

# Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

***Anwendung wirkmedienbasierter Verfahren zum Tiefziehen von Papier und Karton***

der Forschungsstellen

Nr. 1: Technische Universität Darmstadt,

Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik, PMV

Nr. 2: Technische Universität Darmstadt,

Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen, PtU

Das IGF-Vorhaben 17788N der Forschungsvereinigung Kuratorium für Forschung und Technik der Zellstoff- und Papierindustrie im VDP e.V. wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

vom

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Darmstadt, 27.07.2015

Dipl.-Ing. Dominik Huttel

Dipl.-Ing. Paul-Philipp Post

---

Ort, Datum

---

Name und Unterschrift der Projektleiter  
an den Forschungsstellen



**Kontakt:**

Technische Universität Darmstadt  
Fachgebiet Papierfabrikation und  
Mechanische Verfahrenstechnik PMV  
Dipl.-Ing. Paul Post  
Prof. Dr.-Ing. Samuel Schabel

Alexanderstraße 8  
D-64283 Darmstadt  
+49 6151 16-2154

[pmv@papier.tu-darmstadt.de](mailto:pmv@papier.tu-darmstadt.de)

Technische Universität Darmstadt  
Institut für Produktionstechnik  
und Umformmaschinen  
Wilken Franke, M.Sc.  
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing.  
Peter Groche

Otto-Berndt-Straße 2  
D-64287 Darmstadt  
+49 6151 16-3056

[groche@ptu.tu-darmstadt.de](mailto:groche@ptu.tu-darmstadt.de)



---

## Inhaltsverzeichnis

---

1	Hintergrund und Motivation.....	1
2	Stand der Forschung .....	3
2.1	Das Material Papier .....	4
2.2	Materialcharakterisierung und Beschreibung des Materialverhaltens von Papier ..	7
2.3	Umformprozess (Tiefziehen von Papier) .....	11
2.4	Eigene Arbeiten .....	14
3	Zielsetzung und Lösungsweg .....	18
3.1.1	Angestrebte Forschungsergebnisse .....	19
3.1.2	Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse .....	20
3.2	Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels.....	21
4	Versuchsdurchführung und Ergebnisse.....	22
4.1	Variation der einflussreichsten Materialparameter .....	22
4.2	Erweiterte Charakterisierung der Materialeigenschaften vor, während und nach der Umformung .....	30
4.3	Betrachtung des tribologischen Systems Papier-Werkzeug .....	44
4.4	Werkzeugauslegung und Entwicklung einer Versuchsgeometrie .....	50
4.5	Identifikation signifikanter Prozessparameter.....	54
4.6	Abbildung der Materialeigenschaften in der Simulation .....	57
4.7	Vergleich der Prozessvarianten .....	62
4.8	Entwicklung eines Demonstrators.....	67
5	Schlussfolgerungen .....	74
6	Mittelverwendung und Transfer in die Wirtschaft.....	75
6.1	Verwendung der Zuwendung .....	75
6.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	76
6.3	Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung der Forschungsergebnisse für KMU .....	77



---

Voraussichtliche Nutzung der Forschungsergebnisse in KMU.....	77
6.4 Ergebnistransfer in die Wirtschaft.....	80
7 Tabellenverzeichnis.....	LXXXIV
8 Abbildungsverzeichnis .....	LXXXV
9 Literaturverzeichnis.....	XCI

---

## 1 Hintergrund und Motivation

---

Konsumenten sind heute an eine große Verpackungsvielfalt mit einem hohen Form- und Variantenreichtum gewöhnt. Studien belegen in diesem Zusammenhang, dass Verbraucher bereits anhand der Verpackung auf die Qualität der Ware schließen [2]. Neben Basisfunktionen, wie dem Schutz des Produktes und der Zweckmäßigkeit, müssen Verpackungen also insbesondere emotionale Reize auslösen. Während „die faktischen Eigenschaften die Kaufimpulse am POS [point of sale] nur zu ca. einem Drittel beeinflussen, [tragen] die emotionalen Eigenschaften der Verpackung [...] mit ca. zwei Dritteln den größten Anteil zum Kaufimpuls bei“ [3]. Die Verpackung ist somit ein Marketinginstrument und muss Kommunikationsfunktionen erfüllen, die gleichermaßen Werbung und Wiedererkennbarkeit umfassen. Dies hat dazu geführt, dass Verpackungen immer aufwändiger geworden sind. Komplizierte Formen, hochauflösende, teils Sonderfarben umfassende Drucke sowie die Verwendung von Materialkombinationen sind heute bei zahlreichen Verpackungen anzutreffen.

Die Herstellung von mehrdimensionalen Verpackungslösungen (oder auch Konstruktionsbauteilen) mit geschwungenen Geometrien aus Papier und Karton ist bislang jedoch nicht zufriedenstellend möglich.

Für die Produktion von geschwungenen Papierformteilen kommen prinzipiell Faserguss- oder Tiefziehverfahren in Frage. Letztere bieten energetisch sowie in Bezug auf die Stabilitäts- und Oberflächeneigenschaften des fertigen Produktes Vorteile, sind allerdings bislang kaum erforscht. Industrielle Papier-Tiefziehteile besitzen daher meist nur eine einfache Geometrie. Die Entwicklung neuer Formteile beruht auf Erfahrungen sowie auf kosten- und zeitintensiven Experimenten. Sie bewegt sich besonders im Hinblick auf die Erschaffung komplexerer Geometrien in engen Grenzen [4].

Der Einsatz von Simulationswerkzeugen zur Entwicklung neuer Produkte und zur Auslegung der Umformprozesse, wie z. B. in der Metallindustrie mittlerweile üblich, erfolgt bei Papier bisher nicht. Auch der Tiefziehprozess selbst hat sich seit Jahrzehnten nicht grundlegend verändert. Neue Prozessvarianten, wie z. B. wirkmedienbasiertes Tiefziehen, werden in der Papierumformung nicht industriell eingesetzt. Im Bereich der Metall- und Kunststoffverarbei-

---

tung zeigt sich jedoch, dass mit diesen Verfahren komplexere Geometrien in Verbindung mit höheren Umformgraden hergestellt werden können [5]<sup>1</sup>.

Derzeitig verfügbare Papier- und Kartonqualitäten genügen nicht den Anforderungen, die moderne Umformverfahren zur Produktion anspruchsvoller Geometrien stellen. Sie besitzen eine stark begrenzte plastische Verformbarkeit, haben kaum thermoplastische Eigenschaften und sind stark anisotrop. Der nachhaltige Werkstoff Papier kann daher auf vielen Gebieten der Verpackungstechnik nicht bzw. nicht mehr mit Kunststoffen oder Metallen konkurrieren [6].

Bleiben Innovationen im Bereich der Produktentwicklung und der Produkteigenschaften aus, so besteht die Gefahr, dass tiefgezogene Papiergüter zusehends durch alternative Materialien ersetzt werden. Dies hätte negative wirtschaftliche Folgen für die papiererzeugenden und papierverarbeitenden Firmen. Auch wären negative Auswirkungen auf die hohe Altpapier-Einsatzquote der deutschen Papierindustrie, die einen erheblichen Beitrag zur Ressourcenschonung liefert, zu erwarten.

Ein Schlüssel zu innovativen Verpackungen und somit zum Erhalt und Gewinn wichtiger Marktanteile ist die Erweiterung der bisher stark begrenzten Formgebungsmöglichkeiten von Papier und Karton. Es ist davon auszugehen, dass optimierte Herstellverfahren und Umformprozesse zu einer erheblichen Verbesserung des Papierumformvermögens beim Tiefziehen führen können [7]. Hierzu bedarf es Verbesserungen des Werkstoffs, Erweiterungen der Produktgrenzen sowie verbesserter Produktentwicklungs- und Produktionsverfahren. All dies sind Ziele dieses Projekts.

---

<sup>1</sup> S. 349ff

---

## 2 Stand der Forschung

---

Verpackungen aus Papier und Karton sind sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht interessant. Papier besteht größtenteils aus nachwachsenden Rohstoffen [8] und kann mit erprobten Technologien ressourcenschonend recycelt werden [9]. Laut einer Studie der Gesellschaft für Konsumforschung (GfK) „beurteilt eine klare Mehrheit von 79 Prozent Papier und Karton als umweltfreundlicher als Plastik. (...) Hat der Verbraucher die Wahl zwischen zwei Produkten gleichen Inhalts, aber mit unterschiedlichem Verpackungsmaterial, wählt er das umweltfreundlichere. So greift er beispielsweise lieber zu Nudeln im Karton als im Plastikbeutel. (...) Nur wenn das gewünschte Produkt nicht in einer alternativen Umhüllung erhältlich ist, nimmt er den Nachteil der geringeren Umweltfreundlichkeit in Kauf“ [10]. Die positiven Emotionen gegenüber Papier führen vielfach sogar dazu, dass zusätzliche, funktionell überflüssige Papierverpackungen eingesetzt werden, um die Wertanmutung von Produkten, die in anderen Materialien verpackt sind, zu steigern (z. B. bei Kosmetika, Tiefkühlwaren, Pralinen) [3].

Bei mehrdimensionalen, komplexen Verpackungen ist Papier bisher jedoch nur sehr eingeschränkt konkurrenzfähig. Am Markt vertreten sind Faserguss- sowie Tiefzieh-Papierformteile. Fasergussteile finden vorwiegend bei Produkten mit hohen Stückzahlen und geringen Anforderungen an Stabilität und Oberfläche Einsatz (Eierkartons, Trays, Verpackungsinneinteile) [11]. Allerdings gibt es hier Ausnahmen im höherpreisigen und -wertigen Umfeld (**Abbildung 2-1**). Die Umformung von Papierwerkstoffen ist zurzeit auf einfache Geometrien wie bspw. Pappteller beschränkt.



*Abbildung 2-1: Verpackung des Smartphones "HTC M8" aus Faserguss*

---

Betrachtet man die gesamte Prozesskette der Umformung von Papier von der Produktidee bis zum fertigen Produkt, so ist ersichtlich, dass es sich beim Material, der Materialcharakterisierung, der Beschreibung des Materialverhaltens und beim Umformprozess um die grundlegenden Eckpfeiler der Entwicklungskette handelt. Im Folgenden wird daher der aktuelle Stand der Forschung mit Fokus auf die genannten Teilaspekte dargestellt.

---

## 2.1 Das Material Papier

---

Papier ist „ein flächiger, im Wesentlichen aus Fasern meist pflanzlicher Herkunft bestehender Werkstoff, der durch Entwässerung einer Faserstoffaufschwemmung auf einem Sieb gebildet wird“ [12]. Das durch diesen Prozess gebildete komplexe Netzwerk aus Fasern, Füll- und Hilfsstoffen wird hauptsächlich über Wasserstoffbrückenbindungen zusammengehalten. Papier gibt es in zahlreichen Sorten, die sich in ihren Eigenschaften teils erheblich unterscheiden. Das Angebot kann grob in grafische Papiere, Verpackungs-, Tissue- und Spezialpapiere unterteilt werden. Sehr dünne Druckpapiere (bspw. Bibeldruckpapier) haben Flächengewichte von ca. 25 g/m<sup>2</sup>, noch darunter liegen Tissue-Papiere. Gängige grafische Papiere liegen im Bereich 40 – 100 g/m<sup>2</sup>. Schwere Papiere ab einem Flächengewicht von ca. 180 g/m<sup>2</sup> werden üblicherweise als Karton bezeichnet, ab ca. 600 g/m<sup>2</sup> spricht man von Pappe.

Papier gehört mit einer spezifischen Dichte von  $\rho = 0,6$  bis 1,6 g/cm<sup>3</sup> zu den leichteren Werkstoffen. Der Rohstoffkreislauf ist gegenüber Werkstoffen wie Kunststoff ( $\rho = 0,6$  bis 2,16 g/cm<sup>3</sup>) bereits sehr weit gestaltet. Die Rücklaufquote von Altpapier beträgt in Deutschland etwa 77 % [13].

Die Eigenschaften des Papiers bzw. Kartons werden zunächst durch die Auswahl des Rohstoffes und durch das verwendete Aufschlussverfahren bestimmt. In Deutschland ist der mengenmäßig bedeutendste Rohstoff heute Altpapier. Frischfasern in Form von Zell- bzw. Holzstoff stehen an zweiter Stelle. Deutlich stärker als der Rohstoff beeinflusst jedoch der Herstellungsprozess die Papiereigenschaften. Die Papierfestigkeit wird bspw. wesentlich durch die Anzahl der Wasserstoffbrückenbindungen bestimmt, welche durch mechanische Behandlung der Fasern (Mahlung) sowie durch Zugabe von chemischen Hilfsstoffen erheblich gesteigert werden kann [8]. Die optischen Eigenschaften des Materials hängen u. a. von der Bleiche, der

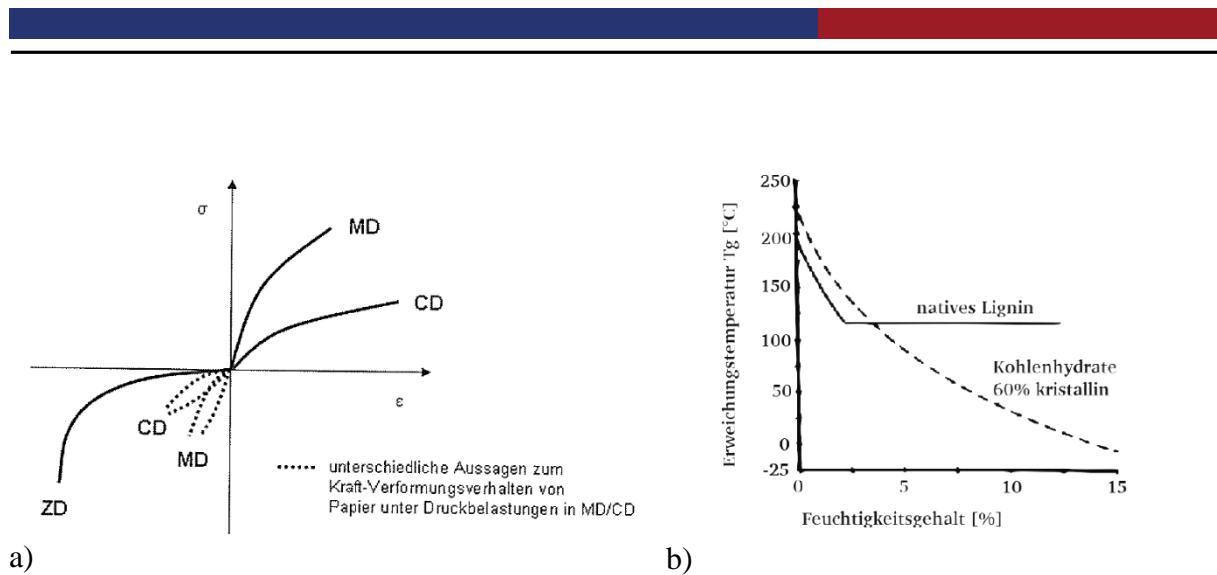


---

Entfernung der Druckfarben (bei Altpapier), dem Aufbau des Fasernetzwerks und vom Strich bzw. von zugesetzten Füllstoffen ab [14].

Unter Laborbedingungen werden Papierblätter normalerweise mit in der Blattebene annähernd isotropen Eigenschaften hergestellt. Maschinell hergestelltes Papier ist jedoch i. d. R. ein anisotropes Material. Die Strömungsverhältnisse am Stoffauflauf und die dadurch bedingte Ausrichtung der Fasern sowie unterschiedlich große Schrumpfungen bzw. Dehnungen während der Trocknung führen zu richtungsabhängigen Eigenschaften. Die Fasern besitzen durch die Herstellung eine Vorzugsrichtung zur Maschinenlaufrichtung (MD) und stehen, durch die während des Transports durch die Trockenzylinder aufgebrauchten Dehnungen, in dieser Richtung unter Spannung. In Querrichtung (CD) hingegen kann sich das Material während der Trocknung zusammenziehen (schrumpfen). Dies führt zu den in **Abbildung 2-2 a)** dargestellten Eigenschaften maschinell hergestellten Papiers. Es zeigt sich eine in Längsrichtung (MD) höhere Festigkeit, in Querrichtung (CD) kann das Material hingegen eine größere Bruchdehnung aufweisen. Oftmals wird Papier daher auch als orthotroper Werkstoff bezeichnet [15]. Die herstellungsbedingten orthotropen Eigenschaften führen zu unterschiedlich großen Rückstellkräften in tiefgezogenen Formteilen, welche sich in ovalen Zargenrändern und Verzerrungen der Geometrie äußern [4]. Außerdem treten aufgrund der ungleichmäßigen Festigkeitsverteilung unterschiedlich hohe Dehnungen und ungleichmäßig verteilte Falten auf.

Das Materialverhalten von Papier im Druckbereich unterscheidet sich von dem im Zugbereich [16]. Typischerweise beträgt die Drucksteifigkeit ungefähr ein Drittel der Zugsteifigkeit. Dies ist jedoch sehr stark vom Material, dem Herstell- und auch dem Messverfahren abhängig. So sind unterschiedliche Aussagen zum Verhalten von Papier unter Druckbelastung (degressiver oder progressiver Verlauf) zu finden (**Abbildung 2-2 a)**).



**Abbildung 2-2:** Materialverhalten a) von Papier in Abhängigkeit der Belastungsrichtung [17] und b) der Materialbestandteile von Papier in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchte [18]

Insbesondere im Vergleich mit Metallen und Kunststoffen fällt auf, dass Papier nicht nur ein anisotroper, sondern auch ein inhomogener Werkstoff ist. Dies liegt teils schon in seiner Herkunft als Naturprodukt begründet. Selbst bei sortenreinen Zellstoffen zeigen sich erhebliche Unterschiede in den Eigenschaften der einzelnen Fasern (Früh- und Spät-, Kern- und Splintholz, unterschiedliche Fasertypen). Bei Altpapier findet man eine Mischung verschiedenster Fasern vor. Weitere Faktoren, die zur inhomogenen Papierstruktur beitragen, sind u. a. Flockenstruktur, Füllstoffverteilung, Schwankungen im Prozess und eine uneinheitliche Verteilung der Wasserstoffbrückenbindungen. Die durch den Aufbau des Blattgefüges entstehende starke Inhomogenität beeinflusst das Kraft-Verformungs-Verhalten vom initialen Belastungsbereich bis zum Versagen stark.

Das Umformverhalten von Papier hängt von einer komplexen, bisher nicht vollständig geklärten Mischung von Eigenschaften ab. Unter anderem sind dies Art und Menge zugesetzter Füll- und Hilfsstoffe, Temperatur, Materialfeuchte und der zeitliche Verlauf der Verformung.

Insbesondere Temperatur und Feuchtigkeit haben einen wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Papiers. Der Einfluss der Temperatur beruht hauptsächlich auf der Erweichung einzelner Papierbestandteile [18]. Dies ist in **Abbildung 2-2 b)** dargestellt. In der Praxis werden diese Effekte beim Tiefziehen durch beheizte Werkzeuge ausgenutzt. Zusätzlich kann es zu einer Beeinflussung des Reibkoeffizienten durch die Erwärmung von Werkstoffbestandteilen, wie z. B. Harzen und Lignin, kommen.

---

Der Einfluss der Feuchte ist bei zahlreichen Anwendungsfällen von Papier von entscheidender Bedeutung. Aufgrund der hygroskopischen Eigenschaften des Werkstoffs stellt sich ein Gleichgewichtszustand mit der Umgebungsluft ein. Verändert sich die Luftfeuchte, so verändert sich auch die Papierfeuchte. Der genaue Feuchtigkeitswert hängt dabei von der Zusammensetzung und Porenstruktur des Papiers sowie von der Klimahistorie ab (die Sorptionskurven von Papier zeigen eine Hysterese) [19]. Schwankende Feuchte verändert die Dicke und die mechanischen Eigenschaften des Papiers, sie kann daher im Umformprozess zu ungenügender Planlage, falsch dimensionierten Ziehspalten, einer Erhöhung der Beul- und Knickgefahr und damit Rissen und weiteren Defekten führen. In der Papierprüfung und der Erforschung von Papier-Tiefziehprozessen wird deshalb generell bei Normklima gearbeitet, in der Praxis sind aufgrund fehlender Klimatisierung allerdings oft nur Anpassungen in Befeuchtungsmenge (Vorkonditionierung des Materials), Werkzeugtemperatur bzw. Taktzahl möglich. Bei Ziehprozessen ist zudem zu beobachten, dass Verformungen der Ziehteile oft erst nach dem eigentlichen Umformprozess auftreten, da das Material nachträglich trocknet und u. U. schrumpft.

Nach Einschätzung der an diesem Projekt beteiligten Forschungsstellen gibt es ein erhebliches, bislang nicht ausgeschöpftes Potential für die Formgebung von Papierwerkstoffen, welches aufgrund fehlender Erkenntnisse zum Zusammenhang zwischen der Papierdehnbarkeit und der Feuchte bei gleichzeitig günstiger Einstellung des Spannungszustandes bisher nicht genutzt werden konnte.

---

## **2.2 Materialcharakterisierung und Beschreibung des Materialverhaltens von Papier**

---

### *Mechanische Papiereigenschaften*

Eine besondere Bedeutung kommt der Prüfung der mechanischen Eigenschaften von Papier zu. Allerdings beschränkt sich die Mehrzahl der vorliegenden Untersuchungen hierzu auf eine oder teilweise zwei Dimensionen. Aus den 1980er und 1990er-Jahren liegt eine Reihe von entsprechenden Veröffentlichungen vor, wobei das Thema auch ein Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten am PMV war.

---

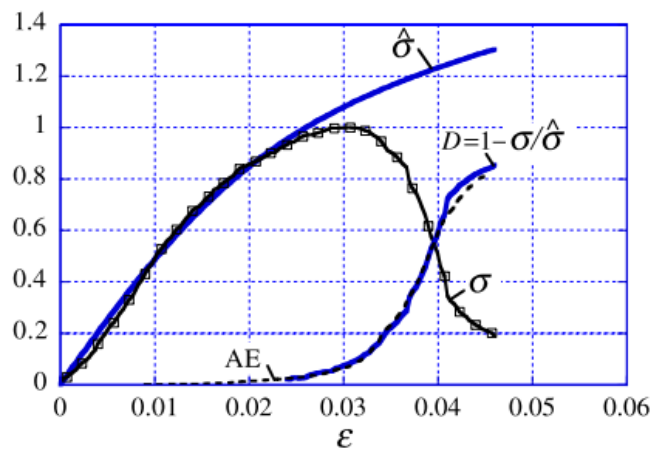
Belastet man Papier im einachsigen Zugversuch mit einer konstant ansteigenden Last, zeigt sich zuerst ein linearer Zusammenhang der auftretenden Spannungs-Dehnungsbeziehung. Führt man den Zugversuch fort, schließt sich hieran ein nichtlinearer Bereich an. Brecht [20] und später Paetow [21] teilten die auftretenden Dehnungen in elastische, plastische und visko-elastische Anteile auf. Paetow entwickelte das zweidimensionale, orthotrope Werkstoffgesetz zur Beschreibung des nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens inklusive der viskoelastischen Anteile unter Berücksichtigung der Querkontraktion [21]. Allgemein ist zudem zu sagen, dass Spannungs-Dehnungskurven von Papier eine Abhängigkeit von der Belastungsgeschwindigkeit zeigen.

Wolf fasst in seiner Dissertation 2005 [22] zusammen, dass nach diesen Arbeiten in den 80er- und 90er-Jahren auf dem Gebiet des Kraft-Verformungs-Verhaltens von Papier kaum weiter geforscht wurde. Er beschäftigte sich mit dem Scherschneiden von Papier und entwickelte eine empirische Versuchsmethode zur vollständigen Beschreibung des Kraft-Verformungs-Verhaltens in allen drei Dimensionen.

Xia präsentiert in [23] eine Beschreibung für das anisotrope Materialverhalten von dreilagigem Karton. Das Modell ist in der Lage, das Materialverhalten unter konstant ansteigender Last für die unterschiedlichen Anisotropie-Richtungen vorherzusagen. Des Weiteren beschreibt Xia in [24] ein Dekohäsionsmodell, um die Schichtablösung der einzelnen Papierlagen beim Rillen und Falten darzustellen. Ein Nachteil ist hierbei jedoch der große Umfang an zu bestimmenden Parametern.

Mäkelä und Östlund [25] gehen davon aus, dass für die praktische Anwendung von Materialmodellen diese über möglichst wenig zu bestimmende Parameter verfügen sollten. Sie präsentieren ein auf der Annahme der Volumenkonstanz basierendes Modell, welches in der Lage ist, das anisotrope Materialverhalten unter Zug zu bestimmen. Der Aspekt der Materialdegeneration wird hierbei nicht dargestellt. Isaksson geht bei der Beschreibung des Materialverhaltens in [26] einen Schritt weiter und berücksichtigt das Verhalten bis zum Bruch, basierend auf einem kontinuumsmechanischen Schädigungsmodell in Anlehnung an die Arbeiten von Lemaître [27, 28]. Ausgehend von der Annahme, dass der real tragende Querschnitt durch die Schädigung reduziert ist, kann die Spannung durch die effektiv wirkende Spannung ersetzt werden. Dies berücksichtigt die auftretende Materialdegeneration und dadurch die Abnahme der durch das Material aufnehmbaren Kräfte.

Isaksson nutzt in seinen Arbeiten [29, 30] die akustische Emissionsmessung (AE) zur Detektion des Schädigungsverhaltens. Hierbei wird davon ausgegangen, dass sich durch die Verformung und daraus resultierende Schädigung des Materials einzelne Fasern aus dem Netzwerk lösen, was zu einer Entspannung des entsprechenden Faserbereichs führt. Die schlagartige Entspannung kann wiederum als Schwingungssignal detektiert werden und erlaubt somit Aussagen über das Schädigungsverhalten. Isaksson zeigt, dass es möglich ist die Schädigung über AE zu bestimmen. Zur Extrapolation der ungeschädigten



**Abbildung 2-3:** Darstellung einer experimentell und einer theoretisch ermittelten Spannungs-Dehnungs-Kurve von TMP-Laborblättern, der mittels akustischer Emissionsmessung (AE) gemessenen, normalisierten Zahl an Ereignissen und der daraus berechneten homogenen Schädigungsvariablen  $D$  als Funktion der uniaxialen Dehnung (Isaksson, Gradin et al. 2006)

Spannungs-Dehnungsbeziehung ab dem Einsetzen der Schädigung nutzt er die Ansätze von Andersson und Berkyto [31]. **Abbildung 2-3** zeigt die Gegenüberstellung des experimentell ermittelten Spannungs-Dehnungsverlaufs  $\sigma$ , des berechneten Verlaufs des ungeschädigten Materials  $\hat{\sigma}$  und der Schädigungsevolution  $D$ .

Aus der Arbeit von Issakson [26, 29, 32, 33] geht hervor, dass Papierwerkstoffe zwei wesentliche Phänomene aufweisen: Plastizität und Schädigung. Durch deren Zusammenspiel kommt es zu einem komplexen Zusammenwirken einer Degradation der elastischen Festigkeitseigenschaften mit irreversiblen Verzerrungen.

Neben diesen phänomenologischen Ansätzen werden in anderen Arbeiten zur Beschreibung des Verformungszustandes von Papieren klassische Werkstoffmodelle empfohlen. Beispielsweise weisen Alava und Niskanen in [8]<sup>2</sup> auf die Vorteile eines visko-elastisch-plastischen Werkstoffgesetzes hin.

<sup>2</sup> S. 690 ff

---

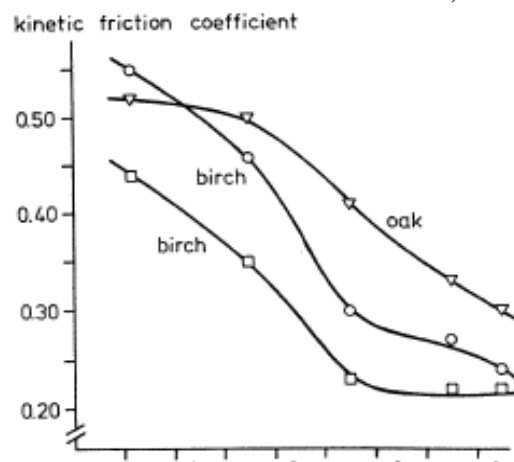
Diese Übersicht zeigt, dass sich bisher nur sehr wenige Autoren in wissenschaftlicher Tiefe mit dem Umformen von Papier und allgemeingültigeren Werkstoffgesetzen zur Beschreibung des Umformverhaltens beschäftigt haben. Auch hinsichtlich der Berücksichtigung anderer physikalischer Größen weisen bisherige Ansätze der Modellierung des Verhaltens von Papier noch erhebliche Defizite auf. So liefert Wolf [22] Modellgesetze und Messdaten für das Scherschneiden von Papieren im Normzustand. Diese können allerdings nicht ohne Weiteres auf das Umformen übertragen werden, da der Einfluss der Feuchte vollständig vernachlässigt ist. Aktuelle Arbeiten befassen sich mit Werkstoffgesetzen für Papiermaterialien, die in Übereinstimmung mit den Bilanzsätzen der Thermodynamik stehen. Allerdings bleibt auch hier der Einfluss der Feuchte in den numerischen und experimentellen Arbeiten, wie z. B. in [8] beschrieben gänzlich unberücksichtigt.

Bei der wissenschaftlichen Betrachtung von Umformprozessen ist generell zu beachten, dass Laborblätter in der Blattebene isotrop sind, industriell gefertigte Papiere dagegen aufgrund der während der Blattbildung eingebrachten Faserorientierung i. d. R. stark anisotrope Eigenschaften aufweisen. Um praxisnahe Auslegungsstrategien für Umformprozesse mit komplexen Geometrien zu entwickeln, ist folglich eine Erweiterung der Stoffgesetze für anisotrope Papiere erforderlich.

Hinsichtlich der etablierten Spannungs- und Dehnungsgrößen ist abschließend darauf hinzuweisen, dass im Stand der Technik der Mechanik von Papieren vorzugsweise mit der technischen Dehnung gearbeitet wird. Dagegen bevorzugt man in der Umformtechnik das logarithmische Verzerrungsmaß für die Beschreibung der auftretenden großen Dehnungen. Hierbei wird die Dehnung auf die aktuelle Länge der gedehnten Probe bezogen:  $\epsilon' = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$ . Da neben der Schaffung von umformgerechten Papiersorten vor allem der Umformprozess betrachtet werden soll, wird im Rahmen dieses Projekts das logarithmische Verzerrungsmaß als Größe gewählt. Unterschiede in der Darstellungsweise der Verzerrungsmaße im Projektbericht treten dann auf, wenn die originale Wiedergabe des Standes der Technik als nützlich erscheint.

### *Reibung*

Reibung ist eine entscheidende Einflussgröße für den Umformprozess. Sie stellt den Zusammenhang zwischen der Kraft im Niederhalterbereich und der resultierenden Kraft gegen Relativbewegung dar. Die Reibung beeinflusst somit entscheidend das Nachfließen des Werkstoffs in die Umformzone und damit das Rissverhalten und die Faltenbildung [5]. Bekannt ist, dass sich die Reibung in Abhängigkeit von den Prozessgrößen Temperatur, Flächenpressung und Reibgeschwindigkeit, aber auch den Materialgrößen wie Faserart, Fasermorphologie, Feuchte und chemischen Zusätzen, verändern kann. Zudem können Schmiermittel, wie z.B. Talkum oder Wachse, eine beeinflussende Rolle spielen. Back [1] hat den Einfluss von Flächenpressung und Temperatur auf den Reibkoeffizienten ausgewählter Werkstoffe ermittelt. Er zeigte, dass steigende Temperatur zu einer Abnahme des Reibkoeffizienten bei Birken- und Eichenhalbzellstoffen führt (**Abbildung 2-4**). Einen Einfluss von Flächenpressung und Papierglätte konnte er, im Gegensatz zu [34] nicht finden. Insgesamt ist der Wissensstand auf dem Gebiet der Reibung hinsichtlich der wirkmedienbasierten Papierumformung unzureichend. Es müssen daher Verfahren gefunden werden, um die Reibung in Abhängigkeit der genannten Größen zu charakterisieren.



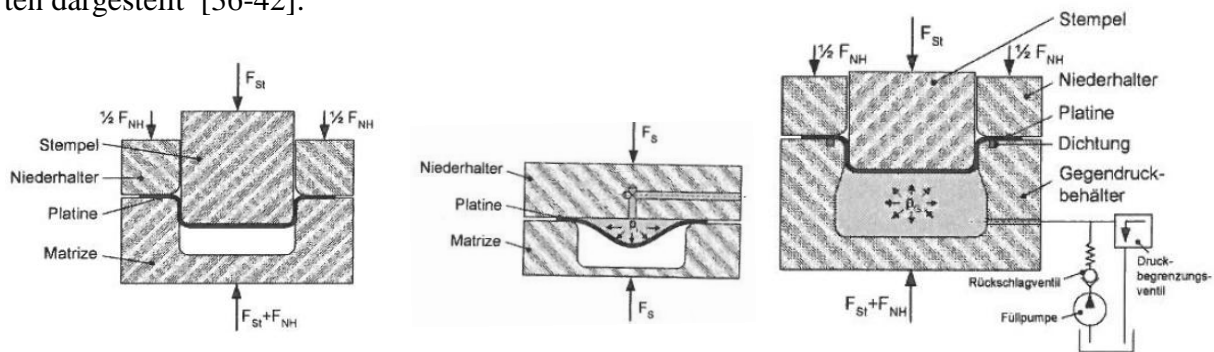
**Abbildung 2-4:** temperaturabhängiger Reibkoeffizient zwischen Wellenpapier aus 3 verschiedenen Papierfabriken und beheizter Stahl-Folie. Zwei Papiere sind aus NSSC (Neutral Sulfite Semi Chemical)-Birkenfasern, eines aus NSSC-Eichenfasern [1]

### 2.3 Umformprozess (Tiefziehen von Papier)

Umformprozesse werden laut Lange [35] in Blech- und Massivumformung unterteilt. Blechumformung beschreibt hierbei die Überführung eines flächigen Rohteils in eine dreidimensionale Form. Die Anwendung findenden Verfahren sind hierbei in die Gruppen der Zugdruckumformung (DIN 8485) und Zugumformung (DIN 8585) einzuteilen. Untergruppen dieser Verfahren sind u.a. die Verfahrensvarianten Tiefziehen, Tiefziehen mit Wirkmedien und Streckziehen. Die Verfahren mit Wirkmedieneinsatz bieten besonders gute Voraussetzungen,



um Erzeugnisse mit hoher Maß- und Formgenauigkeit in wenigen Fertigungsoperationen rationell und reproduzierbar herzustellen. Dies wird in verschiedenen wissenschaftlichen Arbeiten dargestellt [36-42].



**Abbildung 2-5:** *Verfahrensvarianten zum Tiefziehen:*

(1) *Tiefziehen*, (2) *hydromechanisches Tiefziehen*, (3) *wirkmedienbasiertes Tiefziehen* [39]

Tiefziehen mit flüssigen Wirkmedien lässt sich in verschiedene Verfahren unterteilen, die entweder einen Ziehstempel (wirkmedienunterstützte Umformverfahren) oder eine Matrize (wirkmedienbasierte Umformverfahren) als Formspeicher verwenden (**Abbildung 2-5**). Bei wirkmedienbasierten Umformverfahren ersetzt das Wirkmedium das aktive Werkzeugelement. Hierzu zählen u.a. die Verfahren der Hochdruckblechumformung (HBU), und Innenhochdruckumformung (IHU) [43]<sup>3</sup>. In der Regel erfolgt hierbei die Umformung rein druckgebunden. Sie kann aber durch Werkzeugelemente mit einer Zwangsbewegung überlagert werden, um so den Werkstofffluss und den Spannungszustand zu beeinflussen.

<sup>3</sup> S. 347



Betrachtet man den Tiefziehprozess von Papier, so zeigt sich, dass sich an dem in der Praxis standardmäßig eingesetzten Maschinen- und Werkzeugkonzept in den letzten Jahrzehnten nicht viel verändert hat. Der Prozess ähnelt dem aus der Metalltechnik bekannten Tiefziehen. Üblicherweise werden weggebundene Pressen mit beheizten Werkzeugen eingesetzt, bei denen der Niederhalter in einem experimentell ermittelten Abstand fixiert wird (**Abbildung 2-6**). Um ein Versagen des Tiefziehbauteils im Bodenbereich zu verhindern, wird in der Regel mit einem Gegenhalter gearbeitet. Die Arbeit von Scherer (1932) [44, 45] kann noch immer als Anleitung für Papier-Tiefziehprozesse gesehen werden. Laut Scherer ist das Auftreten und Verpressen von Falten im Niederhalterbereich charakteristisch für Papier-Tiefziehteile.

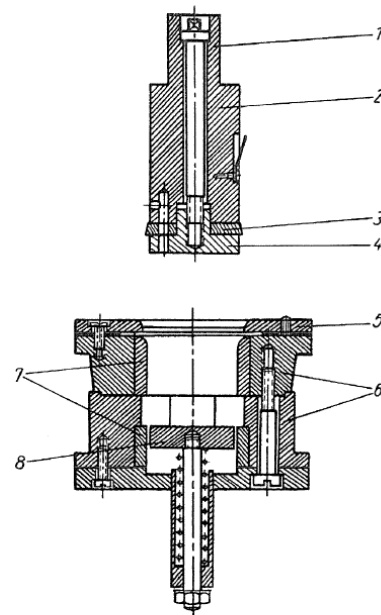


Bild 121 Ziehwerkzeug  
 1 Einspannzapfen 2 Stempelhalter 3 Schnittring 4 Ziehstempel  
 5 Faltenhalterplatte 6 Ziehmantel 7 Ziehbüchse 8 Bodenplatte

**Abbildung 2-6:** Umformwerkzeug  
 1 Einspannzapfen; 2 Stempelhalter;  
 3 Schnittring; 4 Ziehstempel; 5  
 Faltenhalterplatte; 6 Ziehmantel;  
 7 Ziehbüchse; 8 Bodenplatte

Neuere Untersuchungen zum konventionellen Tiefziehen von Papier sind von Hauptmann am Institut für Verarbeitungsmaschinen und Mobile Arbeitsmaschinen der TU Dresden durchgeführt worden. In seiner Dissertation [46] kann er für ein Beispielmateriale zeigen, dass durch angepasste Konzepte in der Umformtechnik, wie geregelte Niederhalter, eingestellte Temperaturunterschiede im Werkzeug und angepasste Stempelgeschwindigkeiten, eine deutliche Verbesserung der Formteilqualität erzielt werden kann. Er führt aus, dass der Kraftverlauf am Stempel zur Überwachung der Formteilqualität dienen kann. Eine Beschreibung der Umformung mit Hilfe von Simulationen und eine Optimierung des Werkstoffs für die Umformung fanden jedoch bisher nicht statt.

Erste Untersuchungen zur wirkmedienbasierten Umformung von Papier wurden von Östlund [47] durchgeführt. Außerdem beschäftigten sich das PMV und das PtU in einem vorangegangenen Projekt ausführlich mit den Grundlagen des Verfahrens [48]. Im Unterschied zu den Darmstädter Forschungsstellen verzichtet Östlund auf einen aktiven Niederhalter. Als Wirk-

---

medium für die Umformung wird Öl verwendet, wobei das Fluid vom Papier durch eine Membran getrennt ist.

Es zeigt sich allgemein, dass eine erfolgreiche Umformung nicht nur von der Dehnbarkeit abhängt, sondern dass das Material gleichzeitig eine gewisse Festigkeit besitzen muss. Östlund [7] zeigt, dass ein Feuchtegradient im Material, kombiniert mit einer beheizten Form, die Umformfähigkeit deutlich verbessert. Hauptmann [4] erreicht über einen Temperaturgradienten bessere Umformergebnisse. Diese bisherigen Forschungsergebnisse sind ausschließlich empirisch an Demonstrator-Umformgeometrien ermittelt worden. Auch in der Industrie wird üblicherweise bei erhöhter Temperatur und Feuchte umgeformt, wobei die entsprechenden Einstellungen auf Erfahrungen beruhen. Rückschlüsse auf die optimale Gestaltung von Umformprozessen lassen sich jedoch nur ziehen, wenn die physikalischen Zusammenhänge näher beleuchtet werden. Dies war wesentlicher Teil der Motivation für das Projekt „Wirkmedienbasiertes Umformen von Papier“.

---

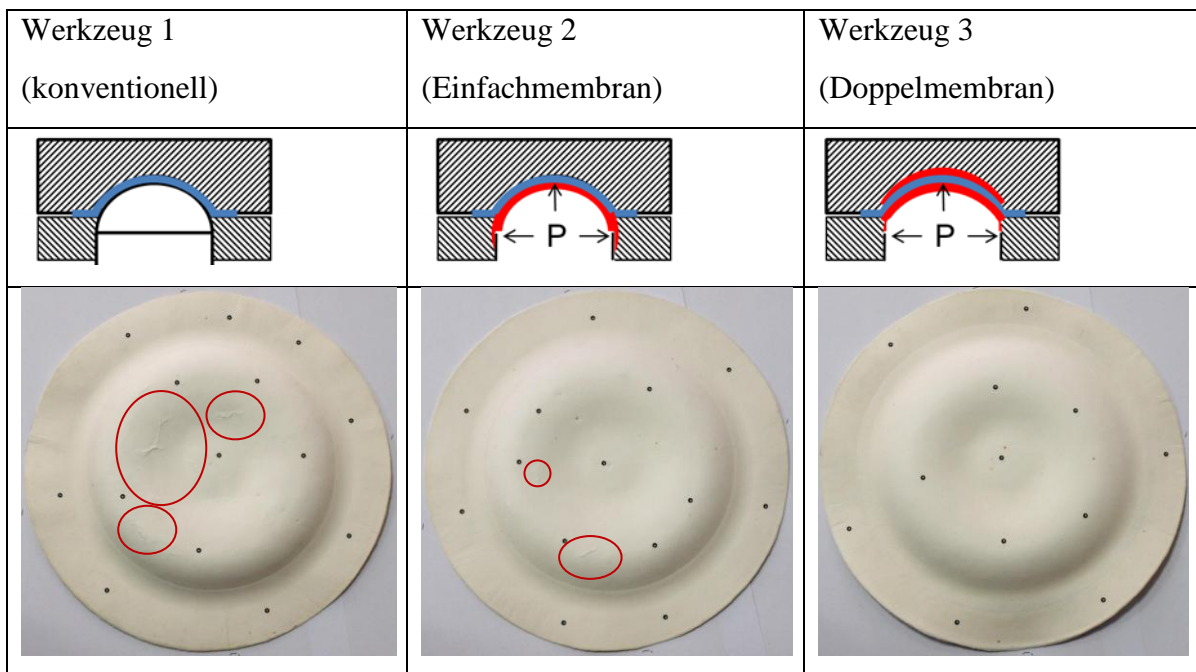
## **2.4 Eigene Arbeiten**

---

Im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) geförderten Forschungsprojekts konnten PMV und PtU Erfahrungen mit der Auslegung wirkmedienbasierter Umformprozesse für Papier gewinnen. Hierbei konnten die prinzipiellen Möglichkeiten der simulationsgestützten Auslegung von Tiefziehteilen aus Papier durch eine erste systematische Betrachtung des Umformprozesses vom Rohstoff bis zum Produkt gezeigt werden.

Im Rahmen des Projekts wurde deutlich, dass die Unterstützung des Papiers während der Umformung durch eine gezielte Drucküberlagerung vorteilhaft für den Umformprozess ist. Zur erweiterten Materialcharakterisierung fand eine Anpassung eines für Metallwerkstoffe üblichen Charakterisierungsverfahrens, des Tiefungsversuchs, an Papier statt. Dieser erlaubt es, die Materialparameter unter demselben Belastungszustand, wie er in der späteren Umformung auftritt, experimentell zu bestimmen. Der Aufbau des Versuchsstandes wurde in [49] detailliert dargestellt und die Testergebnisse wurden mit denen aus Standard-Zugversuchen verglichen. Die wesentliche Erkenntnis des Vergleichs war, dass Papier bei mehrdimensionaler Belastung in der Lage ist, höhere Dehnungen auszuhalten. Dies ermöglicht bei entsprechender Belastung prinzipiell höhere Umformgrade.

Aufbauend auf den Ergebnissen wurde eine Versuchsmaschine für die wirkmedienbasierte Umformung im Bereich bis zu 10 bar Umformdruck aufgebaut. Damit war es möglich, erste rotationssymmetrische Bauteile zu produzieren. Durch die Verwendung eines aktiven Niederhalters konnte in [50] gezeigt werden, dass es prinzipiell gelingt, faltenfreie tiefgezogene Bauteile aus Papier herzustellen. Des Weiteren wurde anhand der Ergebnisse der Materialcharakterisierung eine erste Auslegung des Prozesses in Bezug auf die Prozessgrenzen erstellt. Es zeigte sich, dass das prinzipielle Materialverhalten in Simulationen erfasst werden kann. Dennoch ergaben sich Unterschiede zwischen Simulation und Experiment im Bereich der Rückfederung und bezüglich der genauen Prozessgrenzen. Als dominante Einflussgrößen sind hier das verwendete Materialmodell und die schwierige Ermittlung der genauen Prozessparameter (besonders der Reibung) zu nennen. Insgesamt wurden anhand der Untersuchungen wesentliche wissenschaftliche Grundlagen für einen industriellen Einsatz des Verfahrens geschaffen. Es zeigte sich aber auch, dass diesem bisher noch das Fehlen genauerer Untersuchungen und Bewertungen der möglichen Materialmodelle sowie einer genauen Ermittlung der Prozessgrößen entgegenstehen.



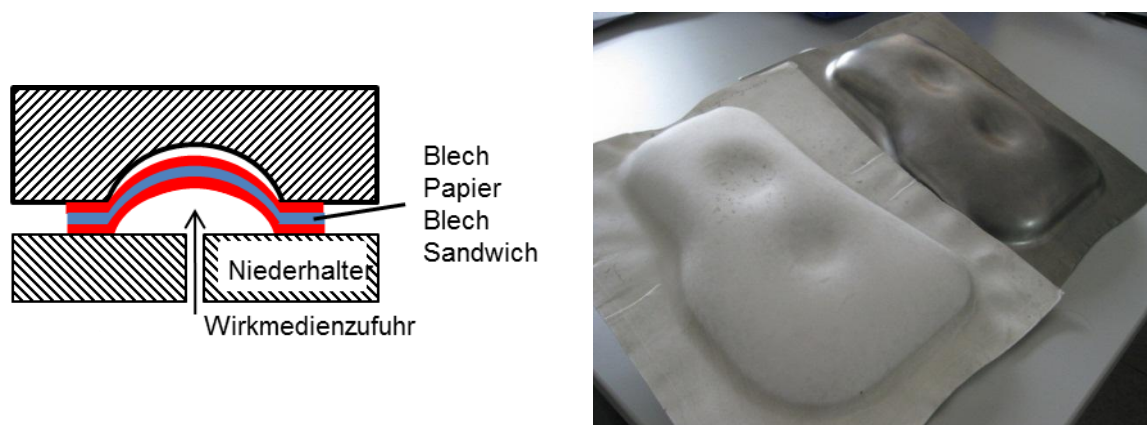
**Abbildung 2-7:** Prozessvergleich verschiedener Umformverfahren.

Vergleicht man die Verfahrensvarianten der konventionellen Umformung, der wirkmedienbasierten Umformung mit einer Membran und der wirkmedienbasierten Umformung mit Ge-


gendruck anhand einer Beispielgeometrie, wie in **Abbildung 2-7** gezeigt, so werden die Vorteile der wirkmedienbasierten Umformung deutlich. Die gezeigten Formteile wurden aus Laborblättern mit einem Durchmesser von 200 mm hergestellt. Oberflächendefekte (Risse) sind rot umkreist. Die Papierronde ist in blau, die Kunststoffmembranen sind in rot dargestellt. Die Rissneigung des Bauteils nimmt von dem Tiefziehen mit festen Stempeln hin zum wirkmedienbasierten Tiefziehen ab. Das gezeigte Werkzeugkonzept ermöglicht Umformungen bis maximal 10 bar. Die Werkzeuge verfügten über keinerlei Heizvorrichtung und das Wirkmedium wurde nur in der Umformzone eingesetzt. Der Niederhalterbereich war mit starren Werkzeugen ausgeführt.

Schon in dieser einfachen Konfiguration sorgten wirkmedienbasierte Umformverfahren für eine deutliche Verbesserung des Umformergebnisses. So konnte das Auftreten von Falten im Niederhalterbereich und insbesondere von Rissen in Bereichen mit hohen Umformgraden verhindert werden, indem die Umformung im Doppelmembranverfahren stattfand. Bei den anderen Verfahren traten dagegen sowohl Risse (rot markiert) als auch Falten auf.

Durch eine erste gezielte Untersuchung der Einflüsse der Faserart, der Fasermorphologie, der Faserlänge, des Flächengewichts und der Feuchte auf die Fließkurve und damit das plastische Werkstoffverhalten konnte in [48] der Werkstoff Papier für den Umformprozess optimiert werden. Es zeigte sich dabei, dass die Bruchdehnung nicht als alleinige Bewertungsgrundlage für die Eignung im Umformprozess ausreicht. Der E-Modul und das Verfestigungsverhalten während der Umformung scheinen weitere Einflussgrößen für die Schaffung umformtechnisch optimierter Papiere zu sein.



**Abbildung 2-8:** Wirkmedienbasierte Umformung mit globaler Werkstoffunterstützung, Abmessungen der Formteile: ca. 32 x 26 cm.

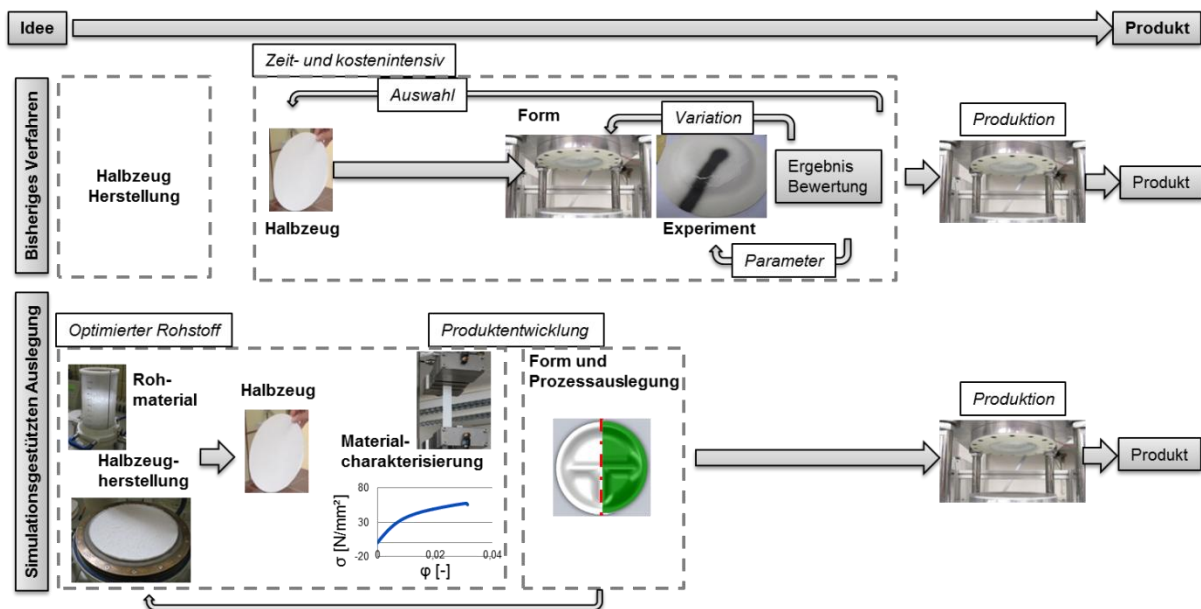


---

Des Weiteren konnte unter Zuhilfenahme von Blechen auf bestehenden Versuchsanlagen zur Metallumformung das Potential der wirkmedienbasierten Papierumformung gezeigt werden. Durch je ein Blech auf der Ober- und Unterseite der Papierprobe wurde eine Drucküberlagerung realisiert. Hiermit wurde zugleich ein mitfließender Niederhalter generiert. Dies erlaubte die Produktion des in **Abbildung 2-8** gezeigten Formteils. Dieses hat eine asymmetrische Geometrie mit ungleichmäßigem Materialfluss und einen für Papier sehr hohen Umformgrad von über 15 %. Es demonstriert die Möglichkeiten des wirkmedienbasierten Umformens.

### 3 Zielsetzung und Lösungsweg

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, das Anwendungsspektrum von Tiefziehverfahren für den Werkstoff Papier zu erweitern. Hierzu bedarf es der Schaffung rohstoff-, prozess- und auslegungsseitiger Grundlagen. Die zurzeit für Papier übliche experimentelle und damit kostenaufwendige Vorgehensweise bei der Entwicklung neuer Produkte soll durch die gezielte Untersuchung der Bereiche Material, Werkstoffcharakterisierung, Prozessauslegung und Simulation verbessert werden. Vorbild hierfür ist die bereits für Metallwerkstoffe angewandte Entwicklungsmethodik. **Abbildung 3-1** verdeutlicht den Stand bei der Entwicklung neuer Geometrien aus Papier und den an Metallwerkstoffe angelehnten Entwicklungsprozess.



**Abbildung 3-1:** Heutige Vorgehensweise bei der Entwicklung von Papier-Umformteilen und beabsichtigter, an das Vorgehen bei Metallen angelehnter Entwicklungsprozess.

Das Forschungsvorhaben soll das in der Metalltechnik verbreitete und in bisherigen eigenen Arbeiten als sehr erfolgversprechend erkannte wirkmedienbasierte Tiefziehen von Papierwerkstoff- und prozessseitig weiterentwickeln, so dass die Grundlagen für eine industrielle Anwendung gelegt werden. Im Vordergrund stehen experimentelle Untersuchungen zum wirkmedienbasierten Umformen von Papier sowie die Schaffung umformgerechter Papiersorten. Außerdem wird eine numerische Abbildung des Materialverhaltens im Umformprozess angestrebt.

---

Das materialimmanente Verhalten wird mit dem Prozess durch die Prozessparameter Temperatur der Werkzeuge, Feuchte des Materials, Kraft im Niederhalterbereich, resultierende Reibkräfte und auftretenden Belastungszustände verknüpft. Hierbei treten durch die Umformung unterschiedliche Belastungszustände und Werkzeug-Papier-Interaktion auf. Besonders für die Abbildung des Materialverhaltens durch Simulationen ist es entscheidend, dies beschreiben zu können. Da es für die Modellierung des Umformverhaltens von Papieren erst wenige Untersuchungen gibt, werden entsprechende Grundlagen auf Basis kontinuumsmechanischer Ansätze geschaffen. Vergleiche zwischen unterschiedlichen Materialmodellen zur Beschreibung des Umformverhaltens und realen Ergebnissen aus der Materialcharakterisierung und der Umformung ermöglichen hierbei eine Bewertung der Eignung der jeweiligen Modelle.

Anknüpfend an bisherige Forschungsergebnisse sind rohstoffseitig die Auswirkungen von Papierfeuchte, Faserorientierung, Faserbehandlung (mechanische und enzymatische Verfahren), Temperatur, Curl, Anisotropie und Schrumpfung auf das Umformergebnis zu betrachten. Abschließend sollen anhand eines Anwendungsbeispiels (Demonstrators) die Möglichkeiten der Prozessauslegung in Verbindung mit optimierten Halbzeugen dargestellt werden. Der im weiteren Projektverlauf geplante Vergleich zwischen konventionellen und wirkmedienbasierten Umformverfahren dient der Darstellung der jeweiligen Prozessvorteile und soll die Möglichkeiten der erwähnten Prozessauslegung und Materialoptimierung für beide Verfahren zeigen.

### **3.1.1 Angestrebte Forschungsergebnisse**

Von dem Vorhaben wird die Schaffung von rohstoff-, prozess- und simulationsseitigen Grundlagen für die Umformung von Papier erwartet, welche den industriellen Einsatz des nachwachsenden Rohstoffes Papier in der Verpackungstechnik und in verwandten Branchen steigern.

Insbesondere umfasst dies:

- Identifikation geeigneter Versuchsabläufe zur Bestimmung erforderlicher Materialparameter.
- Labormethoden zur Herstellung optimierter Papierwerkstoffe.
- Kenntnisse zur Übertragbarkeit bestehenden Wissens aus der Blechumformung auf Papierwerkstoffe.



- 
- Auslegungsmethode geeigneter Werkzeugsysteme für die wirkmedienbasierte Umformung von Papier.
  - Messmethoden und Maßnahmen zur Verbesserung des Reibverhaltens von Oberflächen in der Papierumformung.
  - Ökonomische Bewertung des wirkmedienbasierten Tiefziehens von Papierbauteilen.
  - Kennzeichnung der Zusammenhänge zwischen der Papierdehnbarkeit und sowohl dem sich durch Schrumpfung, Faserkräuslung und -orientierung einstellenden Spannungszustand, als auch dem feuchtigkeitsinduzierten Aneinandervorbeigleiten von Fasern im belasteten Papiernetzwerk.
  - Numerische Abbildung des Materialverhaltens im Umformprozess.
  - Demonstratorgeometrien zur Aufzeigung der Möglichkeiten des konventionellen und des wirkmedienbasierten Umformens von Papier.

### **3.1.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse**

Das Tiefziehen von Papier führt bisher ein Nischendasein in der Produktion einfacher Zieh-  
teilformen. Eine höhere wirtschaftliche Bedeutung des Tiefziehens von Papier wäre möglich,  
wenn verbesserte Materialien sowie Materialgesetze, die das Kraft-Verformungsverhalten von  
Papier unter ein- und mehrachsiger Belastung vom initialen Verformungsbereich aus bis hin  
zum Versagenszustand für alle drei Hauptrichtungen vollständig beschreiben, vorhanden wä-  
ren [22].

Ziel des Projekts ist es, das Prozessverständnis des wirkmedienbasierten und des konventio-  
nellen Umformens von Papier zu erhöhen sowie vorteilhafte Rohstoffzusammensetzungen  
und Produktionsverfahren zu beschreiben. Außerdem soll ein Simulationsmodell erstellt wer-  
den, das zu einer schnellen Überprüfung der Herstellbarkeit von tiefgezogenen Papiergeome-  
trien herangezogen werden kann. Entsprechende Designmöglichkeiten würden das Spektrum  
der wirtschaftlich herstellbaren tiefgezogenen Papierformen erheblich erweitern und so eine  
nachhaltige, erneuerbare Alternative zu Kunststoffverpackungen darstellen. Weitere neue  
Anwendungsfelder sind insbesondere im Möbel- und Automobilbau denkbar. Die Erkenntnis-  
se bezüglich vorteilhafter Rohstoffzusammensetzungen sowie Produktionsverfahren sind für  
Hersteller von Ziehpappe und -karton ebenso wie für Produzenten zahlreicher anderer Papier-  
sorten von Interesse.



---

### 3.2 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Um das Projektziel zu erreichen, wird der Umformprozess unter Berücksichtigung des Rohstoffs und des Materialverhaltens in Zusammenarbeit zwischen dem PMV sowie dem PtU betrachtet.

Es wird ein iterativer, systematisch empirischer Ansatz gewählt. Anfangs werden zwei Arbeitspakete parallel bearbeitet. Eines beinhaltet eine Materialoptimierung für die Umformung, das andere die Weiterentwicklung des vorhandenen wirkmedienbasierten Umformprozesses sowie die Erstellung eines Vergleichswerkzeugs für das konventionelle Tiefziehen.

Im Rahmen der Materialoptimierung werden durch eine Parametervariation die Auswirkungen des Fasercurls, chemischer Zusätze, der Art des bei der Herstellung eingebrachten Spannungszustandes sowie der Anisotropie auf den Umformprozess bestimmt. Außerdem findet eine ausführliche Materialcharakterisierung an Referenz-Laborblättern und an einem industriellen Referenzkarton statt. Dies dient dazu, erste Ergebnisse für die Materialbeschreibung und die Auslegung einer Versuchsgeometrie bereitzustellen. Der wirkmedienbasierte Umformprozess wird weiterentwickelt und prozessseitig angepasst.

Der Einfluss der Prozessgrößen auf das Umformergebnis wird in experimentellen Untersuchungen bestimmt. Diese umfassen neben den Niederhalterkräften, der Temperatur und dem Umformdruck auch die Reibkräfte. Die Reibkräfte werden in Abhängigkeit der wesentlichen Einflussgrößen (Art der Reibpartner, Feuchte des Materials, Flächenpressung, Temperatur, Geschwindigkeit) ermittelt.

Aufbauend auf den gewonnenen Daten wird ein Materialmodell zur Entwicklung und Auslegung eines Umformprozesses für eine Demonstrator-Geometrie herangezogen.

---

## 4 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

---

Im Folgenden werden die durchgeführten Untersuchungen angelehnt an die im Forschungsvorhaben definierten Arbeitspakete dargestellt. Zusätzlich erfolgt eine Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse in den einzelnen Arbeitspaketen. Die hier dargestellte Reihenfolge der Kapitel steht jedoch nicht in direktem Zusammenhang mit der Chronologie der durchgeführten Tätigkeiten.

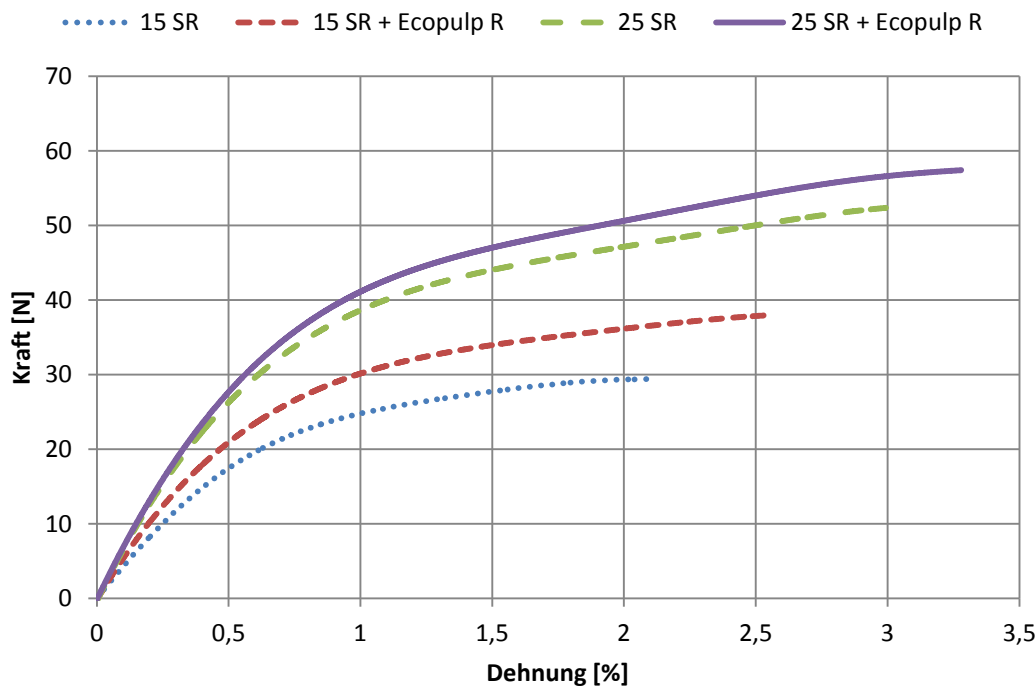
---

### 4.1 Variation der einflussreichsten Materialparameter

---

Die Variation der einflussreichsten Materialparameter umfasste insbesondere Versuche zur hochkonsistenten Faserbehandlung mit Laborkneter und -disperger, die Herstellung von Laborblättern mit unterschiedlichem Gehalt an Kaolin, modifiziertem Kaolin, Calciumcarbonat, Melasse und kationischer Stärke sowie Versuche zur Beschichtung verschiedener Papiere mit unterschiedlichen Wachsen. Auf diese wird im Folgenden näher eingegangen.

#### **Einfluss von Mahlung und enzymatischer Behandlung auf die mechanischen Papiereigenschaften**



**Abbildung 4-1:** Kraft-Verformungs-Verläufe zur Veranschaulichung des Einflusses von Mahlung und enzymatischer Behandlung auf die mechanischen Papiereigenschaften.

Aus **Abbildung 4-1** ist zu entnehmen, dass eine enzymatische Behandlung des Faserstoffs die Bruchdehnung erhöht und für eine Steigerung der Bruchkraft sorgt.

Behandelt wurde ungemahlener sowie auf 25 SR gemahlener Kiefernulfat-Zellstoff. Zunächst erfolgte über 20 min eine Zerfaserung im Hobart-Mischer bei 40 °C, pH 8 und 25 % SD. Anschließend wurde der Stoff 20 min bei 45 °C geknetet.

Die zugrundeliegenden Zusammenhänge auf Faserebene für die beobachteten Effekte konnten bisher nicht erklärt werden. Es konnte keine Veränderung des Mahlgrads beobachtet werden. Auch mit dem optischen Faseranalysegerät „Fiberlab“, welches basierend auf optischen Messungen und anschließender Bildanalyse eine Vielzahl von Informationen zur Fasermorphologie zur Verfügung stellt, waren keine signifikanten Unterschiede zwischen den enzymatisch behandelten und den unbehandelten Faserstoffen messbar (

**Tabelle 4-1**). Lediglich bei der Faserwandstärke ist eine leichte Zunahme durch das Enzym zu erkennen.

Laut Hersteller [51] sorgen die verwendeten Endo-Glucanasen dafür, dass die Faseroberfläche geöffnet wird und dass Feinstoffe und Hydrokolloide entfernt werden. Ein Einfluss auf den Feinstoffgehalt konnte nicht festgestellt werden, eine Öffnung der Faseroberfläche käme allerdings als Erklärung für die höheren Festigkeitswerte in Frage, da sie die Bindungsfähigkeit der Fasern erhöht. Dies muss nicht zwangsläufig mit einer mit dem Fibrelab erfassbaren Geometrieänderung der Fasern einhergehen.

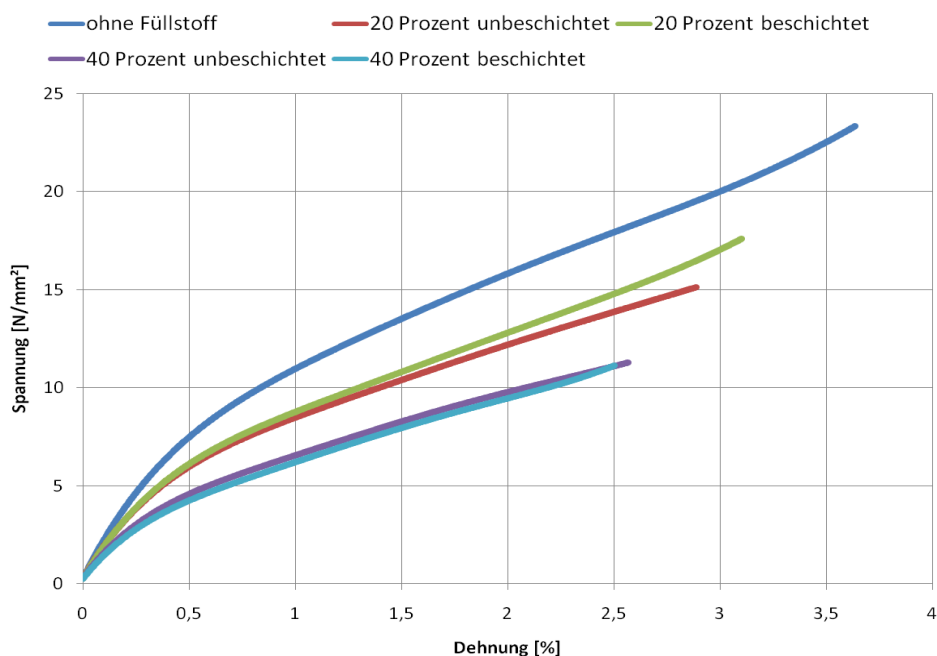
**Tabelle 4-1:** Fiberlab-Messdaten zu den Enzymversuchen

		Kisa 15 SR		Kisa 15 SR + Ecopulp R	
		vor Kneten	nach Kneten	vor Kneten	nach Kneten
mittlere arithm. Faserlänge	mm	1,06	0,84	1,14	0,86
mittlere längengew. Faserlänge	mm	2,09	1,72	2,1	1,74
mittlere massengew. Faserlänge	mm	2,63	2,28	2,61	2,33
Faserbreite	µm	25,3	23,8	25,5	24,1
Faserwandstärke	µm	7,7	8,3	7,9	8,4
Curl	%	21,47	24,76	22,48	24,78
Faserquerschnitt	µm <sup>2</sup>	411,4	404	431,7	403,8
Fibrillierung	%	3,7	3,5	3,6	3,5
mittlerer arithm. Feinstoffgehalt	%	29,47	31,35	24,75	28,63
mittlerer längengew. Feinstoffgeh.	%	2,88	3,97	2,28	3,54



		Kisa 25 SR		Kisa 25 SR + Ecopulp R	
		vor Kneten	nach Kneten	vor Kneten	nach Kneten
mittlere arithm. Faserlänge	mm	0,81	0,69	0,84	0,67
mittlere längengew. Faserlänge	mm	1,72	1,52	1,73	1,44
mittlere massengew. Faserlänge	mm	2,32	2,13	2,34	2,07
Faserbreite	µm	23,8	22,9	23,9	23,2
Faserwandstärke	µm	7,9	8,4	8,1	8,5
Curl	%	18,45	21,45	19,82	21,12
Faserquerschnitt	µm <sup>2</sup>	394,2	392,3	399,5	388,9
Fibrillierung	%	3,9	3,9	4,0	4,1
mittlerer arithm. Feinstoffgehalt	%	31,87	32,44	28,52	31,98
mittlerer längengew. Feinstoffgeh.	%	4,21	2,17	3,65	5,21

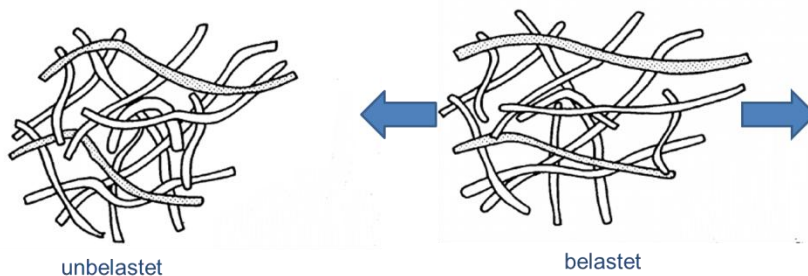
Ebenfalls ersichtlich ist, dass in Standard-Zugversuchen kein signifikanter Unterschied zwischen beschichteten und unbeschichteten Füllstoffen auftrat. Umgeformt bei erhöhter Temperatur zeigten die beschichteten Füllstoffe jedoch Vorteile (s. u.).



**Abbildung 4-2:** Kraft-Verformungs-Verläufe zur Veranschaulichung des Einflusses von Füllstoffzugabe auf die mechanischen Papiereigenschaften.

### **Einfluss hochkonsistenter Faserbehandlung auf das Umformverhalten von Papier.**

Da eine hohe Bruchdehnung die Umformbarkeit von Papier positiv beeinflusst, wurde experimentell untersucht, wie sich diese steigern lässt. Aus der Literatur [52-54] ist bekannt, dass gekräuselte Fasern unter bestimmten Umständen die Bruchdehnung von Papier positiv beeinflussen können (vgl. **Abbildung 4-3**). Hochkonsistente Faserbehandlungen – am PMV stehen dazu aus früheren AiF-finanzierten Projekten ein Kneteter und ein Disperger zur Verfügung – steigern gezielt die Faserkräuselung.



**Abbildung 4-3:** Modellvorstellung eines unbelasteten und belasteten Fasernetzwerks aus gekräuselten Fasern [55]

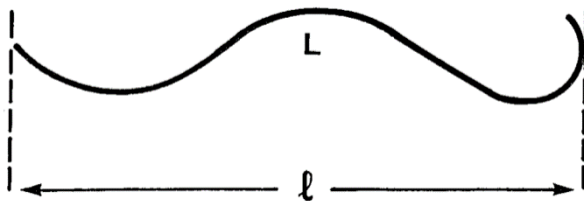
In den Versuchen wurde der Einfluss der hochkonsistenten Faserbehandlung auf die Fasergeometrie und die sich einstellenden mechanischen Eigenschaften von Papier untersucht. Die Geometrie der Fasern wurde mithilfe optischer Faseranalyse im Kajaani FiberLab ermittelt. Die mechanischen Eigenschaften von Papier aus diesen Fasern wurden im einachsigen Zugversuch und durch Tiefziehversuche bewertet. Für die Versuche wurden gemahlener und ungemahlener Kiefern-/Fichten-Sulfatzellstoff sowie gemahlener Linters verwendet.

Das Programm JMP 8 der Firma SAS Institute wurde genutzt, um eine statistische Versuchsplanung der Knetversuche durchzuführen. Verwendet wurde ein Versuchsplan nach „L18 Chakravarty-Design“ [56]. Variiert wurden die Stoffdichte mit 20 %, 30 % und 40 %, die Temperatur mit 30 °C und 80 °C, die Knetdauer mit 10 min, 20 min und 30 min und die Drehzahl mit 30 U/min und 60 U/min bei einer Füllmenge von jeweils 330 g Faserstoff.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass der verwendete Kneteter eine starke Faserkräuselung bei gleichzeitig starker Faserkürzung bewirkt [57]. Der Curl-Index, also das Verhältnis der

projizierten Länge und der Länge entlang der Mittellinie der Faser (vgl. **Abbildung 4-4**), konnte bei ungemahlenem Stoff von 17,8 % auf 25,9 %, bei vorher gemahlenem Stoff von 17,5 % auf 23,9 % gesteigert werden. Ein positiver Einfluss auf die Bruchdehnung von Papier war jedoch nicht erkennbar, vielmehr fielen Bruchdehnung und E-Modul mit steigender Knetdauer, Stoffdichte und Temperatur ab. Dieser Effekt ist aufgrund der auftretenden Faser-

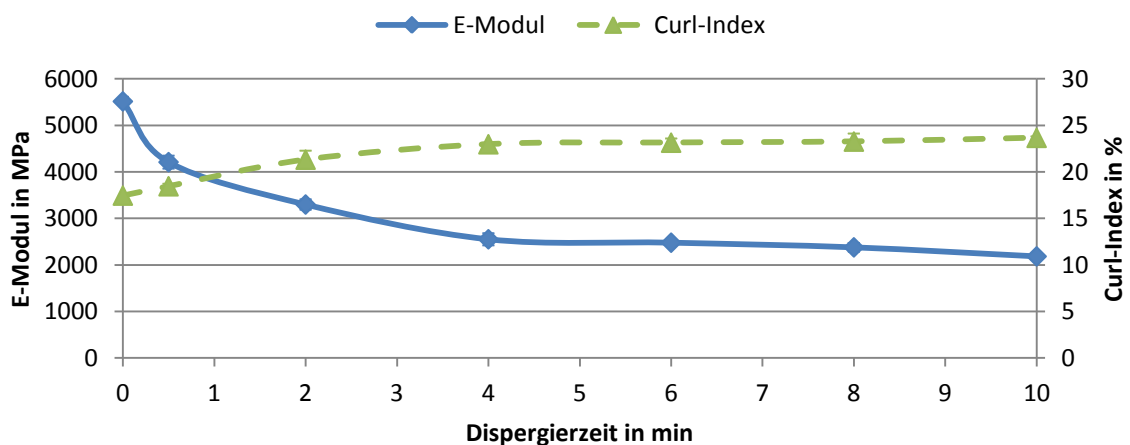
kürzung erwartbar.



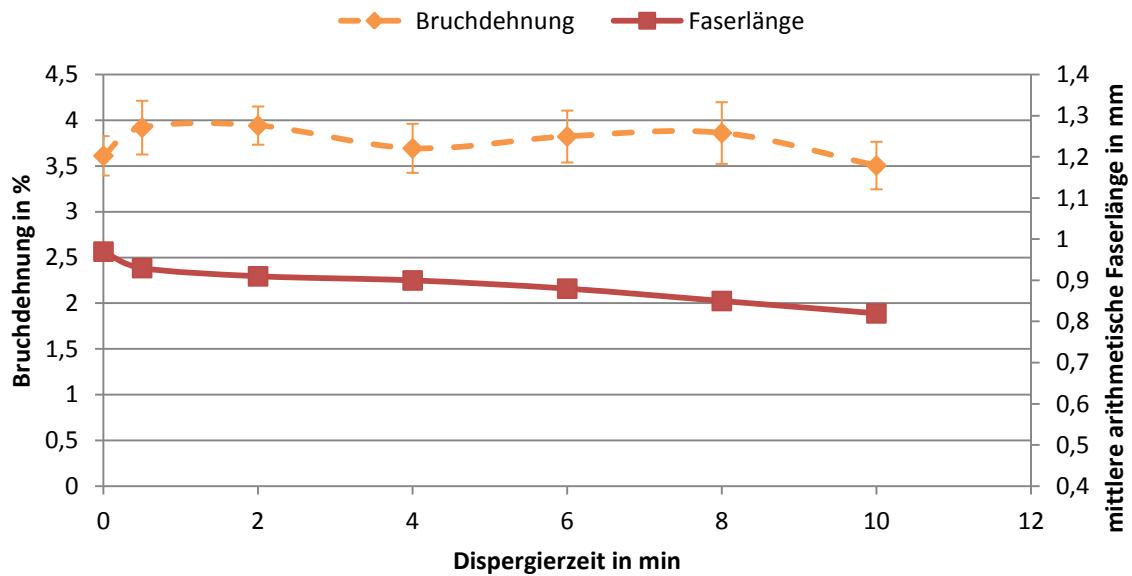
$$CURL = \left( \frac{L}{l} - 1 \right) * 100\%$$

**Abbildung 4-4:** Länge entlang der Mittellinie ( $L$ ) und projizierte Länge ( $l$ ) einer Faser [55]

Die Faserbehandlung im Disperger bewirkte hingegen eine starke Faserkräuselung bei wesentlich geringerer Faserkürzung. In **Abbildung 4-5** ist deutlich zu erkennen, dass mit steigendem Curl-Index der E-Modul abnimmt. Vergleicht man **Abbildung 4-5** mit **Abbildung 4-6**, so kann lediglich die Aussage getroffen werden, dass die Bruchdehnung von der Dispergierzeit abhängt. Dabei scheint eine kurze Dispergierung von bis zu zwei Minuten eine maximale Bruchdehnung einzustellen. Ein direkter Zusammenhang zwischen dem Curl-Index und der Bruchdehnung ist nicht zu erkennen.



**Abbildung 4-5:** Gebleichter Kiefernulfatzellstoff, gemahlen, bei 25% Stoffdichte und 900 U/min im Disperger behandelt [57]



**Abbildung 4-6:** Gebleichter Kiefernulfatzellstoff, gemahlen, bei 25% Stoffdichte und 900 U/min im Disperger behandelt [57]

Die Versuche mit Linters konnten aufgrund starker Schwankungen der Bruchdehnung, welche sich vermutlich auf inhomogene Faserverteilung innerhalb der Laborblätter zurückführen lassen, leider keine aussagekräftigen Ergebnisse liefern.

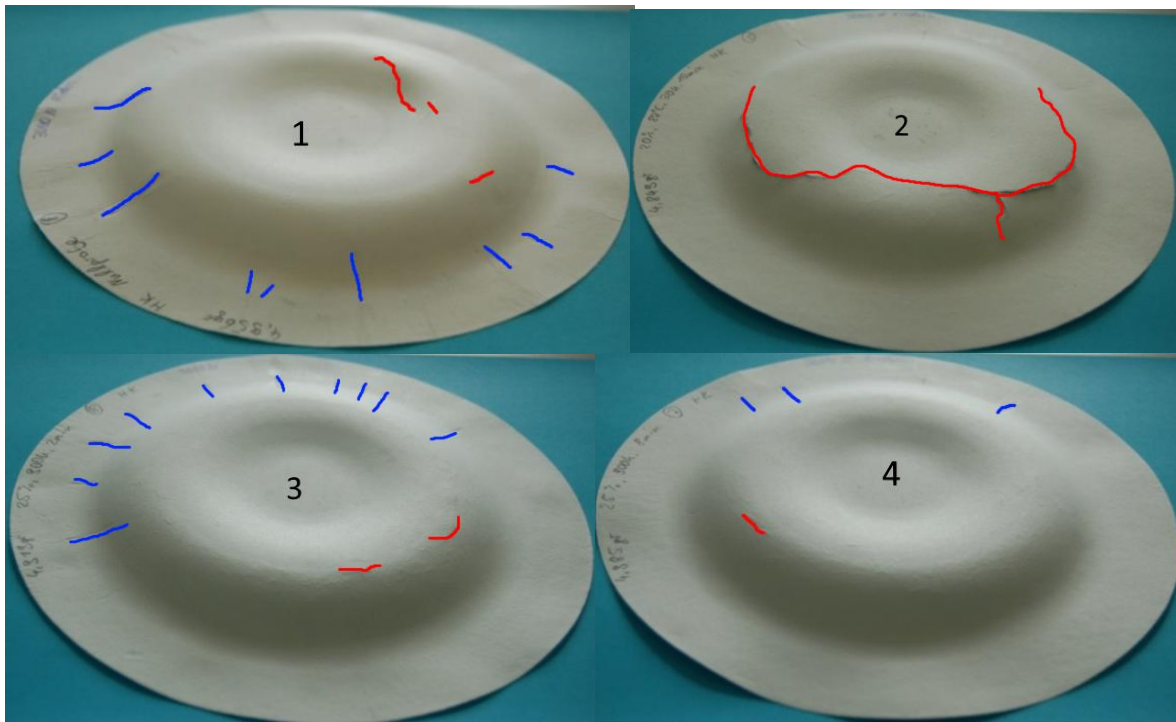
**Tabelle 4-2:** Übersicht über die Eigenschaften der untersuchten Proben (die angegebenen Werte sind die arithmetischen Mittelwerte der Einzelversuche) [57]

Behandlungsart	Versuch Nr.	Bruchdehnung in %	E-Modul in MPa	Curl-Index in %
gemahlen	1	3,61	5516	17,5
gemahlen + geknetet	2	2,65	2192	23,2
gemahlen + 2 min dispergiert	3	3,94	3301	21,3
gemahlen + 8 min dispergiert	4	3,86	2380	23,3

Abschließend wurden ausgewählte Laborblätter am PtU in Tiefziehversuchen untersucht (

**Tabelle 4-2** und **Abbildung 4-7**). Dabei wurde der positive Einfluss Dispergierung auf das Umformverhalten von Papier bestätigt. Blätter aus gemahlenem Zellstoff (1) zeigten deutliche Anrisse und starke Faltenbildung am Rand. Eine zusätzliche Knetbehandlung (2) führte zu großen Rissen. Die Faltenbildung auf der Risseite der Blätter war gering, auf der hierzu abgewandten Seite sind deutliche Falten zu erkennen. 2 Minuten Dispergierzeit (3) führte zu

rissfreien Formteilen, jedoch mit deutlicher Faltenbildung. 8 Minuten Dispergierzeit (4) senkten die Faltenbildung wesentlich. Starke Faserkräuslung verbesserte somit unabhängig von der Bruchdehnung das Umformverhalten, einhergehend mit einem niedrigeren E-Modul. Weitergehende Versuchsergebnisse finden sich in [57].



*Abbildung 4-7: Ergebnisse der Versuche zum Einfluss von Kneten und Disperger auf das Tiefziehergebnis in der in*

*Tabelle 4-2 angegebenen Reihenfolge [57]. Risse und Anrisse sind rot, Falten blau markiert.*

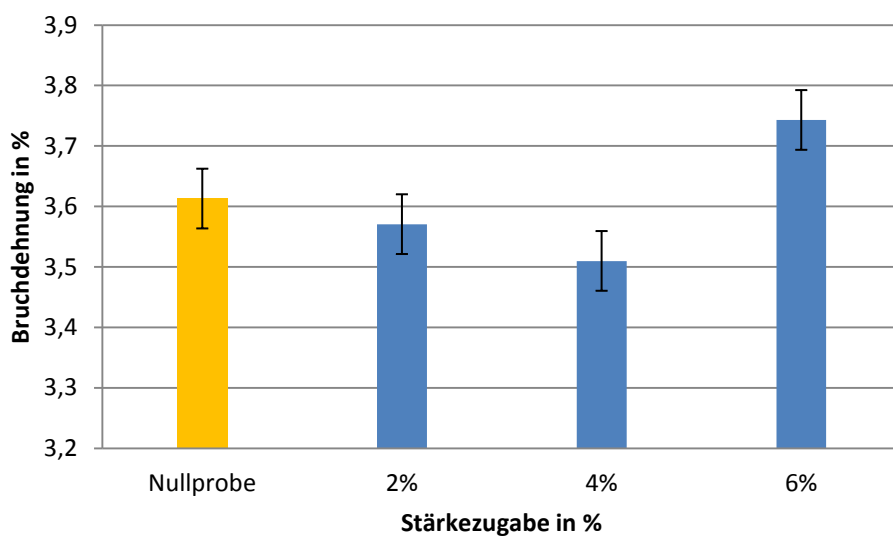
### **Einfluss von Füllstoffen, Additiven und Beschichtungen auf das Umformverhalten von Papier**

Anhand von Laborblättern wurde der Einfluss von Kaolin, modifiziertem Kaolin und Calciumcarbonat sowie Melasse und kationischer Stärke auf das Umformverhalten von Papier untersucht. Melasse verbesserte die Bruchdehnung der untersuchten Laborblätter leicht, selbiges war bei einer hohen Stärkezugabe zu beobachten (**Abbildung 4-8**). Die untersuchten Füllstoffe erwiesen sich leider als nicht tauglich zur Verbesserung der Umformeigenschaften (vgl. **Abbildung 4-9** sowie nächster Abschnitt). Zwar zeigten sich in Ansätzen Verbesserungen,

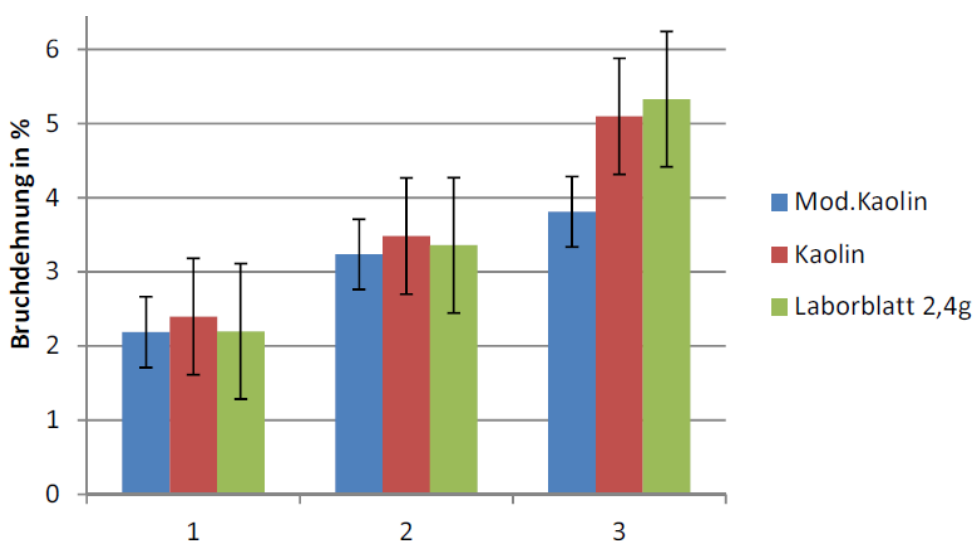


dies ging jedoch mit einer erheblichen Schwächung der mechanischen Eigenschaften einher. Das modifizierte Kaolin, welches auf die Masse bezogen mit 5 % Gleitmittel (eine Carbon-säure) beschichtet war, zeigte bessere Umformergebnisse als das unbeschichtete. Weitergehende Versuchsergebnisse finden sich in [58].

Die Beschichtung mit Wachsen zeigte einen starken Einfluss auf das Reib- und das Umformverhalten. Hierauf wird im Abschnitt „Betrachtung des tribologischen Systems Papier-Werkzeug“ näher eingegangen.



**Abbildung 4-8:** Einfluss von Stärkezugabe auf die Bruchdehnung von Laborblättern [58]



**Abbildung 4-9:** Vergleich der Bruchdehnungen von Laborblättern ohne Füllstoffe sowie mit modifiziertem bzw. Standard-Kaolin bei unterschiedlichen Versuchsbedingungen: (1): 0 % Feuchte, 110 °C; (2): 5 % Feuchte, 23 °C; (3): 15 % Feuchte, 23 °C [58].

---

## 4.2 Erweiterte Charakterisierung der Materialeigenschaften vor, während und nach der Umformung

---

Das umfangreichste Arbeitspaket befasste sich mit der Charakterisierung verschiedener Materialeigenschaften. Hierzu gehörten u.a. die Erweiterung eines bestehenden Zugversuchsstands, um Zugversuche bei erhöhter Temperatur durchführen zu können, die Umformung von Probelblättern bei erhöhter Temperatur und Feuchte, die Ermittlung des Einflusses modifizierter Füllstoffe auf die Umformeigenschaften von Papier und die Bewertung des Einflusses knetender und enzymatischer Faserstoffbehandlung auf die Schrumpfung, Dimensionsstabilität und mechanischen Eigenschaften des Papiers. Außerdem wurden während eines Aufenthalts am Forschungsinstitut Innventia in Stockholm Trocknungs- und Schrumpfungsversuche mit einem biaxialen Trockengestell durchgeführt und die hergestellten Laborblättern anschließend mittels Zugversuchen und optischer Verformungsmessung in xy- und xz-Ebene untersucht.

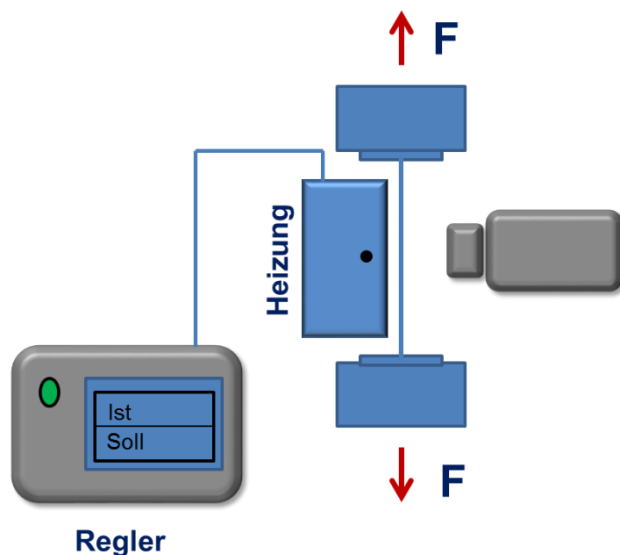
Weiterhin wurde ein von einem Projektpartner gestellter Referenzkarton (UD2) für zahlreiche Experimente herangezogen. Dies umfasste die Untersuchung des eindimensionalen Materialverhaltens im Zugversuch und des mehrdimensionalen Materialverhaltens im für Papier angepassten Tiefungsversuch. Dabei wurden die Materialorientierung, die Anisotropie, die Geschwindigkeitsabhängigkeit und das Rissverhalten berücksichtigt und deren Effekte analysiert. Außerdem wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Feuchteinstellungen auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten und den Versagenspunkt betrachtet und basierend darauf wurde das Materialverhalten analytisch approximiert. Der Zusammenhang zwischen einer Druckbeanspruchung in Dickenrichtung und den Dehnungszuständen wurde über eine taktile Erfassung der Dickenänderung sowie optische Messung der Oberflächenvergrößerung detektiert und mit einem üblichen, in der Umformung eingesetzten, metallischen Werkstoff (DC04, 1.0338) in Zusammenhang gebracht.

Im Rahmen einer Materialcharakterisierung nach der Umformung wurde der Werkstoff im konditionierten Zustand (Feuchte) bis zu einer bleibenden Dehnung beansprucht und anschließend bei Normklima getrocknet. In einer zweiten Belastungsstufe wurde der Werkstoff dann bis zum Versagen belastet. Gegenüberstellungen mit einstufigen Prüfungen bei den jeweiligen Konditionierungen bis zum Versagen dienen der Bewertung der Vorhersagbarkeit des Materialverhaltens.

Im Verlauf des Projekts zeigte sich, dass die Vorhersage des Materialverhaltens entscheidend für die Auslegung von Umformprodukten aus Papier ist. Aus diesem Grund wurden in Anlehnung an von Metallen bekannten Verfahren Grenzformänderungskurven für Papier ermittelt. Hierzu wurden unterschiedliche Versuchsaufbauten, wie der Kerbzugversuch, der Nakazima-Test und erweiterte Tiefungsversuche genutzt. Dies ermöglichte es, unterschiedliche Dehnungszustände im Versagenspunkt zu erzeugen. Diese wurden dann in ein speziell für Papier angepasstes Grenzformänderungsschaubild übertragen.

### Zugversuche bei erhöhter Feuchte und Temperatur

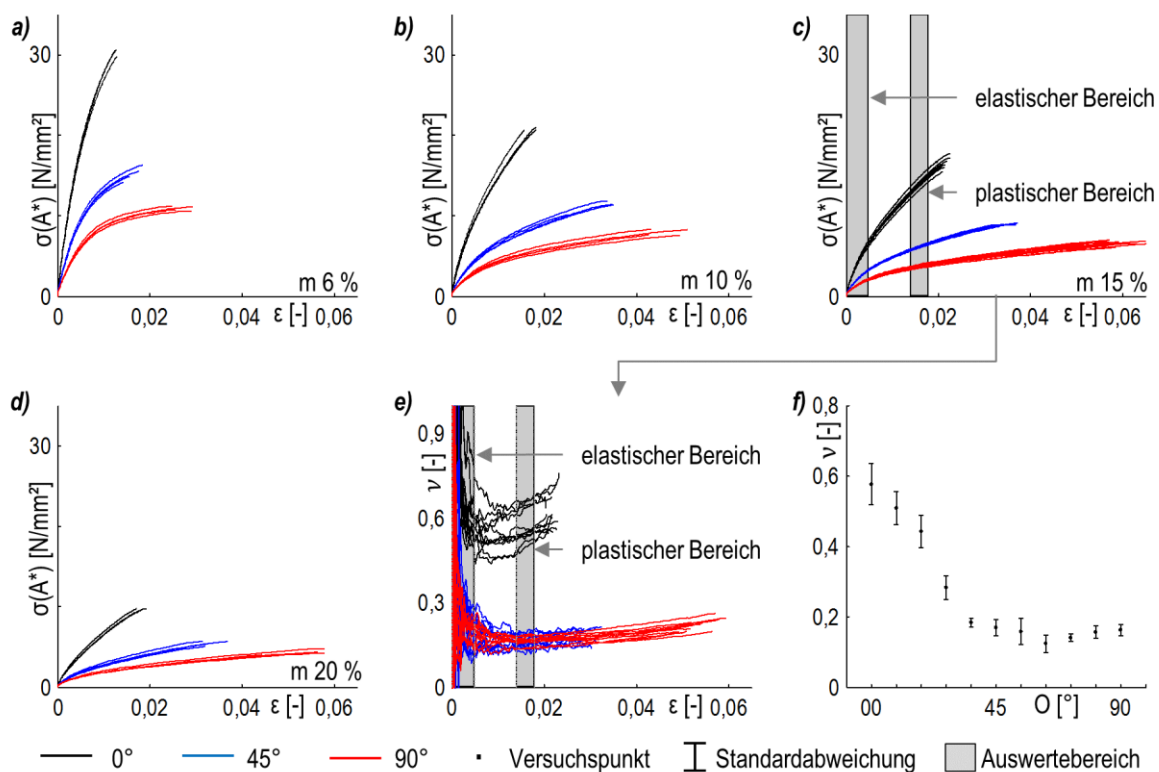
Die Auswirkungen unterschiedlicher Feuchteinstellungen auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten und den Versagenspunkt wurden erfasst und darauf basierend das Materialverhalten analytisch approximiert. Zur einheitlichen Befeuchtung der Proben wurde eine am PMV vorhandene automatisierte Sprühanlage angepasst. Zugversuche bei erhöhter Temperatur (bis zu 150 °C) konnten nach Erweiterung des Zugprüfstands wie schematisch in **Abbildung 4-10** gezeigt durchgeführt werden.



*Abbildung 4-10: Schematische Darstellung des Zugprüfstands zur Messung des Materialverhaltens bei erhöhter Temperatur*

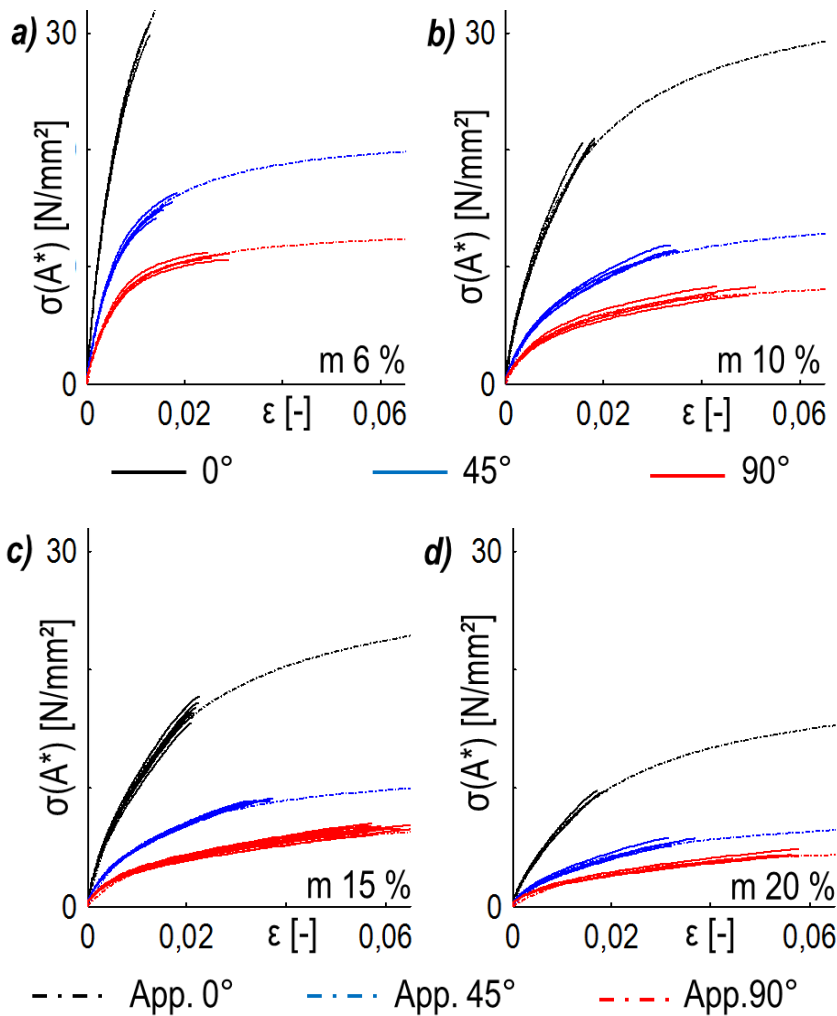
Die Konstruktion und Simulation der Heizung sind in [58] beschrieben. Der Einfluss der Feuchte konnte vollständig bestimmt werden. Temperaturerhöhungen im Zugversuch bewirkten aufgrund des Feuchteverlusts gleichzeitig eine Verringerung der Bruchdehnung (**Abbildung 4-9**). Messungen bei erhöhter Feuchte und Temperatur scheiterten daran, dass das Material während der notwendigen Aufheizphase im freien Bereich zwischen den Klemmen trocknete, sich dadurch die Zugfestigkeit gegenüber dem eingespannten Teil erhöhte und der Teststreifen somit immer an der Einspannung riss. Leider konnte auch mit einer Veränderung der Probengeometrie keine Abhilfe geschaffen werden.

Die Ergebnisse der Zugversuche mit verschiedenen Einstellungen sind in **Abbildung 4-11** dargestellt. Getestet wurden Proben mit Feuchtigkeiten von 6 %, 10 %, 15 % und 20 %. Ebenso sind die Proben in Faserorientierungen von 0 °, 45 ° und 90 ° entnommen worden. Wie generell für maschinengefertigtes Papier üblich zeigte sich in Faserrichtung (Orientierung 0 ° bzw. MD) die höchste Festigkeit, in 45 ° eine mittlere und quer zur Faserrichtung (90 ° bzw. CD) die geringste Festigkeit. Die Bruchdehnung verhält sich genau gegenläufig hierzu, sie ist in CD höher als in MD.



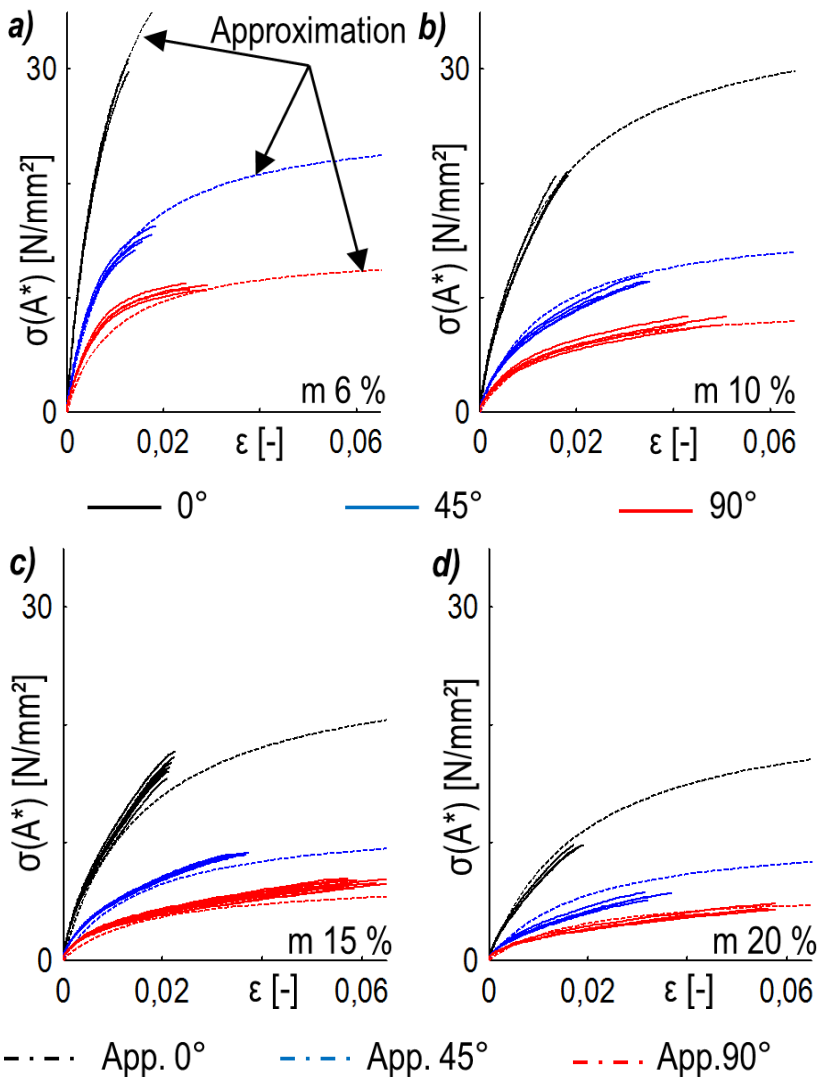
**Abbildung 4-11:** Zugversuche mit verschiedenen Feuchtigkeiten: a) 6 %; b) 10 %; c) 15%; d) 20%; e) Querkontraktionszahl über die Dehnung; f) plastische Querkontraktionszahl

**Abbildung 4-12** zeigt die Auswirkungen verschiedener Feuchtegehalte (6 % - a); 10 % - b); 15 % - c); 20 % - d)) auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten des untersuchten UD2-Kartons bei Raumtemperatur. Ebenso sind die Materialapproximationen nach Paetow [21] für die jeweiligen Feuchtegehalte und Orientierungen von 0 °, 45 ° und 90 ° zur Maschinenrichtung aufgetragen. Es zeigt sich, dass eine erhöhte Materialfeuchtigkeit wie erwartet zum Absinken der Zugspannung führt. Gegensätzlich dazu nimmt die maximal ertragbare Dehnung bis zum Feuchtegehalt von 15 % zu. Von einer Feuchtigkeit von 15 % bis 20 % sinkt die maximal ertragbare Dehnung wieder ab.



**Abbildung 4-12:** Spannungs-Dehnungs-Diagramme in Abhängigkeit von Feuchte und Orientierung sowie Approximation nach [21]

Dieses Verhalten der Spannungen und Dehnungen zeigt sich bei allen Faserorientierungen. Das Papier verhält sich erwartungsgemäß richtungsabhängig, wie aus der Literatur bekannt ist. Die Versuchsproben in Maschinenrichtung orientiert (0 °) besitzen die höchste Festigkeit, wohingegen sie die geringste ertragbare Dehnung aufweisen. Genau umgekehrt ist das Verhalten der Proben mit einer Orientierung in Querrichtung (90 °). Auch die Approximationen nach Paetow sind aufgetragen und zeigen einen Verlauf ähnlich der experimentellen Ergebnisse.

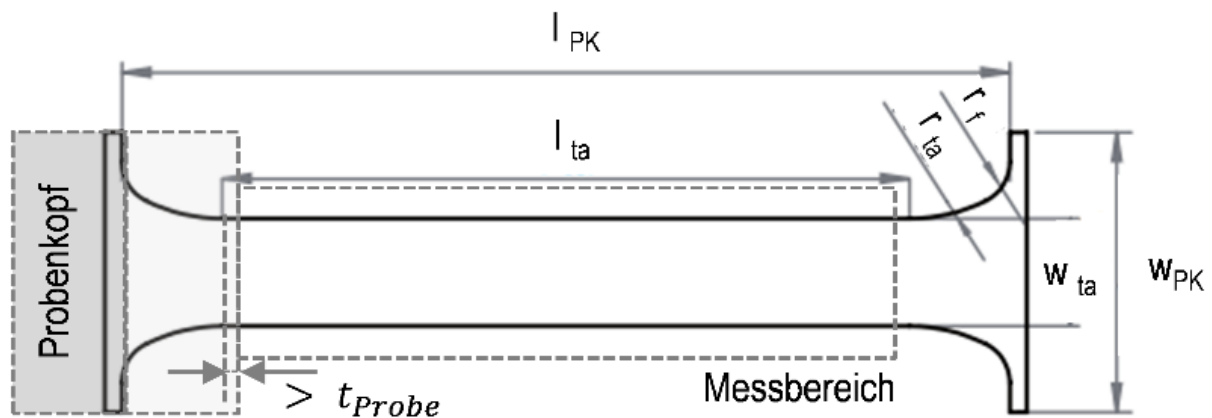


**Abbildung 4-13:** Gegenüberstellung der erweiterten Approximation mit den experimentellen Ergebnissen bei verschiedenen Feuchtigkeitsgehalten der Proben [59]

Basierend auf der Materialcharakterisierung im Zugversuch bei unterschiedlichen Feuchten konnte eine analytische Beschreibung des Materialverhaltens in Abhängigkeit von der Orientierung und der Feuchte hergeleitet werden. Diese erweitert das Modell nach Paetow dahingehend, dass eine Materialbeschreibung in beliebiger Entnahmerichtung und bei beliebiger Materialfeuchte im Bereich Gleichgewichtsfeuchte bis 20 % möglich ist. Dies wird über eine Einbeziehung des TSO-Tests ermöglicht. Somit sind für die Beschreibung des Materialverhaltens im Parameterraum von 0 ° bis 90 ° Orientierung und Feuchtegehalt von 6 % bis 20 % nur fünf Versuche notwendig, nämlich vier Zugversuche bei unterschiedlichen Materialfeuchten und ein TSO-Test. Die konkreten Ergebnisse der Approximation für die Orientierungen 0 °,

45 ° und 90 ° bei den unterschiedlichen Feuchtigkeiten 6 %, 10 %, 15 % und 20 % sind in den experimentellen Messdaten gegenübergestellt. Für eine detailliertere Beschreibung des Verfahrens sei an dieser Stelle auf die Dissertation von Huttel [59] verwiesen.

Zur Untersuchung des Materialverhaltens unter eindimensionaler Belastung fanden Zugversuche in verschiedenen Einstellungen (Faserorientierung und Feuchtigkeit) statt. Hierzu musste eine angepasste Zugprobengeometrie verwendet werden. Die aus der Metallcharakterisierung bekannte Geometrie eignet sich aufgrund der für Papier zu stark gekrümmten Übergänge nicht, da in diesen Bereichen ein ungewolltes Reißen im Zugversuch auftrat. **Abbildung 4-14** zeigt die angepasste Geometrie.



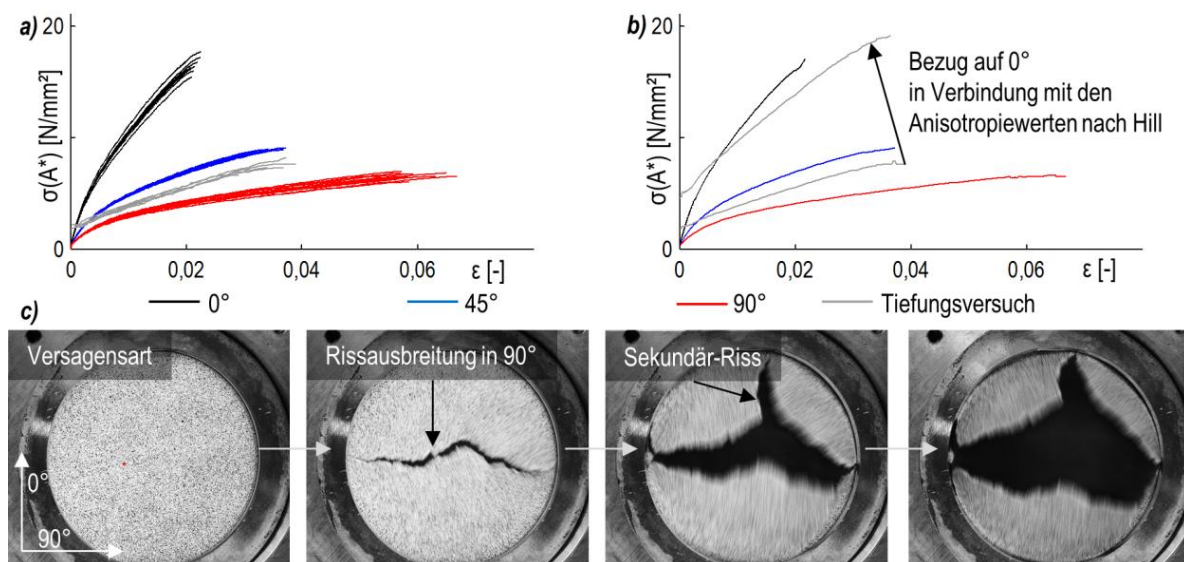
**Abbildung 4-14:** Für Papier-Zugversuche angepasste Probengeometrie mit:  $l_{ta} = 80$ ;  $l_{PK} = 103,3$ ;  $W_{ta} = 12,5$ ;  $W_{PK} = 40$ ;  $r_{ta} = 20$ ;  $r_f = 5$ ; alle Angaben in mm [59]

### Bestimmung des Materialverhaltens unter mehrdimensionaler Belastung

Neben dem eindimensionalen Materialverhalten im Zugversuch wurde das mehrdimensionale Materialverhalten im für Papier angepassten Tiefungsversuch untersucht. Dabei wurden die Materialorientierung, die Anisotropie, die Geschwindigkeitsabhängigkeit und das Rissverhalten berücksichtigt und deren Effekte analysiert (**Abbildung 4-15**).

Der angepasste Tiefungsversuch fand auf einer pneumatischen Presse statt. Zusätzlich wurde eine Folie zwischen Wirkmedium und Versuchsprobe eingefügt, um die Kraftübertragung zu gewährleisten. Ohne diese Folie würde die Druckluft durch das poröse Versuchsmaterial entweichen können. Der Probenradius beträgt 100 mm. Der freie Tiefungsbereich ist ebenfalls kreisförmig mit einem Radius von 60 mm. Zwischen dem äußeren Umfang und der freien

Fläche wird der Probenkörper wie beim hydraulischen Tiefungsversuch mittels einer Klemmsicke geklemmt. Hierdurch wird das Nachfließen des Werkstoff ins Zentrum der Probe verhindert. Für eine detaillierte Beschreibung des Versuchsaufbaus sei an dieser Stelle auf die Veröffentlichungen [60] und [61] verwiesen.



**Abbildung 4-15:** Pneumatischer Tiefungsversuch für Papier bei einer Feuchtigkeit von 15 %: a) und b) Spannungs-Dehnungs-Verhalten c) typisches Versagen im Tiefungsversuch [59]

Die Ergebnisse der Tiefungsversuche sind in **Abbildung 4-15 a)** im Spannungs-Dehnungs-Diagramm aufgetragen. Vergleichend sind ebenfalls die Zugversuchsverläufe in den Orientierungen  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $90^\circ$  für 15 % Feuchtigkeitsgehalt aufgetragen. Im biaxialen Versuch aufgenommene Spannungs-Dehnungs-Verläufe lassen sich zwischen den  $45^\circ$  und den  $90^\circ$ -Verläufen der Zugversuche einordnen. Auffällig ist, dass das Material im Tiefungsversuch weiter gedehnt werden kann, als im Zugversuch mit  $0^\circ$  Orientierung. Zusätzlich ist das Spannungsniveau geringer als bei den Zugversuchen mit  $0^\circ$  und  $45^\circ$  Orientierung, jedoch höher als das der Zugversuchsproben mit  $90^\circ$  Orientierung. Im Tiefungsversuch lassen sich Dehnungen von bis zu 0,04 bei einer Spannung von ca.  $8 \text{ N/mm}^2$  erreichen. Im Abbildungsteil b) sind die gemittelten Kurven dargestellt. Hier wurde zusätzlich die Übertragung der reinen ertragbaren Dehnung im biaxialen Tiefungsversuch auf den Zugversuch in  $0^\circ$  gemacht, wobei deutlich wird, dass diese größer als die im Zugversuch ist. Betrachtet man das Versagensverhalten während des Tiefungsversuchs, stellt sich eine Versagensart als besonders charakteristisch heraus. Trotz des sehr schnell eintretenden Risses ohne vorherige Anzeichen, lässt sich erkennen, dass sich primär ein Riss in  $90^\circ$ -Richtung ausbreitet. Dieser Riss findet



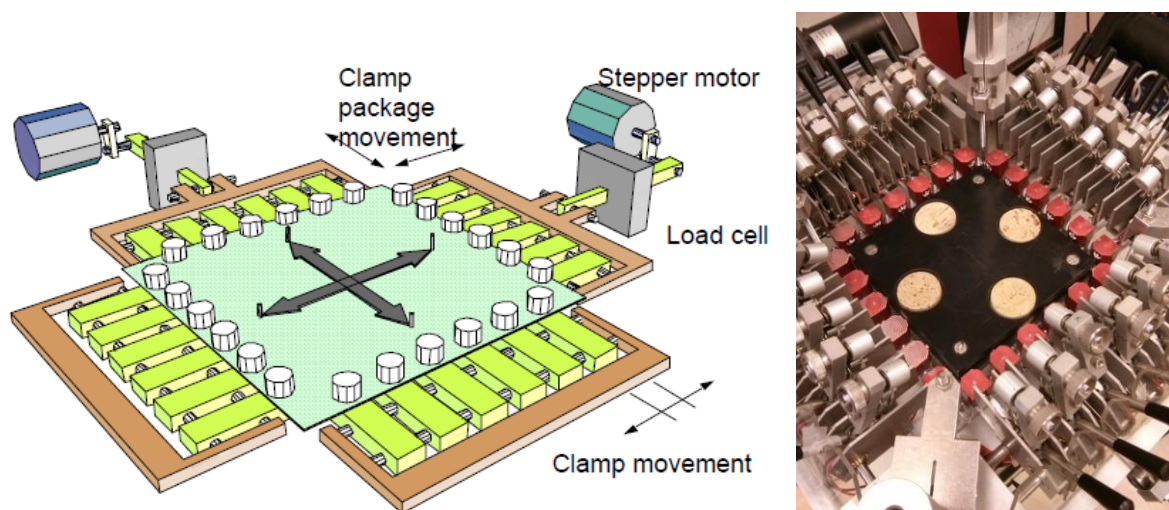
seinen Ursprung in der Dommitte, dem sogenannten Dompol. Obwohl die ertragbare Spannung in 0°-Orientierung höher liegt als quer dazu, reißt das Material anscheinend in dieser Richtung. Dieses Versagen könnte mit der Überschreitung der Dehnungsgrenze begründet werden. Die Entstehung des sekundären Risses in 0°-Orientierung verläuft ebenfalls ausgehend vom Dompol, jedoch später als der primäre Riss.

### Schrumpfungsversuche

Im Rahmen eines Forschungsaustausch beim Institut Inventia in Stockholm wurden Schrumpfungsversuche durchgeführt. Hierzu wurden Probelblätter aus unterschiedlich behandeltem Zellstoff (**Tabelle 4-3**) in einem biaxialen Trockengestell (**Abbildung 4-16**) unter verschiedenartiger Belastung getrocknet.

**Tabelle 4-3:** Übersicht der Zellstoffbehandlungen

Behandlung	Mahlung 120 kWh/t	Enzymbehandlung	Kneteter
<b>A</b>			
<b>B</b>	X		
<b>C</b>	X	X	
<b>D</b>	X		X
<b>E</b>	X	X	X
<b>F</b>	Behandlung mit Jokro-Mühle auf 25 SR		
<b>Versuchsbedingungen:</b> Mahlung mit Voith LR 40 Laborrefiner und Universal-Langfaser-Kegelgarnitur 1-30. Enzymbehandlung bei 25 % Stoffdichte, 40 °C und pH 8 mit 0,1 g/kg. Knetbehandlung 20 min bei 25 % Stoffdichte und 120 U/min.			



**Abbildung 4-16:** Biaxiales Trockengestell [62]

---

Es handelte es sich um gebleichten nordischen Kiefersulfatzellstoff, die Enzymbehandlung und das Kneten wurden wie oben beschrieben durchgeführt. Zur Versuchsdurchführung erfolgt zunächst die Herstellung der Laborblätter (in diesem Fall 100 g/m<sup>2</sup>) auf einem rechteckigen Blattbildner nach nordischem Standard SCAN-C 26:76. Das nasse Papier wird mittels jeweils sechs Klemmen im Trockengestell von allen vier Seiten fixiert. Diese sind so gelagert, dass sie sich seitlich verschieben können. An zwei gegenüberliegenden Seiten befinden sich Schrittmotoren, die mit einer Kraftmessung gekoppelt sind. Dies ermöglicht ein gezieltes Einstellen der Spannungen und Dehnungen über den Trockenprozess in der Papierebene. Die Trocknung kann durch eine unterhalb des Papiers angebrachte Heizplatte unterstützt werden. Im Wesentlichen wurden zwei verschiedene Versuchseinstellungen gefahren: freie Schrumpfung in beide Ebenenrichtungen sowie unterbundene Schrumpfung in y-Richtung bei freier Schrumpfung in x-Richtung.

**Abbildung 4-17** und **Abbildung 4-18** machen deutlich, dass die enzymatische Behandlung die Schrumpfung und die Bruchdehnung deutlich erhöhte, insbesondere bei hochkonsistent gekneteten Fasern. Bei freier Trocknung in beide Richtungen zeigten der unbehandelte und der mit der Jokro-Mühle gemahlene Zellstoff nur geringe Schrumpfung von ca. 2,5 % bzw. 2,8 % in jede Richtung. Die anderen untersuchten Stoffe schrumpften deutlich stärker, wobei insbesondere eine Zunahme der Schrumpfung durch die enzymatische Behandlung zwischen Zellstoff B und C zu beobachten war (**Abbildung 4-17**). Langsame Trocknung ohne Heizung verringerte die auftretende Schrumpfung. Verhinderung der Schrumpfung in eine Richtung führt zu einer stärkeren Schrumpfung in der anderen Richtung. Auch hier zeigt sich ein schrumpfungverstärkender Einfluss der enzymatischen Behandlung im Vergleich B zu C bzw. D zu E. Aus **Abbildung 4-18** ist ersichtlich, dass trotz der höheren Schrumpfung bei den gemahlenden Stoffen keine höhere Bruchdehnung aufgrund der Enzymbehandlung eintritt. Bei geknetetem Stoff tritt hingegen eine deutliche Erhöhung der Bruchdehnung auf (D zu E).

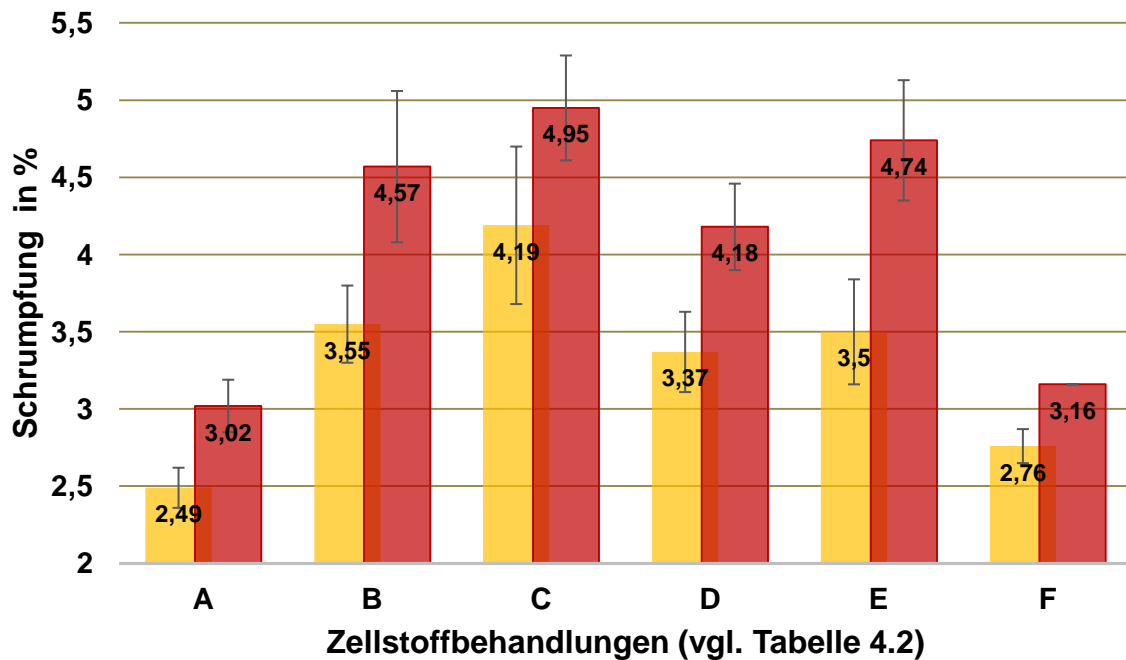


Abbildung 4-17: Prozentuale Schrumpfung in x-Richtung bei freier Trocknung in beide Richtungen (gelbe Balken) bzw. unterbundener Schrumpfung in y-Richtung (rote Balken).

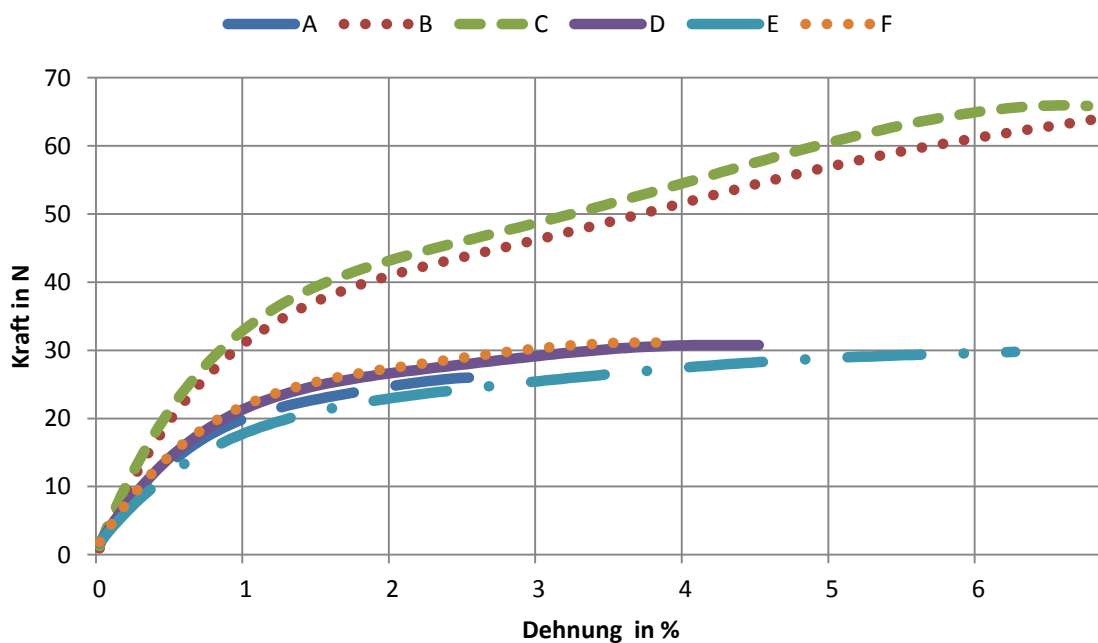
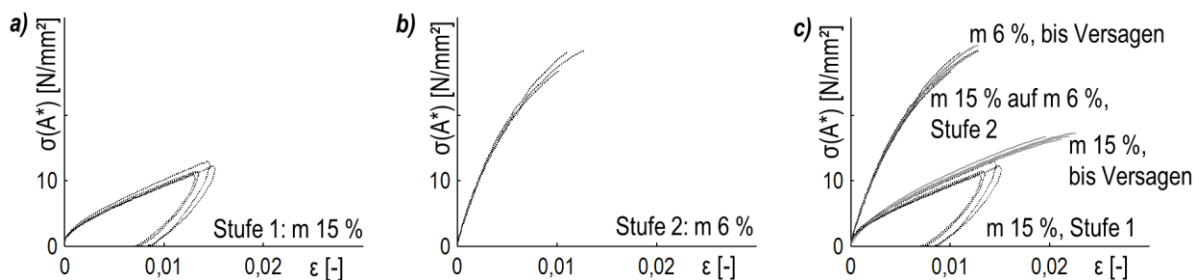


Abbildung 4-18: Kraft-Verformungs-Diagramme von Blättern aus unterschiedlich behandeltem Zellstoff bei freier Schrumpfung

## Materialcharakterisierung nach der Umformung

Um anhand des ermittelten Schrumpfungsverhalten bei Trocknung bereits vor der Umformung das Verhalten in der Phase nach der Umformung sowie während des späteren Gebrauchs vorherzusagen zu können, wurden Trocknungsversuche durchgeführt. Hierzu wurde der Werkstoff im konditionierten Zustand (15 % Feuchte) bis in den plastischen Dehnungsbereich mittels eines Zugversuchs beansprucht und anschließend entspannt. Dies ist im Spannungs-Dehnungs-Diagramm in **Abbildung 4-19 a)** dargestellt. Die plastische (bleibende) Dehnung von ca. 0,008 [-] nach der Entspannung ist auf der horizontalen Achse abzulesen. Daran schloss sich ein Trocknungsprozess der selben Proben auf den Gleichgewichtszustand bei Normklima<sup>4</sup> an. In einer zweiten Belastungsstufe (**Abbildung 4-19-b)**) wurde der Werkstoff bis zum Versagen belastet (Zugversuch). Im Abbildungsteil c) sind die zuvor beschriebenen Ergebnisse der zweistufigen Belastung denen ohne solche Belastungshistorie gegenübergestellt. Die Proben ohne vorherige Belastung wurden entsprechend der Feuchtigkeiten von 6 % und 15 % konditioniert und bis zum Versagen gezogen. Diese Ergebnisse dienen der Vorhersage des Verhaltens nach der Umformung und Trocknung, dass zum Beispiel die Spannungs-Dehnungs-Verläufe der vorbelasteten und nicht vorbelasteten Proben bei 6 % Feuchte sehr ähnlich verlaufen.

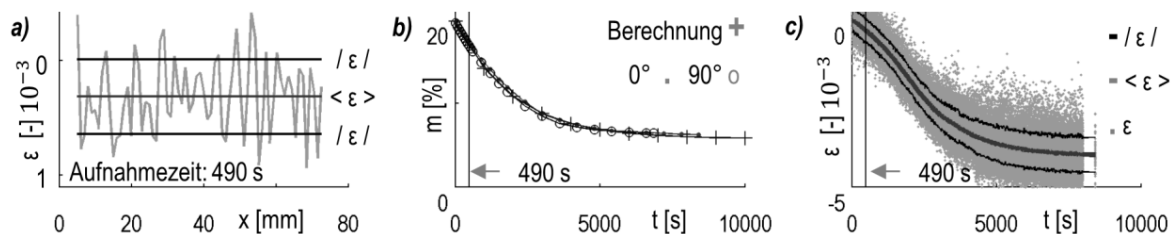


**Abbildung 4-19:** Zweistufige Zugbelastung von Proben bei 15 % Feuchte und anschließender Trocknung. Erste plastische Belastungsphase (a), zweite Belastungsphase nach Trocknung auf 6 % (b) und Gegenüberstellung mit nicht vorbelasteten Proben (c) [59]

Im Kontext zur Änderung der Materialeigenschaften durch Feuchteänderung und Belastungshistorie wurde auch das Trocknungsverhalten des Referenzkartons untersucht. Die Auswirkung der Trocknung auf die Geometrie durch entsprechende Ausdehnung oder Schrumpfung

<sup>4</sup> 23 °C, 50 % relative Luftfeuchte. Je nach Zusammensetzung und Vorgeschichte stellt sich bei Papier unter Normklima eine Feuchte von 5 % – 8 % ein.

wurde ermittelt. In **Abbildung 4-20** sind hierzu die Ergebnisse dargestellt. Der Abbildungsteil a) stellt hierzu die vorherrschenden Dehnungsschwankungen entlang eines Messpfades auf der Probenoberfläche dar. Die Schwankungen werden unter anderem durch Messrauschen, aber auch durch die inhomogene Oberfläche des Versuchsmaterial (Flockenstruktur etc.) hervorgerufen. Neben dem Dehnungsmittelwert ( $\langle \epsilon \rangle$ ) ist auch die Standardabweichung ( $/\epsilon/$ ) aufgetragen. Im Abbildungsteil b) ist der zeitliche Verlauf des Feuchtigkeitsgehaltes der Probe dargestellt. Es wird deutlich, dass innerhalb der ersten 2500 Sekunden die meiste Feuchtigkeit aus dem Material verschwindet. Anschließend nähert sich die Feuchtigkeitskurve asymptotisch einem Gleichgewichtsgrenzwert. Das mit der Trocknung einhergehende Dehnungsverhalten ist im Abschnitt c) dargestellt. Ebenfalls sind die statistischen Größen Mittelwert und Standardabweichung aufgetragen. Auch im Verlauf der Dehnung ist eine deutliche Schrumpfung (negative Dehnungswerte) in den ersten 2500 Sekunden auszumachen. Anschließend nähert sich die Dehnungskurve ebenfalls asymptotisch einer Grenzwert. Dieser Verlauf wird von einem breiten Streuband umhüllt, was unter anderem mit der Messung der gesamten Probeoberfläche zusammenhängt.



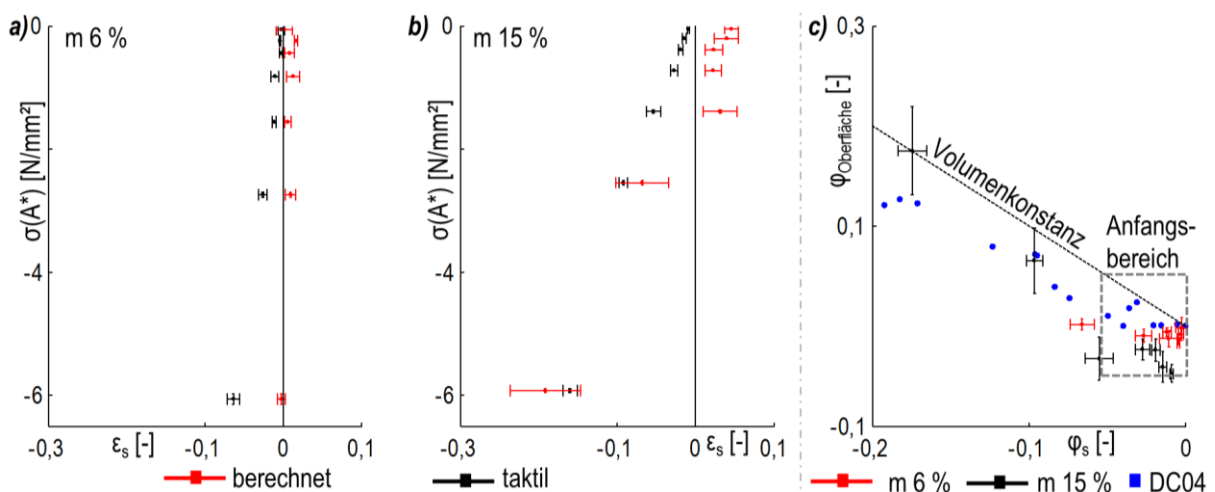
**Abbildung 4-20:** Trocknungsverhalten des Referenzkartons; Dehnungsschwankungen über die Schnittlänge a); Feuchtigkeitsgehalt der Probe über die Zeit b); Dehnung über die Zeit c) [59]

### Messung der plastischen Verformung unter Druck

Der Zusammenhang zwischen einer Druckbeanspruchung in Dickenrichtung und den auftretenden Dehnungszuständen wurde auf zwei Arten untersucht. Einerseits erfolgte die Messung der Dickenänderung taktil und andererseits wurde die Oberflächenvergrößerung über optische Messsysteme detektiert. Hierzu wurde zunächst die Ausgangsdicke der Proben vor der Druckbelastung mit einem Dickemesser nach DIN EN ISO 534 bestimmt. Außerdem wurden die Oberflächen optisch vermessen. Anschließend wurde der Karton mit verschiedenen Flä-

chenpressungen von bis zu 6 N/mm<sup>2</sup> belastet und direkt nach der Belastung wurden die Messungen erneut durchgeführt. Durch diese Messungen konnten die optisch erfassten Oberflächenvergrößerungen mit den taktil gemessenen Dickenänderungen in Verbindung gebracht werden (vgl. **Abbildung 4-21** a und b). Bei Volumenkonstanz müsste eine Dickenverminderung direkt in einer Oberflächenvergrößerung münden. Für eine Feuchte von 6 % konnte praktisch keine Oberflächenvergrößerung gemessen werden, daher müsste die Dicke in diesem Fall konstant bleiben (berechnete Werte in **Abbildung 4-21** a). Die taktil gemessene Dicke nimmt jedoch ab, womit keine Volumenkonstanz angenommen werden kann. Vielmehr ist davon auszugehen, dass das Papier komprimiert und verdichtet wird. Für 15 % Feuchte kann die Annahme der Volumenkonstanz dagegen gerechtfertigt sein, da hier sowohl eine Oberflächenvergrößerung als auch eine Dickenänderung messbar sind.

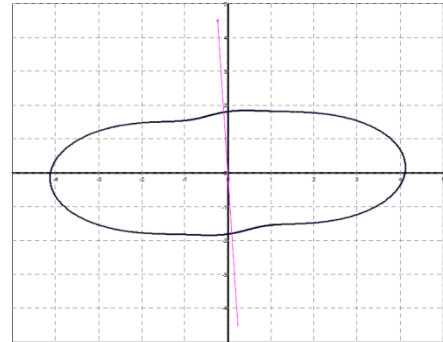
Die Auftragung des Umformgrades auf der Oberfläche über den Dickenumformgrad (**Abbildung 4-21** c) für den Umformstahl DC04 sowie das Probenmaterial bei einer Feuchte von 6 % und 15 % macht deutlich, dass bei dem Stahl und bei einer Papierfeuchte von 15 % von Volumenkonstanz ausgegangen werden kann. Proben mit einer Feuchte von 6 % lassen diese Annahme nicht zu.



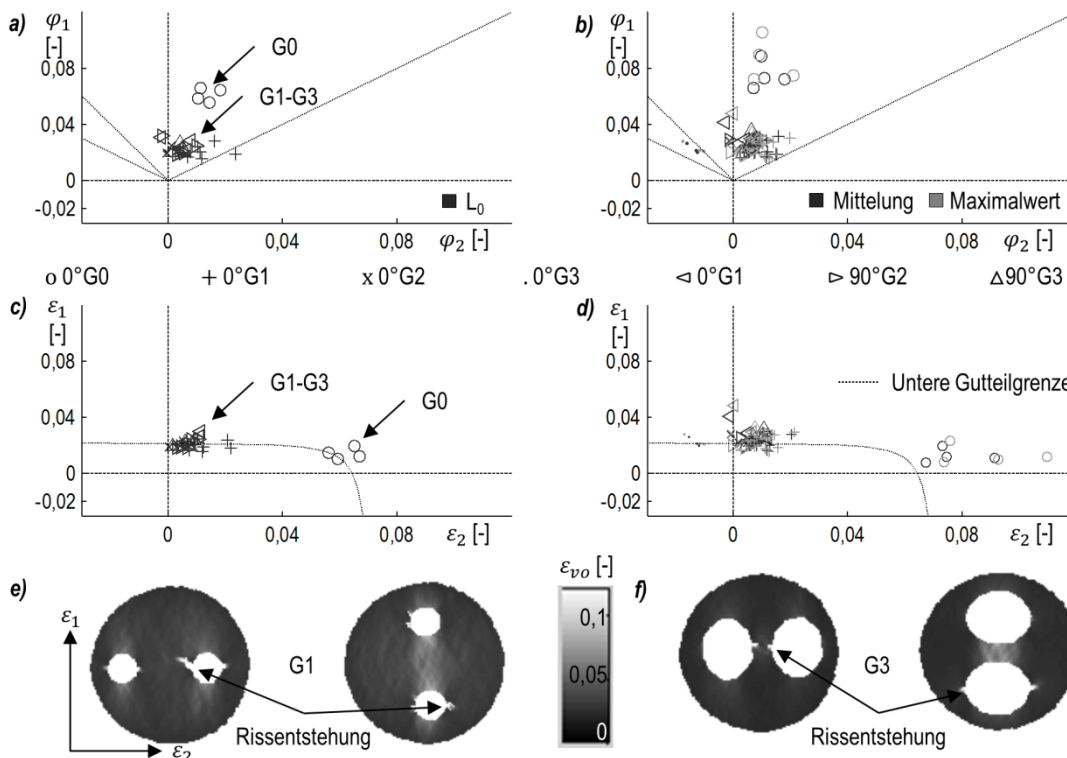
**Abbildung 4-21:** Dickenabnahme durch Oberflächendehnung berechnet und taktil gemessen bei a) 6 % Feuchte; b) 15 % Feuchte; c) Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Volumenkonstanz; Darstellung im Spannungs-Dehnungs-Diagramm (a und b) sowie Oberflächenumformgrad über Dickenumformgrad (c) [59]

## Erweiterte Materialcharakterisierung des Schädigungsverhaltens

Die zusätzliche Untersuchung des Materialversagens bei unterschiedlichen Dehnungszuständen erlaubte es, Grenzformänderungskurven für Papier zu ermitteln. Dies bildet einen Ausgangspunkt für eine spätere Auslegung von Umformprodukten aus Papier. Die Übertragbarkeit der aus der Metallverarbeitung typischen Grenzformänderungskurvendarstellung in Hauptformänderung über der Nebenformänderung wurde untersucht, indem die Dehnungen wie bei der Metallcharakterisierung typisch in Haupt- über Nebenformänderung aufgetragen wurde.



**Abbildung 4-22:** Relative Tensile Stiffness Index [-] in den Hauptorientierungen des untersuchten Kartons, Verhältnis MD/CD=2,4/1



**Abbildung 4-23:** Grenzformänderungsschaubilder – Darstellungsweise in Haupt- und Nebenformänderung (a und b); Darstellung angepasst an anisotropes Papier in Dehnungsrichtungen 1 und 2 (c und d); Geometrieversuche zur Erreichung unterschiedlicher Dehnungszustände (e und f) [59]



---

Hier zeigte sich, wie in **Abbildung 4-23** a) und b) ersichtlich ist, dass durch diese Darstellung keine nützlichen Aussagen über die tatsächlich maximal ertragbaren Dehnungen in verschiedenen Faserorientierungen gemacht werden können. Dies wird mit der starken Anisotropie (vgl. **Abbildung 4-22**) des Materials in Verbindung gebracht.

Durch die Darstellung der Dehnungen in Faserorientierung und quer dazu ( $\epsilon_1$  über  $\epsilon_2$ ) lässt sich jedoch eine auf das anisotrope Material Papier angepasste Grenzformänderungskurve ableiten. Diese wird im Folgenden mit GFSHO (Grenzformänderungsschaubild über die Hauptorientierungen) abgekürzt. Mit dieser sind Aussagen über ein potentielles Versagen des Materials bei einem bestimmten Dehnungszustand möglich. Insbesondere die maximal ertragbaren Dehnungen in den Orientierungen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  stellen hier die begrenzenden Achsenparallelen oder Asymptoten der Grenzformänderungskurve dar (vgl. **Abbildung 4-23** c) und d)).

Zur Ermittlung der ertragbaren Dehnungen in Orientierungen zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  wurde eine Übertragbarkeit von Versuchen mit symmetrisch gelochten Blechproben (vgl. [63]) auf Papier, wie in **Abbildung 4-23** e) und f) dargestellt ist, untersucht. Hier zeigte sich, dass die Rissentstehung, trotz sorgfältiger Probenvorbereitung (Lochung), aufgrund der Lochgeometrie an den Lochrändern, vor einem erwartungsgemäßen Versagen in der Dommitte auftritt. Gewünscht und bei Blechproben auftretend wäre ein Versagen der Proben im Proben-/Kreismittelpunkt.

---

### 4.3 Betrachtung des tribologischen Systems Papier-Werkzeug

---

Reibung ist eine entscheidende Einflussgröße für die Umformung von Papierwerkstoffen. Bekannt ist, dass sich die Reibung in Abhängigkeit von den Prozessgrößen Temperatur, Flächenpressung und Reibgeschwindigkeit, aber auch den Materialgrößen, wie Faserart, Fasermorphologie, Feuchte und chemischen Zusätzen, verändern kann. Zudem können Schmiermittel, wie z.B. Talkum oder Wachse, eine beeinflussende Rolle spielen [1]. Zum jetzigen Zeitpunkt gibt es keine standardisierten Prüfmaschinen, welche Reibwerte unter Variation all dieser Faktoren bestimmen können.

Im Rahmen des dritten Arbeitspakets des Projekts wurde daher zunächst eine entsprechende Prüfvorrichtung ausgelegt und aufgebaut. Anschließend wurde ein Vergleich der neuen Anla-



ge mit bestehenden Reibversuchskonzepten angestellt und schließlich die Reibung unter Variation der genannten Parameter systematisch untersucht.

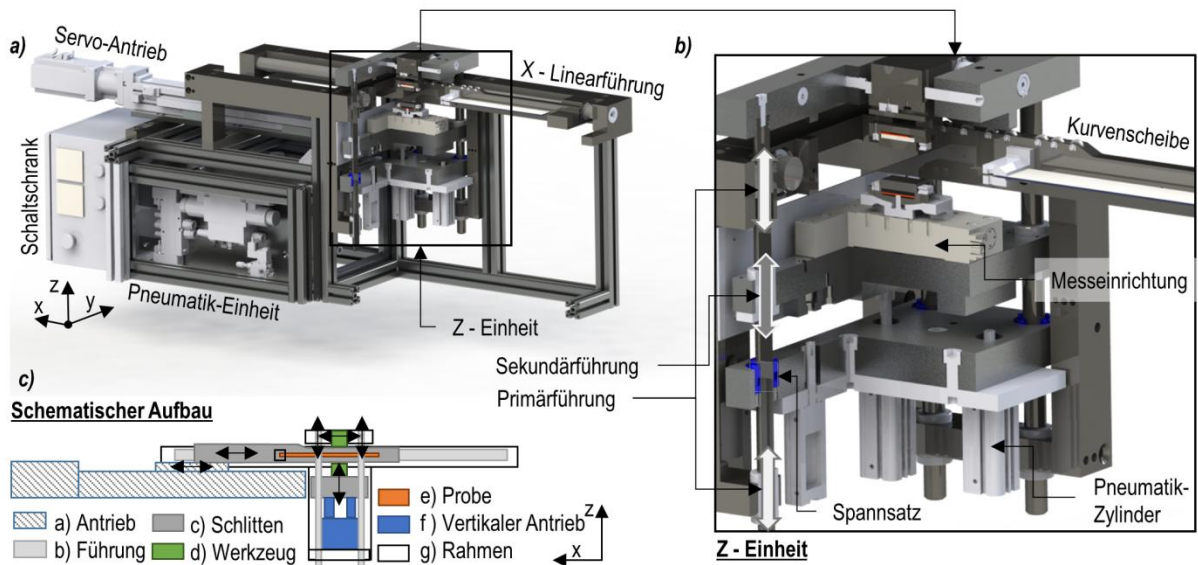
**Tabelle 4-4** fasst die Spezifikationen der beiden am PMV vorhandenen, standardkonformen Messgeräte und der neuen Anlage zusammen. Es ist erkennbar, dass mit der neuen Anlage ein weit größerer Temperatur-, Geschwindigkeits- und Flächenpressungsbereich abgedeckt werden kann.

**Tabelle 4-4:** Spezifikationen der verschiedenen Messgeräte

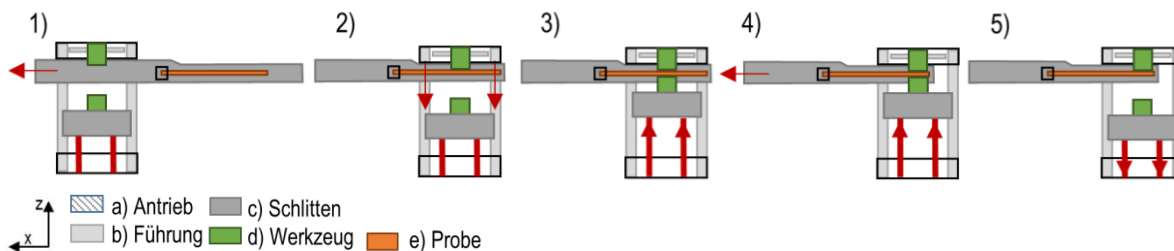
	<b>Temperaturbereich</b>	<b>Reibgeschwindigkeit</b>	<b>Flächenpressung</b>
<b>Tribosgraph</b>	$T_R$	2,4 – 900 mm/min (0,00004 – 0,015 m/s)	0,00654 N/mm <sup>2</sup>
<b>Rutschwinkelprüfer</b>	$T_R$	winkelabhängig	<0,00147 N/mm <sup>2</sup> winkelabhängig
<b>Neue Anlage der TU Darmstadt</b>	$T_R - 200^\circ\text{C}$	0 – 22000 mm/min (=0,37m/s)	0 – 4 N/mm <sup>2</sup>

### **Aufbau des Reibprüfstands**

Es konnte eine für den Werkstoff Papier und die bei der Umformung wirkenden Lastkollektive optimierte Anlage konstruiert, gefertigt und in Betrieb genommen werden. Diese ist in **Abbildung 4-24** zu sehen. Prinzipiell besitzt die Anlage einen horizontal verschiebbaren und geführten Schlitten, der über einen Servoantrieb geregelt bewegt werden kann. An diesem Schlitten befindet sich die Probeneinspannung. Im Messbereich befindet sich die Werkzeuganbringung, eine vertikale Kraftaufbringung sowie hochauflösende Kraftmesssensorik. Durch den modularen Aufbau ist ein einfaches Wechseln der Werkzeugteile (Reibbacken) möglich. Die Kraftaufbringung erfolgt geregelt mittels 4 parallel geschalteter pneumatischer Zylindern. Für eine detaillierte Beschreibung der Reibversuchsanlage und weiterer damit durchgeführter Untersuchungen sei an dieser Stelle noch einmal auf die Veröffentlichung [64] verwiesen.



**Abbildung 4-24:** Reibversuchsanlage a) CAD-Ansicht; b) CAD-Ansicht detailliert; c) Schematischer Aufbau [59]



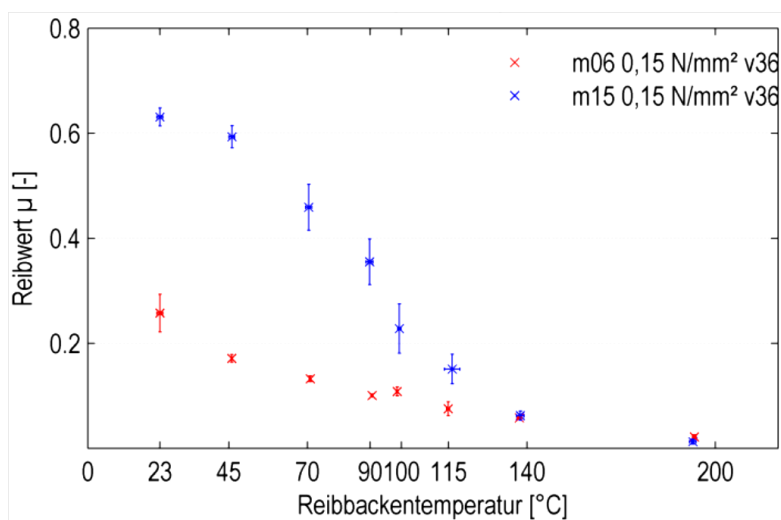
**Abbildung 4-25:** Prinzipskizze eines Messvorganges mit den Messphasen: Einlegen der Probe (1), Verharren vor Normkraftaufbringung(2), Messbeginn (3), Messende (4) und Probenentnahme (5) [64]

Zur Messung (**Abbildung 4-25**) wird die Probe durch den geführten Schlitten gezogen, so dass sie immer parallel zu den Reibbacken orientiert ist. Die Kräfte werden an der unteren Reibbacke (grün) gemessen, die auf einer Kugelkalotte montiert ist. Sensoren ermöglichen es, die Kräfte in allen drei Raumrichtungen zu messen. Dies erlaubt die Berechnung der Momente in der  $x$ - $z$ -Ebene und der  $y$ - $z$ -Ebene. Hieraus lassen sich u.a. die Verkippung der Reibbacken und die daraus resultierenden Einflüsse auf das Reibverhalten ermitteln. Der Messablauf erfolgt gemäß der **Abbildung 4-25** in fünf Phasen. Nach dem Einlegen der Probe (1) fährt der Schlitten über die Probenscheibe, so dass sich die obere Reibbacke absenkt (2). In dieser Position verharrt der Schlitten und die pneumatische Kraft wird orthogonal zur Zugrichtung durch die untere Reibbacke aufgebracht (3). Anschließend fährt der Schlitten in  $x$ -Richtung mit de-

finierter Geschwindigkeitsvorgabe bis zum Ende des Prüfweges (4), während die Kraft-, Weg- und Geschwindigkeitssignale aufgezeichnet werden. Am Ende der Messung werden die Zylinder entspannt und die Probe entnommen (5).

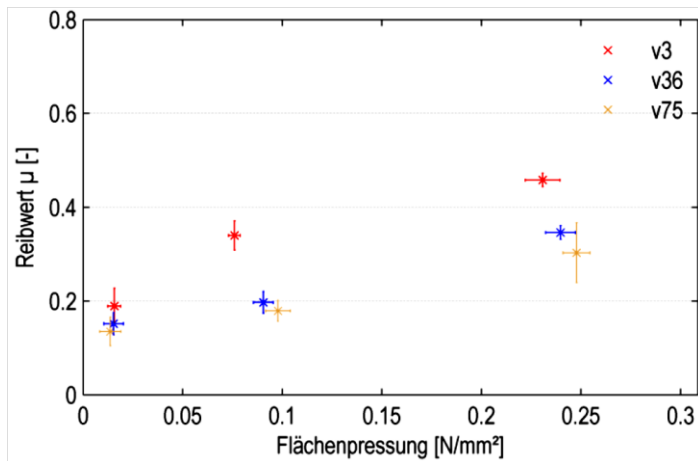
### Untersuchung wesentlicher Einflussparameter auf die Reibung

In umfassenden Versuchen wurden die Einflüsse der Parameter Flächenpressung ( $0,015 \text{ N/mm}^2$  bis  $0,85 \text{ N/mm}^2$ ), Temperatur ( $23 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ), Zuggeschwindigkeit ( $3 \text{ mm/s}$  bis  $75 \text{ mm/s}$ ), Feuchtigkeitsgehalt ( $6 \%$  bis  $20 \%$ ), Faserorientierung ( $0^\circ$  und  $90^\circ$ ) und die Lage der Prüfseite auf das Reibverhalten untersucht. Aufgrund des Umfangs wurden nicht alle möglichen Kombinationen getestet, sondern es wurden Verfahren der statistischen Versuchsplanung und –auswertung angewandt. Im Folgenden sind beispielhaft einige Ergebnisse gezeigt.



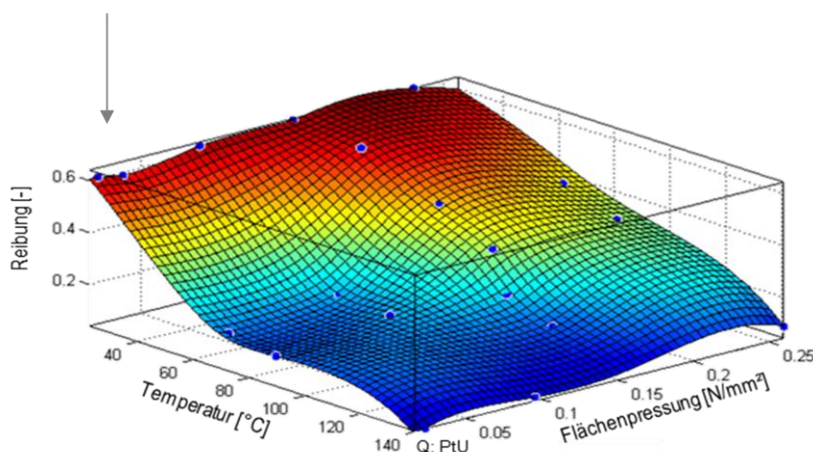
**Abbildung 4-26:** Einfluss der Temperaturerhöhung auf den Reibwert [65]. Die roten Messwerte wurden bei 6 % Feuchte aufgenommen, die blauen bei 15 %.

In **Abbildung 4-26** ist ersichtlich, dass der Reibwert mit zunehmender Temperatur abnimmt. Dieses Phänomen ist für 6 % und 15 % Feuchte und einer jeweiligen Flächenpressung von  $0,15 \text{ N/mm}^2$  dargestellt. Die Abnahme des Reibwertes mit der Temperatursteigerung ist für die höhere Feuchte stärker ausgeprägt und deutlicher erkennbar. Eine Trocknung der Reibproben durch die erhöhten Reibbackentemperaturen wird festgestellt. Dieser Effekt verstärkt sich bei höherer Temperatur, womit die Abnahme des Reibwertes begründet werden könnte. Ebenso könnte durch das verdampfte Wasser ein Dampfpolster zwischen Reibbacke und –probe entstehen, welches die Reibung zusätzlich verringert.



**Abbildung 4-27:** Einfluss der Flächenpressung bei 15 % Feuchte und 90 °C Reibbackentemperatur auf den Reibwert bei verschiedenen Prüfgeschwindigkeiten ( $v_3 = 3 \text{ mm/s}$ ;  $v_{36} = 36 \text{ mm/s}$ ;  $v_{75} = 75 \text{ mm/s}$ ) [65]

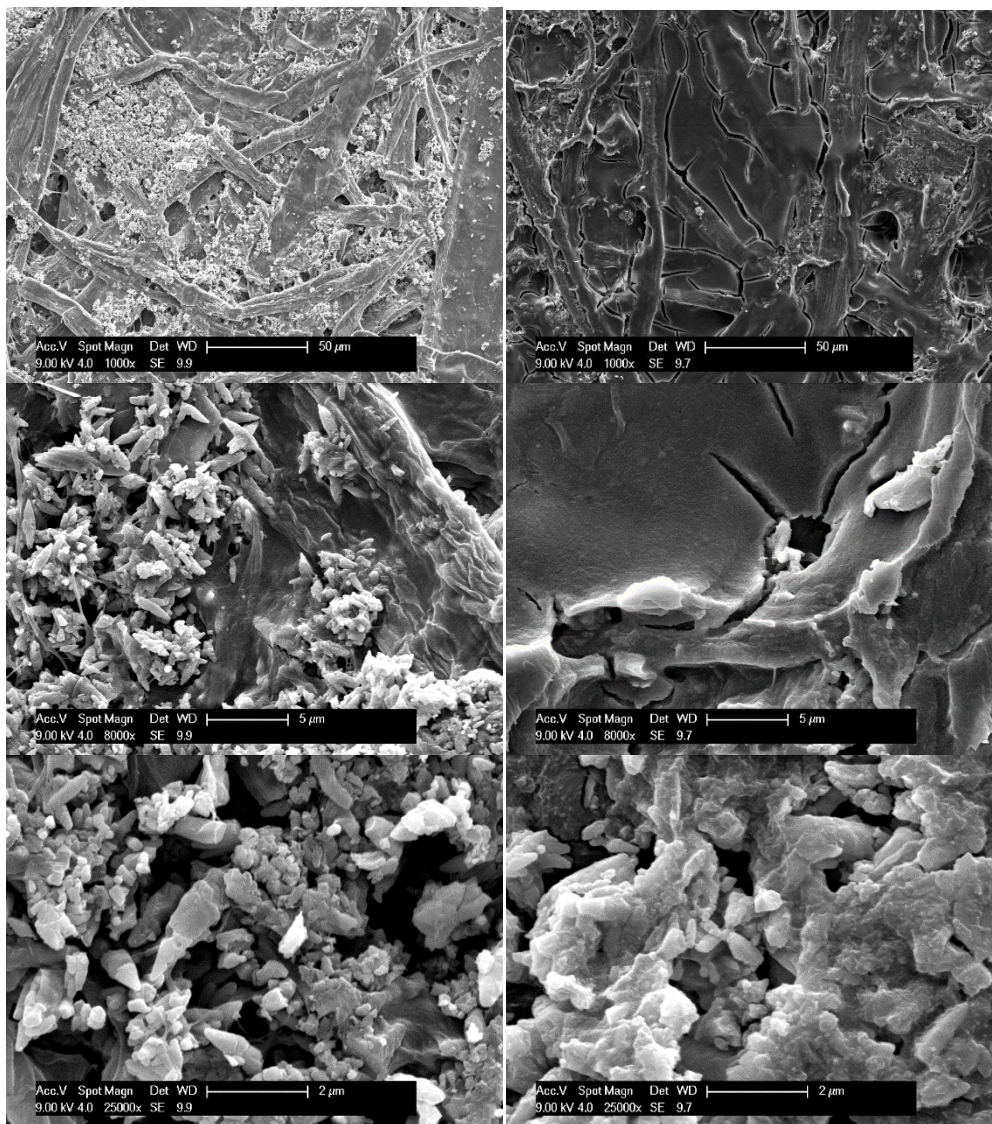
**Abbildung 4-27** zeigt den Einfluss der Flächenpressung und der Prüfgeschwindigkeit auf den Reibwert bei einer Feuchte von 15 % und einer Temperatur von 90 °C. Es zeigt sich, dass die Reibwerte mit zunehmender Flächenpressung zunehmen, wohingegen die Reibwerte mit zunehmender Prüfgeschwindigkeit abnehmen. Auch hier lässt sich wieder die Wasserdampfthese einbringen. Bei niedrigen Geschwindigkeiten hat der Wasserdampf Zeit zu entweichen und kann nicht als Schmierfilm dienen, bei höheren Geschwindigkeiten ist dies nicht der Fall und der Reibwert sinkt. Ebenso wird dieser Film durch erhöhte Flächenpressung zusätzlich herausgedrückt und entweicht, somit steigt der Reibwert bei erhöhter Flächenpressung an.



**Abbildung 4-28:** Dreidimensionale Darstellung des gekoppelten Einflusses von Temperatur und Flächenpressung auf den Reibwert (blaue Punkte – Messwerte); Fläche approximiert



Eine flächige Darstellung der Einflussgrößen Temperatur und Flächenpressung auf die Reibung zeigt **Abbildung 4-28**. Die Fläche wurde mittels der blau dargestellten Punkte ermittelt. Zu erkennen ist, dass eine besonders niedrige Reibung bei der Kombination von Temperaturen über 80 °C und Flächenpressungen unterhalb von 0,1 N/mm<sup>2</sup> erreicht wird. Auch in dieser Darstellung zeigen sich die zuvor erwähnten Einflüsse der Temperatur (je höher die Temperatur desto geringer der Reibwert) und der Flächenpressung (je höher die Flächenpressung desto höher der Reibwert). Ein hoher Reibwert wird dadurch bei der Kombination einer niedrigen Temperatur um Raumtemperatur und einer hohen Flächenpressung erreicht.



**Abbildung 4-29:** REM-Aufnahmen bei verschiedenen Vergrößerungsstufen von CaCO<sub>3</sub>-haltigem Papier ohne (links) und mit (rechts) Wachsbeschichtung bei verschiedener Vergrößerung

---

In detaillierten Untersuchungen wurden die Einflüsse von Kaolin und modifiziertem Kaolin als Füllstoffe und zwei verschiedener Wachse als Streichmittel auf das Reibverhalten untersucht. Hierzu wurde zunächst ein Laborverfahren entwickelt, um Wachse gleichmäßig auftragen zu können und den Auftrag über Anfärbemethoden sichtbar zu machen. Dies geschah unterstützt vom Projektpartner BYK-Chemie. Für eine Beschreibung der Verfahren und Versuche sei auf [66] verwiesen. Aus **Abbildung 4-29** ist ersichtlich, dass die Beschichtung zu einer deutlichen Oberflächenveränderung führte.

Die Wachsbeschichtung senkte die Reibwerte stark. Bei Raumtemperatur sanken sie von Werten um 0,3 auf 0,04; bei einer Reibbackentemperatur von 140 °C lag der Reibwert mit einem der Wachse nur noch bei 0,007 und damit im Grenzbereich des Messbaren. Folglich erscheinen Wachsbeschichtungen, auch vor dem Hintergrund, dass viele der Wachse lebensmittelecht sind, als eine vielversprechende Möglichkeit, um die Reibwerte von Papier im Umformprozess zu senken. Für zukünftige Untersuchungen stellt sich insbesondere die Frage, ob eine lokale Steuerung der Reibung durch gezielten Wachsaufrag den Umformprozess von Papier weiter verbessern kann.

Zusammenfassend konnten im Rahmen der Reibversuche Wachse und hohe Temperaturen als dominierende Faktoren zum Senken der Reibungszahl identifiziert werden. Hohe Relativgeschwindigkeiten und geringe Rauigkeiten der Reibpartner begünstigten niedrige Reibungszahlen. Unter Verwendung von Wachs nahmen die Füllstoffe eine untergeordnete Rolle ein. Höhere Flächenpressungen erhöhten die Reibungszahlen.

---

#### **4.4 Werkzeugauslegung und Entwicklung einer Versuchsgeometrie**

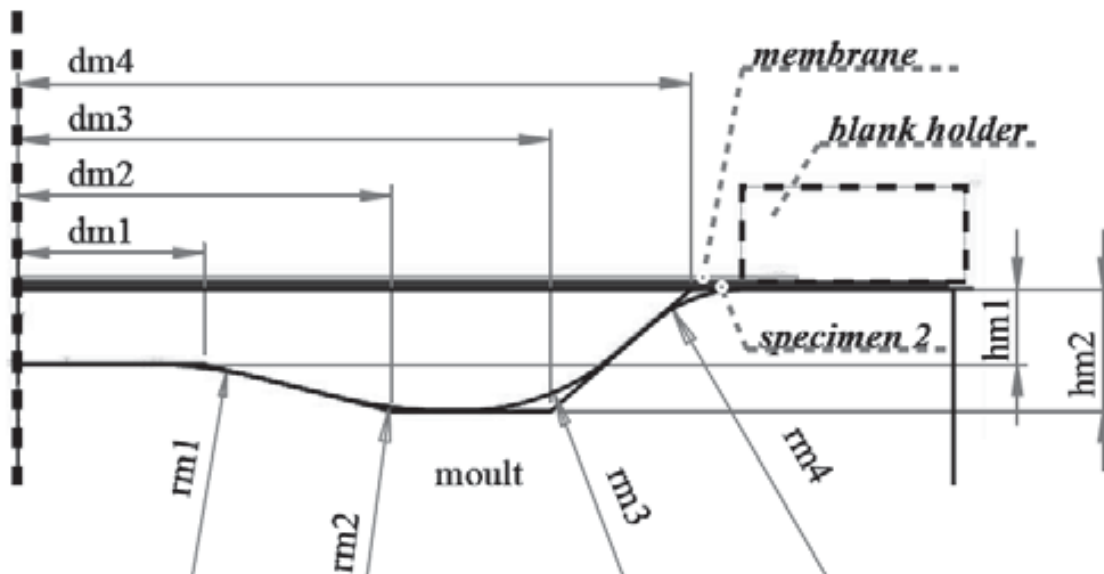
---

Zur Untersuchung des Einflusses und insbesondere der Vorteile wirkmedienbasierter Verfahren im Vergleich zu konventionellen Tiefziehverfahren in Bezug auf die Formgebung wurden ein konventionelles und ein wirkmedienbasiertes Werkzeug ausgelegt und aufgebaut. Die beiden Werkzeugvarianten können auf institutseigenen Pressen des PtU (vgl. **Abbildung 4-30**) betrieben werden und ermöglichen damit einen Vergleich der wirkmedienbasierten Umformung mit dem konventionellen Umformverfahren.



**Abbildung 4-30:** Versuchspresse des PtU. Links: schematische Darstellung; Mitte: Gesamtansicht; rechts: Werkzeugbaureaum.

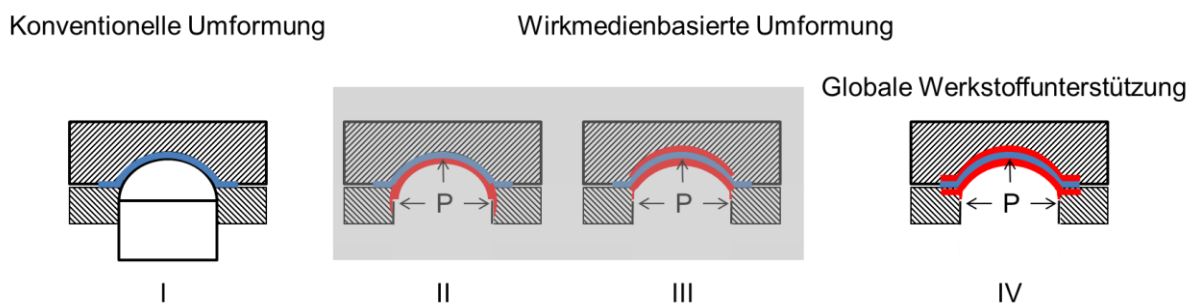
Für eine bessere Vergleichbarkeit wird eine zuvor ausgelegte und in vorherigen Veröffentlichungen genutzte Formgeometrie verwendet [49]. Die ausgewählte Geometrie ist rotationssymmetrisch und wurde im Rahmen studentischer Arbeiten simulativ ausgelegt, um eine doppelt gekrümmte Kontur zu erhalten. Diese dient der besonderen Beanspruchung des Materials, aber auch der strukturellen Versteifung des Bauteils.



dm1	20	dm2	40	dm3	57	dm4	72
rm1	50	rm2	50	rm3	25	rm4	16
hm	8	hm2	13	-	-	-	-

**Abbildung 4-31:** Formgeometrie Typ "Frisbee" (Daten in der Tabelle in mm) [49]

**Abbildung 4-32** zeigt mögliche Werkzeugkonzepte des konventionellen und des wirkmedienbasierten Tiefziehens, angefangen beim konventionellen Werkzeug (I) über wirkmedienbasierte Umformverfahren ohne (II) und mit (III) lokaler Werkstoffunterstützung in der Umformzone bis zum wirkmedienbasierten Umformwerkzeug mit globaler Werkstoffunterstützung (IV). Im Fokus der Untersuchung stand der Vergleich zwischen konventionellen (I) und wirkmedienbasierten Tiefziehverfahren mit globaler (IV) Werkstoffunterstützung. Durch einen entsprechenden modularen Aufbau des konstruierten Werkzeugs konnten zusätzlich die wirkmedienbasierten Umformverfahren mit festem Niederhalter (II und III) betrachtet werden.

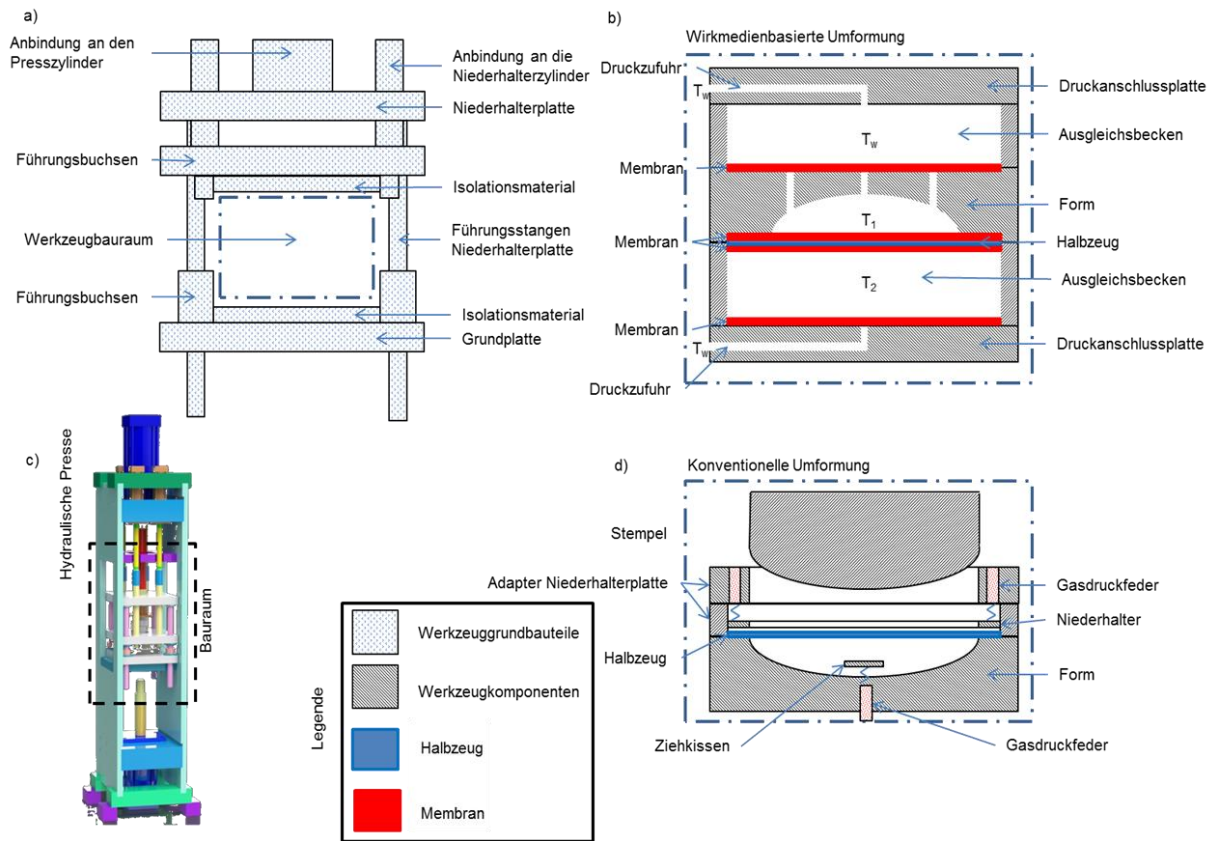


**Abbildung 4-32:** *Verschiedene Umformverfahren und -varianten. I: Konventionelles Tiefziehen, II: Wirkmedienbasiertes Tiefziehen im Einfachmembranverfahren, III: Wirkmedienbasiertes Tiefziehen im Doppelmembranverfahren, IV: Tiefziehen mit globaler Werkstoffunterstützung durch Gegendruck*

Die Auslegung des Werkzeugs erfolgte entsprechend der VDI-Konstruktionsrichtlinie VDI2221 und ist in **Abbildung 4-33** exemplarisch dargestellt. Der für das Werkzeug verfügbare Bauraum (**Abbildung 4-33 a**) in der hydraulischen Versuchspressen (**Abbildung 4-33 c**) beträgt 590 mm x 400 mm x 500 mm (Höhe x Tiefe x Breite). Die detaillierten Konzeptzeichnungen (**Abbildung 4-33 b** und **c**) verdeutlichen den Unterschied der beiden Verfahrensvarianten mit starren und wirkmedienbasierten Werkzeugen. Deutlich wird insbesondere beim Konzept mit zweiseitigem Wirkmediendruck, dass Ausgleichsbecken vorzusehen sind. Diese dienen dazu, die Druckaufbringung, bei erwärmten Versuchen auch die Temperaturverteilung, zu homogenisieren. Zusätzlich stellte die Folienklemmung, die zur Abdichtung und zur Fixierung der für die Trennung des Wirkmediums vom Werkstück notwendigen Kunststofffolien notwendig ist, eine bedeutende Anforderung an die Werkzeugentwicklung. Hierbei

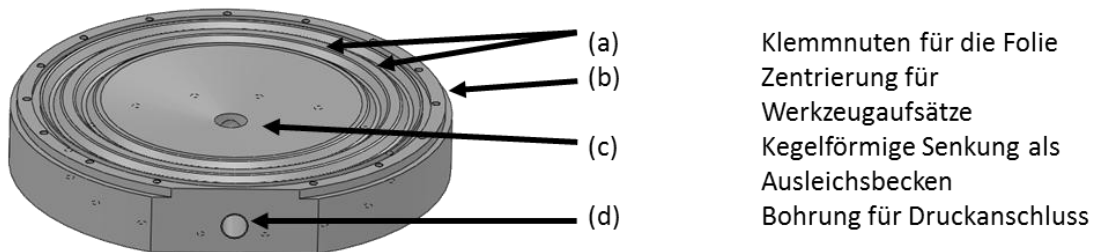


konnte auf vorherige Erfahrungen im Bereich der wirkmedienbasierten Umformung zurückgegriffen werden.



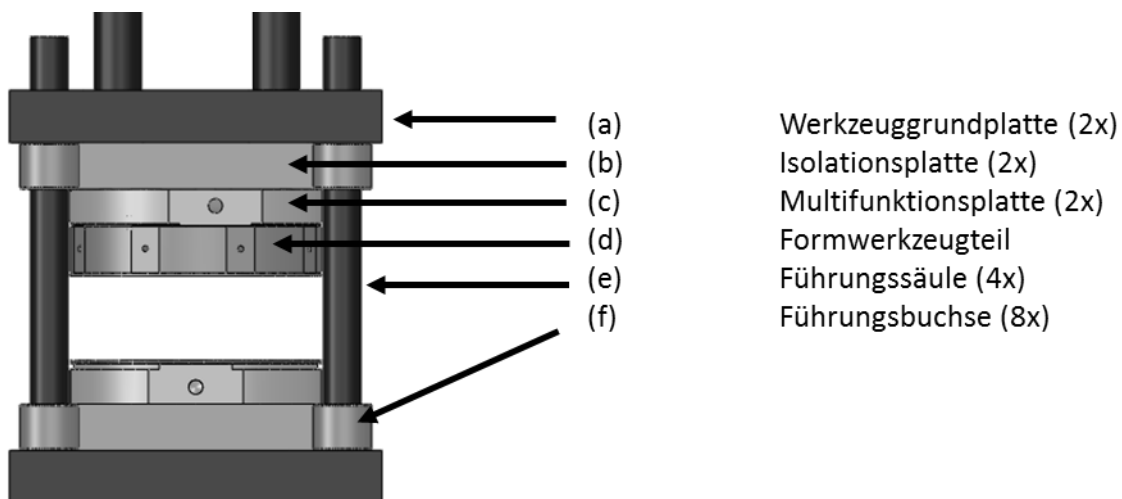
**Abbildung 4-33:** *Werkzeugauslegung. Werkzeugbauraum (a) innerhalb der hydraulischen Versuchspressen (c); Konzept des wirkmedienbasierten Werkzeugs (b) mit Gegendruck und entsprechenden Ausgleichsbecken im Vergleich zum Konzept des konventionellen Werkzeugs mit starren Werkzeugen (d)*

Um der Anforderung gerecht zu werden, ein möglichst modulares Werkzeugsystem zu entwickeln, mit dem sich die verschiedenen Prozessvarianten durchführen lassen, wurde eine Multifunktionsplatte entwickelt. Diese kann zum einen als Anschlussplatte für Matrizenteile, aber auch als Gegendruckplatte dienen. Dieses Werkzeugteil ist in **Abbildung 4-34** dargestellt.



**Abbildung 4-34:** Multifunktionsanschlussplatte als CAD-Modell

Wie in der Anforderungsliste gefordert, erfüllt dieses Werkzeugteil die Funktionen der Druckaufbringung (d und c), Zentrierung der Formwerkzeugteile (b) und in Kombination mit den passenden Klemmrings die Klemmung der Folien und Abdichtung der Ausgleichsbecken (a). Für den Aufbau des gesamten Werkzeugs sind zwei solcher Multifunktionsplatten notwendig. Eine wird auf der Gegendruck- und eine auf der Druckseite eingebaut. Den schematischen Aufbau einer Werkzeugvariante sieht man in **Abbildung 4-35**.




**Abbildung 4-35:** Schematischer Aufbau einer Werkzeugvariante

---

#### 4.5 Identifikation signifikanter Prozessparameter

---

Zur Erforschung des Einflusses der einzelnen Prozessparameter auf das Umformergebnis und zur Identifikation der Interaktionen zwischen den einzelnen Parametern wurden verschiedene Versuche angestellt.



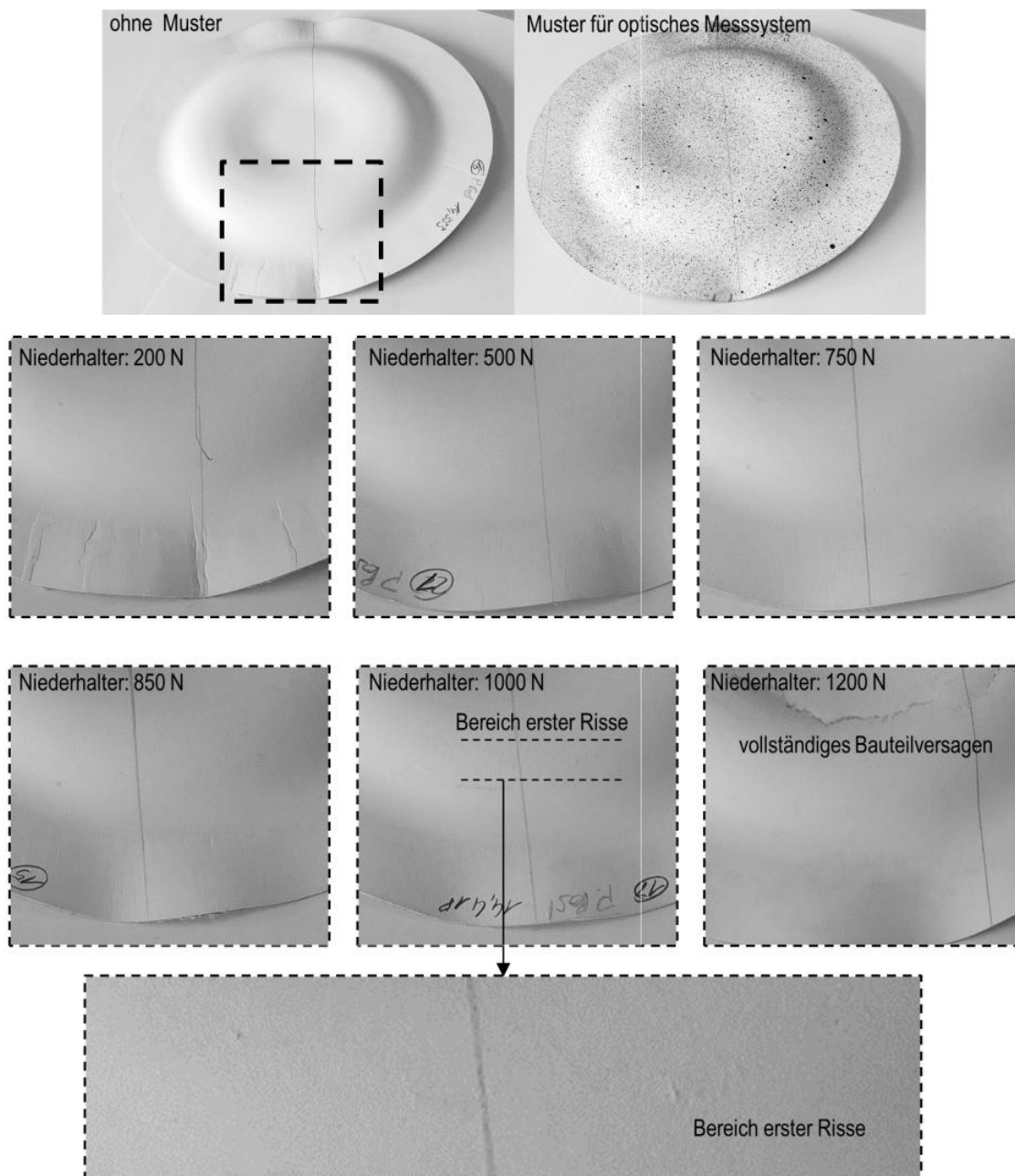
---

Die Untersuchung der Umformprozesse und der Prozesseigenschaften fand an zwei wirkmedienbasierten Prozessen und einem stempelbasierten Prozess statt. Die Versuchsgeometrie sowie der Aufbau der beiden wirkmedienbasierten Umformprozesse sind im vorangegangenen Abschnitt „Werkzeugauslegung und Entwicklung einer Versuchsgeometrie“ dargestellt. Der stempelbasierte Prozess nutzt eine identische Geometrie. Der Niederhalter ist ähnlich zu der Wirkmedienprozessvariante 1 aufgebaut und das Umformmedium wird durch einen Stempel ersetzt. Die Untersuchung des Referenzkartons bei Raumtemperatur (RT) und mit einer eingestellten Feuchte von 15 % diente als Vergleich der Prozessvarianten. Im wirkmedienbasierten Prozess 1 findet eine Variation der Temperatur, der Niederhalterkraft und der Umformgeschwindigkeit statt. Die Untersuchung der Auswirkung einer Drucküberlagerung und damit einer gezielten Materialunterstützung fand mittels des wirkmedienbasierten Prozesses 2 statt. Bei diesem wurden die Oberflächendehnungen mittels eines optischen Messsystems aufgenommen.

Auch bei der Umformung von Papier zeigt sich der aus der Metallumformung bekannte Einfluss der Niederhalterkraft. Wie in **Abbildung 4-36** zu sehen ist, entstehen bei zu geringer Niederhalterkraft (bis ca. 500 N) Falten im Bereich des Niederhalters (Randbereich des Werkstücks). Wird die Niederhalterkraft zu hoch eingestellt (ab ca. 1000 N), kann das Werkstückmaterial nicht nachfließen, wird geklemmt und reißt („Bereich erster Risse“). Diese beiden Kräfte grenzen das Prozessfenster aus Sicht der Niederhalterkraft, in dem die Herstellung faltenfreier Bauteile möglich ist, ein. Neben der Niederhalterkraft hat beim Tiefziehen von Papier mit festem Niederhalter die Werkzeugtemperatur und die Materialfeuchte einen signifikanten Einfluss auf das Umformergebnis. Dieser Einfluss lässt sich mit der Reibwertermittlung aus Kapitel 4.3 in Verbindung bringen und ist durch die damit gemachten Erkenntnisse zu erwarten. Zusätzlich führt eine Erhöhung der Temperatur bei dem untersuchten Material und der gewählten Geometrie zu einer Reduktion der Rissneigung bei gleichzeitigem Auftreten einer Wellung im Randbereich.

Aufgrund der verschiedenen Prozesseigenschaften wird nur beim konventionellen Tiefziehen und Tiefziehen mit lokaler Werkstoffunterstützung ein regulärer Niederhalter eingesetzt. Bei globaler Unterstützung des Werkstückwerkstoffs ist kein Niederhalter im eigentlichen Sinne vorhanden. Das für Papier übliche Verpressen der Falten fällt insbesondere in diesem Prozess weg und kann durch faltenfreie Umformung ersetzt werden. Dieses Phänomen wird auch durch die Drucküberlagerung im Prozess mit Gegendruck (globale Werkstoffunterstützung)

begünstigt. Optische Dehnungsmessungen zeigten, dass die Drucküberlagerung zu einer deutlichen Homogenisierung der Dehnungsverteilung auf der Werkstückoberfläche führt.



**Abbildung 4-36:** Exemplarische Untersuchung der Auswirkung der Niederhalterkraft bei 140 °C.

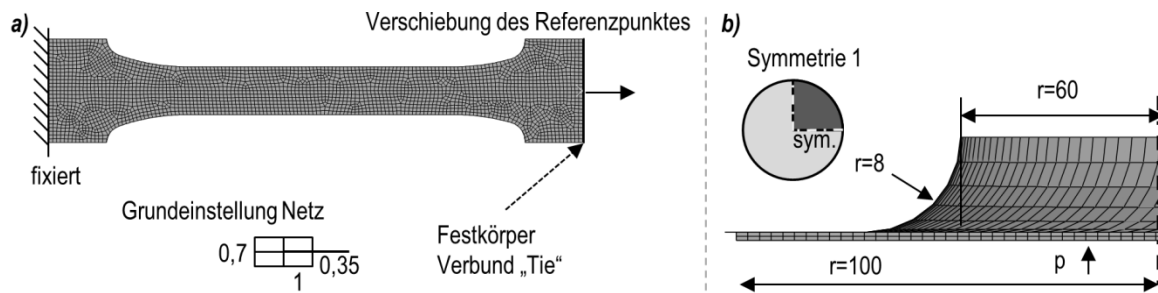
---

## 4.6 Abbildung der Materialeigenschaften in der Simulation

---

Zur Bewertung unterschiedlicher Modellierungsstrategien zur Abbildung des Materialverhaltens im Prozess sowie zur Vorhersage der Eigenschaften des fertigen Produkts wurde an der Abbildung der Materialeigenschaften in der Simulation gearbeitet.

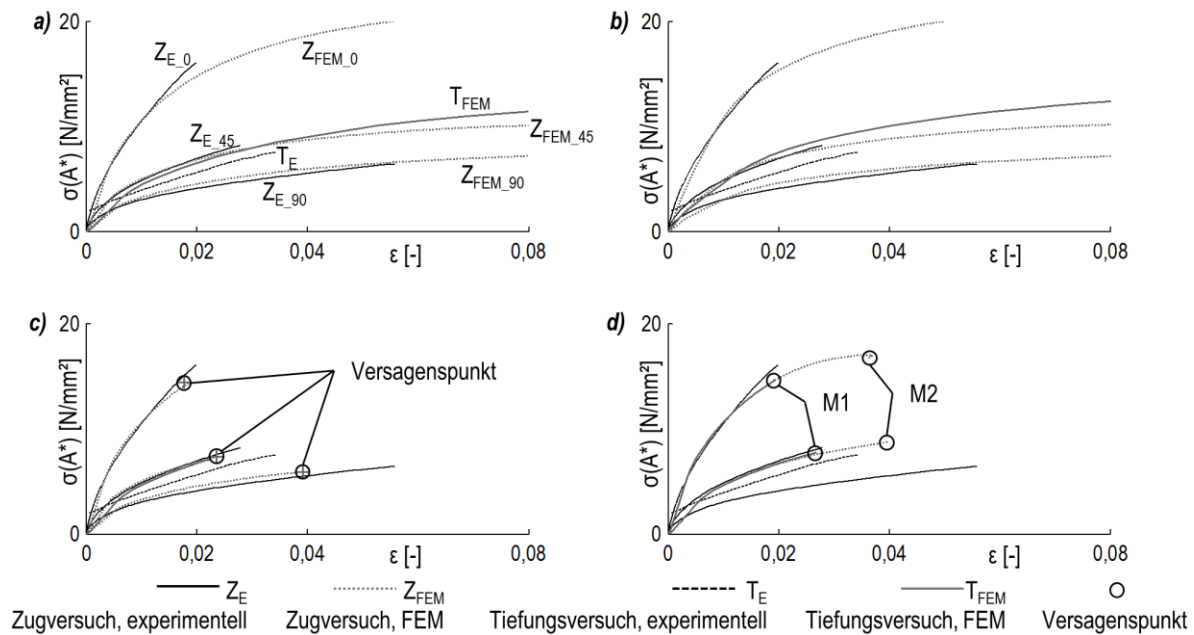
Die im Arbeitspaket „Erweiterte Charakterisierung der Materialeigenschaften vor, während und nach der Umformung“ (S. 30) aufgenommenen Materialdaten dienten als Grundlage für die Abbildung des Materialverhaltens in numerischen Simulationen. Im ersten Schritt fand ein Abgleich zwischen der experimentellen Materialcharakterisierung und dem numerischen Materialverhalten statt. Hierzu wurden die realen Charakterisierungsversuche numerisch abgebildet und mit den entsprechenden Versuchsparametern simuliert. Zugversuche in  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $90^\circ$  zur Maschinenrichtung sowie der pneumatische Tiefungsversuch wurden abgebildet. Der geometrische Aufbau der Modelle ist in **Abbildung 4-37** dargestellt. Die im Abbildungsteil a) dargestellte Zuggeometrie ist auf die materialcharakteristischen Anforderungen von Papier angepasst. Hierfür mussten die Radien dahingehend verändert werden, dass ein Reißen der Probe im Realversuch nicht durch die Geometrie bedingt im Radiuseinfluss stattfand. Zur Nachbildung des Zugversuchs und der dabei herrschenden Bedingungen wurde die Zugprobe im Modell an der einen Seite fest eingespannt und an der anderen Seite an eine fiktive Festkörperfläche gebunden. Im Verlauf des Versuchs wurde die Fläche mittels einer Referenzpunktverschiebung entlang der Probenachse bewegt. Aufgrund der Materialdicke von circa 0,7 mm bei einer Feuchtigkeit von 15 % wurde die Elementgröße zu  $0,7 \times 0,35 \times 1$  [mm] gewählt, um so ein Elementkantenverhältnis von 3 bei 2 Elementen über der Dicke nicht zu überschreiten. Im zweiten Bildabschnitt b) ist die Viertelsymmetrie des hydraulischen Tiefungsversuchs abgebildet. Auch hier wurde mit zwei Elementen über der Dicke modelliert. Die weiteren geometrischen Eigenschaften (Probenradius = 100 [mm]; Matrizenradius = 8 [mm]; freie Versuchsfläche  $r = 60$  [mm]) wurden dem realen Versuchsaufbau nachempfunden. Die Rotationssymmetrie bietet den deutlichen Vorteil, dass nur ein Viertel der Elemente (im Vergleich zum Vollmodell) berechnet werden müssen. Dies führt zu einer Reduktion der benötigten Berechnungszeit.



**Abbildung 4-37:** Geometrischer Aufbau der Simulationsmodelle – Zugversuch a) und hydraulischer Tiefungsversuch b) (Huttel 2015)

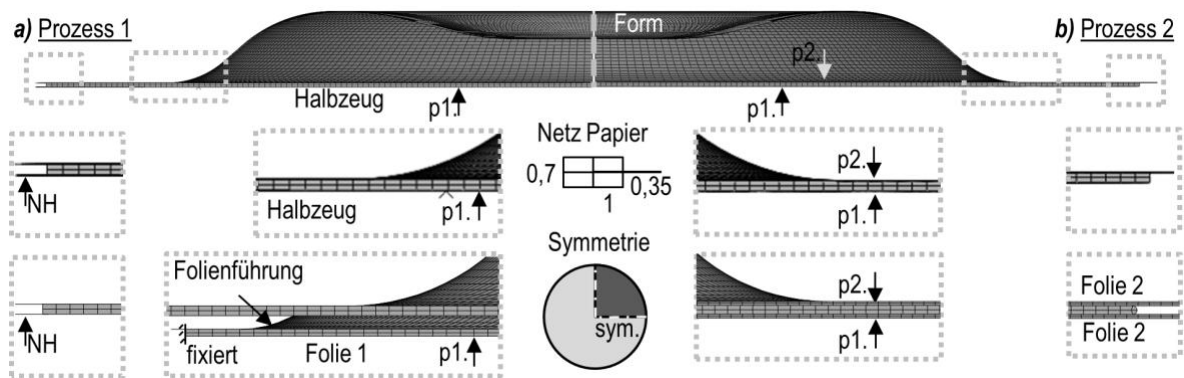
Gerechnet wurde mit einem statisch impliziten Solver. Ein Vergleich der Ergebnisse mit einem dynamisch impliziten Solver ergab in diesem Fall keine signifikanten Unterschiede. Die Modellierung und Berechnung erfolgte im Rahmen der CAE-Umgebung Simulia Abaqus Version 6.12. Wie in **Abbildung 4-38** gezeigt, wurden verschiedene Materialmodellierungsansätze (Hill, visko-plastisch und Lemaître) verwendet und den experimentellen Ergebnissen gegenübergestellt. Es zeigte sich, dass alle verwendeten Materialmodellvarianten geeignet sind, das Verhalten sowohl im Zugversuch als auch im Tiefungsversuch abzubilden. Das Modell nach Hill bildet die Grundlage für die komplexeren Modelle, die um visko-plastische Anteile oder Schädigungsmodellierung erweitert wurden. Die numerischen Nachbildungen des Zugversuchs zeigen geringe Abweichungen zu den experimentellen Daten. Auch die Schädigungsbeschreibung ist möglich und in **Abbildung 4-38 c)** gezeigt. Durch weitere experimentelle-numerische Abgleiche ließe sich eine exaktere Vorhersage des Versagenszeitpunktes herbeiführen. Dies ist jedoch an dieser Stelle, aufgrund der erhöhten Rechenzeit, nicht zielführend. Ein Beispiel für die Veränderung des Versagenszeitpunktes mittels verschiedener Eingabedaten ist der Unterschied zwischen Modell 1 (M1) und Modell 2 (M2) im Abbildungsteil d). M1 wurde mit Eingabeparametern aus dem Zugversuch und M2 mit Daten aus dem Tiefungsversuch kalibriert. In der Simulation ist nun ersichtlich, dass auch die in der Realität auftretenden, größeren ertragbaren Dehnungen im mehrachsigen Spannungszustand abgebildet werden können. Im Tiefungsversuch zeigte sich allgemein, dass die Simulation ein erhöhtes Spannungsniveau im Vergleich zu den experimentellen Ergebnissen vorhersagt.





**Abbildung 4-38:** Vergleich der experimentellen Daten mit der Materialmodellierung nach: a) Hill, b) visko-plastisch, c) Lemaitre (Schädigung basierend auf den Zugversuchsergebnissen) und d) Lemaitre (erweiterte Schädigungsabbildung durch den Tiefungsversuch) [59]

Im Anschluss an den Aufbau der Materialmodelle und den Abgleich mit der experimentellen Materialcharakterisierung fand die Betrachtung des Umformprozesses statt. Hierzu wurden die wirkmedienbasierten Umformprozesse in numerischen Simulationsmodellen abgebildet. Dies umfasste insbesondere die in **Abbildung 4-39** dargestellten Varianten mit einseitigem und zweiseitigem Druck sowie dem starren und flexiblen Niederhalter. Durch unterschiedliche Abstraktionsgrade wurden eine mögliche Modellvereinfachung und damit einhergehend eine Erhöhung der numerischen Effizienz beleuchtet. Bei der hier beschriebenen rotations-symmetrischen Werkstückgeometrie wurde insbesondere die Symmetrie ausgenutzt, um effizientere Berechnungen zu ermöglichen. In der Regel wurde mit einer Viertelsymmetrie gearbeitet. Vollkörpersimulationen benötigten deutlich mehr Berechnungszeit und erbrachten keinen wesentlichen Mehrwert. Ein zweidimensionales Modell (Projektion in die Ebene) benötigte vergleichsweise kurze Berechnungszeiten, jedoch sind wesentliche, insbesondere durch die Anisotropie hervorgerufene Effekte im Simulationsergebnis nicht abbildbar.

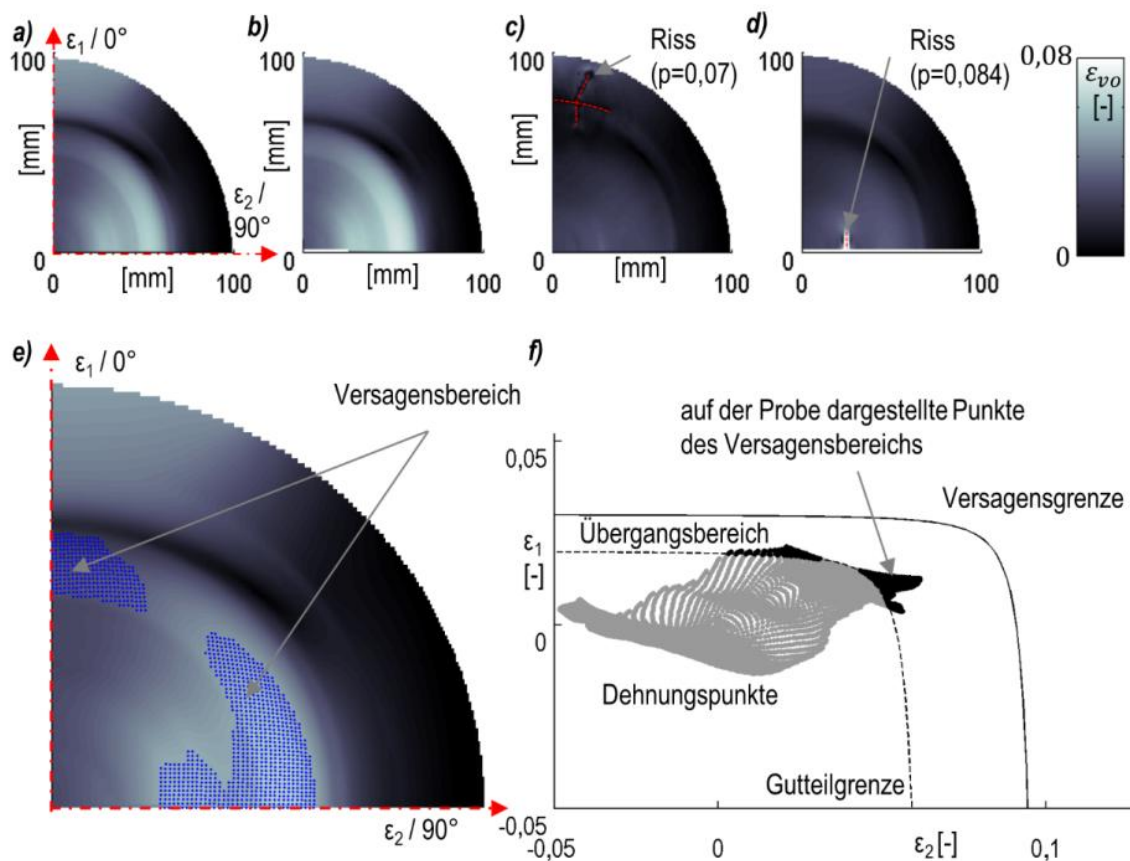


**Abbildung 4-39:** Gegenüberstellung der Prozessvarianten in der Simulation mit starrem Niederhalter und einseitigem Wirkmediendruck (Prozess 1) und flexiblem Niederhalter mit zwei-seitigem Wirkmediendruck (Prozess 2) [59].

Aufbauend auf den ausgewählten Basismodellen fand eine erweiterte Betrachtung der Auswirkung der Materialmodellierung auf das vorhergesagte Umformergebnis statt. Wie in **Abbildung 4-40** dargestellt, sind die viertelsymmetrischen Simulationsergebnisse mit den unterschiedlichen Materialmodellen simuliert worden. Simuliert wurde ohne Schädigungsabbildung (vgl. a und b) sowie mit (vgl. c und d), wobei das Hill-Modell, wie zuvor beschrieben, die Basis für die weiteren komplexen Erweiterungen (Schädigung und visko-Plastizität) bildet. Die Teilabbildungen a) und b) sagen modellbedingt nichts über ein Versagen des Materials aus und sind einander aber in der Spannungsverteilung auf der Oberfläche ähnlich. In den Abbildungen c) und d) wird die Rissentstehung und -ausbreitung modelliert und simuliert. Es zeigt sich, dass der Ort und der Zeitpunkt der Rissentstehung von den gewählten Parametern abhängig sind. Simuliert wurde zum einen mit den Schädigungsparametern des Zugversuchs (c) und zum anderen mit denen um die Parameter des Tiefungsversuchs erweiterten (d). Bei der erweiterten Variante zeigt sich eine Rissausbreitung in  $0^\circ$ -Richtung, was im Gegensatz zu den experimentellen Ergebnissen ( $90^\circ$ -Rissausbreitung) steht. Dies lässt sich mit dem verwendeten Schädigungsmodell begründen. Eine Kombination aus Spannungszustand und Rissbeginn liegt diesem zugrunde, wobei eine Differenzierung des Rissbeginns in unterschiedliche Raumrichtungen bei mehrdimensionaler Belastung nicht stattfindet. Weiterhin fällt auf, dass die Modelle der Schädigungsmodellierung geringere Oberflächendehnungen aufweisen, als die ohne Abbildung des Schädigungsverhaltens. Eine Erklärung für dieses Phänomen ist, dass die Schädigung zu Instabilitäten im Simulationsprozess führt und dieser früher beendet wird. In



den Teilen e) und f) wird die im Bauteil erreichte Dehnung mit der zuvor ermittelten Grenzformänderungskurve abgeglichen. Es zeigt sich, dass einige Bereiche als Versagenszonen angenommen werden müssen. Zusätzlich zeigt die Auftragung der im Bauteil erreichten Dehnungen im Grenzformänderungsschaubild (vgl. Abschnitt 4.2) für Papier die Größe der Grenzüberschreitung. In den Fällen der Überschreitung der Grenze kann nach dem hier gezeigten Versagenskriterium keine sichere Gutteilherzeugung angenommen werden, da sich die Dehnungszustände des Bauteils im Übergangsbereich befinden.



**Abbildung 4-40:** Gegenüberstellung der Modellierungsansätze; Materialbeschreibung nach: a) Hill, b) visko-plastisch, c) Schädigung basierend auf Zugversuchsergebnissen und d) Schädigung erweitert um den Tiefungsversuch; e) Versagensvorhersage auf Probenoberfläche durch Grenzformänderung; f) Darstellung der Überschreitung der Grenzformänderungskurve

Die Materialcharakterisierung erlaubt es, das Verhalten von Papier mittels unterschiedlicher Modellierungsansätze in numerischen Simulationen abzubilden. Es zeigte sich, dass der Zug-

---

versuch, wie auch der Tiefungsversuch, durch die verschiedenen Modellansätze beschrieben werden können. Auch Risse und Materialversagen lassen sich durch die Simulation abbilden. Insbesondere ist es möglich, die im verwendeten Industriekarton vorhandene, starke Anisotropie abzubilden. Größere Unterschiede in den Ergebnissen der verschiedenen Materialmodelle lassen sich nicht feststellen. Prinzipiell ist zu bemerken, dass die benötigte Rechenzeit mit der Komplexität des Materialmodells zunimmt. Eine Abbildung des Rissverhaltens/Rissauftritts benötigt demnach wesentlich mehr Zeit, als ein vergleichbares Modell nach z.B. Hill. Deutliche Unterschiede der Materialmodelle zeigen sich in der Abbildung der Umformprozesse. Dabei zeigen das Konzept nach Hill und die Erweiterung bezüglich des viskoplastischen Verhaltens ähnliche Ergebnisse der Oberflächendehnung im Prozess. Modellierungskonzepte, welche das Materialversagen im Umformprozess selbst widerspiegeln, zeigen ein deutlich anderes Verhalten (allgemein geringere Dehnungen aufgrund der frühen Rissentstehung). Dies ist bedingt durch das Entstehen von Rissen im Umformprozess.

Die Verwendung von angepassten Grenzformänderungskurven für Papier sagt in Verbindung mit dem Konzept nach Hill ein Probenversagen voraus (*Abbildung 4-40*). Die zugehörigen Rissbereiche sind auf der Probe dargestellt. Der Vergleich mit den Ergebnissen aus dem Arbeitspaket „Identifikation signifikanter Prozessparameter“ zeigt das Potenzial, welches Grenzformänderungskurven zur Vorhersage des Materialversagens bieten.

---

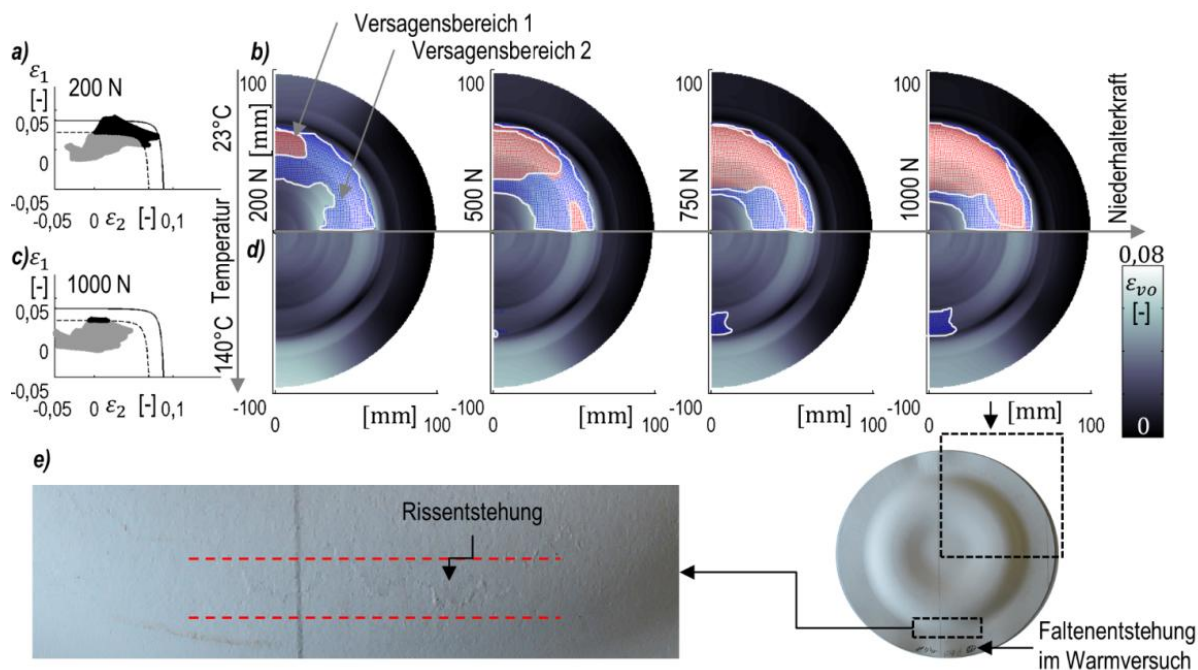
#### 4.7 Vergleich der Prozessvarianten

---

An einer einheitlichen Versuchsgeometrie wurden die beiden Prozessvarianten verglichen. Hierzu wurden die Ergebnisse aus den vorherigen Arbeitspaketen herangezogen und aufbereitet. Eine Werkstückfeuchte von 15 % und Werkzeuge bei Raumtemperatur sind als feste Prozessparameter festgelegt worden.

Der wirkmedienbasierte Prozess 1 wurde in numerischen Simulationen in Verbindung mit vier unterschiedlichen Niederhalterkräften und zwei Temperatureinstellungen untersucht und den experimentellen Ergebnissen gegenüber gestellt. Es zeigte sich, dass bei steigender Niederhalterkraft über 200 N die Versagenswahrscheinlichkeit deutlich zunimmt (*Abbildung 4-41 b*)). Dieses Phänomen lässt sich zusätzlich durch die Auftragung der Oberflächendehnungen in das Grenzformänderungsschaubild mit den zuvor aufgenommenen Grenzformände-

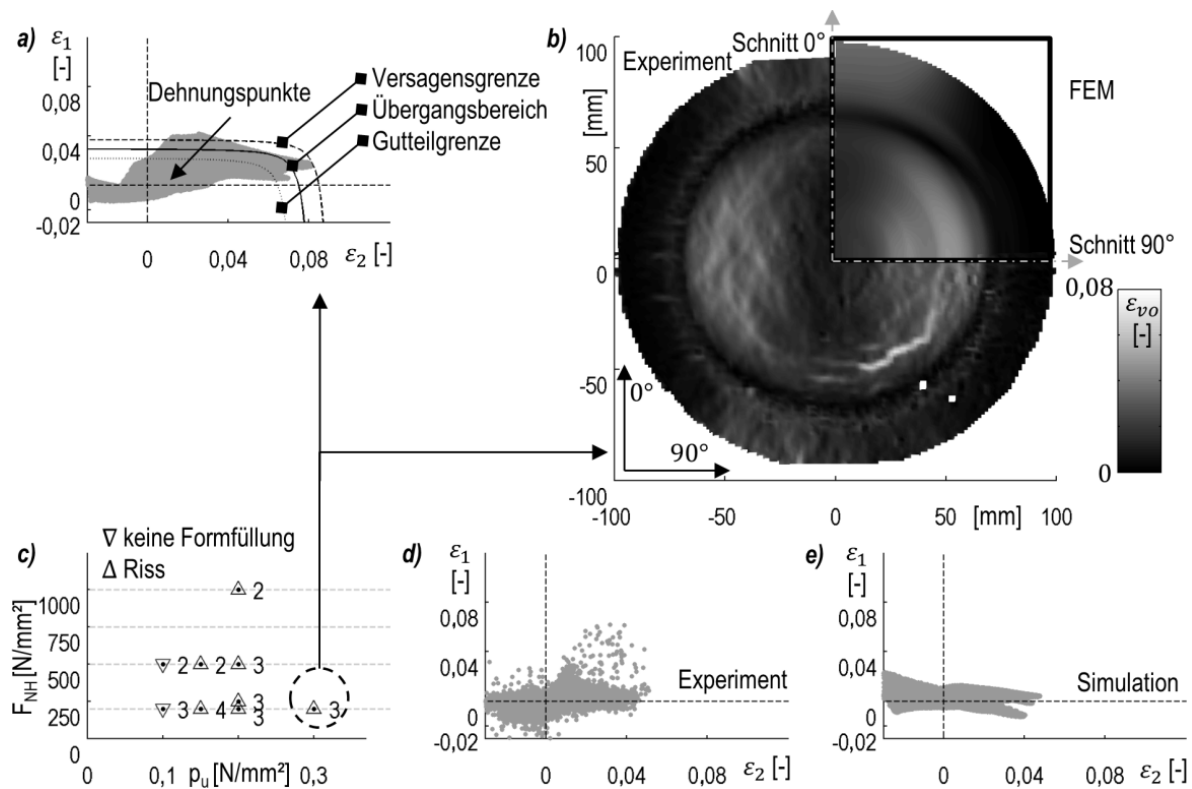
rungskurven des entsprechenden Materials nachvollziehen. In **Abbildung 4-41 a)** ist ersichtlich, dass die aufgetragenen Dehnungen die Gutteilgrenze überschreiten. Die Dehnungspunkte befinden sich im Übergangsbereich, in dem von einer erhöhten Versagenswahrscheinlichkeit ausgegangen werden muss. Durch die Erwärmung der Werkzeugteile verschieben sich die Dehnungspunkte selbst bei der Niederhalterkraft von 1000 N, die zuvor den größten Versagensbereich aufwies, fast komplett unter die Gutteilgrenze. Nur noch ein geringer Anteil der Oberflächendehnung befindet sich im Übergangsbereich. (**Abbildung 4-41 c)**)



**Abbildung 4-41:** Untersuchung des wirkmedienbasierten Prozesses 1 mit: a) Grenzformänderungskurve für Raumtemperatur und 200 N Niederhalterkraft, b) Darstellung der Versagensbereiche (Versagensbereich 1 hohe Versagenswahrscheinlichkeit, Versagensbereich 2 Beginn der Versagensmöglichkeit), c) Grenzformänderungskurve für 140 °C und 1000 N Niederhalterkraft, d) Darstellung der Versagensbereiche, e) Versagen auf der Realprobe [59]

Für den wirkmedienbasierten Prozess 1 und Raumtemperatur wurde das Prozessfenster (**Abbildung 4-42 c)**) aus Niederhalterkraft und Umformdruck experimentell untersucht. Zudem fand ein Vergleich der Oberflächendehnung in numerischen Simulationen (**Abbildung 4-42 e)**) und experimentellen Untersuchungen (**Abbildung 4-42 e)**) an ausgewählten Proben statt. Hier zeigte sich, dass durch die gewählte Parametereinstellung von Raumtemperatur und Niederhalterkraft keine Gutteile herstellbar sind. Entweder kam es zu einem Riss wie im unte-

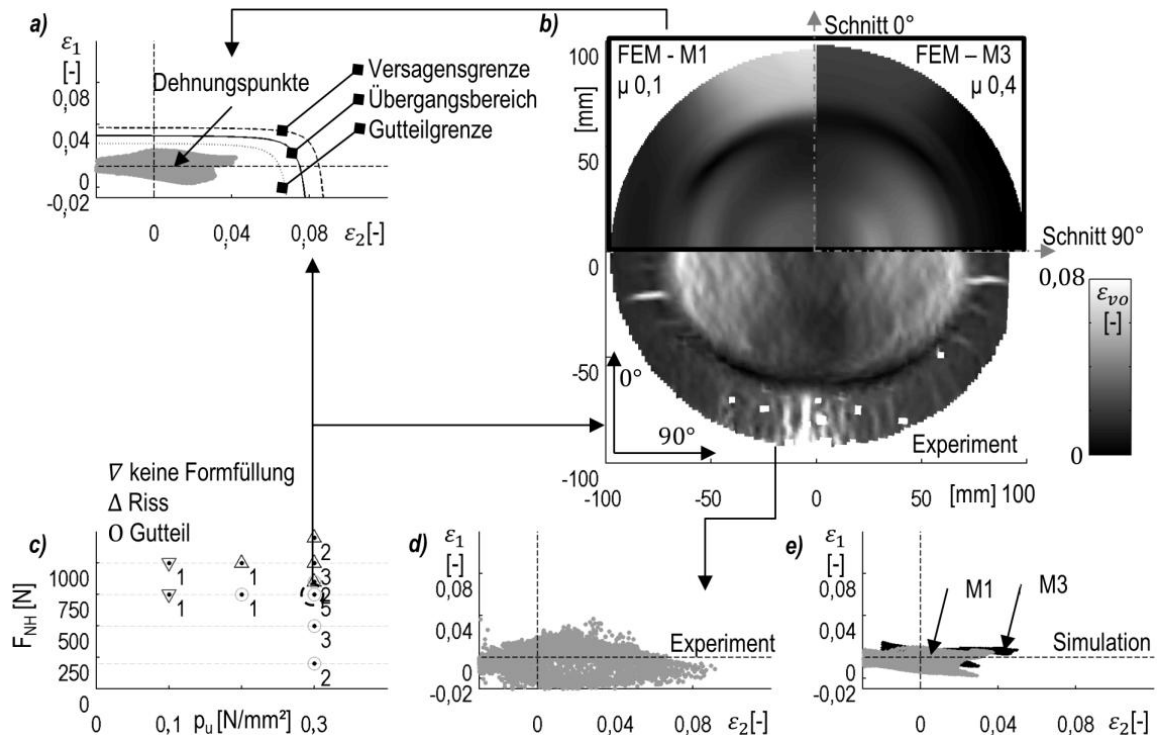
ren rechten Bildabschnitt der **Abbildung 4-42** b) oder eine Formfüllung war nicht gegeben. Durch das prinzip- und materialbedingte Rauschen bei den experimentellen Messungen, zeigt sich bei diesen eine deutlich größere Dehnungsstreuung als bei den numerisch ermittelten Dehnungsverteilungen.



**Abbildung 4-42:** Untersuchung des wirkmedienbasierten Prozesses 1 bei Raumtemperatur mit: a) Grenzformänderungskurve für Raumtemperatur und 200 N Niederhalterkraft, b) Darstellung der Oberflächendehnung, c) Prozessfenster, d) experimentelle Dehnungsverteilung, e) Dehnungsverteilung des Simulationsmodells [59]

Zu den Untersuchungen bei Raumtemperatur fand für den wirkmedienbasierten Prozess 1 eine Untersuchung bei 140 °C Werkzeugtemperatur statt. Durch diese gezielte Prozessparameterveränderung, konnten Gutteile ab einem Umformdruck von 0,2 N/mm<sup>2</sup> und einer Niederhalterkraft von maximal 750 N erzeugt werden. (**Abbildung 4-43** c)) Wird die Niederhalterkraft erhöht, kommt es ab diesem Umformdruck zum Reißen des Werkstücks. Durch die Erhöhung der Werkzeugtemperatur kommt es anscheinend zu einer Veränderung des tribologischen Systems, durch welches das Werkstückmaterial besser in die Probenmitte

fließen kann. Dieser Effekt, sorgt zum einen für einere geringere Klemmkraft im Niederhalterbereich, sodass eine Formfüllung möglich ist, und zum anderen für die Verhinderung des Reißens. Trotz dieser generellen Herstellbarkeit der Formteile, stellte sich nach dem Entformen der Werkstücke eine Randwelligkeit ein. Diese ist nicht mit den sonst typischen Falten zu verwechseln.

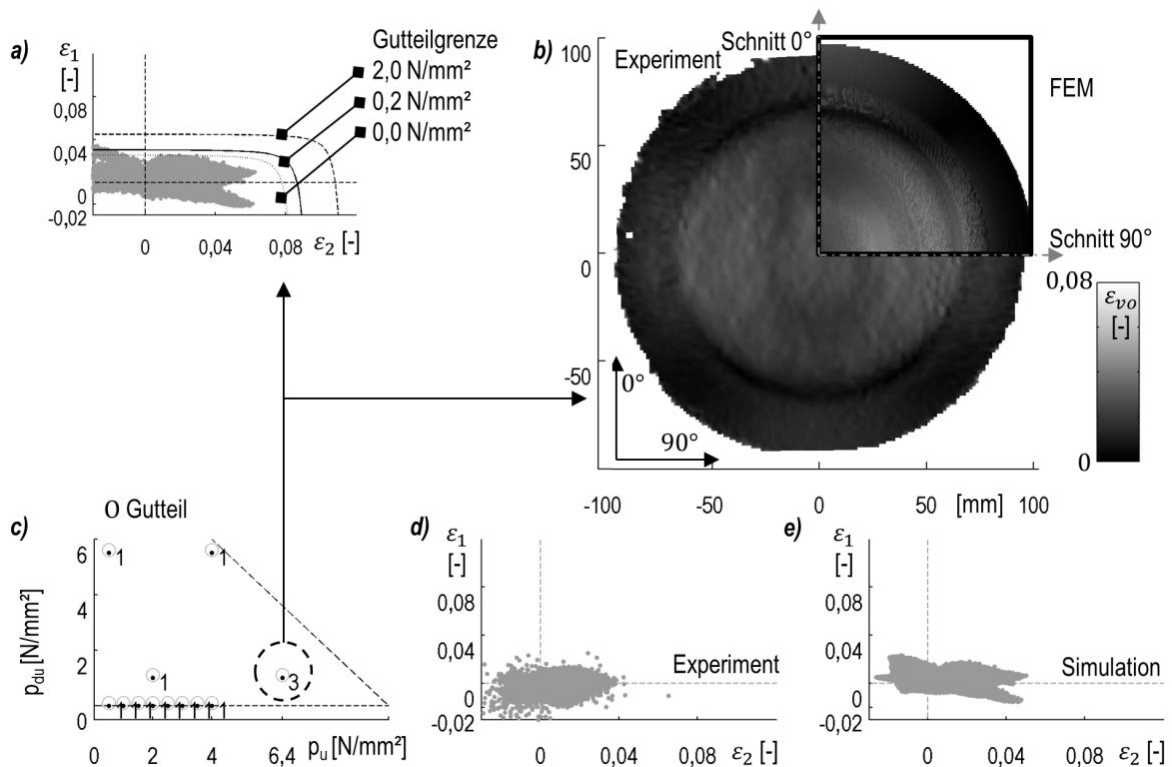


**Abbildung 4-43:** Untersuchung des wirkmedienbasierten Prozesses 1 bei 140 °C mit: a) Grenzformänderungskurve, b) Darstellung der Oberflächendehnung, c) Prozessfenster, d) experimentelle Dehnungsverteilung, e) Dehnungsverteilung des Simulationsmodells [59]

Für den wirkmedienbasierten Umformprozess 2 bildet sich das Prozessfenster aus der eingestellten Drucküberlagerung und dem Umformdruck. In Anlehnung an die vorherigen Untersuchungen wurde ein Vergleich zwischen der Oberflächendehnung in experimentellen Untersuchungen und in numerischen Simulationen durchgeführt. Insbesondere **Abbildung 4-44 c)** macht deutlich, dass in diesem Fall, der Umformung mit Gegendruck, nur Gutteile erzeugt werden konnten. Die ausgewählte Geometrie ließ sich mittels jeder Parameterkombination herstellen. Auch eine wie oben beschriebene Randwelligkeit der entformten Werkstücke wurde nicht festgestellt. Erkennbar und theoretisch, simulativ




vorhersagbar ist dies auch durch die Auftragung der Dehnung im Grenzformänderungsschaubild über die Hauptorientierungen in **Abbildung 4-44 a)**, wobei hier die Gutteilgrenzen für keine sowie 0,2 N/mm<sup>2</sup> und 2,0 N/mm<sup>2</sup> Drucküberlagerung aufgetragen sind. Die Dehnungspunkte überschreiten die Gutteilgrenze bei einer Drucküberlagerung von 2,0 N/mm<sup>2</sup> an keiner Stelle.



**Abbildung 4-44:** Untersuchung des wirkmedienbasierten Prozesses 2 bei Raumtemperatur mit: a) Grenzformänderungskurve, b) Darstellung der Oberflächenverzerrung, c) Prozessfenster, d) experimentelle Dehnungsverteilung, e) Dehnungsverteilung des Simulationsmodells [59]

Die ausgewählte Frisbee-Geometrie ist bei den anfangs gewählten Vergleichsparametern (15 % Werkstückfeuchte und Raumtemperatur) nur mittels des wirkmedienbasierten Umformens mit Gegendruck (Prozess 2) herstellbar. Durch Parameterveränderungen (Erhöhung der Werkzeugtemperatur auf 140°C) lassen sich Werkstücke ohne Falten und Risse herstellen, jedoch entsteht eine Randwelligkeit der Werkstücke. Neben dieser generellen Herstellbarkeit des Beispielproduktes, ist eine prinzipielle Abbildung des Prozesses



---

in der numerischen Simulation (FEM) möglich. Hierdurch lassen sich Versagensverhalten und Dehnungen des Werkstücks vorhersagen.

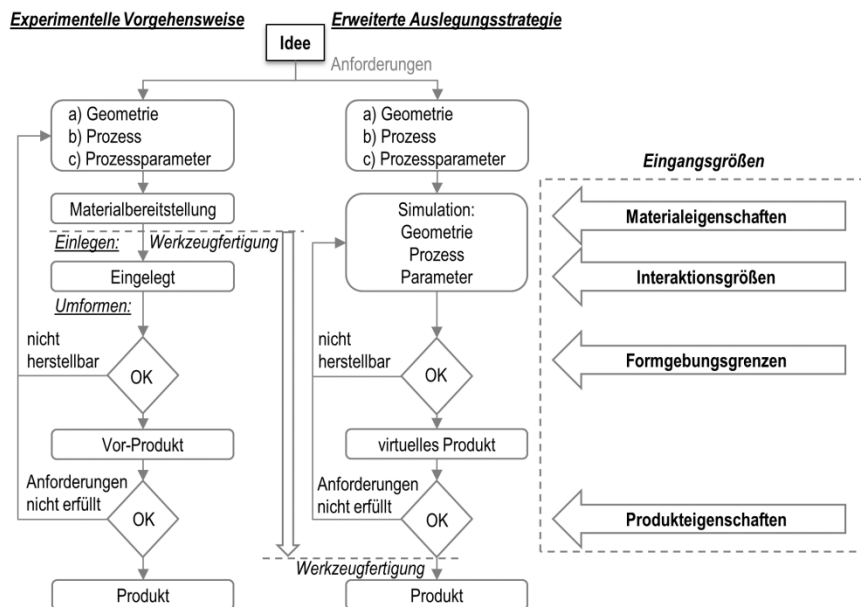
---

#### 4.8 Entwicklung eines Demonstrators

---

Als Schlusspunkt des Projekts wurde ein Demonstrator entwickelt, welcher die Möglichkeiten der Papierumformung verdeutlicht und die Vorteile der Prozessauslegung mittels FEM (Finite-Elemente-Methode) aufzeigt. Der Demonstrator realisiert eine Geometrie, welche mit bestehenden, stempelbasierten Papierumformverfahren nicht herstellbar ist. An seinem Beispiel und mit der entwickelten Auslegungsstrategie kann gezeigt werden, dass durch den Einsatz der auf die Papierverarbeitung übertragenen wirkmedienbasierten Umformverfahren und numerischer Simulationsverfahren eine zielgerichtete, effiziente und reproduzierbare Auslegung von neuartigen Bauteilen/Produkten (asymmetrische und geschwungene Geometrie mit glatten Oberflächen) möglich ist.

Die Demonstratorentwicklung fand aufbauend auf den Ergebnissen der vorherigen Arbeitspakete statt. Die Abbildbarkeit des Materialverhaltens und die Vorhersage von Versagens in der Umformung bildete hierbei die Grundlage der Entwicklung. Die hierfür erarbeitete Entwicklungsmethodik ist in **Abbildung 4-45** verdeutlicht. Es fand ein Übergang von der bisherigen experimentell geprägten Auslegung auf eine Auslegung in numerischen Simulationen statt. Dies ermöglichte zum einen die gezielte Optimierung des Produktes und zum anderen eine deutliche Reduktion der Entwicklungszeiten und Kosten für experimentelle Untersuchungen sowie den Formenbau.



**Abbildung 4-45:** Entwicklungsmethodik - von der Idee zum Produkt [59]

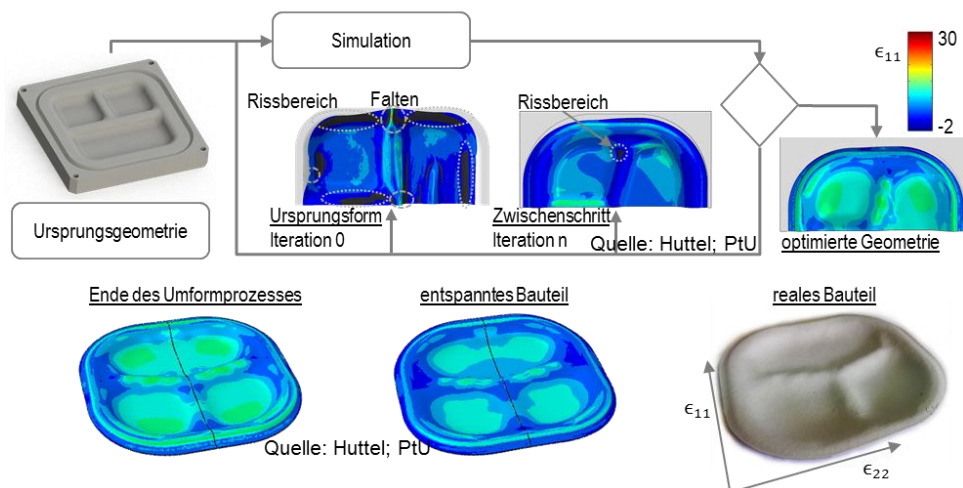
Die in **Abbildung 4-45** gezeigten Vorgehensweisen der Produktauslegung beinhalten prinzipiell keine Einschränkungen in Bezug auf Geometrie, Prozess oder Prozessparameter. Diese werden durch den Anwender definiert und können theoretisch auf beliebige Anwendungsfälle übertragen werden. In diesem Zusammenhang bleibt es auch dem Anwender überlassen, seine Erfahrungen in den Entwicklungsablauf mit einfließen zu lassen. Dies kann zu einer Verringerung der Anzahl an Iterationen führen.

Grundsätzlich beschreibt die Methodik das Vorgehen von einer anfänglichen Idee bis zur Produktion der erdachten Produkte. Hierbei werden in **Abbildung 4-45** die derzeit industriell eingesetzte und die erweiterte Auslegungsstrategie gegenübergestellt. In beiden sind die grundlegenden Parameter Geometrie, Prozess und Prozessparameter definiert. Die zuvor systematisch ermittelten Materialeigenschaften, Interaktionsgrößen sowie die Formgebungsgrenzen stellen die Eingangsgrößen der erweiterten Auslegungsstrategie dar. Sie bilden die Basis für die simulative Abbildung des Fertigungsprozesses und darauf aufbauend die Entscheidung, ob die gewählte Geometrie mit den getroffenen Annahmen herstellbar ist oder nicht. Diese Entscheidung wird aufgrund der durch die Simulation ermittelten Dehnungen des Werkstückmaterials in Abgleich mit den Formgebungsgrenzen getroffen. Es erscheint sinnvoll, dieses Kriterium zu wählen, da zum einen eine effiziente Simulation ohne Schädigungsabbildung benutzt werden kann und zum anderen ein einfacher Abgleich mit den ermittelten Grenzformänderungskurven ausreicht, um eine Aussage über die umformtechnische Mach-




barkeit zu treffen. Nachdem die Herstellbarkeit simulativ bewiesen ist, wird ein Abgleich mit den geforderten Produkteigenschaften durchgeführt. Auch dieser Schritt erfolgt digital im Computermodell. Zu den Produkteigenschaften zählt u. a. die Form-/Maßhaltigkeit des Werkstücks/Produkts nach dem Entformen und der Feuchtigkeitsgehalt. Bei der erweiterten Auslegungsstrategie wird erst nach und basierend auf der Überprüfung der zuvor beschriebenen Produktions- und Produkteigenschaften ein reales Werkzeug gefertigt. Dies bedeutet, dass ein Großteil der Werkzeugformanpassungen rein digital erfolgt und im Vergleich zum bisherigen, experimentellen Vorgehen bei der Auslegung ein deutlicher Zeitvorteil und Flexibilitätsvorteil entsteht.

Die dargestellte Entwicklungsmethodik wurde anhand eines exemplarischen Produktes vollzogen, kann jedoch auf weitere Anwendungsfälle übertragen werden. Es wird angenommen, dass die zu optimierende Geometrie aus einem Halbzeug (Papier) mit den maximalen Abmessungen 200 mm x 200 mm herzustellen ist. Des Weiteren sind drei voneinander getrennte Vertiefungen vorgesehen. Der Rand ist ohne Falten auszuführen, um ein späteres Versiegeln mit einer Folie zu ermöglichen. Um die Stabilität zu erhöhen ist der Rand zu biegen.



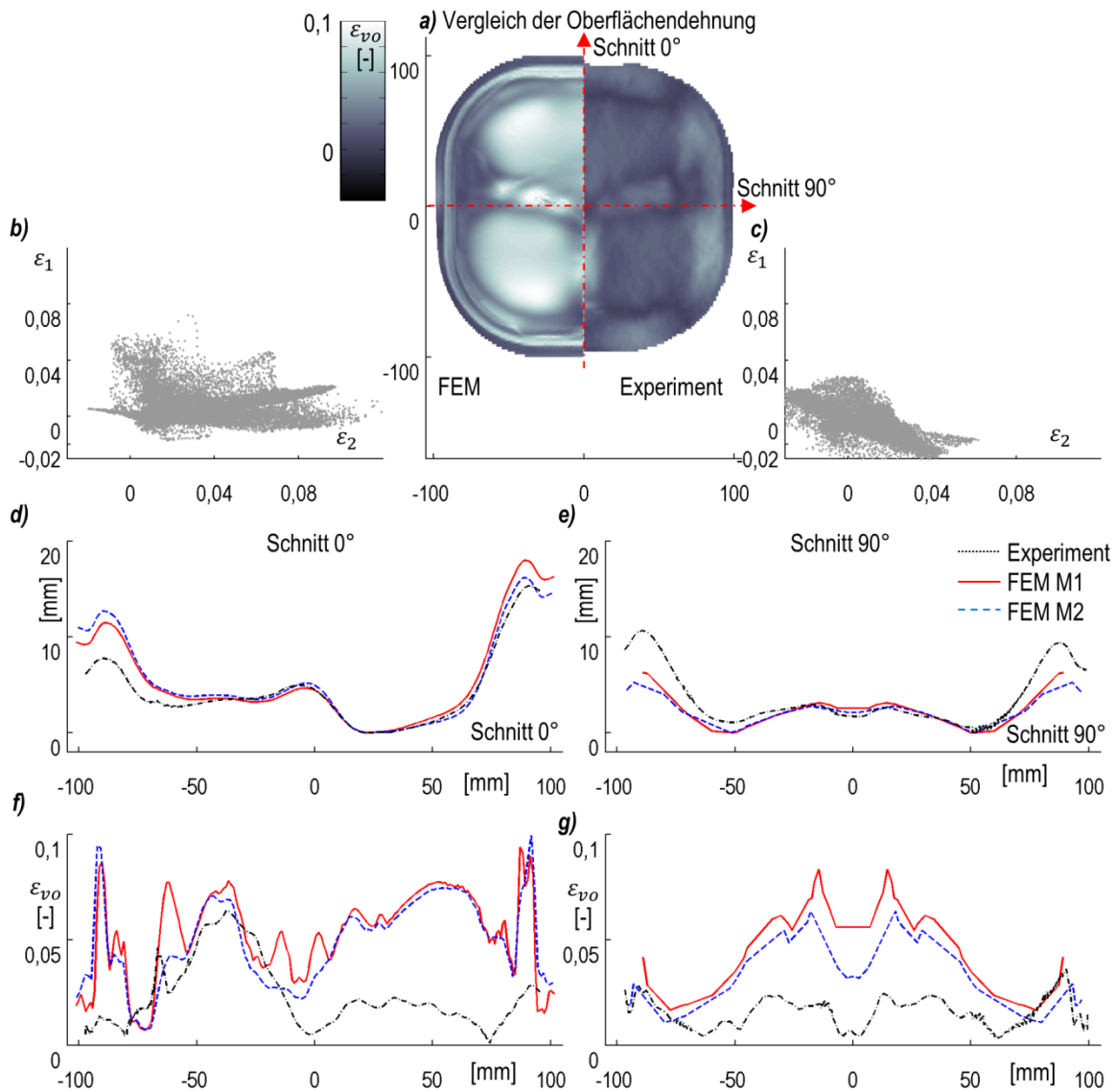
**Abbildung 4-46:** Exemplarischer Durchlauf der erweiterten Auslegungsmethodik [59]

In **Abbildung 4-46** sind diese grundlegenden Anforderungen an die Produktgeometrie in einer Ursprungsgeometrie zusammengefasst. Diese bildet die geforderte Funktionalität des Produktes ab, ist aber bislang nicht in Bezug auf Fertigungsgerechtheit oder den Produktionsprozess angepasst. Im ersten Schritt wird dies mittels einer numerischen Simulation überprüft. Hierzu wird das Geometriemodell in das Simulationsmodell importiert. Dort wird der Prozess des



---

wirkmedienbasierten Tiefziehens nachgebildet und das Werkstück (Halbzeug) simulativ umgeformt. Nach der Simulation wird die sich einstellende Dehnung des Werkstücks analysiert. Hierbei ergeben sich Überschreitungen der ermittelten Prozessgrenzen. Werden Dehnungsgrenzen überschritten, ist von einer Rissbildung auszugehen. Ebenso ist in Fällen einer zu geringen Niederhalterkraft von Faltenbildung auszugehen. Durch gezielte manuelle Anpassung der Geometrie in Bereichen der Überschreitung der Dehnungsgrenzen und ggf. Veränderung der Prozessdrücke wird der Übergang zur Iterationsstufe „1“ bzw. „n+1“ geschaffen. Nach der Simulation des Iterationsschritts „m“, in dem die Einhaltung der Dehnungsgrenzen gewährleistet ist, als auch die Faltenbildung verhindert wird, ist eine optimierte Geometrie entstanden. Zur Überprüfung der endgültigen Bauteileigenschaften insbesondere der Formhaltigkeit, wird das Bauteil simulativ entformt, was durch Entspannen der mit Druck beaufschlagten Wirkmedienkissen und Lösen der entsprechenden Randbedingungen geschieht. Auf Basis dieser Ergebnisse lassen sich nun eine reale Werkzeugform der optimierten Geometrie fertigen und reale Bauteile abformen. Diese wiederum können mit den simulierten Bauteilen verglichen werden. Hierzu wird die Oberflächendehnung der realen Bauteile mittels eines optischen 3D-Messsystems aufgenommen.



**Abbildung 4-47:** Vergleich der simulierten und experimentellen Demonstratorgeometrie; Oberflächendehnung: auf der Geometrie a) , im simulativen b) und experimentellen c) Dehnungsdiagramm; Schnitt-Geometrie in 0° d) und 90° e); Oberflächendehnung der Schnitte in 0° f) und 90° g) M1 – Rand wird zuerst umgeformt und dann der Innenbereich; M2 – Innenbereich wird zuerst umgeformt und dann der Rand (Huttel 2015)

Die realen Bauteile wiederum können mit den simulierten Bauteilen verglichen werden. Hierzu wird die Oberflächendehnung der realen Bauteile mittels eines optischen 3D-Messsystems aufgenommen. Diese ist in Abbildung 4-47 der numerisch ermittelten gegenübergestellt.

## Erzielte Ergebnisse

---

Zur Auslegung von Produkten insbesondere in Bezug auf Fehlerfreiheit und Fertigungsgerechtigkeit ist eine erweiterte Auslegungsstrategie entwickelt worden. Diese ermöglicht es mit den zuvor gemachten Erkenntnissen ein Bauteil aus Papier simulativ – iterativ für den Prozess des wirkmedienbasierten Tiefziehens auszulegen. Hierdurch ist es möglich den Auslegungsprozess von tiefgezogenen Papierbauteilen deutlich flexibler, schneller und zielgerichteter zu gestalten. Insbesondere der in der konventionellen Auslegung notwendige große experimentelle und maschinelle Aufwand während der iterativen Anpassung der Umformwerkzeuge kann deutlich verringert werden. Ebenso lässt sich durch die gemachten Erkenntnisse eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bei der Auslegung erzeugen, was bisher nicht der Fall war.

Aufbauend auf den Ergebnissen der vorherigen Arbeitspakete fand die Entwicklung eines exemplarischen Demonstratorbauteils statt. Hierbei handelt es sich um einen sogenannten Menüteller. Die Abbildbarkeit des Materialverhaltens und die Vorhersage von Versagen in der Umformung bildeten hierbei die Grundlage der Entwicklung. Es fand ein Übergang von der bisherigen, experimentell geprägten Auslegung auf eine Auslegung in numerischen Simulationen statt. Durch diese simulative Vorhersage war es möglich das Demonstratorbauteil gemäß der Anforderungen falten- und rissfrei tiefzuziehen. Das Bauteil zeigt zudem, dass geschwungene, asymmetrische dreidimensionale Bauteile mit vergleichsweise glatten Oberflächen aus einem anisotropen industriell eingesetzten Karton hergestellt werden können. **Abbildung 4-48** zeigt ein Foto des beschriebenen Menütellers.

Die in **Abbildung 4-47** gezeigte Gegenüberstellung der experimentellen und numerischen Ergebnisse zeigt, dass eine Simulation des beschriebenen Prozesses der Demonstratorfertigung prinzipiell möglich ist und qualitative Aussagen über die Dehnungsverteilung auf der Oberfläche ermöglicht. Die Oberflächendehnungen sind im experimentellen Fall geringer als die numerisch berechneten. Deutlich zu sehen ist dieser Sachverhalt im Vergleich der beiden Dehnungsdiagramme. Die experimentellen Dehnungen liegen deutlich kompakter um den Null-Dehnungspunkt und überschreiten die 0,04-Grenze in 1-Richtung und die 0,08-Grenze in 2-Richtung nicht, was im numerischen Ergebnis deutlich der Fall ist. Trotz dieser quantitativ unterschiedlichen Dehnungsverteilung zeigen die Geometrieschnitte in  $0^\circ$  und  $90^\circ$  Übereinstimmungen der Simulationen mit dem Experiment. Deutlicher wird der Unterschied wiederum in der Darstellung der Oberflächendehnung aufgetragen über die Schnittlänge. Hierbei zeigen zwar die Simulationsvarianten Übereinstimmungen, weichen in

---

weiten Bereichen aber vom Experiment ab. Die Dehnungen in der Simulation lassen nur eine qualitative Tendenz ersehen. Dieser Unterschied in der Dehnungsverteilung lässt sich ansatzweise mit den in der Simulation getroffenen Annahmen begründen. In den Modellen werden die in der realen Umformung verwendeten Kunststofffolien vernachlässigt und nicht abgebildet. Ebenso wird in der Simulation das Materialmodell nach Hill verwendet, welches durch komplexere Modelle zur Verbesserung der numerischen Abbildung ersetzt werden könnte.

Die Auslegungsstrategie kann für weitere Anwendungen in Industrie und Forschung benutzt und auf andere Materialtypen und Bauteilanforderungen übertragen werden. Ebenso lässt sich diese durch Einfügen weiterer Überprüfungs- oder ggf. Automatisierungsschritte erweitern, um so eine weitere Verkürzung, Flexibilisierung und Verbesserung der Produktentwicklung von tiefgezogenen Papierprodukten herbeizuführen. Dies führt zu einer besseren und schnelleren Reaktionsfähigkeit von Papierverarbeitungs- und Papierherstellungsunternehmen auf Marktanfragen.



*Abbildung 4-48: Demonstratorbauteil - Menüteller*

---

## 5 Schlussfolgerungen

---

Ziel des Projektes war es, das Anwendungsspektrum von Tiefziehverfahren für den Werkstoff Papier durch die Schaffung rohstoff-, prozess- und auslegungsseitiger Grundlagen zu erweitern. Durch die vorliegenden Untersuchungen wurden hierzu wesentliche Informationen gewonnen. Mittels der wirkmedienbasierten Umformung ist es möglich, dreidimensionale Werkstücke aus Papier herzustellen und so das Anwendungsspektrum des nur bedingt formbaren Werkstoffs zu erweitern. Weiteres Steigerungspotential ergibt sich aus einer Drucküberlagerung im Umformprozess. Es konnte gezeigt werden, dass die zurzeit für Papier übliche experimentelle und damit kostenaufwendige Vorgehensweise bei der Entwicklung neuer Umformprodukte durch die gezielte Untersuchung der Bereiche Material, Werkstoffcharakterisierung, Prozessauslegung und Simulation verbessert werden kann. Anhand von vereinfachten Ansätzen der Materialmodellierung können – verbunden mit den entsprechenden Verfahren der Materialcharakterisierung – numerische Simulationen durchgeführt werden, die eine gezielte Auslegung der Prozesse und eine Optimierung der herzustellenden Geometrien ermöglichen. Für die Abbildung der Umformung in der Simulation genügt es, einen Tensile-Stiffness-Orientation-Test (TSO) sowie Zugversuche bei vier verschiedenen Feuchten durchzuführen und außerdem die Reibung zu untersuchen, wozu die Minima und Maxima des Parameterraums aus Feuchte, Temperatur, Flächenpressung und Geschwindigkeit benötigt werden. Schließlich empfiehlt es sich, ein sogenanntes Grenzformänderungsschaubild über die Hauptorientierungen zu bilden. Dies erlaubt es, anschaulich und schnell Aussagen über die Produzierbarkeit eines spezifischen Bauteils zu tätigen.

Basierend auf den vorliegenden Untersuchungsergebnissen lassen sich zudem Optimierungen des Papierherstellungsprozesses mit Blick auf die Umformung durchführen. Als vielversprechend haben sich hier insbesondere eine Kräuselung der Fasern mithilfe eines Dispergers sowie eine enzymatische Behandlung erwiesen. Auch eine – technisch allerdings besonders in Maschinenrichtung schwierig darstellbare – Schrumpfungsförderung während der Trocknung erhöht die Umformfähigkeit des Materials. Stärke, verschiedene Füllstoffe sowie Melassezugabe zeigten dagegen nur einen kleinen Effekt. Der Einfluss der Temperatur auf die Umformung konnte leider nicht abschließend bewertet werden. Tendentiell zeigten sich jedoch bessere Umformergebnisse mit steigender Werkzeugtemperatur. Eine erweiterte Abbildung der komplexen Wechselwirkung zwischen Temperatur und Feuchte auf die mechani-

schon Eigenschaften von Papier könnte die Vorhersage des Verhaltens in Umformprozessen weiter verbessern. Eine Wachsbeschichtung stellt eine hervorragende Möglichkeit dar, günstigen Einfluss auf den für die Umformung entscheidenden Parameter der Reibung zu nehmen. Hier wäre es zukünftig interessant, lokale Veränderungen des Reibwertes durch gezielten, stellenweisen Wachsauftrag zu untersuchen.

Der entwickelte Demonstrator verdeutlicht abschließend die Möglichkeiten des wirkmedienbasierten Umformens von Papier. Insbesondere werden die z.T. deutlich erweiterten Umformgrenzen bei gleichbleibender Oberflächengüte sichtbar. Bei der Herstellung des Demonstrators traten keine Falten auf. Ebenso wurde eine schädigungsfreie Demonstratoroberfläche erzeugt. Trotz der teils relativ stark gekrümmten Übergänge und der asymmetrischen Geometrie wurde Formfüllung erreicht.

---

## 6 Mittelverwendung und Transfer in die Wirtschaft

---



---

### 6.1 Verwendung der Zuwendung

---

Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)

Forschungsstelle: PtU

Mitarbeiter	Mannmonate 2013	Mannmonate 2014	Mannmonate 2015
Wiss. Mitarbeiter, Dipl.-Ing., HPA A	8	12	4
Geräteinvestition	4 431,56 € (Sondersäulengestell)		

Forschungsstelle: PMV

Mitarbeiter	Mannmonate 2013	Mannmonate 2014	Mannmonate 2015
Wiss. Mitarbeiter, Dipl.-Ing., HPA A	8	12	4
Geräteinvestition	16 023,59 € (Thermokamera)		



---

## **6.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

---

Das Ziel, durch wirkmedienbasierte Verfahren die Tiefziehfähigkeit von Papier und Karton zu erweitern, erforderte zu seiner Erreichung und für eine gezielte Optimierung Kenntnisse über das Materialverhalten, die Prozesse und die Abbildung selbiger in Simulationsmodellen. Aus diesem Grund war es notwendig, im ersten Schritt das Materialverhalten zu bestimmen, um hierdurch Rückschlüsse auf die Umformbarkeit, die Belastbarkeit und die Abbildbarkeit der Prozesse zu treffen. Dies begründet die durchgeführten Variationen der Faserstoffeigenschaften, der Zugabe von Füllstoffen und der Trocknung/Schrumpfung. Die Reibung stellt einen der wichtigsten Parameter bei der Interaktion zwischen der Form und dem Halbzeug Papier dar. Bis jetzt sind nur wenig wissenschaftliche Erkenntnisse zu der Interaktion zwischen den für die Umformung typischen Einflussgrößen und den Reibbedingungen vorhanden. Dies begründet den zur Betrachtung des tribologischen Systems und zur Modifikation der Reibeigenschaften durchgeführten Aufwand. Um die Auswirkung der Prozessoptimierung und der neu entwickelten Umformverfahren auf das Umformergebnis zu beurteilen, ist ein physisch vorhandenes Werkzeug notwendig. Dies stellt den Grund für die Werkzeugauslegung und Fertigung dar. Aufbauend auf dem Werkzeug können die für den Prozess einflussreichen Parameter identifiziert werden. Die Abbildung des Materialverhaltens in Simulationen legt den Grundstein für tiefere Einblicke in die bei der Umformung auftretenden Effekte. Dies erlaubt es, den Prozess weiter zu optimieren, Produkte gezielt auszulegen und neue Produktklassen für den Werkstoff Papier zu schaffen. Somit kann das ökonomische Potenzial des Werkstoffs Papier weiter erschlossen werden. Schließlich wurden die Erkenntnisse aus dem Projekt in einer Demonstratorentwicklung zusammengeführt, die die Möglichkeiten des wirkmedienbasierten Umformens von Papier und der Vorausberechnung des Werkstoffverhaltens veranschaulicht.

Generell wurden für die Planung, Auswertung, Koordination und Durchführung der Versuche aus den Arbeitspaketen, wie im Finanzplan vorgesehen, jeweils 24 MM wiss. Mitarbeiter, Dipl.-Ing. (TU); HPA A eingesetzt.

---

---

### **6.3 Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung der Forschungsergebnisse für KMU**

---

#### **Voraussichtliche Nutzung der Forschungsergebnisse in KMU**

Die Forschungsergebnisse bieten den KMUs im Bereich der Papierverarbeitung, im Prüfmit- tel- und Formenbau die Möglichkeit, mit innovativen Produkten und Produktkonzepten neue Märkte zu gewinnen. Hiermit können tiefgezogene Gebrauchsgüter und Verpackungen aus Papier und Karton erfolgreich mit anderen Verpackungsmaterialien konkurrieren. Dies liefert auch einen Beitrag zum Erhalt der hohen Altpapier-Einsatzquote der deutschen Papierindust- rie, die einen erheblichen Beitrag zur Ressourcenschonung liefert.

Die Verbesserungen des Werkstoffs, Erweiterungen der Produktgrenzen sowie verbesserten Produktentwicklungs- und Produktionsverfahren sichern längerfristig den Einsatz von Papier und Karton bei in Tiefziehverfahren hergestellten Produkten und erhalten somit wichtige Marktanteile. Hiervon können neben KMU der Papierindustrie insbesondere Papierverarbeiter in Deutschland profitieren. In dieser ausgesprochen mittelständisch strukturierten Branche sind rund 61 Prozent der Betriebe Kleinbetriebe mit weniger als 100 Beschäftigten. Weitere 37 Prozent haben weniger als 500 Beschäftigte [Wirtschaftsverbände Papierverarbeitung e. V., 2010]. Auch bei Anwendern und Entwicklern von neuen Produkten aus Papier handelt es sich vor allem um kleinere Innovativ-Firmen, die z.B. Design-Objekte oder Werbeträger aus Papier in Auftragsarbeit herstellen lassen.

Die Beleuchtung des gesamten Umformprozesses von der Faser bis zum Produkt mit Fokus auf der Umformung sowie die Erstellung erster Richtlinien für die Produktentwicklung von tiefgezogenen Papierprodukten kommen diesen Firmen direkt zugute. Zusätzlich können durch den erweiterten Einblick in die Prozessketten gezielt Produkteigenschaften eingestellt werden, was zu neuen Anwendungsfeldern und Produktklassen führen kann.

Die Bewertung der Parameter der Werkstoffverarbeitung und Halbzeugherstellung sowie der Prozessparameter in Hinblick auf die Umformung erlaubt es, die relevanten „Stellgrößen“ zu identifizieren. Dies ermöglicht es den Papier- und Kartonproduzenten, ihre Produkte für den Markt zu optimieren. Außerdem wird ein Markt für Maschineneu- und -umbauten geschaf- fen, da wirkmedienbasierte Papierumformmaschinen bislang nicht industriell eingesetzt wer- den.

---

Die Umformbetriebe als Anwender haben mit dem bereitgestellten Wissen die Möglichkeit, gezielt den Werkstoff für die entsprechende Anwendung auszuwählen und die Prozessgrößen abzuschätzen bzw. einzelne Prozessgrößen (Reibung, Feuchte) zu optimieren.

**Zuordnung der zu erzielenden Forschungsergebnisse zu den Fachgebieten (gemäß Anlage 1 des Fragebogens zur Einschätzung der erzielten Forschungsergebnisse):**

Hauptsächliche Nutzung durch: Produktion, Rohstoffe, Verfahrenstechnik, Materialien, Werkstoffe, Verpackungstechnologie, Konstruktion, Mess-, Regel und Automatisierungstechnik

Nutzung auch möglich durch: Umwelttechnik, Chemie.

**Zuordnung der zu erzielenden Forschungsergebnisse zu den Wirtschaftszweigen (gemäß Anlage 2 des Fragebogens zur Einschätzung der erzielten Forschungsergebnisse):**

Hauptsächliche Nutzung durch:

21/22      Papier-, Verlags- und Druckgewerbe

29          Maschinenbau

Nutzung auch möglich durch:

24          Chemische Industrie

72/74      Erbringung von Dienstleistungen überwiegend für Unternehmen

**Voraussichtlicher Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der KMU**

Wie auch in anderen Bereichen wird der Druck auf die papierverarbeitenden Firmen, durch neue und innovative Produkte sowie durch Einsparungen der Produktionskosten wettbewerbsfähig zu bleiben, immer größer. Für die KMU ist es daher von enormer Bedeutung, ihre Absatzmärkte im Vergleich zur internationalen Konkurrenz zu sichern und auszubauen. Sie müssen auf den sich zum Teil schnell wandelnden, immer neue Anforderungen stellenden Markt reagieren. In den unterschiedlichen Bereichen müssen sie hierbei branchenübergreifend agieren. Dies resultiert in der Flexibilität und hiermit verknüpft den verkürzten Entwicklungszeiten, die auch und im Besonderen KMU heute bieten müssen.

---

Die Forschungsergebnisse können dazu beitragen, die Wettbewerbs- und Leistungsfähigkeit der KMU zu steigern. Die Bewertung und die Optimierung des Ausgangsmaterials für die Umformung ermöglichen eine gezielte, kostengünstige Einstellung der gewünschten Produkteigenschaften. Durch die Kenntnis der relevanten Prozessgrößen kann besser auf die werkstoff- und produktspezifischen Anforderungen bei der Herstellung eingegangen werden. Die Erweiterung der Produktgrenzen und die Möglichkeit, im Vorhinein die Machbarkeit von Produkten abzuschätzen, bringen einen enormen wirtschaftlichen Zusatzgewinn und erlauben es den KMU, schneller auf Angebotsanfragen zu reagieren.

Die Abbildung der Umformung in der FEM reduziert zudem erheblich den Investitionsaufwand. Dies kommt besonders den KMU zugute, welche i. d. R. nicht über genügend Mittel verfügen, um in Forschungsprojekte zur Entwicklung entsprechender Verfahren investieren zu können. Zusätzlich werden durch den reduzierten experimentellen Aufwand weniger Maschinen belegt, welche somit für die Produktion zur Verfügung stehen.

Neben den Einsparungen in der Entwicklungszeit und den Investitionskosten können durch den wissenschaftlichen Zusatzgewinn fachspezifische Grundlagen erschlossen werden. Aufbauend hierauf ist es möglich, neue Produktgruppen mit neuen Anwendungsgebieten und Eigenschaften herzustellen und so die Produktpalette zu erweitern. Dies sichert längerfristig die Marktanteile von papierverarbeitenden Betrieben.

Neben der Papierindustrie und der papierverarbeitenden Industrie können auch Softwareanbieter, Werkzeug- und Prüfmittelhersteller, KMU des Maschinenbaus, der Verfahrenstechnik sowie der Regelungs-, Prozess- und Messtechnik von den Forschungsergebnissen profitieren, die an der Entwicklung und Installation neuer Anlagen beteiligt sind.

### **Aussagen zur voraussichtlichen industriellen Umsetzung der FuE-Ergebnisse**

Bei den Forschungsergebnissen handelt es sich hauptsächlich um Verfahren, die sich entweder schnell in den industriellen Maßstab umsetzen lassen oder lediglich eine Umrüstung oder Erweiterung bestehender Prozesse in der Industrie erfordern. Daher ist eine industrielle Umsetzung in KMU möglich.

Papierumformer haben nun die Möglichkeit, die Ergebnisse für die Auslegung neuer Produkte zu verwenden. Hierdurch können Entwicklungszeiten verkürzt und Prozessgrenzen erweitert

sowie Fehler vorhergesagt werden. Die Investitionskosten für die hierfür benötigten FEM-Systeme fallen vergleichsweise gering aus. Bestehende FEM-Systeme können zudem angepasst und weiter genutzt werden. Weiterhin kann die Abbildung des Materialverhaltens zur Auswahl von Maschinen herangezogen werden. Außerdem ergibt sich durch die wirkmedienbasierte Umformung ein vollkommen neuer Maschinentyp, der die Herstellung neuer Produktvarianten ermöglicht.

Die Hersteller von Ziehnappe und -karton können gezielt ihr Produktportfolio erweitern und ihren Kunden zusätzliche Informationen bezüglich der Umformeigenschaften bereitstellen. Im Bereich des Werkzeugbaus kann durch die Hilfe der Simulationen und mittels der Analyse der Prozessparameter direkt auf die Anforderungen des Werkstoffs Papier eingegangen werden.

Die Untersuchung der Reibung in Abhängigkeit von den Prozessgrößen wurde auf einem wissenschaftlichen Prototyp durchgeführt. Es erscheint möglich, dass entsprechende Prüfmaschinen auch von Unternehmen am Markt bereitgestellt werden. Durch die Entwicklung wirkmedienbasierter Umformprozesse ergeben sich neue Anforderungen an die Prüftechnik, welche in die Entwicklung neuer Prüfmaschinen oder Konzepte mit einfließen.

Die Erkenntnisse im Bereich der Materialmodellierung helfen, die nötigen Materialmodelle zu verifizieren und ggf. zu adaptieren. Die gewonnenen Ergebnisse können in die Verbesserung von Softwareprodukten mit einfließen.

Generell ermöglicht die Betrachtung des gesamten Umformprozesses von der Halbzeugbereitstellung bis zum fertigen Produkt einen vollkommen neuen Blick auf die Umformung von Papier. Es zeigen sich zahlreiche Anknüpfungspunkte für weitergehende Forschung und Entwicklung. Die Erweiterung der Prozesskette in Bezug auf zusätzliche Werkstoffe und weitere, hieraus entstehende Produktklassen und Anwendungsgebiete, ist denkbar.

---

#### 6.4 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

---

*Tabelle 6-1: Durchgeführte Transfermaßnahmen*

Maßnahme	Ziel/Bemerkung	Zeitraum
Projektbegleitender Ausschuss		

Bericht beim IGF-Tag der FV Zellstoff- und Papierindustrie	Fortschrittsbericht, Einbeziehung von sog. „Multiplikatoren“	20.03.2013
1. Beratung des projektbegleitenden Ausschusses	Festlegung & Abstimmung der ersten Arbeitspakete	12.09.2013
Bericht beim IGF-Tag der FV Zellstoff- und Papierindustrie		20.03.2014
2. Beratung des projektbegleitenden Ausschusses		28.10.2014
Präsentation auf dem AiF-Innovationstag Mittelstand	Ergebnistransfer in die Wirtschaft und zu Hochschulen und Forschungsstellen	22.5.2014
Bericht beim IGF-Tag der FV Zellstoff- und Papierindustrie		18.03.2015
3. Beratung des projektbegleitenden Ausschusses	Verbreitung durch die im PA vertretenen Anwender, Umsetzung der Ergebnisse in der Praxis durch die Verwendung der Ergebnisse in weiteren Projekten und Fachvorträgen. Maschinenhersteller, Rohstofflieferanten, Prüfmittelhersteller, Umformer verbreiten die Ergebnisse durch weitere Projekte und Fachvorträge und über den Vertrieb neuer Produkte.	29.06.2015
Erstellung des Schlussberichts	Zusammenstellung der Forschungsergebnisse, Verbreitung des Berichts über den VDP	II. Quartal 2015
<b>Veröffentlichungen (PMV)</b>		
Enzymatic treatment and adjusted shrinkage as a step towards highly extensible paper for forming processes	Vortrag: Paper Physics Conference 2014, Raleigh, USA	09.09.2014
EFPRO „Short Term Scientific Mission“ – Veröffentlichung des Berichts auf den Internetseiten der EFPRO	Bekanntmachung des Projekts, Bericht über den Projektfortschritt	IV. Quartal 2013
The influence of temperature and friction on the formability of paper	Poster: Paper Physics Conference 2014, Raleigh, USA	09.09.2014
Untersuchungen zum Einfluss von Füllstoffen, Additiven und Oberflächen-beschichtungen auf das Reibverhalten von Papier	Symposium der Papieringenieure, München. Präsentation der besten Bachelorarbeit am PMV 2013/2014.	11.10.2014
So kommt Papier in Form	Wochenblatt für Papierfabrikation	Mai 2015
How paper gets in shape	International Paper World	Juli 2015
<b>Abschlussarbeiten zur Problematik des Forschungsvorhabens:</b>		
Untersuchungen zum Einfluss von Füllstoffen, Additiven und Oberflächen-beschichtungen auf das Reibverhalten von Papier	Bachelorarbeit von Robert Götzinger	2014
Auswirkungen modifizierter Füllstoffe auf das Umformverhalten von Papier bei verschiedenen Temperaturen und Feuchten	Bachelorarbeit Anna Schmidt	2014

Auswirkungen hochkonsistenter Faserbehandlung auf das Umformverhalten von Papier	Bachelorarbeit von Markus Otto	2014
<b>Veröffentlichungen (PtU):</b>		
Jahresbericht des PtU	-	2013 2014
Friction Measurement Device for Fiber Material Forming Processes		2014
Neue wirkmedienbasierte Umformkonzepte für nachhaltige Faserwerkstoffe	International Conferences New Developments in Sheet Metal Forming and Proceedings	2014
New hydroforming concepts for sustainable fiber material	Zweiteilige Veröffentlichung auf Deutsch und Englisch	
Wirkmedienbasiertes Umformen von Papier	Dissertation	voraussichtlich Sommer 2015
<b>Abschlussarbeiten zur Problematik des Forschungsvorhabens:</b>		
Untersuchung des tribologischen Systems Faserwerkstoff-Werkzeug-Kontakt	Kennenlernen und Vermitteln wissenschaftlicher Erkenntnisse und Methoden, Heranführen der Studenten an wiss. Arbeiten, Aufbau von Kontakten zw. Studenten und Mitgliedern des PAs	2013
Detaillierung und Inbetriebnahme eines Prüfstandes zur Reibwertermittlung und Auslegung einer Labviewbasierten Steuerung		2013
Experimentelle Ermittlung des Schädigungsverhaltens von Faserwerkstoffen		2013
Experimenteller Vergleich unterschiedlicher Testmethoden zur Ermittlung von Verfahrensgrenzen		2014
Konstruktion einer Servopresse für den Lehrbetrieb		2014
<b>Studentische Projektarbeiten</b>		
Experimentelle Untersuchung der Auswirkung unterschiedlicher Umformtechnologien auf die Umformbarkeit von Faserwerkstoffen	Kennenlernen und Vermitteln wissenschaftlicher Erkenntnisse und Methoden in studentischen Projektarbeiten	2013
Inbetriebnahme eines Schädigungsmesssystems und Ermittlung der charakteristischen Materialkenngrößen von Faserwerkstoffen		2013
Entwicklung und Untersuchung innovativer Werkzeugkonzepte für die Umformung von Faserwerkstoffen		2014
Versuchsaufbau und Untersuchung des Schädigungsverhaltens von Faserwerkstoffen im mehrdimensionalen Spannungszustand		2014
<b>Lehrveranstaltungen</b>		



Umformtechnik und begleitende Übung	Kennenlernen und Vermitteln wissenschaftlicher Erkenntnisse und Methoden in Vorlesungen und begleitenden Übungen	2013
		2014
Maschinen der Umformtechnik – Vorstellung des Werkzeugkonzeptes		2013
		2014
Tutorium – Steuerung und Regelung von Umformmaschinen – Aufbau einer Steuerung einer Reibversuchsanlage für Papierwerkstoffe		2013
Einführung in die Papierfabrikation – Vorlesung über neue Anwendungen für Papier		2013
		2014
<b>Forschungsaustausch</b>		
EFPRO „Short Term Scientific Mission“ – Forschungsaustausch mit Innventia Stockholm	Ergebnistransfer und Erfahrungsaustausch zu Hochschulen und Forschungsstellen	15.-27.9.2013

**Tabelle 6-2: Geplante Transfermaßnahmen**

<b>Maßnahme</b>	<b>Ziel/Bemerkung</b>	<b>Zeitraum</b>
Weitergabe des erworbenen Wissens / weiterführende Untersuchungen mit den Versuchseinrichtungen, Beratung	Die Versuchseinrichtungen stehen an der TU Darmstadt für die weitere Forschung mit der Industrie zur Verfügung. Ebenso ist die industrielle Beratung bei praktischen Problemstellungen ein wesentlicher Bestandteil der Institutsarbeit.	Nach Projektende
Dissertationen	Die an dem Projekt beteiligten wissenschaftlichen Mitarbeiter verwenden die Projektergebnisse weiterführend für ihre Dissertationen. Hiermit wird direkt zur Publikation und der Verbreitung des im Projekt erlangten Wissens beigetragen.	Nach Projektende

---

## 7 Tabellenverzeichnis

---

<i>Tabelle 4-1: Fiberlab-Messdaten zu den Enzymversuchen .....</i>	23
<i>Tabelle 4-2: Übersicht über die Eigenschaften der untersuchten Proben (die angegebenen Werte sind die arithmetischen Mittelwerte der Einzelversuche) [57] .....</i>	27
<i>Tabelle 4-3: Übersicht der Zellstoffbehandlungen .....</i>	37
<i>Tabelle 4-4: Spezifikationen der verschiedenen Messgeräte .....</i>	45
<i>Tabelle 6-1: Durchgeführte Transfermaßnahmen .....</i>	80
<i>Tabelle 6-2: Geplante Transfermaßnahmen .....</i>	83

---

## 8 Abbildungsverzeichnis

---

<i>Abbildung 2-1: Verpackung des Smartphones "HTC M8" aus Faserguss</i> .....	3
<i>Abbildung 2-2: Materialverhalten a) von Papier in Abhängigkeit der Belastungsrichtung [17] und b) der Materialbestandteile von Papier in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchte [18]</i> .....	6
<i>Abbildung 2-3: Darstellung einer experimentell und einer theoretisch ermittelten Spannungs-Dehnungs-Kurve von TMP-Laborblättern, der mittels akustischer Emissionsmessung (AE) gemessenen, normalisierten Zahl an Ereignissen und der daraus berechnet homogenen Schädigungsvariablen D als Funktion der uniaxialen Dehnung (Isaksson, Gradin et al. 2006)</i> .....	9
<i>Abbildung 2-4: temperaturabhängiger Reibkoeffizient zwischen Wellenpapier aus 3 verschiedenen Papierfabriken und beheizter Stahl-Folie. Zwei Papiere sind aus NSSC (Neutral Sulfite Semi Chemical)-Birkenfasern, eines aus NSSC-Eichenfasern [1]</i> ....	11
<i>Abbildung 2-5: Verfahrensvarianten zum Tiefziehen: (1) Tiefziehen, (2) hydromechanisches Tiefziehen, (3) wirkmedienbasiertes Tiefziehen [39]</i> .....	12
<i>Abbildung 2-6: Umformwerkzeug 1 Einspannzapfen; 2 Stempelhalter; 3 Schnittring; 4 Ziehstempel; 5 Faltenhalterplatte; 6 Ziehmantel; 7 Ziehbüchse; 8 Bodenplatte</i> .....	13
<i>Abbildung 2-7: Prozessvergleich verschiedener Umformverfahren.</i> .....	15
<i>Abbildung 2-8: Wirkmedienbasierte Umformung mit globaler Werkstoffunterstützung, Abmessungen der Formteile: ca. 32 x 26 cm.</i> .....	16
<i>Abbildung 3-1: Heutige Vorgehensweise bei der Entwicklung von Papier-Umformteilen und beabsichtigter, an das Vorgehen bei Metallen angelehnter Entwicklungsprozess.</i> ....	18
<i>Abbildung 4-1: Kraft-Verformungs-Verläufe zur Veranschaulichung des Einflusses von Mahlung und enzymatischer Behandlung auf die mechanischen Papiereigenschaften.</i>	22
<i>Abbildung 4-2: Kraft-Verformungs-Verläufe zur Veranschaulichung des Einflusses von Füllstoffzugabe auf die mechanischen Papiereigenschaften.</i> .....	24
<i>Abbildung 4-3: Modellvorstellung eines unbelasteten und belasteten Fasernetzwerks aus gekräuselten Fasern [55]</i> .....	25
<i>Abbildung 4-4: Länge entlang der Mittellinie (L) und projizierte Länge (l) einer Faser [55]</i>	26

<b>Abbildung 4-5:</b> Gebleichter Kiefernulfatzellstoff, gemahlen, bei 25% Stoffdichte und 900 U/min im Disperger behandelt [57] .....	26
<b>Abbildung 4-6:</b> Gebleichter Kiefernulfatzellstoff, gemahlen, bei 25% Stoffdichte und 900 U/min im Disperger behandelt [57] .....	27
<b>Abbildung 4-7:</b> Ergebnisse der Versuche zum Einfluss von Knetter und Disperger auf das Tiefziehergebnis in der in <b>Tabelle 4-2</b> angegebenen Reihenfolge [57]. Risse und Anrisse sind rot, Falten blau markiert. ....	28
<b>Abbildung 4-8:</b> Einfluss von Stärkezugabe auf die Bruchdehnung von Laborblättern [58] ...	29
<b>Abbildung 4-9:</b> Vergleich der Bruchdehnungen von Laborblättern ohne Füllstoffe sowie mit modifiziertem bzw. Standard-Kaolin bei unterschiedlichen Versuchsbedingungen: (1): 0 % Feuchte, 110 °C; (2): 5 % Feuchte, 23 °C; (3): 15 % Feuchte, 23 °C [58]. ....	29
<b>Abbildung 4-10:</b> Schematische Darstellung des Zugprüfstands zur Messung des Materialverhaltens bei erhöhter Temperatur .....	31
<b>Abbildung 4-11:</b> Zugversuche mit verschiedenen Feuchtigkeiten: a) 6 %; b) 10 %; c) 15%; d) 20%; e) Querkontraktionszahl über die Dehnung; f) plastische Querkontraktionszahl	32
<b>Abbildung 4-12:</b> Spannungs-Dehnungs-Diagramme in Abhängigkeit von Feuchte und Orientierung sowie Approximation nach [21] .....	33
<b>Abbildung 4-13:</b> Gegenüberstellung der erweiterten Approximation mit den experimentellen Ergebnissen bei verschiedenen Feuchtigkeitsgehalten der Proben [59] .....	34
<b>Abbildung 4-14:</b> Für Papier-Zugversuche angepasste Probengeometrie mit: $l_{ta} = 80$ ; $l_{PK} = 103,3$ ; $W_{ta} = 12,5$ ; $W_{PK} = 40$ ; $r_{ta} = 20$ ; $r_f = 5$ ; alle Angaben in mm [59]. ....	35
<b>Abbildung 4-15:</b> Pneumatischer Tiefungsversuch für Papier bei einer Feuchtigkeit von 15 %: a) und b) Spannungs-Dehnungs-Verhalten c) typisches Versagen im Tiefungsversuch [59] .....	36
<b>Abbildung 4-16:</b> Biaxiales Trockengestell [62] .....	37
<b>Abbildung 4-17:</b> Prozentuale Schrumpfung in x-Richtung bei freier Trocknung in beide Richtungen (gelbe Balken) bzw. unterbundener Schrumpfung in y-Richtung (rote Balken). ....	39
<b>Abbildung 4-18:</b> Kraft-Verformungs-Diagramme von Blättern aus unterschiedlich behandeltem Zellstoff bei freier Schrumpfung .....	39

<b>Abbildung 4-19:</b> Zweistufige Zugbelastung von Proben bei 15 % Feuchte und anschließender Trocknung. Erste plastische Belastungsphase (a), zweite Belastungsphase nach Trocknung auf 6 % (b) und Gegenüberstellung mit nicht vorbelasteten Proben (c) [59]	40
<b>Abbildung 4-20:</b> Trocknungsverhalten des Referenzkartons; Dehnungsschwankungen über die Schnittlänge a); Feuchtigkeitsgehalt der Probe über die Zeit b); Dehnung über die Zeit c) [59]	41
<b>Abbildung 4-21:</b> Dickenabnahme durch Oberflächendehnung berechnet und taktil gemessen bei a) 6 % Feuchte; b) 15 % Feuchte; c) Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Volumenkonstanz; Darstellung im Spannungs-Dehnungs-Diagramm (a und b) sowie Oberflächenumformgrad über Dickenumformgrad (c) [59]	42
<b>Abbildung 4-23:</b> Grenzformänderungsschaubilder – Darstellungsweise in Haupt- und Nebenformänderung (a und b); Darstellung angepasst an anisotropes Papier in Dehnungsrichtungen 1 und 2 (c und d); Geometrieversuche zur Erreichung unterschiedlicher Dehnungszustände (e und f) [59]	43
<b>Abbildung 4-22:</b> Relativer Tensile Stiffness Index [-] in den Hauptorientierungen des untersuchten Kartons, Verhältnis MD/CD=2,4/1	43
<b>Abbildung 4-24:</b> Reibversuchsanlage a) CAD-Ansicht; b) CAD-Ansicht detailliert; c) Schematischer Aufbau [59]	46
<b>Abbildung 4-25:</b> Prinzipskizze eines Messvorganges mit den Messphasen: Einlegen der Probe (1), Verharren vor Normalkraftaufbringung(2), Messbeginn (3), Messende (4) und Probenentnahme (5) [64]	46
<b>Abbildung 4-26:</b> Einfluss der Temperaturerhöhung auf den Reibwert [65]. Die roten Messwerte wurden bei 6 % Feuchte aufgenommen, die blauen bei 15 %.	47
<b>Abbildung 4-27:</b> Einfluss der Flächenpressung bei 15 % Feuchte und 90 °C Reibbackentemperatur auf den Reibwert bei verschiedenen Prüfgeschwindigkeiten ( $v_3 = 3 \text{ mm/s}$ ; $v_{36} = 36 \text{ mm/s}$ ; $v_{75} = 75 \text{ mm/s}$ ) [65]	48
<b>Abbildung 4-28:</b> Dreidimensionale Darstellung des gekoppelten Einflusses von Temperatur und Flächenpressung auf den Reibwert (blaue Punkte – Messwerte); Fläche approximiert	48

<b>Abbildung 4-29:</b> REM-Aufnahmen bei verschiedenen Vergrößerungsstufen von CaCO <sub>3</sub> -haltigem Papier ohne (links) und mit (rechts) Wachsbeschichtung bei verschiedener Vergrößerung .....	49
<b>Abbildung 4-30:</b> Versuchspresse des PtU. Links: schematische Darstellung; Mitte: Gesamtansicht; rechts: Werkzeugbauraum.....	51
<b>Abbildung 4-31:</b> Formgeometrie Typ "Frisbee" (Daten in der Tabelle in mm) [49].....	51
<b>Abbildung 4-32:</b> Verschiedene Umformverfahren und -varianten. I: Konventionelles Tiefziehen, II: Wirkmedienbasiertes Tiefziehen im Einfachmembranverfahren, III: Wirkmedienbasiertes Tiefziehen im Doppelmembranverfahren, IV: Tiefziehen mit globaler Werkstoffunterstützung durch Gegendruck.....	52
<b>Abbildung 4-33:</b> Werkzeugauslegung. Werkzeugbauraum (a) innerhalb der hydraulischen Versuchspresse (c); Konzept des wirkmedienbasierten Werkzeugs (b) mit Gegendruck und entsprechenden Ausgleichsbekken im Vergleich zum Konzept des konventionellen Werkzeugs mit starren Werkzeugen (d).....	53
<b>Abbildung 4-34:</b> Multifunktionsanschlussplatte als CAD-Modell.....	54
<b>Abbildung 4-35:</b> Schematischer Aufbau einer Werkzeugvariante .....	54
<b>Abbildung 4-36:</b> Exemplarische Untersuchung der Auswirkung der Niederhalterkraft bei 140 °C.....	56
<b>Abbildung 4-37:</b> Geometrischer Aufbau der Simulationsmodelle – Zugversuch a) und hydraulischer Tiefungsversuch b) (Huttel 2015).....	58
<b>Abbildung 4-38:</b> Vergleich der experimentellen Daten mit der Materialmodellierung nach: a) Hill, b) visko-plastisch, c) Lemaitre (Schädigung basierend auf den Zugversuchsergebnissen) und d) Lemaitre (erweiterte Schädigungsabbildung durch den Tiefungsversuch) [59].....	59
<b>Abbildung 4-39:</b> Gegenüberstellung der Prozessvarianten in der Simulation mit starrem Niederhalter und einseitigem Wirkmediendruck (Prozess 1) und flexiblem Niederhalter mit zweiseitigem Wirkmediendruck (Prozess 2) [59].....	60
<b>Abbildung 4-40:</b> Gegenüberstellung der Modellierungsansätze; Materialbeschreibung nach: a) Hill, b) visko-plastisch, c) Schädigung basierend auf Zugversuchsergebnissen und d) Schädigung erweitert um den Tiefungsversuch; e) Versagensvorhersage auf	

<i>Probenoberfläche durch Grenzformänderung; f) Darstellung der Überschreitung der Grenzformänderungskurve .....</i>	61
<b>Abbildung 4-41:</b> <i>Untersuchung des wirkmedienbasierten Prozesses 1 mit: a) Grenzformänderungskurve für Raumtemperatur und 200 N Niederhalterkraft, b) Darstellung der Versagensbereiche (Versagensbereich 1 hohe Versagenswahrscheinlichkeit, Versagensbereich 2 Beginn der Versagensmöglichkeit), c) Grenzformänderungskurve für 140 °C und 1000 N Niederhalterkraft, d) Darstellung der Versagensbereiche, e) Versagen auf der Realprobe [59] .....</i>	63
<b>Abbildung 4-42:</b> <i>Untersuchung des wirkmedienbasierten Prozesses 1 bei Raumtemperatur mit: a) Grenzformänderungskurve für Raumtemperatur und 200 N Niederhalterkraft, b) Darstellung der Oberflächendehnung, c) Prozessfenster, d) experimentelle Dehnungsverteilung, e) Dehnungsverteilung des Simulationsmodells [59] .....</i>	64
<b>Abbildung 4-43:</b> <i>Untersuchung des wirkmedienbasierten Prozesses 1 bei 140 °C mit: a) Grenzformänderungskurve, b) Darstellung der Oberflächendehnung, c) Prozessfenster, d) experimentelle Dehnungsverteilung, e) Dehnungsverteilung des Simulationsmodells [59].....</i>	65
<b>Abbildung 4-44:</b> <i>Untersuchung des wirkmedienbasierten Prozesses 2 bei Raumtemperatur mit: a) Grenzformänderungskurve, b) Darstellung der Oberflächendehnung, c) Prozessfenster, d) experimentelle Dehnungsverteilung, e) Dehnungsverteilung des Simulationsmodells [59].....</i>	66
<b>Abbildung 4-45:</b> <i>Entwicklungsmethodik - von der Idee zum Produkt [59] .....</i>	68
<b>Abbildung 4-46:</b> <i>Exemplarischer Durchlauf der erweiterten Auslegungsmethodik [59] .....</i>	69
<b>Abbildung 4-47:</b> <i>Vergleich der simulierten und experimentellen Demonstratorgeometrie; Oberflächendehnung: auf der Geometrie a) , im simulativen b) und experimentellen c) Dehnungsdiagramm; Schnitt-Geometrie in 0° d) und 90° e); Oberflächendehnung der Schnitte in 0° f) und 90° g) M1 – Rand wird zuerst umgeformt und dann der Innenbereich; M2 – Innenbereich wird zuerst umgeformt und dann der Rand (Huttel 2015).....</i>	71
<b>Abbildung 4-48:</b> <i>Demonstratorbauteil - Menüteller .....</i>	73





---


## 9 Literaturverzeichnis

---

1. Back, E.L. *Paper-to-paper and paper-to-metal friction*. in *International Paper Physics Conference*. 1991. Kona, Hawaii.
2. Röhrig, R., K. Mis, and S. Wieschebrock, *Branchenreport Verpackungsindustrie - Die Verpackungsindustrie in Deutschland*. 2010: Frankfurt.
3. Faller, M. and U. Lebok *Die Bedeutung von Verpackungen bei Kaufentscheidungen*. 2011. 26.
4. Hauptmann, M., *Die gezielte Prozessführung und Möglichkeiten zur Prozessüberwachung beim mehrdimensionalen Umformen von Karton durch Ziehen*, in *Fak. Maschinenwesen*. 2010, TU: Dresden. p. 159.
5. Doege, E. and B.-A. Behrens, *Handbuch Umformtechnik - Grundlagen, Technologien, Maschinen*. 2., bearbeitete Auflage ed. 2010, Heidelberg: Springer.
6. Hauptmann, M. and J.-P. Majschak, *New Quality Level of Packaging Components from Paperboard through Technology Improvement in 3D Forming*. *Packaging Technology and Science*, 2011. **24**: p. 419-432.
7. Östlund, S., M. Östlund, and S. Borodulina. *3D-forming of double-curved paperboard structures for packaging applications*. in *Progress in Paper Physics Seminar*. 2011. Graz.
8. Alava, M. and K. Niskanen, *The physics of paper*. *Reports on Progress in Physics*, 2006. **69**: p. 669-723.
9. Martens, H., *Recycling von Papier und Pappe*  
*Recyclingtechnik*. 2011, Spektrum Akademischer Verlag. p. 221-227.
10. Konsumforschung, G.f. *Aber bitte ökologisch - Studie der GfK Panel Services Deutschland zur Bedeutung von nachhaltigen Verpackungen*. 2009.
11. Willms, U., *Beanspruchungsgerechte Gestaltung von Faserformprodukten am Beispiel einer Unterarmorthese*. 2003, Universität Dortmund.
12. DIN, *DIN 6735:2010-02: Papier, Pappe und Faserstoffe - Übersicht von Begriffen*. 2010.
13. VDP *VDP Papierkompass*. 2012.
14. Pauler, N., *Optische Papiereigenschaften*. AB Lorentzen & Wettre, Kista, Schweden, 1999.
15. Thorpe, J., *Paper as an orthotropic thin plate*. *Tappi Journal*, 1981. **64**(3): p. 119-121.
16. Niskanen, K., *Paper Physics*. *Papermaking Science and Technology*. Vol. 16. 2008, Helsinki: Fapet Oy.
17. Kaulitz, T., *Bilden von Schneidanlagen unter Ausnutzung des nipinduzierten Effekts für die Druckweiterverarbeitung*, in *IDD*. 2009, TU Darmstadt: Göttingen.
18. Bos, J.H. and M. Staberock, *Das Papierbuch: Handbuch der Papierherstellung*. 1999: ECA Pulp and Paper.
19. Niskanen, K., *Papermaking Science and Technology - 16: Paper Physics*. Vol. 16. 1998: Fapet Oy.
20. Brecht, W., H.-J. Knittweis, and W. Schmidt, *Neuere Untersuchungen über das Dehnungsverhalten verschiedener Papiere*. *Wochenblatt für Papierfabrikation*, 1971. **8**: p. 287-292.
21. Paetow, R., *Über das Spannungs-Verformungs-Verhalten von Papier*. 1991, Technische Hochschule Darmstadt.

- 
22. Wolf, E., *Theoretische und experimentelle Grundlagenuntersuchungen zum Scherschneiden von Papier*. 2005, Fakultät Maschinenbau, Ruhr-Universität Bochum.
  23. Xia, Q.S., M.C. Boyce, and D.M. Parks, *A constitutive model for the anisotropic elastic-plastic deformation of paper and paperboard*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(15): p. 4053-4071.
  24. Xia, Q.S., *Mechanics of inelastic deformation and delamination in paperboard*, in *Dept. of Mechanical Engineering*. 2002, Massachusetts Institute of Technology. p. 236.
  25. Makela, P. and S. Östlund, *Orthotropic elastic-plastic material model for paper materials*. International Journal of Solids and Structures, 2003. **40**(21): p. 5599-5620.
  26. Isaksson, P., R. Hägglund, and P. Gradin, *Continuum damage mechanics applied to paper*. International journal of solids and structures, 2004. **41**(16): p. 4731-4755.
  27. Lemaitre, J. and R. Desmorat. *Engineering Damage Mechanics Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures*. 2005; XXIII, 380 S.].
  28. Lemaitre, J., *Handbook of materials behavior models*. 2001, San Diego, CA: Academic Press.
  29. Isaksson, P., P.A. Gradin, and A. Kulachenko, *The onset and progression of damage in isotropic paper sheets*. International Journal of Solids and Structures, 2006. **43**(3-4): p. 713-726.
  30. Isaksson, P. and R. Hägglund, *Evolution of bond fractures in a randomly distributed fiber network*. International Journal of Solids and Structures, 2007. **44**(18-19): p. 6135-6147.
  31. Andersson, O. and E. Berkyto, *Some factors affecting the stress-strain characteristics of paper*. 1951: inst.
  32. Hägglund, R. and P. Isaksson, *On the coupling between macroscopic material degradation and interfiber bond fracture in an idealized fiber network*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(3-4): p. 868-878.
  33. Gradin, P.A., et al., *Acoustic Emission applied to mechanically loaded Paper*, in *EWGAE (European Working Group on Acoustic Emission) 2004 proceedings* .: 2004. p. 423-431.
  34. Jones, N. and J. Peel, *Frictional properties of paper and their importance in supercalendering*. Pap. Technol, 1967. **8**(1): p. 43-50.
  35. Lange, K., *Umformtechnik: Handbuch für Industrie und Wissenschaft*. 1988: Birkhäuser.
  36. Aust, M., *Hydromechanisches Tiefziehen von Karosserieteilen*. 2003, Universität Stuttgart: Frankfurt.
  37. Bobbert, S., *Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren*, in *Lehrstuhl für Fertigungstechnologie*. 2001, Technische Universität Erlangen: Bamberg.
  38. Dick, P., *Technologie des Hochdruckumformens ebener Bleche*, in *PtU*. 1997, Technische Universität Darmstadt: Aachen.
  39. Metz, C., *Aktiv-elastische Werkzeugsysteme zum Tiefziehen mit Innen-hochdruck*, in *PtU*. 2005, Technische Universität Darmstadt: Aachen.
  40. Hein, P. and F. Vollertsen, *Hydroforming of sheet metal pairs*. Journal of Materials Processing Technology, 1999. **87**(1-3): p. 154-164.
  41. Huber, R., *Hydromechanisches Tiefziehen von Aluminium-Blechen mit thermischer Unterstützung* in *PtU*. 2004, Technische Universität Darmstadt: Aachen.

- 
42. Schopper, F., *Grundlagen der Werkzeugauslegung und der Schließenanlagen für das Innenhochdruck-Umformen*, in PtU. 2004, Technische Universität Darmstadt: Aachen.
  43. Doege, E. and B.A. Behrens, *Handbuch Umformtechnik*. 2006: Springer.
  44. Scherer, K., *Untersuchungen über die Ziehfähigkeit und den Ziehvorgang von Pappe*. 1932, Sächsische Technische Hochschule zu Dresden.
  45. Scherer, K., *Das Ziehen von Pappe : Untersuchungen über die Ziehfähigkeit und den Ziehvorgang von Pappe*. 1935, Berlin: Papier-Zeitung Verlagsgesellschaft m.b.H. 64 S.
  46. Hauptmann, M., *Die gezielte Prozessführung und Möglichkeiten zur Prozessüberwachung beim mehrdimensionalen Umformen von Karton durch Ziehen*, in *Institut für Verarbeitungsmaschinen und Mobile Arbeitsmaschinen*. 2010, TU Dresden: Dresden.
  47. S. Östlund, M.Ö., S. Borodulina, *3D-forming of double-curved paperboard structures for packaging applications*, in *Poster presented at Progress in Paper Physics Seminars*. 2011: Graz. p. 323-325.
  48. P.P. POST, D.H., P. GROCHE, S. SCHABEL, *Paper Characteristics Influencing the Deep Drawing Ability of Paper*, in *Paper-Physics*. 2011.
  49. D. Huttel, P.P., S. Schabel, P. Groche, *The stress strain behaviour of paperboard in tensile and bulge tests*, in *ICTP*. 2011: Aachen.
  50. Groche P., H.H., Post P.P., Schabel S., *Experimental and Numerical Investigation of the Hydroforming Behavior of Paperboard*. *Production Engineering*, 2012.
  51. ABEnzymes. *Refining of Pulp and Recovered Paper*. 2015 [24.6.2015]; Available from: <http://www.abenzymes.com/products/refining-of-pulp-and-recovered-paper>.
  52. Gärd, J., *The influence of fibre curl on the shrinkage and strength properties of paper*. 2002, M. Sc. thesis, Luleå University of technology.
  53. Hill, H., J. Edwards, and L. Beath, *Curlated pulp-A new approach to pulp processing*. *Tappi*, 1950. **33**(1): p. 36-44.
  54. Page, D., et al., *Curl, crimps, kinks and microcompressions in pulp fibres: Their origin, measurement and significance*. *Papermaking raw materials*, 1985: p. 183-227.
  55. Seth, R.S.P., D.H.; Barbe, M.C.; Jordan, B.D., *The mechanism of the strength and extensibility of wet webs*, in *International Paper Physics Conference*. 1983: Harwichport. p. 73-81.
  56. SAS-Institute, *JMP 11 Design of Experiments Guide*, S. Institute, Editor. 2014, SAS Institute: Cary, NC, USA. p. 157-158.
  57. Otto, M., *Auswirkungen hochkonsistenter Faserbehandlung auf das Umformverhalten von Papier*, in *PMV*. 2014, TU Darmstadt.
  58. Schmidt, A., *Auswirkungen modifizierter Füllstoffe auf das Umformverhalten von Papier bei verschiedenen Temperaturen und Feuchten*, in *PMV*. 2014, TU Darmstadt.
  59. Huttel, D., *Wirkmedienbasiertes Umformen von Papier*. 2015, TU Darmstadt.
  60. Huttel, D., et al., *The stress strain behaviour of paperboard in tensile and bulge tests*, in *ICTP*. 2011: Aachen. p. 811-816.
  61. Groche, P., et al., *Experimental and numerical investigation of the hydroforming behavior of paperboard*. *Production Engineering - Research and Development*, 2012(603): p. 229-236.
  62. Wahlström, T., et al., *Biaxial straining of handsheets during drying-Effect on delamination resistance*. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2000. **15**(3): p. 237-242.

- 
- 
63. Banabic, D., et al., *Development of a new procedure for the experimental determination of the Forming Limit Curves*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2013. **62**(1): p. 255-258.
  64. Huttel, D., et al. *Friction Measurement Device for Fiber Material Forming Processes*. 2014.
  65. Euler, M., *Untersuchung des tribologischen Systems Faserwerkstoff-Werkzeug-Kontakt*, in *Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen*. 2014, TU Darmstadt: Darmstadt.
  66. Götzinger, R., *Untersuchungen zum Einfluss von Füllstoffen, Additiven und Oberflächenbeschichtungen auf das Reibverhalten von Papier*, in *Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik*. 2014, TU Darmstadt: Darmstadt.