemodelle zu Krümmungswiderstand und Zweipunktbiegung

Experimentell-numerischer-Abgleich

Die Validierung erfolgt durch Abgleich von experimentell und simulativ ermitteltem Arbeitsdiagramm (Lastreaktionskurven, vgl. Abbildung 18).

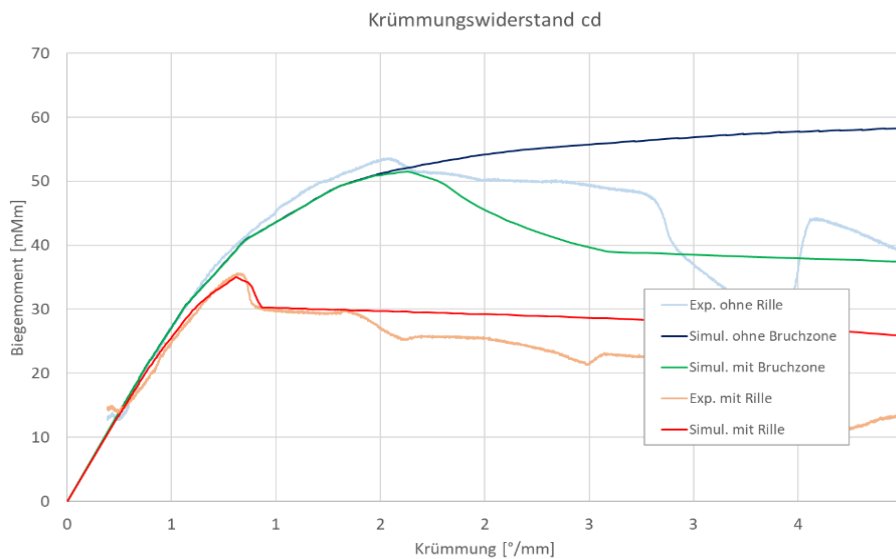


Abbildung 18: Vergleich der Arbeitsdiagramme Krümmungswiderstand CD

Die Prognose des Verhaltens bei querkraftfreier (kein Schubeinfluss), plastischer Biegung gelingt auf Basis der bereitgestellten Materialparameter für beide Faserausrichtung sehr gut. Das Verhalten bei der Krümmungswiderstandsmessung kann damit einschließlich dem lokalen Falten numerisch abgebildet werden. Zur Auslegung gutschonender Verarbeitungsprozesse wird oftmals keine Abbildung des Biegebruches in Verbindung mit einem Absinken

des lokalen Faltwiderstandes benötigt. Deshalb sind im Strukturmodell keine diskreten Faltelemente abzubilden, welche über den Umfang der real prädisponierten Falllinien hinausgehen.

Die geringfügige Abweichung der prognostizierten Kurven für ungerillte Proben im Bereich plastischer Krümmung ist der Forderung von eindeutigen Materialkurven über einen großen Krümmungsbereich geschuldet (vgl. Abbildung 19). Bei Anpassung in diesem Krümmungsbereich steigt die Abweichung für höhere Krümmungen, insbesondere bei einer Umformlinie parallel zur Faser, übermäßig an.

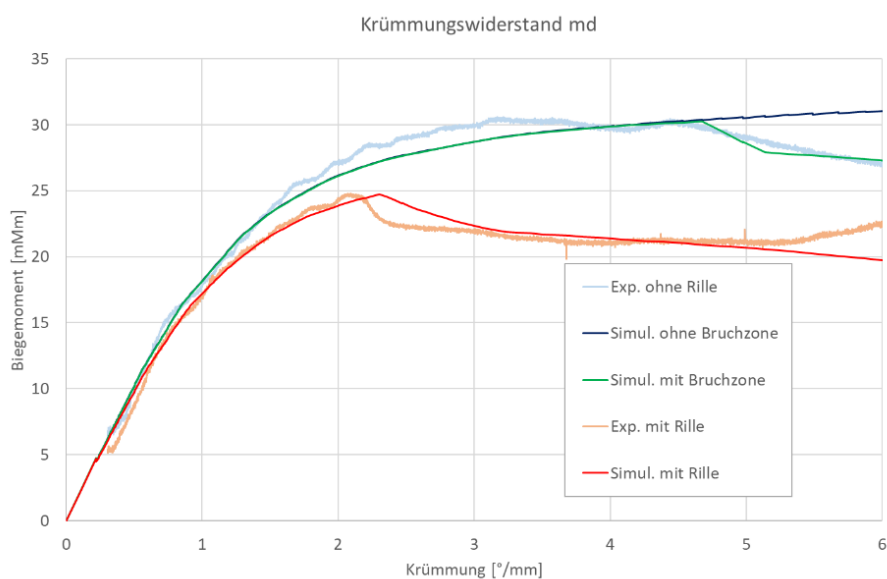


Abbildung 19: Vergleich der Arbeitsdiagramme Krümmungswiderstand MD

Bei der ebenfalls erfolgreichen Abbildung der Biege- und Schubwiderstandsprüfung unter Querkraftbiegung nach der 2- und 3-Punkt-Biegung wurde die geringe Schubsteifigkeit von Kartonwerkstoffen berücksichtigt. Da die eingesetzte FEM-Software ANSYS® bei makroskopischer Modellierung allein im Bereich elastischer Verformung orthotropes und relativ schubweiches Materialverhalten bereitstellt, wird ein lokal unterschiedliches an die Belastung angepasstes Materialverhalten eingesetzt. Dabei wird nur im Bereich der plastischen Biegung die Schubsteifigkeit zu hoch abgebildet. Die lokale Zuweisung der Materialparameter erfolgt iterativ über mehrere Simulationsdurchläufe. Dabei kann als Startwert mindestens 75 % der wirksamen Biegebalkenlänge mit elastischem, schubweichem Materialverhalten abgebildet werden.

9 Validierung per Makrostrukturmodell

Prognosemodell einer Getränkeverpackung

Eine breite Einsatzbereitschaft der neuartigen Methodik in der Verarbeitungstechnik bedarf auch einer Prognosefähigkeit für Makrostrukturen mit lokal unterschiedlichen Lastfällen. Dazu wurde exemplarisch ein experimenteller Stauchversuch mit gefüllten und verschlossenen Getränkeverpackungen, vergleichbar mit dem Box Crash Test, durchgeführt. Entsprechend dieses Versuches wurde ein numerisches Modell einer Getränkeverpackung unter Stapellast entwickelt (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Bei einem komplexem Strukturmodell können unter Lasteinwirkung lokal unterschiedliche Materialbeanspruchungen wirken und Hauptbeanspruchungsrichtungen vorliegen. Aus diesem Grund ist die Prognose mehrstufig über Steps aufgebaut. Dazu wird eine iterative, lokale Anpassung des Materialverhaltens für den zu untersuchenden Lastpunkt durchgeführt. Des Weiteren ist die Abbildung des Füllgutes in Verbindung mit dessen Volumenkonstanz bei geschlossener Packung wesentlich für das Struktur- und Versagensverhalten. Der Nulldurchgang des hydrostatischen Packungsinnendruckes prädisponiert den Ort des Einknickens einer Mantelkante bei Überbelastung unter Druckkraft.

- Step 0: orthotrop, elastisches Materialverhalten bei konstanten Innendruck;
- Step 1: teils lokal isotropes, plastisches Materialverhalten bei konstantem Innendruck, Ermittlung der Tragfähigkeit zur Fokussierung des Material-Modells auf das Lastszenario;
- Step 2: teils lokal isotropes, plastische Materialverhalten bei konstanten Füllvolumen (iterative Innendruckanpassung);
- Step 3: identisch mit Step 2 zur Überprüfung einer stabilen Lösung.

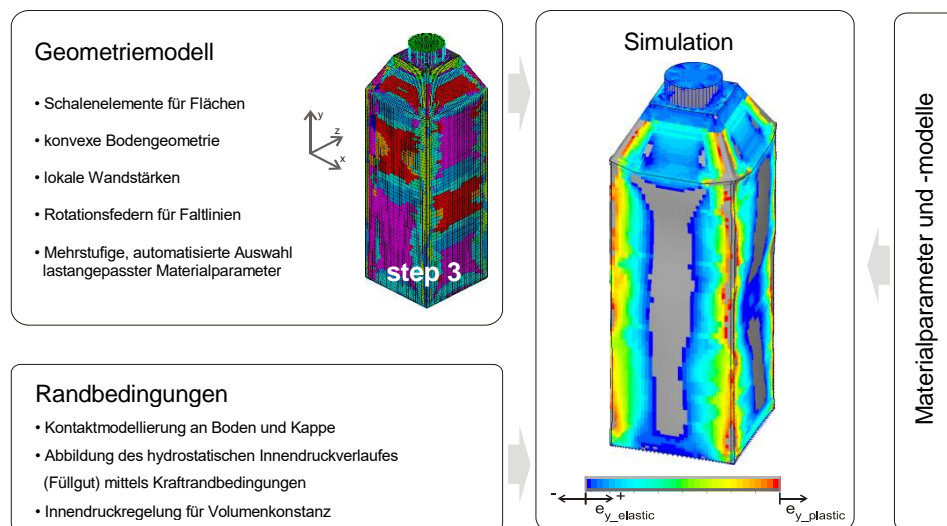


Abbildung 20: Teilmodelle der numerischen Simulation

Simulationsergebnisse Strukturverhalten

In Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. sind die Bereiche unter elastischer Beanspruchung farblich dargestellt. Dabei unterliegen die grauen Bereiche, welche an die blauen angrenzen, einer Zugbeanspruchung und die an rot-orange angrenzenden grauen Bereiche einer plastischen Druckbeanspruchung. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Ableitung der vertikalen Kräfte nur entlang der Außenkanten der Packung erfolgt. Ein erstes Strukturversagen tritt bei Experiment und Simulation in den Ecken des Überganges von Mantel zu Giebel auf.

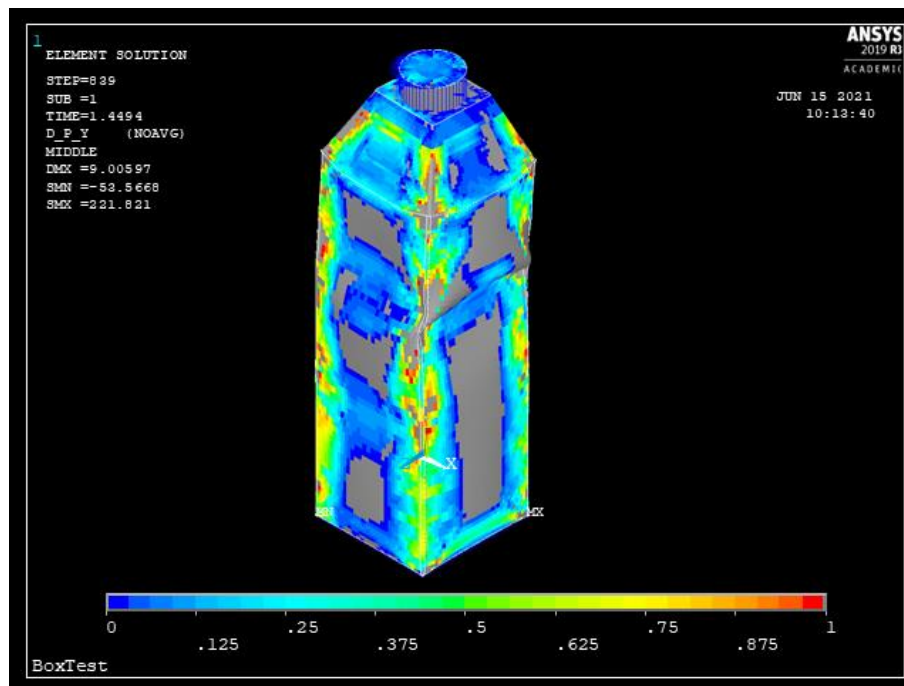


Abbildung 21: Bereiche unter vertikaler elastischer Druckbeanspruchung

In Abbildung 22 ist die Biegebeanspruchung abgebildet. Dabei sind Bereiche unter elastischer Verformung farblich und plastischer grau dargestellt. Das sekundäre Versagen in der Simulation erfolgt durch Einknicken einer Mantelkante. Der Ort des Einknickens der Mantelkante wird von dem Verlauf des hydrostatischen Drucks auf der Innenwand der Packung und dem Nulldurchgang dessen prädisponiert. Im Experiment kann dieses sekundäre Versagen an etwa der Hälfte der Proben nachgewiesen werden. Alternativ kann sich das primäre Struktur- und Materialversagen beginnend von einer ecknahen Zone auf die Giebelkante und in die Seitenwände ausweiten.

In der Realität erfolgt bei lokaler Überbeanspruchung ein Biegebruch mit lokalem Absinken des Biege widerstandes. Erfolgt dieser Sekundärbruch außerhalb der im Modell veranlagten Faltlinien kann dies nur unzureichend abgebildet werden. Das eingesetzte Simulationswerkzeug ANSYS® unterstützt keinen negativen Anstieg der Materialkurve und verlässt den gültigen Modellbereich beim Überschreiten von Bruchdehnung oder Bruchspannung. Für der Art Problemstellung ist der explizite Solver LS-DYNA besser geeignet, welcher jedoch keine vergleichbare Makro-Programmierschnittstelle bereitstellt.

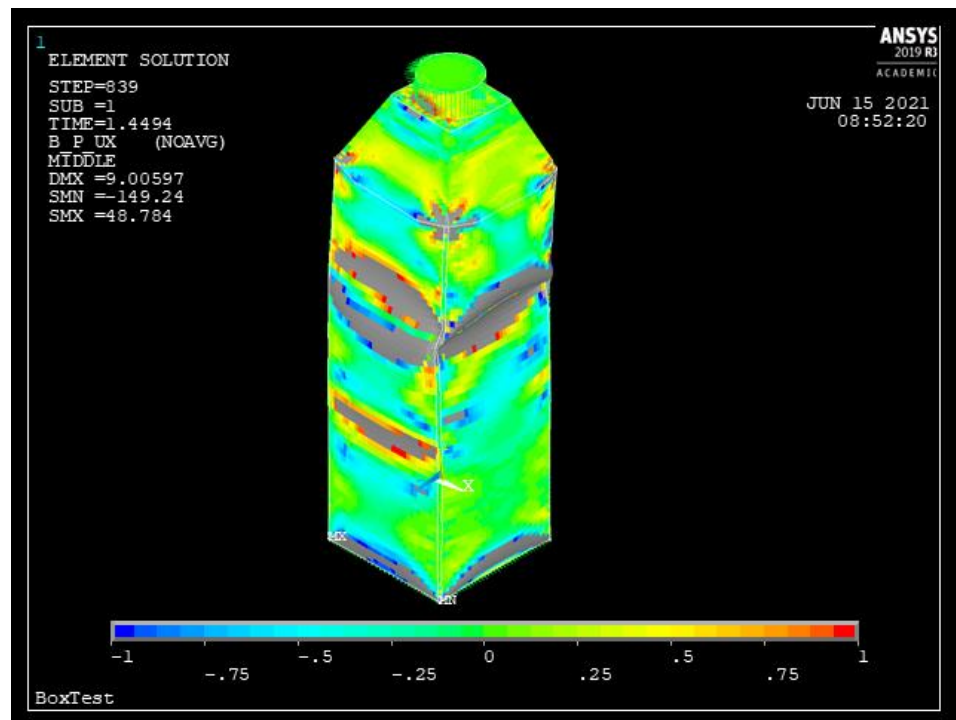


Abbildung 22: Bereiche unter horizontaler elastischer Biegebeanspruchung

Prognosefähigkeit

Auf Basis der per Krümmungswiderstandsmessung und Zugversuch bereitgestellten orthotropen, elastischen Materialparameter kann die Struktursteifigkeit gut wiedergegeben werden, welches der Vergleich von roter Kurve und grauer Kurve mit Ein-Sigma-Bereich zeigt (siehe Abbildung 23). Die iterative Anpassung und lokale Verwendung des plastischen Materialverhaltens ermöglichen eine gute Prognose der Tragfähigkeit und des Ortes des beginnenden Strukturversagens, welches durch Experimente und optische Verfahren überprüft wurde. Die mit teils plastischen Materialverhalten berechnete grüne Kurve repräsentiert eine etwas steifere Makrostruktur. Dies begründet sich aus dem lokalen Einsatz von isotropen, plastischen Materialverhalten, wobei das Materialverhalten bei Hauptbeanspruchung in Faserrichtung auch für die real weichere Querrichtung von der FEM-Software benutzt wird.

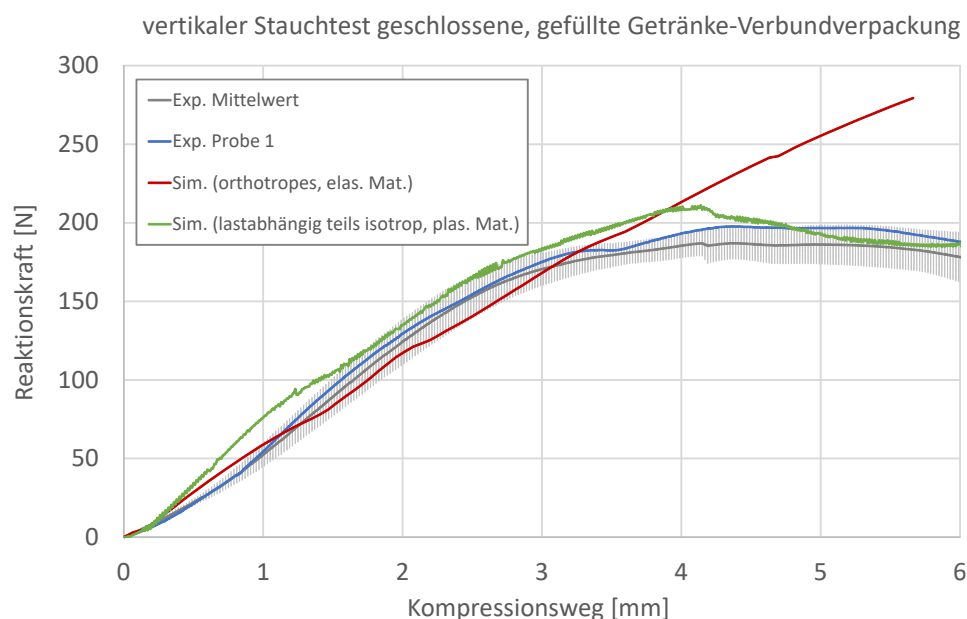


Abbildung 23: Experimentell-nummerischer Abgleich des Makrostrukturmodells, Exp. Mittelwert auf Basis von 8 Proben

Abgleich mit der Digitalen Bildkorrelation / Optischen Dehnfeldanalyse

Die Gesamtsteifigkeit der Struktur entspricht einer Reihenschaltung der einzelnen Steifigkeiten von Verschluss, Giebel, Mantel und Boden. Durch einen experimentellen Abgleich erfolgt eine Überprüfung der Steifigkeitsrelationen (vgl.

Abbildung 24). Das Strukturmodell des Packungsbodens ist bei geringen Lasten etwas zu steif wiedergegeben und der Mantel ist etwas zu druckweich abgebildet. Daraus lässt sich ableiten, dass der Steifigkeitsverlust flächiger Bereiche in der Nähe von Rillungen geringer als bisher angenommen ist oder die berechnete Drucksteifigkeitskurve auf Basis des Krümmungswiderstandes noch zu unpräzise ist. Eine genaue Untersuchung und Zuordnung der Einflüsse bedürfen eines gesonderten Projektes.

Das primäre Versagen erfolgt bei einem Stauchweg zwischen 3 - 4 mm, das sekundäre etwa ab 5 mm. Die zuvor genannten Modellgrenzen werden hier ebenfalls durch ein Abweichen der roten Kurven verdeutlicht.

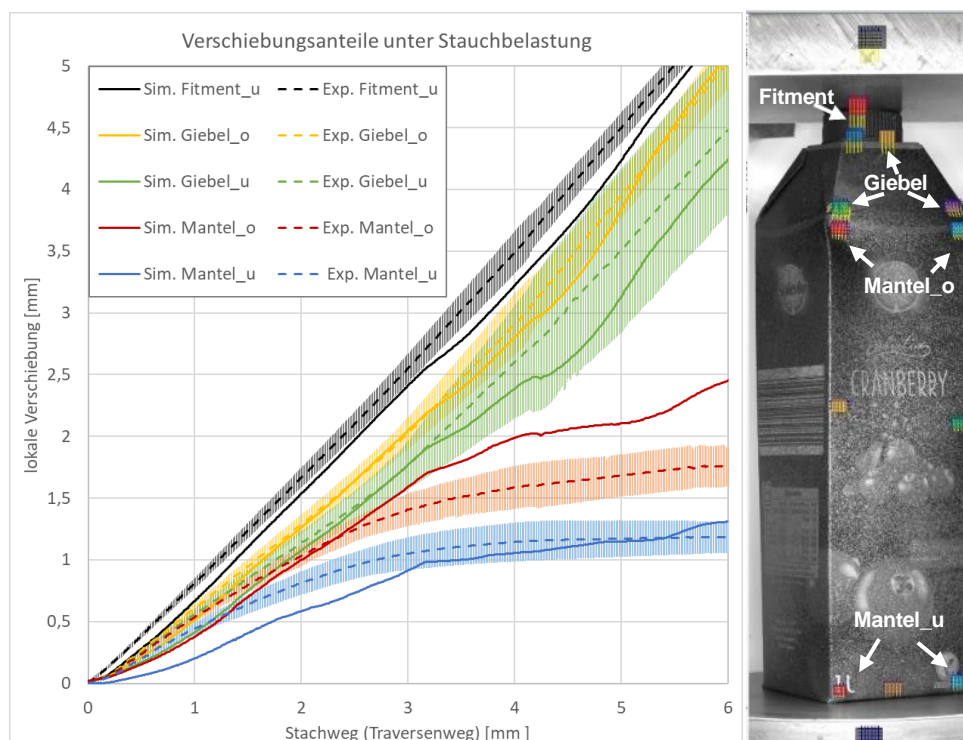


Abbildung 24: Vergleich lokaler Verschiebungen aus Simulation und Experiment (DIC/ODA)

Eignung des Prognosewerkzeuges

Das geschaffene Prognosewerkzeug ermöglicht eine Prognose der Gesamtsteifigkeit der Struktur sowie der maximalen Belastbarkeit. Damit ist es als Auslegungswerkzeug, insbesondere zur Wichtung unterschiedlicher Hebelwirkungen von Einflussfaktoren sehr gut geeignet. Im Fokus der Anwendung stehen Parameterstudien hinsichtlich Materialeinsatz, Faltlinienvorbereitung sowie geometrische Anpassungen oder neue Formate.

Die entwickelten Methodiken Krümmungswiderstandsmessung, alternative Bereitstellung von Materialparametern auf Basis numerischer Verfahren und die lastangepasste Auswahl des lokalen, primär wirksamen Materialverhaltens unterstützen die Bestrebungen nach verfügbaren und verbesserten Prognosewerkzeugen zum mechanischen Umformverhalten von faserbasierten, flächigen Verbundmaterialien.

10 Fazit und Ausblick

Fazit

Im Rahmen des INNO-KOM-Forschungsprojektes „Krümmungswiderstandsmessung“ wurden wesentliche Voraussetzung zur geometrieunabhängigen Beschreibung des plastischen Biegeverhaltens von Karton und Verbundwerkstoffen geschaffen. Auf Basis der entwickelten Materialmodelle, Messmethodik mit zugehöriger Vorrichtung „Krümmungswiderstandsmessung - Curvature Resistance Test CRT“ und numerischen Modellierungs- und Simulationsabläufen können Biege- und Faltvorgänge sowie darauf basierende Strukturen gezielter ausgelegt und untersucht werden. Damit werden Entwicklungsabläufe beschleunigt und Potentiale für einen verringerten Materialeinsatz gehoben.

Die Methodik ist nicht auf papierbasierte Faserwerkstoffe beschränkt und bietet damit ein großes Potential zur Bewertung plastischer Umformeigenschaften flächiger Werkstoffe allgemein. Es ist insbesondere angezeigt die entwickelten Alternativen zur Druck- und Schubsteifigkeitsbestimmung weiter zu verfolgen.

Ausblick

In einem nächsten Schritt soll in Zusammenarbeit mit einem Hersteller von Messsequipment, bei positiver Bedarfsanalyse, ein marktfähiges Messgerät entwickelt werden. Im Rahmen der Geräteweiterentwicklung sind die Punkte Messbereich, -empfindlichkeit und Reduktion von Störeinflüssen (z.B. Reibung) sowie Geräte- und Betriebssicherheit zu behandeln. Unabhängig davon soll auf Basis der entwickelten Algorithmen und Programmabläufe ein Software-tool zur Messdatenweiterverarbeitung inklusive Parameterexport für Prüfprotokolle und bekannte FEM-Programme entwickelt werden.

Literatur

- 1 Bekaert, P. et al: Modellfabrik Papier – Basispräsentation, Düren, 2021
- 2 Miletzky, F.: Chance Leichtbau - Zukunftsfähige Anwendungen von Papier. Wochenblatt für Papierfabrikation 4/2013, S. 246-249, Deutscher Fachverlag GmbH, Frankfurt am Main, 2013.
- 3 Simon, JW. A Review of Recent Trends and Challenges in Computational Modeling of Paper and Paperboard at Different Scales. Arch Computat Methods Eng 28, 2409–2428 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09460-y>.
- 4 DIN EN ISO 1924-2:2009-05: Papier und Pappe - Bestimmung von Eigenschaften bei Zugbeanspruchung - Teil 2: Verfahren mit konstanter Dehngeschwindigkeit (20 mm/min) (ISO 1924-2:2008), Beuth-Verlag, Berlin, 2009.
- 5 DIN 54518:2004-03: Prüfung von Papier und Pappe – Streifenstauchwiderstand, Beuth-Verlag, Berlin, 2004.
- 6 Matheas J.: Materialparameter, PTS-Forschungsbericht, Heidenau, 2015.
- 7 Schmidt, F. J.; Schneider, T.: Anwendung der Impact-Verarbeitung bei der Umformung von Kartonverbundwerkstoffen. Tagungsband VVD 2006, Dresden, 2006.
- 8 DIN EN 20187:1993-11: Papier, Pappe und Zellstoff; Normalklima für die Vorbehandlung und Prüfung und Verfahren zur Überwachung des Klimas und der Probenvorbehandlung (ISO 187:1990), Beuth-Verlag, Berlin, 1993.
- 9 DIN 53123-1:2005-04: Prüfung von Papier und Pappe - Bestimmung der Biegesteifigkeit - Teil 1: Resonanzlängen-Verfahren, Beuth-Verlag, Berlin, 2005.
- 10 TAPPI/ANSI T 489 om-15: Bending resistance (stiffness) of paper and paperboard (Taber-type tester in basic configuration), tappi.org, Georgia/USA, 2022.
- 11 DIN 55437-3:2008-05: Prüfung von Pappe - Rillungen - Teil 3: Bestimmung der technischen Qualität, Beuth-Verlag, Berlin, 2008.
- 12 Öchsner, A. (2016). Theorie der Balkenbiegung. Southport, QLD, Australien: Springer Vieweg.