

Schlussbericht vom 29.01.2024

zu IGF-Vorhaben Nr. 21513BG

Thema

UniVorsUm - Thema: Entwicklung einer universellen Methode zur Vorhersage der Umformbarkeit von papierbasierten Materialien im Tiefziehen und Hydroforming

Berichtszeitraum

01.12.2020-31.07.2023

Forschungsvereinigung

Papiertechnische Stiftung (PTS) & Industrievereinigung für Lebensmitteltechnologie und Verpackung e.V (IVLV)

Forschungseinrichtung(en)

Papiertechnische Stiftung (PTS)

Steinbeis Research gGmbH

TU Darmstadt - Institut für Produktionstechnik & Umformmaschinen

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Zusammenfassung	5
2 Wissenschaftlich- technische und wirtschaftliche Problemstellung	8
3 Forschungsziel	14
4 Definition von Qualitätskriterien und Materialauswahl	15
5 Ableitung lokaler Beanspruchungen	18
5.1 Modellierung der wirkmedienbasierten Umformung	18
5.2 Ableitung lokaler Beanspruchungen ohne Nachfließen des Materials	20
5.3 Ableitung lokaler Beanspruchungen mit Nachfließen des Materials	23
5.4 Zusammenfassende Betrachtung der abgeleiteten Beanspruchungen	25
6 Umformversuche Tiefziehen	27
6.1 Prozessfenster und Einfluss von Prozessgrößen	28
6.2 Qualitätsgrößen	31
6.3 Ermittlung der Qualitätsgrößen	33
6.4 Fazit	39
7 Umformversuche Hydroformen	40
7.1 Verwendete Umformgeometrien	40
7.2 Methodik zur Bewertung der Umformqualität	41
7.3 Prozessfenster und Einfluss von Prozessgrößen	43
7.4 Umformbarkeit verschiedener Papiere	45
7.5 Fazit	49
8 Materialcharakterisierung	50
8.1 Standardprüfmethoden der Papiertechnik	51
8.2 Parametermodifizierter Zugversuch	57
8.3 Out-of-Plane-Schubprüfung	61
8.4 In-Plane-Schubprüfung	65
8.5 Curvature Resistance Test (CRT)	67
8.6 Tiefungsversuche	71
8.7 Reibversuche	76
8.8 Reibversuche / Streifenzugversuch	78
8.9 Zero Span Kompression / Reibtester	80
8.10 Verhalten unter Kompression	82
8.11 Out of Plane Kompression	84
9 Korrelationsanalyse und Validierung (AP 8, 9)	86
9.1 Korrelationsanalyse mittels multipler Regressionsmodelle	87
9.1.1 Grundlagen multipler Regression und Korrelationsanalyse	87
9.1.2 Korrelationen im Tiefziehen (SH).....	89
9.2 Korrelationsanalyse auf Basis Künstlicher Neuronaler Netze	99
9.2.1 Aufbau und Funktion des Künstlichen Neuronalen Netzes	99
9.2.2 Korrelationen im Tiefziehen	101

9.2.3	Korrelationen in der wirkmedienbasierten Umformung.....	103
9.3	Validierung und Anpassung des Prognosewerkzeugs	106
10	Schlussfolgerungen.....	109
11	Durchführende Forschungsstellen	111
12	Literaturverzeichnis	112

1 Zusammenfassung

Zielstellung

Ziel des Forschungsvorhabens war es, eine Standardisierung und Vorhersage der Umformbarkeit für Papiere und verwandte Werkstoffe in 3D-Umformprozessen sowohl mit festen als auch mit flexiblen Niederhaltern anhand wesentlicher Materialeigenschaften zu entwickeln. Hierfür sollten zunächst für eine neue Prüfstrategie aussagekräftige Kennwerte identifiziert werden, um Effekte und Defekte den im 3D-Umformprozess verantwortlichen Formänderungen bzw. Materialschädigungen (im geringen Umfang erlaubt, in großem Umfang unerwünscht) zuordnen zu können. Weiterhin sollten Prüfscenarien und Prüfbedingungen (prozessnahe Zustände) abgeleitet werden, die Aufschluss über die Umformbarkeit von Materialien geben. Die gezielte Kombination sollte sodann für eine Vorhersage der Umformgrenzen dienen. Abschließend war die Prüfmethodik für die 3D-Umformprozessvarianten zu harmonisieren.

Ergebnisse

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde erstmals eine systematische Untersuchung der Umformbarkeit verschiedener Papiere in der wirkmedienbasierten Umformung und im Kompressionstiefziehen mit bestimmter Oberfläche verglichen. Dabei wurde durch vergleichbare Variation der Prozessparameter Niederhalterkraft und Umformdruck für jedes Papier ein optimiertes Umformergebnis erzielt. Zur systematischen Bewertung der geometrischen Umformgüte wurde eine Methode entwickelt, die unterschiedlichen geometrischen Merkmale aus digitalen Abbildern der Formteile extrahiert. Dabei hat sich gezeigt, dass die Umformgüte der untersuchten Papiere unterschiedlich hoch ist und nicht alle geometrischen Merkmale sinnvoll bestimmt werden können. Als geeignetes Merkmal, das unabhängig von der Umformgüte bestimmt und zur Bewertung herangezogen werden kann, wurde beim wirkmedienbasierten Tiefziehen der Ausfüllgrad eines virtuellen Schnitts, auch als Flächenfüllung bezeichnet, durch die Probe identifiziert. Beim Kompressionsziehen hat sich die Auswertung der Falten, besonders die Starthöhe der Faltenbildung, als geeignetes Kriterium gezeigt.

Vorrangiges Ergebnis der Hydroforminguntersuchungen ist, dass die Flächenfüllung die höchste Korrelation mit Materialkennwerten, aus einem Tiefungsversuch ermittelt, aufweist. Bei diesem Versuch wird das flächige Prüfmaterial gleichmäßig eingespannt und mit einem Druck beaufschlagt, so dass eine zunehmende Dehnung bis zum Versagen aufgebracht wird. Aus der sich bei 70% des maximalen Drucks bei Versagen ausbildenden Kuppelhöhe wurde der Kennwert mit der höchsten Korrelation zur Flächenfüllung abgeleitet. Zusätzlich kann der sich ausbildende biaxiale Spannungszustand mit einem Kamerasystem unter Verwendung eines stochastischen Musters und digitaler Bildkorrelation analysiert werden. Daraus lässt sich unter anderem die mittlere elastische Dehnung bestimmen, die einen weiteren Kennwert mit hoher Korrelation darstellt.

Bei gängigen Qualitätsgrößen im Tiefziehen konnten durch die Versuche eine Korrelation zu Materialparametern bestätigt werden. Neu in den Fokus gerückt ist die Starthöhe der Faltenbildung. Definiert als Höhe ab welcher eine festgelegte Anzahl an Falten zu erkennen ist kann über diesen Qualitätswert der weitere Verlauf gut abgeschätzt werden. Lediglich der Algorithmus auf dem die Faltenauswertung basiert stieß bei der farblichen Bandbreite der Materialien an seine Grenzen.

Ein Prüfverfahren, aus dem ein Kennwert mit hohen Korrelationen zu Qualitätsparametern beider Umformverfahren ermittelt wurde, ist der Zugversuch, der ein Standardprüfverfahren mit hoher industrieller Abdeckung darstellt. Hier empfehlen sich die Bruchdehnung und der E-Modul als besonders aussagekräftige Kenngrößen aus dem Projekt.

Anhand der vier Validierungspapiere konnte die Leistungsfähigkeit der Vorhersage der Umformqualität in der wirkmedienbasierten Umformung bestätigt werden. Mit einem Fehler von weniger als 10 % kann die Umformqualität aus den durchgeführten Charakterisierungsversuchen vorhergesagt werden und ermöglicht somit eine gute Abschätzung der Eignung verschiedener Materialien für die wirkmedienbasierte Umformung.

Beim Kompressionsziehen konnte die Vorhersage durch KNN nicht direkt bestätigt werden. Die real erzielten Umformtiefen liegen mit 10-40% deutlich über den vorhergesagten. Bei den vorhergesagten Ziehtiefen wurden eine deutlich höhere Faltenzahl berechnet, die bei Validierungsversuchen nicht erreicht wurden. Bei den Versuchen wurde wie bei den Versuchen für die Datengrundlage die Ziehtiefe erhöht bis die Faltenqualität nicht mehr subjektiv ansprechend wurde. Mit der Berücksichtigung, dass die Faltenanzahl größer, also die optische Qualität bei geringerer Ziehtiefe deutlich besser ist, sind die Vorhersagen plausibel und können nachgebildet werden.

Zielerreichung

Die Ziele des Vorhabens wurden erreicht.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben IGF 21513 BG der AiF-Forschungsvereinigungen PTS und IVLV 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.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Unser Dank gilt außerdem den beteiligten Firmen des projektbegleitenden Ausschusses für die Unterstützung der Arbeiten.

2 Wissenschaftlich- technische und wirtschaftliche Problemstellung

Verpackungen aus Papier durch 3D-Umformung Verpackungen haben sich durch ihre Werbe- und Identifikationswirkung zu einem wesentlichen Bestandteil des Produktes selbst entwickelt [Touchpoint 2015, Gutjahr 2011]. Gerade hinsichtlich Carbon-Footprint, der Verknappung fossiler Rohstoffe und einer zunehmenden Anhäufung von Abfällen in der Umwelt [Ivleva 2017, Wagner 2018], erfüllen Papiere und naturfaserbasierte Packlösungen – auch aus Kundensicht – den Wunsch nach Umweltfreundlichkeit und Nachhaltigkeit sehr gut [Pointlogic 2012, Beutner 2012]. Der deutsche Markt für Papierverpackungen ist wachsend und umfasste 2017 10,7 Mrd € [IVK 2018].

Zur Sicherstellung einer höchstmöglichen Identifikationswirkung setzen sich mehrdimensional ausgeformte Verpackungen mit komplexer Geometrie und hochwertiger Materialanmutung durch, die in der Regel aus starren Kunststofffolien über Umformverfahren, wie dem hochproduktiven Thermoformen, direkt beim Verpacker erzeugt werden. Diese Märkte waren vor etwa 10 Jahren für faserbasierte Produkte nur eingeschränkt zugänglich. Seit einigen Jahren ist der Handlungsdruck auf Verpacker durch die Single-Use-Plastics-Richtlinie der EU [EP 2019] schlagartig drastisch gestiegen, Alternativen zu etablierten Kunststoff-Verpackungslösungen am Markt anzubieten. Von den inkludierten Verbotskategorien sind Kunststoffteller, Luftballonhalter oder Getränkebecher direkt durch umgeformte Papierprodukte ersetzbar. Das zum 01.01.2019 verabschiedete Verpackungsgesetz (VerpackG) fordert zudem die Erfüllung ambitionierter Recyclingquoten für petrochemische Kunststoffe. Während für Kunststoffverpackungen hier dringend Innovationen erforderlich sind, bestehen die Recyclingkreisläufe für Papiere bereits und Verpacker steigen auch wegen der günstigeren modulierten Lizenzentgelte verstärkt auf Papierverpackungen um, ohne die gewohnte Formenvielfalt thermogeformter Kunststoffpacklösungen aufgeben zu wollen. Durch diese Gegebenheiten ist ein sprunghafter Anstieg der Nutzung der 3D-Papierumformung in den letzten Jahren zu beobachten gewesen.

Bereits vor etwa 5 Jahren begann die Marktdurchdringung durch umgeformte Papierprodukte. Beispiele sind hier in der aktuellen Entwicklung und im Angebot am Markt die überwiegend auf Thermoformanlagen hergestellten Musterverpackungen (Abbildung 2-1 links/Mitte). Die bisher mittels Pressformen hergestellten Lebensmittelverpackungen für Tiefkühl- und Mikrowellenanwendungen sind in ihrem Formatspektrum deutlich breiter geworden und die Möglichkeiten für gasdichte Schalen sind vorbereitet [Hauptmann 2013].

Ziehen von Karton – Status

Auch das Ziehen von Karton wird inzwischen in marktfähigen Verpackungen angeboten (Abbildung 2-1 rechts). In diesem Verfahren sind in wissenschaftlichen und bilateralen Studien bereits die Grenzen weiter ausgebaut (Abbildung 2-2) und stehen kurz vor ihrer Umsetzung in der Verpackungspraxis.



Abbildung 2-1: Beispiele von Formteilen, die im Labormaßstab hergestellt wurden [Hauptmann 2017]

Der Umsetzung geht ein im Einzelnen zuzuschneidendes Eigenschaftsprofil-Engineering voraus, was für eine Vielzahl von Anwendungen aufgrund Ihrer Anforderungsprofile aussichtsreich erscheint (siehe Beispiele in Abbildung 2-2).



Abbildung 2-2: Potentielle Anwendungen für die 3D-Umformtechnik von Papier und Karton

Umformverfahren für Papiere und Beanspruchungsmodi

Um flächige Materialien (Metallfolien, Kunststofffolien oder auch Kartone) in mehrdimensionale Formkörper zu überführen, existieren zwei grundlegend verschiedene Prinzipien. In Verfahren mit festen Niederhaltern (Fixed Blank) wird das umzuformende Material in den Außenbereichen fest eingespannt und sodann aus der Ebene heraus durch einen Stempel oder ein Wirkmedium in eine entsprechend ausgeformte Kavität gedrückt, die die Zielgestalt des Werkstückes definiert (z.B. hot-Stamping und Thermoforming). In Umformprozessen mit flexiblen Niederhaltern (Sliding Blank) erfolgt die Einspannung des flächigen Halbzeuges nur mit einer definierten Kraft. Ein Stempel oder eine Membran formt nun auch hier das Werkstück durch Einziehen in eine Büchse, jedoch erlaubt die gezielte Steuerung der Niederhalterkraft ein Nachfließen des Materials in den Ziehspalt hinein (z.B. Tiefziehen und Hydroforming). Die nötigen Anforderungen an das jeweilige Material unterscheiden sich je nach Umformprinzip stark. Ergebnisse jüngerer Untersuchungen konnten in Ansätzen relevante Material- und Prozesszustände identifizieren.

Beanspruchungsmodi im Ziehen

Die Beanspruchungen im Ziehprozess sind im Flansch- und Zargenbereich dreiaxsig (Abbildung 2-3) und führen anfänglich zu Verschiebungen in der Fasernetzwerkstruktur, bis dies aufgrund des begrenzten Porenvolumens nicht mehr möglich ist. Die überlagernden Beanspruchungen in Dickenrichtung (ZD) verändern die Dehnungseigenschaften. Im Flanschbereich entsteht bei flexiblen Niederhaltern ein Bruch im Lagengefüge des Materials, dessen Charakteristik durch seine Schubeigenschaften gekennzeichnet ist. Beim Pressformen entfällt die Druckspannung in ZD in der Zarge und es erfolgt keine Verdichtung. Am Einlaufradius sowie am Bodenradius treten zudem Biegespannungen auf, die ebenfalls Schubspannungen axial erzeugen.

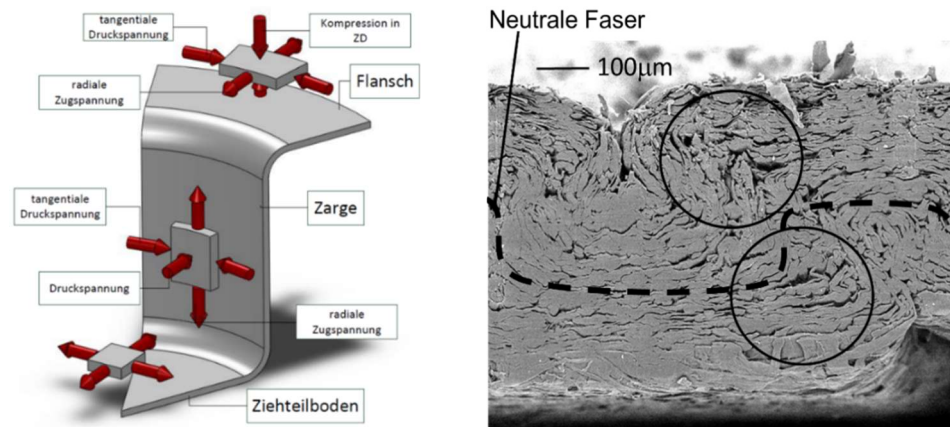


Abbildung 2-3: Spannungszustände im Formteil bei der 3D-Umformung von Papier und Karton (links), Zargenschnitt nach Umformung durch die Falten (REM-Aufnahme) (rechts)

Das Hydroforming ist ein in der Metallumformung unter dem Namen Hochdruckblechumformung (HBU) etablierter Umformprozess, bei dem flächige Halbzeuge unter Zuhilfenahme eines Wirkmediums umgeformt werden. Für Papier wurde der Prozess beispielsweise von Linvil und Huttel untersucht. Zur Abdichtung des porösen Materials gegenüber dem Umformmedium kommt eine Membran zum Einsatz. Abbildung 2-4 stellt die einzelnen Phasen während des Umformprozesses dar.

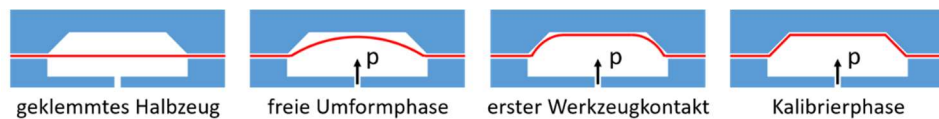


Abbildung 2-4: Umformphasen beim Hydroforming

Das Werkstück wird zunächst im Werkzeug fest eingespannt. Ein Nachfließen des Materials in die Matrize wird somit unterbunden. Die Bildung von Falten wird verhindert. Durch Beaufschlagung des Wirkmediums mit einem Umformdruck kommt es zur Umformung. In der ersten Umformphase ist der herrschende Spannungszustand rein biaxial. Das Material wird in der Ebene in beide Raumrichtungen gedehnt. Kommt es zum Anliegen des Werkstücks an die Matrize, überlagert sich dieser biaxialen Zugspannung eine Druckspannung in Dickenrichtung. In der Kalibrierphase werden die Konturen der Matrize ausgeformt. Die Druckspannung in Dickenrichtung dominiert. Zum Versagen kommt es beim Hydroformen, wenn die auftretenden Zugspannungen die vom Material ertragbaren Spannungen überschreiten. Huttel beschreibt in seiner Arbeit, dass diese ertragbare Spannung durch die überlagerte Druckspannung zunimmt und eine Rissbildung vermieden werden kann.

**Materialseitige
Beeinflussungs-
möglichkeiten**

Wie in aktuellen Forschungsarbeiten nachgewiesen werden konnte, lassen sich Eigenschaften wie eine günstige Reibpaarung, eine höhere Materialdehnbarkeit oder eine Manifestierung der Form nach der Umformung durch gezielten Additiveinsatz und Lagenaufbau oder eine entsprechende Feuchteconditionierung erreichen, wodurch die möglichen Formtiefen und Oberflächenqualitäten im Tiefziehen und Hydroforming eine beachtliche Weiterentwicklung erfuhren. So sind beispielsweise im Tiefziehen Umformgrade bis 1,0 mit hervorragender Oberflächenqualität erzielbar.

**Prozesseitige
Beeinflussungs-
möglichkeiten**

Der Umformprozess ist von einer Vielzahl abhängiger Faktoren bestimmt. Grundlegender Einfluss geht von der Geometrie der Grundfläche und den in ihr zusammengestellten Elementen (Radien, konvex, konkav, Geraden) aus. Von dieser Geometrie und im Zusammenhang mit der Ziehhöhe leitet sich der Umfang des Materialüberschusses bzw. im konkaven Fall des Materialmangels ab. Bei der Anwendung flexibler Niederhalter ist die Steuerung des Materialüberschusses durch die Gestaltung des Niederhalterkraftprofils möglich. Die Verteilung und Ausprägung der durch den Spannungszustand beim Nachrutschen des Zuschnittes bedingten Falten kann zusammen mit der Ausprägung und Verteilung axialer Dehnungen durch die gezielte Einstellung eines Kraftverlaufes über dem Stempelweg eingestellt werden. Im Pressformen ist diese Steuerungsmöglichkeit aufgrund der freiliegenden Zarge bis zum Schließen des Werkzeuges in geringerem Maße wirksam. Aus diesem Grund wird durch die Gestaltung des Zuschnittes (Rillmuster) eine Sollbruchstruktur vorgegeben.

Die Verhältnisse im Ziehspalt oder Pressspalt im Schließzustand des Pressformens sind von den aufeinander abgestimmten Werkzeugmaßen und -toleranzen sowie ihrer Einrichtung zueinander abhängig. Das Spaltmaß und ggf. dessen Verjüngung mit der Ziehhöhe (Konizität) sind für die Verdichtung und Fixierung im umgeformten Zustand entscheidende Größen, die mit der Verdichtbarkeit der Materialien in Interaktion stehen und bislang nicht vorhersehbar sind. Die Verdichtungseigenschaften aber auch Schubeigenschaften von Papier und Karton werden durch Temperatur und Materialfeuchte verändert, so dass in diesem Zusammenhang die Fixierung der gewünschten Form einzustellen ist. Die Zusammenhänge der Prozessparameter werden überwiegend mit Hilfe linearer und quadratischer Regressionsmodelle mit Qualitätskenngrößen korreliert, so dass der Einfluss der Größen und ihre Wechselwirkungen erfolgreich sichtbar gemacht werden.

Ein wesentlicher Einfluss im Prozess ist die Reibung, die an den einzelnen Werkzeugflächen unterschiedlich einzustellen ist und durch Werkzeugmaterial, Oberflächengüte aber auch durch Kontaktdruck, Geschwindigkeit sowie Materialfeuchte, Werkzeugtemperatur und elektrische Ladungseffekte verändert wird.

Werden jedoch die Beanspruchungsgrenzen des Materials im Prozess überschritten, kommt es zur Ausbildung verschiedener Fehlerbilder, die ihrerseits neben einer optischen Beeinträchtigung zusätzlich funktionelle Probleme wie Verlust der Barrierewirkung sowie verschlechterte Siegelbarkeit bei Papierverbunden oder generell verringerte mechanische Belastbarkeit nach sich ziehen. Unabhängig vom Umformverfahren werden diese in Risse oder Falten kategorisiert. Diese Fehler bedingen signifikante Maschinenstillstände und Justierbedarf und müssen daher durch gezielte Anpassung der Prozesseinstellungen auf das Material so weit wie möglich ausgeschlossen werden.

Problemstellung Die Schwierigkeit in der Umsetzung der Verpackungslösung besteht aber nicht nur in der reinen technischen Lösung, sondern in der klaren Definition der Lieferketten und Bedingungen und vor allem in der Beschreibung der Materialqualitäten, die jeweils anwendungsbezogen mindestens erforderlich sind, um prozesssicher und ausreichend schnell produzieren zu können. Ein wesentlicher Mangel liegt in fehlenden Kriterien und Kenngrößen zur Beschreibung der Umformbarkeit von Papier und Karton sowie den zugehörigen Prüfmethode. Dies resultiert darin, dass der Fertigungsprozess individuell an das zur Verfügung stehende Material angepasst werden muss. Dies kann nur durch empirische Untersuchungen an bereits gefertigten Werkzeugen erfolgen. Durch notwendige Anpassungen entstehen den Herstellern hohe Kosten. Etablierte Verfahren zur Materialcharakterisierung von Papier reichen nicht aus, um eine hinreichend genaue Aussage über die Umformbarkeit und das Verhalten im späteren Prozess treffen zu können. Das geplante Forschungsvorhaben dient in erster Linie dazu, diesen Umstand umzukehren. Der Umformprozess wird anhand vorliegender Materialdaten mit einer entsprechenden Sicherheit ausgelegt. Somit können Verpackungshersteller den Umformprozess schon in der Planungsphase gezielt an den Werkstoff anpassen. Im Umkehrschluss ist es aber ebenso möglich, dass Anforderungen an ein Verpackungsmaterial gestellt werden können. Papierhersteller können sich an Zielwerten orientieren und dementsprechend kosteneffizient Materialien zur Herstellung komplexer Geometrien entwickeln.

Vorarbeiten zur Entwicklung einer Prüfstrategie

Die Forschungsstellen haben in dem Bemühen, die Mechanismen in Materialien und Prozess bei der 3D-Umformung zu beschreiben, die Aussagekraft ausgewählter Standardprüfmethoden untersucht. Hierbei sind bislang im Rahmen der Beurteilung von Labor- und Pilotmaterialien im Projekt IGF 16578BR die Biegesteifigkeit, der Tensile-Index sowie die scheinbare Dichte des Materials als bedingt geeignet und eher grobe Indikatoren verbesserter Umformeigenschaften identifiziert worden. Sie ergeben jeweils einzeln kein konsistentes Bild und ihr Zusammenhang mit der Umformbarkeit ist bislang nicht durchgängig beschrieben. Ein vergleichbares Bild zeichnete sich für das Hydroforming im Projekt IGF 17788N1 ab. Für die Beschreibung des Einflusses der Reibung auf den Umformprozess und seiner Interaktionen mit Prozessparametern wurden durch die Forschungsstellen verschiedene tribologische Prüfabläufe und zugehörige Spezialprüfgeräte entworfen. Bei Huttel 2015 wird ein Reibprüfgerät mit einseitig eingespannter Probe vorgestellt, welches unter definiertem Druck und verschiedenen Geschwindigkeiten den Reibwiderstand abbildet. Die elektrostatistische Aufladung wird bei vielfacher Wiederholung in einer Streifenzugprüfanlage von Lenske 2017 unter verschiedenen Temperaturen studiert. Die Reibzustände in der Ziehbüchse und unter dem Faltenhalter unterscheiden sich und werden in einer neuen Prüfmethode untersucht. Das gleiche Gerät ist imstande, Druckbeanspruchungen ohne freie Länge, d.h. im vollständig eingespannten Zustand unter Vorspanndruck zu testen und die Faltenbildung nachzustellen.

Standardprüfmethoden der Papierbranche und deren begrenzte Anwendbarkeit

In der Papiertechnik existiert eine Vielzahl an mechanischen Prüfmethode zur Gewinnung von Werkstoffkennwerten. Insbesondere Parameter für Zug und Druck in der Blattebene sind in den meisten Fällen problemlos zu generieren. Die Anwendung dieser Messmethoden zur Charakterisierung der Umformbarkeit von faserbasierten Materialien ist jedoch nicht untersucht oder nur bedingt zielführend. Hierzu seien insbesondere die beiden folgenden Gründe genannt: Die komplexen Beanspruchungsmodi beim Umformen sowie die abweichenden Umgebungsbedingungen. Anders als bei den meist uniaxialen quasi-statischen Prüfungen der Papiertechnik kommt es beim Umformen von Papier zu komplexen und überlagerten Schub-, Zug- und Druckbeanspruchungen im Material. Durch das Überlagern der Beanspruchungen kommt es zu Wechselwirkungen der eingebrachten Kräfte, welche durch die aktuell angewendeten Prüfverfahren nicht nachgestellt werden können. Darüber hinaus wird bei den Standardversuchen ausschließlich eine Standardgeschwindigkeit und das Normklima zu 23 °C und 50 % RH genutzt. Diese Bedingungen entsprechen jedoch nicht dem realen Anwendungsfall. Papier als hygroskopischer Werkstoff zeigt eine starke Abhängigkeit der Werkstoffkennwerte insbesondere von der Umgebungfeuchte aber auch der Temperatur auf. Darüber hinaus ist auch eine Abhängigkeit von der Prüfgeschwindigkeit (Viskoelastizität) existent. Daher ist es notwendig, die bestehenden Prüfmethode zu erweitern und anwendungsgerechte Prüfstrategien zu entwickeln.

3 Forschungsziel

Forschungsbedarf

Die vorstehend geschilderten Ausführungen beschreiben jeweils Teilaspekte des Umformvorgangs. Eine vollständige Beschreibung der Umformbarkeit war bislang nicht gelungen. Die erfolgreichen Korrelationen der Formteilqualität mit Prozessparametern im Umformprozess ließen jedoch erwarten, dass mittels statistischer Modelle unter Kombination der Prüfmethoden die Komplexität der Einflussgrößen aus Material, Klima und Maschinenteknik erfolgreich erfasst und in eine praxistaugliche Methode überführt werden können. Die erforderliche Erfahrungsbasis für den Einfluss von Teilaspekten und die Kenntnis notwendiger Modifikationen an Prüfmethoden bzw. eine ausreichende Eingrenzung der in Frage kommenden Prüfmethoden sind gegeben, so dass der nächste Schritt eine passgerechte Kombination der Methoden ist, die durch die empirische Modellierung in ihrer Güte beurteilt werden kann.

Ziel

Ziel des Forschungsvorhabens war es, eine Standardisierung und Vorhersage der Umformbarkeit für Papiere und verwandte Werkstoffe in 3D-Umformprozessen sowohl mit festen als auch mit flexiblen Niederhaltern anhand wesentlicher Materialeigenschaften zu entwickeln. Hierfür sollten zunächst für eine neue Prüfstrategie aussagekräftige Kennwerte identifiziert werden, um Effekte und Defekte den im 3D-Umformprozess verantwortlichen Formänderungen bzw. Materialschädigungen (im geringen Umfang erlaubt, in großem Umfang unerwünscht) zuordnen zu können. Weiterhin sollten Prüfscenarien und Prüfbedingungen (prozessnahe Zustände) abgeleitet werden, die Aufschluss über die Umformbarkeit von Materialien geben. Die gezielte Kombination sollte sodann für eine Vorhersage der Umformgrenzen dienen. Abschließend war die Prüfmethodik für die 3D-Umformprozessvarianten zu harmonisieren.

4 Definition von Qualitätskriterien und Materialauswahl

Grundlagen und Definition Qualitäts- kriterien

Qualitätskriterien werden in der Papiertechnik üblicherweise nach [Heinz 1966] in optische Qualität und Formstabilität unterteilt. Für die objektive Beurteilung von erzeugten Tiefziehteilen/Formteilen mussten in Abstimmung mit den Projektpartnern Kriterien formuliert werden, die möglichst für beide Herstellungsverfahren anwendbar sind. Naheliegend ist als erste Klassifikation ein einfaches Versagenskriterium unter der mechanischen Belastung in der Umformung, das hier unabhängig von der Bruchmechanik die Tauglichkeit / Funktionserfüllung bewertet und in diesem Projekt nur intakte Formteile zulässt. Die Bewertung erfolgt visuell und schließt Formteile mit offensichtlichen Rissen besonders in der Zarge als auch Schichtversagen – was nicht unbedingt als Riss, sondern als Materialermüdung oder Beschädigung auftreten kann – für die weitere Qualitätsbeurteilung aus. Nicht als Ausschuss wurden Formteile mit „Zipfelabrissen“ am Zargenrand gewertet, da sie nicht durch Materialversagen an sich entstehen, sondern durch infinitesimal kleiner werdende Kontaktflächen, auf die entsprechende nicht regelbare Haltekräfte wirken. Ursache ist in der Regel eine minimal abweichende Zentrierung des Halbzeugs.

Für die Korrelation der Umformqualität mit den Materialkenngrößen müssen Qualitätsgrößen umgeformter Papiere ermittelt werden. Dazu wurden in Abstimmung mit dem PA die folgenden sieben Qualitätsgrößen identifiziert, die am konischen Napf bestimmt werden sollen.

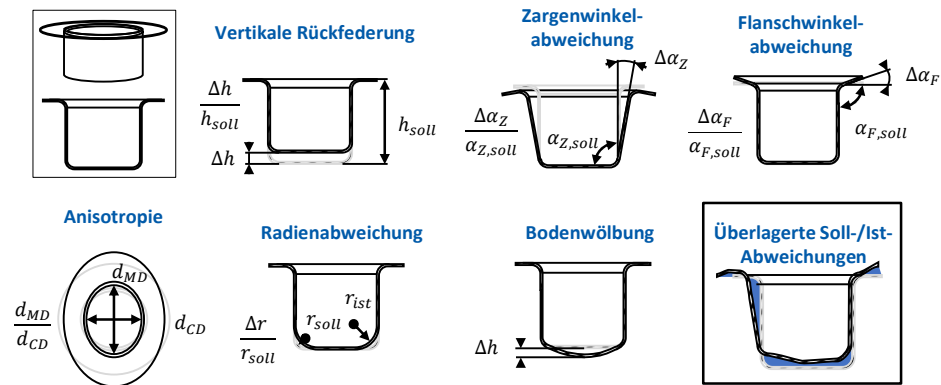


Abbildung 4-5: Identifizierte Qualitätsgrößen in der wirkmedienbasierten Umformung

Mit Blick auf die Anwendung als Verpackungsmittel stellt die erreichte Tiefe eine entscheidende Größe dar, die das Verpackungsvolumen maßgeblich beeinflusst. Aufgrund der elastischen Dehnungsanteile ist hierbei eine vertikale Rückfederung zu erwarten, weshalb diese als Qualitätsgröße aufgenommen wurde. Die Zargenwinkelabweichung ist mit Blick auf das Stapelverhalten relevant und wird über die Zargenwinkeldifferenz quantifiziert. Analog zur Zargenwinkelabweichung wird die Flanschwinkelabweichung bestimmt, diese ist für eine potenzielle Versiegelung in nachgelagerten Prozessschnitten zu berücksichtigen. Aufgrund des orthotropen Materialverhaltens ist zu erwarten, dass eine Richtungsabhängigkeit in der Umformung auftritt, sodass dies ebenfalls betrachtet wird. Bei allen geometrischen Qualitätsgrößen von naturfaserbasierten Verpackungslösungen muss, insbesondere bei der Umformung mit Dehnung aus der Materialreserve, die Orthotropie berücksichtigt werden.

Eine weitere Qualitätsgröße stellt die Abbildung von Kantenradien dar, da zur Abbildung enger Radien hohe lokale Materialdehnungen und Drücke notwendig sind. Die Bodenwölbung ist eine weitere relevante Qualitätskenngröße, da diese eine Rotation der geformten Papierschalen bedingen kann. Dies stellt wiederum bei der weiteren Verarbeitung, beispielsweise einer Befüllung nicht rotationssymmetrischer Näpfe, eine Herausforderung dar. Diese wird über die maximale vertikale Abweichung im Bodenbereich bestimmt.

Zusätzlich zu den sechs vorgestellten Qualitätsgrößen, die jeweils die Ausprägung spezifischer Geometrielemente bewerten, wird eine Gesamtübereinstimmung der Soll- und Ist-Geometrie betrachtet, die eine Überlagerung aller Abweichungen durch die vorher genannten Elemente beinhaltet und eine Gesamtaussage zur Qualität ermöglicht.

Materialauswahl

In Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurden fünf verschiedene Papiersorten in jeweils zwei unterschiedlichen Grammaturen in vergleichbaren Bereichen ausgewählt. Die Sorten lassen sich hierbei grob wie folgt charakterisieren:

- Faltschachtelkarton
- Becherkarton
- Recyclingkarton
- Laborkarton
- Tiefziehkarton

Der untere Grammaturbereich lag nominell zwischen 190 g/m^2 und 200 g/m^2 , der obere Grammaturbereich zwischen 326 g/m^2 und 350 g/m^2 .

Hintergrund der Materialauswahl ist die Abdeckung eines möglichst breiten Spektrums marktverfügbarer und -relevanter Materialien, sodass das zu entwickelnde Modell in seinen Anwendungsgrenzen bereits mit Erstellung möglichst breit aufgestellt ist. Um dies zu erreichen, wurden ebenso Materialien (Laborkartons) eingesetzt, die in früheren Forschungsprojekten entwickelt wurden und eine gute Umformbarkeit aufgezeigt haben. Andere Materialien wurden speziell wegen schlechtem Verhalten im Umformen als Extrembeispiele ausgewählt.

5 Ableitung lokaler Beanspruchungen

Vorgehen

Das Ziel des dritten Arbeitspaketes war es, die lokalen Beanspruchungen im Papier während der wirkmedienbasierten Umformung abzuleiten und darzustellen. Dies dient dazu, für die Umformung bedeutsame Materialeigenschaften zu identifizieren und die in den Charakterisierungsversuchen abzubildende Größenordnung der Beanspruchungen festzulegen. Hierbei wird auf einem Modell eines vorangegangenen AIF-Projektes (IGF 17788N - Anwendung wirkmedienbasierter Verfahren zum Tiefziehen von Papier und Karton) aufgebaut.

Für die nachfolgenden Untersuchungen werden zwei verschiedene Belastungsfälle betrachtet. Während im ersten Belastungsfall ein Materialnachfluss aus dem Flansch durch hohe Niederhalterkräfte unterbunden ist, wird dieser im zweiten Belastungsfall zugelassen. Der Fokus der Untersuchungen liegt auf der Bestimmung des erwarteten Wertebereichs für die Charakterisierungsversuche.

5.1 Modellierung der wirkmedienbasierten Umformung

Materialmodell

Bei dem verwendeten Materialmodell wird auf Erfahrungswerte der Materialeigenschaften nach [Huttel 2015] zurückgegriffen. Dieses ist für einen Recyclingkarton dargestellt, der nicht Gegenstand dieses Projekts ist.

Das Materialmodell basiert auf der Annahme eines orthotropen Materials. Das orthotrope Verhalten ist über Potenzialwerte abgebildet. Die verwendeten Werte sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 1: Zur Ableitung der Beanspruchungen verwendete Parameterwerte des orthotropen Materials nach [Huttel 2015]

Elastizitätsmodul in N/mm ²	E1	E2	E3
	1630	437	432
Querkontraktionszahl	Nu1	Nu2	Nu3
	0,33	0,33	0,33
Schubmodul in N/mm ²	G12	G13	G23
	382	613	164
Potenzialwerte	R11	R22	R33
	1	0,41	0,4
	R12	R13	R23
	0,66	0,63	0,63

Für eine Abbildung des plastischen Materialverhalten ist eine Spannungs-Dehnungskurve hinterlegt, die den vorliegenden Spannungswerten eine bleibende plastische Dehnung zuordnet. Diese basiert auf Messwerten des Zugversuchs in MD unter Verwendung einer taillierten Zugversuchsgeometrie nach [Huttel 2015].

Verwendete Geometrie

Für die Simulation der wirkmedienbasierten Umformung wurde die konvex-konkave Tellergeometrie verwendet. Die Übergänge zwischen konvexen und konkaven Konturen stellen Versagensstellen im Tiefziehen mit starren Werkzeugen dar. Hier zeigt sich die wirkmedienbasierte Umformung vorteilhaft. Die Maße der Tellergeometrie sind in *Abbildung 5-6* gezeigt.

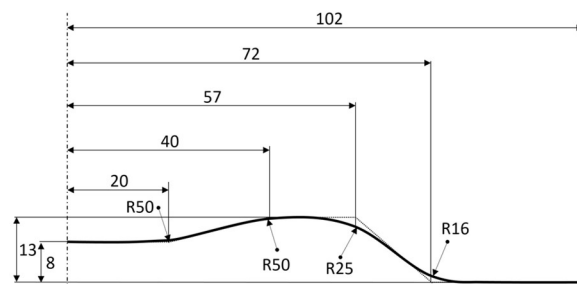


Abbildung 5-6: Maße der rotationssymmetrischen konvex-konkaven Tellergeometrie

Aus Gründen der Effizienz wurde unter Ausnutzung der Symmetrie ein Viertel der Gesamtgeometrie simuliert. Dadurch wird zum einen noch die Orthotropie des Materials in MD und CD erfasst, zeitgleich jedoch der Rechen- und Energieaufwand für die Simulation reduziert.

Abbildung des Prozesses der wirkmedienbasierten Umformung

Die Simulation des Prozessablaufs orientiert sich am Realprozess. Im ersten Schritt wird eine Niederhalterkraft im Flansch aufgebracht. Die Niederhalterkraft wirkt auf die Form und das Untergesenk und steigt linear auf den einzustellenden Zielwert. Im zweiten Schritt wird der Umformdruck linear bis auf dem Maximalwert erhöht. Anschließend wird der Umformdruck wieder abgesenkt, um auch die Rückfederung betrachten zu können.

Das Belastungsprofil ist in *Abbildung 5-7* dargestellt.

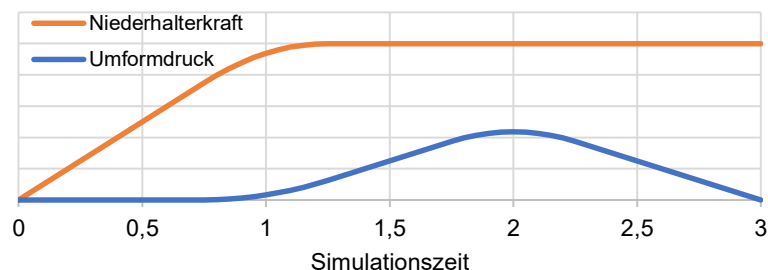


Abbildung 5-7: Belastungsprofil in der Simulation der wirkmedienbasierten Umformung

Für die Simulation wird ein impliziter Solver (Abaqus/Standard Solver) verwendet. Für erste Untersuchungen werden für die Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück Erfahrungswerte vorheriger Simulationen verwendet. Für die Reibung zwischen Papier und Form wird der Reibwert zu 0,6 und zwischen Papier und Membran zu 0,4 gesetzt. Der Gitteraufbau der Papierronde basiert auf Elementen des Typs C3D20. Die Elementgröße beträgt 1 mm x 1 mm x 0,35 mm. Dies entspricht zwei Elementen in Dickenrichtung.

Plastische Dehnung während der Umformung

In *Abbildung 5-8* sind die plastischen Dehnungen aufgezeigt, die sich in der wirkmedienbasierten Umformung nach der Rückfederung ergeben.

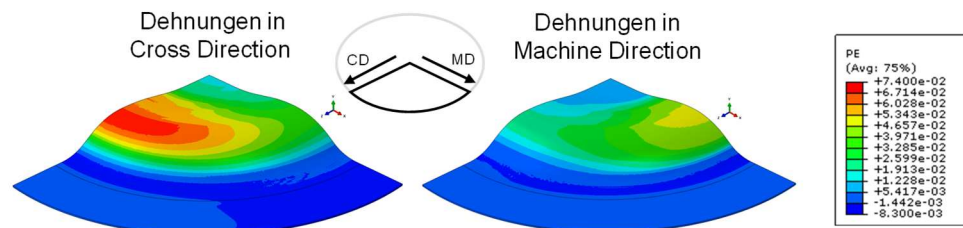


Abbildung 5-8: Plastische Dehnungen in der wirkmedienbasierten Umformung

Hierbei zeigt sich, dass trotz des symmetrischen Aufbaus aufgrund des orthotropen Materialverhaltens Unterschiede in den Dehnungen auftreten. In CD ergeben sich größere Dehnungen als in MD. Dies ist im Einklang mit den in Zugversuchen ersichtlichen höheren Zugfestigkeiten in MD, jedoch geringeren Dehnbarkeiten im Vergleich zu CD.

5.2 Ableitung lokaler Beanspruchungen ohne Nachfließen des Materials

Prozessführung Nach Erstellung des grundlegenden Simulationsmodells wurden zwei Fälle der Prozessführung betrachtet, um daraus wirksame Beanspruchungen abzuleiten. Die Unterscheidung der Fälle basiert auf der Wahl der Niederhalterkraft. Hierbei hat sich gezeigt, dass bei einer Niederhalterkraft von 4000 N kein signifikanter Nachfluss in die Form mehr stattfindet, sodass dieser für die folgenden Auswertungen verwendet wurde.

Prozessunterteilung Bei genauer Betrachtung des Prozesses zeigt sich, dass eine Einteilung des Umformvorgangs in drei Phasen möglich ist. Diese sind:

- 1. Phase: Freie Umformung vor Anlegen an die Form
- 2. Phase: Anlegen an die Form
- 3. Phase: Kalibrieren mit erhöhtem Druck

Die dabei wirksamen Beanspruchungen und die Bedeutung für Charakterisierungsversuche werden im Folgenden dargestellt.

Biaxiale Zugbelastung

In der ersten Phase findet die freie Umformung statt. Sie äußert sich durch Ausbildung eines Kuppeldoms und endet, sobald es zu einem Kontakt zwischen der Papierronde und der Matrize kommt. Dies ist in Abbildung 5-9 dargestellt.

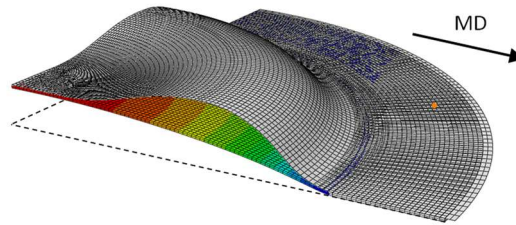


Abbildung 5-9: Freie Phase der Umformung bei wirkmedienbasierter Umformung ohne Nachfluss

In dieser Phase bestehen biaxiale Zuglasten. Dadurch, dass das Material geklemmt wird, gibt es keinen Nachfluss. Die Umformung basiert daher ausschließlich auf der Materialdehnung. In Abbildung 5-10 sind die Hauptachsenspannungen in der Papierronde dargestellt.

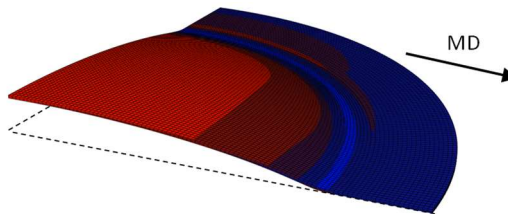


Abbildung 5-10: Hauptachsenspannungen in der freien Umformung; Zug rot, Druck blau dargestellt

In den größten Bereichen der Probe ergeben sich Zugbelastungen (rot). Im Flanschbereich sowie in konvexen Bereichen auf der Blattoberseite ergeben sich Druckspannungen (blau).

Um diesen Spannungszustand in den Charakterisierungsversuchen abzubilden, wurden am PtU Tiefungsversuche durchgeführt. Der Tiefungsversuch weist einen ähnlichen Ablauf wie die 1. Phase der wirkmedienbasierten Umformung auf, nur dass keine Form vorhanden ist. Die Klemmung und Prozessführung sind identisch zur wirkmedienbasierten Umformung. Im Tiefungsversuch wird die Phase der freien Umformung so lange ohne Matrize durchgeführt, bis es zu einem Materialversagen durch Rissbildung kommt. Dabei kann die maximale Dehnung und auch die Dehnungsverteilung anhand einer optischen Dehnungsmessung mit einem GOM Aramis System während des Prozesses erfasst werden, siehe Abschnitt 8.6.

Überlagerte Biegebelastung

In der zweiten Phase erfolgt ein Anlegen an die Form. Das komplette Anliegen an der Form ist in Abbildung 5-11 gezeigt.

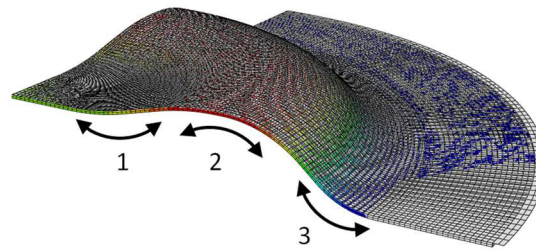


Abbildung 5-11: Zweite Phase der wirkmedienbasierten Umformung mit vollständigem Anlegen an die Matrize

Aus dem Anlegen resultieren neben den tangentialen und radialen Zugbeanspruchungen auch überlagerte Biegebeanspruchungen. In Abbildung 5-12 sind die Spannungen in radialer Richtung entlang der Probenkante des Viertelkreises aufgetragen. Dabei verläuft ein Pfad durch die biegeneutrale Phase in der Papiermitte. Ein weiterer Pfad verläuft auf der Unterseite des Papiers.

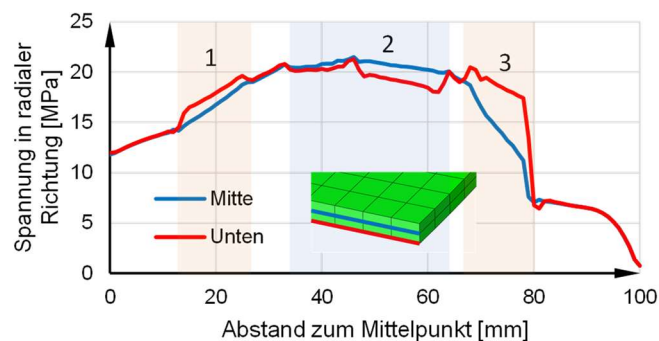


Abbildung 5-12: Biegebelastung infolge des Anlegens an die Matrize

Der Pfad in der biegeneutralen Mitte (blau) weist die bereits in der ersten Phase auftretenden biaxialen Zugbelastungen auf. Im Gegensatz dazu zeigt sich im Pfad auf der Papierunterseite, dass die Bereiche 1 bis 3 Spannungen aufweisen, die von denen der biegeneutralen Mitte abweichen. In den konvexen Bereichen (1 und 3) werden zusätzliche Zugspannungen überlagert. Im konkaven Probenbereich (2) erfolgt ein Absinken der Zugspannung da auf der Papierunterseite Drucklasten überlagert werden. Daraus folgt, dass trotz maßgeblicher biaxialer Zugbelastungen auch Biegebelastungen im Prozess überlagert werden.

Auch bei den an der Steinbeis-Hochschule durchgeführten Tiefziehversuchen mit starren Werkzeugen treten am Übergang von Flansch in die Zarge erhebliche Biegebeanspruchungen auf. Um diese Biegebeanspruchungen für die Korrelationsanalyse abzubilden, werden an der PTS Krümmungswiderstandsmessungen durchgeführt, siehe Abschnitt 8.5.

Kompression in Dickenrichtung

In der dritten Phase wird der Druck nach Anlegen an die Matrize weiter erhöht, um eine bessere Ausprägung und Formhaltigkeit zu erzielen. Diese Phase der Kalibrierung ist durch Kompression in Dickenrichtung gekennzeichnet. Die Kompression ist auf eine Reduktion der Hohlräume der porösen Faserstruktur zurückzuführen, was sich in einer Dickenreduktion äußert.

Die letzte Phase wird ebenfalls durch Charakterisierungsversuche adressiert, in dem die Papiere gezielt mit Kontaktnormalspannungen belastet werden. Die dabei auftretende Kompression wird ermittelt. Zusätzlich wird das Material auf mikroskopisch erfassbare Schädigungen untersucht.

5.3 Ableitung lokaler Beanspruchungen mit Nachfließen des Materials**Prozessführung**

Eine weitere Möglichkeit der Prozessführung ist eine Reduktion der Niederhalterkraft, sodass ein Materialnachfluss aus dem Flansch in die Matrize möglich ist. Die dabei auftretende Beanspruchung entspricht der Beanspruchung beim Tiefziehen mit starren Werkzeugen.

Zug-Druck-Beanspruchung im Flansch

In Abbildung 5-13 ist eine Umformung mit Materialnachfluss gezeigt. Durch den Materialnachfluss treten in tangentialer Richtung Druckspannungen auf, während in radialer Richtung eine Zugbelastung vorliegt.

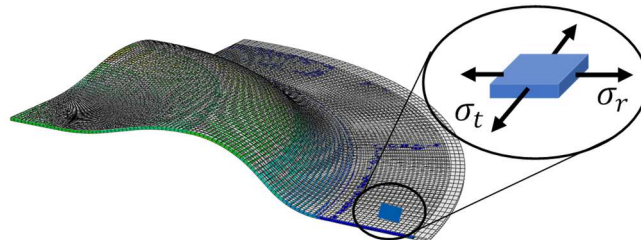


Abbildung 5-13: Belastungen im Flansch bei der wirkmedienbasierten Umformung mit Materialnachfluss

Durch die Umfangsreduktion beim Nachfluss entsteht ein Materialüberschuss, der in tangentialen Druckspannungen resultiert. Diese führen teilweise zu einem Verdichten des porösen Materials in Umfangsrichtung, aber auch zu einer Aufdickung bzw. Faltenbildung. Die Spannungsverläufe werden besonders deutlich, wenn ein einzelnes Element aus dem mittleren Flanschbereich betrachtet wird. Ein beispielhafter Verlauf ist in Abbildung 5-14 für den kompletten Umformprozess aufgezeigt.

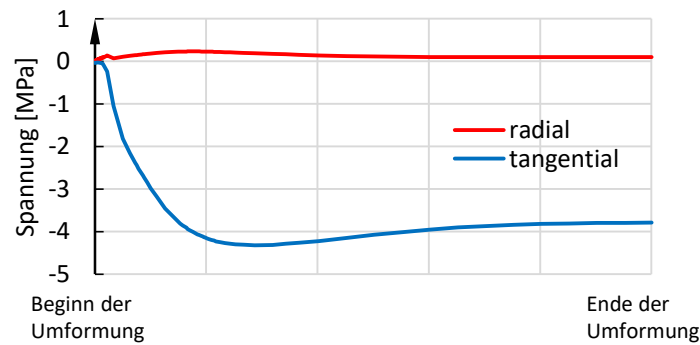


Abbildung 5-14: Verlauf der Zug- und Druckspannungen im Flansch

In radialer Richtung zeigen sich wie erwartet leichte Zugkräfte. In tangentialer Richtung werden die erheblich größeren Druckspannungen sichtbar. Diese Druckspannungen können zu Falten führen, die bei den werkmedienbasierten Umformversuchen jedoch verhindert werden sollen. Dies wird erzielt, indem die Niederhalterkraft entsprechend hoch eingestellt wird.

Im klassischen Tiefziehprozess mit starren Werkzeugen, der an der Steinbeis-Hochschule durchgeführt wird, ist das nicht möglich. Der dabei verwendete Zugschnitt wird durch den Stempel in die Matrize eingezogen, was zu starken tangentialen Druckspannungen und daraus folgender Faltenbildung führt. Das Faltenbild wird als einer der Qualitätsmerkmale analysiert und es werden beispielsweise die Anzahl und Homogenität der Falten als Qualitätsgrößen bestimmt.

Kontaktnormalspannungen

Durch den Materialnachfluss kommt es im Flansch zu einer Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug, die wiederum zum Auftreten von Reibung führt. Um diese Reibungskräfte zu quantifizieren, ist eine Bestimmung der Reibwerte bei prozessnahen Bedingungen wichtig. Dazu wurden wie in Abbildung 5-15 dargestellt die Kontaktnormalspannungen im Flanshbereich betrachtet.

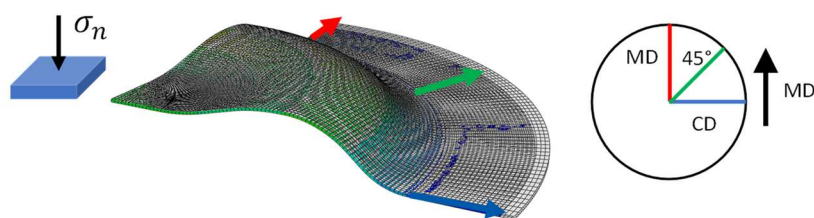


Abbildung 5-15: Betrachtete Flächenpressung im Flansch

In Abbildung 5-16 sind die Kontaktnormalspannungen im Flanshbereich in radialer Richtung betrachtet und über die Pfadlänge aufgetragen.

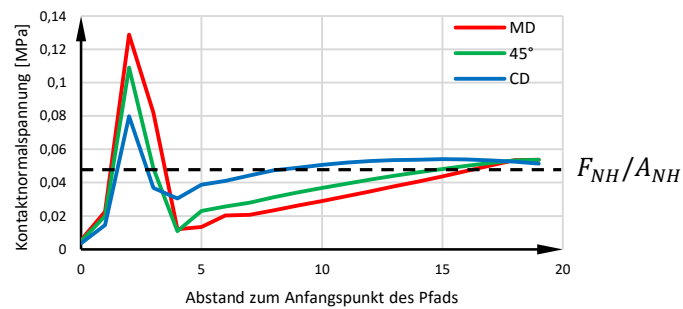


Abbildung 5-16: Verlauf der Kontaktnormalspannung über die Flanschlänge

Dabei zeigt sich, dass in der Nähe des Einzugsbereiches, also an der Seite der auszubildenden Form, eine Überhöhung der Kontaktnormalspannung auftritt, die nachfolgend absinkt und dann bis zum Rand wieder ansteigt. Die maximal auftretende Kontaktnormalspannung beträgt dabei etwa 0,13 MPa. Bei der Annahme einer gleichmäßigen Flächenpressung, die sich aus der Division der Niederhalterkraft durch die Fläche des Niederhalters ergibt, folgt eine mittlere Flächenpressung von etwa 0,05 MPa. Diese Annahme kann damit nicht getroffen werden. Lokal kann die Kontaktnormalspannung erheblich höher sein, sodass bei der Durchführung von Reibversuchen eine Betrachtung des Quotienten aus Kraft und Fläche eine Unterschätzung erfolgen würden. Hieraus sind wiederum Abweichungen in den zu bestimmenden Reibwerten zu erwarten.

Die Reibwerte wurden sowohl am PtU als auch an der Steinbeis-Hochschule unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus den Simulationen ermittelt, siehe Abschnitte 8.7 und 8.8.

5.4 Zusammenfassende Betrachtung der abgeleiteten Beanspruchungen

Ergebnisse

Aus der Betrachtung der beiden Möglichkeiten der Prozessführung konnten die Beanspruchungen, die im Prozess maßgeblich sind, analysiert werden. Diese Beanspruchungsmodi werden durch die Charakterisierungsversuche abgedeckt und für die verschiedenen Papiere untersucht.

Aus der simulativen Betrachtung des Prozesses der wirkmedienbasierten Umformung ergeben sich Anforderungen, welche Bereiche durch die Charakterisierungsversuche abgedeckt werden müssen. Dies ist zusammenfassend in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 2: Zusammenfassung der simulativ abgeschätzten Belastungen und in den Charakterisierungsversuchen abzudeckende Bereiche

Größe	Simulation	Abzudeckender Bereich
Spannung MD	20,2 MPa	0 – 100 MPa
Spannung CD	7,4 MPa	0 – 100 MPa
Dehnung MD	3,7 %	0 – 30 %
Dehnung CD	7,5 %	0 – 30 %
Kontaktnormalspannung	0,2 MPa	2 MPa

6 Umformversuche Tiefziehen

Vorgehen und verwendete Umformgeometrien

Für eine Betrachtung der Umformbarkeit der Papiere durch Kompressionstiefziehen wurden zunächst Prozessfenster zu Werkzeugpaaren, also Stempeldurchmesser für alle ausgewählten Materialdicken bestimmt. Jeweils die besten Tiefziehergebnisse wurden digitalisiert und deren Faltenqualität quantifiziert um Kennwerte für die Regressionsanalysen zu generieren.

Anforderungen Geometrien zur Umformung

Mit der Entscheidung für die Geometrie und das an der TU Dresden verfügbare Werkzeugset, mit zylindrischen Stempeln von 108,7 bis 109,6 für eine Ziehbüchse von 110 mm Durchmesser, wurden einige geometrische Eigenschaften festgelegt, sodass nur die Wahl des Ziehspalts verbleibt. In Abbildung 6-17 sind Anforderungspunkte für die Auslegung eines Ziehspaltes dargestellt. Das verwendete Set besitzt die erfahrungsgemäß besten geometrischen Eigenschaften. Der Stempelkonus von $0,3^\circ$ kompensiert den sich aufbauenden Materialüberschuss mit zunehmender Ziehtiefe. Der Einlaufradius von 5 mm ist weder zu groß, dass über die Wegstrecke Überbeanspruchungen und in dessen Folge Ausschuss entstehen, noch ist er so scharf, dass Zuschnitte abgeschert werden – Analog beim Bodenradius des Stempels.

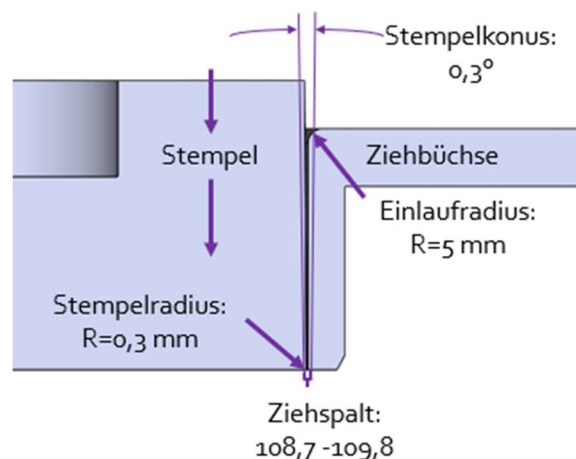


Abbildung 6-17: Geometrische Details Tiefziehwerkzeuge

Definition der Umformung

Eine der einfachsten Grundgeometrien der Verpackungstechnik, petrochemisch wie naturfaserbasiert, ist der flache Zylinder, für welchen eine umfangreiche Wissensbasis in Dresden erarbeitet wurde und dementsprechend umfangreich naturfaserbasierte Formteile herstellbar sind. Als erster Schritt ist der zur Materialdicke passende Stempel zu bestimmen, bevor Prozessparameter, die eine ansprechendes Faltenbild ergeben, genau ausgearbeitet werden können. Der Prozess erfolgt iterativ und ist in Tabelle 3 zusammengefasst. Die Eignung von Naturfasern für den Kompressionsziehprozess wird üblicherweise über den Umformgrad also das Verhältnis von Bodendurchmesser zu Zargenhöhe oder Ziehtiefe angegeben. Hier kann aufgrund der Werkzeugauswahl, oder dem nahezu gleichbleibenden Bodendurchmesser direkt die Ziehhöhe betrachtet werden.

6.1 Prozessfenster und Einfluss von Prozessgrößen

Prozessfenster

Die Qualität im Kompressionsziehprozess tiefgezogener Formteile wird aktuell durch Erfahrungen der Arbeitsgruppe Umformtechnik bestimmt. Der Umformprozess muss im materialabhängigen Grenzbereich trotz der Erfahrungen iterativ auf das Material angepasst werden (Ziehspalt, Temperaturen, Faltenhalterkraft, Faltenbild u.a.), was mit einer variablen Ziehhöhe als Qualitätskriterium besonders herausfordernd ist, da mehrere konkurrierende Kriterien abgewogen werden müssen.

Die Qualität der Formteile ist konträr zur Ziehhöhe und wird bei der Herstellung, also vor der Bestimmung von Kennwerten, vom Operator eingeschätzt. Er klassifiziert, um das Betriebsfeld für jedes Material zu bestimmen, zunächst optisch das Faltenbild und die Formgenauigkeit in akzeptabel und inakzeptabel. Bei diesem Vorgehen ist Ursache und Wirkung, wie in Abbildung 6-18 dargestellt, nicht eindimensional. Die Ziehgeschwindigkeit ist eine weitere Einflussgröße und wurde für dieses Projekt mit 20mm/s auf einen Wert festgelegt bei dem in Vorversuchen alle Materialien umgeformt werden konnten. Weiter wurde eine Mindesttemperatur von 80° festgelegt, oberhalb welcher sich der Reibkoeffizient nach [Lenke 2017] signifikant reduziert und als Einflussfaktor begrenzt wird. Im Betriebsplan abweichende Temperaturen (Tabelle 3), dienen dem Verbessern der Verpressung durch Anpassungen des Ziehspaltes über die Wärmeausdehnung des Werkzeugs.

Tabelle 3: Prozessparameter

Material	Becherkarton		Recyclingkarton		Laborkarton		Faltschachtelkarton		Tiefziehkarton	
	A	B	grau	braun	biko	viskose	A	B	A	B
Grammatur g/m ²	195	330	350	200	200	200	190	325	190	350
Dicke [µm]	275	450	540	270	350	440	350	650	255	465
spez. Gewicht [g/m ² / µm]	1,41	1,36	1,54	1,35	1,75	2,20	1,84	2,00	1,34	1,33
Werkzeugspalt [µm]	280	480	560	260	330	420	350	520	240	440
Stempeldurchmesser [mm]	109,3	109,1	109	109,4	109,3	109,3	109,4	109,1	109,4	109,1
Stempelpresskraft [kN]	15	15	15	15	15	15	18	18	15	18
Temperatur Stempel [°C]	80	80	120	90	80	80	80	70	80	80
Temperatur Matrize [°C]	130	120	80	120	100	130	120	100	100	120
Faltenhalterkraft [kN] linear	2000 700	3600 1000	1000 600	1500 500	6000 1500	4600 900	900 500	1500 700	4600 900	5200 2400
Ziehtiefe [mm]	58	53	28	40	56	60	45	38	54	60

Einfluss von Prozessgrößen

In Abbildung 6-18 sind Wechselwirkungen für Prozesseinflüsse im Ansatz zueinander in Beziehung gebracht.

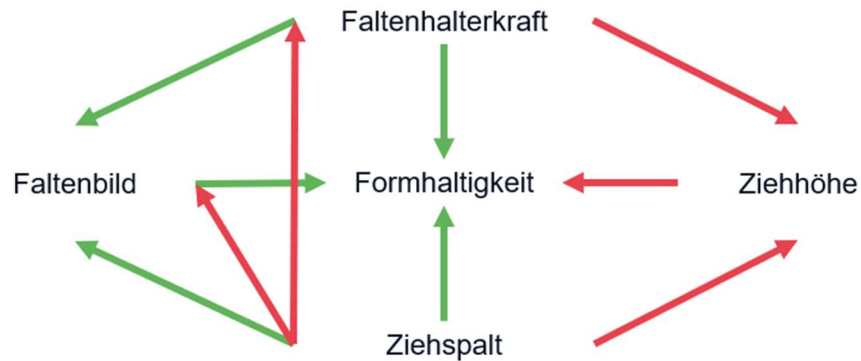


Abbildung 6-18: Prozesseinflüsse Kompressionstiefziehen

Ein inakzeptables Faltenbild ist in Abbildung 6-19 (Formteil A) dargestellt. Die wenigen Falten sind deutlich zu erkennen und durch eine besonders starke Verpressung verfärbt. Gemäß Abbildung 6-19 und anhand von Erfahrungswerten kann ein zu geringer Ziehspalt als eine Ursache bestimmt werden. Bei zu geringem Ziehspalt ist sowohl die mögliche Faltenhalterkraft geringere als auch die Verteilung oder Faltenzahl ungünstig für ein optisch ansprechendes Formteil. Des Weiteren leidet die Formgenauigkeit unter dem mäßigen Faltenbild. Die Ziehhöhe muss bei Formteil A reduziert werden, um mit einer höheren Faltenhalterkraft ein besseres Faltenbild und bessere Formgenauigkeit bei geringem Ziehspalt zu erhalten. In Abbildung 6-19 sind bei dem Formteil B klar Falten zu erkennen, hier ist es an dem Operator, die optische Güte gegenüber der Ziehhöhe abzuwägen. Die Formgenauigkeit ist bei Formteil B gut wie auch bei Formteil C, bei dem das Faltenbild jedoch deutlich besser ist. Falten sind bei diese nicht nur auf dem Bild kaum zu erkennen. Bei den Formteilen B und C ist gemäß Abbildung 6-18 eine höhere Ziehtiefe möglich. Bei Formteil B ist alternativ eine bessere Verpressung durch einen engeren Ziehspalt und eine erhöhte Faltenhalterkraft möglich um die optische Qualität zu steigern. Bei Formteil C ist keine bessere Verpressung zu erwarten, hier kann lediglich die Ziehtiefe prozesstechnisch erhöht werden.

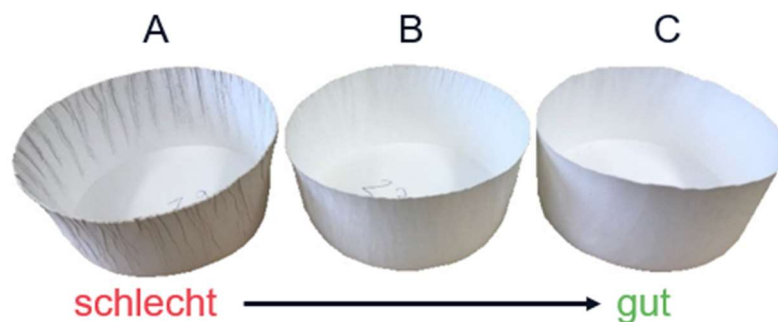


Abbildung 6-19: Optische Qualitätsunterschiede

Ein optisch ansprechendes Faltenbild lässt sich bei den meisten Materialien, nach Abbildung 6-19 bei entsprechender Ziehhöhe in der Regel erzeugen. In Abbildung 6-20 zu sehen sind links (A) und in der Mitte (B) Formteile aus Recyclingmaterialien, mit Ziehhöhe um 25-35 mm, bei der eine ansprechende Qualität erhalten wurde. Auf Basis der Ziehhöhen mit einem guten Faltenbild als erstes Qualitätskriterium können weitere Qualitätsparameter bestimmt werden.

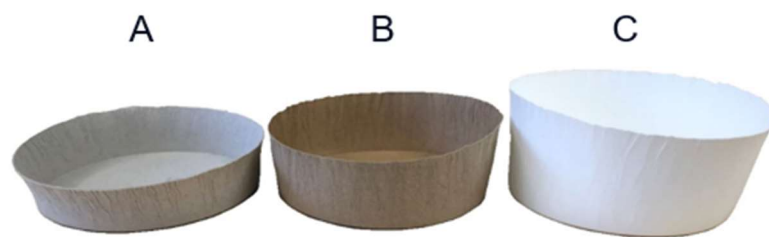


Abbildung 6-20: Ziehhöhen

6.2 Qualitätsgrößen

Vorgehen bei der optischen Auswertung

Die Qualitätsgrößen wurden an der SH vorwiegend optisch ausgewertet. Die optische Auswertung erfolgte mit dem Lucia Toolscan Untersuchungssystem R360 für forensische Werkzeugspuren, mit dessen Software Laserabtastungen und Bilder von Rotationskörpern erstellt und übereinandergelegt werden können. Diese Auswertung beschränkt sich auf den Bereich der Zarge. Die Boden-geometrie ist erfahrungsgemäß exakt genug um auf die Betrachtung zu verzichten und kann mit dieser Methode nicht erfasst werden.

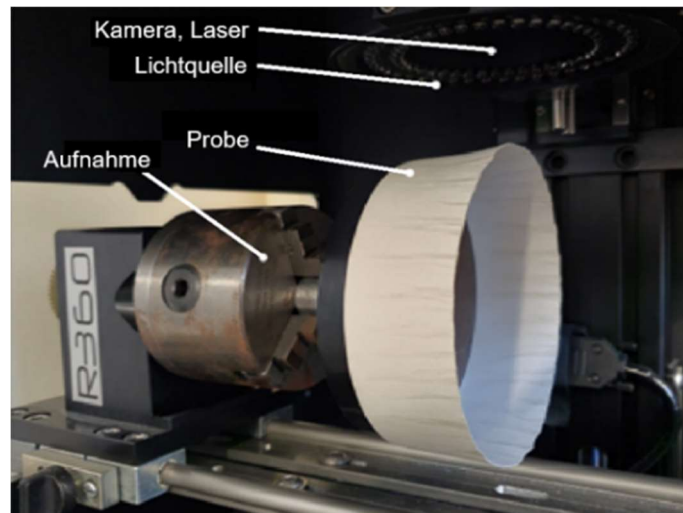


Abbildung 6-21: Probenaufnahme Lucia Toolscan R360

Mit diesen Daten und Bildern lassen sich mehrere Qualitätsparameter von Formteilen bestimmen.

- Formabweichung
- Faltenanzahl
- Faltenabstand

**Vorgehen zur
Ableitung der
Qualitätsgrößen****Auswertung des Faltenbild**

Sowohl die Faltenanzahl, als auch der Faltenabstand sind kombiniert für den Gesamteindruck des Faltenbildes maßgeblich. Mit zunehmender Faltenzahl reduziert sich der Abstand zwischen Falten idealerweise gleichmäßig. Die Gleichmäßigkeit kann über die Abweichung der Faltenabstände abgeleitet werden. Falten und deren Abstand wurden aus den Aufnahmen softwareunterstützt über einen Grauwertabgleich ausgelesen, mit dem in Abbildung 6-22 zu sehenden Zwischenschritt. In dem Zwischenschritt setzt das Programm anhand eines Schwellenwertes Punkte, mit denen auch der Verlauf einer Falte erkannt wird. Besonders auffällig und erschwerend für diesen Schritt ist der farbliche Unterschied der Recyclingmaterialien, siehe Abbildung 6-22 unten, hier werden Verunreinigungen fälschlicherweise als Falten mit roten Punkten markiert und detektiert. Im oberen Bild ist eine Probe mit hervorragender optischer Qualität zu sehen, bei der Falten so fein verteilt und verpresst sind, dass diese nicht mehr als solche vom Programm erkannt werden. Wird der Schwellenwert herabgesetzt sodass alle Falten in dieser Aufnahme erkennbar sind, werden wiederum Farbabweichungen im Probenmaterial als Falten erfasst. In der Mitte von Abbildung 6-22 ist eine Probe zu erkennen, bei der die softwareunterstützte Auswertung mit der manuellen Auszählung der Falten übereinstimmt. Aufgrund der Ungenauigkeit durch die Materialvielfalt wurden für das Projekt die Falten manuell ausgezählt.

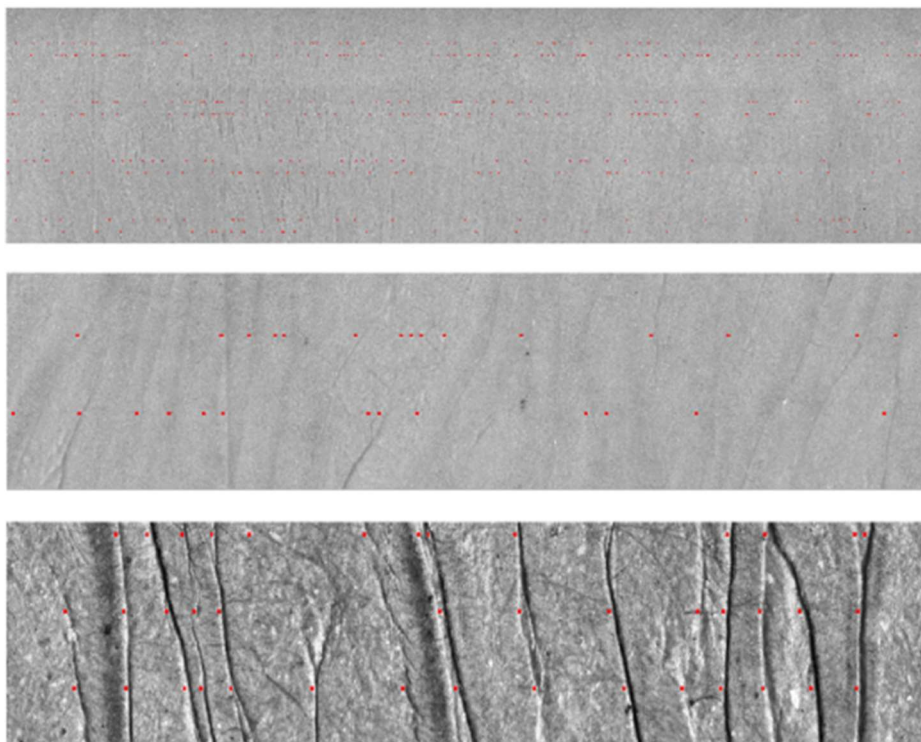


Abbildung 6-22: Detektierte Falten [rote Punkte]

Es wurde 180° der Zarge ausgewertet um den Arbeitsumfang zu reduzieren. Die Theorie, dass sich die Proben symmetrisch verhalten, konnte anhand einiger weniger komplett ausgezählter Proben bestätigt werden.

6.3 Ermittlung der Qualitätsgrößen

Ermittlung der Qualitätsgrößen

Formabweichung

Die Formabweichung ist für Verpackungen seit jeher ein Qualitätskriterium – nicht nur für Formteile auf Naturstoffbasis. Für tiefgezogene naturstoffbasierte Formteile nimmt die Formabweichung nochmal eine besondere Stellung ein, da der Ausgangsstoff stark zu orthotroper Formabweichungen unterschiedlicher Art neigt. Diese Formabweichung gilt es auf signifikante Größen für das im Transport oder Abfüllen geforderte Maß üblicher Verpackungen zu reduzieren. In *Abbildung 6-23* in einem auf den oberen und unteren Umfang reduzierten Scan ist die ovale Form durch das orthotrope Materialverhalten von Naturstoffen zu erkennen, wie sie sich in dem Prozess üblicherweise darstellt und untersucht wurde.

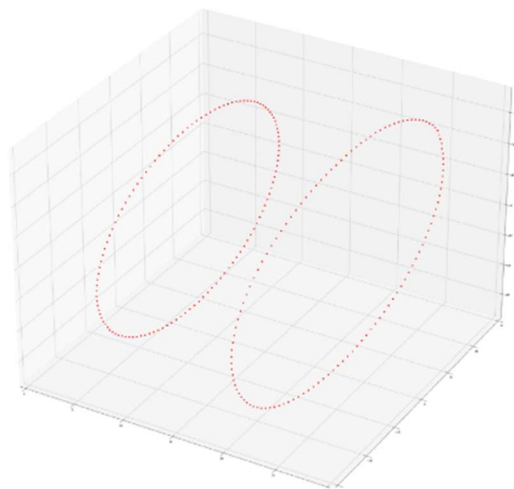


Abbildung 6-23: Reduzierter Scan mit oberem und unterem Umfang

Die Bodengeometrie, der untere Umfang, ist nicht relevant, da er anders als hier dargestellt, nicht stark beeinflusst wird.

Weiter kann aus dem gezeigten Scan über ein MatLab Skript der Rückstellungswinkel nach dem in *Abbildung 6-24* gezeigten Ansatz bestimmt werden.

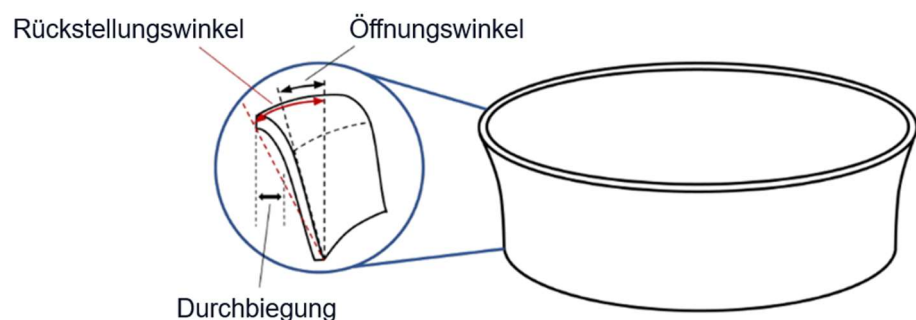


Abbildung 6-24: Rückstellung der Zarge

Ergebnisse

Die ermittelten Rückstellungswinkel der untersuchten Materialien sind in Abbildung 6-25 zusammengestellt.

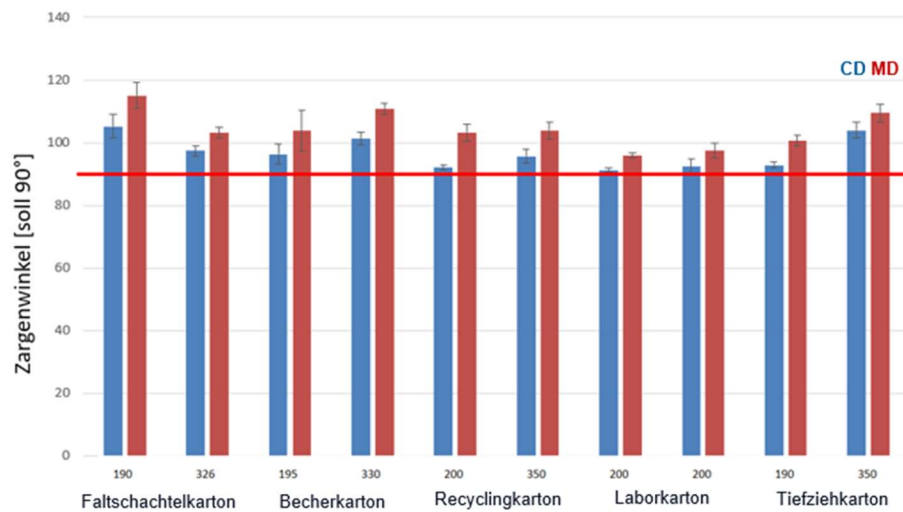


Abbildung 6-25: Rückstellungswinkel (orthotrop)

Unterschieden wurde die Rückstellung in Maschinenrichtung (MD/rot) und zu dieser orthogonal (CD/blau). Der angestrebte Zargenwinkel von 90° wird durch die vertikale rote Linie im Diagramm dargestellt. Bei keinem der Materialien wurden die 90° Zargenwinkel unterschritten. Keines der Materialien zeigt ein derart starkes orthotropes Verhalten, dass sich das Formteil schließt.

Quer zur herstellungsbedingten Richtung der Proben ist die Rückstellung über alle Untersuchungen stärker, lediglich die Differenz variiert über die Materialauswahl. Idealerweise sind die Rückstellungswinkel identisch, was ein rotationssymmetrisches Formteil bedeuten würde. Die Laborkartone kommen dem Ziel am nächsten, andere wie der Faltschachtelkarton oder Becherkarton weisen eine größere richtungsbedingte Abweichung auf und liegen von dem angestrebten Zargenwinkel generell weiter entfernt, zeigen also eine stärkere Rückstellung bzw. Öffnung. In Abbildung 6-26 sind besonders ausgeprägte Exemplare zu sehen: Links ein gutes, fast rotationssymmetrisches Formteil und rechts mit klar orthotroper Rückstellung.

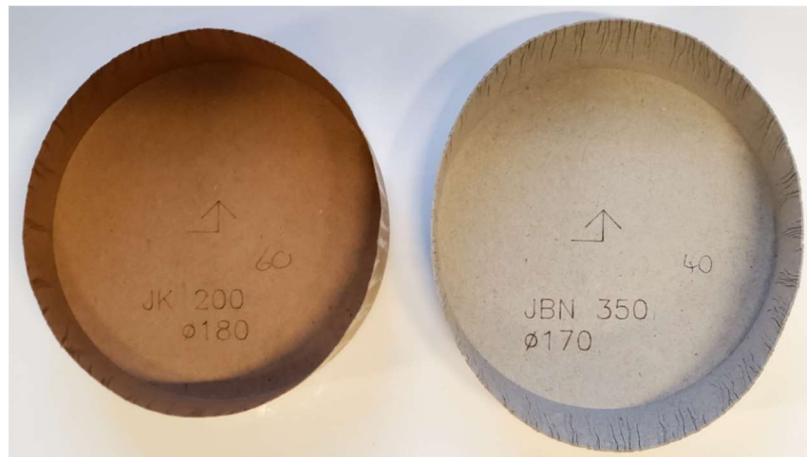


Abbildung 6-26: Beispiele orthotroper Rückstellung

Ermittlung der Qualitätsgrößen

Faltenanzahl

Faltenabstand

Die Faltenanzahl und der Abstand sind vor allem in Kombination seit Entwicklung des Kompressionstiefziehen ein aussagekräftiges Wertepaar um vorwiegend die optische Qualität von Formteilen zu quantifizieren. Über die Faltenanzahl und deren Abstand hinaus gibt die mittlere Abweichung des Abstandes Informationen über die Gleichmäßigkeit.

Es wurden mit der anfangs beschriebenen Methode von 10 Proben je Material die Zarge hochauflösend aufgenommen und ausgewertet. Betrachtet wurden gemittelte Werte in einheitlichen Stufen von 5 mm. Die ermittelten (unplausiblen) Werte unter 5 mm Zargenhöhe wurden nach [Müller 2017] entfernt und bei der Starthöhe der Zarge die Faltenanzahl genullt.

Die Entfernung der ersten Millimeter führt erfahrungsgemäß zu einem deutlich stabileren Verhalten des Auswertalgorithmus, während sich in der Zone noch wenig Materialüberschuss für eine Faltenbildung ansammelt, die Falten noch zu klein sind um diese zu detektieren oder die Verformung noch im Fasernetzwerk kompensiert werden kann.

Ergebnisse

Bei den erreichten Ziehhöhen ergaben sich zwei Gruppen, unter 35 mm Zarge und darunter. In der Abbildung 6-28 und Abbildung 6-27 sind die Faltenanzahl und deren Abstand für Proben unter einer Ziehtiefe von 35 mm dargestellt; In der Abbildung 6-29 und der Abbildung 6-30 entsprechend über 35 mm erreichter Zargenhöhe. Das Verhalten ist unauffällig, plausibel und wird in der Regressionsanalyse weiter untersucht.

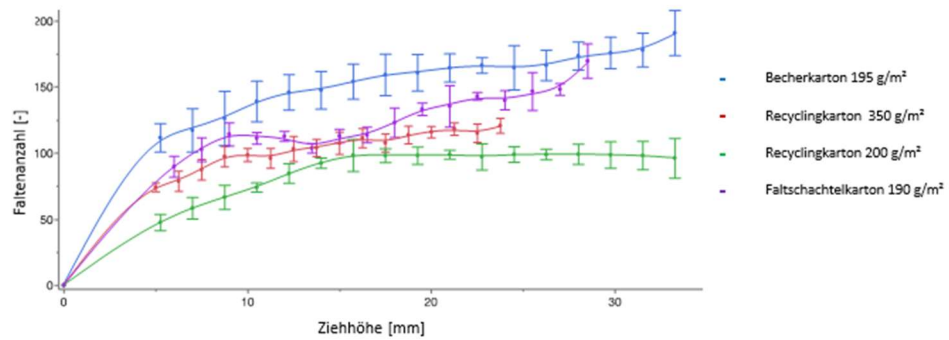


Abbildung 6-27: Faltenanzahl unter 35 mm

Ergebnisse

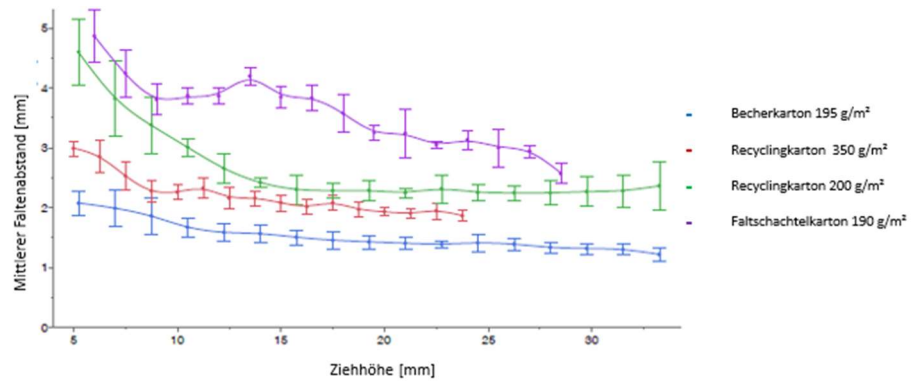


Abbildung 6-28: Faltenabstand unter 35 mm

Bei den Ziehteilen über 35 mm sticht das Labormaterial bei beiden Parametern durch konträres Verhalten heraus. Andere Materialien zeigen, wie zu erwarten, mit steigender Zargenhöhe eine Zunahme an Falten, das Labormaterial verhält sich entgegengesetzt. Die manuelle Faltenzählung hat ergeben, dass die Faltenanzahl entgegen der softwarebasierten Messergebnisse steigt und deutlich über denen der anderen Materialien liegt. Erklärt werden kann dieses Ergebnis mit den Problemen des verwendeten Algorithmus. Der Erkennungsschwellwert mit dem die Kanten der Falten identifiziert werden, wurde für jedes Material individuell angepasst. Bei den Labormaterialien ist dieser Wert bei der hohen Anzahl an Falten mit geringen Abständen und ausgezeichneter Verpressung unterhalb der Schwelle, bei der Verunreinigungen und Farbnuancen zu Fehlern führen.

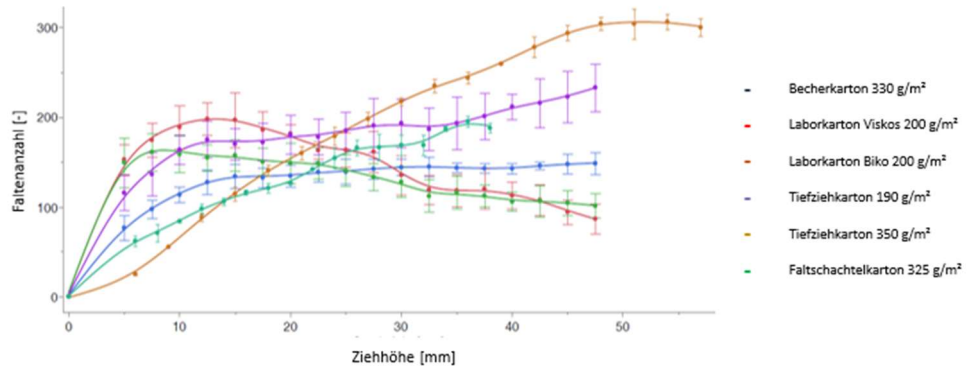


Abbildung 6-29: Faltenanzahl über 35 mm

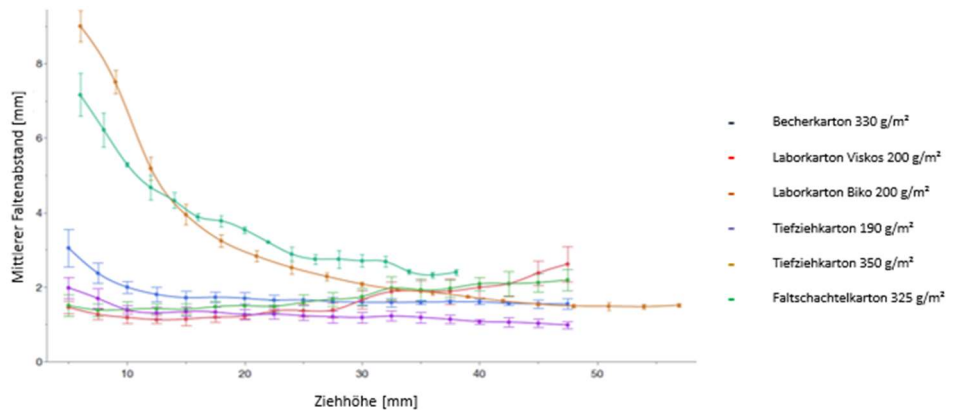


Abbildung 6-30: Mittlerer Faltenabstand über 35mm

**Ermittlung der
Qualitätsgrößen****Starthöhe
Faltenbildung**

Es ist bekannt, dass in der ersten Phase der Kompressionsumformung das Porenvolumen von großer Bedeutung ist, da es die maximale Kapazität des Materials zur Kompensation von Verformungen in der Netzwerkstruktur und hierdurch die anfängliche Beweglichkeit erhöht, was zu einer späteren Faltenbildung bzw. messbar größeren Starthöhe der Faltenbildung führt.

Als eine naheliegende Hypothese lässt sich für die Regressionsanalyse folgend formulieren: Das Porenvolumen stellt die maximale Kapazität des Materials dar, Verformungen zu kompensieren und die Faltenbildung setzt später ein. Zu untersuchen ist in der Korrelation, ob die Faltenbildung mit der Dickenkompression oder dem spezifischen Gewicht verknüpft werden kann.

In Abbildung 6-31 ist die Starthöhe anhand zweier entgegengesetzt ausgeprägter Beispiele veranschaulicht. Links zu sehen ist eine später einsetzende Faltenbildung bzw. größere Starthöhe zu erkennen, rechts eine frühe bzw. niedrige Starthöhe der Faltenbildung.

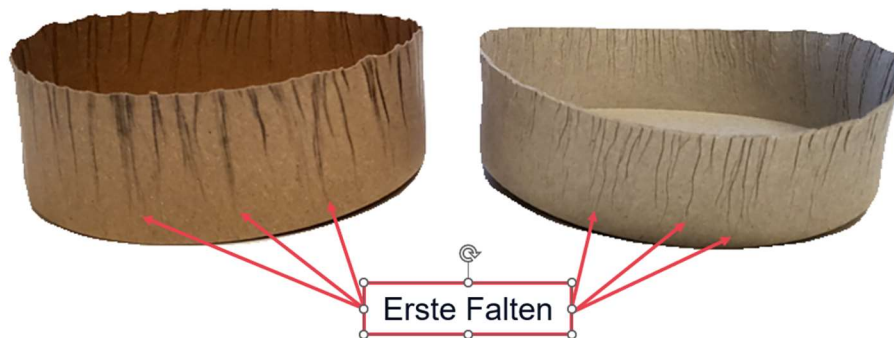


Abbildung 6-31: Exemplarische Starthöhe der Faltenbildung

Die Starthöhe wurde dabei definiert als Grenze ab der auf 180° gerade acht Falten eine umlaufende Linie kreuzen. Gemessen wurde vom Ende des Umformradius der Bodengeometrie.

Ergebnisse

Die Laborkartone sowie die Recyclingkartone haben einen grundsätzlich anderen Aufbau und sind nicht vergleichbar, mit den anderen Frischfasermaterialien unterschiedlicher Grammaturen. Hier weist die Variante mit geringerer Grammatur generell früher eine Faltenbildung auf (siehe Abbildung 6-18), was sich mit dem geringeren Volumen, in dem die einsetzende Faltenbildung kompensiert werden kann, erklärt. Die spezifische Dichte ist für die Materialauswahl innerhalb der Gruppen vergleichbar.

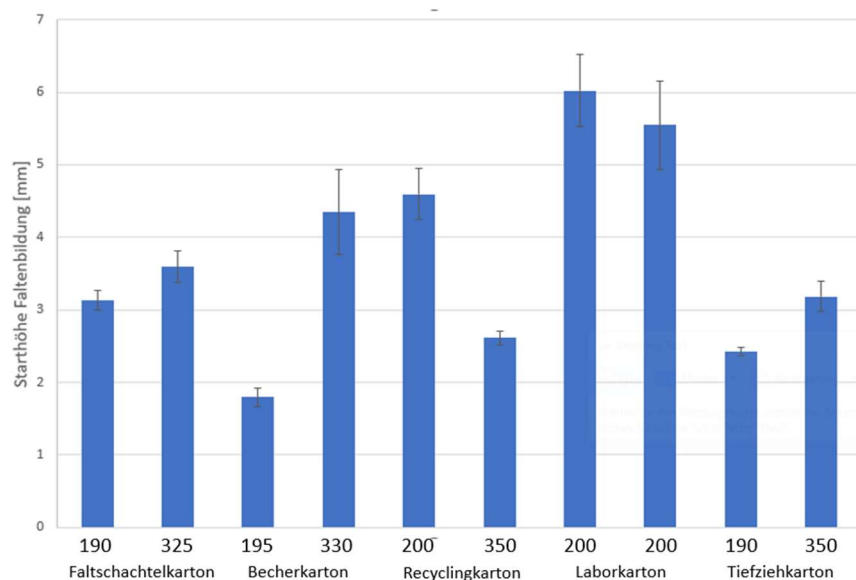


Abbildung 6-32: Starthöhen der Faltenbildung

6.4 Fazit

Ergebnisse

Die ausgewählten Materialien zeigen einen deutlichen Unterschied im Tiefziehverhalten. Für alle Materialien konnten Qualitätsparameter ermittelt werden. Die Orthotropie ist zu erkennen auch wenn sie über die Materialien unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Überraschend gut und entgegen der Erwartung konnte das Recyclingmaterial konstant verarbeitet werden.

7 Umformversuche Hydroformen

Vorgehen

Für eine Betrachtung der Umformbarkeit der Papiere in der wirkmedienbasier-ten Umformung (auch als Hydroforming bezeichnet) wurden zunächst drei Umformgeometrien abgestimmt. Für die Papiere wurden jeweils Prozessparameter identifiziert, die eine maximale Formfüllung ermöglichen. Die erhaltenen Proben wurden digitalisiert und virtuelle Schnitte eingefügt, die dann für die Bestimmung der Qualitätskenngrößen verwendet werden konnten.

7.1 Verwendete Umformgeometrien

Definition der Umformgeometrien

In Abstimmung mit dem PA (Sitzung vom 25.01.2022) wurden drei verschiedene Geometrien untersucht, die zu Beginn bezüglich ihrer konkreten Ausgestaltung definiert wurden, siehe Abbildung 7-33.

Als Basisgeometrie wurde ein konischer Napf verwendet, der einen Durchmesser von 100 mm bei einer Tiefe von 8 mm aufweist. Die Napfwände (Zarge) laufen konisch unter einem Winkel von 45° zu und die Kanten sind mit einem Radius von 4 mm verrundet.

Als weitere Geometrie wurde ein rechteckiger Napf betrachtet. Dieser weist eine Größe von 80 x 100 mm auf und ist 10 mm tief. Der Winkel der Napfwände beträgt 30° . Die Eckenbereiche sind mit Radien von 20 und 30 mm verrundet. Die Kanten sind ebenfalls mit einem Radius von 4 mm verrundet.

Als dritte Geometrie wurde eine konvex-konkave Tellergeometrie verwendet, die bei einem Durchmesser von 144 mm eine maximale Tiefe von 13 mm aufweist. Die exakte Geometrie ist Abschnitt 4 zu entnehmen.

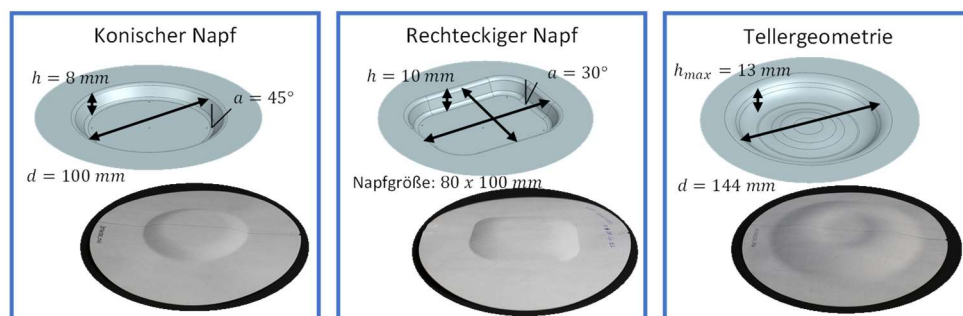


Abbildung 7-33: Geometrien für die wirkmedienbasierte Umformung

Anforderungen Geometrien zur Umformung

Der Materialnachfluss kann durch Wahl einer hohen Niederhalterkraft unterbunden werden. Unter der Annahme, dass es im Prozess zu keinem Nachfließen aus dem Flanschbereich kommt, kann die notwendige Dehnbarkeit zur kompletten Formfüllung theoretisch hergeleitet werden, indem die Bogenlänge eines Formschnittes in Bezug zur projizierten Länge gesetzt wird.

Bei den drei Geometrien ergeben sich dabei folgende nötige Dehnungen:

Tabelle 4: Vergleich der Geometrien in der wirkmedienbasierten Umformung

Form	Tiefe in mm	Länge in mm	Dehnung in %
Konischer Napf	8	100	5,75
Rechteckiger Napf	10	100 (lange Kante) 80 (kurze Kante)	9,39 11,61
Konvex-Konkaver Teller	max. 13	144	5,17

Der konische Napf weist die geringste Formtiefe auf und eignet sich aufgrund des einfachen Aufbaus aus drei geraden (Boden und 2 x Zarge) und vier gekrümmten (jeweils Übergänge Boden/Zarge und Zarge/Flansch) Abschnitten besonders zur Identifikation der Qualitätsgrößen, sodass diese Geometrie für die Korrelationsanalyse im AP 8 verwendet wurde.

7.2 Methodik zur Bewertung der Umformqualität

Vorgehen zur Ableitung der Qualitätsgrößen

Nach der Umformung der Papiere werden die Proben berührungslos mit einem Koordinatenmessarm mit Linienscanner der Firma Hexagon eingescannt und digitalisiert. Um eine Reproduzierbarkeit der Vermessung und des Bezugssystems für die Bestimmung der Qualitätsgrößen sicherzustellen, beschloss der PA, dass eine Klemmung im Flanschbereich vorgenommen werden soll. Im digitalen Abbild der Papierprobe werden Schnitte in MD und CD eingefügt und für die Bestimmung der Qualitätsgrößen als csv-Datei exportiert. Das Vorgehen ist in Abbildung 7-34 gezeigt.

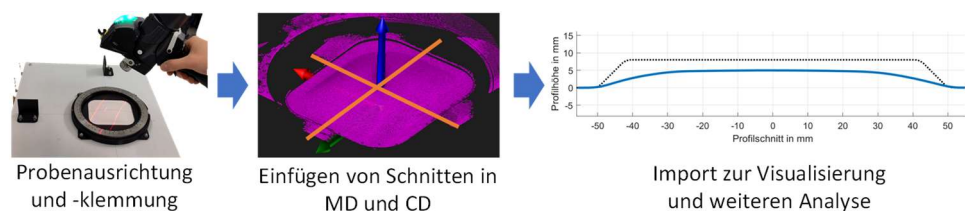


Abbildung 7-34: Ablauf der Auswertung umgeformter Proben

Für die Bestimmung der Qualitätsgrößen werden die erste und zweite Ableitung der Profilschnitte gebildet. Mithilfe dieser Ableitungen und dem Nutzen von angepassten Grenzwerten kann so zwischen geraden und gekrümmten Bereichen unterschieden werden. In den jeweiligen Bereichen ist dann eine Ermittlung beispielsweise der Radienabweichungen oder des Zargenwinkels mittels best-fits eines Kreises bzw. einer Geraden möglich. Die Bestimmung der Flächenfüllung als überlagerte Soll-/Ist-Abweichung erfolgt durch Integration der Fläche unter dem Profilschnitt.

Ermittlung der Qualitätsgrößen

Die Anwendung der Methodik zur Identifikation der Qualitätsgrößen auf die verwendeten Papiere hat gezeigt, dass nicht für alle Papiere eine Bestimmung aller Kenngrößen möglich und sinnvoll ist. Dies ist beispielhaft für zwei Papiere in Abbildung 7-35 gezeigt. Bei schlecht umformbaren Papieren ist die erreichte Formfüllung trotz angepasster Prozessparameter so gering, dass keine eindeutigen geraden Bereiche erkennbar sind. Farbeinbringungen in der Matrize bestätigen, dass es zu keinem Kontakt zwischen Papierprobe und Matrize kommt.

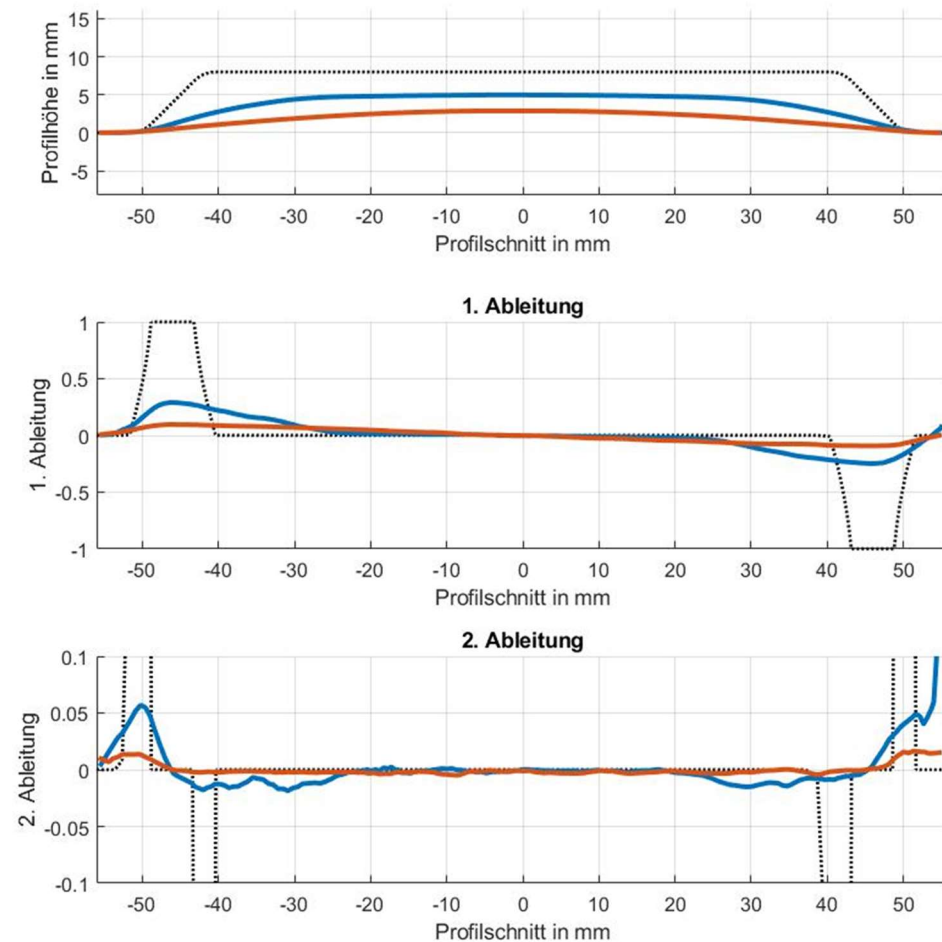


Abbildung 7-35: Profilschnitt sowie erste und zweite Ableitungen für ein gut (blau) und schlecht (rot) umformbares Papier. Formgeometrie und dafür theoretisch notwendige Ableitungen gestrichelt dargestellt.

Der konische Napf stellt aufgrund der im Vergleich der übrigen Geometrien geringsten Tiefe und der (unter Annahme keines Materialnachflusses) geringen nötigen Dehnung die Geometrie dar, die die geringsten Anforderungen an die Umformbarkeit der Papiere stellt. Da selbst diese Geometrie nicht durch alle Papiere formgetreu abgebildet werden konnte, wurde auf eine vollumfassende Bestimmung der Qualitätsgrößen mit der voran genannten Methodik bei den anderen beiden Umformgeometrien mit höherer Formtiefe und -komplexität verzichtet.

Für die Bestimmung der Qualitätsgrößen „Vertikale Rückfederung“, „Bodenwölbung“, „Zargenwinkelabweichung“ und „Radienabweichung“ ist eine hinreichend gute Formabbildung nötig, da zwischen den Elementen des Bodens, der Zargen und den dazwischenliegenden Radien unterschieden werden muss, siehe Abbildung 7-35. Da bei sechs der zehn betrachteten Papiere bereits beim konischen Napf keine hinreichend gute Formabbildung versagensfreier Teile möglich war, wurde für die weitere Bewertung der Umformbarkeit lediglich die Flächenausfüllung als Qualitätsgröße verwendet, da diese für alle Papiere bestimmt werden konnte.

7.3 Prozessfenster und Einfluss von Prozessgrößen

Prozessfenster

Um die Umformbarkeit der Papiere vergleichen zu können und Qualitätsgrößen bei jeweils materialabhängig guter Umformung zu untersuchen, wurden zunächst für alle Papiere die Prozessfenster in Abhängigkeit der Prozessparameter Niederhalterkraft und Umformdruck bestimmt. Dabei wurden die Parameterkombinationen dreifach wiederholt. Ein beispielhaftes Prozessfenster ist in Abbildung 7-36 dargestellt.

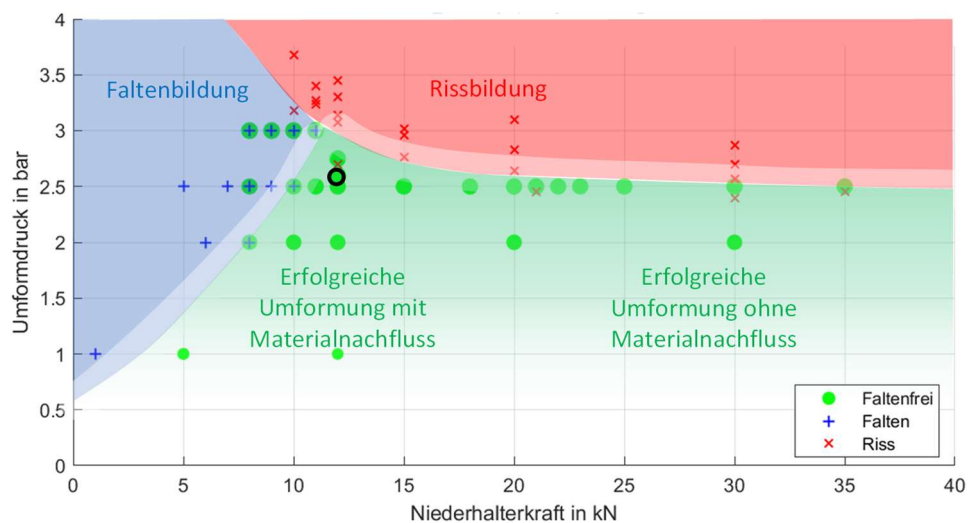


Abbildung 7-36: Prozessfenster in der wirkmedienbasierten Umformung in Abhängigkeit der Niederhalterkraft und des Umformdrucks. Bei Detektion eines Risses oder einer Falte wurde das jeweils andere Fehlerkriterium nicht weiter berücksichtigt; $n = 3$

Bei Wahl einer ausreichend hohen Niederhalterkraft ist kein Materialnachfluss aus dem Flansch möglich. An diesem Punkt ist eine Formfüllung nur noch durch Dehnung des Materials möglich. Wenn die Belastbarkeit des Papiers mit zunehmendem Druck überschritten wird, ergibt sich eine Rissgrenze, die annähernd horizontal verläuft. Aufgrund der geringen Dehnbarkeit des Papiers sind dabei nur begrenzte Ziehverhältnisse möglich.

Wird die Niederhalterkraft reduziert, kann ein Materialnachfluss stattfinden. Wird die Niederhalterkraft zu niedrig eingestellt, erfolgt ein Materialnachfluss, der durch die Druckspannungen in tangentialer Richtung zur Faltenbildung führt. Da das Auftreten von Falten nicht gewollt ist, führt dies zu einer Prozessgrenze. Wenn weder Faltenbildung noch Risse sichtbar sind, wird die Umformung als erfolgreich angesehen.

Der Druck, bei dem Risse auftreten, sowie die Faltengrenze sind mit Unsicherheiten behaftet, was zu unscharfen Grenzen des Prozessfensters führt. Dies zeigt sich im Prozessfenster durch sowohl fehlerfreie als auch fehlerbehaftete Proben bei identischen Prozessparametern, beispielsweise bei 10 kN Niederhalterkraft und einem Umformdruck von 3 bar. Diese Tatsache lässt sich durch Inhomogenitäten in der Struktur des Naturfasermaterials Papier begründen.

Einfluss von Prozessgrößen

Für das Erreichen des Ziels einer maximalen Formfüllung ist die Wahl der Prozessparameter ausschlaggebend. Die Beeinflussung der beiden Prozessparameter Niederhalterkraft und Umformdruck ist in Abbildung 7-37 gezeigt.

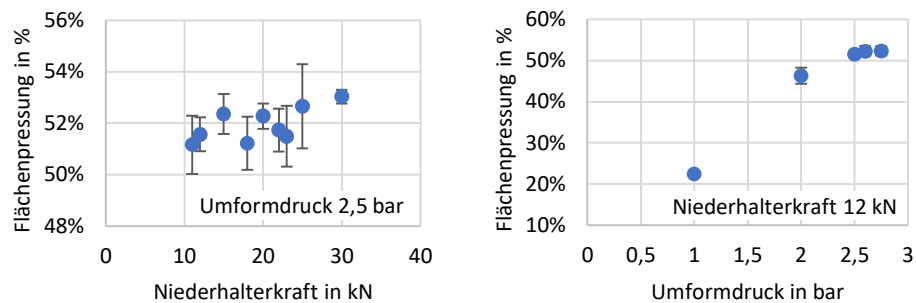


Abbildung 7-37: Einfluss der Prozessgrößen Umformdruck und Niederhalterkraft auf Umformung; $n = 3$

Hierbei zeigt sich, dass die erreichte Formfüllung kaum von der Wahl der Niederhalterkraft abhängt. Es kann eine leichte Tendenz zu höheren Formfüllungen bei gesteigerten Niederhalterkräften festgestellt werden. Dies kann dadurch erklärt werden, dass bei höheren Niederhalterkräften eine höhere Ausdehnung des Fasernetzes und damit ein höherer Anteil plastischer Dehnung auftritt.

Der Umformdruck beeinflusst die erreichte Formfüllung deutlich und stellt die signifikante Prozessgröße dar. Zur Erzielung maximaler Formfüllung ist damit eine Erhöhung des Umformdrucks bis zum Auftreten von Falten oder Rissen sinnvoll.

Aufgrund der starken Unschärfe der Prozessgrenzen wurde für die weitere Untersuchung der Umformbarkeit der verschiedenen Materialien ein Parametersatz identifiziert, der eine sichere Wiederholbarkeit ermöglicht. Hierzu wurde ein gegenüber dem Optimum (maximaler Umformdruck) geringfügig reduzierter Umformdruck gewählt und für die weitere Auswertung fünffach wiederholt, siehe schwarzer Kreis in Abbildung 7-36.

7.4 Umformbarkeit verschiedener Papiere

Prozessparameter für verschiedene Papiere

Die Prozessparameter, die zu einer jeweils materialspezifisch guten Formfüllung führen, sind in der nachfolgenden Tabelle aufgelistet:

Tabelle 5: Prozessparameter für die wirkmedienbasierte Umformung des konischen Napfes

Papier	Grammatur in g/m ²	Niederhalterkraft in kN	Umformdruck in bar
Becherkarton	195	3,5	4,5
Becherkarton	330	5	5
Recyclingkarton A	350	3	2,2
Recyclingkarton B	200	3	2,4
Laborkarton A	200	2	3,8
Laborkarton B	200	2	3,5
Faltschachtelkarton	190	1,5	0,9
Faltschachtelkarton	325	2	1,2
Tiefziehkarton	190	2	4,2
Tiefziehkarton	350	10	5,2

Erreichbare Formfüllung

Die mit den in obiger Tabelle aufgezeigten Prozessparametern erreichten Umformgüten sind beispielhaft für die Flächenfüllung in CD aufgezeigt:

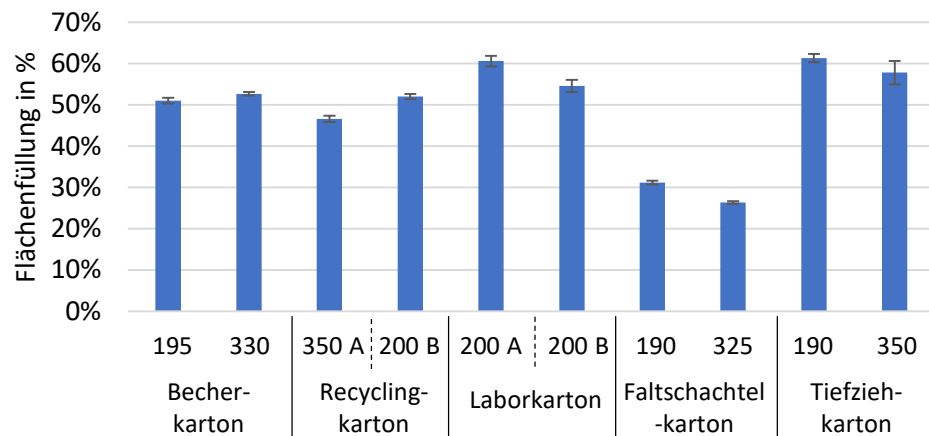


Abbildung 7-38: Vergleich der erzielten Flächenfüllung für den konischen Napf

Bei den Flächenfüllungen zeigen sich starke Unterschiede über die betrachteten Papiere. Der Einfluss der Grammaturn auf die Umformbarkeit zeigt keine eindeutige Tendenz und ist gegenüber dem Einfluss verschiedener Papiertypen mit jeweils unterschiedlichem Schicht- bzw. Faseraufbau von untergeordneter Bedeutung. Eine besonders gute Umformeignung zeigen die Tiefziehpapiere in beiden Grammaturnen sowie die beiden Laborpapiere auf. Die geringste Umformeignung zeigt sich bei dem Faltschachtelkarton.

Auswirkung der Orthotropie

Die Richtungsabhängigkeit der Materialeigenschaften, die beispielsweise im Zugversuch deutlich werden, zeigt sich auch im Umformergebnis. Papier weist in CD eine geringere Festigkeit, jedoch eine höhere Dehnbarkeit auf, was zu einer besseren Formfüllung in dieser Richtung führt. Dies ist in den Schnitten in MD und CD in Abbildung 7-39 zu erkennen.

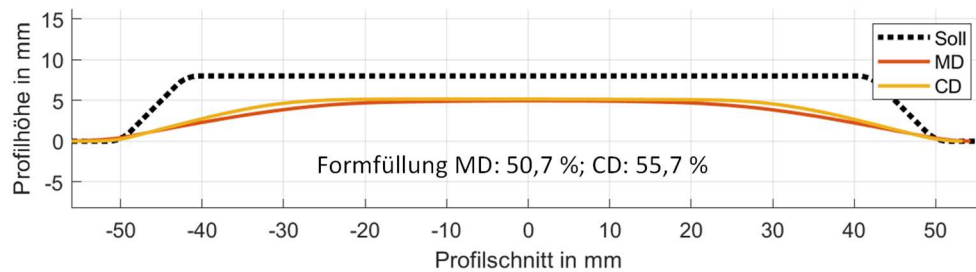


Abbildung 7-39: Einfluss der Orthotropie auf die Umformung in MD und CD

Die Auswirkung der Orthotropie kann über das Verhältnis der Flächenfüllung in MD und CD quantifiziert werden und liegt für die betrachteten Papiere bei etwa 0,9.

Betrachtung der weiteren Qualitätsgrößen

Nur vier der zehn Papiere haben eine hinreichend gute Formfüllung erzielen können, sodass nur für diese Papiere (Tiefziehkarton in beiden Grammaturnen und beide Laborpapiere) eine Bestimmung der weiteren Qualitätsgrößen zuverlässig möglich war. Dies ist beispielhaft in Abbildung 7-40 gezeigt.

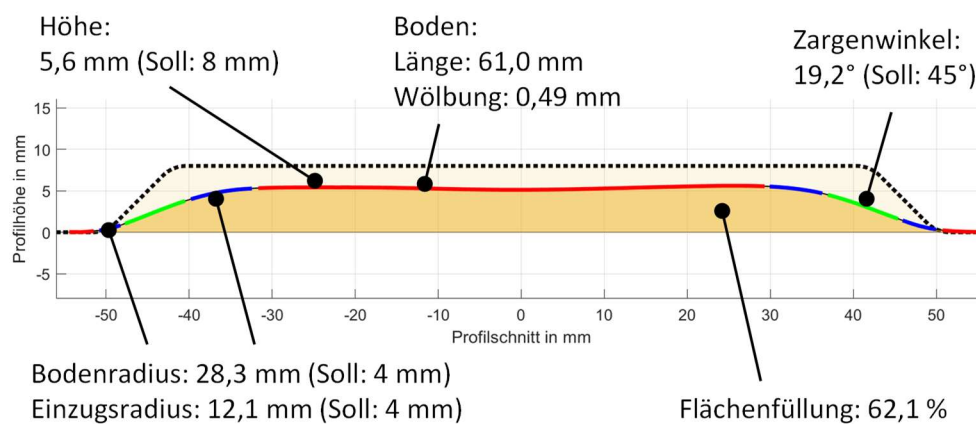


Abbildung 7-40: Bestimmung weiterer geometrischer Qualitätsgrößen in der wirkmedienbasierten Umformung

Die Klemmung der Formkörper ist zur Schaffung eines Bezugssystems und Sicherstellung der Reproduzierbarkeit der Vermessung notwendig, verhindert jedoch die Bestimmung des Flanschwinkels. Stichprobenartig werden daher auch Scans ohne Klemmung durchgeführt. Beispielhaft ist dies in Abbildung 7-41 gezeigt. Ohne Klemmung (gestrichelte Linie) resultiert ein Flanschwinkel von ca. 5° . Durch die Klemmung tritt dieser Flanschwinkel α_F nicht mehr auf, steigert jedoch die Reproduzierbarkeit der Bestimmung der Qualitätsgrößen.

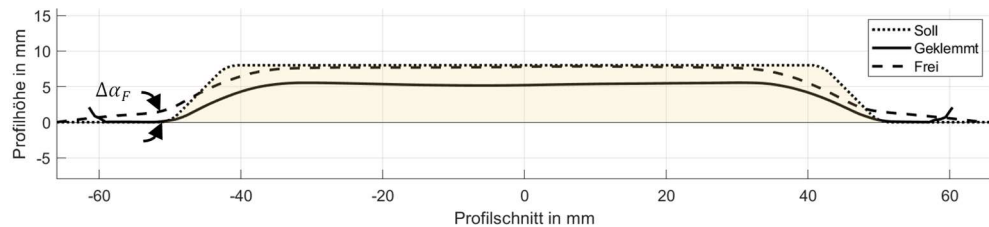


Abbildung 7-41: Auswirkung der Klemmung auf Bestimmung der Geometriegrößen

Betrachtung der weiteren Umformgeometrien

Die weiteren Umformgeometrien „Rechteckiger Napf“ und „Konvex-konkaver Teller“ stellen aufgrund der gesteigerten Formtiefe und der höheren Komplexität erhöhte Ansprüche an die Umformbarkeit der Materialien. In Abbildung 7-42 sind Schnitte durch Proben für die Rechteckgeometrie gezeigt. Aufgrund der stärkeren Dehnbarkeit des Materials in CD wurden die Papiere so angeordnet, dass die kurze Kante, die eine höhere Dehnbarkeit zur Formfüllung erfordert, parallel zu CD angeordnet wurde. Im Fall des am besten umformbaren Papiers ist eine Identifikation der Bereiche zur Bestimmung der Qualitätsgrößen möglich. Auffällig ist der aufgrund der gesteigerten Formtiefe deutlich kürzer ausfallende Bodenbereich. Bei schlecht umformbaren Papieren ist kein Erreichen des Formbodens aufgetreten, sodass sich kein Bodenbereich ergibt.

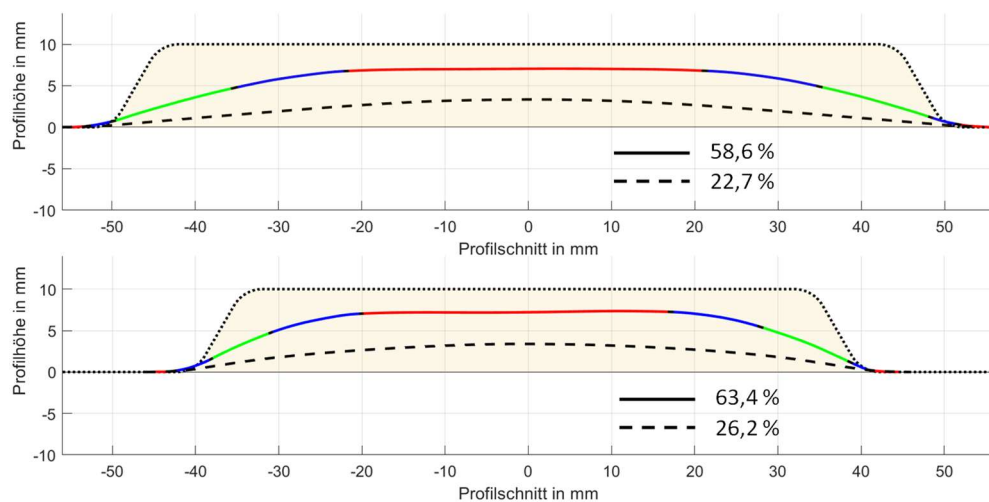


Abbildung 7-42: Probenquerschnitt der Rechteckgeometrie entlang der langen (oben) und kurzen (unten) Kante für das am besten (durchgezogene Linie) und schlechtesten (gestrichelte Linie) umformbaren Papier

In Abbildung 7-43 sind Schnitte für die Tellergeometrie gegeben. Auch hier ist der Unterschied der Umformbarkeit der betrachteten Papiere ersichtlich. Insbesondere die Ausbildung der „Höcker“ mit einer maximalen Formtiefe von 13 mm erfordert eine hohe Dehnbarkeit des Materials.

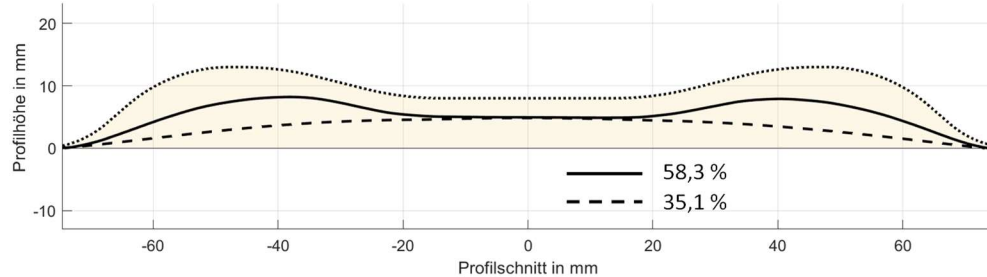


Abbildung 7-43: Probenquerschnitt entlang CD der Tellergeometrie für die am besten (durchgezogene Linie) und schlechtesten (gestrichelte Linie) umformbaren Papiere

Einfluss erhöhter Materialfeuchte

Für die Korrelationsanalyse der Materialparameter und Qualitätsgrößen waren im Projekt keine Variation des Feuchtigkeitsgehalts der Papiere vorgesehen. Die Feuchtigkeit beeinflusst dabei maßgeblich die Eigenschaften der verwendeten Papiere. Dies äußert sich unter anderem durch eine Reduktion der Festigkeit bei zeitgleicher Steigerung der Dehnbarkeit und ist in entsprechenden Spannungs-Dehnungsdiagrammen ersichtlich. Auch bei der Umformung zeigt sich der Einfluss der veränderten Materialcharakteristik, wie in Abbildung 7-44 sichtbar. Für dasselbe Papier zeigt bei erhöhter Feuchtigkeit von 15 % eine um etwa 12 Prozentpunkte gesteigerte Formfüllung. Hierbei fallen insbesondere die bessere Ausbildung der Bodenradien und die geringere vertikale Rückfederung auf.

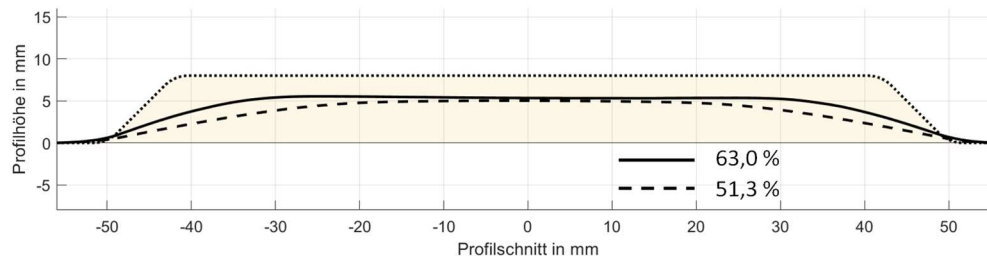


Abbildung 7-44: Auswirkung erhöhter Feuchtigkeit auf die Umformgüte, Vergleich der Umformung nach Lagerung unter Raumbedingungen (gestrichelte Linie) gegenüber Befeuchtung auf 15 % (durchgezogene Linie)

7.5 Fazit

Ergebnisse

Die untersuchten Papiere zeigen eine unterschiedlich starke Eignung zur Umformbarkeit mittels wirkmedienbasierter Umformung. Als Maß für die Umformbarkeit wurde die Flächenfüllung eines virtuellen Schnittes ausgewertet, der in MD und CD in die umgeformten und digitalisierten Proben gelegt wurde. Hierbei zeigt sich der Einfluss der orthotropen Materialeigenschaften auf makroskopischer Ebene durch unterschiedliche Ausfüllung der Form. Die geplanten erweiterten Qualitätsparameter, die sich auf die Ausprägung einzelner geometrischer Elemente beziehen, konnten aufgrund mangelnder Umformbarkeit nicht für alle Papiere bestimmt werden. Für die Korrelationsanalyse wurden daher die Flächenfüllung in MD und CD verwendet.

8 Materialcharakterisierung

Vorgehen

Eine erfolgreiche Umformung kann durch einen hohen Anteil plastischer Dehnung, mehrachsiger Beanspruchungen und Bruchfreiheit in Ausbreitungsebene charakterisiert werden. Dementsprechend wurden geeignete Messverfahren ausgewählt, welche Parameter für mehrachsige Materialbeanspruchungen im Bereich plastischer Verformung bereitstellen. Teils existierten geeignete Messanordnungen bereits, jedoch erfolgt vielmals nur eine Auswertung im Bereich der elastischen Verformung oder die Angabe eines vergleichenden Bruchparameters. Ziel der zu entwickelnden Prüfstrategie war es daher, alle benötigten Versuche zur Charakterisierung der Umformbarkeit von Papieren zu bestimmen. Hierbei wurden zunächst die lokalen Materialbeanspruchungen betrachtet und alle zur Messung dieser Beanspruchungen vorhandenen Prüfverfahren analysiert.

Prüfstrategie

Der Fokus der Prüfstrategie lag in der Charakterisierung reiner Schub-, Biege- und Reibeigenschaften sowie überlagerter Zug-Druck-Beanspruchungen (vgl. Tabelle 6).

Tabelle 6: Relevante Beanspruchungen und mögliche Prüfverfahren zur Gewinnung der benötigten Werkstoffparameter

Umformverfahren	Beanspruchung im Material	Messverfahren
Relevant für beide Verfahren	Schub	Out-of-Plane-Schubprüfung mit modernisiertem Schubprüfstand
		In-Plane-Schubprüfung mit Scherrahmenprüfsystem
	Zug	Parametermodifizierter Zugversuch
	Biegung	Krümmungswiderstandsmessung nach dem Ringprinzip
	Druck	RCT/ Krümmungswiderstandsmessung nach dem Ringprinzip
Tiefziehen	Mixed-Mode	Zug mit überlagerter Druckbelastung in Dickenrichtung
	Mixed-Mode	Druck mit überlagerter Druckbelastung in Dickenrichtung (Zero-Span-Compression)
	Schub	Reibung (unter Kontakttemp., Kompression, Geschwind.)
Hydroformen	Zug	Tiefungsversuch
	Druck in Dickenrichtung	optische Vermessung

Diese Beanspruchungen waren bereits im Vorfeld als Kerneigenschaften für die 3D-Umformung bekannt und wurden durch diverse Vorlaufprojekte bestätigt. Lediglich die potentiellen Zusammenhänge waren bislang noch unklar.

Geräteumbau

Um die Durchführung der Prüfmethoden sicherstellen zu können, kam es u. a. an der PTS zu einer Weiterentwicklung und Validierung des Out-of-Plane Schubprüfstands. Des Weiteren erfolgte eine Anpassung der Krümmungswiderstandsmessung hinsichtlich Einstellung eines Prüfklimas und einer größeren Messempfindlichkeit (bisher nur für biegesteiferen Karton).

8.1 Standardprüfmethoden der Papiertechnik

Flächenbezogene Masse (mA) und Dicke

Die Bestimmung der flächenbezogenen Masse erfolgte nach DIN EN ISO 536:2020-05 mittels Analysenwaage der Firma Sartorius mit einer Genauigkeit von 1/1000 g. Die Prüffläche betrug abweichend von der Norm 100 cm². Aus 20 Einzelmesswerten wurde ein Mittelwert in g/m² berechnet.

Die Bestimmung der Dicke erfolgte nach DIN EN ISO 534:2012-02 mittels Mikrometer der Firma Lorentzen & Wettre. Aus 20 Einzelwerten wurde ein Mittelwert gebildet.

Die Ergebnisse der Messung sind in folgender Abbildung 8-45 aufgezeigt.

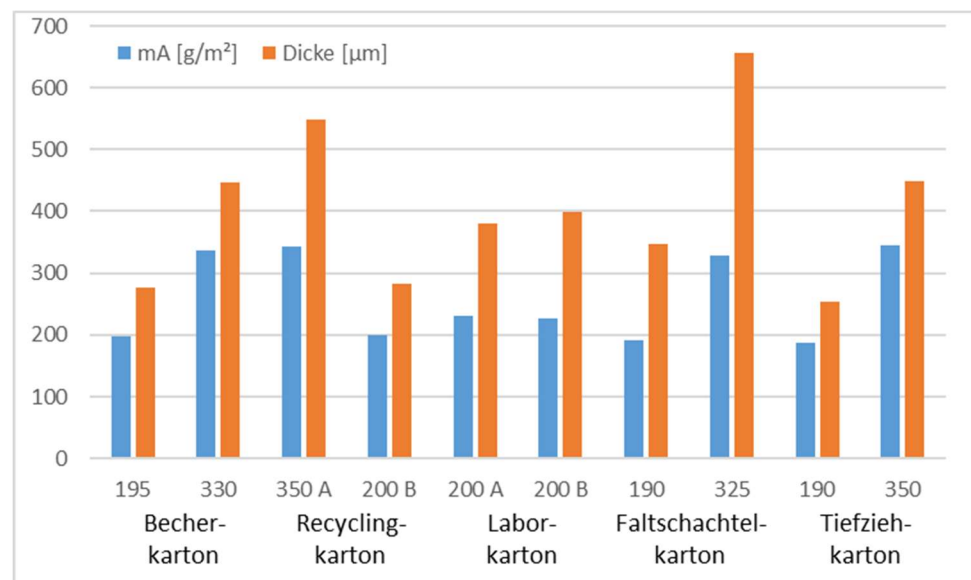


Abbildung 8-45: Messergebnisse mA und Dicke

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 entgegengesetzt. Es wurden 20 Materialstreifen in jede der drei Richtungen geprüft und aus 20 Einzelmesswerten ein Mittelwert berechnet. Abbildung 8-46 zeigt die ermittelten SCT-Werte.

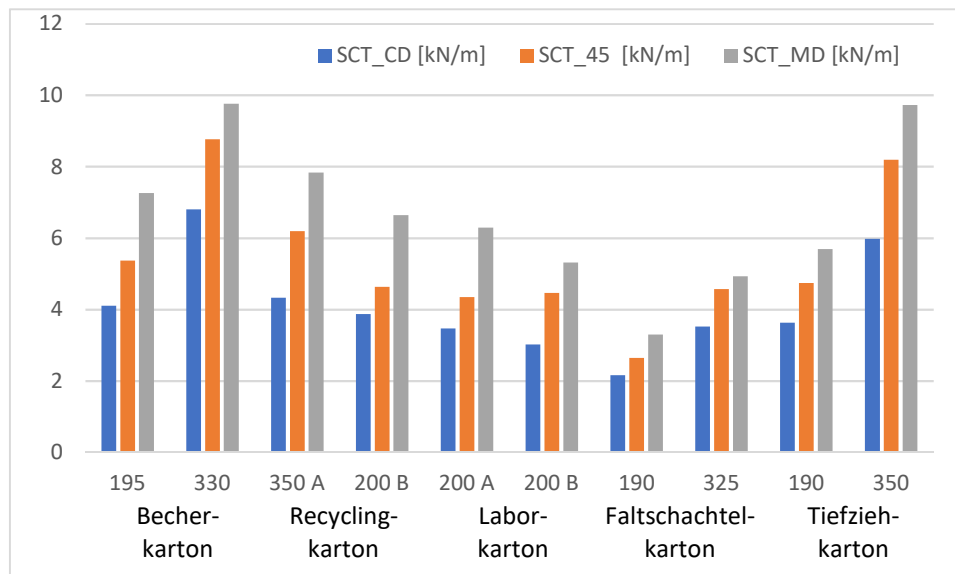


Abbildung 8-46: Messergebnisse SCT

Biege­widerstand nach DIN ISO 2493-1

Die Bestimmung des Biege­widerstands wurde gemäß DIN ISO 2493-1:2023-02 (Biegung mit konstanter Drehgeschwindigkeit) mit dem Biege­steifigkeitsprüfgerät Typ 58566 der Firma Frank-PTI GmbH durchgeführt. Die Biege­widerstand beschreibt die mittlere Kraft, die erforderlich ist, um ein rechteckiges Prüf­stück unter folgenden Bedingungen zu biegen:

- Biege­winkel: 15°
- Einspannlänge: 50 mm
- Probenbreite: 38 mm

Es wurden 10 Einzelwerte pro Prüf­richtung ermittelt, davon je 5 Messungen gegen die Materialober- bzw. Materialunterseite und ein Mittelwert errechnet. Die Ergebnisse sind folgend dargestellt (vgl. Abbildung 8-47).

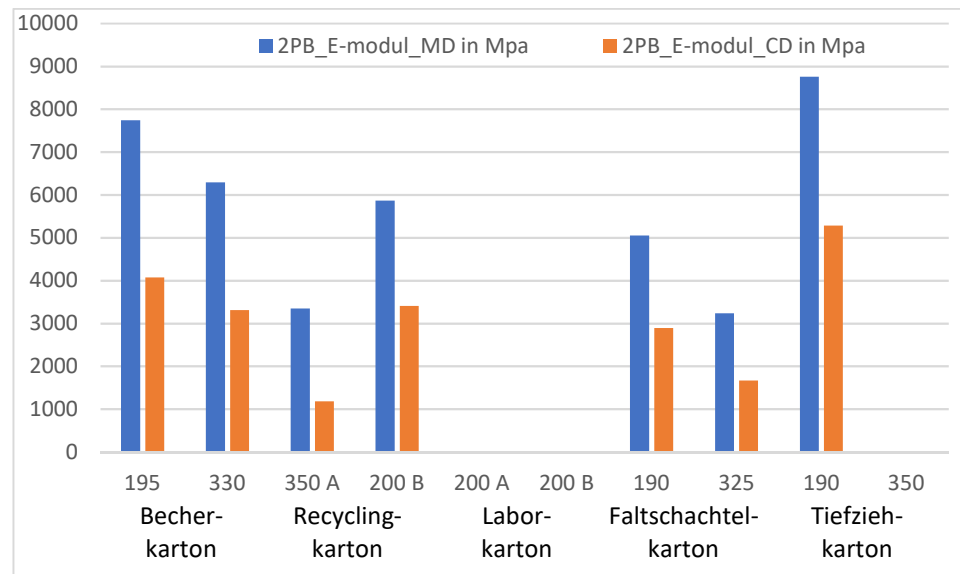


Abbildung 8-47: Biege widerstand der Materialien

Spaltfestigkeit nach Scott Bond

Die Bestimmung der Spaltfestigkeit nach Scott Bond erfolgte nach DIN ISO 16260:2017-06 / TAPPI T569 om-22 mit dem IBT Internal Bond Tester der emco Elektronische Mess- und Steuerungstechnik GmbH. Die Spaltfestigkeit definiert die durchschnittliche potenzielle Energie in J/m^2 bezogen auf die Probenoberfläche, die für eine schlagartige Spaltung einer mehrschichtigen Probe senkrecht zur Materialebene unter definierten Prüfbedingungen erforderlich ist. Die Prüfung erfolgte unter folgenden Bedingungen:

- Anpresszeit: 3 Sekunden
- Anpressdruck: 690 kPa
- Klebeband: 3M Type TM-410 / Nitto tape Permacell P-50/08

Es wurden je 5 Einzelmesswerte in Maschinenlaufrichtung und Querrichtung bestimmt und aus 10 Einzelwerten ein Gesamtmittelwert errechnet. Die Ergebnisse sind folgend dargestellt (vgl. Abbildung 8-48).

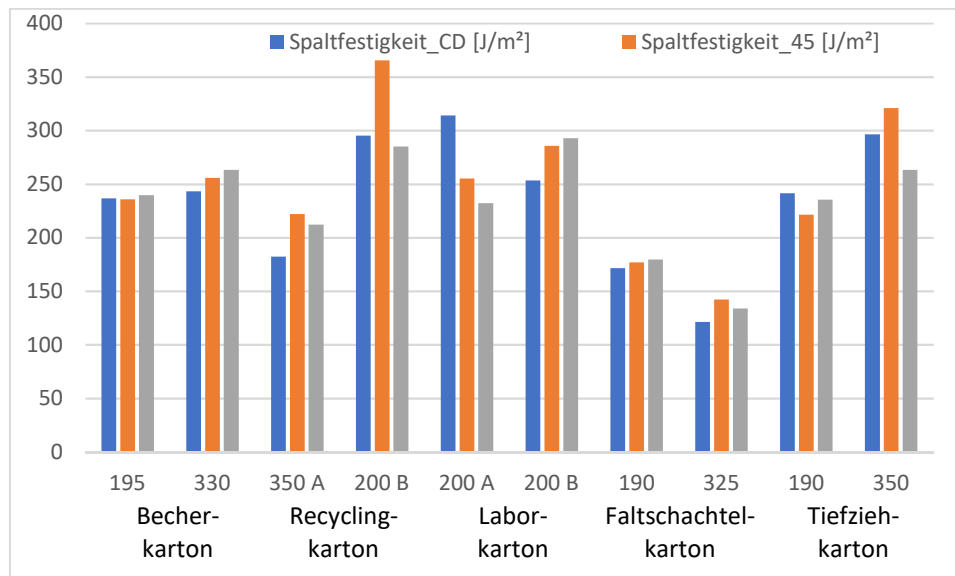


Abbildung 8-48: Spaltfestigkeit nach Scott Bond für die Materialien

Bersten Pappe

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 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 (vgl. Abbildung 8-49).

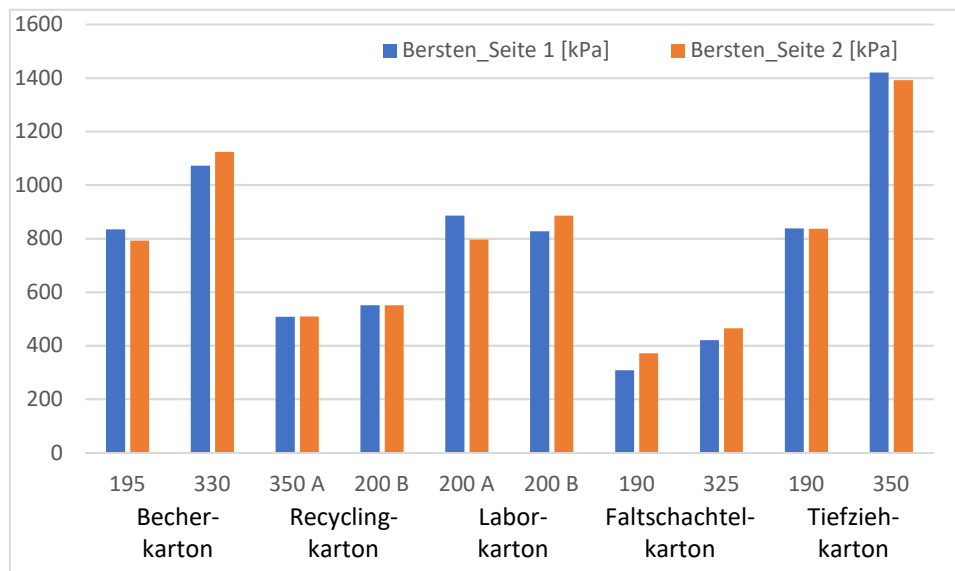


Abbildung 8-49: Bersten Pappe der Materialien

S-Test

Der Stauchwiderstand einer S-förmig eingespannten Probe misst parallel zur Papierebene die maximale Stauchkraft, der die Probe standhält. Der S-Test erfolgt nach der DIN 5014:2019-04 mit dem L&W S-Tester der Firma ABB. Es werden 20 Streifen in Längsrichtung mit einer Breite von 15 ($\pm 0,1$) mm zugeschnitten und geprüft. Aus den 20 Einzelmesswerten wird ein Mittelwert gebildet. Zusätzlich wurde der S-Test analog zu Maschinenlaufprüfung auch in Quer- und 45°-Richtung aus ebenfalls 20 Einzelwerten ermittelt (vgl. Abbildung 8-50). Der S-Test-Wert wird in kN/m angegeben

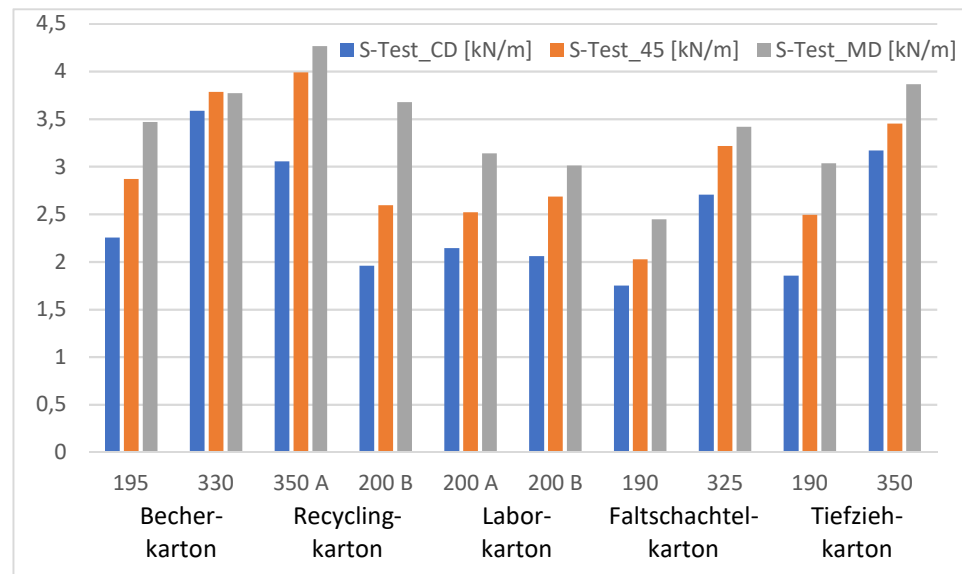


Abbildung 8-50: Messergebnisse S-Test der Materialien

Feuchtegehalt nach DIN und IR-Waage

Der Feuchtegehalt wurde nach DIN EN SO 287:2018-03 nach dem Wärmeschrankverfahren bestimmt. Die Prüfung erfolgte unmittelbar nach Öffnung der Musterverpackung ohne vorherige Klimatisierung. Die Muster wurden bei ($105 \pm 2^\circ\text{C}$) bis zu ihrer Massekonstanz getrocknet und gewogen. Die Massekonstanz ist erreicht, wenn der Unterschied zwischen zwei aufeinanderfolgenden Wägungen $\leq 0,1\%$ der Ausgangsmasse des Musters beträgt. Es wurde jeweils eine Doppelbestimmung pro Muster durchgeführt. Zudem erfolgte eine Bestimmung des Feuchtegehalts mittels IR-Waage HB 43 Halogen der Fa. Mettler Toledo (vgl. Abbildung 8-51).

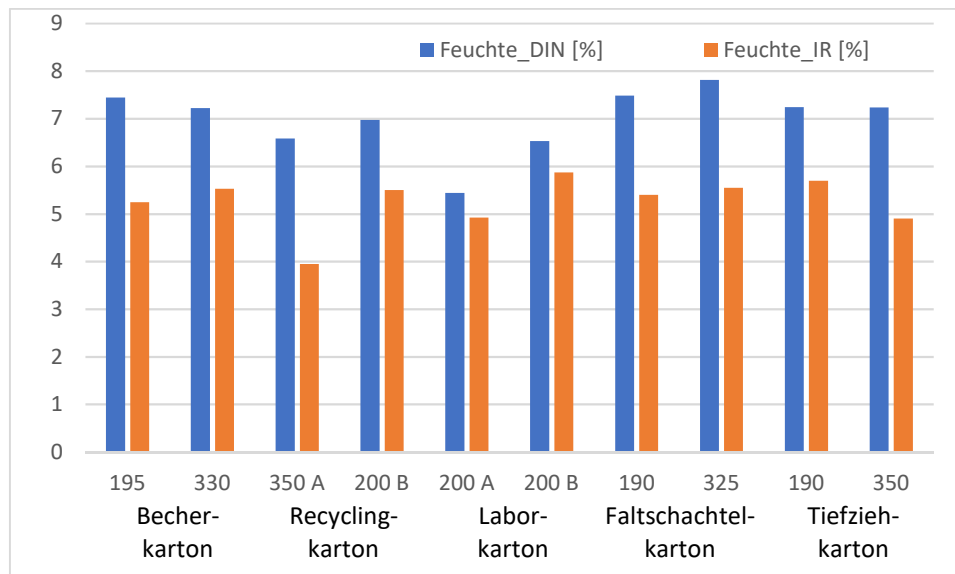


Abbildung 8-51: Feuchtegehalt der Materialien nach DIN und mittels IR-Waage

Haft- und Gleitreibungskoeffizient

Die Bestimmung des statischen und dynamischen Reibungskoeffizienten erfolgte nach TAPPI T549 om-20 (Horizontal-Plane Methode) auf einer Universalprüfmaschine TIRAtest 2805 der TIRA GmbH. Der Reibungskoeffizient gibt die Reibungskraft im Verhältnis zur Anpresskraft (Normalkraft) zwischen zwei Körpern dimensionslos an.

Geprüft wurde unter folgenden Bedingungen:

- Prüfgeschwindigkeit 150 mm/min
- Normalkraft 1,96 N
- Größe des Prüfkörpers (Reibschuh): 63,5 mm x 63,5 mm

Zur Bestimmung des statischen Reibungskoeffizienten (μ_S) wurde die Haftreibungskraft (erste Kraftspitze), für den dynamischen Reibungskoeffizienten (μ_D) die mittlere Kraft im Auswertebereich beim Gleiten (zwischen Ober- und Unterseite) ausgewertet.

Es wurden jeweils 10 Messungen in Längs- und Querrichtung mit der Seitenpaarung US und OS gegen Stahl gemessen und aus den Einzelmesswerten der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet (vgl. Abbildung 8-52).

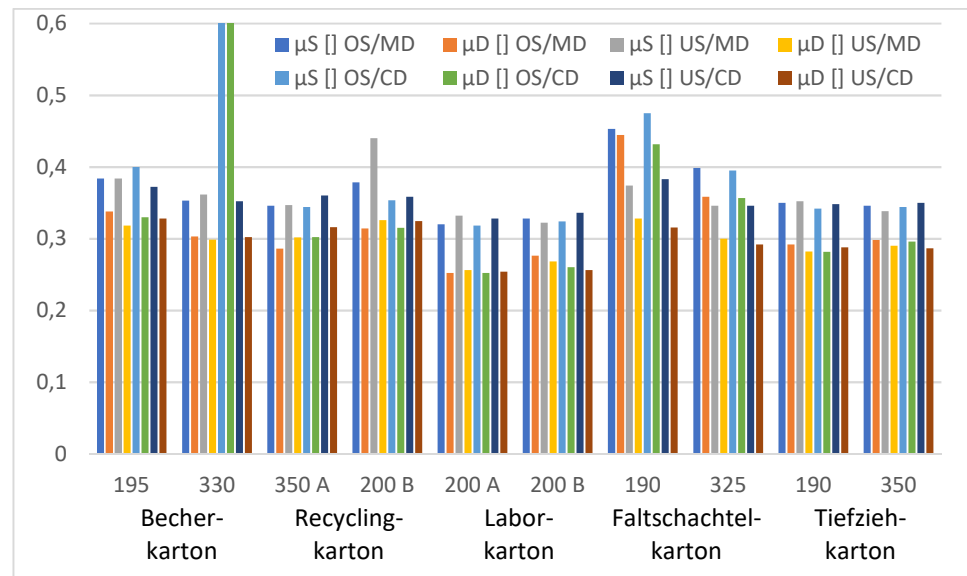


Abbildung 8-52: Haft- und Gleitreibungskoeffizienten der Materialien gegen Stahl

Das Diagramm wurde auf 0,6 genormt, die Werte für den Becherkarton 330 in der Paarung OS/CD lagen weit über den vergleichbaren Kennwerten.

8.2 Parametermodifizierter Zugversuch

Digital Image Correlation (DIC)

Der parametermodifizierte Zugversuch sowie die In-Plane- und Out-of-Plane-Schubprüfungen erfolgten durch Messung der Werkstoffantwort über ein geeignetes optisches Kamerasystem und anschließende Bewertung mittels der sogenannten *Digitalen Bildkorrelation*. Es handelt sich hierbei allgemein um eine Methode zur Analyse von Bewegungen, Verformungen und Dehnungen. Aufgrund einer Lasteinwirkung entstehen Verformungen am Messobjekt, welche im Abbild der Oberfläche sichtbar sind. Die Voraussetzung für eine sinnvolle Generierung von Prüfdaten sind stabile Versuchsbedingungen, die eine Auswertung über ein Grauwertbild mit entsprechenden Intensitätsunterschieden ermöglichen. Werden Bilder während der Prüfung erzeugt, werden diese mit einer Messpunktmatrix versehen und die jeweiligen Kennwerte auf Basis des Kreuzkorrelationsalgorithmus berechnet.

Die Auswertung erfolgt über die Festlegung einer Referenzgrauwertmatrix mit $n \cdot n$ Pixeln bezüglich der Umgebung der Messpunkte x_i und y_i . Dazu wird eine Vergleichsmatrix mit $N \cdot N$ Pixeln ($N > n$) ins Verhältnis gesetzt. Dabei wird als Ähnlichkeitsmaß ein Korrelationskoeffizient berechnet für jede mögliche Position des jeweiligen Referenzfeldes innerhalb des entsprechenden Messfeldes. Die Position mit maximaler Musterähnlichkeit liefert einen Verschiebungsvektor u_i für jeden Messpunkt. Subpixelverschiebungen werden über einen Subpixelalgorithmus mit einer Genauigkeit von 0,001 Pixel unter Berücksichtigung von Rotation, Translation, Scherung und Dehnung ermittelt.

Ablauf, Versuchsparameter und Messergebnisse

Der Zugversuch erfolgt an Proben mit einer Länge l von 100 mm und einer Breite b von 15 mm. Diese werden mit einer Faserorientierung in 0° , 45° und 90° zur Kraftaufnahme in eine Universalprüfmaschine eingespannt. Danach erfolgt die Prüfung unter Zugbeanspruchung mit einer genormten Dehnungsgeschwindigkeit von 1 %/min.

Die Werkstoffverzerrung wird mit Hilfe der digitalen Bildkorrelation bewertet und in Beziehung zu der Kraftwirkung der Probe gesetzt. Die Querkontraktion wird über die Poissonzahl ν ermittelt.

Es lässt sich eine weitere Schubsteifigkeit G aus Kennwerten des Zugversuches in MD beziehungsweise CD-Richtung ermitteln.

Beispiel Auswertung mittels DIC

Die Auswertung des Zugversuchs ist beispielhaft auf folgender Abbildung 8-53 dargestellt.

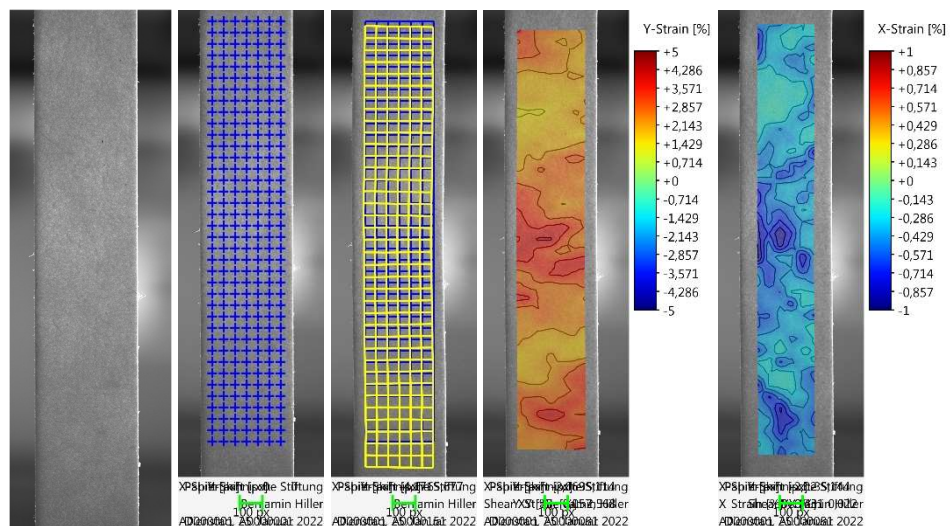


Abbildung 8-53: Ablauf der Versuchsauswertung v.l.n.r.: Aufgenommenes Kamerabild, Messgitter zu Versuchsbeginn, verschobenes Messgitter, lokal aufgelöste Längs- und Querdehnung

Die Ergebnisse geben zudem Auskunft über das Fließverhalten des Materials im 90° -Winkel zur Beanspruchungsrichtung und ermöglichen damit die Detektion der Querkontraktionszahl. Es besteht ebenso die Möglichkeit der Analyse von lokalen Inhomogenitäten und aufgrund der Messung direkt am Probekörper ergeben sich unmittelbare und nicht beeinflusste Messergebnisse. Das Ergebnis einer Auswertung der Längs- und Querdehnung inkl. Querkontraktionszahl ist folgend aufgezeigt (vgl. Abbildung 8-54).

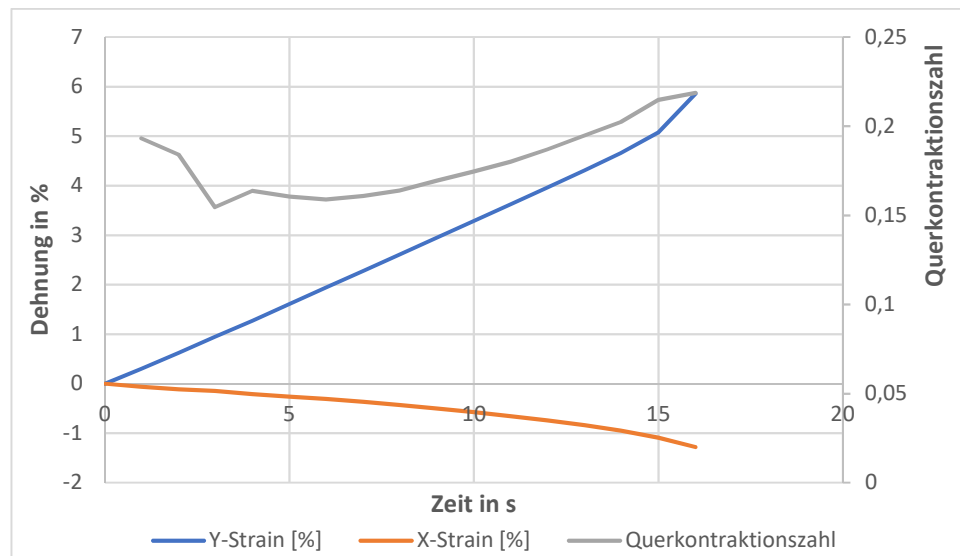


Abbildung 8-54: Beispiel einer Auswertung der Längs- und Querdehnung inkl. Querkontraktionszahl

E-Modul

Die ermittelten Steifigkeitskennwerte der Materialien sind in folgender Abbildung 8-55 dargestellt. Der E-Modul entspricht dem Anstieg im Spannungs-Dehnungs-Diagramm im linear-elastischen Bereich und ist als elastischer Kennwert insbesondere im Bereich der Auslegung lasttragender Bauteile von Bedeutung.

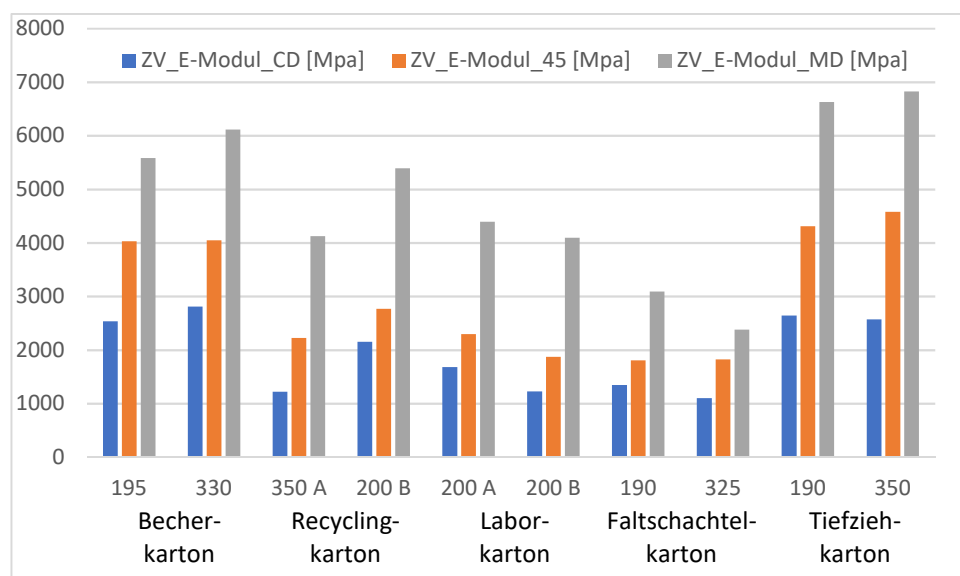


Abbildung 8-55: Elastizitätsmodul der Materialien

Festigkeit

Die Bruchfestigkeit als Kennwert bezüglich des Versagens der Materialien ist in folgender Abbildung 8-56 aufgetragen. Sie beschreibt das Versagen des Werkstoffs nach der plastischen Verformung und gibt damit eine Kraftgrenze vor.

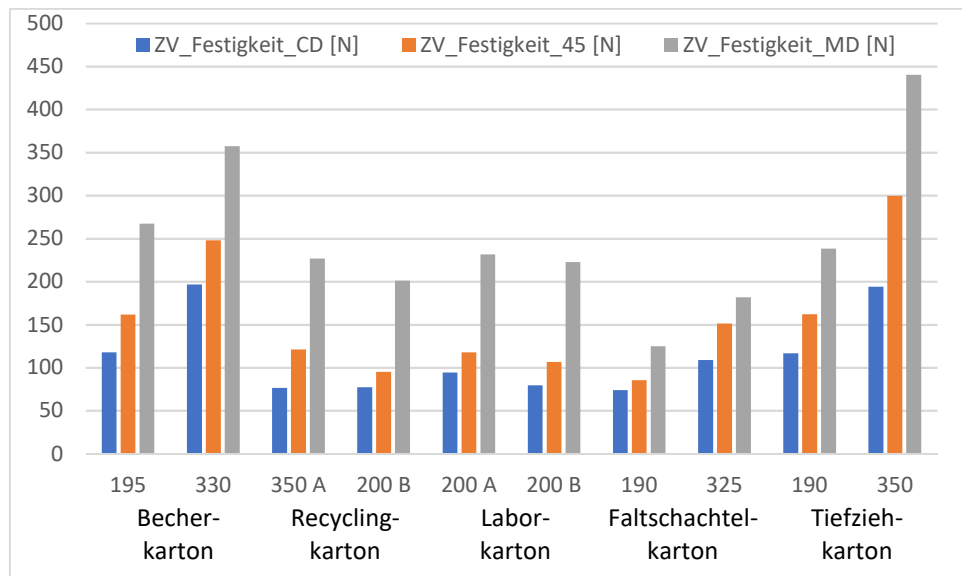


Abbildung 8-56: Festigkeit der Materialien

Bruchdehnung

Die Bruchdehnung als Weggrenze und somit beschreibendes Grenzkriterium in der Wegverformung ist in folgender Abbildung 8-57 aufgezeigt.

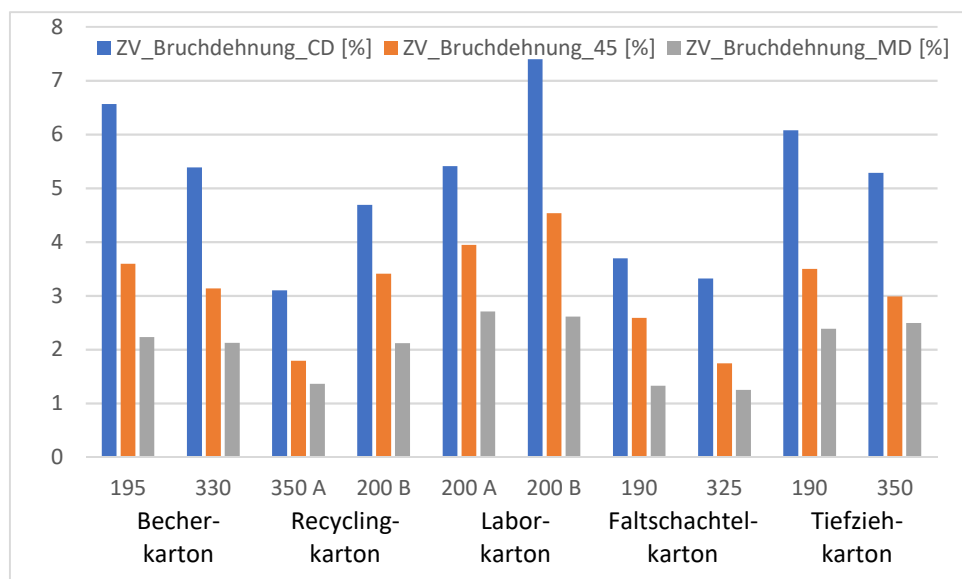


Abbildung 8-57: Bruchdehnung der Materialien

Arbeitsaufnahmevermögen

Das Arbeitsaufnahmevermögen beschreibt das Integral unter der aufgenommenen Spannungs-Dehnungs-Kurve und ist somit ein Kriterium, in welches sowohl die Kraft als auch die Dehnung der Materialien eingehen. Die ermittelten Arbeitsaufnahmevermögen der Materialien sind folgend aufgezeigt (vgl. Abbildung 8-58).

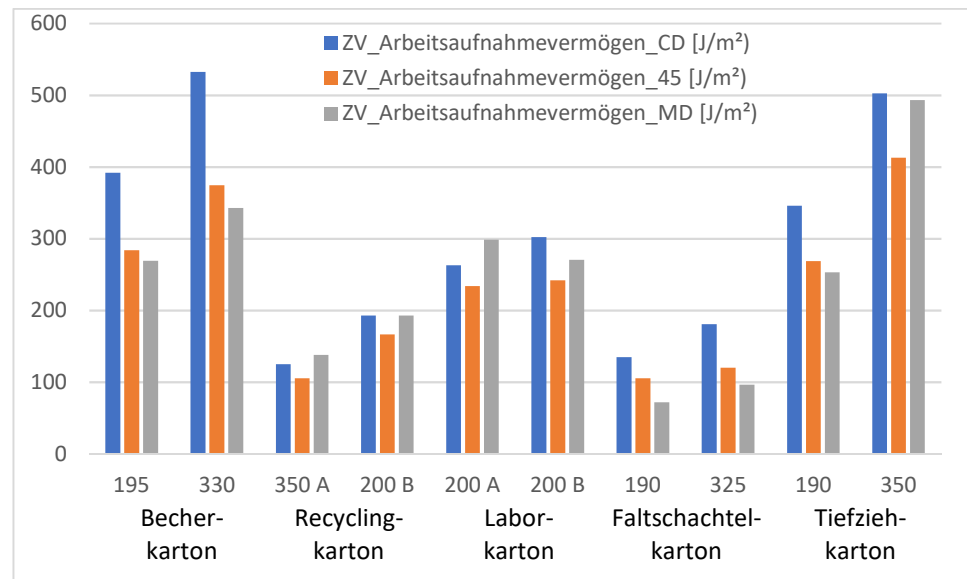


Abbildung 8-58: Arbeitsaufnahmevermögen der Materialien

8.3 Out-of-Plane-Schubprüfung

Out-of-Plane-Schubprüfvorrichtung

In Umformverfahren werden Naturfaserwerkstoffe auf Scherung außerhalb der Blattebene (Out-of-Plane) belastet. Eine Möglichkeit, eine gezielte Prüfung der Schubeigenschaften in dieser Richtung zu ermöglichen, bietet die direkte Out-of-Plane-Schubprüfung. Die entsprechende Prüfvorrichtung ist in Abbildung 8-59 dargestellt. Sie wurde im Rahmen des Projekts modernisiert.

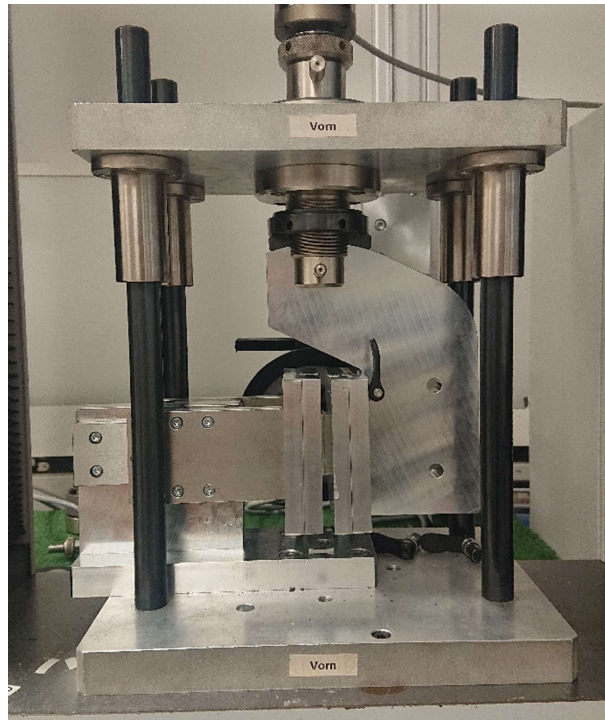


Abbildung 8-59: Modernisierter Out-of-Plane-Schubprüfstand

Dabei wird das entsprechende Material zwischen zwei Metallplättchen mittels eines zweikomponentigen Epoxidharzklebers fixiert. Der Kleber ist so ausgelegt, dass dessen Schermodul den der zu prüfenden Materialien übersteigt, so dass keine Beeinflussung der Messwerte durch die Klebung erfolgen kann. Ansonsten würde sich der Klebstoff ebenfalls deformieren.

Einfluss des Klebstoffs

Es wird zudem gefordert, dass der Klebstoff die Fähigkeit besitzt, Lücken zwischen der Oberfläche des Werkstoffs und der Metalloberfläche auszufüllen. Allerdings muss eine Penetration des Klebstoffs aufgrund der inneren Porosität der Werkstoffe ausgeschlossen werden. Dies wurde vorhergehend an der Papiertechnischen Stiftung für ein Beispielmateriale verifiziert. Eine beispielhafte REM-Aufnahme ist in Abbildung 8-60 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Werkstoff und der Klebstoff optisch voneinander getrennt vorliegen.

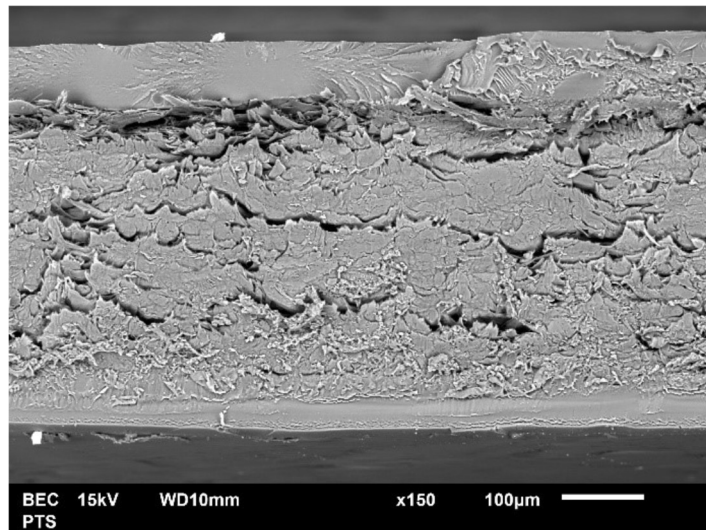


Abbildung 8-60: Abbildung eines Klebstoffeindringversuches des Klebstoffs in einen Faltschachtelkarton

Ablauf

Die Prüfvorrichtung erzwingt ein Abscheren der Decklagen des Werkstoffes, sodass bewusst Schubspannungen in das Material eingebracht werden, die zu einer Schubverzerrung in ZD-Richtung führen. Dies wird über zwei Metallscheren gewährleistet, die jeweils an einer Lage des Prüfkörpers angreifen. Diese sind in einem Metallgestell fixiert, welches mit der Kraftaufnahme einer Universalprüfmaschine verbunden ist. Die Maschine misst die jeweilige Scherkraft. Die Messung der Verschiebungen erfolgt durch die digitale Bildkorrelation direkt am Prüfkörper, sodass Einflüsse der Prüfvorrichtung minimiert werden. Dadurch sind auch Risseffekte optisch am Prüfkörper detektierbar.

Die Out-of-Plane-Schubprüfung wird mit einer Probenlänge von 43 mm und einer Probenbreite von 15 mm durchgeführt. Die Proben werden zwischen den Einspannflächen paarweiser Metallblöcke mit dem Klebstoff kraftschlüssig verbunden. Dazu wird dieser unter Verwendung einer Pistole mittels Mischdüse aus den beiden Harz-Härter-Reservoirs gemischt, auf die Flächen aufgetragen und mittels einer Rasierklinge verstrichen. Von den Metallblöcken stehen fünf Paare zur Verfügung. Nach der Aushärtezeit von einer Stunde werden die Materialüberreste mit einer Rasierklinge abgetragen. Die Proben werden anschließend in die Prüfvorrichtung eingespannt, indem an den gegenüberliegenden Seiten Abstandshalter in Form von Metallplättchen angebracht werden. Die Anbringung in die Prüfmaschine erfolgt mittels einer möglichst spannungs- und rissfreien Montage. Die obere Metallzange wird festgeklemmt und die Schrauben werden festgedreht. Danach erfolgt die Prüfung des Werkstoffes mit einer Traversengeschwindigkeit von 4 mm/min, da diese für Vergleichsverfahren genormt ist. Die Bestimmung der Schubeigenschaften erfolgt über die Scherspannung τ_{ZD} und die Scherverzerrung γ_{ZD} .

Die Scherverzerrung γ_{ZD} wird durch die digitale Bildkorrelation bestimmt, indem die unterschiedlichen lokalen Längenänderungen der Deckflächen zueinander in Beziehung gesetzt werden. Aufgrund der umständlichen Montage und dem

damit verbundenen Zeitaufwand erfolgt eine Einfachbestimmung der mechanischen Kennwerte.

DIC-Verformung und ausgewählte Ergebnisse

Beispielhaft ist auf folgender Abbildung 8-61 die DIC-Auswertung des Versuchs dargestellt.

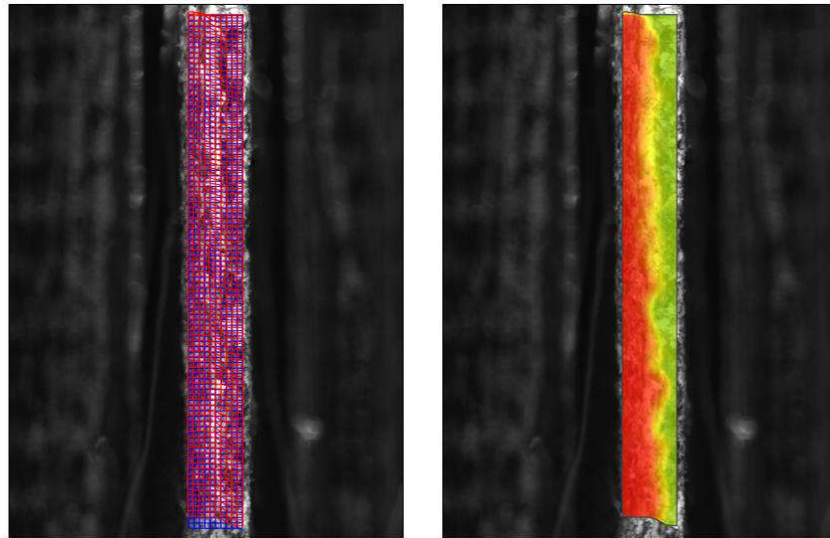


Abbildung 8-61: DIC-Auswertung des Out-of-Plane-Schubversuch mit Messgitter (links) und farblicher Darstellung der Trennebene (rechts)

Mit Hilfe der Kamertechnik ist es daher nicht nur möglich, präzise die Wegverformung zu bestimmen, was für die Berechnung der Steifigkeit notwendig ist, sondern ebenso die Trennebene zu bestimmen.

Die Ergebnisse der Modulberechnung sind beispielhaft in folgender Abbildung aufgetragen (vgl. Abbildung 8-62).

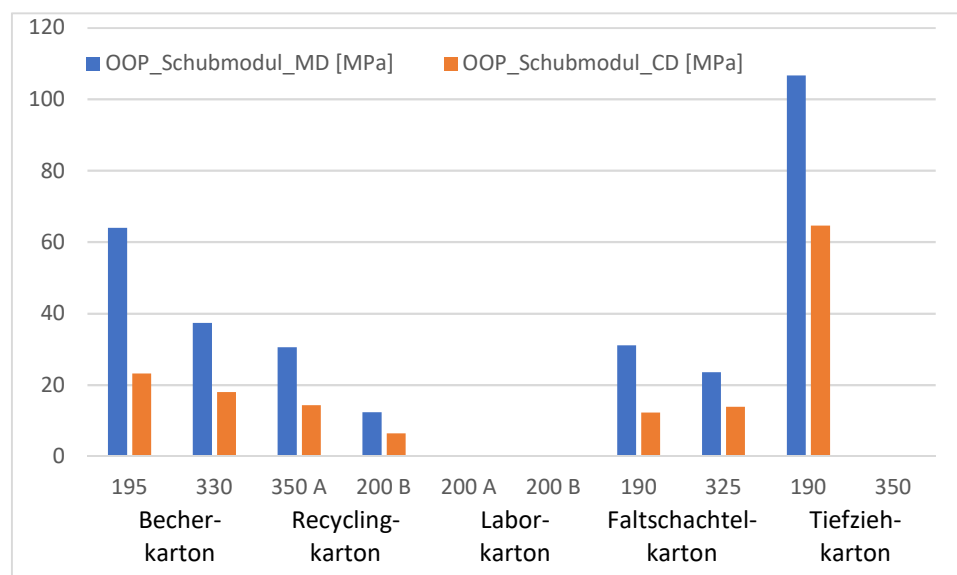


Abbildung 8-62: Schubmoduln out-of-plane der Materialien

8.4 In-Plane-Schubprüfung

Scherrahmen

Die mechanisch-technologische Messung der Schubeigenschaften in der Blattebene (In-Plane) von Naturfaserwerkstoffen wird mittels eines Schubrahmens ermöglicht. Dieser ist beispielhaft in Abbildung 8-63 dargestellt.



Abbildung 8-63: Darstellung des In-Plane-Schubrahmens

Hierbei ist es unerlässlich, für einen Beanspruchungszustand zu sorgen, der den Probekörper auf reinen Schub belastet. Daher muss den im Werkstoff auftretenden Veränderungen in der Prüfvorschrift Rechnung getragen werden, um geeignete Kenngrößen zu ermitteln. Die Belastungsentwicklung, bezogen auf Naturfaserwerkstoffe, erfolgt anhand einer zu dimensionierenden Zwischenfaserbruchbeanspruchung.

Bei der In-Plane-Schubprüfung handelt es sich um eine quasistatische Belastung, die mittels eines Schubrahmens auf einen flachen und ebenen Werkstoff übertragen wird. Hierbei wird ein ebener Spannungszustand (kraftgeregelte Prüfung durch am Körper angreifende Kräfte) induziert, beziehungsweise ein ebener Verzerrungszustand (dehngeregelte Prüfung durch erzwungene Verschiebungen/Verformungen) im Werkstoff aufgebracht. Aufgrund des zeitabhängigen mechanischen Verhaltens von Naturfaserwerkstoffen wird die Prüfung mit konstanter Beanspruchungsgeschwindigkeit durchgeführt.

Ablauf

Die Werkstoffprüfung über den In-Plane Schubversuch erfolgt an kreuzförmigen Proben mit einer $60 \cdot 60$ mm Messfläche und einer Gesamtlänge von 150 mm. Diese werden im Schubrahmen mit einem festgelegten Einspannmoment von 5 Nm befestigt. Dadurch wird die kraftschlüssige Verbindung des Werkstoffs mit dem Schubrahmen gewährleistet. Bei Bedarf werden die Einspannflächen mit einem definierten Anzugsmoment festgeschraubt. Dieser wird aber nicht genutzt, um ein Materialversagen im Einspannbereich zu verhindern. Die Anordnung wird in eine Universalprüfmaschine eingespannt. Um die lokale Werkstoffantwort zu ermitteln, entfällt die Prüfung mit konstanter Dehngeschwindigkeit $\dot{\epsilon}$. Es wird daher in dieser Untersuchung eine Prüfung mit konstanter Beanspruchungsgeschwindigkeit $\dot{\sigma}$ durchgeführt, damit eine zeitliche

Vergleichbarkeit mit einer Dehngeschwindigkeit von $\dot{\epsilon} = 4 \text{ mm/min}$ gewährleistet wird. Dies ermöglicht eine Auswertung des Werkstoffverhaltens mittels digitaler Bildkorrelation. Daher entfällt die Verwendung von Dehnmessstreifen, was die praktische Handhabung stark vereinfacht. Das Kräfteingangssignal des Probekörpers wird mittels Messung über eine Universalzugprüfmaschine ermittelt. Hierbei wird eine lineare Vorkraft bis zu 5 N appliziert, um den Traversenweg bei Messstart zu nullen. Im Rahmen der praktischen Handhabung wird versucht, eine möglichst vollständige Verformung abzubilden, ohne ein auftretendes Stabilitätsversagen (Beulen) der Probe zu erreichen. Es ist jedoch zu erwähnen, dass der Schubrahmen Zwangsdehnungen in 11- und 22-Richtung induziert, die betragsmäßig gleich groß ausfallen. Diese Einschränkung muss bei der Interpretation der Ergebnisse beachtet werden.

Die Schubbeanspruchung im 45° -Winkel zur Kraftaufnahme des Schubrahmens wird durch Aufbringen eines kombinierten Spannungszustandes gewährleistet, da die Hauptspannungen und Hauptrichtungen äquivalent zur Schubspannung sind. Erfolgt eine Prüfung des Werkstoffs außerhalb der Orthotropieachsen, so ergibt sich eine Spannungs-Dehnungs-Kopplung und es kommt zu zusätzlichen Schubspannungen. Dabei ist die Spannungs-Dehnungs-Kopplungs-Zwangsbeziehung bezüglich des XY-Koordinatensystems zunächst betragsmäßig vernachlässigbar.

Das Aufbringen einer möglichst reinen Schubbelastung wird erzielt, indem der Schubrahmen eine vertikale Zugbeanspruchung aufbringt und diese über zwei bewegliche Gelenke, die sich an den diagonal gegenüberliegenden Ecken des Schubrahmens befinden, lateral übersetzt. Durch Einspannen des Rahmens in eine Universalprüfmaschine wird der messtechnische Aufwand erheblich verringert.

Verformungsanalyse und Ergebnisermittlung

Mittels der Kameratechnik ist es möglich das bidirektionale Verformungsverhalten während des Versuchs zu analysieren. Hierfür werden die Verformungen in Längs- und Querrichtung berechnet und übereinander gelegt (vgl. Abbildung 8-64).

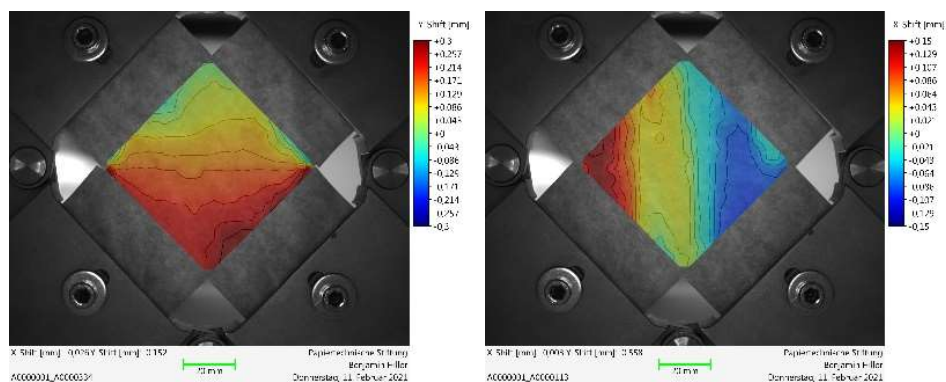


Abbildung 8-64: Längs- und Querverformung während des In-plane-Schubversuchs

Eine ausgewählte Messkurve ist in Abbildung 8-65 dargestellt. Neben dem Schubspannung-Schubwinkel-Verlauf ist hier ebenso die Bestimmung des Schubmoduls zu erkennen.

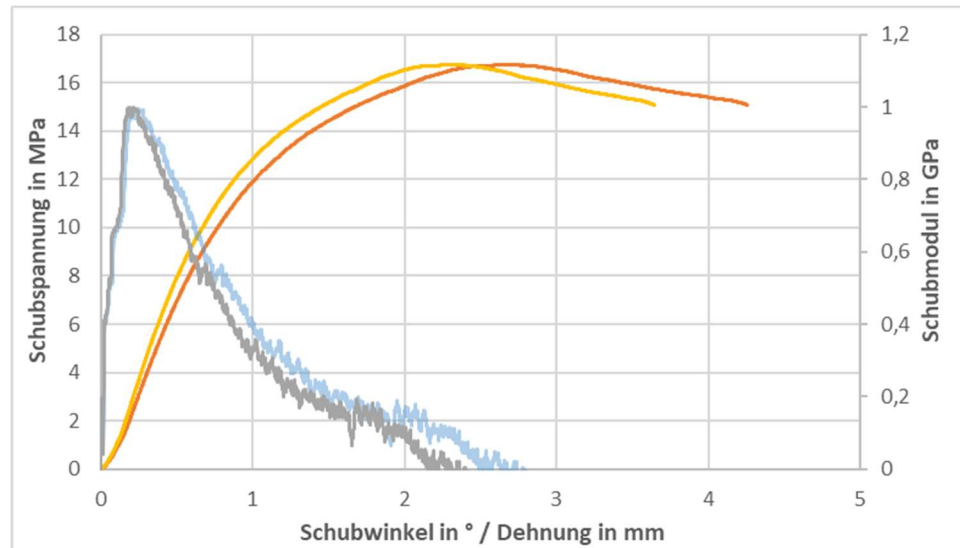


Abbildung 8-65: Schubspannung-Schubwinkel-Diagramm inkl. Schubmodulbestimmung

Ergebnisse der In-Plane-Schubmessungen

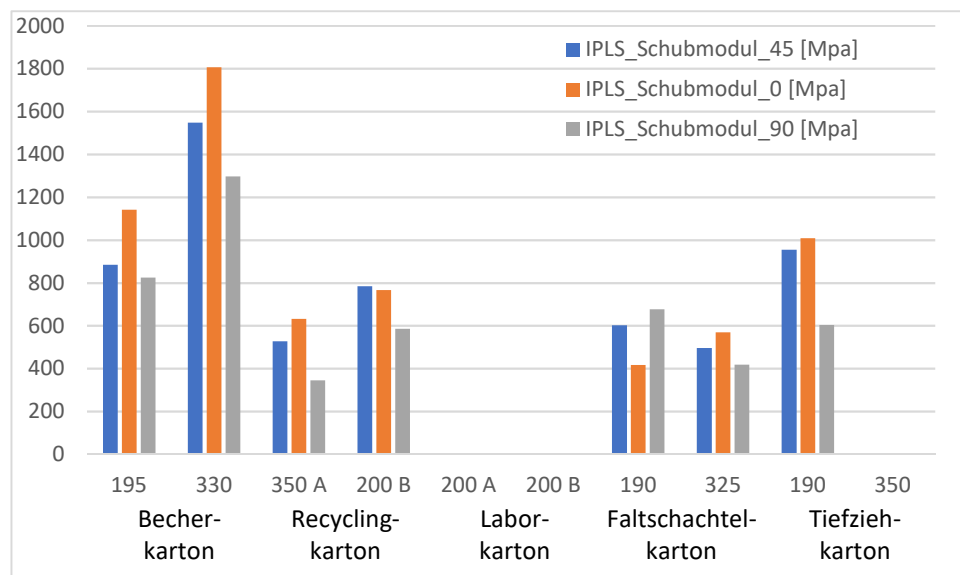


Abbildung 8-66: Ergebnisse bzgl. des Schubmoduls in-plane der Materialien

8.5 Curvature Resistance Test (CRT)

ehem. Krümmungswiderstandsmessung nach dem Ringprinzip

Die gesamten Baugruppen für Messung und Probenausrichtung wurden neu gestaltet. Durch eine räumliche Neuordnung der Drehmomentmessung wird eine um eine Größenordnung höhere Empfindlichkeit der Drehmomentmessung ermöglicht. Bei hoher Empfindlichkeit steigt der Einfluss von reibungsbehafteten, systematischen Fehlern, welches einer Überprüfung jeder Messkurve und Anpassung der Nulllage bedarf. Es kann die Biegesteifigkeit von einlagigen

Papieren gemessen werden, wobei der qualitative Verlauf (die Dehnungsverteilung) wesentlich ist. Bei Betrachtung mehrerer Messkurven ist daher eine Normierung der Einzelkurven angezeigt. Begrenzend wirkt nur noch der Durchmesser der Probeneinspannung. Für Sondermessungen ist auch eine Verklebung oder Klemmung mit einem Spezialprobenträger möglich. Zur Reduktion der Winkelfehler zwischen Einspannung und Führung wurden Austauschsegmente und eine Schlitzweiteneinstellung implementiert. Für eine reproduzierbare Kalibrierung auf Basis der Schwerkraft sind Zentrierpunkte und Umlenkrollchen vorhanden. Der bisher einseitig angetriebene, schlupfarme Abzug wurde vereinfacht und benötigt nun wesentlich weniger Bauraum. Damit eröffnet sich die zusätzliche Option der Winkelanstellung des Probestisches. Damit kann der elastische Bereich von dicken Materialproben (große Masse und Reibwiderstandskraft zu Beginn der Messung) mit geringerer Anfangsstörung vermessen werden. Durch Einsatz eines Servomotors treten keine mechanischen und elektrischen Störungen auf, wodurch ebenfalls die Motoraufhängung vereinfacht werden konnte. Bei Aufbau und Erprobung der Neukonstruktion zeigte sich, dass der Übertragungsfaktor des Drehmomentes nicht wie erwartet proportional zur wirksamen Hebellänge ist und beim Kalibrieren größere Schwankungen auftreten. Als eine Möglichkeit wurden die unterschiedliche Härte und das Reibverhalten der Kontaktpartner identifiziert. Nach dem Austausch eines Bauteils mit abgestimmter Härte konnte das Problem behoben werden.

Verfahren

Zur Qualifizierung des Tiefziehverhaltens von Papierwerkstoffen ist eine Beschreibung des plastischen Verhaltens unter Biegebeanspruchung, einschließlich der Abbildung innerer Strukturbrüche, nötig. In Anlehnung an die 4-Punkt-Prüfung wird bei dem Curvature Resistance Test ein langer Probestreifen zu einem Ring angeordnet und dessen Durchmesser unter einem konstanten Biegemoment kontinuierlich verkleinert. Die Prüfmaschine ist in Abbildung 8-67 dargestellt.

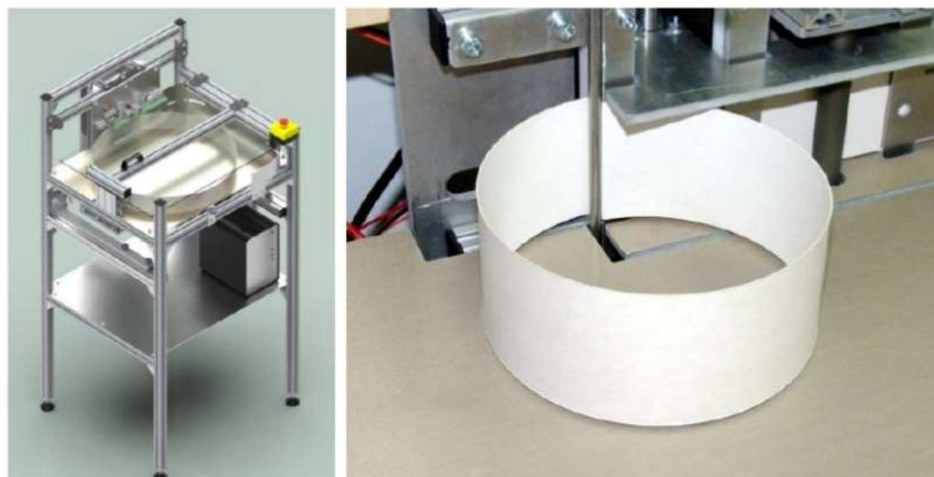


Abbildung 8-67: Darstellung der Prüfvorrichtung (links) und eines eingespannten Probekörpers (rechts) des CRT

Die Einspannung eines Streifenendes verfügt über eine Drehmomentmessung, sodass Einspannmomente und Lagerkräfte erfasst werden können. Das andere Ende des Streifens weist eine ortsnahe, zur Einspannung parallele Führung über einen schlupffreien Abzug auf. Dieser steuerbare Abzug vollzieht direkt hinter der Führung das Zuziehen des Ringes. Die Werkstoffantwort wird als Drehmoment in Abhängigkeit von der Krümmung in Ringebene mit Messkomponenten, die an der Einspannung angebracht sind, aufgenommen. Die dafür benötigte Krümmung des Balkens, welche nahezu konstant über die Messlänge verteilt ist, wird direkt aus der Balkenlänge berechnet. Die mittlere Krümmung ergibt sich anhand der Position des Abzugs. Während des Versuches zeichnet eine DMS-Vollbrücke ein Spannungssignales auf, welches proportional zum benötigten Drehmoment ist. Die Messanordnung ist in Abbildung 8-68 dargestellt.

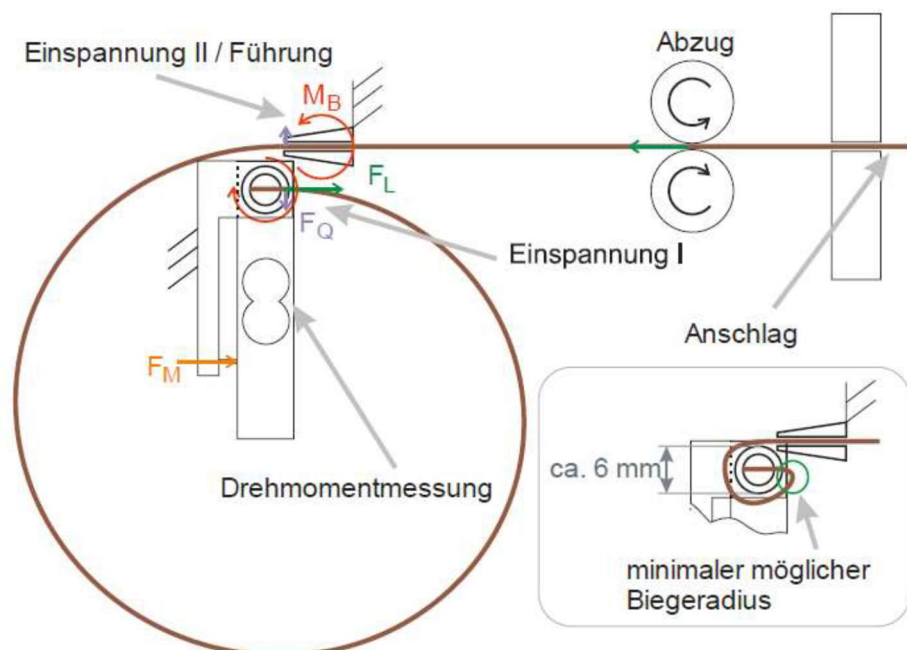


Abbildung 8-68: Darstellung der Probenanordnung des Curvature Resistance Tests

Im Verlaufe des Versuches steigt die Krümmung und dementsprechend auch das jeweilige Biegemoment in der Einspannung bis zum Prüfungsende an. Aufgrund der konstruktiven Auslegung ist es möglich, große plastische Krümmungen unter geringen Krümmungsgradienten in Biegebalkenrichtung zu erhalten. Die maximal mögliche aufzubringende Biegekrümmung wird von der Geometrie der Einspannung und Führung begrenzt und beträgt ungefähr $12^\circ/\text{mm}$. Dies entspricht einem minimalen Biegeradius von ungefähr 4,5 mm. Die verstellbare Empfindlichkeit der Biegemomentenerfassung deckt einen Messbereich von ungefähr 0,1 Nmm bis 200 Nmm ab. Zudem sind prinzipiell geringe Verformungsanteile aus Querkraftschub vorzufinden. Bei großen Krümmungen aber entstehen aufgrund des bauraumbedingten Versatzes der Einspannungen hinreichend große Längs- und Querkräfte, welche die Querkraftbiegung und die Schubverformung überlagern.

Beispiel des Verlaufs und Darstellung der Ergebnisse

Ein beispielhafter Verlauf der CRT-Messung ist in Abbildung 8-69 dargestellt und beschreibt das ansteigende Moment bei steigender Krümmung. Die Ergebnisse der Messungen sind folgend in Abbildung 8-70 dargestellt.

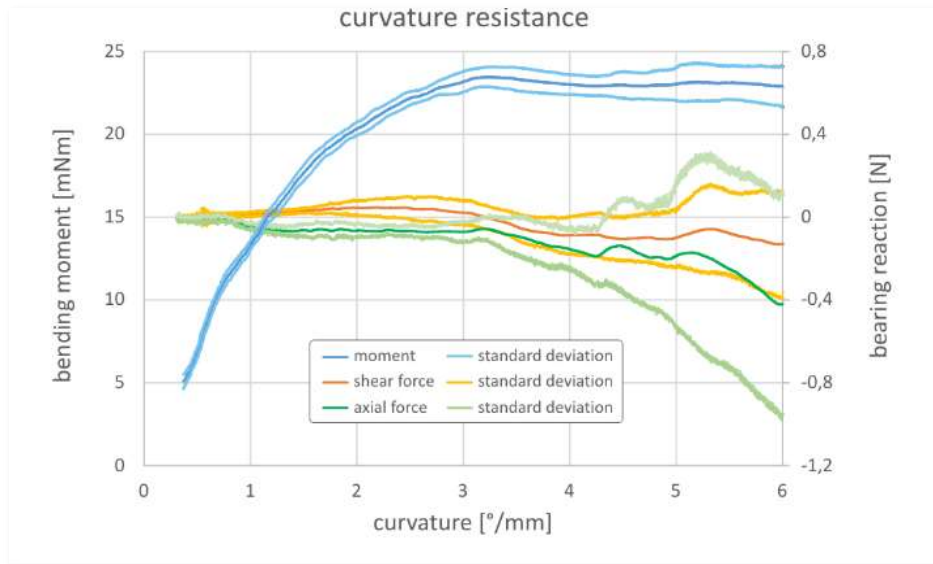


Abbildung 8-69: Beispiel einer CRT-Messung

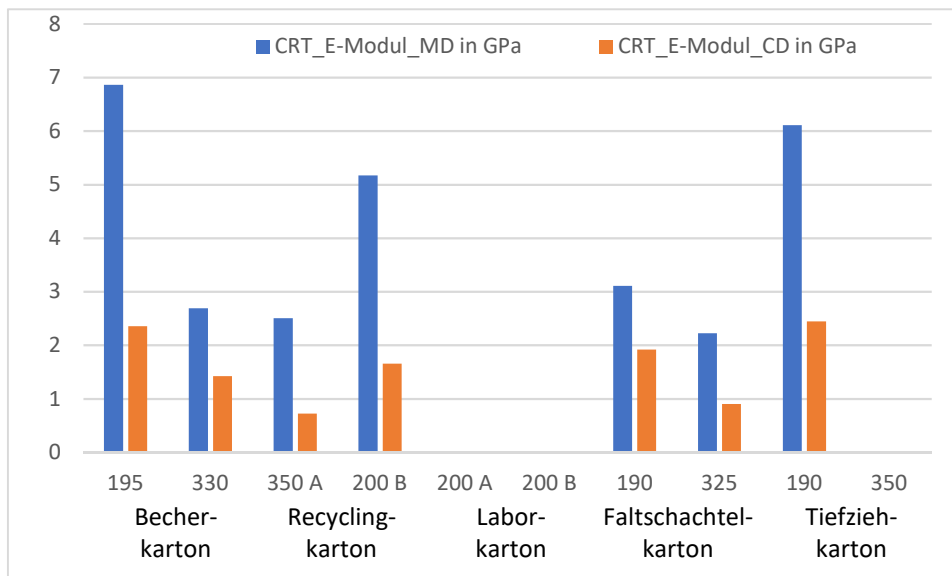


Abbildung 8-70: E-Modul-Bestimmung mittels CRT-Messung

8.6 Tiefungsversuche

Versuchs- ablauf

Die Durchführung des Tiefungsversuchs (auch Bulge-Test) ist ähnlich zur wirkmedienbasierten Umformung. Ein Probenzuschnitt wird durch einen Niederhalterring geklemmt, wobei die Klemmkräfte derart hoch gewählt werden, dass der Materialnachfluss unterbunden ist. Einseitig wird ein Druck mit einer festen Druckrate von 0,1 bar/s aufgebracht, bis es zum Bersten der Probe kommt. Aufgrund der porösen Struktur von Papier wird eine Membran mit einem gegenüber Papier signifikant geringeren E-Modul zur Abdichtung verwendet. Die Probenzuschnitte werden vorab mit einem stochastischen Muster versehen. Dies ermöglicht eine flächige Dehnungsmessung durch das optische Messsystem GOM Aramis.

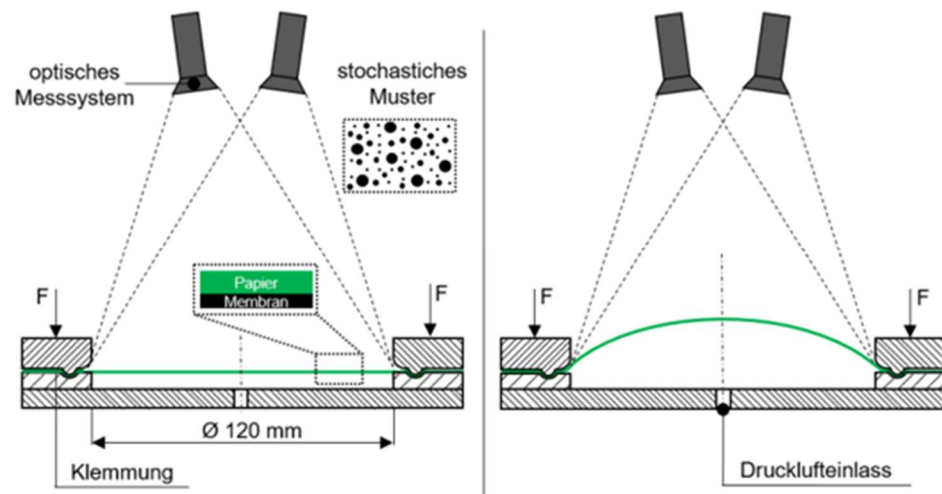


Abbildung 8-71: Versuchsablauf des Tiefungsversuchs nach [Stein 2019]

Eine beispielhafte Probe nach Versagen ist in Abbildung 8-72 dargestellt. Hierbei ist die typische Rissausbildung quer zu MD zu sehen, was auf die geringere Dehnbarkeit zurückgeführt werden kann.

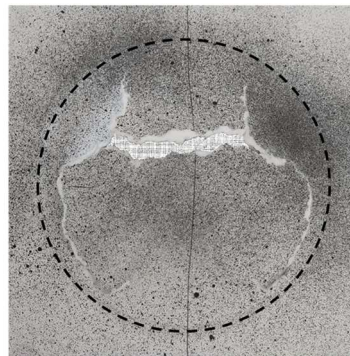


Abbildung 8-72: Probekörper aus dem Tiefungsversuch nach Bersten

Ermittlung der Materialkennwerte bis zum Materialversagen

Mit dem Tiefungsversuch können viele Materialkennwerte ermittelt werden. Durch den linear steigenden Prüfdruck kann der Berstdruck bestimmt werden, bei dem es zu einem Versagen des Prüfkörpers kommt. Weitere Kenngrößen werden aus dem optischen Messsystem abgeleitet, wobei für die Auswertung das letzte Bild vor Versagen verwendet wird. Durch den Aufbau mit zwei Kameras ist eine Erfassung der Formänderung möglich. Aus dieser wird die Domhöhe, die den höchsten Punkt des sich ausbildenden Kugelsegments beschreibt, berechnet. Die weiteren Kenngrößen werden aus dem Dehnungsfeld ermittelt. Ein beispielhaftes Dehnungsfeld ist in Abbildung 8-73 links gezeigt. Hier zeigen sich unterschiedliche lokale Dehnungen. Zur Ermittlung von Materialkennwerten werden virtuelle Schnitte in MD und CD durch das Dehnungsfeld gelegt und der Dehnungsverlauf ausgewertet. Der entsprechende Dehnungsverlauf ist in Abbildung 8-73 rechts gezeigt.

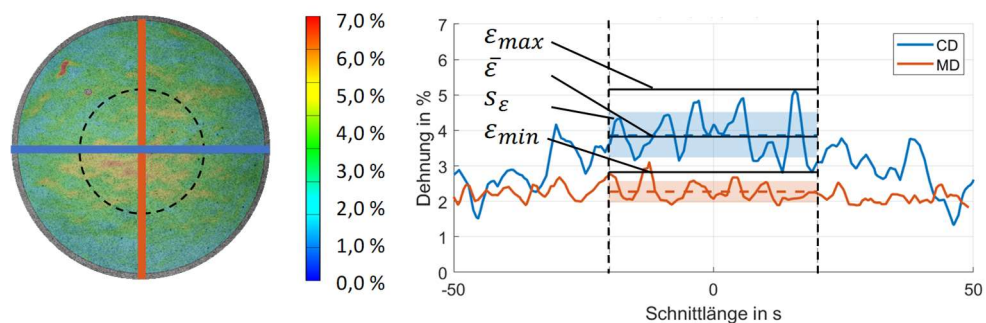


Abbildung 8-73: Dehnungsfeld und Schnitt in MD und CD für ein beispielhaftes Papier und daraus ermittelte Kennwerte

Die Dehnungen werden im mittleren Bereich des Dehnungsfeldes ausgewertet, um Beeinflussungen durch die Einspannung zu verringern. Aus den Schnittverläufen in MD und CD werden jeweils innerhalb des Auswertebereichs die maximal und minimal auftretende Dehnung, sowie der Mittelwert und die Standardabweichung bestimmt.

Ermittlung weiterer Materialkennwerte

Die im vorherigen Abschnitt vorgestellten Kenngrößen werden aus Prüfungen entnommen, bei denen der Prüfdruck bis zum Versagen gesteigert wird. Die dabei analysierten Dehnungen lassen sich in elastische und plastische Anteile unterteilen. Da für die Umformung insbesondere die plastischen Dehnungsanteile entscheidend sind, werden diese mit einem modifizierten Prüfverfahren untersucht. Hierzu wird ein Prüfdruck aufgebracht, der 70 % des aus der vorherigen Durchführung ermittelten Berstdrucks beträgt. Nach Erreichen des Prüfdrucks erfolgt eine unmittelbare Druckreduktion, die zu einer Entlastung und Rückfederung des Prüfkörpers führt.

Aus der Versuchsdurchführung werden analog die Domhöhe und Dehnungskennwerte bestimmt. Hierbei werden jeweils die Kennwerte zum Zeitpunkt des maximalen Prüfdrucks sowie 5 s nach Entlastung ermittelt. Ein beispielhafter Verlauf der gemessenen Dehnung und die Aufteilung in elastische und plastische Anteile sind in Abbildung 8-74 gezeigt.

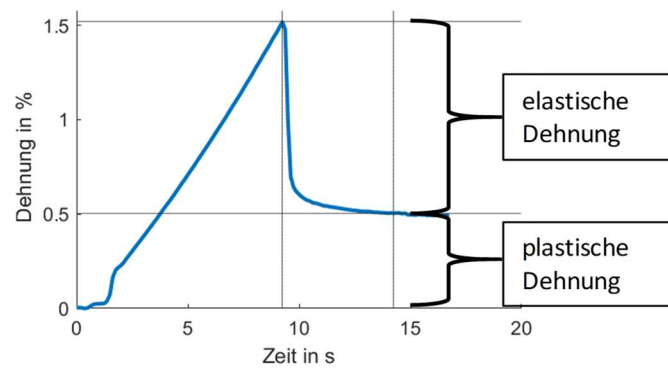


Abbildung 8-74: Vorgehen zur Bestimmung elastischer und plastischer Dehnungsanteile im Tiefungsversuch

Zusammenfassung: Ermittelte Kennwerte aus Tiefungsversuch

Aus dem Tiefungsversuch werden mit den beiden vorgestellten Durchführungsweisen 19 Kennwerte erfasst und für die Korrelationsanalyse verwendet. Diese Kennwerte sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 7: Zusammenfassung der Kennwerte aus dem Tiefungsversuch für die Korrelationsanalyse. Alle Werte außer dem Berstdruck basieren auf Messungen des GOM Aramis-Systems

Versuchsdurchführung	Nr. Tiefungsversuch	Kenngröße	Materialrichtung
Bis Bersten	1	Berstdruck	-
	2	Domhöhe	-
	3	Maximale Dehnung	MD und CD
	4	Minimale Dehnung	MD und CD
	5	Mittlere Dehnung	MD und CD
	6	Standardabweichung der Dehnung	MD und CD
Bis 70 % des Berstdrucks	7	Domhöhe	-
	8	Domhöhe 5 s nach Entlastung	-
	9	Anteil der Domhöhe 5 s nach Entlastung von der Domhöhe unter Prüfdruck (entspricht $\frac{Kenngröße7}{Kenngröße8}$)	-
	10	Mittlere Dehnung (elastisch + plastisch)	MD und CD
	11	Mittlere Dehnung 5 s nach Entlastung (plastisch)	MD und CD
	12	Mittlere elastische Dehnung (entspricht $Kenngröße10 - Kenngröße11$)	MD und CD

Berstdruck

Im Abbildung 8-75 ist für die im Projekt zur Korrelationsanalyse gezeigten Papiere der Berstdruck im Tiefungsversuch gezeigt. Hierbei zeigen sich starke Unterschiede zwischen den aufgetragenen Drücken, bis es zu einem Versagen kommt. Mit zunehmender Materialstärke sind eine höhere Festigkeit und damit ein höherer Berstdruck erwartbar. Die Normierung des Berstdrucks mit der Grammatur bestätigt diesen Zusammenhang und ist ebenfalls in der Abbildung aufgetragen. Bei den Frischfaserpapieren identischen Aufbaus, die in zwei verschiedenen Grammaturen vorhanden sind (Tiefziehkarton, Faltschachtelkarton, Becherkarton) zeigt sich, dass der normierte Berstdruck nur geringfügig von der Grammatur abhängt. Bei den beiden Recyclingkartons zeigen sich deutliche Unterschiede im normierten Berstdruck.

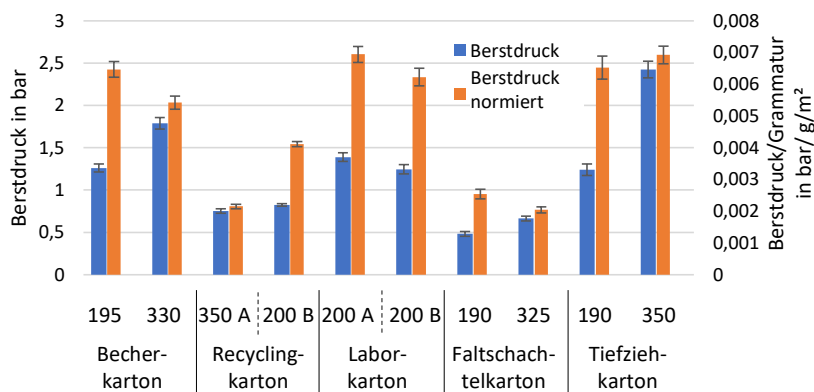


Abbildung 8-75: Vergleich des Berstdrucks im Tiefungsversuch; $n = 5$

Domhöhe

Die Domhöhe, die im Tiefungsversuch erreicht wird, unterscheidet sich stark über die verschiedenen Papiere. Bei den Frischfaserpapieren identischen Aufbaus, die in zwei verschiedenen Grammaturen vorhanden sind (Tiefziehkarton, Faltschachtelkarton, Becherkarton), liegt eine geringe Abhängigkeit der Domhöhe von der Grammatur vor. Während beim Tiefziehkarton eine höhere Domhöhe bei höherer Grammatur erfolgt, liegen diese für den Faltschachtelkarton und den Becherkarton bei niedrigerer Grammatur geringfügig höher.

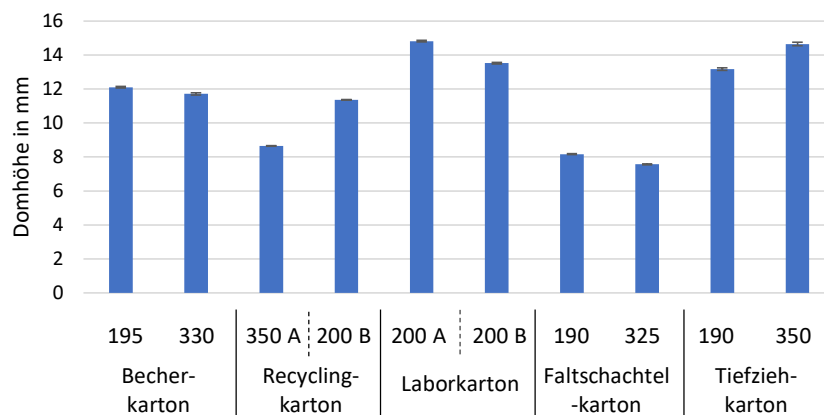


Abbildung 8-76: Vergleich der Domhöhen im Tiefungsversuch; $n = 5$

Dehnung

Die Dehnung stellt eine bedeutende Größe für die Umformung dar und kann mit der beschriebenen Methodik ermittelt werden. In Abbildung 8-77 ist beispielhaft die mittlere Dehnung im Auswertebereich für beide Orientierungen MD und CD dargestellt. Über alle betrachteten Papiere zeigt sich der Einfluss der Materialausrichtung, welche in CD zu höheren mittleren Dehnungen als in MD führt. Dies ist im Einklang mit den Ergebnissen aus den Zugversuchen (Abschnitt 8.2). Die Orthotropie ist bei den Papieren unterschiedlich stark ausgeprägt. Der Faltschachtelkarton zeigt die geringsten Unterschiede in der Richtungsabhängigkeit, während diese bei den Laborkartons und dem Tiefziehkarton deutlicher auftreten. Die betrachteten Papiere decken damit einen Bereich der mittleren Dehnungen von etwa 1,1 % bis 4,3 % ab.

Auffällig sind die starken Streuungen, die sich bei den Laborkartons zeigen. Die auf der Versuchsanlage der PTS hergestellten Papiere weisen deutlich höhere lokale Schwankungen der Materialeigenschaften auf als die auf industriellen Anlagen hergestellten Papiere. Dies führt sowohl zu starken Unterschieden der lokalen Dehnung innerhalb des Auswertebereichs (minimale und maximale Dehnung), als auch Schwankungen zwischen unterschiedlichen Proben.

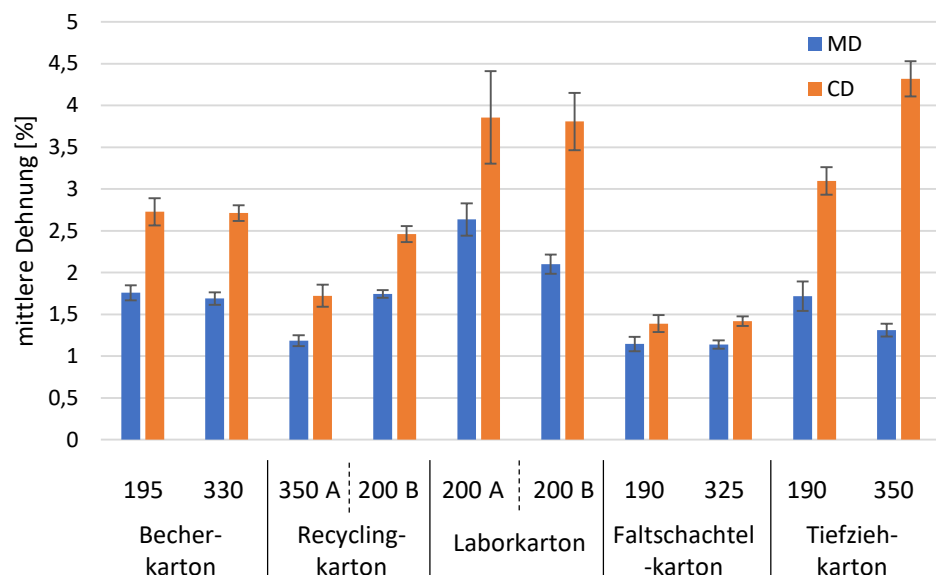


Abbildung 8-77: Mittlere Dehnung im Tiefungsversuch in MD und CD; $n = 5$

Elastische und plastische Dehnungsanteile

Die für die bleibende Formgebung besonders relevante plastische Dehnung ist in Abbildung 8-78 beispielhaft für die CD dargestellt. Hieraus wird ersichtlich, dass die plastischen Dehnungsanteile weniger als die Hälfte der Gesamtdehnung ausmachen. Die verbleibenden plastischen Dehnungen nach Entlastung liegen damit deutlich unter den in den vorherigen Versuchen erfassten Dehnungen, die von elastischen Dehnungsanteilen überlagert sind. Erneut zeigen sich geringe Dehnungen bei den Recyclingkartons und den Faltschachtelkartons. Für die Laborkartons und den Tiefziehkarton sind die plastischen Dehnungen am höchsten.

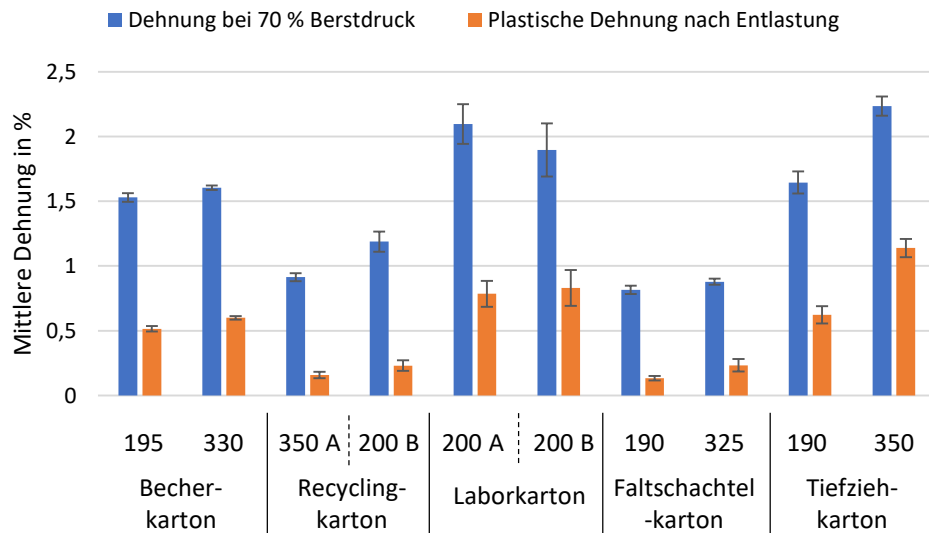


Abbildung 8-78: Plastische und elastische Dehnung bei 70 % des Berstdrucks und plastische Anteile nach Entlastung; $n = 5$

8.7 Reibversuche

Versuchsablauf

Bei der verwendeten Reibversuchsanlage handelt es sich um eine Streifenzieh-anlage, bei der ein Probestreifen zwischen zwei Reibbacken gezogen wird. Die gewünschte Normalkraft wird über pneumatisch betriebene Zylinder aufgebracht, während der Prüfstreifen mittels einer Servoachse mit definierter Geschwindigkeit gezogen wird. Dabei werden an der unteren Reibbacke die auftretende Normalkraft, die Reibkraft sowie eventuell auftretende Querkräfte erfasst. Im Auswertebereich wird aus dem Quotienten der Reibkraft und der Normalkraft der Reibkoeffizient μ bestimmt. Die zeitlichen Verläufe der Normal- und Reibkraft sowie des berechneten Reibwerts sind für ein beispielhaftes Papier in Abbildung 8-79 aufgezeigt.

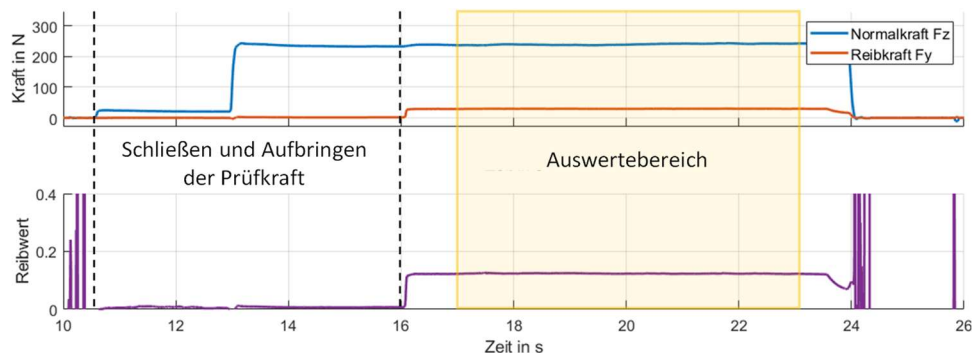


Abbildung 8-79: Bestimmung des Reibkoeffizienten für einen Tiefziehkarton mit 190 g/m^2

Reibwerte verschiedener Papiere

Die Reibwerte für die untersuchten Papiere sind in Abbildung 8-80 dargestellt. Die Reibwerte unterscheiden sich stark und liegen materialabhängig zwischen 0,12 und 0,36. Da die Reibwerte an der unteren Reibbacke erfasst werden, können beide Papierseiten einzeln untersucht werden. Hierbei zeigt sich, dass die seitenabhängigen Eigenschaften unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Das Papier mit dem geringsten Reibwert ist der Tiefziehkarton. Bei diesem ist der Reibwert annähernd unabhängig von der Prüfseite und der Grammat. Im Gegensatz dazu zeigt beispielsweise der Laborkarton B stark seitenabhängige Eigenschaften auf.

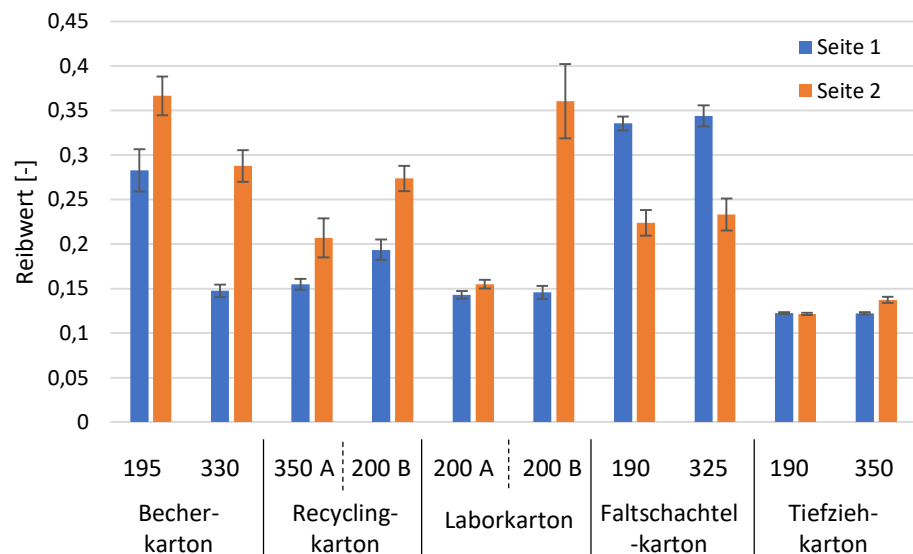


Abbildung 8-80: Vergleich der Reibwerte für beide Seiten der betrachteten Papiere; $n = 5$

Einfluss der Prozessgrößen Flächenpressung und Geschwindigkeit

Die Prüfgeschwindigkeit und Flächenpressung sind Prozessgrößen, die im Reibversuch in Anlehnung an die Bedingungen während der Umformung zu wählen sind. Die Einflüsse für ein beispielhaftes Papier sind in Abbildung 8-81 gezeigt. Hier zeigt sich, dass mit steigender Geschwindigkeit eine Zunahme des Reibwertes erfolgt. Auch bei einer erhöhten Flächenpressung zeigt sich eine Zunahme des Reibwertes.

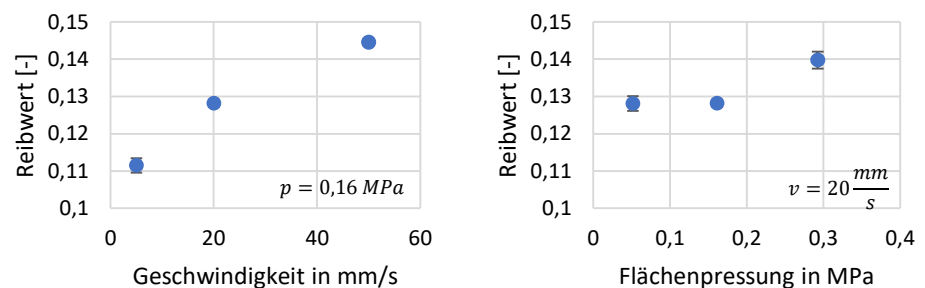


Abbildung 8-81: Einfluss der Prüfgeschwindigkeit und der Flächenpressung auf den Reibwert für ein Tiefziehpapier mit 190 g/m^2 ; $n = 5$

8.8 Reibversuche / Streifenzugversuch

Reibtester

Um die Phänomene des Tiefziehprozesses in seinen einzelnen Bereichen separat nachbildend zu können, wird an der TU Dresden ein speziell hierfür entwickelter Reibtester eingesetzt. Mit diesem können Vorgänge des Kompressionsziehen mit materialspezifischen Kennwerten unter prozessnahen Bedingungen verknüpft werden. Für dieses Projekt wurde der Gleitreibungskoeffizient bestimmt und die Faltenbildung in Blattebene ausgewertet.

Versuchsablauf Streifenzug- versuch

Die Herstellung von Formteilen mittels Kompressionstiefziehen wird von der Reibung zwischen Werkzeugen und Halbzeug bestimmt. Essentiell ist dabei der Gradient von der mitnehmenden Reibung zwischen Stempel und Karton zu der Gleitreibung zwischen Matrize und Karton. Mit dem Streifenzugversuch, mit dem in *Abbildung 8-82* dargestellten Aufbau im Kern, war es möglich mit einer abfallenden Normalkraft F_N und somit bei einem konstantem Druck p_N von 2 bar dynamische Reibkoeffizienten aller Versuchsmaterialien, bei einer prozessnahen Geschwindigkeit von p_N 10mm/s zu bestimmen.

Reibkoeffizient

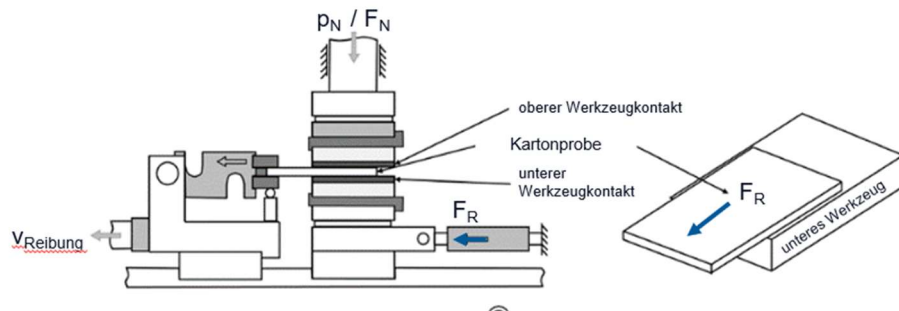


Abbildung 8-82: Streifenzugversuch

Oberhalb von 2 bar mehren sich bei einigen Materialien die schadhafte Proben, wie beim Kompressionsziehen von 3D-Körpern wenn Pressung, Reibung und Belastung die Grenzen des Materials übersteigen. Die Orthotropie spielt bei dieser Grenze eine Rolle, nicht jedoch der Reibwert, sodass hier ausschließlich in Maschinenrichtung gemessen wurde.

Reibwerte ver- schiedener Pa- piere

Aus Vorprojekten ist bekannt, dass neben der Werkzeugoberflächen die Temperatur einen weiteren starker Einfluss auf die Belastungsgrenzen im Tiefziehprozess hat. Als Versuchstemperaturen wurden zwei realitätsnahe Temperaturen gewählt. Die Raumtemperatur von etwa 23-25 °C und 100 °C. Als untere Grenze des Prozessfensters gilt erfahrungsgemäß 80 °C, was durch die Tiefzugsversuche aus Arbeitspaket 4 bestätigt wurde.

1.2379 bzw. X155CrVMo12-1 wurde als Werkzeugstahl der Gruppe Kaltarbeitsstahl als Werkzeugmaterial mit geringer Gleitreibung ausgewählt. Dieser Hochleistungsschnittstahl wird vorwiegend für Schnitt- und Stanzwerkzeuge verwendet, aber auch für Kunststoffformen oder Presswerkzeuge. Der Stahl besitzt eine sehr hohe Zähigkeit sowie sehr gute Verschleißfestigkeit, lässt sich sehr gut härten und ist daher sehr gut polierbar (feinpolierbar), wie die Werkzeuge hier auch zum Einsatz kamen.

In Abbildung 8-83 sind alle Reibkoeffizienten aus Versuchen mit diesem Werkzeug bei 25°C (blau) und 100°C (rot) dargestellt. Die besten Gleitreibungseigenschaften weist der speziell auf das Tiefziehen ausgelegte Karton in der Grammaturnatur 190 g/m² mit $\mu_{GR} \approx 0,1$ bei 25 °C und mit einem leicht besseren Wert bei 100 °C auf, siehe Abbildung 8-84. Bei den Laborkartonen zeigt sich der positive Einfluss von Temperatur durch die größte Reduktion des Reibkoeffizienten von $\mu_{GR} = 0,6 - 0,7$ runter auf $\mu_{GR} = 0,2 - 0,25$ besonders ausgeprägt, wie bei keinem anderen Versuchsmaterial. Bei drei Materialien besonders dem Becherkarton steigt der Reibkoeffizient mit erhöhter Temperatur mitunter sehr stark, entgegen den Erwartungen. Eine Erklärung konnte in diesem Projekt nicht gefunden werden. Der Laborkarton wiederum zeigt einen durch Temperatur besonders stark gesenkten Reibwert.

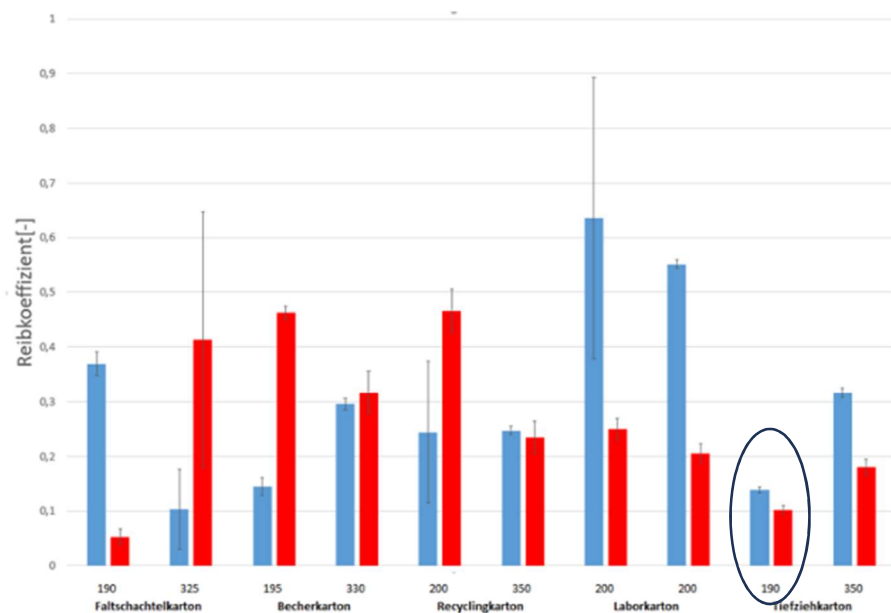


Abbildung 8-83: Dynamischer Reibkoeffizienten

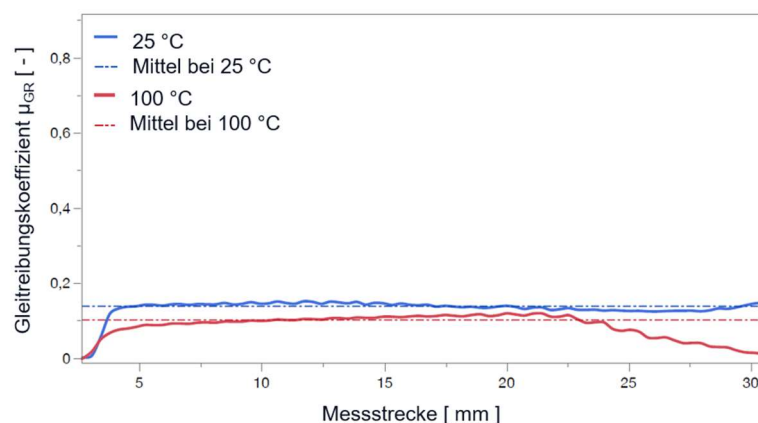


Abbildung 8-84: Gleitreibungskoeffizient Tiefziehkarton 190 g/m²

8.9 Zero Span Kompression / Reibtester

Versuchsablauf Reibtester

Zero Span Kompression

Um die Faltenbildung während dem Kompressionsziehprozess besser zu verstehen, wird an der TU Dresden der Zero Span Kompressionsversuch verwendet (Abbildung 8-85). In diesem Versuchsaufbau sollen Bedingungen des Kompressionstiefziehen ohne den geometrischen Einfluss von Tiefziehwerkzeugen nachgebildet werden. Hierfür wird eine rechteckige flache Probe zwischen einem oberen und unteren Werkzeug eingelegt, mit einem definierten Druck komprimiert und einer Klinge in Blattebene komprimiert. Ohne dass für die Kartonprobe die Möglichkeit besteht auszuweichen, entstehen in diesem Ersatzversuch vergleichbare Falten wie es unter dem Faltenhalter im hydraulischen Tiefziehversuchstand geschieht. Der maximale Druck p_N der Werkzeugeoberflächen gegen sich zwischen den Kontaktflächen aufbauende Falten ist begrenzt und somit die erreichbare Kompression für jedes Material charakteristisch. Entsprechend den Reibversuchen am gleichen Messstand wurde der Druck mit 2 bar, und die Geschwindigkeit auf 10 mm/s festgelegt. Die theoretisch maximale Kompression war auf 50% begrenzt, wurde aber nicht vor 2 bar Gegendruck erreicht.

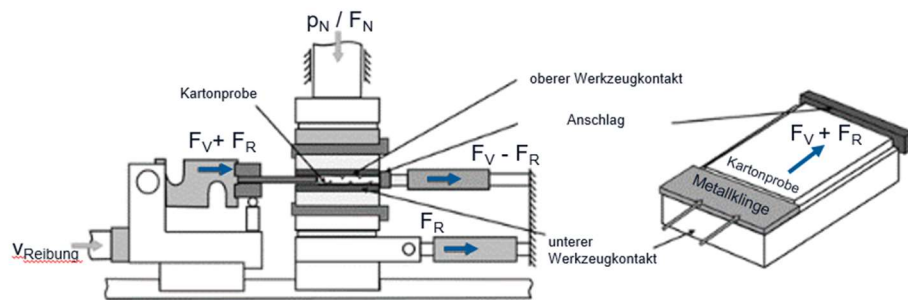


Abbildung 8-85: Zero Span Kompressionsversuch

Die Klinge in diesem Versuchsaufbau muss der Probe entsprechend eingesetzt werden und sollte 10% dünner gewählt werden. Eine Reibung zwischen Klinge und Werkzeug wird so verhindert, während die Klinge nicht zu weit in die Proben eindringt. Die Einkerbung, wie in *Abbildung 8-86* gezeigt, befindet sich im zulässigen Bereich. Auch schön erkennbar ist die Entstehung und Kompression von Falten mit Frequenz und Anzahl oder die Delaminierung im Knickbereich, eine Grundvoraussetzung geeigneter Materialien für den Tiefziehprozess.

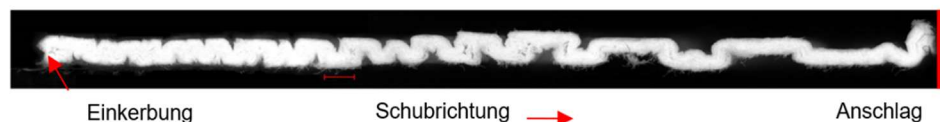


Abbildung 8-86: Schnitt einer Kompressionsprobe

In *Abbildung 8-87* ist eine Gesamtübersicht von resultierenden Kompressionsproben aller Materialien sowohl in MD als auch in CD zusammengestellt. Der Probenzuschnitt von anfänglichen 60 x 40 mm ist zur Veranschaulichung symbolisch dargestellt. Die Faltenauswertung erfolgte analog zu der Faltenauszählung in der Zarge, siehe AP 4 SH.

**Reibwerte ver-
schie-
dener Pa-
pierre**

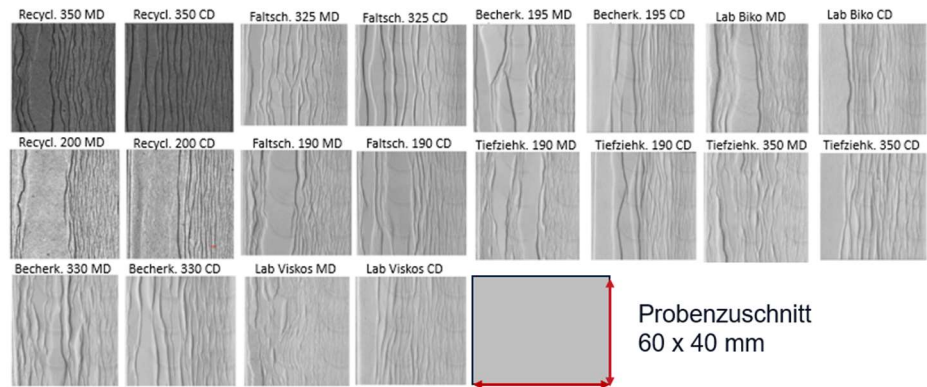


Abbildung 8-87: Übersicht Kompressionsproben

Viele Unterschiede und Gemeinsamkeiten lassen sich mit dieser Übersicht und der in Abbildung 8-88 dargestellten Faltenauswertung (hier die Anzahl) und der erreichten Kompression beschreiben. Die Kompression wurde direkt nach den Versuchen manuell gemessen, um die Relaxation zu minimieren und bezieht sich auf die Längenänderung zur kompletten Ausgangslänge der Probe von 60mm.

Über alle Proben und anhand der Messwerte ist zu erkennen, dass die Kompression in MD größer ist. Nach dem Faltenbild ist die Kompression in CD besser oder gleichmäßiger verteilt, besonders gut bei Recyclingkarton zu erkennen, auch wenn sich weniger Falten mit entsprechend mehr Abstand bilden. Schlecht stellen sich hier besonders der Faltschachtel- und Becherkarton dar, wie es aber nach den Tiefungsversuche zu erwarten war. Die Faltenzahl verhält sich wieder mit Ausnahme des Becherkartons analog und ist in MD größer. Im Vergleich von Kompression und Faltenanzahl ist der Faltschachtelkarton besonders auffällig, da er bei einer hohen Faltenanzahl eine vergleichbar geringe Kompressionsrate zulässt.

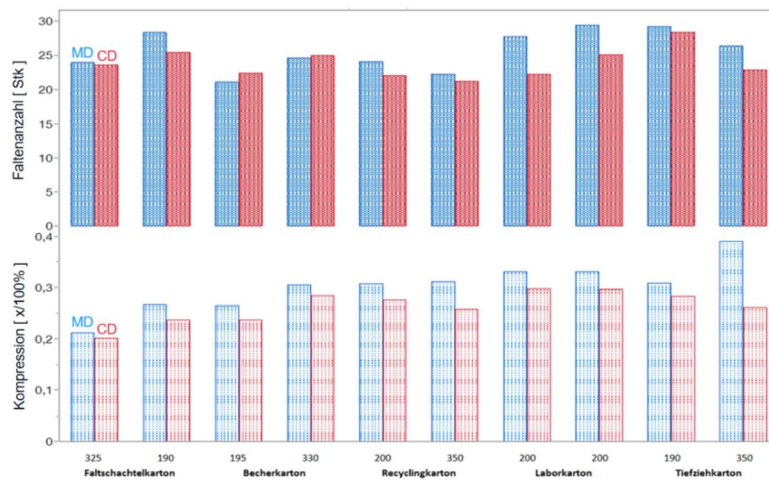


Abbildung 8-88: Übersicht Kompressionsergebnisse

Von besonderem Interesse werden nun diese augenscheinlichen Zusammenhänge für die Korrelation.

8.10 Verhalten unter Kompression

Optische Erfassung

Ziel der Untersuchungen war es, das Kompressionsverhalten nach Anlegen an die Matrize bei der wirkmedienbasierten Umformung zu erfassen. Hierbei sollten eine Dickenveränderung und potenzielle Faserschädigung erfasst werden. Die in der wirkmedienbasierten Umformung verwendeten Drücke liegen im Bereich bis 6 bar, sodass bei Anlegen eine maximale Flächenpressung an der Matrize von 0,6 MPa wirkt.

Zur Untersuchung der Kompression wurde eine Form, die einen Ausschnitt aus einem Kugelsegment darstellt, verwendet. Die wirkmedienbasierte Umformung der Probekörper wurde mit hoher Niederhalterkraft durchgeführt, sodass der Materialnachfluss unterbunden ist. Zur Formfüllung ist eine Dehnbarkeit von 1 % nötig, sodass diese für alle verwendeten Papiere nutzbar ist (Abbildung 8-77). Ab einem gewissen Umformdruck liegt die Papierprobe an der Form an und wird durch eine weitere Steigerung des Druckes an die Matrize gepresst. Zur Untersuchung der Dickenänderung wurden jeweils Druckniveaus von 0 bar bis 6 bar mit einem Inkrement von 0,5 bar betrachtet. Die Dickenmessungen wurden mit einem Mikrometer mit Belastungsgewicht nach ISO 534 (wirkender Druck von 100 kPa auf 2 cm²) durchgeführt.

Hierbei hat sich gezeigt, dass die Dickenänderungen bei den im Prozess erreichbaren Flächenpressungen der umgeformten Bereiche (weiße Strichpunkt-Linie) materialabhängig sind, siehe Abbildung 8-89. So erlauben die Messunsicherheiten im Fall des Faltschachtelkartons keine eindeutige Aussage zu einer Tendenz. Für den Tiefziehkarton zeigt sich zunächst eine Zunahme der Materialdicke um etwa 5 µm bei 2 bar. Ähnliche Beobachtungen der Materialaufdickung in Zugversuchen nach [Stenberg 2002] legen nahe, dass im Druckbereich bis 2 bar noch freie Umformung stattfindet. Nach dem Anlegen der Ronde an die Matrize bleibt die Materialdicke konstant. Eine Kompression nach Anlegen ist bei den prozesstypischen Flächenpressungen mit dieser Vorgehensweise nicht detektierbar.

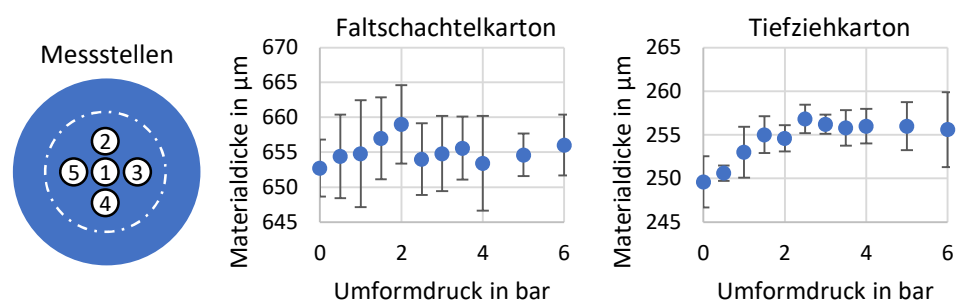


Abbildung 8-89: Dickenveränderung nach Anlegen an die Matrize in der wirkmedienbasierten Umformung; n = 5

Auch eine mikroskopische Betrachtung der Schnittkante der Messstellen aus Abbildung 8-89 zeigt keine ersichtliche Änderung. Eine optische Vermessung der Materialdicke obliegt aufgrund der notwendigen manuellen Definition der Kanten starken Unsicherheiten. Es zeigen sich keine sichtbaren Faserschädigungen.

Dickenmessung nach Kompression

Ergänzend zur Untersuchung der Dickenveränderungen nach Anliegen an die Matrize wurden Dickenmessungen mit deutlich höheren Flächenpressungen durchgeführt. Hierzu wurde eine Flächenpressung von 50 MPa gewählt, da diese zu einer messbaren Kompression für alle Papiere führt und die Messunsicherheiten gegenüber den auftretenden Kompressionen vernachlässigbar werden.

Die erreichte Kompression wurde direkt nach Entlastung mit einem Dickenmesser bestimmt. Zusätzlich wurden die Proben nach 24 Stunden erneut vermessen. Die Kompression wird anhand des Quotienten aus Dickenreduktion nach Belastung und der Ausgangsdicke bestimmt und ist für die Papiere in Abbildung 8-90 dargestellt.

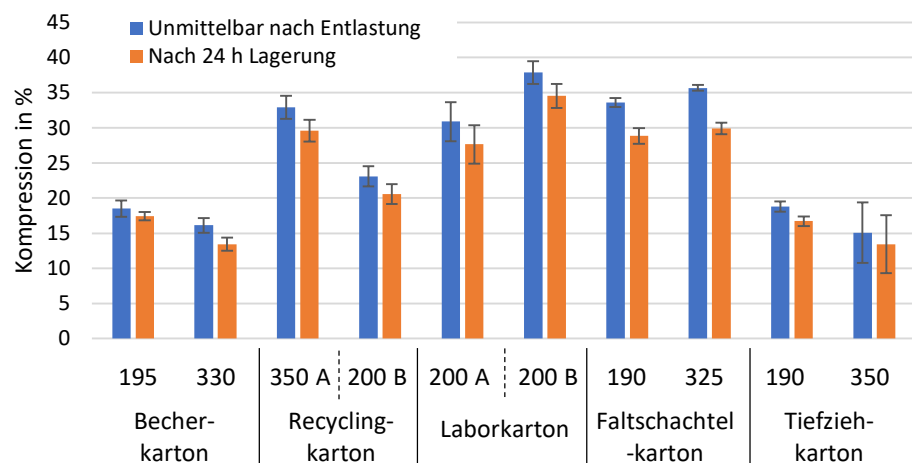


Abbildung 8-90: Kompression der Papiere direkt nach Belastung mit 50 MPa und nach 24 h Lagerung; $n = 5$

Die dabei festgestellte Kompression fällt stark unterschiedlich für die betrachteten Papiere aus und zeigt einen Zusammenhang zu den an der PTS durchgeführten Bestimmungen der spezifischen Dichte (siehe Abschnitt 8.11).

8.11 Out of Plane Kompression

Erfassung

Zur Untersuchung der Out-of-plane-Kompressionsdehnung wurde ein Experiment entwickelt, das über eine Bestimmung von elastischer und plastischer Verformung des Materials Rückschlüsse über die relative Dichte sowie das Porenvolumen zulässt.

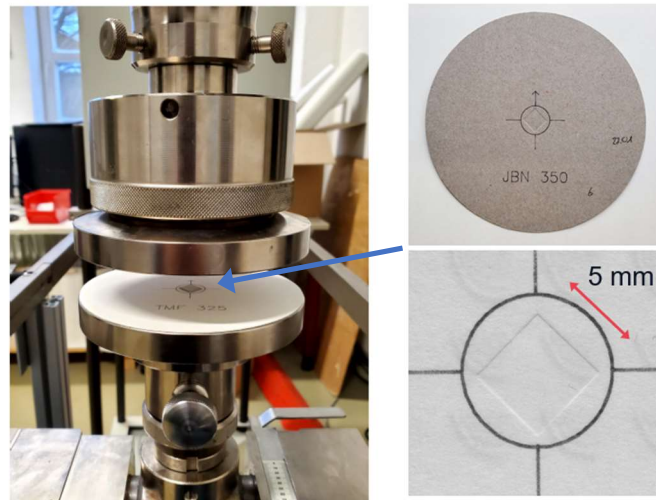


Abbildung 8-91: Kompressionsversuch / Kompressionsabdruck

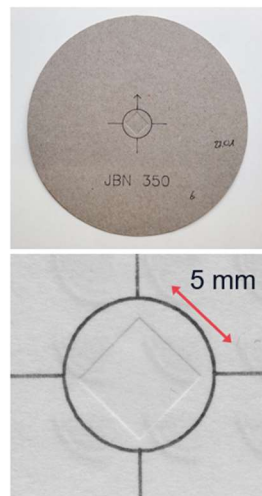


Abbildung 8-91

Abbildung 8-91 zeigt links den Versuchsaufbau in der verwendeten Universalprüfmaschine des Herstellers Zwick/Roell, hier mit einer Kraftmessdose mit dem Maximum von 20kN. In diesem Aufbau wird ein 5 x 5 mm oder 100 mm² großes Metallplättchen in eine wesentlich größere Ronde, Bild rechts oben, mit definierter Kraft von 5000N mit 1 mm/min linear steigend eingepresst und der um die Messvorrichtungsverformung korrigierte Traversenweg aufgezeichnet. Nach einer elastischen Erholung von etwa 2 Tagen wurde die Dicke der Proben manuell bestimmt um den elastischen bzw. plastischen Anteil der Kompression zu isolieren.

Dickenmessung
Ergebnisse
Kompression

Bei den Einstellungen ist zu erwarten, dass sich die Kompression bereits im plastischen Bereich befindet. Alexey Vishtal 2014 hat in einer früheren Studie einen Zusammenhang zwischen der wiederherstellbaren elastischen Verformung und dem Abstand zwischen Falten beobachtet. Als Erklärung findet er eine in dem Prozess durch den Faltenhalter eingebrachte Vorverdichtung des Materials, die ein Material mit einem höheren spezifischen Volumen liefert, wie auch von [Franke und Groche 2023] beschrieben wurde. Wesentlichen Einfluss auf das Verhalten beim Kompressionstiefziehen haben auch die Porenräume da mehr Ausweichkapazität verfügbar ist um Verformungen im Material auszugleichen.

Die Abbildung 8-92 umfasst diese Messungen. Die verbleibende Verformung nach langer Wegnahme der Druckkraft und die maximal erreichte Verformung durch 5kN nach dem Maschinenweg. Beide Messungen sind für die verschiedenen Probenmaterialien nebeneinander dargestellt.

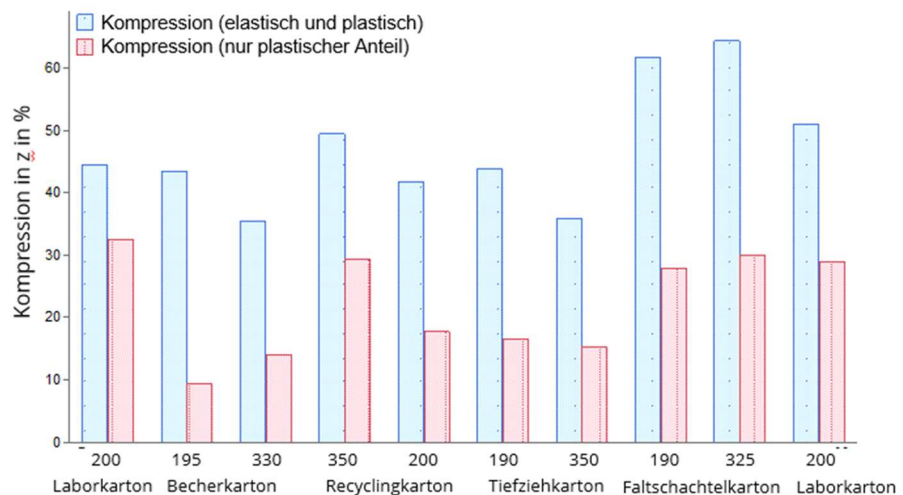


Abbildung 8-92: Ergebnisse der Kompressionsversuche

Bei Materialien mit geringer Kompression kann davon ausgegangen werden, dass diese bereits herstellungsbedingt eine hohe Dichte in z-Richtung aufweisen und sich eine negative Korrelation mit den Umformparametern zeigt.

Dahingegen positiv korrelieren kann die plastische Verformung mit einem höheren anfänglichen Porenvolumen.

Die Annahme, dass die Dicken-Kompressibilität von Pappe direkt mit dem Porenvolumen und der relativen Dichte in Zusammenhang gebracht werden kann geht aus Ergebnissen von [Stein 2019] oder [Franke und Groche 2023] hervor. Sie bestätigen in ihren Ergebnissen, dass die Hohlräume (Poren) mit fester Fasermasse bei der Kompression außerhalb der Ebene gefüllt werden, was dann zu einer erhöhten Dehnbarkeit im Tiefziehvorgang führt, denn die positiven Effekte einer größeren Dehnbarkeit treten erst dann auf, wenn sie vor dem Tiefziehen erfolgen. Da das Material durch den Prozess in Dickenrichtung komprimiert wurde, können wir vermuten das Materialien mit höherer relativer Dichte zu besserer Umformbarkeit führt.

9 Korrelationsanalyse und Validierung (AP 8, 9)

Allgemeines

Die Korrelationsanalyse diente zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen den festgelegten Prüfverfahren und ihren Messergebnissen mit den ermittelten Umformergebnissen bzw. den hierzu ermittelten Qualitätskenngrößen. Diese unterschieden sich für die im Projekt betrachteten Verfahrensvarianten Pressformen, Ziehen und Hydroformen teilweise. Die Korrelationsanalyse erfolgt auf der Basis multipler Regressionsmodelle für die Qualitätskenngrößen. Hierbei werden lineare Einflüsse einbezogen und durch Einbeziehung bzw. ggf. Ausgliederung von Einflussgrößen die Güte der Modelle optimiert.

Ziel der Korrelationsanalyse durch multivariate Datenanalyse war es, die erforderlichen charakteristischen Materialkenngrößen derart zu reduzieren, dass die Handhabung der Menge und Konfiguration der Prüfmethode im industriellen Kontext gelingt. Es war darüber hinaus vorgesehen, das ermittelte Modell für Materialkenngrößen mit bestehenden Modellen zu Einflussgrößen der Maschine zu koppeln. Aufgrund der hohen Komplexität an Beanspruchungen im Prozess und deren vielzähligen Wechselwirkungen war zudem der Einsatz Künstlicher Neuronaler Netzwerke (KNN) umgesetzt, um über das Verständnis der Zusammenhänge, welches durch die Regressionsmodelle erarbeitet wird hinaus die Vorhersagegenauigkeit des Gesamtmodells zu optimieren. Hierbei dienten wiederum die Ergebnisse der durchgeführten Prüfverfahren als Eingangsparameter für das Künstliche Neuronale Netz. Zwischen Ihnen und den definierten Qualitätsparametern wurde ein Zusammenhang mittels der KNN gesucht und der Einfluss der einzelnen Eingangsgrößen bestimmt.

Ziel

Ziel der Korrelationsanalysen war die Identifikation der wichtigsten Ersatzversuche für die verschiedenen Umformverfahrensvarianten und somit die Möglichkeit einer Minimierung der Anzahl der benötigten Prüfverfahren sowie die Identifikation von Schnittmengen mit gleichgerichteter Aussagekraft für beide Verfahrensvarianten. Dieser Prozess war als rekursiv anzusehen und musste bei jeder Verringerung der benötigten Prüfverfahren validiert werden. Es erfolgte eine detaillierte Analyse der Modell- und Vorhersagegüte und gemeinsam mit dem PA eine Einschätzung der Aussagefähigkeit bzw. des Nutzens für die Industrie.

9.1 Korrelationsanalyse mittels multipler Regressionsmodelle

9.1.1 Grundlagen multipler Regression und Korrelationsanalyse

Methode

Korrelationsanalyse

Eine Korrelationsanalyse liefert Zusammenhänge von Eingangsgrößen inklusive einer Gewichtung und der Abhängigkeit. Die Korrelation erfolgt ungerichtet, d.h. sie beschreibt keine Ursache-/Wirkung-Beziehung und geht davon aus, dass sich Eingangsgrößen nicht beeinflussen. Sie dient daher nur der Sichtung von großen Datenmengen und Identifizierung von ausschließlich linearen Zusammenhängen. Besonders übersichtlich darstellen lässt sich die Analyse in einer Datenmatrix (Heatmap) mit einem Farbcodiersystem. Ab zwei quantitativen Merkmalen empfiehlt sich der dimensionslose Korrelationskoeffizient nach Pearson als Maß für den Grad linearer Zusammenhänge. Die dimensionslosen Werte von 1 und -1 bedeuten einen vollständig linearen Zusammenhang zwischen den betrachteten Merkmalen. Positiv korrelieren die Merkmale in die gleiche Richtung, während negative Werte eine entgegengesetzte Entwicklung bedeuten. Weisen die Merkmale einen Korrelationskoeffizient von 0 auf, ist keine lineare Abhängigkeit vorhanden.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Gleichung 9-1: Pearson Korrelation

Die Summe im Zähler wird als Kovarianz bezeichnet, sie bestimmt das Vorzeichen des Korrelationskoeffizienten. Durch die Division mit der Standardabweichung für beide Achsen wird der Wert normiert. Der Betrag wiederum gibt die Stärke der Korrelation zweier Merkmale nach Tabelle 9-8 wieder.

Tabelle 9-8: Korrelationskoeffizienten

Sehr Niedrig	$0 < r < 0,2$
Niedrig	$0,2 < r < 0,5$
Mittel	$0,5 < r < 0,7$
Hoch	$0,7 < r < 0,9$
Sehr Hoch	$0,9 < r < 1$

Regressions-analyse

Die Regressionsanalyse baut auf die Korrelationsanalyse auf. Plausible Zusammenhänge mit einer hohen ungerichteten Korrelation werden für die genaue Betrachtung durch eine Regressionsanalyse ausgewählt. Für eine Regression anders als bei der Korrelation wird vorausgesetzt, dass es einen gerichteten linearen Zusammenhang, hier idealerweise von einem Materialkennwert zu einem Qualitätskennwert gibt, das heißt, es existieren eine abhängige Variable und eine unabhängige Variable. Ein gängiger Ansatz ist es, in einer Datenwolke eine Regressionslinie einzufügen, bei welcher der Abweichungsfehler zu den Messpunkten minimiert ist. Das Bestimmtheitsmaß R^2 zeigt für diese Daten, wie gut die Regressionslinie zu den Parametern der Datenwolke passt und sich einer angenommenen wahren Gerade annähert. Die Gesamtvarianz (sum of square total / SST) ergibt sich aus der Summe der erklärten Abweichungen (sum of square explained / SSE) und der unerklärten Abweichung (sum of square residual). Das Bestimmtheitsmaß ergibt sich nun aus dem Quotienten der Summen von erklärbarer zu gesamter Abweichung aller Datenpunkte (Abbildung 9-93, Gleichungen 11-2 und 11-3).

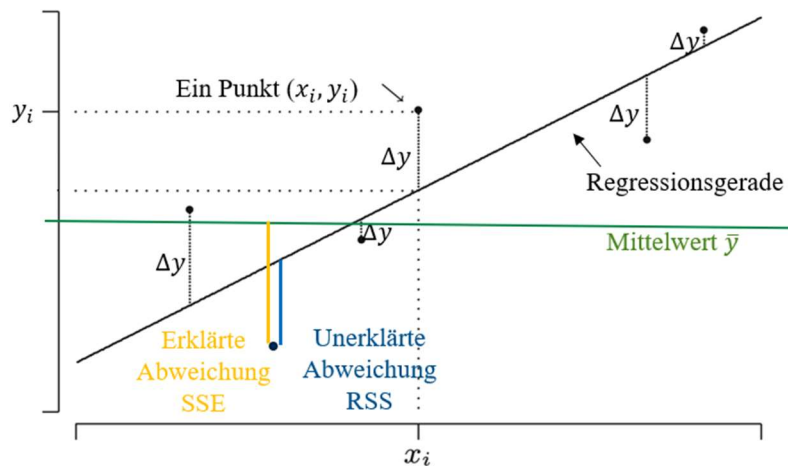


Abbildung 9-93: Herleitung einer Regressionsgerade

$$SST = SSE + SSR(RSS)$$

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Gleichung 9-2: Abweichungsanteile

$$R^2 = \frac{SSE \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{SST \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Gleichung 9-3: Bestimmtheitsmaß (R^2)

9.1.2 Korrelationen im Tiefziehen (SH)

Datensichtung Datenreduktion

Als erster Schritt der Datenanalyse wurden die verfügbaren Messdaten in einer Heatmap gegenübergestellt. Diese erleichtert die Sichtung relevanter Beziehungen durch eine Farbskala und ermöglicht, aus den 59 Messwerten und 20 Qualitätsparametern geeignete Größen zu identifizieren.

Die Korrelationen werden durch eine geeignete Farbskala dargestellt, in diesem Fall als Graustufenspektrum gewählt, durch dunkle Töne, die eine hohe Korrelation implizieren und durch hellere Töne bis Weiß die keine Korrelation bedeuten.

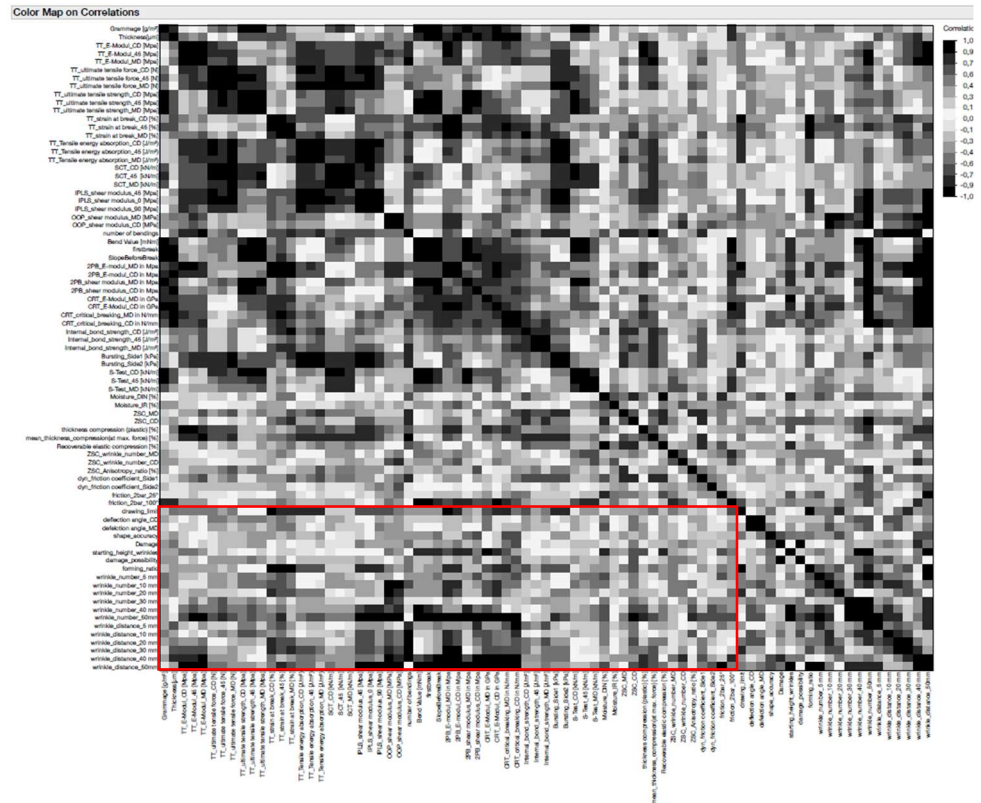


Abbildung 9-94: Korrelationsmatrix; relevanter Bereich rot umrandet

Durch die gewählte Farbskala ist in der kompletten Matrix die Darstellung an der Diagonalen gespiegelt, da alle ermittelten Werte auf beiden Achsen aufgetragen wurden und die Diagonale somit die Korrelation von Größen zu sich selbst ist. Von Interesse sind Korrelationen, nicht deren Richtung, sodass sowohl entgegengesetzte als auch gleich gerichtete Beziehungen durch stärker werdende Grautöne hervorstechen.

In den Zeilen sind Qualitätsparameter den Materialkennwerten in den Spalten gegenübergestellt. Die gespiegelte Seite von der Diagonalen aus kann ignoriert werden. Nur in dem in Abbildung 9-94 rot umrandeten Bereich werden Qualitätsparameter sinnvoll Materialparametern gegenübergestellt. In diesem Bereich werden Beziehungen mit einer Korrelation über 0,6 genauer betrachtet.

Elastizitätsmodul Qualitätsparameter Der Elastizitätsmodul wurde mit drei verschiedenen Methoden bestimmt. Für alle wurde eine mittlere bis hohe Korrelationen zu unterschiedlichen Qualitätsparametern nachgewiesen.

Elastizitätsmodul Zugversuch nach ISO 1924-2 Die klassische Bestimmung des Elastizitätsmoduls mit dem Zugversuch nach ISO 1924-2 zeigt zu dem Faltenabstand bei 40 mm Zargenhöhe die beste lineare Korrelation. In Abbildung 9-95 ist die Korrelation in die drei untersuchten Probenrichtungen dargestellt. Besonders ausgeprägt mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,739$ ist der Zusammenhang in Maschinenrichtung (MD). Eine höhere Elastizität im Material korreliert als Schlussfolgerung mit einer Abnahme des Abstandes zwischen den Falten und erzeugt damit eine bessere visuelle Gesamtqualität des geformten Körpers.

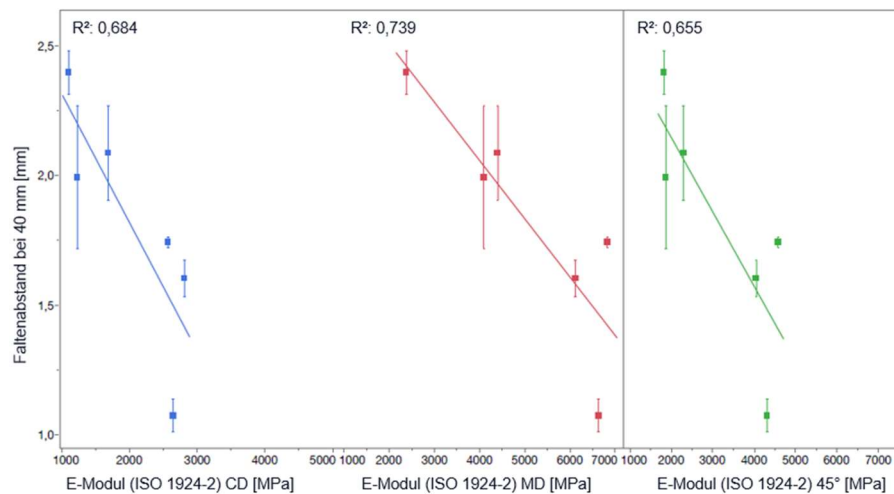


Abbildung 9-95: Zusammenhang zwischen Faltenabstand bei 40 mm und E-Modul nach ISO 1924-2

Der deutliche Ausreißer bei allen drei Probenrichtungen entsteht bei dem gleichen Material, das bei dem Erkennungsalgorithmus einen Fehler durch zu feine Falten erzeugt. Eine separate manuelle Kontrollzählung hat dies bestätigt, wurde aber nicht für alle Materialien durchgeführt und nicht abgeändert.

**Elastizitätsmodul
Curvature
Resistance Test
(CRT)**

Der Curvature Resistance Test (CRT) der PTS stellt eine weitere und besondere Methode zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Berücksichtigung der Kraftverteilung im Material dar. Während die ermittelten Werte denen ziemlich ähnlich sind, die mit dem Zwei-Punkt-System ermittelt werden, sollten sie nicht verglichen werden. Besonders auffällig sind die größeren Abweichungen der einzelnen Messungen durch die schwierige Kalibrierung des Prüfgerätes und Probleme in der Steuerung.

Eine negative Korrelation zwischen der Ausgangshöhe der Falten und dem Elastizitätsmodul impliziert einen früheren Beginn der Faltenbildung während des Kompressionstiefziehens. Die Versuchsmaterialien mit geringerer Elastizität zeigen eine Tendenz zur späteren Faltenbildung mit allgemeinen Ausgangshöhen zwischen 3 und 5 mm, während bei Materialien mit höherer Elastizität die Faltenbildung zwischen 1,9 und 2,6 mm einsetzt.

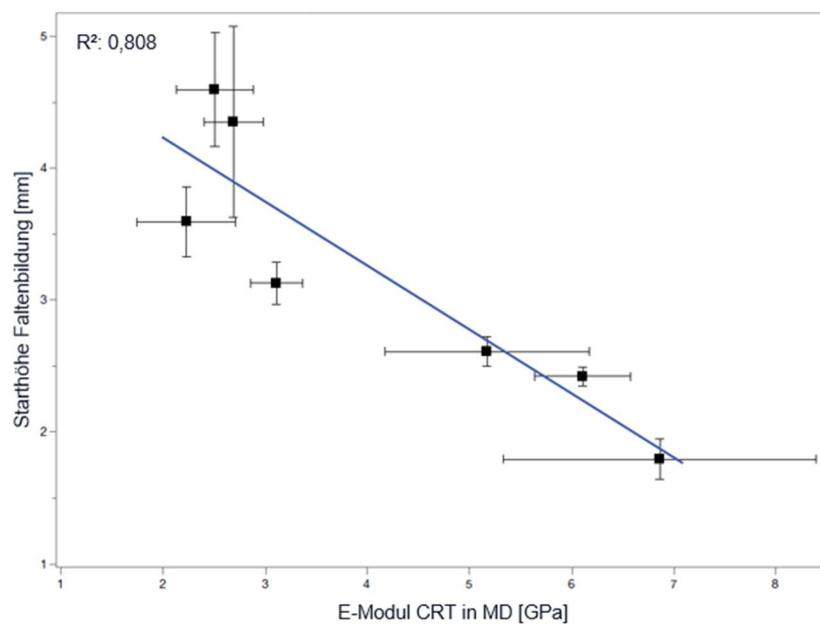


Abbildung 9-96: Zusammenhang zwischen der maximalen Starthöhe und dem E-Modul aus dem CR-Test in MD

Elastizitätsmodul Zwei-Punkt Bie- gung (2-PB)

Der Elastizitätsmodul kann auch durch den Zwei-Punkt-Biegeversuch nach ISO 5628 bestimmt werden. Diese Messwerte für den E-Modul sind nicht mit den Messwerten des E-Moduls aus dem Zugversuch nach ISO-1924-2 vergleichbar, da die Last in der Dicke anders als zur Längsbelastung während des Zugversuchs wirkt. Ein Zusammenhang zwischen einer Erhöhung der Elastizität von MD und CD und der maximalen Ziehgrenze der Formteile kann in den Abbildungen Abbildung 9-96, Abbildung 9-97 und Abbildung 9-98 beobachtet werden. Der Zusammenhang zu der Elastizität in MD ist etwas höher, aber auch die Standardabweichung der Messwerte.

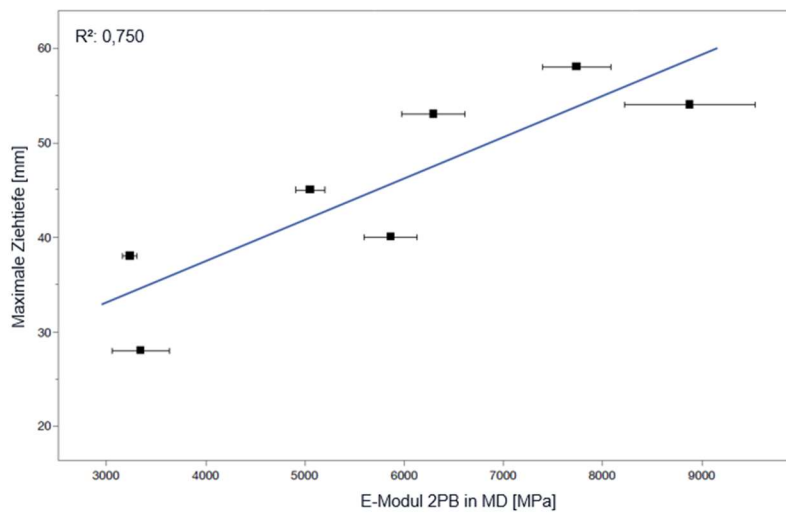


Abbildung 9-97: Zusammenhang der Maximalen Ziehtiefe und dem E-Modul aus dem 2PB-Versuch in MD

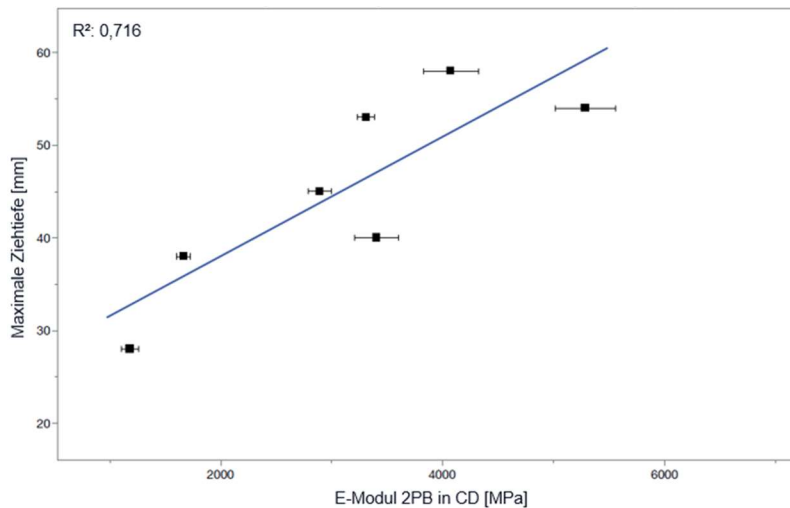


Abbildung 9-98: Zusammenhang der Maximalen Ziehtiefe und dem E-Modul aus dem 2PB-Versuch in CD

Reduktion der Materialparameter
E-Modul

Als weiteres Ziel für die praktische Anwendung der Erkenntnisse dieses Projekts soll eine Korrelation der Materialparameter zur Reduktion notwendiger Prüfmethode genutzt werden. Das Elastizitätsmodul wurde über drei verschiedene Ansätze mit am häufigsten in dem Projekt bestimmt. In Abbildung 9-99 wurden die Elastizitätsmoduln aus den drei Versuchen: Zugprüfung (Tensile Test), Krümmungswiderstand (CRT) sowie Zwei-Punkt-Biegung (2-PB) in Querrichtung (CD) und in Abbildung 9-100 in Maschinenrichtung (MD) gegenübergestellt.

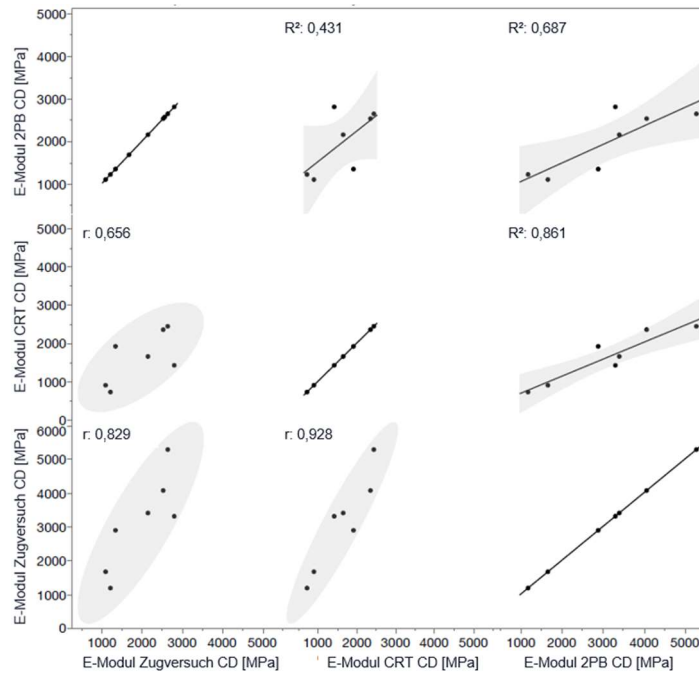


Abbildung 9-99: Elastizitätsmoduln CD

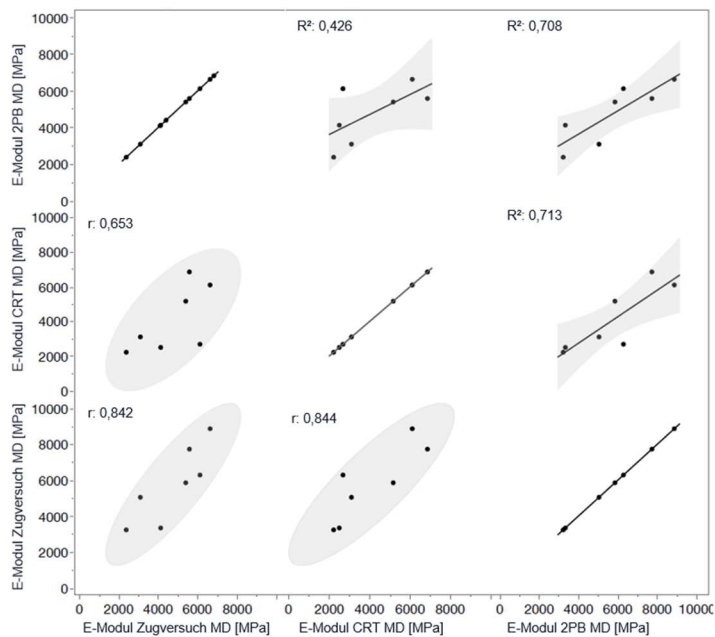


Abbildung 9-100: Elastizitätsmoduln MD

Der CRT-Test und der 2-PB-Versuch zeigen eine hohe Korrelation (r) von 0,8 bis 0,9 in CD wie in MD. Zwischen dem 2-PB-Versuch und dem Zugversuch liegt die Korrelation mit 0,8 vergleichbar hoch. Einzig zwischen dem Elastizitätsmodul aus dem CRT-Test und dem Zugversuch ist keine deutliche Korrelation festzustellen. Auch das Bestimmtheitsmaß (R^2) der linearen Regression liegt mit 0,4 unter der geforderten Güte um eine Abhängigkeit von CRT-Test und Zugversuch annehmen zu dürfen.

Betrachtet man die anderen R^2 -Werte in dem Diagramm kann durch den hohen r -Wert, den sowohl der CRT-Test als auch der Zugversuch zum 2-PB-Versuch zeigen, der 2-PB-Versuch ohne Informationsverlust durch einen der anderen Versuche ersetzt werden.

Bruchdehnung Qualitäts- parameter

Die Bruchdehnung wird in einigen Studien als wichtiger Faktor für die Umformbarkeit von Papier angesehen, aber auch für unbedeutend erklärt, wenn es wie in diesem Projekt um das Tiefziehen mit Materialnachfluss geht. Bei anderen Materialien, insbesondere Metall und Kunststoffen, sind klare Versagensmuster oder Bruchstellen reproduzierbar. Bei Naturfasermaterialien ist eine klare Versagensstelle, selbst bei überschritten gemessenen Bruchdehnungen nicht immer klar zu identifizieren.

Die Bruchdehnung in Maschinen- wie in Querrichtung und im 45° Winkel zur Maschinenlaufrichtung wurde wegen erwähnter Bedeutung in den Materialwissenschaften gründlich auf Korrelationen untersucht.

Der r -Wert nach Pearson deutete auf eine hohe Korrelation zwischen der Bruchdehnung und dem Faltenabstand bei 20 und 30 mm hin. Bei näherer Betrachtung der linearen Regression konnte aber keine statistisch signifikante Korrelation zwischen der Bruchdehnung in MD und 45° festgestellt werden, das Bestimmtheitsmaß liegt von 0,45 - 0,55 unter der Grenze hierfür. Wie in der Abbildung 9-101 und Abbildung 9-102 zu sehen ist, konnte in Querrichtung zum Maschinenlauf mit $R^2 = 0,544$ und 0,728 eine Korrelation gezeigt werden. Eine sinkende Faltdistanz mit Zunahme der Bruchdehnung nur in Querrichtung als zuverlässige Vorhersage der Umformbarkeit bei Naturfasern ist nicht verlässlich.

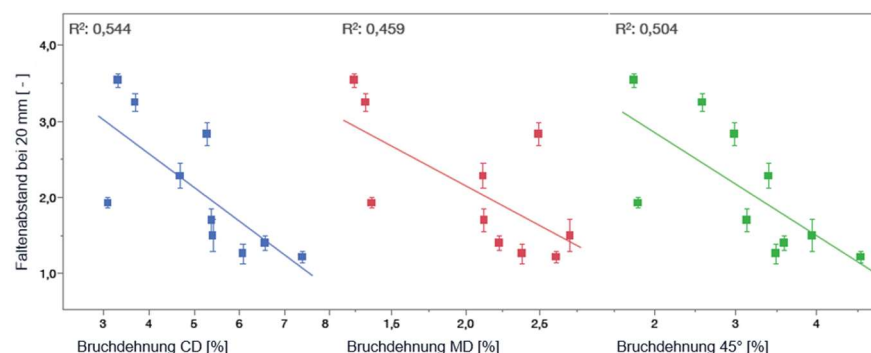


Abbildung 9-101: Korrelation des Faltenabstandes bei 20 mm und der Bruchdehnung CD MD und 45°

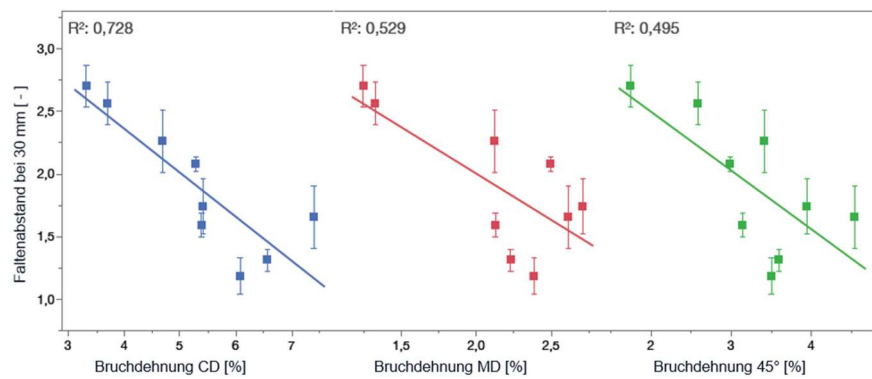


Abbildung 9-102: Korrelation des Faltenabstandes bei 30 mm und der Bruchdehnung CD MD und 45°

Wird die Bruchdehnung jedoch mit der maximalen Ziehgrenze verglichen, zeigt sich ein klarerer Zusammenhang auch für MD und 45° (Abbildung 9-103). Der Umformgrad, definiert als die Ziehhöhe im Verhältnis zum Bodendurchmesser, verstärkt durch eine gute Korrelation zur Bruchdehnung, (Abbildung 9-104) die Annahme weiter, hier einen starken Zusammenhang zwischen Umformbarkeit und Materialkennwerten nachgewiesen zu haben.

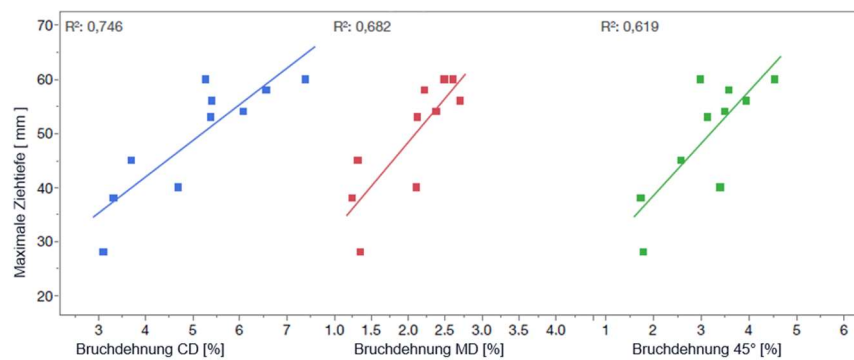


Abbildung 9-103: Korrelation der maximalen Ziehtiefe und der Bruchdehnung CD MD und 45°

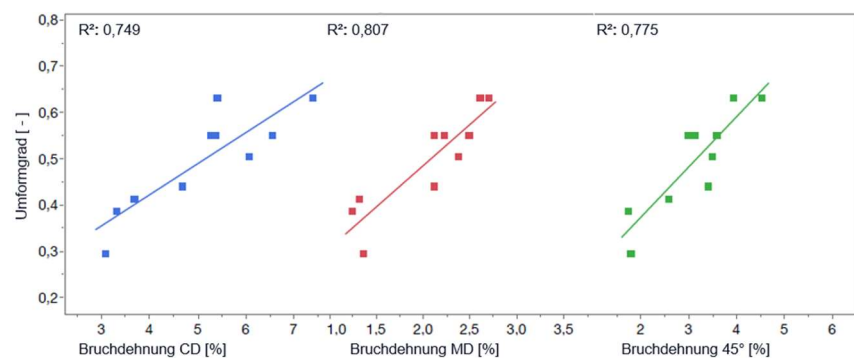


Abbildung 9-104: Korrelation des Umformgrades und der Bruchdehnung CD MD und 45°

Out of Plane Schubmodul Faltenbildung

Der Out-of-Plane-Schubmodul (OOP) wurde ebenfalls mit drei Experimenten vergleichbar häufig untersucht. Aus dem Zwei-Punkt Biegeversuch bestimmt korreliert der Schubmodul nach der Korrelationsmatrix gut mit der Starthöhe der Faltenbildung, da diese Starthöhe bekanntermaßen durch Kompensation aus/in der Materialreserve verzögert wird. Betrachtet man hingegen Abbildung 9-105 zeigt sich mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,683$ eine Wolkenbildung in zwei Bereichen, wodurch keine gesicherte Aussage möglich ist, auch wenn die Tendenz plausibel ist.

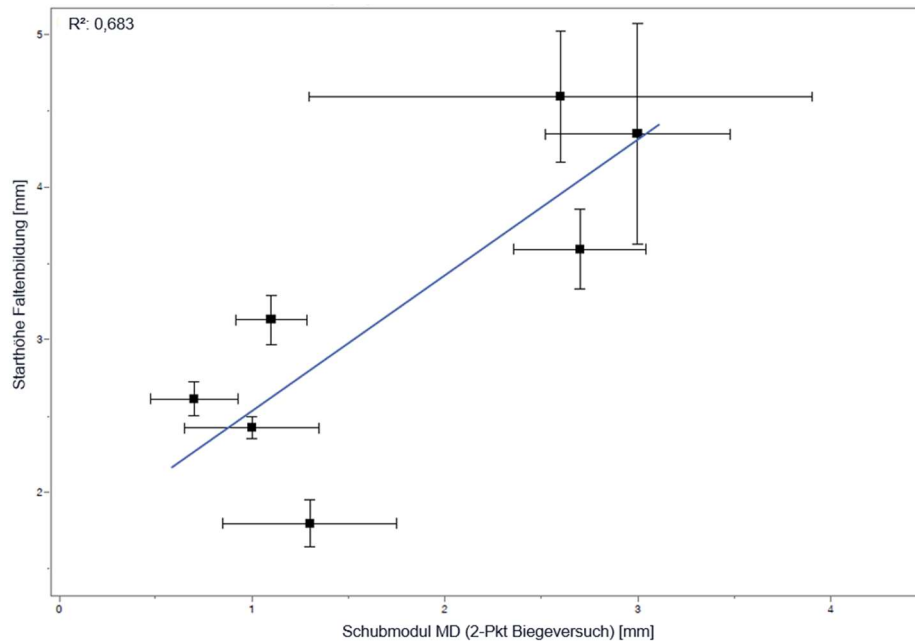


Abbildung 9-105: Korrelation von Starthöhe der Faltenbildung zu Schubmodul

Ein verwandter Qualitätsparameter, die durchschnittliche Faltenzahl, zeigt zum Schubmodul in CD und MD, der durch den Out-of-Plane-Scherversuch bestimmt wurde, signifikante Korrelationen. In Abbildung 9-106 wurde die Faltenanzahl bei 10 mm und Abbildung 9-107 bei 20 mm Zargenhöhe in Korrelation zu Schubmodul dargestellt.

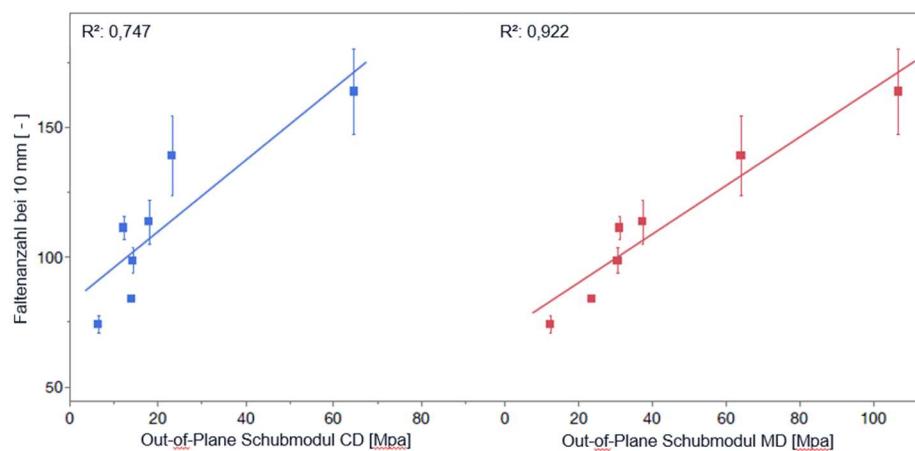


Abbildung 9-106: Korrelation von Faltenanzahl (10 mm) zum Schubmodul

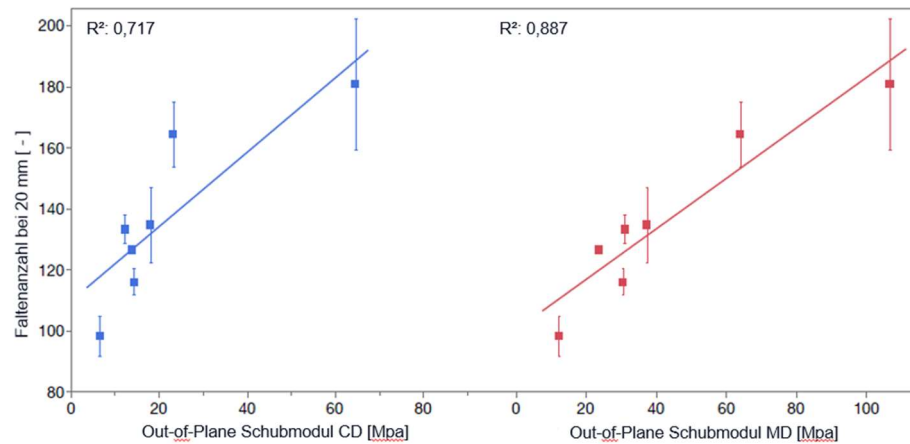


Abbildung 9-107: Korrelation von Faltenanzahl (20 mm) zum Schubmodul

Eine lineare Regression lieferte das beste Bestimmtheitsmaß R^2 für den Out-of-Plane-Schubmodul in Maschinenrichtung (MD) mit 0,92 und 0,89 für die Faltenzahl bei 10 mm bzw. 20 mm Becherhöhe. Die Werte in Querrichtung (CD) lagen mit 0,75 und 0,72 nur etwas darunter. Mit der Faltenanzahl steigt die optische Qualität durch eine feinere und gleichmäßigere Verteilung die plausibel mit dem OOP-Schubmodul korreliert. Dieser Materialkennwert kann für die Vorhersage von qualitativen Formteilen verwendet werden.

Biege­wider­stand Starthöhe Faltenbildung

Ein vergleichbares Bild mit zwei Messwolken liefert die Korrelation der Starthöhe der Falten zu dem aus dem Krümmungswiderstandstest (Curvature Resistance Test oder CRT-Test) bestimmtem Biegemoment. Das Bestimmtheitsmaß mit $R^2 = 0,714$ ist vergleichbar, siehe Abbildung 9-108 im Vergleich zu Abbildung 9-105.

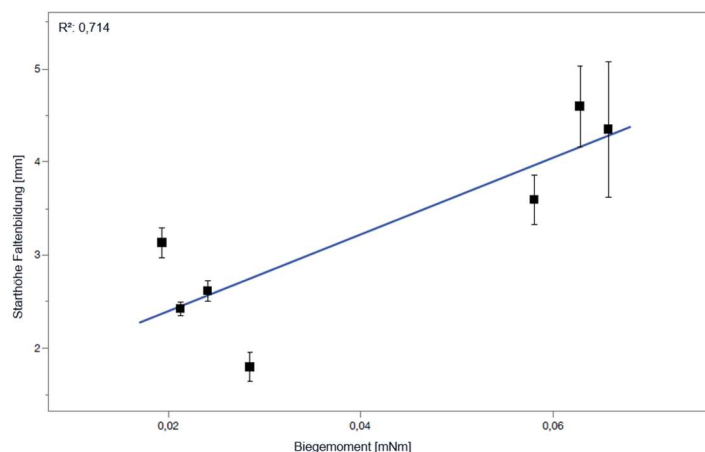


Abbildung 9-108: Korrelation Starthöhe Faltenbildung zu Biegemoment

Der Vergleich des Korrelationskoeffizienten zwischen dem Schubmodul, dem Biegemoment und der Starthöhe der Faltenbildung zeigt wie in Abbildung 9-109 zu sehen, eine Korrelation von nahezu 1 zwischen beiden mechanischen Parametern.

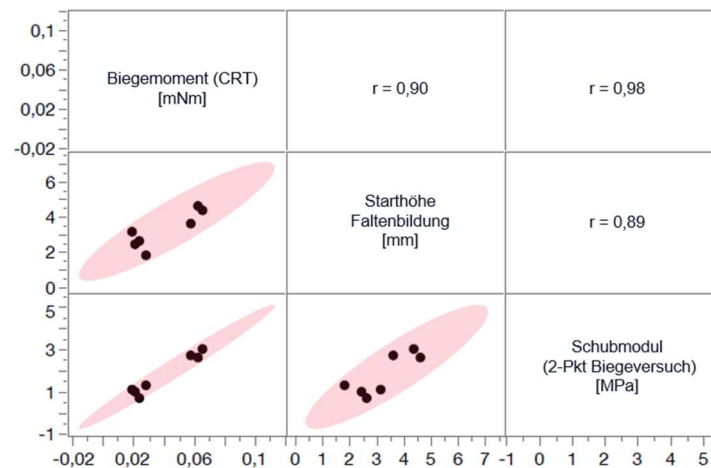


Abbildung 9-109: Korrelationsübersicht: Starthöhe Faltenbildung; Biegemoment (CRT); Schubmodul (Zwei-Punkt-Biegung)

Einen der mechanischen Materialkennwerte im Sinne der Reduktion des Aufwandes zu streichen, liegt nahe. Über den CRT wurde über das Biegemoment hinaus ein E-Modul bestimmt, welches gut mit der Starthöhe der Falten korreliert. Der über den Zwei-Punkt-Biegetest bestimmte E-Modul wiederum korreliert mit der maximalen Ziehtiefe sowie mit Materialwerten aus dem Zugversuch, auf den nicht verzichtet werden kann.

Mit der wiederholten Korrelation zu unverzichtbaren oder sehr verbreiteten Versuchen, ist der Informationsverlust durch Streichen des Zwei-Punkt Biegeversuches aus der Empfehlung für Charakterisierungsversuche hinnehmbar.

9.2 Korrelationsanalyse auf Basis Künstlicher Neuronaler Netze

9.2.1 Aufbau und Funktion des Künstlichen Neuronales Netzes

Analyse-Tool Neural Designer

Sowohl die Datenanalyse zur Bestimmung der Zusammenhänge zwischen den Materialparametern und den Qualitätskenngrößen als auch die Vorhersage von Umformeigenschaften 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 Umformeigenschaften der Materialien.

Datengrundlage

In den vorherigen Arbeitspaketen wurde ein umfassender Datenpool aufgenommen, bestehend aus Parametern die sich aus den Messungen an den Kartons zweier verschiedener Grammaturstufen ergeben haben.

Aus der Anzahl der Kartons (zehn) sowie der Anzahl der verwendeten Messverfahren bzw. der daraus extrahierten Werkstoffkennwerte (89) ergibt sich hierbei die Anzahl der Inputs des Datensatzes. Zur Datenanalyse standen insgesamt 890 Datenpunkte zur Verfügung.

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 9-110).

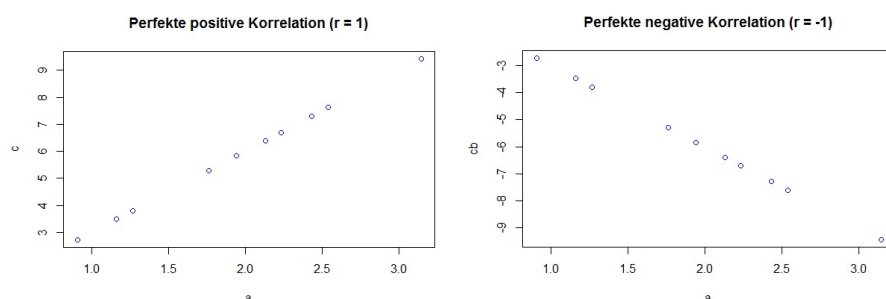


Abbildung 9-110: Perfekte positive Korrelation ($r = 1$, links) und perfekte negative Korrelation ($r = -1$, rechts)

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 9 dargestellt sind.

Tabelle 9: 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 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 9-111).

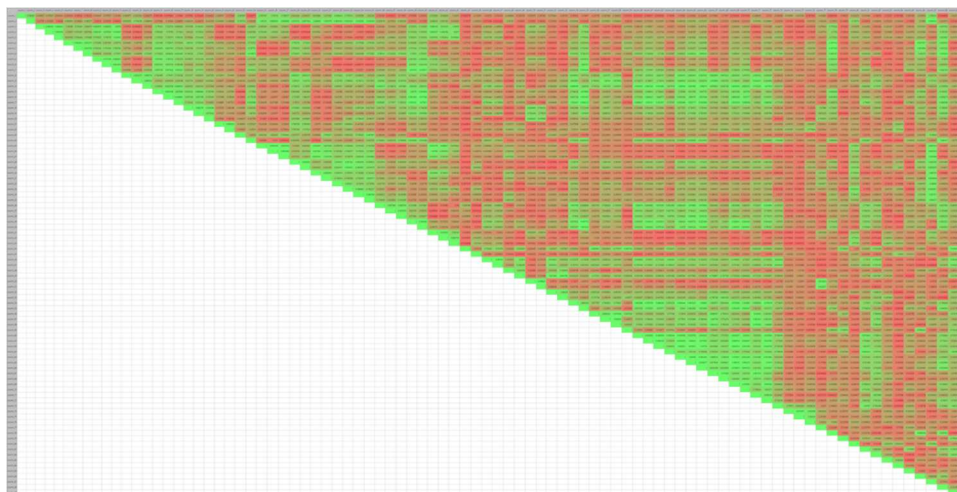


Abbildung 9-111: Korrelationsmatrix des Neural Designer für alle Inputvariablen

Es zeigte sich, dass die gewählten Materialparameter in großem Umfang nicht in einer Abhängigkeit zueinander stehen (rote Färbung der Zellen). Trotzdem gibt es vereinzelte Korrelationen auch innerhalb des Inputdatensatzes, weshalb die folgenden Sensitivitätsanalysen mit dem Blick auf diese Matrix bewertet werden müssen.

Im nächsten Schritt wurde eine Analyse der Zusammenhänge zwischen den Inputvariablen und den Zielgrößen durchgeführt. Hierbei wurde zwischen den Zielgrößen im Bereich Tiefziehen und dem Hydroforming unterschieden und jeweils zwei Qualitätskriterien je Umformverfahren analysiert.

9.2.2 Korrelationen im Tiefziehen

Sensitivitätsanalyse Ziehtiefe

Bei der Sensitivitätsanalyse des Ziehtiefes zeigten sich große Korrelationen nach Cohan, dessen Annahmen für die Koeffizienten folgend genutzt werden, da die Zusammenhänge im Bereich des Umformens naturfaserbasierter Werkstoffe noch nicht umfangreich beschrieben sind (Abbildung 9-112).

Insgesamt ergaben sich 19 der 89 Materialparameter zu Korrelationen über einem Wert von 0,75. Diese waren den folgenden Messverfahren zuzuordnen:

- Tiefungsversuch (10)
- Zugversuch (5)
- 2-Pkt-Biegung (2)
- CRT
- Bersten

Die großen Korrelationen zum Tiefungsversuch erklären sich darin, dass der Messaufbau im Tiefungsversuch dem Umformverfahren des Tiefziehens ähnelt. Aus der Literatur bekannte Korrelationen zum Zugversuch zeigten sich ebenso, weshalb durch die Nutzung nur dieser beiden Versuche angenommen werden kann, ausreichende Genauigkeiten für die Vorhersage dieses Qualitätsparameters treffen zu können.

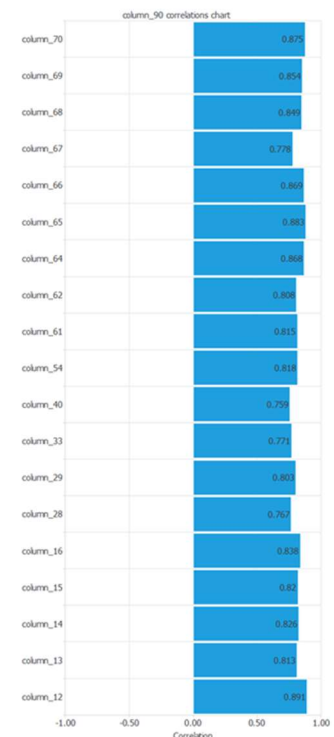


Abbildung 9-112: Korrelationen Ziehtiefe mit Koeffizienten > 0,75

Sensitivitätsanalyse Umformgrad

Bei der Sensitivitätsanalyse des Umformgrads zeigten sich nahezu gleiche Korrelationen wie für die Ziehtiefe (vgl. Abbildung 9-112). Die 20 Materialparameter mit Korrelationen über einem Wert von 0,75 ergaben sich allesamt aus dem Tiefungs- (15) und dem Zugversuch (5).

Die relevanten Parameter der Versuche sind hierbei Folgende:

- Tiefungsversuch:
 - maxHeight
 - minStrain_MD
 - meanStrain_MD
 - maxStrain_CD
 - minStrain_CD
 - meanStrain_CD
 - maxHeight_70%
 - maxHeight_70%_release5s
 - plasticPortion_maxHeight_70%
 - meanStrain_70%_MD
 - meanStrain_70%_release5s_MD
 - meanStrain_70%_CD
 - meanStrain_70%_release5s_CD
 - elasticPortion_strain_70%_MD
 - elasticPortion_strain_70%_CD
- Zugversuch
 - ZV_Bruchdehnung_CD [%]
 - ZV_Bruchdehnung_45 [%]
 - ZV_Bruchdehnung_MD [%]
 - ZV_Arbeitsaufnahmevermögen_CD [J/m²]
 - ZV_Arbeitsaufnahmevermögen_45 [J/m²]

Aus den korrelierenden Parametern lässt sich hierbei ein deutlicher Zusammenhang zu den Verformungseigenschaften der Werkstoffe ziehen (Dehnrreserven des Materials) wohingegen von Festkeits- oder Steifigkeitseigenschaften nahezu keinen Einfluss nachweisbar ist.

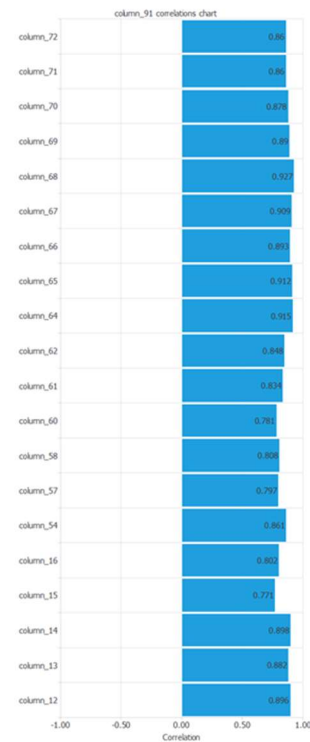


Abbildung 9-113: Korrelationen Umformgrad mit Koeffizienten > 0,75

Sensitivitätsanalyse Anzahl der Falten

Als zweites, optisches Qualitätskriterium des Tiefziehens wurde die Anzahl der Falten bei 30 mm Ziehtiefe betrachtet. Auch hierbei zeigten sich im Verfahren nach Cohan große Korrelationen im Bereich $> 0,5$ (vgl. Abbildung 9-112). Die Anzahl der korrelierenden Werkstoffparameter ist aber deutlich geringer, als bei den Untersuchungen im Bereich der mechanischen Eigenschaften.

Große Korrelationen finden sich in den Messverfahren:

- Tiefungsversuch (3)
- Zugversuch (3)
- Out-of-Plane-Schubversuch (2)
- Zero Span Kompressionstest - Orthotropie-Verhältnis

Im Vergleich der Korrelationsanalysen des Tiefziehens zwischen mechanischen (Ziehtiefe, Umformgrad) und optischen (Anzahl der Falten) Qualitätsparametern sind deutliche Unterschiede zu erkennen. In beiden Fällen können große Korrelationen nach Cohan aufgezeigt werden, die Anzahl der relevanten Messverfahren und -parameter ist im Bereich der mechanisch-physikalischen Bewertung jedoch wesentlich größer als im Bereich der optischen Auswertung von Qualitätsparametern.

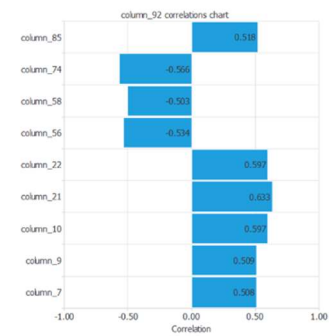


Abbildung 9-114: Korrelationen Anzahl der Falten mit Koeffizient $> 0,5$

9.2.3 Korrelationen in der wirkmedienbasierten Umformung

Kennwerte mit hoher Korrelation

Für die wirkmedienbasierte Umformung wurden als Qualitätsgröße jeweils die prozentuale Flächenfüllung in MD bzw. CD betrachtet, siehe Abschnitt 7. Bei Korrelation mit den erfassten Materialparametern zeigen sich einige Größen mit einem Korrelationskoeffizienten $> 85\%$. Diese ist in der folgenden Tabelle beispielhaft für die Flächenfüllung in CD aufgeführt.

Tabelle 10: Korrelationskoeffizienten wirkmedienbasierte Umformung bezogen auf die Flächenfüllung in CD, absteigend sortiert nach absoluten Werten des Korrelationskoeffizienten

Charakterisierungsversuch	Messgröße	Messgröße Nr.	Korrelationskoeffizient
Tiefungsversuch (Durchführung bis 70 % Berstdruck)	Anteil der Domhöhe 5 s nach Entlastung von der Domhöhe unter Prüfdruck	Tiefungsversuch 9	0,962

Tiefungsversuch (Durchführung bis 70 % Berstdruck)	Domhöhe 5 s nach Entlastung	Tiefungsversuch 8	0,952
Tiefungsversuch (Durchführung bis 70 % Berstdruck)	Mittlere elastische Dehnung	Tiefungsversuch 12	0,89
Tiefungsversuch (Durchführung bis Bersten)	Domhöhe	Tiefungsversuch 7	0,883
Zugversuch	Bruchdehnung in MD	Zugversuch 9	0,877
Spaltversuch	Spaltfestigkeit CD	Spaltfestigkeit 1	0,867
Zugversuch	E-Modul in MD	Zugversuch 3	0,866
Curvature Resistance Test	Number of bendings	CRT	-0,856
Tiefungsversuch (Durchführung bis Bersten)	Minimale Dehnung in CD	Tiefungsversuch 4	0,852
Zugversuch	Arbeitsaufnahmevermögen in MD	Zugversuch 12	0,85

Interpretation der Ergebnisse Die drei Kennwerte mit der höchsten Korrelation entstammen aus dem Tiefungsversuch bei einer Durchführung bis zu 70 % des vorab ermittelten Berstdrucks, sodass eine Betrachtung der nach Entlastung erfolgenden Rückfederung ermöglicht wird.

Die erste Größe entspricht dem Anteil der Domhöhe nach Rückfederung in Bezug auf die maximale Domhöhe bei Erreichen des maximalen Prüfdrucks. Diese Größe wird mathematisch aus den Größen 7 und 8 ermittelt, die jeweils eine geringfügig geringere Korrelation aufweisen, und ist in Abbildung 9-115 aufgezeigt. Als weitere Kenngröße aus dem Tiefungsversuch bei Durchführung bis zum Bersten zeigt sich die minimale mittlere Dehnung im Auswertebereich in CD.

Die hier auftretenden hohen Korrelationen sind durch die Ähnlichkeit des Tiefungsversuchs zur wirkmedienbasierten Umformung zu begründen. In beiden Fällen liegt ein biaxialer Belastungszustand vor. Während beim Tiefungsversuch eine freie Umformung bis zum Versagen, oder bis Erreichen des Prüfdrucks auftritt, ist bei der wirkmedienbasierten Umformung eine Gegenform als Matrize gegeben. Bis zum Erstkontakt der Papierronde mit der Matrize sind beide Verfahren identisch.

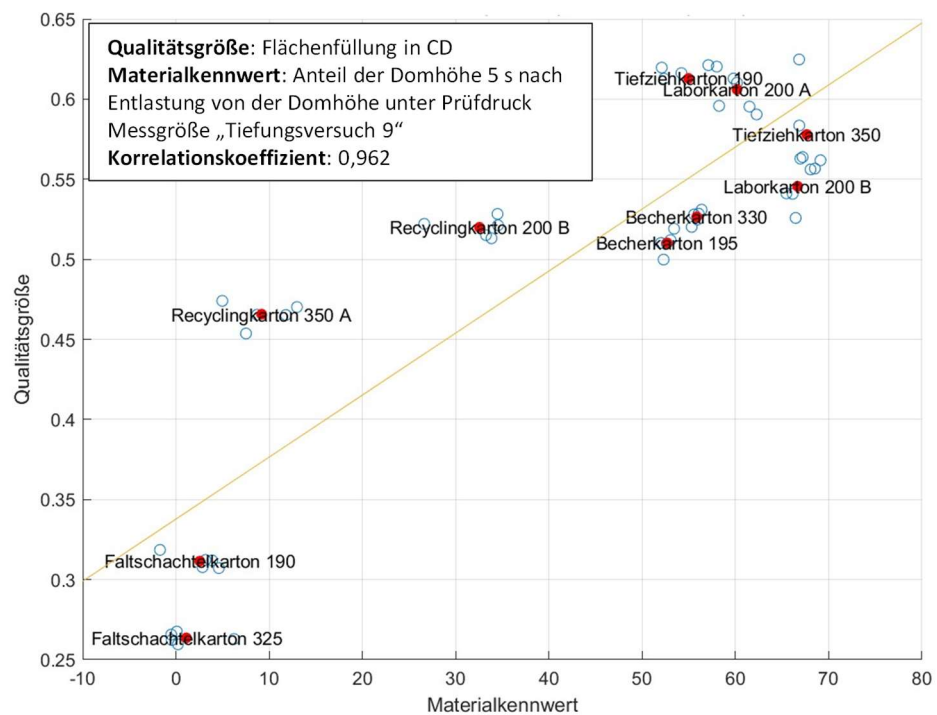


Abbildung 9-115: Korrelation zwischen Flächenfüllung in CD und Materialkennwert

Die Korrelationen zu den Kennwerten der Bruchdehnung und des Arbeitsaufnahmevermögens aus dem Standard-Zugversuch entspringt dem Zusammenhang des hiermit verbundenen plastischen Dehnvermögens. Je größer die Bruchdehnung eines Materials und je größer das Arbeitsaufnahmevermögen, desto höhere Umformgrade sind umsetzbar. Der Zusammenhang zum Steifigkeitskennwert des E-Moduls ist eine neue Erkenntnis aus den Untersuchungen. Dieser lässt sich darauf zurückführen, dass ein angepasster E-Modul einer Verformung im elastischen Bereich (zu Beginn des Umformverfahrens) zuträglich ist. Alle Kennwerte beziehen sich hierbei auf die Richtung MD. Dies liegt darin begründet, dass in dieser Herstellungsrichtung sowohl Bruchdehnung als auch Arbeitsaufnahmevermögen als geringer, der E-Modul hingegen als größer, als in CD erweisen und somit die limitierenden Faktoren sind.

Die Spaltfestigkeit als Kennwert zu den Delaminationseigenschaften des Materials gegen eine schälende Beanspruchung ist eine vergleichbare Größe zu den Out-of-Plane-Schubeigenschaften und somit korrelierend zu der Annahme einer unterschiedlichen Verschiebung von Ober- zu Unterseite während des Umformverfahrens. Korrelationen zum CRT als Verfahren zur Definition des plastischen Verformungsverhaltens von naturfaserbasierten Werkstoffen sind ebenso vorzufinden und naheliegend.

9.3 Validierung und Anpassung des Prognosewerkzeugs

Einsatz des Künstlichen Neuronalen Netzes

Das Vorgehen zum Aufbau und zur Nutzung eines Künstlichen Neuronalen Netzes zur Vorhersage der Qualitätsparameter 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 programmieretechnische 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 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 Umformkriterien 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 Tiefziehen oder Hydroforming sind, war das Ergebnis, das 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.

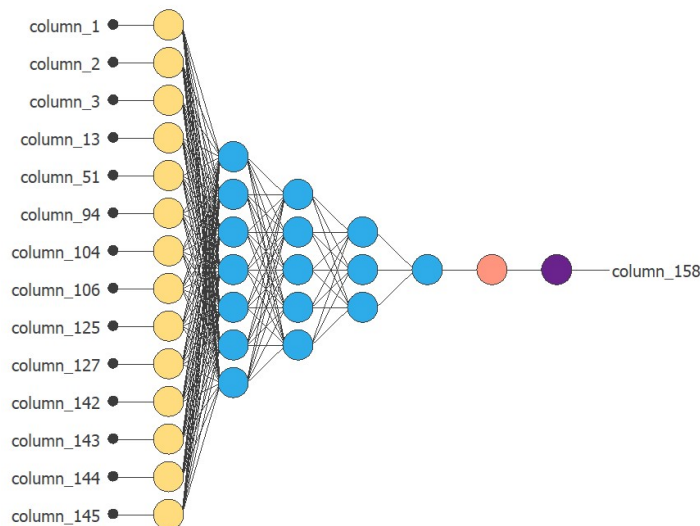


Abbildung 9-116: Beispiel eines schematischen Aufbaus eines KNN

Nach der Definition des zu ermittelnden Zielparameters wurde das Netz mit Hilfe des Datenpools angelernet, wobei in der Nutzung des Datensatzes nicht unterschieden wird in Trainings- und Testdatensatz. Die allgemein gültige Aufteilung im Bereich 80:20, was bedeutet, dass 80 % des Datensatzes zum Anlernen des Netzes genutzt wird und das angelernete Netz dann anhand der weiteren 20 % der Daten in seiner Güte bewertet wird, wird nicht angewendet. Das Anlernen des Netzes geschieht hierbei in einem mehrstufigen Prozess, die Durchläufe zur Modelloptimierung enden beim Erreichen eines definierten Gütewerts. Im Folgenden wurden mehrere Netze hinsichtlich unterschiedlicher Zielparameter (Ziehtiefe, Anzahl der Falten, area ratio MD, area ratio CD) und unter stetiger Verringerung der Eingangsparameter trainiert und bewertet.

Eine Validierung der Vorhersagemodells geschieht in diesem Fall durch den separat aufgenommenen Datensatz der Validierungspapiere. Diese wurden auf Basis der Korrelationsanalysen bereits nur auf die relevanten Werkstoffeigenschaften hin untersucht.

Validierung und Anpassung des Prognosewerkzeugs

Nach Erstellung eines Vorhersagemodells wurde die Zuverlässigkeit dieses Modells in der Anwendung mit neuen Materialien erprobt und die Vorhersagegenauigkeit gekennzeichnet. Auf der Grundlage der Aussagen, die aus dieser Validierung mit vier bis dahin ungenutzten Materialien entstanden, wurde eine Einteilung von Materialklassen erstellt, die in der Anwendung die Grundlage für die Einordnung der Materialien nach ihrer Eignung bilden.

**Validierung
mit weiteren
Versuchsmaterialien**

Für die Validierungspapiere wurden mit der entwickelten ML-Methode die Umformqualität basierend auf den Materialkennwerten geschätzt. Parallel wurden Umformversuche durchgeführt und die Umformqualität mit der in Abschnitt beschriebenen Methode bestimmt. Die jeweiligen Formfüllungen in MD und CD sind in der folgenden Tabelle gegenübergestellt.

Tabelle 11: Geschätzte und experimentell ermittelte Formfüllung in der wirkmedienbasierten Formfüllung

Validierungspapier	Formfüllung MD in %			Formfüllung CD in %		
	Schätzung	Experiment	Prozentuale Abweichung	Schätzung	Experiment	Prozentuale Abweichung
Getränkekarton A (223)	0,499	0,463	7,83 %	0,566	0,521	8,66 %
Getränkekarton B (273)	0,497	0,468	6,17 %	0,555	0,526	5,63 %
Energiepflanzenkarton A (200)	0,522	0,517	0,97 %	0,584	0,571	2,28 %
Energiepflanzenkarton B (350)	0,470	0,518	-9,30 %	0,550	0,577	-4,75 %

Wie in der Tabelle zu erkennen ist, ermöglicht die entwickelte Methode eine Vorhersage der Umformqualität mit einer prozentualen Abweichung von unter 10 % für alle betrachteten Papiere. Die Abweichungen sind abhängig von den betrachteten Validierungspapieren und führen materialabhängig zu einer Überschätzung oder Unterschätzung der experimentell ermittelten Formfüllung.

Diese Abweichungen müssen in dem Kontext interpretiert werden, dass die experimentelle Bestimmung der Umformqualität auf den pro Papier bestimmten Prozessfenstern basiert. Wie in Abschnitt 7 beschrieben, stellen die Prozessgrenzen unscharfe Beschränkungen dar. Daher wurde ein gegenüber dem erwarteten Optimum reduzierter Umformdruck zugunsten eines stabileren Prozesses gewählt. Dieses Ausmaß an Reduktion obliegt zwangsläufig Schwankungen, sodass die gewählten Betriebspunkte als unterschiedlich konservativ einzuschätzen sind.

10 Schlussfolgerungen

Einordnung

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde erstmals eine systematische Untersuchung der Umformbarkeit verschiedener Papiere in der wirkmedienbasierter Umformung und im Kompressionstiefziehen mit bestimmter Oberfläche verglichen. Dabei wurde durch vergleichbare Variation der Prozessparameter Niederhalterkraft und Umformdruck für jedes Papier ein optimiertes Umformergebnis erzielt. Zur systematischen Bewertung der geometrischen Umformgüte wurde eine Methode am PtU entwickelt, die unterschiedlichen geometrischen Merkmale aus digitalen Abbildern der Formteile extrahiert. An der TU Dresden konnten bestehende Vorrichtungen hierfür genutzt werden. Dabei hat sich gezeigt, dass die Umformgüte der untersuchten Papiere unterschiedlich hoch ist und nicht alle geometrischen Merkmale sinnvoll bestimmt werden können. Als geeignetstes Merkmal, das unabhängig von der Umformgüte bestimmt und zur Bewertung herangezogen werden kann, wurde beim wirkmedienbasierten Tiefziehen der Ausfüllgrad eines virtuellen Schnitts, auch als Flächenfüllung bezeichnet, durch die Probe identifiziert. Beim Kompressionsziehen hat sich die Auswertung der Falten, besonders die Starthöhe der Faltenbildung, als geeignetes Kriterium gezeigt.

Ergebniszusammenfassung

Vorrangiges Ergebnis der Hydroforminguntersuchungen ist, dass die Flächenfüllung die höchste Korrelation mit Materialkennwerten, aus einen Tiefungsversuch ermittelt, aufweist. Bei diesem Versuch wird das flächige Prüfmaterial gleichmäßig eingespannt und mit einem Druck beaufschlagt, so dass eine zunehmende Dehnung bis zum Versagen aufgebracht wird. Aus der sich bei 70 % des maximalen Drucks bei Versagen ausbildenden Kuppelhöhe wurde der Kennwert mit der höchsten Korrelation zur Flächenfüllung abgeleitet. Zusätzlich kann der sich ausbildende biaxiale Spannungszustand mit einem Kamerasystems unter Verwendung eines stochastischen Musters und digitaler Bildkorrelation analysiert werden. Daraus lässt sich unter anderem die mittlere elastische Dehnung bestimmen, die einen weiteren Kennwert mit hoher Korrelation darstellt.

Bei gängigen Qualitätsgrößen im Tiefziehen konnten durch die Versuche eine Korrelation zu Materialparametern bestätigt werden. Neu in den Fokus gerückt ist die Starthöhe der Faltenbildung. Definiert als Höhe ab welcher eine festgelegte Anzahl an Falten zu erkennen ist kann über diesen Qualitätswert der weitere Verlauf gut abgeschätzt werden. Lediglich der Algorithmus auf dem die Faltenauswertung basiert stieß bei der farblichen Bandbreite der Materialien an seine Grenzen.

Ein Prüfverfahren, aus dem ein Kennwert mit hohen Korrelationen zu Qualitätsparametern beider Umformverfahren ermittelt wurde, ist der Zugversuch, der ein Standardprüfverfahren mit hoher industrieller Abdeckung darstellt. Hier empfehlen sich die Bruchdehnung und der E-Modul als besonders aussagekräftige Kenngrößen aus dem Projekt.

Fazit

Anhand der vier Validierungspapiere konnte die Leistungsfähigkeit der Vorhersage der Umformqualität in der wirkmedienbasierten Umformung bestätigt werden. Mit einem Fehler von weniger als 10 % kann die Umformqualität aus den durchgeführten Charakterisierungsversuchen vorhergesagt werden und ermöglicht somit eine gute Abschätzung der Eignung verschiedener Materialien für die wirkmedienbasierte Umformung.

Beim Kompressionsziehen konnte die Vorhersage durch KNN nicht direkt bestätigt werden. Die real erzielten Umformtiefen liegen mit 10-40% deutlich über den vorhergesagten. Bei den vorhergesagten Ziehtiefen wurden eine deutlich höhere Faltenzahl berechnet, die bei Validierungsversuchen nicht erreicht wurden. Bei den Versuchen wurde wie bei den Versuchen für die Datengrundlage die Ziehtiefe erhöht bis die Faltenqualität nicht mehr subjektiv ansprechend wurde. Mit der Berücksichtigung, dass die Faltenanzahl größer, also die optische Qualität bei geringerer Ziehtiefe deutlich besser ist, sind die Vorhersagen plausibel und können nachgebildet werden.

11 Durchführende Forschungsstellen

Forschungsstelle 1:	Papiertechnische Stiftung (PTS) Pirnaer Straße 37 01809 Heidenau
Leiter der Forschungsstelle: Projektleiter:	Dr. Thorsten Voß Dr. Martin Zahel, Benjamin Hiller
Forschungsstelle 2:	Steinbeis-Hochschule (SH) Lehrstuhl für Verpackungsmaschinen und -technik Büro Dresden Ernst-Augustin-Straße 15 12489 Berlin
Leiter der Forschungsstelle: Projektleiter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Marek Hauptmann Holger Schubert
Forschungsstelle 3:	Technische Universität Darmstadt Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen (PtU) Otto-Berndt-Straße 2 64287 Darmstadt
Leiter der Forschungsstelle: Projektleiter:	Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche Cédric Brunk, Henning Husmann, Simon Biffar
Laufzeit	01.12.2020– 31.07.2023

12 Literaturverzeichnis

- Huttel 2015 Huttel, Dominik: Wirkmedienbasiertes Umformen von Papier. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen. Dissertation. 2015
- Stenberg 2002 Niclas Stenberg and Christer Fellers
“Out-of-plane Poisson’s ratios of paper and paperboard”
Nordic Pulp and Paper Research Journal Vol 17 no. 4/2002
- Hauptmann 2017 Hauptmann, M. Neue Einsatzpotentiale naturfaserbasierter Materialien in der Konsumgüterproduktion durch die technologische Entwicklung des Ziehverfahrens am Beispiel der Verpackung. Habilitationsschrift, Technische Universität Dresden. 2017.
- Hauptmann 2013 Hauptmann, M., et al. Gastight paperboard package - a new step in food packaging. Professional papermaking 1/2013. 2013, S. 48-51.
- EP 2019 European Parliament. Directive (EU) 2019/904 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment.
- IVK 2018 Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V. Jahresbericht 2017/18. 2018.
- Beutner 2012 K. Beutner, S. Klaus. Die zehn wichtigsten Trends in der Verpackungsindustrie. [Online: <http://www.neue-verpackung.de/12205/die-zehn-wichtigsten-trends-in-der-verpackungsindustrie/> (Zugriff am 14.03.2018)] Heidelberg: Hüthig GmbH, 2012.
- Pointlogic 2012 Pointlogic. Verpackung: ein Medium mit hoher Durchschlagskraft, 23 Kommunikationskanäle im Vergleich. s.l.: Pro Carton, FFI, 2012.
- Wagner 2018 M. Wagner, S. Lambert (Editoren). Freshwater Microplastics. s.l.: Springer, Cham, 2018.
- Ivleva 2017 N. P. Ivleva, A. C. Wiesheu, R. Niessner. Mikroplastik in aquatischen Ökosystemen / Microplastic in Aquatic Ecosystems. Angew. Chem. / Angew. Chem. Int. Ed. 2017, 129, 1744–1764 / 56, 1720–1739.
- Gutjahr 2011 Gutjahr, G. Markenpsychologie: Wie Marken wirken – Was Marken stark macht. Wiesbaden: Springer Gabler, 2011.
- Touchpoint 2015 Touchpoint. Der Beitrag der Verpackung zum Marketingerfolg. s.l.: Pro Carton, FFI, 2015

- Müller 2017 Tobias Müller et al. "Method for Fast Quality Evaluation of Deep-drawn Paperboard Packaging Components." In: *Packaging Technology and Science* 30.11 (2017), pp. 703–710.
- Heinz 1966 O. Heinz. "Ungenügende Ziehqualität Und Ihre Ursachen." In: *Buchbinderei und Papierverarbeitung* 6 (1966), S. 89–95.
- Lenske 2017 Alexander Lenske, Prof Dr-Ing Jens-Peter Majschak, and Dr.-Ing. Marek Hauptmann. "Evaluating the Factors Influencing the Friction Behaviour of Paperboard during the Deep Drawing Process." In: (2017). In collab. with Matti Schneider, Lars Pentter, and Tobias Müller.
- Vishtal 2014 Alexey Vishtal et al. "3D Forming of Paperboard: The Influence of Paperboard Properties on Formability." In: *Packaging Technology and Science* 27.9 (2014), pp. 677–691. issn: 1099-1522. doi: 10.1002/pts.2056. url: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pts.2056>.
- Franke und Groche 2023 Wilken Franke and Peter Groche. "Extended Formability of Paperboard by Pre-Compression in Hydro-Based Deep-Drawing." In: Proceedings of the International Paper Physics Conference. TAPPI, 2019. url: <https://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/113322/> (visited on 03/09/2023).
- Stein 2019 Philipp Stein et al. "Forming Behavior of Paperboard in Single Point Incremental Forming." In: *BioResources* 14.1 (Jan. 15, 2019), pp. 1731–1764. issn: 19302126, 19302126. doi: 10.15376/biores.14.1.1731-1764. url: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/forming-behavior-of-paperboard-in-single-point-incremental-forming/>.