

**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

---

**Fakultät Maschinenwesen** Institut für Verarbeitungsmaschinen und Mobile Arbeitsmaschinen

Professur für Verarbeitungsmaschinen und Verarbeitungstechnik

---

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

**„Die gezielte Prozessführung und Möglichkeiten zur  
Prozessüberwachung beim mehrdimensionalen  
Umformen von Karton durch Ziehen“**

Marek Hauptmann

## Danksagung

An erster Stelle danke ich meinem Betreuer Herrn Prof. Dr.-Ing. Jens-Peter Majschak für die Möglichkeit, die vorliegende Aufgabe bearbeiten zu dürfen und für die Beratung und Motivation bei Projektarbeit und –management sowie zahlreiche Anregungen bei der wissenschaftlichen Ausarbeitung.

Ein herzliches Dankeschön möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. André Wagenführ für die Übernahme der Begutachtung, die aktive Beratung in Konsultationen und die Unterstützung bei Materialprüfungen an der Professur für Holz- und Faserwerkstofftechnik aussprechen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Harald Grossmann und seinen Mitarbeitern Herrn Dr.-Ing. Roland Zelm, Herrn Tilo Gailat und Herrn Paul-Gerhardt Weber danke ich herzlich für die Betreuung bei der Durchführung des Rigorosums im Fach Converting Technology (Papierverarbeitung) und für die Unterstützung bei den Untersuchungen zum Materialverhalten.

Ich möchte mich zudem bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Siegfried Helduser und seinem Mitarbeiter Herrn Harald Lohse für die hervorragende und äußerst produktive Zusammenarbeit bei der Entwicklung und Umsetzung des Versuchsträgers bedanken.

Besonderen Dank richte ich an dieser Stelle an Frau Dr.-Ing. Uta Weiß, die sich in Konsultationen in kürzester Zeit in die vorgebrachten Problemstellungen eingearbeitet hat und wichtige Anstöße zum erfolgreichen Vorankommen und Gelingen der Arbeit geliefert hat.

Mein Dank gilt zudem allen Kollegen der Professur für Verarbeitungsmaschinen und Verarbeitungstechnik für das hervorragende Arbeitsklima, das stets die Motivation aufrecht erhalten hat und natürlich unseren Studenten der Verarbeitungstechnik, die sich mit persönlichem Interesse engagiert haben.

Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern Barbara und Gerd Hauptmann für die stete moralische Unterstützung und natürlich ganz besonders meiner Frau Romy für zahlreiche Einschränkungen und vor allem den umfangreichen zeitlichen Verzicht, den sie hat hinnehmen müssen, um mir die Erstellung der Arbeit zu ermöglichen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen.....</b>	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>VI</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>VIII</b>
<b>1 Einführung in die Thematik .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Wissenschaft und Technik.....</b>	<b>3</b>
2.1 Verarbeitungsgut Papier, Karton und Pappe .....	3
2.1.1 Definition und Herstellung .....	3
2.1.2 Struktur und Aufbau .....	4
2.1.3 Grundeigenschaften .....	6
2.2 Prozess des mehrdimensionalen Umformens von flächigem Verarbeitungsgut .....	8
2.2.1 Einordnung des Ziehprozesses.....	8
2.2.2 Tiefziehen von Metallblech.....	10
2.2.3 Ziehen von Papier und Karton .....	13
2.2.3.1 Prozessablauf .....	13
2.2.3.2 Wirkmechanismen und Parameter .....	14
2.2.3.3 Maschinenteknik .....	18
2.2.4 Thermoformen von Kunststoffolie .....	21
2.2.5 Tiefziehen und 3D Verformung von Holz und Furnier.....	21
2.2.6 Zusammenfassung.....	22
2.3 Modellvorstellungen zum Umformen von Papier und Karton .....	23
2.3.1 Umformprozess Ziehen von Papier und Karton .....	23
2.3.2 Thermodynamisches System.....	26
2.3.3 Tribologie Karton – Metall .....	28
2.3.4 Mechanische Eigenschaften von Papier- und Karton .....	31
2.3.4.1 Beanspruchungen in der Blattebene .....	31
2.3.4.2 Kompression in z-Richtung.....	34
2.3.4.3 Biegung.....	36
2.3.5 Zusammenfassung.....	38
<b>3 Zielsetzung der Arbeit und Vorgehensweise.....</b>	<b>39</b>
<b>4 Entwicklung eines flexiblen Versuchsträgers zum Ziehen von Karton .....</b>	<b>42</b>
4.1 Zielsetzung und Anforderungen an den Versuchsträger .....	42
4.1.1 Zielsetzung .....	42
4.1.2 Generierung von Parameterbereichen für den Versuchsträger .....	43
4.2 Beschreibung des Versuchsträgers .....	46
4.2.1 Struktureller Aufbau.....	46
4.2.2 Verarbeitungssystem.....	48
4.2.3 Antriebs- und Steuerungssystem .....	52
4.2.4 Stütz- und Hüllsystem .....	54
4.2.5 Messsystem .....	55

---

<b>5</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen zum Ziehprozess von Karton</b> .....	<b>58</b>
5.1	Untersuchungen zur Vorauswahl von Einflussgrößen auf den Ziehprozesses .....	58
5.2	Ermittlung von Kenngrößen für den Ziehprozess .....	65
5.2.1	Bewertungskriterien für die Qualität von Ziehteilen .....	65
5.2.1.1	Formhaltigkeit .....	65
5.2.1.2	Formstabilität .....	66
5.2.1.3	Optische Qualität .....	67
5.2.1.4	Gesamtqualitätswert .....	68
5.2.2	Bestandteile und Kenngrößen des Stempelkraftverlaufes .....	69
5.3	Umformversuche .....	71
5.3.1	Vorgehensweise .....	71
5.3.2	Ermittlung der Parameterniveaus .....	73
5.3.3	Wirkungen der Prozessparameter auf Qualität der Formteile und Stempelkraft .....	74
5.3.3.1	Optische Qualität .....	74
5.3.3.2	Formhaltigkeit .....	76
5.3.3.3	Formstabilität .....	78
5.3.3.4	Gesamtqualitätswert .....	79
5.3.3.5	Kenngrößen des Stempelkraftverlaufes .....	80
5.3.4	Vergleich von Formteilqualität und Kraftkenngrößen .....	82
5.3.5	Untersuchung der Wirkungen von Prozessparametern mit nichtlinearem Ansatz .....	85
5.3.5.1	Auswahl der Parameter .....	85
5.3.5.2	Einfluss der Faltenhalterkraft .....	85
5.3.5.3	Einfluss der Temperatursumme .....	88
5.3.5.4	Einfluss der Temperaturdifferenz .....	90
5.3.5.5	Wechselwirkung zwischen Temperatursumme und Temperaturdifferenz .....	92
<b>6</b>	<b>Modellierung des Ziehprozesses</b> .....	<b>95</b>
6.1	Teilsysteme und Systemgrenzen der Modellierung .....	95
6.2	Modellierung der geometrischen Verhältnisse .....	99
6.3	Ermittlung und Modellierung der Formänderungskräfte .....	102
6.3.1	Beanspruchung in z-Richtung .....	102
6.3.2	Beanspruchungen in Blattebene .....	106
6.3.3	Biegung .....	110
6.4	Modellierung der Reibkräfte .....	112
6.5	Prozessmodell und Verifizierung .....	113
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>117</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>121</b>
	<b>Anlagenverzeichnis</b> .....	<b>134</b>
	<b>Anlagen</b> .....	<b>135</b>

## Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzung/ Index	Bezeichnung
B	Biegung
CD	Querrichtung zur Faser des Kartons (Cross Direction)
CTMP	Chemi-Thermo-Mechanical-Pulp
ev	Verdunstung (Evaporation)
ges	gesamt
max	Maximum
min	Minimum
Mat	Material
MD	Längsrichtung zur Faser des Kartons (Machine Direction)
N	Normal (orthogonal wirkend)
Fa	Falten
FH	Faltenhalter
Form	Formschluss
id	ideell
int	interpoliert
Ko	Komprimierung
o	oben
p	Papier
Pr	Probe
r	radial
R	Reibung
rel	Relaxation, relativ
RMP	Refiner-Mechanical-Pulp
St	Stauchung
ST	Stempel
SCT	Streifenstauchkraft
t	tangential
TMP	Thermo-Mechanical-Pulp
u	unten
v	verpresst
va	Dampf
w	wirksam
W	Wasser

Z	Zug
ZB	Ziehbüchse
ZT	Ziehteil

<b>Formelzeichen</b>	<b>Bezeichnung</b>
a	Ziehspalt, Beschleunigung
A	Fläche
b	Breite
C	Spezifische Wärmekapazität
d	Dicke
D	Durchmesser
e	Euler-Zahl
E	Summe der Temperaturen von Stempel und Ziehbüchse, Elastizitätsmodul
F	Kraft
h	Höhe
i	Anzahl der Falten
I	Flächenträgheitsmoment
k	Wärmeleitkoeffizient
K	Empirischer Faktor
l	Länge, Stauchweg, Längenänderung
$\dot{m}$	Massenstrom
M	Molare Masse
p	Druck
P	Gesamtdruck
r	Rundungsradius an Kanten
R	Radius
s	Weg, Wegkoordinate, Dicke
S	Biegesteifigkeit
t	Zeit
T	Temperatur in °C
U	Umfang
W	Arbeit
x,y,z	Kartesische Richtungskoordinaten
$\alpha$	Winkel, Koeffizient für thermische Längenänderung
$\delta$	Faltenabstand

$\Delta$	Differenz
$\kappa$	Relative Komprimierung von Karton unter Belastung in z-Richtung
$\mu$	Reibkoeffizient
$\pi$	Kreiszahl
$\rho$	Dichte
$\sigma$	Spannung
$\vartheta$	Temperatur in °C
$\varphi$	Biegewinkel

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Beispiele innovativer Verpackungen .....	1
Abbildung 2:	Elemente und Aufbau von Karton.....	5
Abbildung 3:	Sorptionshysterese von Papier, Karton und Pappe nach (Uesaka, 2002).....	7
Abbildung 4:	Charakteristisches Formteil als Ergebnis des Ziehprozesses.....	9
Abbildung 5:	Pfad zur Einordnung des Umformprozesses nach (DIN 8580, 2003), (DIN 8584-1, 2003), (DIN 8584-3, 2003).....	9
Abbildung 6:	Schema Tiefziehen von Metallblech im Anschlag nach (Doege, et al., 2006) .....	10
Abbildung 7:	Beanspruchungen beim Tiefziehen von Metallblech nach (Simon, 1989) .....	11
Abbildung 8:	Arbeitsdiagramm eines schwingungsüberlagerten Niederhalters nach (Ziegler, 1999).....	12
Abbildung 9:	Schematischer Prozessablauf beim Ziehen von Papier und Karton .....	13
Abbildung 10:	Schematische Darstellung der „charakteristischen Dreiecke“ des Materialüberschusses beim Zieh- und Tiefziehprozess nach (Tschätsch, 2005) .....	14
Abbildung 11:	Schematische Darstellung der Verhältnisse von Reibung und Komprimierung in der Ziehbüchse .....	16
Abbildung 12:	Abbildung und Getriebeschema der Ziehmaschine vom Typ BSZ-II (Fa. Manz Automation Tübingen GmbH).....	18
Abbildung 13:	Anordnung der Arbeitsorgane beim Ziehen von Karton nach (Hesse, et al., 1963) und (Tenzer, 1989) .....	20
Abbildung 14:	Verlauf der Stempelkraft über der Stempelposition nach (Scherer, 1932).....	23
Abbildung 15:	Verlauf von Berührungslänge und Reibkraft in der Ziehbüchse nach (Heinz, 1967) ...	25
Abbildung 16:	Verlauf der Formänderungskraft nach (Scherer, 1932).....	26
Abbildung 17:	Verhältnisse bei der Reibprüfung einer Materialpaarung aus hartem Prüfkörper und weichem Material nach (Czichos, 1978) .....	29
Abbildung 18:	Gleitreibungskoeffizient in Abhängigkeit von der Temperatur der Metalloberfläche nach (Back, 1991).....	30
Abbildung 19:	Modellelemente von Maxwell, Kelvin und Eyring-Halsey .....	31
Abbildung 20:	Rheologisches Verhalten von Papier und Karton unter Zugbeanspruchung nach (Brecht, et al., 1971a) und (Paetow, 1991).....	32
Abbildung 21:	Verlauf von Bruchfestigkeit und Bruchdehnung in Polarkoordinaten nach (Steenberg, 1947) und Temperaturabhängigkeit von Spannung und Dehnung nach (Salmén, et al., 1977) .....	33
Abbildung 22:	Kraft-Verformungs-Verlauf bei der Kompression in z-Richtung am Beispiel des Ziehkartons MM ZKH mit 510 g/m <sup>2</sup> .....	35
Abbildung 23:	Abhängigkeit von Erweichungstemperatur und relativem Elastizitätsmodul von der Feuchte nach (Gohring, 1963) und (Salmén, et al., 1985).....	36
Abbildung 24:	Bezeichnungen an Ziehteil und Zuschnitt.....	43
Abbildung 25:	Bewegungsvorgaben am Stempel (Hauptmann, et al., 2009a) .....	45
Abbildung 26:	Versuchsträger zur Untersuchung des Ziehprozesses nach (Hauptmann, et al., 2009a) und (Hauptmann, et al., 2009b).....	47
Abbildung 27:	Schematischer Aufbau von Verarbeitungsmaschinen nach (Langer, 2004).....	47
Abbildung 28:	Baugruppenstruktur des Versuchsträgers .....	48
Abbildung 29:	Schematischer Aufbau des Verarbeitungssystems .....	48
Abbildung 30:	Aufbau von Zieh- und Kalibrierbüchseineinheit.....	49
Abbildung 31:	Aufbau der Faltenhalterbaugruppe .....	50
Abbildung 32:	Aufbau von Stempel- und Gegenhalterbaugruppe.....	51
Abbildung 33:	Aufbau der Baugruppen Zuführung und Entnahme .....	52
Abbildung 34:	Prinzipieller Aufbau eines hydraulischen Antriebssystems nach (Helduser, 2008) .....	52
Abbildung 35:	Hydraulische Antriebe am Versuchsträger nach (Hauptmann, et al., 2009a).....	53

Abbildung 36:	Stütz- und Hüllsystem des Versuchsträgers.....	54
Abbildung 37:	Schematischer Aufbau des Messsystems am Versuchsträger .....	55
Abbildung 38:	Testmessung zur Regelabweichung der Stempelposition .....	56
Abbildung 39:	Testmessung zur Regelabweichung der Faltenhalterkraft bei 3000 N .....	56
Abbildung 40:	Wegverlauf von Stempel und Faltenhalter .....	59
Abbildung 41:	Vergleich von Formteilmessungen mit zylindrischem und konischem Stempelkopf.....	61
Abbildung 42:	Vergleich der Faltenverteilung bei 100 und 1500 N Faltenhalterkraft .....	62
Abbildung 43:	Desorptions-Zeit-Verlauf für MM ZKH 510g/m <sup>2</sup> .....	63
Abbildung 44:	Stempelkraftverlauf bei Variation der Temperatursumme.....	64
Abbildung 45:	Prinzipdarstellung der Messgrößen Rückstellwinkel $\varphi$ und Durchbiegung $a$ der Zarge am Formteil .....	65
Abbildung 46:	Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Zarge für das Material MM ZKH nach der Umformung .....	67
Abbildung 47:	Mikroskopische Aufnahme der Falten in der Zarge bei fünffacher Vergrößerung .....	68
Abbildung 48:	Kenngößen des Kraftverlaufes am Beispiel der Variation der Temperatursumme.....	70
Abbildung 49:	Histogramm am Beispiel der Faltenabstände in CD für den Versuchspunkt nach Anlage 5, ermittelt in STATISTICA® .....	71
Abbildung 50:	Vergleich der Faltenbildung längs und quer zur Maschinelaufrichtung (MD).....	74
Abbildung 51:	Normierte Regressionskoeffizienten für die Antwortgröße Faltenabstand.....	75
Abbildung 52:	Faltenbildung in Abhängigkeit des Stempelweges.....	75
Abbildung 53:	Normierte Regressionskoeffizienten für Rückstellwinkel und Durchbiegung der Zarge.....	77
Abbildung 54:	Rückstellung der Zarge in Längs- und Querrichtung im Vergleich.....	78
Abbildung 55:	Normierte Regressionskoeffizienten für die Zugarbeit .....	79
Abbildung 56:	Normierte Regressionskoeffizienten für den Gesamtqualitätswert .....	80
Abbildung 57:	Normierte Regressionskoeffizienten für die Kenngößen der Stempelkraft.....	81
Abbildung 58:	Vergleich der Regressionskoeffizienten von Faltenabstand und Kraftkenngößen .....	83
Abbildung 59:	Kraft-Weg-Verlauf am Stempel bei Variation der Faltenhalterkraft und Vergleich der Faltenbildung in der Zarge .....	86
Abbildung 60:	Regressionsverlauf von Faltenabstand und Standardabweichung bei Variation der Faltenhalterkraft.....	86
Abbildung 61:	Regressionsverlauf der Kraftkenngößen $A_1$ und $F_4$ bei Variation der Faltenhalterkraft.....	87
Abbildung 62:	Vergleich mikroskopischer Aufnahmen des Zargenquerschnittes bei Faltenhalterkräften von 500 N, 2000 N und 3000 N und einer Ziehhöhe von 25 mm.....	87
Abbildung 63:	Stempelkraftverlauf bei Variation der Temperatursumme im Vergleich zur Faltenbildung in der Zarge.....	88
Abbildung 64:	Vergleich der Regressionsverläufe von Faltenabstand, Standardabweichung und den Kraftkenngößen bei Variation der Temperatursumme .....	89
Abbildung 65:	Regressionsverlauf von Rückstellwinkel und Durchbiegung im Vergleich zur Abbildung der Zarge bei Variation der Temperatursumme .....	90
Abbildung 66:	Stempelkraftverlauf bei Variation der Temperaturdifferenz im Vergleich zur Faltenbildung in der Zarge.....	90
Abbildung 67:	Vergleich der Regressionsverläufe von Faltenabstand, Standardabweichung und den Kraftkenngößen bei Variation der Temperaturdifferenz.....	91
Abbildung 68:	Regressionsverlauf von Rückstellwinkel und Durchbiegung im Vergleich zur Abbildung der Zarge bei Variation der Temperaturdifferenz .....	92
Abbildung 69:	Achsentransformation und Parameterniveaus für den oktagonalen Versuchsplan nach (Scheffler, 1997) .....	93
Abbildung 70:	Verlauf von Anstieg $A_1$ und Kraft $F_4$ sowie von Faltenabstand und Standardabweichung in Abhängigkeit von Temperatursumme und Temperaturdifferenz in normierter Darstellung.....	93

Abbildung 71:	Schematischer Ablauf der Reibung eines Stahlprüfkörpers auf Karton unter Komprimierung .....	97
Abbildung 72:	Kontaktzustände der Wärmeeinbringung beim Ziehprozess von Karton .....	97
Abbildung 73:	Pressdruckverteilung bei Komprimierung der Zarge im Ziehspalt .....	98
Abbildung 74:	Positionen des Stempelweges .....	99
Abbildung 75:	Abstandsfunktion am Einlauf des Materials in den Ziehspalt .....	100
Abbildung 76:	Ziehspalt als Funktion des Stempelweges .....	102
Abbildung 77:	Schematische Darstellung der Verhältnisse in der Ziehbüchse .....	102
Abbildung 78:	Gemessene Dicke der Zarge über der Ziehhöhe am Formteil .....	103
Abbildung 79:	Vergleich von Kraftverlauf und relativer Kraftänderung bei unbehandeltem Ziehkarton ZKH, nach Erwärmung auf 105 °C und nach Konditionierung auf 15 % Feuchte .....	104
Abbildung 80:	Schematische Darstellung der Verhältnisse im Flanschbereich .....	106
Abbildung 81:	Teilweise gezogenes Kartonteil ohne Einsatz des Faltenhalters .....	106
Abbildung 82:	Verlauf der Kraft unter Kompression in Blattebene für Längs- (MD) und Querrichtung (CD) der Faserorientierung .....	107
Abbildung 83:	Vergleich teilweise gezogener Formteile bei Stempelwegpositionen von 3 mm, 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm und 25 mm .....	107
Abbildung 84:	Verlauf der Stauchkraft in Längs- und Querrichtung .....	108
Abbildung 85:	Biegestellen beim Ziehprozess von Karton .....	110
Abbildung 86:	Schema und ermittelter Kraftverlauf im Biegeversuch unter prozessnahen Bedingungen .....	111
Abbildung 87:	Verlauf der modellierten Biegekräfte $F_{B,1}$ und $F_{B,2/3}$ in Abhängigkeit des Stempelweges $s_{ST}$ .....	111
Abbildung 88:	Reibkräfte innerhalb des Ziehprozesses von Karton .....	112
Abbildung 89:	Vergleich gemessener und simulierter Verläufe der Stempelkraft unter Variation von Temperaturdifferenz, Temperatursumme, Faltenhalterkraft und Konizität .....	114
Abbildung 90:	Vergleich von Simulation und Messung für die Kraftkenngrößen $A_1$ und $F_4$ .....	115
Abbildung 91:	Vergleich der Qualitäten des Standes der Technik a), b) und eines optimierten Formteils c), Formteil mit einem Ziehverhältnis von 0,63 e) .....	118

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Systematik der Einflussgrößen auf den Ziehprozess von Karton .....	58
Tabelle 2:	Übersicht fixierter und variabler Größen für die experimentellen Untersuchungen ....	64
Tabelle 3:	Variationsspanne und Normierungswerte der Qualitätskenngrößen .....	68
Tabelle 4:	Anzahl der Messungen für die Antwortgrößen .....	72
Tabelle 5:	Parameterniveaus für den vollfaktoriellen Versuchsplan .....	74
Tabelle 6:	Gültigkeitsgrenzen für die Modellierung .....	96
Tabelle 7:	Versuchspunkte und Parameterniveaus für die Verifizierung des Prozessmodells ..	114

# 1 Einführung in die Thematik

Die verbreitete Nutzung von Papier, Karton und Pappe in der Verpackungstechnik stellt derzeit in Branchen wie Interieurbau von Automobilen, Möbelbau, Leichtbau, Medizintechnik und Verpackungstechnik zunehmend eine strategische Perspektive dar. Die Triebkraft für diese Entwicklung ist das steigende ökologische Bewusstsein der Konsumenten sowie die Kenntnis der zunehmenden Ressourcenverknappung und die davon abhängige Preisentwicklung der Rohstoffe. Das auf Naturfasern basierende Material Karton besteht weitestgehend aus nachwachsenden Rohstoffen und zeichnet sich durch seine vielfache Rezyklierbarkeit aus.

Der Stand der Kenntnisse bei der Verarbeitung, insbesondere bei der Umformung und die zugehörigen prozessspezifischen Freiheiten der Formgestaltung sind zentrale Entscheidungskriterien für die Anwendung des Materials. Am Beispiel der Verpackungstechnik wird deutlich, dass die Anforderungen an Formteile stetig steigen. Neben der Erfüllung der Schutz- und Rationalisierungsfunktion steht zunehmend die Werbefunktion durch

- Individualisierung der Formgestaltung,
- Funktionalität und
- Ausrüstung der Verpackung

im Vordergrund innovativer Verpackungskonzepte (Abbildung 1).



**Abbildung 1:** Beispiele innovativer Verpackungen

Aus Erdöl hergestellte petrochemische Kunststoffe haben sich aufgrund ihrer Verarbeitungseigenschaften bei einer Vielzahl von Anwendungen durchgesetzt, denen keine Anforderungen nach Dichtigkeit oder Barriere zugrundeliegen. Das thermoplastische Umformvermögen und die intensiven Entwicklungen und Forschungsarbeiten zu Umformprozessen wie Spritzgießen, Blasformen oder Thermoformen ermöglichen großen Freiraum bei der Formgestaltung von Verpackungskomponenten sowie einen prozesssicheren Betrieb der Maschinen bei reproduzierbar hoher Qualität der Formteile. Die geforderte Flexibilität in der Produktion wird durch Werkzeugwechsel gewährleistet, so dass der Verringerung der Losgrößen, die durch die Individualisierung entsteht, entsprochen werden kann.

Das Umformen von Karton erfolgt bislang durch Biegen, Wickeln und Falten. Diese Verfahren sind für die flexible Herstellung von Verpackungskomponenten mit spezifischer dreidimensionaler Form bedingt geeignet. Durch Biegen und Wickeln werden beidseitig

offene, zylindrische Hülsen hergestellt. Das Falten wird zur Herstellung scharfkantiger Schachteln eingesetzt. Alle drei Verfahren realisieren die Umformung um eine bestimmte Raumachse. Die Herstellung einseitig geschlossener Hohlkörper als Kopf- und Bodenteile mehrteiliger Verpackungen erfordert eine Vorgangsfolge, die mit zunehmender Komplexität geringere Flexibilität und Prozesssicherheit zur Folge hat.

Durch mehrdimensionales Umformen wird bei Metallen und bei Kunststoffen das Anwendungspotential der Werkstoffe ausgeschöpft. Bei Papier, Karton und Pappe ist bislang ein mehrdimensionales Umformen mit geringem Umformgrad durch Prägen verbreitet. Der Ziehprozess dagegen weist hohes Einsatzpotential für die Herstellung von einseitig geschlossenen Hohlkörpern mit hohem Umformgrad auf, wird bislang jedoch nur in Randbereichen eingesetzt und es besteht ein geringer Stand wissenschaftlich gesicherter Kenntnisse. Grund dafür ist das Umformverhalten des Materials. Ein fließfähiger Zustand wie bei Kunststoffen und Metallen wird nicht erreicht. In der Praxis ist das Risiko für eine Weiterentwicklung bzw. den Einsatz innovativer geometrischer Formen zu hoch, solange keine Wissensbasis zu den geometrischen Möglichkeiten besteht, die einen prozesssicheren Einsatz gewährleistet. Aus diesem Grund sind Ziehmaschinen in ihrer Arbeitsweise auf einfache Formate ausgelegt und das Potential des Ziehprozesses wird im Bezug auf

- Qualität der Formteile
- Formgestaltung und
- Flexibilität von Maschinen

nicht ausgenutzt.

Die Motivation der Arbeit besteht darin, die Einflussgrößen auf den Ziehprozess umfassend zu analysieren, identifizieren, evaluieren und anschließend zu quantifizieren. Die wissenschaftlichen Ergebnisse der Arbeit tragen dazu bei das Verständnis des Verhaltens von Papier, Karton und Pappe beim mehrdimensionalen Umformen zu verbessern, um die Ausnutzung des Formgestaltungspotentials zu ermöglichen. Durch die Kennzeichnung der physikalischen Zusammenhänge der maßgeblichen Einflussgrößen mit Hilfe von Experimenten und theoretischen Ansätzen entsteht eine Wissensbasis, die den gezielten, verbreiteten und produktionssicheren Einsatz des Verfahrens und des Materials in der Verpackungstechnik und anderen potentiellen Branchen ermöglicht.

## 2 Stand der Wissenschaft und Technik

### 2.1 Verarbeitungsgut Papier, Karton und Pappe

#### 2.1.1 Definition und Herstellung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung des mehrdimensionalen Umformens von Papier, Karton bzw. Pappe, vorzugsweise jedoch Karton, durch Ziehen. Die wesentlichen Zusammenhänge des Prozesses gehen von den Eigenschaften des Verarbeitungsgutes aus.

Anforderungen nach Dichtigkeit und Siegelbarkeit haben in der Praxis häufig zur Anwendung von Verbundmaterialien mit Karton als Trägermaterial geführt. Eine direkte Untersuchung von Kartonverbunden führt jedoch zur Überlagerung der Materialeigenschaften der Stoffkomponenten von Karton und Kunststoff und verhindert den gesicherten Erkenntnisgewinn zum jeweiligen Verhalten dieser unter Prozessbedingungen. Die genaue Kenntnis des Verhaltens aller Verbundkomponenten dagegen lässt in weiterführenden Arbeiten die Untersuchung von Verbunden zu, so dass eine Fokussierung auf Karton als mögliches Trägermaterial für Beschichtungen erfolgt.

Im internationalen Sprachgebrauch werden Papier, Karton und Pappe begrifflich nicht unterschieden, sondern zusammenfassend mit „board“ bezeichnet. Im deutschsprachigen Raum dagegen wird traditionell eine Unterteilung mit Hilfe der flächenbezogenen Masse vorgenommen. Nach (DIN 6730, 2006) wird für Papier eine flächenbezogene Masse von 7 bis 225 g Faserstoff je Quadratmeter ( $\text{g/m}^2$ ) festgelegt. Oberhalb  $225 \text{ g/m}^2$  wird das Material als Pappe bezeichnet. Der Begriff Karton ist nicht standardisiert, sondern hat sich im Umgang mit einem breiten Spektrum flächenbezogener Massen für einen Bereich von 150 bis  $600 \text{ g/m}^2$  durchgesetzt. Überschneidungen der Begriffe Papier, Karton und Pappe sind je nach Eigenschaft und Anwendung entstanden. Im Sinne der Arbeit wird unter dem Begriff Karton Material mit einer flächenbezogenen Masse von 225 bis  $600 \text{ g/m}^2$  verstanden.

Die Eigenschaften und der Aufbau von Karton werden maßgeblich durch seine Herstellung bestimmt. Karton besteht hauptsächlich aus Naturfasern sowie Füll- und Hilfsstoffen. Die Naturfasern bilden die Grundstruktur des Materials. Die Gewinnung erfolgt entweder als Primärfasern aus Holz oder als Sekundärfasern aus Altpapier.

Bei der Herstellung von Primärfasern werden aus einem Holzhalbzeug durch mechanische Zerkleinerung Hackschnitzel erzeugt. Diese Hackschnitzel werden durch Pulping Prozesse mechanisch (RMP), thermisch-mechanisch (TMP) oder chemisch-thermisch-mechanisch (CTMP) zu Fasern verarbeitet und gegebenenfalls durch Refiner weiterverarbeitet (z. B. Fibrillierung). Um den Zusammenhang der Fasern aufzulösen und das in den Fasern befindliche Lignin zu entfernen, ist ein chemischer Aufschluss der Fasern erforderlich. Dazu haben sich zwei Verfahren etabliert, das saure Sulfitverfahren und das alkalische Sulfatverfahren. Auf diese Weise entsteht eine Stoffmischung aus Cellulose, Hemicellulose und einem Rest Lignin. Der Faserstoff hat eine bräunliche Farbe, die das Restlignin verursacht. Durch Lignin entfernendes oder Lignin modifizierendes chemisches Bleichen wird die gewünschte Weiße erzeugt. (Bos et al., 2006)

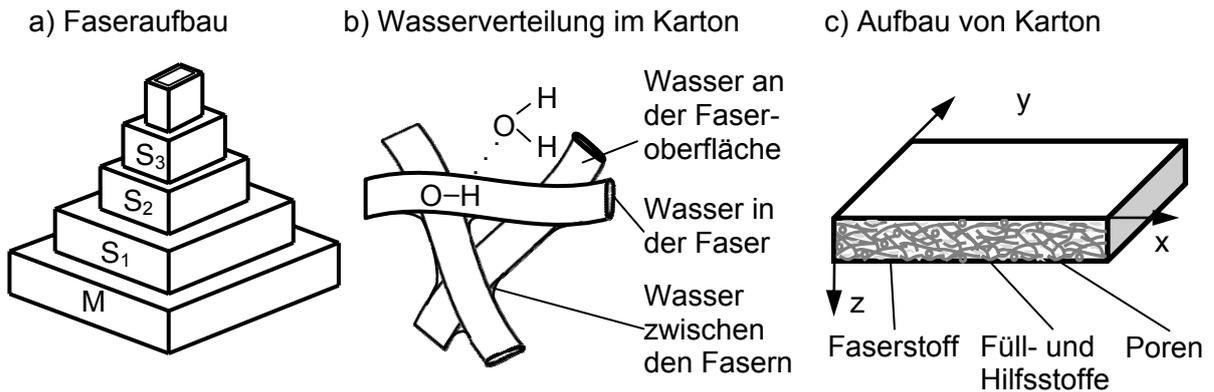
Die Herstellung von Sekundärfasern aus Altpapier ist bei stetig steigendem Anteil wiederverwerteter Fasern an dem für die Papierherstellung genutzten Faserstoff ein zweiter

wichtiger Teil der Faseraufbereitung. Das Altpapier als Rohstoff ist in seiner Qualität im Sinne des Grades der Verunreinigung nach (DIN EN 643, 2002) in fünf Gruppen eingeteilt. Diese Unterteilung entscheidet über die Konfiguration des sich anschließenden Auflöseprozesses des Altpapiers. Im Pulper wird das Altpapier mit Wasser und gegebenenfalls Chemikalien gemischt und mechanisch aufgeschlagen. Durch diesen Prozess werden Verunreinigungen weitgehend entfernt und die Fasern gewonnen. Das Lösen von Druckfarben erfolgt zusätzlich durch den Deinkingprozess. Beim Deinking verliert das Material durch die Druckfarben an Weiße, so dass anschließend gebleicht wird. Die finalen Eigenschaften des Faserstoffes entstehen durch die Mahlung. Die Primärwand der Faser wird abgelöst und die  $S_1$  Zellwand aufgebrochen, so dass die  $S_2$  Zellwand quellen kann. Es entstehen hohe Festigkeiten und die Neigung zur Bildung von Wasserstoffbrückenbindungen. (Bos et al., 2006)

Der hergestellte und aufbereitete Zellstoff wird gemeinsam mit Füll- und Hilfsstoffen als Ganzstoff der Papiermaschine zugeführt. Die Papiermaschine besteht aus Konstantteil, Stoffauflauf, Siebpartie, Pressenpartie und Trockenpartie. Im Konstantteil wird der Zellstoff zusammen mit Füll- und Hilfsstoffen zu einer Faserstoffsuspension mit einer Stoffdichte von 3,5 bis 4,5 % Feststoff verarbeitet und gemischt. Der Stoffauflauf verteilt die Faserstoffsuspension angepasst an die Geschwindigkeit der Papiermaschine gleichmäßig über der Siebbreite. Durch entsprechende Dosierung wird die flächenbezogene Masse des Papiers eingestellt. Die Blattbildung erfolgt in der Siebpartie. Auf Lang- oder Rundsieben wird die Faserstoffsuspension aufgetragen und die Fasern bilden durch Filtration und Eindickung eine endlose Faserlage, die dann als Papierbahn durch die Papiermaschine gefördert wird. Entlang der gesamten Papiermaschine erfolgt eine Entwässerung des Faserstoffes. Von der Blattbildung wird das Material mit einem Trockengehalt von 16 bis 25 % an die Pressenpartie übergeben. Durch Aufbringen eines hohen Druckes innerhalb des Pressnips reduziert der Filz der Presswalzen die Feuchtigkeit bis auf einen Trockengehalt des Materials von 50 bis 55 %. Die restliche Feuchte bis annähernd zur Gleichgewichtsfeuchte des Materials wird in der anschließenden Trockenpartie entfernt, die durch Einsatz von ca. 60 % der gesamten aufgewendeten Energie ein Material mit ca. 8 % Feuchtegehalt erzeugt. Auf Kalandern werden die geforderte Glätte und Dichte des Materials sowie der finale Feuchtegehalt von ca. 6 % erreicht. Je nach Anwendungen erfolgt nach der Herstellung eine Veredelung durch Streich- oder Kaschierprozesse. (Wilken, 1993), (Bos et al., 2006)

### 2.1.2 Struktur und Aufbau

Karton gehört nach (Goldhahn, 1969) bei der Produktion zur Verarbeitungsgutgruppe der bahnförmigen Flachformgüter. Bei der Verarbeitung kann das Material auch als bogenförmiges Flachformgut vorbereitet sein. Die Beschreibung und Unterteilung des Materials erfolgt nicht mit Hilfe der Abmessungen wie es bei Halbzeugen üblich ist, sondern mit Hilfe der flächenbezogenen Masse. Die Fläche wird durch die Bahnlaufrichtung (y-Achse) und die Bahnbreite (x-Richtung) bestimmt (Abbildung 2 c).



**Abbildung 2:** Elemente und Aufbau von Karton

Die Dicke des Materials entspricht der z-Richtung. Die Grundstruktur von Karton besteht wie in Abschnitt 2.1.1 beschrieben aus Cellulose, Hemicellulose und gegebenenfalls einem Rest an Lignin. Die aus Holz oder Altpapier gewonnenen Fasern sind ursprünglich aus einer Primärwand M und drei Zellwänden  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  aufgebaut (siehe Abbildung 2 a). Für die Nutzung in Papier, Karton und Pappe werden die Zellwände aufgebrochen, um das Lignin zu eliminieren und sind teilweise fibrilliert. Die Fasern liegen in einem porösen Verband übereinander. Eine geringe Grundfestigkeit des Faserverbundes entsteht durch das Verfilzen der Fasern nach der Entwässerung und Verdichtung in der Papiermaschine. Fibrillierungen verbessern diese mechanische Verfilzung. (Bos et al., 2006)

Die hauptsächliche Festigkeit des Papiers entsteht durch die Ausbildung von Wasserstoffbrückenbindungen, wie Sie bei der Bindung von Wassermolekülen bekannt sind. Die vergleichsweise großen Sauerstoffatome im Wassermolekül sind negativ, die kleineren Wasserstoffatome positiv geladen. Das führt zu einer Anziehung zwischen Wasserstoff- und Sauerstoffatomen unterschiedlicher Wassermoleküle. Ähnlich bilden sich die Bindungen zwischen Fasern durch aneinander angrenzende Hydroxylgruppen (OH-Gruppen) der Fasern aus. Aus diesem Grund nimmt die Festigkeit des Kartons mit Verringerung der Feuchte und damit der Wassermoleküle zu. (Bos et al., 2006)

An die Fasern werden Füll- und gegebenenfalls Hilfsstoffe angelagert. Die Füllstoffe verringern die Größe der Poren innerhalb des Kartons und es entsteht eine geschlossene Blattstruktur, die Voraussetzung für Druckprozesse ist. Füllstoffe werden auch als Pigmente für die Verbesserung der Weiße beispielsweise beim Streichen und für die Verringerung des Materialpreises eingesetzt, an dem die Fasern den höchsten Anteil haben. Die am häufigsten eingesetzten Füllstoffe sind Kaolin, Kreide, Calciumkarbonat, Talkum, Bentonit, Gips, Satinweiß und Titanoxid. Die Bindung dieser anorganischen, mineralischen Stoffe und sonstiger Feinstoffe an die Fasern wird durch den Einsatz meist polymerer Retentionsmittel erreicht, die gleichzeitig eine Erhöhung der Entwässerungsgeschwindigkeit bewirken. Hilfsstoffe müssen im Gegensatz zu Füllstoffen nicht extra gebunden werden, sondern haben bindende Eigenschaften. Sie werden als Leime (z. B. Harzleim) für die Verbesserung der Oberflächeneigenschaften oder Massezusätze für die Verbesserung der Festigkeitseigenschaften eingesetzt. Das wichtigste Hilfsmittel ist mittlerweile die Stärke (Bos et al., 2006). Der Einsatz von Stärke in der Papierstruktur nimmt stetig zu. Ziel ist die Verbesserung der Festigkeitseigenschaften vor dem Hintergrund der Reduzierung des Anteils hochwertiger festigkeitssteigernder Fasern wie z. B. in (Borchers, 2003), (Möller,

2006), (Kießler, 2006). Weitergehende Entwicklungen schlagen bereits Alternativen zum Stärkeeinsatz vor. Ein Beispiel ist die Verwendung von Carboxymethylcellulose (Götze et al., 2004). Auch beim Streichprozess wird am gezielten Einsatz der Stärke gearbeitet wie z. B. in (Le, 2004).

Zusätzlich zu den beschriebenen Bestandteilen liegt im Gleichgewichtszustand mit dem umgebenden Klima eine geringe Menge Wasser im Material vor (siehe Abbildung 2 b). Das Wasser ist teilweise in der Faser aber vor allem zwischen den Fasern und an der Faseroberfläche verteilt. In den Poren zwischen den Fasern sind Kapillarwirkungen der Bindeeffekt. An der Faseroberfläche wird das Wasser durch Wasserstoffbrücken gebunden.

### **2.1.3 Grundeigenschaften**

Die in Abschnitt 2.1.1 beschriebenen Zusammenhänge und Verfahrensschritte bei der Herstellung von Karton erzeugen strukturbedingte Grundeigenschaften wie Anisotropie, Zweiseitigkeit und Inhomogenität.

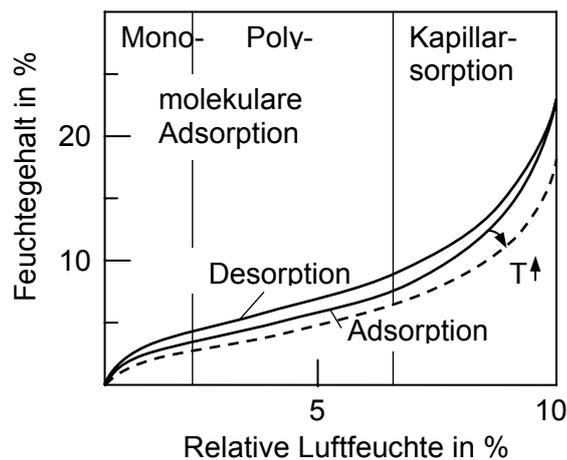
Die Anisotropie besteht in einer unterschiedlich ausgeprägten Richtungsorientierung der Fasern in der Blattebene. Der größere Teil der Fasern wird bei der Herstellung in Maschinenlaufrichtung orientiert. Die Ursachen dafür liegen in der Arbeitsweise des Stoffauflaufes. Die Fasersuspension wird auf das schneller bewegte Sieb in einem bestimmten Auftreffwinkel aufgebracht. Die Relativgeschwindigkeit und die dadurch wirkende Beschleunigung zusammen mit dem Auftreffwinkel richten die Fasern in Maschinenrichtung aus. Hinzu kommt eine unterschiedlich stark ausgeprägte Orientierung der Fasern in z-Richtung des Blattes. Im maschinellen Herstellungsprozess ist die Anisotropie nicht zu vermeiden. Sie kann durch die Einstellungen des Stoffauflaufes in bestimmten Grenzen verändert werden (Wilken, 1993). Einfluss hat die Anisotropie besonders auf die mechanischen Eigenschaften des Materials. In der Blattebene weist das Material unabhängig von der Art der mechanischen Beanspruchung unendlich viele unterschiedliche Elastizitätsmoduli auf, die vom Beanspruchungswinkel zur Faserorientierung abhängig sind. Bei der Prüfung mechanischer Materialeigenschaften werden anisotropiebedingte Unterschiede durch eine Unterscheidung von Längs- und Querrichtung (quer zur Faserachse) erfasst. Die Widerstandsfähigkeit des Materials gegenüber Beanspruchungen in Längsrichtung (MD) ist wesentlich höher als in Querrichtung (CD). Die Faserorientierung hat zusätzlich Einfluss auf das Schrumpfungs- bzw. Quellungsverhalten des Materials. Die Quellung in Querrichtung des Materials ist ausgeprägter als in Längsrichtung, da sich die Fasern in ihrer Dickenrichtung stärker ausdehnen als in der Länge. (Wilken, 1993)

Die Inhomogenität beschreibt die strukturelle Ungleichmäßigkeit von Karton. Die Ungleichmäßigkeiten werden zum einen stoffbedingt durch Eigenschaftsschwankungen der Fasern auf natürlicher Basis oder Mengenunterschiede angelagerter Füll- und Hilfsstoffe hervorgerufen. Zum anderen wird herstellungsbedingt eine Ungleichmäßigkeit erzeugt. Ursachen dafür sind im Blattbildungsprinzip durch Filtrations- und Eindickungsunterschiede bei der Erzeugung des Ganzstoffes und dessen Homogenitätsabweichungen sowie mechanischen Wirkungen, wie unterschiedlich starken Zugkräften beim Durchlauf durch die Papiermaschine, begründet. Die Auswirkungen der Inhomogenität sind Schwankungen in mechanischen Eigenschaften innerhalb des Profils von Längs- bzw. Querrichtung bis hin zu „Schwachstellen“ in Dicke, Dichte und flächenbezogener Masse des Materials, sowie in Oberflächeneigenschaften wie Rauheit. (Wilken, 1993)

Die Blattbildung durch Entwässerung auf einem Sieb erzeugt die charakteristische Zweiseitigkeit des Materials. Es werden Siebseite und Oberseite unterschieden. Verursacht wird der Unterschied zwischen diesen beiden Seiten durch Faserstoffmischungen sowie unterschiedliche Größe und Dichte von Fasern und Teilchen. Auf der Siebseite ist beispielsweise ein geringerer Anteil von Füllstoffen zu erwarten als an der Oberseite. Auswirkungen hat die Zweiseitigkeit vor allem auf Oberflächeneigenschaften wie Topografie und Rauheit, die bei Beschichtungs-, Druck-, Klebe- und Reibvorgängen Einfluss haben. (Wilken, 1993)

Karton besteht überwiegend aus Naturfasern. Durch die Fasern und deren Mischung mit Füll- und Hilfsstoffen entstehen Eigenschaften die vorrangig auf den Einfluss der Stoffkomponenten zurück geführt werden. Für die Verarbeitung und speziell die Verformung von Karton sind die Hygroskopizität und die Viskoelastizität entscheidende stoffbedingte Eigenschaften.

Unter Hygroskopizität wird die Fähigkeit des Materials verstanden, durch Adsorption oder Desorption Feuchtigkeit mit der umgebenden Luft auszutauschen bis ein temperaturspezifischer Gleichgewichtszustand erreicht wird. Im Material ist demnach ständig ein thermodynamisches System zu betrachten, dass sich in Form von Adsorptions- bzw. Desorptionsisothermen darstellen lässt (Abbildung 3). (Uesaka, 2002)



**Abbildung 3:** Sorptionshysterese von Papier, Karton und Pappe nach (Uesaka, 2002)

Während der Aufnahme und Abgabe von Feuchtigkeit entstehen nicht die gleichen Feuchtigkeitswerte, sondern es stellt sich eine Hysterese ein. Die Gleichgewichtsfeuchte des Materials ist von der Luftfeuchte und der Umgebungstemperatur abhängig. Die Hygroskopizität der Stoffkomponenten nimmt in der Reihenfolge Füllstoff, Lignin, Cellulose, Hemicellulose zu. Daher ist die Änderung der Feuchte über der Konditionierungszeit von der Stoffzusammensetzung abhängig. (Wilken, 1993)

Die mechanischen Eigenschaften von Karton folgen nicht dem Elastizitätsgesetz, wie es von Metall bekannt ist. Ein linear elastischer Bereich existiert nur bei sehr geringen Verformungen. Bei größeren Verformungen treten zeitabhängige plastische und elastische Verformungsanteile im Material auf. Das heißt, bei einer konstanten Belastung wird mit zunehmender Belastungszeit eine steigende plastische Verformung erzeugt. Nach Entlastung entspannt sich das Material verzögert. Diese Eigenschaft wird als viskoelastisches Materialverhalten bezeichnet. Ursache des Verhaltens ist das Einsetzen

eines Fließvorganges, der als „Kriechen“ bekannt ist. Die Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Fasern werden unter Belastung teilweise zerstört und die Fasern gestreckt. In der Folge gleiten die Fasern aneinander vorbei, was als Kriechen bezeichnet wird. (Großmann, 2009)

Eine weitere wichtige Eigenschaft von Karton ist die Kompressibilität in z-Richtung unter mechanischer Druckkrafteinwirkung. Bei Stoffen wie z. B. Metall ist diese Eigenschaft weniger stark ausgeprägt oder nicht vorhanden. Der poröse Stoffaufbau lässt eine Verdichtung bis zum Schließen der Poren und dem damit verbundenen Verdrängen der Luft in der Struktur zu. Nachdem die Poren geschlossen sind steigt der Widerstand gegen Komprimierung stark an und das Kriechen setzt ein. Das Material weist demnach in z-Richtung ein ähnliches viskoelastisches Verhalten auf wie bei Beanspruchungen in der Blattebene.

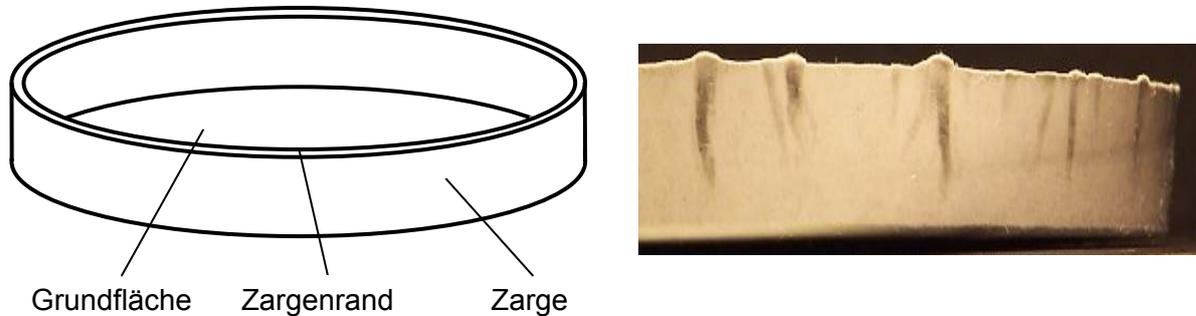
Die Dimensionseigenschaften von Karton werden durch Dicke, Rohdichte, flächenbezogene Masse und spezifisches Volumen beschrieben. Die flächenbezogene Masse ist definiert als Produkt der Masse einer Probe bezogen auf deren Fläche in der Blattebene. Eine Erhöhung der flächenbezogenen Masse wirkt sich auf die mechanischen Eigenschaften durch steigende Werte aus. Die Rohdichte errechnet sich aus dem Quotienten aus flächenbezogener Masse und Dicke. Der Reziprokenwert der Rohdichte wird als spezifisches Volumen des Materials bezeichnet. (Wilken, 1993)

## 2.2 Prozess des mehrdimensionalen Umformens von flächigem Verarbeitungsgut

### 2.2.1 Einordnung des Ziehprozesses

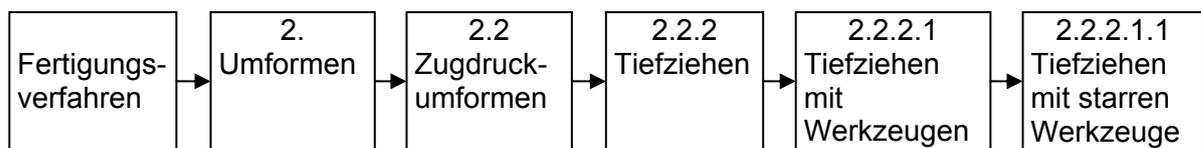
Für das mehrdimensionale Umformen sind in der Verarbeitungstechnik Verfahren bekannt, die sich nach dem Prozessablauf und der Anordnung der Werkzeuge unterscheiden lassen. Beide Merkmale sind vorrangig von den Eigenschaften des Verarbeitungsgutes abhängig. Das Tiefziehen von Metallblech, das Thermoformen von Kunststoffolie sowie das Tiefziehen von Furnier ähneln in ihrem Ablauf und Werkzeugaufbau dem Ziehen von Karton. Der Umformprozess wird durch den Eintrag mechanischer Energie mittels Stempel und Matrize sowie durch die unterstützende Wirkung thermischer Energie realisiert. Das Blasformen unterscheidet sich durch den ausschließlichen Einsatz von Blasluft als Energie übertragendes Medium. Im Kontakt mit dem Verarbeitungsgut ist eine zweiteilige Matrize. Ein Stempel wird nicht eingesetzt. Bei der Schlauchformung wird eine vollständig veränderte Werkzeuganordnung angewendet. Eine Formschulter realisiert durch Vorgabe einer Bewegungsbahn für die Folie die Schlauchformung ohne zusätzlichen Einsatz thermischer Energie. Die Folie wird über die unbewegte Formschulter gezogen und es entsteht zudem im Gegensatz zu allen anderen Verfahren ein beidseitig offener Hohlkörper. Das Prägen weist eine Werkzeuganordnung zweier als Positiv- und Negativform zu einander passender Matrizen zwischen die das Material gepresst wird. Der Prägeprozess wird durch thermische Energieeinbringung unterstützt. Der wesentliche Unterschied zum Ziehprozess ist der definitionsgemäß geringere Umformgrad, der ein weniger stark ausgeprägtes Fließverhalten des Materials erfordert, bevor ein entsprechendes Ausweichen entsteht.

Unter der Bezeichnung Ziehen wird in (Scherer, 1932), (Hesse et al., 1963), (Tenzer et al., 1971) und (Tenzer, 1989) das Umformen von Papier, Karton bzw. Pappe zu einseitig geschlossenen und formstabilen Hohlkörpern verstanden. Kennzeichnend für den Prozess im Sinne der Arbeit ist die Herstellung von Formteilen mit einem Zargenwinkel von  $90^\circ$  bezogen auf die Grundfläche (Abbildung 4).



**Abbildung 4:** Charakteristisches Formteil als Ergebnis des Ziehprozesses

Im Bezug zu den auftretenden Materialbelastungen ist das Ziehen von Karton vergleichbar mit dem Tiefziehen von Metallblech. Der Prozess lässt sich innerhalb der Fertigungsverfahren nach (DIN 8580, 2003), (DIN 8582, 2003), (DIN 8584-1, 2003) und (DIN 8584-3, 2003) durch den in Abbildung 5 skizzierten Pfad in die Gruppe 2.2.2.1.1 „Tiefziehen mit starren Werkzeugen“ einordnen.



**Abbildung 5:** Pfad zur Einordnung des Umformprozesses nach (DIN 8580, 2003), (DIN 8584-1, 2003), (DIN 8584-3, 2003)

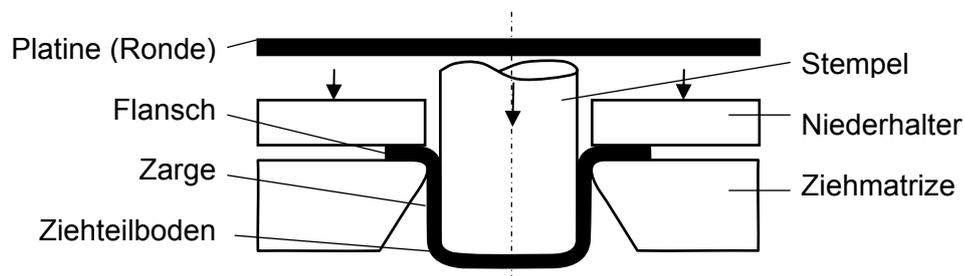
In der Papierverarbeitung wird durch (Hesse et al., 1963), (Tenzer, 1989) eine Einteilung papierverarbeitender Verfahren vorgegeben. Danach sind Verfahren zum Kombinieren von Stoffen mit dem Papier bzw. Karton, zum Bedrucken, Trennen, Umformen und Fügen zu unterscheiden. Die umformenden Verfahren werden zusätzlich in Verfahren zur Vorbereitung von Biegestellen und Verfahren mit bleibender definierter Formänderung unterteilt, denen der Ziehprozess zuzuordnen ist.

Eine ähnliche systematische Unterteilung von Verfahren hat sich in der Verarbeitungstechnik durchgesetzt. Goldhahn beschreibt alle Vorgänge mit Hilfe von sieben Hauptvorgangsgruppen Trennen, Fügen, Formen, Dosieren, Ordnen, Fördern und Speichern (Goldhahn, 1969). Das Ziehen von Papier und Karton wird demnach der Hauptvorgangsgruppe Formen, speziell den umformenden Vorgängen zugeordnet. Eine weitere Vertiefung lässt sich durch die Zuordnung des Vorganges zur entsprechenden Wirkpaarungsklasse nach (Goldhahn, 1969) erreichen. Unter der Wirkpaarung wird danach das System Arbeitsorgan – Verarbeitungsgut verstanden. Durch das Arbeitsorgan wird anhand von Relationen eine definierte Zustandsänderung am Verarbeitungsgut hervorgerufen. Durch kombinatorische Variation der Bewegungen von Arbeitsorgan und Verarbeitungsgut entstehen Wirkpaarungsklassen. Die maßgebliche Wirkpaarung im

Ziehprozess besteht aus Ziehbüchse und Karton. Überlicherweise wird das Verarbeitungsgut (Karton) diskontinuierlich vom Stempel bewegt und das Arbeitsorgan (Ziehbüchse) bleibt unbewegt. Die Relationen entstehen durch das Einbringen von mechanischer und thermischer Energie. Die mechanische Energie wird über die Relativbewegung des Kartons zur Ziehbüchse übertragen. Durch diese Bewegung werden Zug-, Druck und Scherkräfte erzeugt. Thermische Energie wird durch das Beheizen der Ziehbüchse und des Stempels in den Karton eingetragen.

### 2.2.2 Tiefziehen von Metallblech

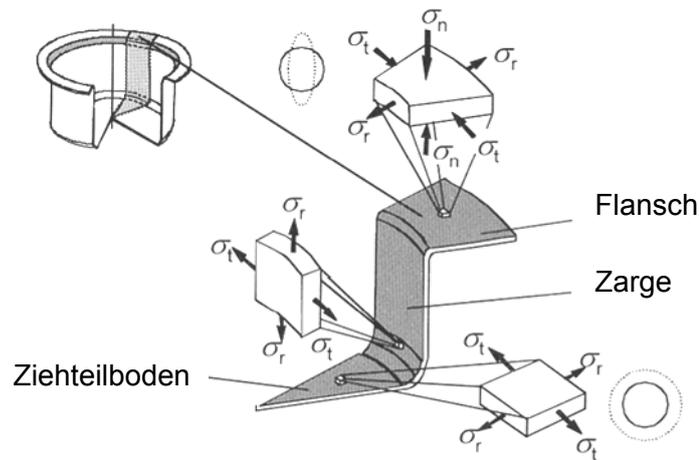
Der Tiefziehprozess von Metallblech ist durch die Fertigungstechnik und insbesondere die dynamische Entwicklung der Automobilindustrie historisch weiter entwickelt und Gegenstand intensiver wissenschaftlicher Forschungsarbeiten. Der Ablauf des Prozesses stellt sich wie in Abbildung 6 dar.



**Abbildung 6:** Schema Tiefziehen von Metallblech im Anschlag nach (Doege et al., 2006)

Die Platine (Ronde), wird zwischen Ziehring (vgl. Ziehbüchse) und Niederhalter (vgl. Faltenhalter) eingespannt. Mit dem Niederhalter wird eine definierte Kraft auf den Flanschbereich der Platine aufgebracht. Der Stempel zieht das Metallblech in den Ziehring. Dabei wird zunächst durch Streckziehen der Boden des Formteils ausgebildet. In dieser ersten Umformphase fließt das Material im freien Bereich zwischen Niederhaltereinspannung und Stempelradius aus der Blechdicke, nicht jedoch aus dem Flanschbereich. Sobald die Stempelkraft größer wird als die Flanscheinzugskraft beginnt die zweite Umformphase. Das Material fließt anschließend aus dem Flanschbereich und es kommt zu einem Anstieg der Blechdicke unter dem Niederhalter hin zum Außenflansch. (Doege et al., 2006)

Der Ziehring ist nach der Ziehringrundung ausgespart, so dass eine weiterführende Reibung in der Ziehbüchse verhindert wird. Es entsteht eine geringe Kontaktfläche mit dem Blechmaterial. Das Spaltmaß zwischen Ziehring und Stempel ist größer als die Materialdicke. Abbildung 7 zeigt die beim Tiefziehen im Material erzeugten Beanspruchungen. Die Beanspruchungen unterscheiden sich in den einzelnen Teilbereichen. Im Flanschbereich stellt sich durch radiale Zugspannungen  $\sigma_r$ , tangentialer Druckspannungen  $\sigma_t$  und normalen Druckspannungen  $\sigma_n$  ein dreidimensionaler Spannungszustand ein. In der Zarge dagegen erzeugen die radialen Zugspannungen und die durch Querkontraktion entstehenden tangentialen Spannungen annähernd einachsigen Zug.



**Abbildung 7:** Beanspruchungen beim Tiefziehen von Metallblech nach (Simon, 1989)

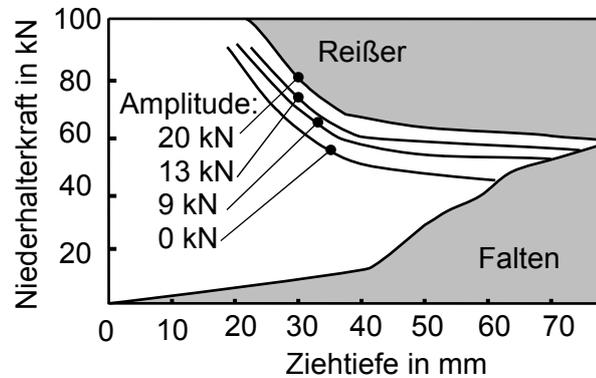
Eine plastische Verformung wird in der Zarge nicht mehr erzeugt. Von Interesse ist zusätzlich der Bereich der Stempelabrundung mit einem zweidimensionalen Spannungszustand durch behinderten einachsigen Zug und der Bodenbereich mit einer zweidimensionalen Zugbeanspruchung durch  $\sigma_r$  und  $\sigma_t$ . (Doege et al., 2006)

Die Beanspruchungen erzeugen im kristallinen Metallblech einen materialtypischen Fließzustand. Dieser Zustand stellt sich ein, sobald im Material eine kritische Schubspannung erreicht ist, um ein Gleitsystem aus Gleitebene (Ebene dichtester Kugelpackung) und Gleitrichtung (Gerade dichtester Kugelpackung) zu aktivieren. Die kritische Spannung wird als Fließspannung bezeichnet und lässt sich durch Prüfmethode wie den klassischen Zugversuch, die Zugversuche nach (Siebel et al., 1944) und (Reihle, 1961), den hydraulischen Tiefungsversuch oder den Kegel- bzw. Zylinderstauchversuch ermitteln. Nach der Schubspannungshypothese von Tresca bzw. der Gestaltänderungshypothese nach v. Mises wird eine Vergleichsspannung berechnet, mit der ein Rückschluss auf das Fließverhalten ermöglicht wird. Zusätzlich wird durch die Fließhypothese von (Hill, 1948) die Anisotropie des Materials berücksichtigt. Unter der Anisotropie von Metallblech wird die beim Walzen erzeugte Richtungsorientierung der Kristalle in Walzrichtung verstanden. Abhängig von der Gefügestruktur kann eine Verfestigung im Material während des Fließens einsetzen. Grund dafür ist die Behinderung bei der Bewegung von Versetzungen. (Doege et al., 2006)

Der Einfluss der Temperatur und der Geschwindigkeit wird von (Doege et al., 1986) beschrieben. Mit der Temperatur nimmt die notwendige Fließspannung und demnach der Kraftbedarf ab. Die Umformgeschwindigkeit hat bei Temperaturen unter 500 °C geringen Einfluss. Wird der Werkstoff über 500 °C bis ca. 1200 °C erwärmt, steigt die Fließspannung signifikant mit steigender Umformgeschwindigkeit. Nach (Doege et al., 2002) verbessert eine partielle Wärmeeinbringung die Umformbedingungen und ermöglicht so das Umformen kritischer Werkstoffe wie z. B. Magnesiumfeinblechen.

Die Steuerung des Fließverhaltens des Materials wird hauptsächlich durch die Gestaltung des Niederhalters und die eingebrachte Rückhaltewirkung erreicht. Es werden überwiegend starre Niederhalter eingesetzt. Verbesserungen im Fließverhalten erreichen derartige Niederhalter durch einen angepassten Kraftverlauf an den Stempelwegverlauf (Siebel, 1954). Für komplexere Geometrien werden die Unterschiede bei der Materialaufdükung im Flanschbereich mit verschiedenen technischen Lösungen lokal beeinflusst. Mit Hilfe

segmentierter Niederhalter beeinflussen (Siegert et al., 1995), (Siegert et al., 1997), (Siegert et al., 1998), (Ninforge, 1998) und (Posehn, 1998) gezielt den Materialfluss bei komplexen Geometrien lokal. Von (Siegert et al., 1998) wird ein schwingungsüberlagerter Niederhalter vorgestellt. Der Einfluss der Schwingung ermöglicht nach (Doege et al., 2006) eine Erweiterung der Prozessgrenzen (Abbildung 8).



**Abbildung 8:** Arbeitsdiagramm eines schwingungsüberlagerten Niederhalters nach (Ziegler, 1999)

Zusätzlich werden in (Ragab et al., 1984), (Sommer, 1986), (Stock, 1996) und (Rittmeier, 2007) gummielastische und segmentelastische Niederhalter untersucht. Diese technischen Lösungen lassen eine weiterführende Einflussnahme auf den Materialfluss zu.

Die Reibung ist eine weitere physikalische Wirkung, die auf den Tiefziehprozess Einfluss hat. Reibstellen sind beim Tiefziehen von Metallblech an der Stempelabrundung und die für den Kraftbedarf maßgeblichen Bereiche an der Ziehringrundung sowie unter dem Niederhalter. Der Einfluss der Reibkraft im Vergleich zur Formänderungskraft ändert sich mit dem Ziehverhältnis. Das Ziehverhältnis entspricht bei zylindrischer Grundfläche dem Quotienten aus Ziehringdurchmesser und Ausgangsdicke des Materials. Bei Ziehverhältnissen bis 600 ist der Reibkraftanteil geringer als die Formänderungskraft. Bis zu einem Ziehverhältnis von 1200 steigt der Anteil der Reibkraft bis zum dreifachen der Formänderungskraft. Die Reibung wird nicht durch die Coulomb'sche Beziehung beschrieben, bei der sich die Reibkraft aus dem Produkt von Normalkraft und Reibkoeffizient zusammensetzt. Es wird angenommen, dass die Reibung im Material eine Schubspannung erzeugt, die Auswirkungen auf die Fließspannung hat. Dieser Einfluss wird durch ein Reibzahlmodell bzw. Reibfaktorenmodell beschrieben. Das tribologische System Stahl-Stahl ist durch den Einsatz von Schmiermitteln gekennzeichnet. Die Reibung wird nach der Stribeck-Kurve in einen Bereich der Misch- bzw. Flüssigkeitsreibung unterteilt. Dementsprechend werden die Reibkoeffizienten minimiert. (Doege et al., 2006)

Nach diesen Grundlagen des Material- und Reibverhaltens wird die für das Umformen notwendige Kraft mit der ideellen Umformkraft  $F_{id}$ , der Rückbiegekraft  $F_{rb}$ , der Reibkraft unter dem Niederhalter  $F_{RN}$  und der Reibkraft an der Ziehringrundung  $F_{RZ}$  nach (Doege et al., 2006) durch

$$F_{ges} = F_{id} + F_{rb} + F_{RN} + F_{RZ} \quad (2.1)$$

berechnet. Die ideelle Umformkraft wird nach (Siebel, 1940), (Siebel, 1932), (Siebel et al., 1956) und (Panknin, 1961) aus der Fließspannung bestimmt. Auch die Berechnung der

Rückbiegekraft erfolgt auf Basis der Fließspannung. Die Reibkraft unter dem Niederhalter dagegen ergibt sich aus dem Reibgesetz nach Coulomb und der Kontaktfläche bzw. dem zugehörigen Pressdruck. Für den Pressdruck werden von (Siebel, 1954) und (Geleji, 1961) empirische Zusammenhänge erarbeitet. Die Reibkraft an der Ziehringrundung wird mit dem Reibkoeffizienten zwischen Blech und Ziehringrundung  $\mu_z$  und dem Umlenkungswinkel an der Ziehkante  $\alpha$  nach dem Eytelwein'schen Ansatz der Seilreibung zu

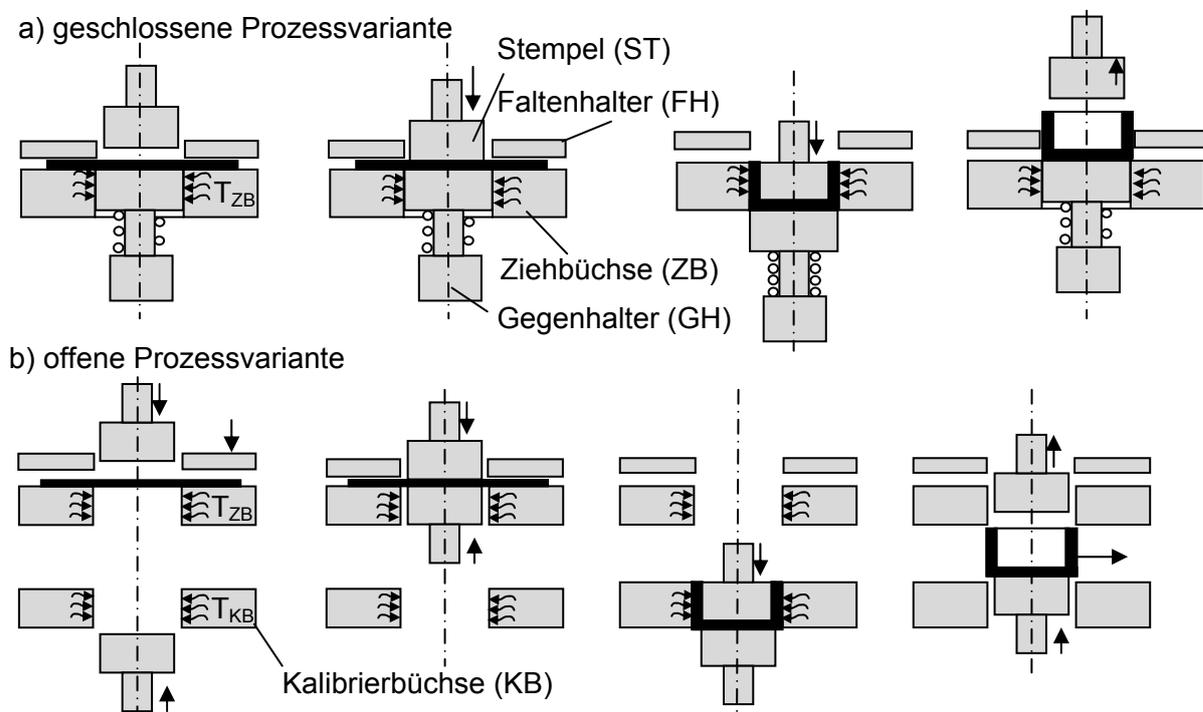
$$F_{RZ} = (e^{\mu_z \cdot \alpha} - 1) \cdot (F_{id} + F_{RN}) \quad (2.2)$$

berechnet.

## 2.2.3 Ziehen von Papier und Karton

### 2.2.3.1 Prozessablauf

Der Prozessablauf beim Ziehen von Karton lässt sich wie folgt beschreiben. Der Kartonzuschnitt wird durch einen Stempel in die zugehörige Matrize gezogen. Beide Arbeitsorgane bilden die formgebende Wirkpaarung. Die Matrize kann als Gesenk oder als beidseitig offene Ziehbüchse ausgeführt sein. Danach wird in zwei Prozessvarianten unterschieden. Bei der geschlossenen Variante ist die Matrize als Gesenk ausgeführt oder das Formteil wird wieder entgegen der Vorschubrichtung ausgestoßen (Abbildung 9 a). Der Karton wird durch den Stempel in die Matrize eingeformt, verpresst und anschließend entgegen der Umformrichtung entformt.



**Abbildung 9:** Schematischer Prozessablauf beim Ziehen von Papier und Karton

Die offene Prozessvariante ist durch die Anwendung einer offenen Ziehbüchse gekennzeichnet, durch die der Stempel den Karton hindurch zieht (Abbildung 9 b). Die gleichzeitige Prägung der Grundfläche erfordert bei dieser Prozessvariante einen Gegenhalter, der mit dem Stempel die Prägewirkpaarung bildet. Der Einsatz eines

Faltenhalters als Gegenfläche zur Stirnfläche der Ziehbüchse bewirkt nach (Scherer, 1932) eine gleichmäßige Verteilung der Falten auf der Zarge und ist daher unabhängig von der Ausführung fester Bestandteil im Ziehprozess. Er wird auf einen vorbestimmten Abstand eingestellt, der etwas größer als die Materialdicke ist.

Die Ziehbüchse ist beheizt und überträgt die Temperatur auf den Karton. Ziel des Temperatureintrages ist die Trocknung des Materials bis zu einer gleichgewichtsfähigen Feuchte. Gegen das Auftreten von Trocknungsspannungen wird das Formteil direkt nach dem Umformen in eine Kalibrierbüchse eingeschoben. Auf diese Weise ist die Form gesichert und mit geringeren Temperaturen bis ca. 60 °C wird nachgetrocknet.

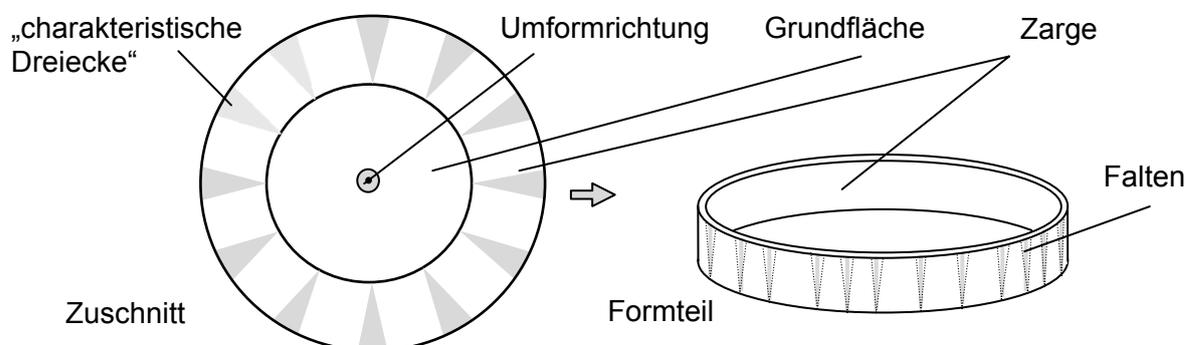
Für die Herstellung von Schachtelteilen mit einem Winkel von 90 ° zwischen Grundfläche und Zarge hat sich in der Praxis die offene Prozessvariante durchgesetzt. Meist wird ein Gegenhalter eingesetzt, der mit dem Stempel eine Stützgeometrie in die Grundfläche prägt. Die Nachtrocknung in einem zweiten Schritt in der Kalibrierbüchse ist üblich. Bei der Herstellung von Kartonschalen für z. B. Fertiggerichte mit geringerem Zargenwinkel und Einweggeschirr eignet sich die geschlossene Prozessvariante und wird weitgehend angewendet. Der geringere Zargenwinkel hat zur Folge, dass im Gesenk eine geringere Reibungsbelastung entsteht, die die Oberfläche des Formteiles beeinträchtigt. Es treten vergleichbare Spannungsverhältnisse auf. Die Faltenbildung entsteht daher analog. In der Praxis hat sich besonders in diesem Segment die Vorbereitung des Zuschnittes durch radial angeordnete Rilllinien in der Zarge als vorbereitete Schwachstellen für die gezielte Legung des Materialüberschusses in Form von Falten durchgesetzt.

### 2.2.3.2 Wirkmechanismen und Parameter

Eine erste umfangreiche Untersuchung des Ziehprozesses wird durch (Scherer, 1932) vorgestellt. Scherer benennt mit Faltenlegung und Faltenverpressung zwei charakteristische Teilvorgänge während des Ziehprozesses.

#### Faltenlegung

Die Faltenlegung entsteht durch den geometrisch bedingten Materialüberschuss. Dieser ist aus der Tiefziehtechnik von Metallblech bekannt und wird von (Tschätsch, 2005) durch die „charakteristischen Dreiecke“ beschrieben (Abbildung 10).



**Abbildung 10:** Schematische Darstellung der „charakteristischen Dreiecke“ des Materialüberschusses beim Zieh- und Tiefziehprozess nach (Tschätsch, 2005)

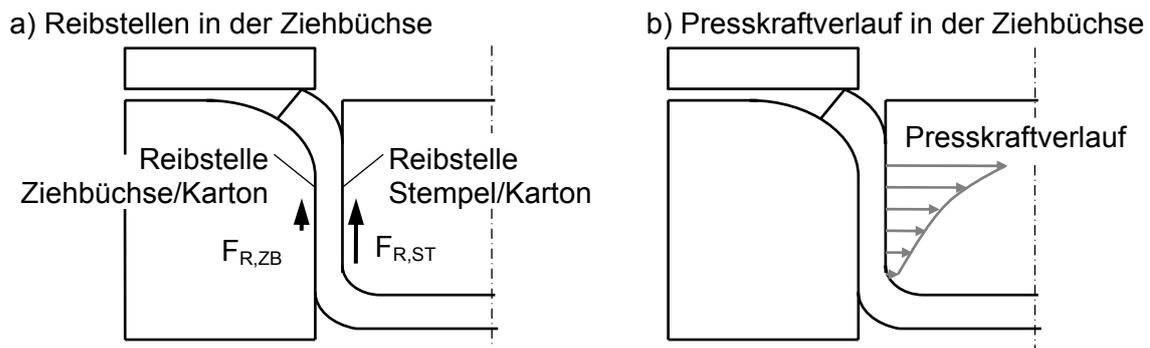
Die Faltenlegung beginnt sobald das plastische Formänderungsvermögen in der Blattebene überschritten wird und das Material aus dieser Ebene ausweicht. Die entstehenden Falten

stellen eine bruchartige Schädigung des Materials dar, die nach (Scherer, 1932) nicht zu vermeiden ist und bis zu einer Überlappung von drei Materiallagen in der Ziehbüchse führen kann. Beeinflussen lässt sich die Verteilung dieser Bruchstellen durch die Einstellung der Faltenhalterplatte. Scherer stellt die Faltenhalterplatte über den Abstand zur Ziehbüchse vor Einschleiben des Zuschnittes ein. Das heißt, der Abstand muss größer als die Materialdicke sein. Er findet, dass eine Justierung zwischen 0,2 und 0,3 mm oberhalb der Dicke des Materials ein Durchziehen aller von ihm getesteten Materialien ermöglicht. Die Ansicht zur Vorgehensweise bei der Einstellung des Faltenhalters hat sich bis heute in Praxis und Wissenschaft nicht geändert. Durch die Einstellung der Faltenhalterplatte ist die Faltenhalterkraft zu Beginn des Ziehvorgangs gleich Null und steigt mit der durch die Falten zunehmenden Materialmenge an. Unter der Faltenhalterkraft wird die Normalkraft verstanden, die von der Faltenhalterplatte auf den Karton übertragen wird. Es wird eine Reibkraft erzeugt, die entgegen der Umformrichtung als Zugkraft auf den Karton wirkt. Durch diese Reibkraft und die Formänderungskraft, die zur Bildung der Falten notwendig ist, wird an der Einlaufkante entlang des Ziehbüchsenradius eine weitere Reibkraft erzeugt. Kurz vor Austritt des Kartonzuschnittes aus dem Faltenhalter liegt die maximale Faltenhalterkraft vor. Diese Kraft benennt Scherer als begrenzende Größe für die erreichbare Ziehhöhe bei optimal eingestelltem Ziehsplatt. Die danach mögliche Ziehhöhe ist vom Durchmesser der Grundfläche (Format) abhängig. Die Entstehung der Falten führt Scherer auf die Bildung von Wölbungen aufgrund auftretender Druckkräfte zurück. Er erklärt den Widerstand gegen das Einziehen als Biegekraft. Die Auswölbung des Materials beginnt nach Scherer am Rand des Zuschnittes, da dort die größte Druckkraft erzeugt wird und die Wölbungsgefahr am größten ist. Mit Hilfe einer aus Glas bestehenden Faltenhalterplatte zeigt Scherer, dass die Falten nicht alle gleichzeitig entstehen, sondern nach 1-2 mm faltenfreiem Ziehweg eine bestimmte Anzahl und mit zunehmendem Ziehweg weitere Falten gebildet werden. Ein zusätzliches Hilfsmittel zur Einflussnahme auf die Faltenbildung ist die Vorbereitung des Zuschnittes durch Einbringen lokaler Schwächungen. Den Falten wird auf diese Weise der Entstehungsort vorgegeben und es kann eine gleichmäßige gezielte Anordnung der Falten erreicht werden. Scherer beschreibt dazu ein Riffelwerkzeug sowie eine gezahnte Walzenpaarung.

### **Faltenverpressung**

Die zunächst ungünstig erscheinende Schädigung des Materials bei der Faltenbildung wird beim Ziehen von Karton genutzt, um durch Verpressen des Materialüberschusses die Formstabilität herzustellen. Das aufgeschobene Material wird direkt nach Einlauf in die Ziehbüchse im Ziehsplatt verdichtet und damit der Materialüberschuss verpresst. Scherer benennt die Verdichtung des Materials und speziell das Verhältnis von plastischer und elastischer Formänderung als Kriterium für die Formhaltigkeit der Ziehteile. Geometrisch betrachtet beginnt die Presskraft zu wirken, nachdem die Radien von Ziehbüchse und Stempel als addierter Ziehweg zurückgelegt sind. Die Änderung dieser Kraft erfolgt über die Einstellung des Ziehsplattes. Als Differenz zwischen Ziehbüchsenradius und Stempelpadius ist dieses Splattmaß nur durch spanende Bearbeitung der Arbeitsorgane veränderbar. Daher hat sich in der Praxis die Verringerung des Stempeldurchmessers als zweckmäßig erwiesen. Die hohe Presskraft erzeugt in der Ziehbüchse eine entsprechend hohe Reibkraft. Nach (Scherer, 1932) und (Heinz, 1966) bewirken Press- und Reibkraft in der Ziehbüchse eine Schädigung der Fasern. Die Presskraft bewirkt dabei eine Strukturschädigung, die nach Scherer eine Verringerung der Festigkeit des Formteils zur Folge hat. Die Reibkraft dagegen

hat Einfluss auf die Oberfläche der Zarge. Heinz weist besonders auf die lokalen Schwärzungen als qualitativer Defekt des Formteils hin, der durch die lokal ausgeprägten Presskräfte an den Materialanhäufungen entstehen (Heinz, 1966). Auf die Reibung hat die Oberfläche des Kartons und die Oberflächenrauigkeit der Ziehbüchse Einfluss. Auch die Glätteänderung in der Ziehbüchse und die Feuchtigkeit des Materials werden von Scherer als Einflussgrößen für den Gleitreibungswiderstand benannt. Scherer findet zudem, dass die Reibstellen von Stempel/Karton und Ziehbüchse/Karton Einfluss auf die Materialbeanspruchung haben (Abbildung 11 a).



**Abbildung 11:** Schematische Darstellung der Verhältnisse von Reibung und Komprimierung in der Ziehbüchse

Ein zu geringer Reibkoeffizient am Stempel bewirkt danach höhere Zugbeanspruchung am Stempelradius. Scherer empfiehlt einen geschichteten Stempel. Auch (Heinz, 1967) weist darauf hin, dass der Reibkoeffizient zwischen Stempel und Karton größer als zwischen Ziehbüchse und Karton sein sollte. Für die Presskraft in der Ziehbüchse empfiehlt er eine progressive Verteilung über der Ziehhöhe. Diese entsteht nach Scherer bereits in zu starker Form durch den Anstieg des Materialüberschusses über der Ziehhöhe (Abbildung 11 b). Es wird demnach eine konische Verjüngung des Stempels entgegen der Umformrichtung eingeführt. Heinz findet, dass die optimale Anpassung theoretisch eine parabelförmige Anpassung des Stempels ist. Eine konische Gestaltung ist für die praktische Anwendung jedoch ausreichend.

### Parameter

Beim Umformen von Karton treten keine ausgeprägten Fließzustände auf wie sie aus der Tiefziehtechnik von Metallblech bekannt sind. Aus diesem Grund wird beim Ziehen von Karton das Material präpariert. Ziel der Präparation ist, das rheologische Verhalten auf Faserebene zu verbessern, das Scherer als innere Reibung bezeichnet. Durch die Erhöhung der Materialfeuchte wird eine bessere Bildsamkeit erreicht. Unter Bildsamkeit versteht Scherer das Verhältnis aus elastischer und plastischer Formänderung. Er beschreibt die Präparation mit einer Seifenlösung mit der er geeignete Feuchtigkeiten zwischen 8 und 10 % einstellt. Das Material wird einseitig mit der Lösung bestrichen und im Stapel entsteht ein Ausgleich der Feuchtigkeit. Nach Scherer besteht ein Unterschied zwischen dem Umformverhalten geseifter und seifenfrei befeuchteter Materialien auch bei gleicher Feuchte. Die geseiften Materialien weisen danach bessere Ziehergebnisse auf. Als Wirkungen der Feuchtigkeit auf die Materialien benennt Scherer im Wesentlichen die Festigkeitsverringerung und die Verringerung des elastischen Verformungsanteils. Auch die äußere Reibung kann durch Präparationsmittel reduziert werden. Dazu benennt Scherer

Paraffin- und Wachsbehandlungen, deren Einfluss jedoch in der Literatur nicht beschrieben ist. Auch (Klingelhöffer, 1962) beschreibt den Einfluss auf die Verformbarkeit von Karton und findet für den Prägevorgang eine geeignete Formhaltigkeit bei 12 % Materialfeuchte und 100 °C Werkzeugtemperatur.

Die durch Präparation oder Konditionierung ins Material eingebrachte Feuchtigkeit wird durch Erwärmung des Kartons in der Ziehbüchse wieder getrocknet. Scherer vermutet einen zweistufigen Ablauf der Trocknung. In der Ziehbüchse wird das Material erwärmt und in der Faserstruktur entsteht Wasserdampf, der innerhalb der Ziehbüchse nicht in großem Umfang entweichen kann. Bei Verlassen der Ziehbüchse entweicht der gebildete Dampf aus dem Karton. Scherer und Heinz erklären, dass bei zu geringer Temperatur Trocknungsspannung aufgrund der weitergehenden Feuchteabgabe nach dem Umformen auftreten. Hingegen bilden sich bei zu schneller Dampfbildung durch zu hohe Temperaturen Blasen. Es entsteht eine zu große Menge Dampf, die nicht entweichen kann und die Lagen des Materials spaltet. Klingelhöffer beschreibt einen ähnlichen Effekt und weist empirisch mit Hilfe der Formungstiefe die Auswirkungen auf die Formhaltigkeit von Prägungen nach (Klingelhöffer, 1964). Zudem hat auf diesen thermodynamischen Zusammenhang die Einwirkzeit der Temperatur Einfluss. Diese Zeit wird durch die Ziehgeschwindigkeit und die Tiefe der Ziehbüchse als Kontaktlänge beeinflusst. Geeignete Temperaturen liegen nach (Scherer, 1932) im Bereich um 130 °C bei einer Ziehbüchsentiefe von 54 mm und einer Geschwindigkeit von 120 mm/s. Die Ausbringungen haben sich in der Praxis von 25 Schachteln je Minute im Jahr 1932, wie sie 120 mm/s Stempelgeschwindigkeit entsprechen, auf 60 bis 100 Stück pro Minute in aktuellen Maschinen gesteigert. Die Wirkung der Erwärmung des Materials wird durch Scherer und Heinz als günstig für das Umformergebnis eingeschätzt. Der Verformungswiderstand verringert sich. Eine gesicherte Ursache dafür wird nicht benannt. Vermutungen von Scherer deuten auf die Erweichung von Leim- oder Seifenbestandteilen.

Aus den bisherigen Ausführungen wird deutlich, dass die Eigenschaften des Materials signifikanten Einfluss haben. Der strukturelle Aufbau des Materials nach Abschnitt 2.1.2 beeinflusst das thermodynamische Verhalten bei der Trocknung. Neben Scherer gibt (Tenzer, 1989) Hinweise auf geeignete Feuchtwerte und beziffert diese mit 12 bis 16 %. Gleichzeitig ist die Rheologie der Materialkomponenten für das Verformungsverhalten interessant. Scherer benennt in seiner Arbeit die Untersuchung der kolloidwissenschaftlichen Grundlagen bei der Verformung als Potential für weiterführende wissenschaftliche Arbeiten. Auch die Oberflächeneigenschaften werden durch den strukturellen Aufbau des Materials beeinflusst. Die Glätte von Karton hat Einfluss auf den Reibwiderstand, der nach Scherer und Heinz den maßgeblichen Ziehkraftanteil verursacht. Die mechanischen Eigenschaften des Materials sind für die Ziehfähigkeit ähnlich wichtig. Scherer benennt Zugfestigkeit, Biegesteifigkeit und Biegebruchwinkel sowie die Verdichtbarkeit als maßgebliche mechanische Eigenschaften. Er beschreibt eine Abhängigkeit dieser Festigkeitseigenschaften von Art und Menge der Füllstoffe, Feuchtigkeit und Werkzeugtemperatur. Den Berstdruck schließt er als Mittel für die Beschreibung der Ziehfähigkeit des Materials aus. Eine Untersuchung des Zusammenwirkens der mechanischen Materialeigenschaften im Bezug auf die Umformbarkeit von Materialien beim Ziehen ist aus der Literatur nicht bekannt. Die Reaktion des Materials auf ein- und zweiachsige Spannungszustände wird behandelt, jedoch nicht in den Kontext zur

vorliegenden Beanspruchungssituation unter den Bedingungen im Prozess wie z. B. Temperatur, Feuchte und Glätteänderung gesetzt.

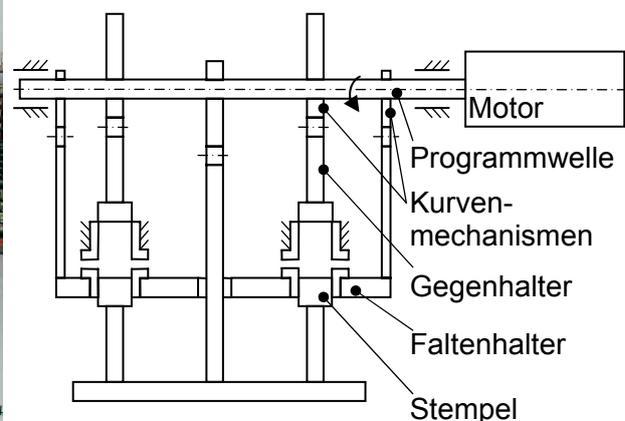
### 2.2.3.3 Maschinentechnik

Ziehpressen für die Verarbeitung von Papier, Karton und Pappe zu einseitig geschlossenen Hohlkörpern werden Ende des 19. Anfang des 20. Jahrhunderts in Patenten wie z. B. (Carl David & Sohn, 1894) und (Gossweiler, 1908) beschrieben. Grundsätzlich sind Ziehpressen für das Umformen von Metallblech als Vorbild bereits deutlich länger bekannt und besonders durch die Anwendung im Karosseriebau von Fahrzeugen intensiv weiterentwickelt worden. In (Doege et al., 2006) wird ein Überblick über Arten, Arbeitsweisen und Anwendungsgebiete von Pressen gegeben. Für das Tiefziehen von Metallblech werden beispielsweise je nach Anforderungen Spindel-, Exzenter-, Kniehebel- oder Hydraulikpressen eingesetzt. Die Erfindungen und patentrechtlichen Anmeldungen bezogen auf das Umformen von Papier, Karton und Pappe verdichten sich zwischen 1920 und 1940. In (N.N., 1921a), (N.N., 1921b), (N.N., 1921c), (Krautwald, 1922), (Schmidt, 1927), (Järschke, 1928), (N.N., 1934), (N.N., 1938), (Käss, 1938) werden Anpassungen von Maschinenlösungen in deren Arbeitsweise beschrieben. Maßgebliche Veränderungen gegenüber Standardpressen sind Einsatz und Arbeitsweise des Faltenhalters, Art und Dauer der Einbringung von Temperatur bzw. Druck und die Bewegungs- bzw. Kraftübertragung zwischen Arbeitsorgan und Antrieb. Die Ausbringung der Maschinen wird durch die Einführung mehrfach ausgeführter Wirkpaarungen gesteigert (Schiller, 1929). Weiterentwicklungen an Maschinen und Verfahren werden in der Folge durch (Oberrauch, 1950), (N.N., 1959), (Dempsey, 1983) und (Fortney, 1998) im Bereich Einweggeschirr und Fertigerichteschalen geschützt. Die Herstellung dieser Teile ist als Kombination von Zieh- und Prägevorgang zu betrachten und steht daher nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit. Für das Ziehen von Hohlkörpern mit 90 ° Zargenwinkel zur Grundfläche haben sich bis heute Exzenterpressen durchgesetzt (Abbildung 12 a).

a) Ziehmaschinen BSZ II



b) Getriebeschema der BSZ II



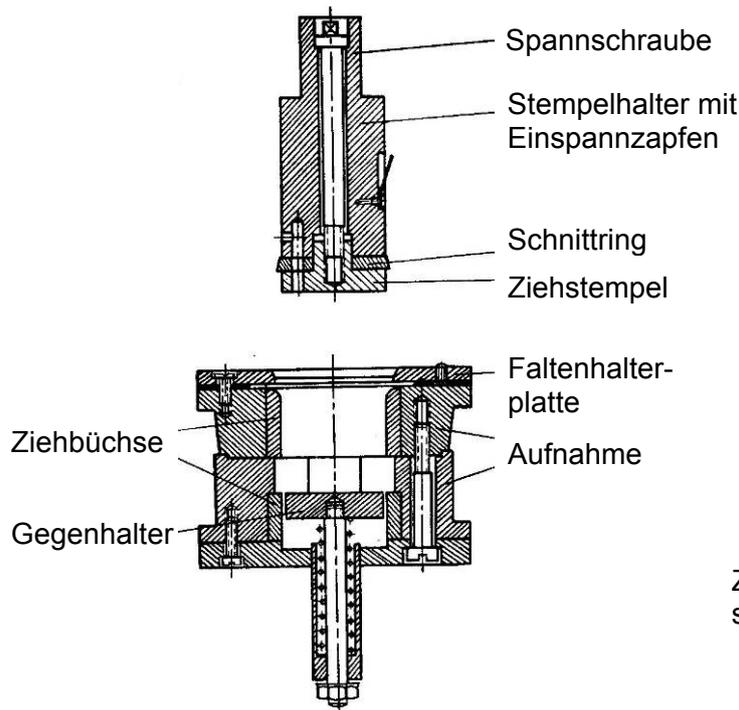
**Abbildung 12:** Abbildung und Getriebeschema der Ziehmaschine vom Typ BSZ-II (Quelle: Fa. Manz Automation Tübingen GmbH)

Durch den ungleichförmigen Exzenterantrieb (siehe Abbildung 12 b) und die auftretenden Kräfte im Ziehspalt bei meist horizontaler Arbeitsweise werden hohe Beanspruchungen im Gestell der Maschinen erzeugt. Daher werden massive geschlossene Guss- oder Schweißgestelle eingesetzt, die durch Innenverbindungen zusätzlich versteift sind. Die Steifigkeit des Stützsystems ist Voraussetzung für eine präzise Arbeitsweise der Arbeitsorgane. Zur Begrenzung des notwendigen Arbeitshubes und Steigerung der Ausbringung werden Zieh- und Kalibriervorgang in zwei getrennten Schritten durchgeführt, so dass während der Formung eines neuen Ziehteils das vorangegangene Teil kalibriert wird. Es entstehen kompakte und funktionsintegrierte Maschinen, in denen durch Einstellung der Exzentrizität im Stempeltrieb eine begrenzte Anpassung an steigende Ziehhöhen und den erforderlichen steigenden Hub möglich ist. Eine Steuerung der sinusförmigen Stempelbewegung und der dementsprechend ungleichmäßigen Geschwindigkeit des Stempels während des Umformens ist bislang nicht vorgesehen. Aus diesem Grund sind Maschinen bislang auf die Produktion eines in engen Grenzen spezifizierten Ziehteils mit festgelegtem Grundflächenformat und Ziehhöhen zwischen 10 und 20 mm ausgelegt.

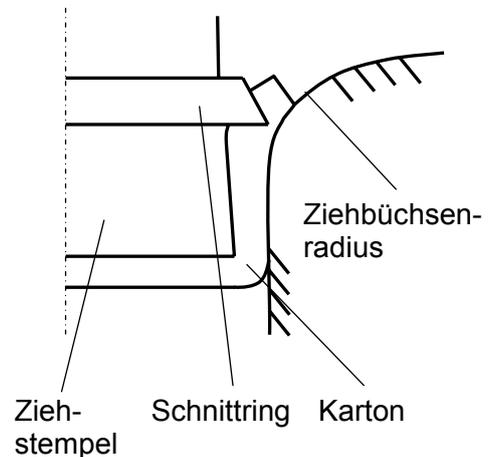
Die Anwendung verschiedener Materialien ist mit der Antriebsleistung begrenzt. Die installierte Leistung des Hauptantriebes liegt zwischen 11 und 18 kW, lässt jedoch aufgrund der zentralen Antriebsstruktur nicht ohne detaillierte Analyse des Gesamtsystems, sowie der Kenntnis von Trägheiten und Reibungen eine Aussage zur maximal zur Verfügung stehenden Stempelkraft zu. Durch die Abhängigkeit der maximalen Kraft am Stempel von der Antriebsstruktur kann nach Herstellerangaben insbesondere beim Anfahren der Maschinen nicht die Maximalkraft aufgebracht werden. Grund dafür sind die Trägheitskräfte, die bei der Beschleunigung überwunden werden müssen und die Hebelverhältnisse der Mechanismen. Für einen Kurbelmechanismus sind diese zum Ende des Hubes kurz vor der Totlage optimal, um hohe Kräfte zu übertragen. Im Ziehprozess von Papier, Karton und Pappe ist jedoch die Maximalkraft zu Beginn des Hubes erforderlich. Informationen des Prozesses sind auf die Temperaturen von Ziehbüchse und Kalibrierbüchse begrenzt. Der Wegverlauf lässt sich über den Kurbelmechanismus berechnen und bleibt in der Maschine konstant, solange keine Änderungen in der Mechanik vorgenommen werden. Das Material wird mit annähernd maximaler Geschwindigkeit vom Stempel berührt und eingezogen. Die Kraftverläufe an Stempel, Faltenhalter bzw. Gegenhalter werden nicht gemessen, so dass keine Informationen zum Umformprozess vorliegen. Auch optische Überwachungen sind durch die Raumverhältnisse der kompakten Maschinen nicht möglich.

Auf den Prozess wird durch unterschiedliche Werkzeuglösungen und Ausführung der Arbeitsorgane wie z. B. in (Gossweiler, 1906), (Poméon, 1920), (N.N., 1924), (Schmidt, 1928), (N.N., 1929), (Ladner, 1956) Einfluss genommen. Die Anordnung der Arbeitsorgane beim Ziehen von Hohlkörpern mit einem Zargenwinkel von  $90^\circ$  in einem Verbundwerkzeug, das sich in der Praxis durchgesetzt hat, zeigt (Hesse et al., 1963) (Abbildung 13 a). An die Ziehbüchse wird die Faltenhalterplatte durch Passscheiben auf einen bestimmten Abstand positioniert für den (Scherer, 1932) und (Tenzer, 1989) Erfahrungswerte von 0,2 mm über Materialdicke angeben.

a) Schnitt eines Verbundwerkzeuges



b) Schema Randbeschnitt



**Abbildung 13:** Anordnung der Arbeitsorgane beim Ziehen von Karton nach (Hesse et al., 1963) und (Tenzer, 1989)

Der Gegenhalter wird entweder mit einer Feder gestützt und durch diese wieder zurück in die Ausgangslage gebracht oder direkt angetrieben. Auch bei direkter Bewegung des Gegenhalters ist dieser zusätzlich gefedert, um das Auftreffen des Stempels zu dämpfen. Ziehbüchse und Kalibrierbüchse sind mit Radien abgerundet für die Erfahrungswerte von 2 bis 3 mm angegeben werden. Für das Spaltmaß zwischen Ziehbüchse und Stempel gibt Tenzer Erfahrungswerte von 0,5 bis 0,75-facher Materialdicke an. Eine Anpassung des Ziehspaltes bzw. der Stempelkonizität bei Risserscheinungen wird im Wesentlichen durch die Verringerung des Stempeldurchmessers erreicht. Nach dem Einförmigen des Materials in die Ziehbüchse wird durch einen Schnittring der Zargenrand vom Formteil getrennt (Abbildung 13 b). Notwendig ist der Randbeschnitt aufgrund der ausgeprägten Zipfelbildung am Zargenrand. Wärmeenergie wird dem Karton durch die mit einem Heizband erwärmte Ziehbüchse zugeführt. Übliche Temperaturen gibt (Tenzer, 1989) mit 120 bis 130 °C an. Für die Nachtrocknung in der Kalibrierbüchse werden geringere Temperaturen von ca. 60 bis 100 °C gewählt.

Versuchsträger für die wissenschaftliche Untersuchung des Ziehvorganges sind derzeit nicht bekannt. (Scherer, 1932) führt seine Untersuchungen an einer Friktionspresse durch, die er mit einer mechanischen Kraftmessvorrichtung ausrüstet. Die Arbeitsweise der Presse wird nicht beschrieben. Auch Heinz beschreibt seinen Versuchsträger nicht, so dass die Einschätzung der Ergebnisse in (Heinz, 1966) und (Heinz, 1967) erschwert wird.

### 2.2.4 Thermoformen von Kunststoffolie

Das Thermoformen von Kunststoffolie wird in der Praxis häufig als Tiefziehen bezeichnet, was definitionsgemäß nicht korrekt ist. Eine Kunststoffolie oder -platte wird vorgewärmt und über einem Formwerkzeug, der Matrize, positioniert. Anschließend wird entweder mechanisch über einen Stempel oder über Vakuum bzw. Druckluft oder vorzugsweise durch eine Kombination von mechanischem Vorstrecken und Ausformen mit Druckluft oder Vakuum das Material umgeformt. Es wird nach der Art der Matrize in Positiv- und Negativformung unterschieden. Das Umformen wird durch einen gezielten Wärmeeintrag unterstützt, der das Material bis zur Glasübergangstemperatur erwärmt. Bei dieser Temperatur wird das Material plastisch verformbar und weist ein ausgeprägtes Fließverhalten auf (Illig, 1997). Entgegen dem eigentlichen Tiefziehen wird beim Thermoformen kein Nachführen des Materials zugelassen, sondern das Material fließt aus der Dicke des Zuschnittes. Im fließfähigen Zustand erreicht das Material Dehnungen von mehreren hundert Prozent (Schwarz et al., 2005). Die resultierende Wanddickenverteilung ist das wesentliche Qualitätskriterium, da sie nicht konstant ist (Hegemann, 2004).

Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf die Beschreibung des rheologischen Materialverhaltens im fließfähigen Zustand unter biaxialen oder planaren Beanspruchungsverhältnissen (Chatraei, et al., 1981), (Baumgaertel et al., 1989), (Bastian, 2001), (Detroit, 2001). Diese Materialeigenschaften werden zusammen mit der Untersuchung des spezifischen Reibverhaltens genutzt, um den Materialfluss zu modellieren wie z. B. in (Debbaut et al., 1997), (Kouba et al., 1999), (Nishioka et al., 2000), (Detroit, 2001), (Hegemann, 2004). Dabei wird ein schädigungsfreies Umformen vorausgesetzt.

### 2.2.5 Tiefziehen und 3D Verformung von Holz und Furnier

Das dreidimensionale Umformen von Holz ist ein Vorgang der zum Ziehen von Karton im Hinblick auf die Faserstruktur des Materials und dessen Reaktion auf Feuchte und Wärme Parallelen erwarten lässt. Untersuchungen zu diesem Prozess werden im Rahmen der Anwendung von Furnieren für beispielsweise Automobilinnendekore durchgeführt. Erste Ergebnisse zum Umformverhalten des Materials liefert (Müller, 1929). Er beschreibt die Formung von dreischichtigem Sperrholz und stellt durch Befeuchten und Erwärmen des Holzes Hohlkörper mit 40 mm Ziehtiefe und 80 mm Durchmesser her. Die Faltenbildung in der Zarge kann zu diesem Zeitpunkt nicht verhindert werden. Die Verwendung miteinander verleimter Holz- bzw. Furnierstreifen wird von (Möller, 1989) und (Sperrschneider, 1996) beschrieben. Es wird nachgewiesen, dass derartige Holschichtverbunde dreidimensional verformbar sind, ohne dass der Zusammenhalt der Schicht verloren geht. Modifikationen des Materials, insbesondere von Furnieren werden in (Böhme, 2003), (Wagenführ et al., 2004a) und (Wagenführ et al., 2004b) vorgestellt und führen zu Verbesserungen im Umformergebnis.

Grundsätzlich sind Holz- bzw. Furnierverformung und die Verformung von Karton nicht direkt zu vergleichen. Bei Holz sind die Fasern durch ein natürliches Polymer, das Lignin, miteinander verbunden, während Karton durch Wasserstoffbrückenbindungen zwischen Fasern gekennzeichnet ist. Das Lignin weist nach (Gohring, 1963) geringe Erweichungstemperaturen auf und wirkt nach der Verformung als Bindemittel zwischen den Fasern. Ein weiterer Unterschied ist die deutlich stärker ausgeprägte Anisotropie des Materials. Diese Eigenschaft führt nach (Wagenführ et al., 2004a) zu einer charakteristischen

Rissbildung bei Beanspruchungen quer zur Faserausrichtung. Entsprechend schwer ist eine Faltenbildung in Längsrichtung zu vermeiden.

Die von (Wagenführ et al., 2004a) beschriebenen Ansätze bei der Modifizierung des Materials sind für spätere Arbeiten zu beachten, die sich mit der Umformbarkeit bzw. Ziehbarkeit von Karton beschäftigen, da durch mechanische und chemische bzw. biologische Materialmodifikationen signifikante Verbesserungen im Umformergebnis erzielt werden können.

### **2.2.6 Zusammenfassung**

Zum Ziehen von Karton sind bislang nur wenige wissenschaftliche Arbeiten bekannt. Im Ergebnis der Untersuchungen werden phänomenologisch der Einfluss von Temperatur Feuchte, Komprimierung und Oberflächeneigenschaften, sowie der Rundungsradien der Werkzeuge als Einflussgrößen benannt. Eine Quantifizierung anhand messbarer Größen erfolgt nicht, da keine entsprechenden Referenzgrößen zur Erfassung der Änderungen an den Formteilen definiert werden. Die wissenschaftliche Forschungsarbeit wird nach 1967 nicht weitergeführt, so dass entsprechende technische Weiterentwicklungen der Antriebstechnik, Papiertechnik und Messtechnik nicht berücksichtigt werden.

Die Ausführungen der Abschnitte 2.2.2 und 2.2.3 zeigen, dass nur wenige Kenntnisse aus dem Bereich Tiefziehen von Metallblech auf das Ziehen von Karton übertragbar sind. Grund dafür sind die Unterschiede im Verhalten der Materialien Metall und Karton unter mechanischen und thermodynamischen Beanspruchungen sowie bei der Tribologie mit den Arbeitsorganen.

Karton weist kein ausgeprägtes Fließverhalten auf, während sich beim Tiefziehen von Metallblech die Prozessführung weitestgehend an der Fließspannung orientiert und deren Überschreitung vermieden wird. Beim Ziehen von Karton ist eine Faltenbildung durch Überschreiten des Formänderungsvermögens in der Blattebene fester Verfahrensbestandteil und wird als Mittel für die Herstellung neuer Bindungen im umgeformten Zustand genutzt. Um diese Bindungen herzustellen wird mit Hilfe eines gezielten Spaltmaßes eine Komprimierung des Materials und der Falten erzeugt, was gleichzeitig ein wesentlicher Unterschied im Verfahrensablauf und der Beanspruchungssituation im Material ist. Bei Metallblech wird nach der Ziehringrundung eine Berührung zwischen Material und Matrize vermieden.

Die bislang dokumentierten Wirkungen der Temperatur auf Metallblech und Karton zeigen einen weiteren Unterschied. Der thermodynamische Zusammenhang von Feuchte und Temperatur in der porösen Struktur von Karton und die ausgeprägte Abhängigkeit der rheologischen Eigenschaften von diesen Größen lässt keine Übertragung wissenschaftlicher Kenntnisse der Tiefziehtechnik von Metallblech zu.

Ein übertragbarer Ansatz aus der Tiefziehtechnik von Metallblech liegt in der gezielten Nutzung des Faltenhalters zur Beeinflussung der Beanspruchungssituation im Material.

Beim Umformen von Kunststoffen durch Thermoformen wird ein ausgeprägtes Fließverhalten des Materials durch Erwärmung oberhalb der Glasübergangstemperatur genutzt, um den Ausgleich des Materialüberschusses zu realisieren. Der Widerstand gegen Verformung verringert sich dabei signifikant, so dass Luft als Wirkmedium zum gutschonenden Umformen genutzt werden kann. Eine Komprimierung des Materials ist nicht

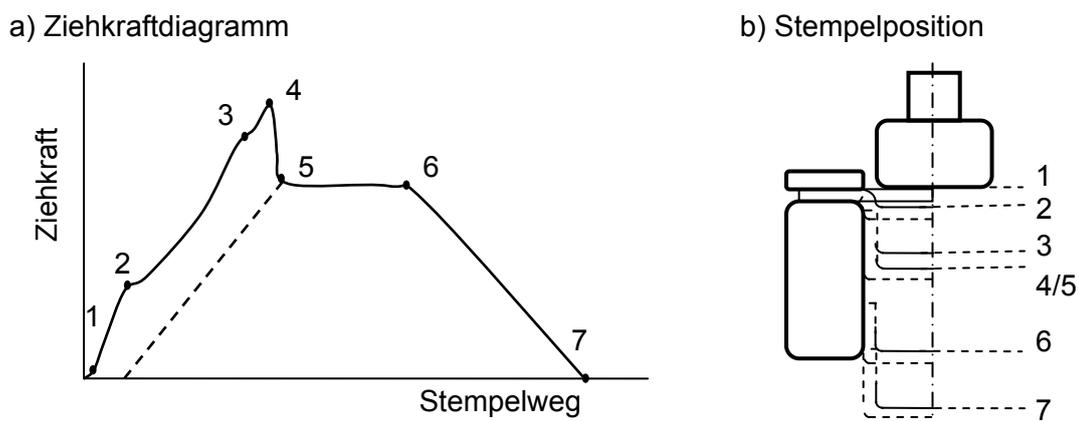
notwendig. Die Wirkung des Wärmeeintrages auf Kunststoffe ist zum Verhalten von Karton nicht vergleichbar. Dadurch unterscheidet sich auch der Prozessablauf beim Thermoformen wesentlich vom Ziehprozess und eine direkte Übertragbarkeit wissenschaftlicher Erkenntnisse ist nicht gegeben.

Das Tiefziehen von Furnier ist durch eine Anisotropie des Materials von annähernd 100 % sowie den Einfluss des Lignins als natürliches Bindemittel nicht vergleichbar zum Ziehen von Karton. Die feste Verbindung der Fasern mit Hilfe des Lignins bewirkt wesentliche Unterschiede im rheologischen Verhalten von Furnier im Vergleich zu Karton.

## 2.3 Modellvorstellungen zum Umformen von Papier und Karton

### 2.3.1 Umformprozess Ziehen von Papier und Karton

In der Literatur werden bislang vorrangig die in Abschnitt 2.2.3.2 beschriebenen phänomenologischen Untersuchungen und Vermutungen als Leitlinie für den Praktiker vorgestellt. Scherer stellt unter der Zielstellung den notwendigen Arbeitsbedarf für die Auslegung von Maschinen zu erfassen fest, dass die dafür entscheidende Prozesskraft am Stempel aus einem Formänderungsanteil und einem Reibanteil besteht (Scherer, 1932). Er ermittelt mit Hilfe einer mechanischen Kraftmessvorrichtung die Kraftverläufe seiner Versuche (Abbildung 14) und erklärt diese qualitativ anhand von Beobachtungen.



**Abbildung 14:** Verlauf der Stempelkraft über der Stempelposition nach (Scherer, 1932)

In (1) trifft der Stempel auf den Kartonzuschnitt auf. Den Kraftanstieg zwischen (1) und (2) begründet Scherer mit der Ausbildung tangentialer Druckspannungen im Material unter dem Faltenhalter und den einsetzenden Reibkräften in der Ziehbüchse durch beginnende Materialverpressung. Von (2) bis (3) steigt die Kraft durch die zunehmende Kontaktfläche in der Ziehbüchse und die zunehmende Dicke unter dem Faltenhalter an. In Punkt 3 tritt der Zuschnitt aus der Faltenhalterplatte aus und wird bis (4) komplett in die Ziehbüchse eingezogen. Den Abfall von (4) zu (5) erklärt Scherer mit der Vollendung der Verpressung des Materials. Zwischen (5) und (6) bleibt die Kraft konstant und entspricht demnach dem Gleitreibungswiderstand. Anschließend nimmt die Kraft annähernd linear mit der Reibfläche durch das Ausfahren aus der Ziehbüchse ab.

Die geometrischen Verhältnisse in der Ziehbüchse sind für die darin entstehende Reibkraft maßgeblich und werden durch Scherer physikalisch beschrieben. Ausgehend von einer konstant bleibenden Querschnittsfläche von Zuschnitt und späterer Mantelfläche des Formteils gilt nach Scherer

$$2 \cdot \pi \cdot R_Z \cdot s = \pi \cdot (R_{ZB}^2 - R_{ST}^2). \quad (2.3)$$

Mit den festgelegten Werten für Ziehbüchsenradius  $R_{ZB}$ , Radius des Zuschnittes  $R_Z$  und Materialdicke  $s$  lässt sich daraus ein Grundradius des Stempels zu

$$R_{ST} = \sqrt{(R_{ZB}^2 - 2 \cdot R_Z \cdot s)} \quad (2.4)$$

bestimmen. Zu diesem Grundradius ist der Komprimierweg des Materials zu addieren. Scherer merkt an, dass die notwendige Verdichtung und damit der Komprimierweg von den Materialeigenschaften, der Materialdicke und der Ziehhöhe abhängen. Ein mathematischer Ansatz ist dafür bislang nicht gefunden. Auch in der Praxis wird die Einrichtung des Ziehspaltes nach wie vor mit großem Aufwand empirisch vorgenommen. Den von der Ziehhöhe abhängigen Materialüberschuss untersucht Scherer durch die Berechnung des Stempeldurchmessers für eine Reihe von Ziehhöhen unter der Voraussetzung, dass in der Ziehbüchse keine Komprimierung entsteht. Er findet durch die Berechnung einer Ausgleichsgeraden nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate eine konische Stempelform mit dem Ergänzungswinkel  $\alpha$ , der von  $90^\circ$  abgezogen wird und dem Betrag des Anstieges der Ausgleichsgeraden entspricht.

Durch die mit dem Format ansteigenden Fehlerwerte im Konuswinkel vermuten Scherer und (Heinz, 1967) eine parabelförmige Kontur als optimale Stempelform. Tenzer verallgemeinert den Zusammenhang für die konische Stempelform, ausgehend von einer konstanten Dicke des Materials im komprimierten Zustand  $s_V$  und damit einer gleichbleibenden Verdichtung über der Ziehhöhe (Tenzer, 1989). Er berechnet den oberen Stempeldurchmesser nach dem Ansatz des Flächenausgleichs in der Zarge vom Zuschnitt zum späteren Formteil und kommt mit

$$D_{ST.O} = \sqrt{(D_{ZB}^2 - 4 \cdot (D_{ZB} + 2 \cdot h) \cdot s_V)} \quad (2.5)$$

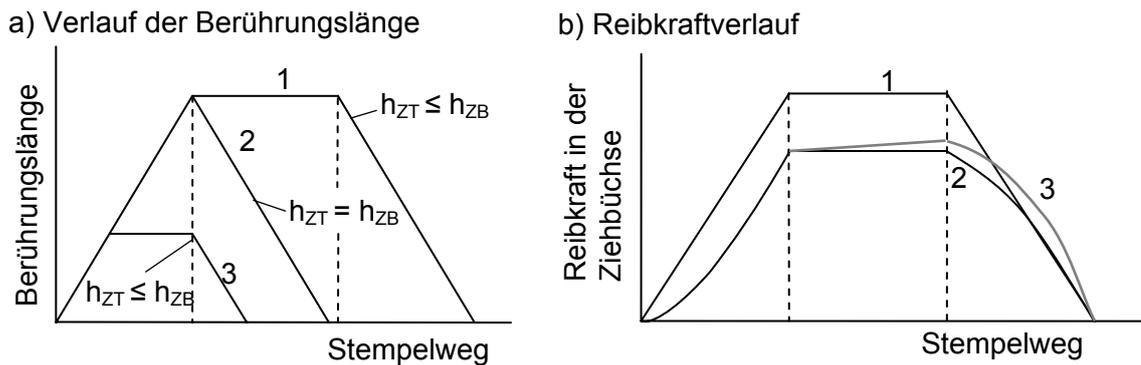
auf den gleichen Zusammenhang wie Scherer. Wobei  $D_{ZB}$  dem Durchmesser der Ziehbüchse und  $h$  der Ziehhöhe entspricht. Als zweiten Stützpunkt für die Ermittlung des Konuswinkels berechnet Tenzer den unteren Stempeldurchmesser  $D_{ST.U}$  durch

$$D_{ST.U} = D_{ZB} - 2 \cdot s_V \quad (2.6)$$

Die Komprimierung liegt nach Tenzer beim 0,5 bis 0,75-fachen der Materialdicke. Der Ergänzungswinkel  $\alpha$  des Ziehstempels wird aus der Beziehung

$$\tan \alpha = \frac{(D_{ZB.U} - D_{ZB.O})}{2 \cdot h} \quad (2.7)$$

berechnet. Als Grundlage für die Bestimmung der Reibkraft unter der Annahme eines konstanten, radial wirkenden Druckes in der Ziehbüchse wird von Heinz der Verlauf der Berührungslänge über dem Ziehweg gekennzeichnet (Abbildung 15).



**Abbildung 15:** Verlauf von Berührungslänge und Reibkraft in der Ziehbüchse nach (Heinz, 1967)

Die Berührungslänge steigt bei Einziehen des Materials in die Ziehbüchse zunächst linear mit dem Stempelweg  $s$  bis zum Maximalwert an. Der Maximalwert entspricht hier der nominellen Ziehhöhe  $h_{ZT}$  des späteren Formteils. Ist die Tiefe der Ziehbüchse  $h_{ZB}$  größer als die Ziehhöhe, bleibt die Berührungslänge entsprechend der Differenz konstant und nimmt anschließend wieder linear ab. Diesem Verlauf entspricht annähernd der Verlauf der Reibkraft in Abbildung 15 a), Kurve 1. Ist die Tiefe der Ziehbüchse gleich der Ziehhöhe, entfällt der konstante Teil der Kurve (Abbildung 15 a), Kurve 2). Die Normalkraft  $F_{N,ZB}$  in der Ziehbüchse berechnen Heinz und Tenzer mit dem radial wirkenden Druck  $p$ , für den ein Bereich von 8-12 MPa angegeben wird, der momentanen Reibfläche  $A_R$ , der Reibhöhe der Zarge  $h_R$  sowie deren momentanem Anteil  $x$  mit ( $0 \leq x \leq 1$ ) zu

$$F_{N,ZB} = \mu \cdot p \cdot A_R = \mu \cdot p \cdot D_{ZB} \cdot \pi \cdot x \cdot h_R . \quad (2.8)$$

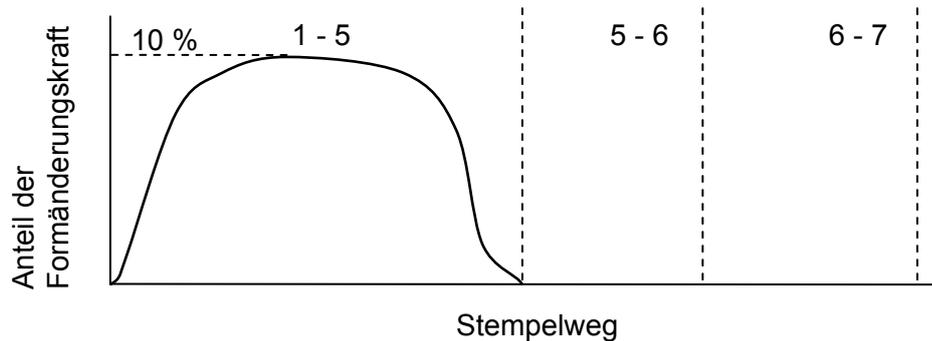
Mit der Annahme rein Coulomb'scher Reibung folgt für die Reibkraft in der Ziehbüchse

$$F_{R,ZB} = F_{N,ZB} \cdot \mu . \quad (2.9)$$

Die maximal erforderliche Ziehkraft ergibt sich nach Heinz und Tenzer durch Multiplikation mit einem empirischen Korrekturfaktor  $\gamma$ , der zwischen 1,2 und 1,8 gewählt wird. Heinz schildert in der Folge seine Beobachtungen zur Entwicklung der Reibkraft in Abhängigkeit der Stempelform. Bei Anwendung der theoretischen (parabolischen) Stempelform wird ein Kraftverlauf erreicht, der dem Verlauf der Berührungslänge proportional ist (Abbildung 15 b), Kurve 1). Wird eine konische Stempelform eingesetzt, entsteht während des Ein- und Ausfahrens ein parabolischer Verlauf bis das Material vollständig in die Ziehbüchse gezogen ist (Abbildung 15 b), Kurve 2). Bei hohen Temperaturen beschreibt Heinz eine starke Austrocknung, die zur Erhöhung des Reibwiderstandes führt und in der Reibkraftkurve einen Anstieg erzeugt, wie er in Abbildung 15 b), Kurve 3 gezeigt ist. Ansätze für die mathematische Berücksichtigung dieser Zusammenhänge werden nicht formuliert.

Für die Modellierung der Formänderungskraft wird bislang kein Zusammenhang vorgeschlagen. Scherer gibt durch die Untersuchung der Materialeigenschaften Biegesteifigkeit, Zugfestigkeit und Verdichtbarkeit erste Hinweise für die Zusammensetzung der Formänderungskraft. Er stellt fest, dass eine Erklärung der Formänderungen auf Basis der beim Umformen von Metallblech üblichen zerstörungsfreien Fließtheorie nicht möglich ist. Aus diesem Grund führt er Versuche mit stark geweitetem Ziehspalt durch, so dass eine geringe Reibung in der Ziehbüchse entsteht. Es entsteht eine Formänderungskurve, die

noch immer die Reibkraft unter dem Faltenhalter und die Reibkraft an der Einlaufkante enthält (Abbildung 16).



**Abbildung 16:** Verlauf der Formänderungskraft nach (Scherer, 1932)

Den Anteil der Formänderungsarbeit an der Gesamtarbeit benennt Scherer mit 6 bis 8 % und der Kraftanteil an der Gesamtziehkraft liegt bei ca. 10 %. Die Formänderungskraft ist im Bereich (1) bis (5) des Ziehkraftverlaufes nach Abbildung 14 wirksam. Eine umfangreiche Modellierung der Formänderungskraft und der gesamten Ziehkraft in Abhängigkeit der Prozessparameter wird durch Scherer und Heinz nicht angestrebt. Ziel der bisherigen Untersuchungen ist vielmehr, eine Grundlage für die Auslegung von Ziehpressen zu geben.

### 2.3.2 Thermodynamisches System

Für den Umformvorgang sind die thermodynamischen Eigenschaften des Kartons von Bedeutung. In Abschnitt 2.1.3 ist die Hygroskopizität als Grundeigenschaft des Materials beschrieben. Danach weist Karton bezogen auf die Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit einen spezifischen Gleichgewichtszustand auf. Bei Kontakt des Materials mit der Ziehbüchse beginnt ein Wärmeübergang auf den Karton. Das Gleichgewicht wird gestört und die Erhöhung der Materialtemperatur führt zur Ausbildung von Wasserdampf innerhalb der Kartonstruktur. Die hervorgerufene Trocknung des Materials ist ein wichtiger Wirkmechanismus innerhalb des Ziehprozesses (siehe auch Abschnitt 2.2.3.2).

Die Trocknung von Papier und Karton ist in zahlreichen wissenschaftlichen Veröffentlichungen thematisiert. Die Motivation für die Untersuchungen zum Trocknungsprozess kommt aus der Papierherstellung und der Erfassung der Vorgänge in Trockenpartien von Papiermaschinen. In der Trockenpartie werden über Anordnungen von Trockenzylindern ca. 85 % der für die Papierherstellung benötigten Energie aufgewendet um von 45 % Feuchte den finalen Feuchtegehalt von 5 bis 8 % zu erreichen. Aus diesem Grund werden seit ca. 1960 mathematische Modelle entwickelt, die als Grundlage für die Verbesserung der Trockenpartien dienen. Ziele sind dabei die Geschwindigkeitssteigerung, Prozesskontrolle und –steuerung und zunehmend die Verringerung des Energieverbrauches durch Effizienzsteigerung und Wärmerückgewinnung. Roonsprasang erarbeitet dazu ein Modell, bei dem die geometrischen Verhältnisse der Trockenpartie einbezogen werden und weist an einem Beispiel den Einfluss auf die Energieeffizienz bei der Trocknung nach (Roonsprasang, 2008). Er beschreibt dazu ausführlich den Stand der Kenntnisse bei der Modellierung des Trocknungsprozesses. Danach werden ab 1980 stabile Modelle entwickelt, mit denen die Verhältnisse bei der Trocknung auf Trockenzylindern zuverlässig simuliert werden können. Roonsprasang diskutiert in seiner Arbeit zahlreiche Modelle für die

thermodynamische Erfassung von Wärme- und Massetransfer und die Energiebilanzierung. Für den als eindimensional und instationär angenommenen Wärmedurchgang im Material beschreibt er die von (Nissan et al., 1960), (Nissan et al., 1961), (Soininen, 1995), (Wilhelmsson, 1995), (Nilsson, 2004a), (Nilsson, 2004b), (Karlsson et al., 2005a), (Karlsson et al., 2005b) und (Gaillemard, 2006) vorgestellten Arbeiten als erfolgreiche und zuverlässige Modelle. Roonsprasang entscheidet sich, das Modell von Wilhelmsson zu nutzen und erarbeitet ein Modell für die Trockenpartie der Papiermaschine unter Berücksichtigung der geometrischen Anordnung der Trockenzylinder. Er bilanziert die Trockenpartie und erzielt gute Übereinstimmung bei der Verifizierung seines Modells. Bei der Modellierung des Wärmedurchgangs gibt er in z-Richtung des Papiers in gleichen Abständen Punkte vor und löst den allgemeinen Zusammenhang der Wärmeleitung

$$\frac{\partial \vartheta_p}{\partial t} = \frac{k_p}{\rho_p \cdot C_{p,p}} \cdot \frac{\partial^2 \vartheta_p}{\partial z_p^2} \quad (2.10)$$

mit der Papiertemperatur  $\vartheta_p$ , der Zeit  $t$ , der Koordinate in radialer Richtung  $z_p$  und den Stoffwerten Wärmeleitkoeffizient  $k_p$ , Dichte  $\rho_p$  sowie spezifischer Wärmekapazität  $C_{p,p}$  numerisch. Mit der aktuellen Temperatur des jeweiligen Punktes im Papier  $\vartheta_{pa}$ , dem Massentransferkoeffizienten des Papiers  $K_{G,pa}$ , der Molmasse von Wasser  $M_W$ , dem Gesamtdruck  $P_{ges}$ , der Gaskonstante von Wasserdampf  $R_v$ , dem Partialdruck von Dampf im Papier  $p_{vp,0}$  und dem Partialdruck des abgegebenen Dampfes  $p_{va}$  bestimmt Roonsprasang über

$$\frac{\dot{m}_{ev}}{A} = \frac{K_{G,pa} \cdot M_W \cdot P_{ges}}{R_v \cdot \vartheta_{pa}} \cdot \ln \left( \frac{P_{ges} - p_{va}}{P_{ges} - p_{vp,0}} \right) \quad (2.11)$$

den Massenstrom des Wassers bezogen auf eine Flächeneinheit Papier  $A$ . In diesem Modell wird von einer Verdunstung an der Materialoberfläche ausgegangen. Der Trocknungszyklus von Papier und Karton lässt sich dabei in drei Phasen einteilen. In der ersten Phase wird das Material erwärmt. Dementsprechend steigen Materialtemperatur und Verdunstungsrate kontinuierlich an. Ist die eingebrachte Wärme ausreichend, um den Wärmebedarf für Verdunstung und Verluste zu decken, stellt sich eine konstante Verdunstungsrate ein. Zu diesem Zeitpunkt beginnt die zweite Phase. In dieser Phase ist die Diffusionsrate des Wassers durch das Material zur Oberfläche hin gleich der Verdunstungsrate an der Oberfläche. Bei einem spezifischen kritischen Feuchtegehalt wird die Diffusionsrate verringert, da zusätzliche Energie für den Massetransport des gebundenen Wassers erforderlich ist. Die dritte Phase wird nach Roonsprasang abhängig vom Material bei einem Feuchtegehalt von 10 bis 15 % erreicht. Für den Ziehprozess ist der Übergang von Phase zwei zu Phase drei und vor allem der Bereich abfallender Verdunstungsrate der Phase drei maßgeblich. In (Bos et al., 2006), (Niskanen, 1998) und (Roonsprasang, 2008) werden neben der Verdunstung an der Oberfläche und dem Massetransport des freien Wassers, Wechselwirkung sich ausbildender kapillarer Minisken mit dem in der Struktur entstehenden Wasserdampf angesprochen. Von diesen Wechselwirkungen ist der Massetransport des Wassers abhängig, sobald die Verdunstungsebene in das Material verschoben wird und keine reine Verdunstung an der Oberfläche mehr stattfindet. Roonsprasang und Niskanen stellen fest, dass die verursachenden physikalischen Mechanismen dieser

Wechselwirkungen bislang noch nicht ausreichend verstanden sind, um sie in einem mathematischen Modell abzubilden (Roonsprasang, 2008), (Niskanen, 1998).

### 2.3.3 Tribologie Karton – Metall

Die Bedeutung des Tribosystems von Papier- und Karton mit Metall wird aus den Ausführungen in Abschnitt 2.3.1 deutlich. In der Papiertechnik werden die Reibeigenschaften von Papier und Karton unter zwei Gesichtspunkten untersucht. Zum einen besteht das Ziel, die Reibung der Paarung Papier – Papier zu vergrößern, um das Verrutschen von Papierlagen oder bei der Distribution von Packungen zu verhindern bzw. entsprechende Maschinengängigkeiten in Druckmaschinen zu erreichen. Zum anderen wird bei verschiedenen Verarbeitungsprozessen von Papier und Karton, wie z. B. dem Riffeln, geringe Reibung angestrebt. Dementsprechend sind aus der Literatur Untersuchungen bekannt, in denen die Einflussfaktoren auf die Reibkoeffizienten thematisiert werden. Back fasst zusammen, dass die allgemein anerkannten vier Reibgesetze nach denen für gleiche Materialpaarungen gilt:

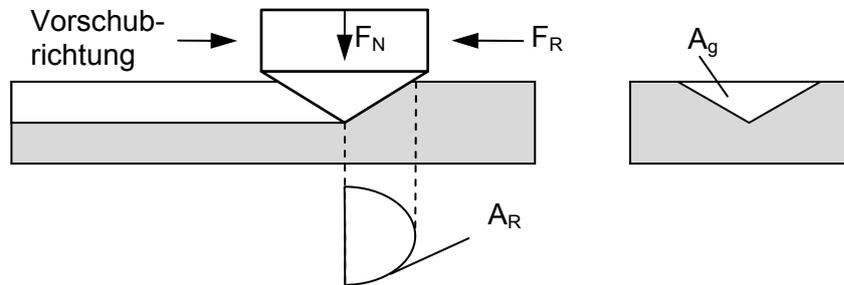
1. Die Reibkraft ist unabhängig von den geometrischen Abmessungen und der Kontaktfläche des Reibkörpers.
2. Die Reibkraft ist proportional zum Gewicht des Reibkörpers, was zusammen mit 1. nach (Amontons, 1699) zu dem empirischen Zusammenhang  $F_R = \mu \cdot F_N$  führt.
3. Die Reibkraft zwischen Körpern gleichen Materials ist nach (Coulomb, 1785) unabhängig von der Relativgeschwindigkeit im Bereich  $10^{-10}$  bis 1 m/s.
4. Die Reibkraft zwischen Körpern gleichen Materials, besonders zwischen Metallen, ist unabhängig von deren Oberflächenrauigkeit.

auf Papier nicht analog angewendet werden können (Back, 1991). Der Reibkoeffizient ist nach Back abhängig von einer Vielzahl Einflussfaktoren, die er in chemische Oberflächeneigenschaften und mechanische Materialeigenschaften einteilt. Dennoch lässt sich der empirische Zusammenhang der Reibung von Metallen

$$\mu = \frac{F_R}{F_N} = \frac{A_R \cdot F_{Sch}}{A_R \cdot p} = \frac{F_{Sch}}{p} \quad (2.12)$$

in dem die Kontaktfläche  $A_R$  eliminiert und der Reibkoeffizient  $\mu$  durch die Scherkraft  $F_{Sch}$  und den Druck  $p$ , der für eine plastische Deformation erforderlich ist, bestimmt wird, zunächst annähern. Bei der Reibung von Papier auf Stahl entsteht durch den hohen Härteunterschied ein „Pflügeeﬀekt“, wie er durch (Czichos, 1978) beschrieben wird. Dabei „pflügen“ die Oberflächenspitzen des harten Materials durch die Oberfläche des weichen Materials. Aus diesem Grund beschreibt (Back, 1991), dass die Oberflächenrauigkeit des Kartons geringen bis keinen Einfluss auf die Reibpaarung hat. Die Metalloberfläche dagegen hat nach seinen Experimenten Einfluss. Eine Vorkomprimierung und Glättung durch Kalandrieren verringert den Reibkoeffizienten nach (Wennerblom, 1988) und (Back et al., 1983), die das empirisch für den Haftreibungskoeffizienten nachweisen. Wiederholungsreibprüfungen über eine bestimmte Reibstrecke in (Bolling, 1964) und (Jones et al., 1967) zeigen eine Erhöhung der Materialglätte und eine Verringerung des Gleitreibungskoeffizienten schon bei der ersten Wiederholungsmessung und bestätigen die

Annahmen. Ein Modellansatz wird nicht vorgestellt. Durch die Komprimierung des Kartons in z-Richtung ist noch ein weiterer Effekt zu erwarten. Bei einem kegeligen Prüfkörper skizziert (Czichos, 1978) das Durchfurchen eines weichen Materials durch einen Prüfkörper (Abbildung 17).



**Abbildung 17:** Verhältnisse bei der Reibprüfung einer Materialpaarung aus hartem Prüfkörper und weichem Material nach (Czichos, 1978)

Unter Einbeziehung der beim Vorschub des Prüfkörpers realen Kontaktfläche  $A_R$ , der Kontaktfläche bei Eindringen des Prüfkörpers  $A_g$ , dem Pressdruck zum Erzeugen einer plastischen Verformung in der Blattebene  $p_{xy}$  und dem Pressdruck in z-Richtung  $p_z$ , wird aus Gleichung 2.12

$$\mu = \frac{A_g \cdot p_{xy}}{A_r \cdot p_z} \quad (2.13)$$

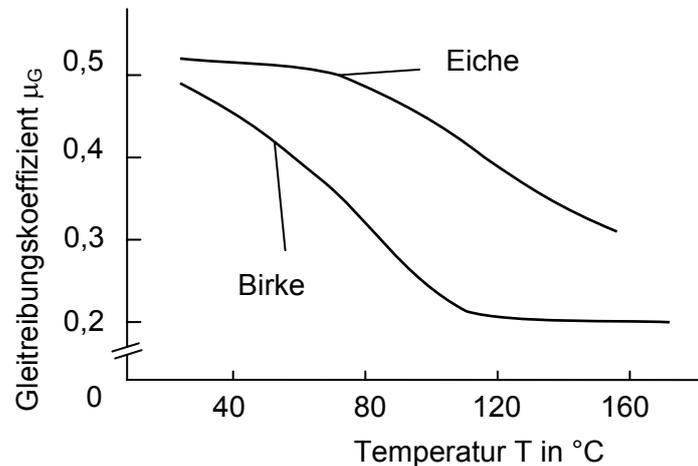
Die reale Kontaktfläche, von der die Reibung demnach abhängt, ist wesentlich geringer als die geometrisch berechnete Fläche, da sich die Reibpartner nur an den Rauigkeitsspitzen berühren. Schaffrath stellt für die Erfassung der realen Kontaktfläche ein Modell vor, in dem er die Kontaktstelle als Pyramidenstumpf annimmt (Schaffrath, 1993). Der Pressdruck wird durch (Niskanen, 1998) als geringer Einflussfaktor für die Reibung bezeichnet. Durch den verstärkten Pfurchungseffekt ist der Pressdruck dennoch zu beachten.

Baumgarten zeigt, dass für Karton beim Anfahren ein höherer Reibwiderstand auftritt, der auch bei der Reibung von Metallen bekannt ist (Baumgarten et al., 1979). Demnach sind Haft- und Gleitreibungszustand zu unterscheiden. Diese Ansätze lassen sich durch die Ausführungen von (Suh, 1981) ergänzen, der den Reibkoeffizienten wie (Back, 1991) in einen chemischen Anteil  $\mu_{\text{molekular}}$  und einen mechanischen Anteil  $\mu_{\text{mechanisch}}$  unterteilt. Beide Anteile ergeben in Summe den Reibkoeffizienten und haben für den jeweiligen Reibzustand verschiedenen Einfluss. Der mechanische Anteil des Reibkoeffizienten setzt sich nach (Suh, 1981) aus einem adhäsiven Anteil  $\mu_a$ , einem Deformationsanteil  $\mu_d$  aus elastischen und plastischen Deformationen, sowie einem Anteil aus Gegenkörperfurchung  $\mu_p$  zusammen.

Back bezeichnet die Reibpaarungen Papier-Papier und Papier-Metall als geschmierte Reibung. Dabei wirken die natürlichen Extraktstoffe aus den Holzfasern sowie Leime oder Chemikalien, die beim Streichen oder Drucken zugesetzt werden als Schmierstoffe. Daraufhin modelliert (Schaffrath, 1993) den Reibkraftverlauf für die Reibpaarung Papier-Papier an einem Beispiel unter Annahme einer elastoviskosen Schmierschicht. Die Deformationsreibung in der Schmierschicht beschreibt er mit Hilfe eines Maxwell Elementes

in Abhängigkeit des Schubmoduls und der Viskosität der Schmierschicht unter Annahme von Beispielwerten für den Haftreibungskoeffizienten  $\mu_H$  und den Gleitreibungskoeffizienten  $\mu_G$ .

Über diese Modellansätze hinaus sind eine Reihe empirischer Untersuchungen zu den weiteren Einflussfaktoren bekannt. Der Einfluss der Temperatur der Metalloberfläche wird durch (Back, 1991) und (Niskanen, 1998) empirisch beschrieben (Abbildung 18)



**Abbildung 18:** Gleitreibungskoeffizient in Abhängigkeit von der Temperatur der Metalloberfläche nach (Back, 1991)

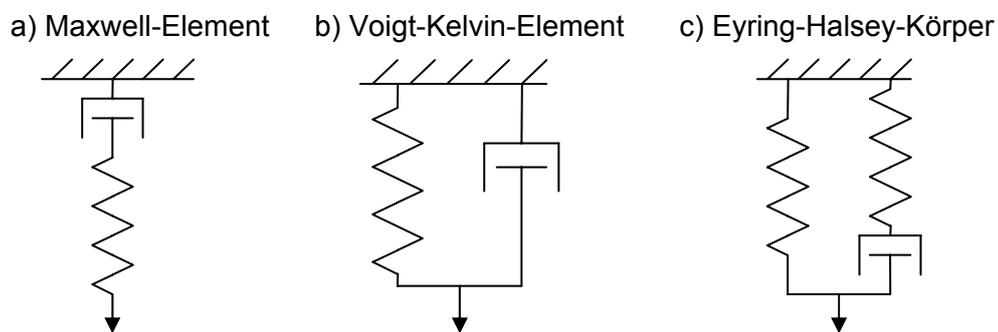
Danach wird der Reibwiderstand bereits bei 100°C annähernd halbiert. Eine gegensätzliche Wirkung wird durch (Klingelhöffer et al., 1961), (Inoue M., 1990), (Back, 1991), (McDonald et al., 1996), (Fellers et al., 1998) im Bezug auf den Einfluss der Materialfeuchte beschrieben. Back vermutet zudem einen Einfluss der Relativgeschwindigkeit der Reibpartner, wie er bei der Reibung von Kunststoffen z. B. durch (Czichos et al., 1984) beschrieben wird (Back, 1991). Dieser Zusammenhang ist auch aufgrund des Furchungseffektes im Zusammenhang mit dem viskoelastischen Verformungsverhalten des Materials zu erwarten.

Der Einfluss der Anisotropie von Papier und Karton auf das Reibverhalten wird in (Johansson et al., 1998) und (Fellers et al., 1998) untersucht. Ein verallgemeinerbarer Zusammenhang wird in diesen Arbeiten nicht gefunden. Signifikanten Einfluss haben dagegen die eingesetzten Materialkomponenten des Kartons. (Back, 1991) und (Withiam, 1991) beschreiben den Einfluss von Füllstoffen, die grundsätzlich den Reibkoeffizienten verringern. Die Wirkung ist abhängig von der Art der Füllstoffe, wobei Talkum die größte Wirkung aufweist. Innerhalb des Kartons sind die Füllstoffe unterschiedlich verteilt, so dass in diesem Zusammenhang die Zweiseitigkeit des Materials eine Rolle spielt. In (Klementsitz et al., 1972) wird nachgewiesen, dass die Art der Faser und deren Mahlgrad Einfluss auf den Reibkoeffizienten hat. Mit zunehmendem Mahlgrad wird der Reibkoeffizient verringert. Auch Hinweise auf die chemischen Einflüsse auf den Reibkoeffizienten werden in der Literatur gegeben. Nach den Untersuchungen von (Broughton et al., 1952), (Inoue M., 1990), (Gurnagul et al., 1992) und (Fellers et al., 1999) ist nicht allein die Oberflächenenergie als Einflussparameter benennbar. Es gilt als erwiesen, dass oleophile (fettige) Extraktstoffe die Reibung signifikant verringern. Leime und harzartige Substanzen dagegen erhöhen den Reibkoeffizienten. Mengenangaben und zuverlässige Aussagen zum Auftreten der Substanzen werden in der Literatur nicht gegeben.

### 2.3.4 Mechanische Eigenschaften von Papier- und Karton

#### 2.3.4.1 Beanspruchungen in der Blattebene

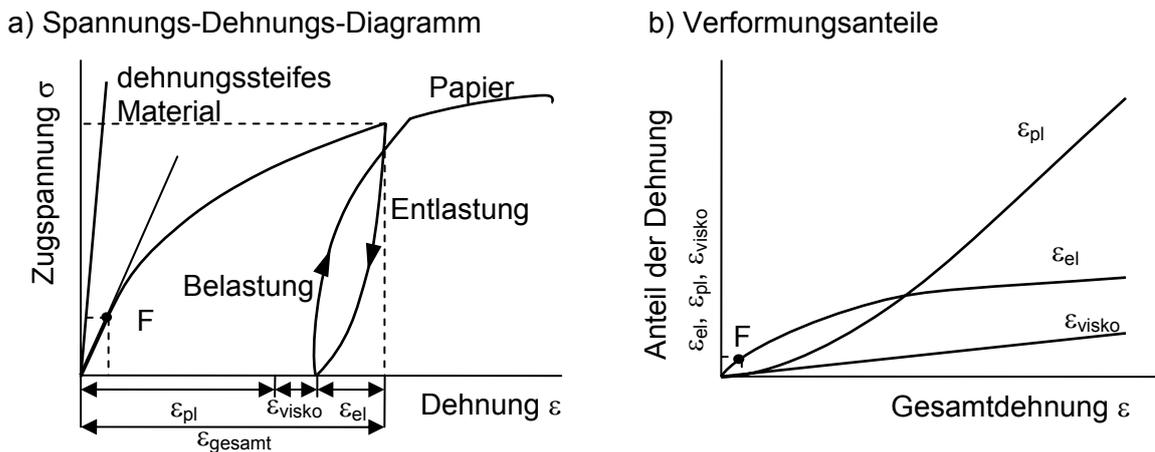
In der Papiertechnik werden Beanspruchungen grundsätzlich nach ihrer Wirkrichtung unterschieden. Zug und Stauchung sind demnach Beanspruchungen in der Blattebene (in-plane) und die Verdichtung durch Druck in z-Richtung oder die Spaltung der Lagen sind Beanspruchungen senkrecht zur Blattebene (out-of-plane). Die Modellierung beider Arten von Beanspruchungen setzt eine Modellierung des Materials voraus. Dazu sind verschiedene Ansätze bekannt. Steenberg beschreibt Papier als viskoelastischen Körper und stellt ein erstes makroskopisches Modell durch einen Eyring-Halsey-Körper vor, der aus zwei parallelen Federn und einem Dämpfer mit nichtlinearer Charakteristik besteht (Steenberg, 1947). Der Dämpfer ist in Reihe mit einer der beiden Federn geschaltet (Abbildung 19).



**Abbildung 19:** Modellelemente von Maxwell, Kelvin und Eyring-Halsey

Die Rechenwerte weichen nach (Paetow, 1991) noch von der Messung ab. Stockhausen und Arramon greifen diesen Ansatz auf und erreichen unter Nutzung von Kelvinelementen für geringe Belastungen gute Übereinstimmungen von Rechnung und Messung (Stockhausen, 1989), (Arramon et al., 2000). Ausgehend von linear elastischem Materialverhalten und der Berücksichtigung der Anisotropie werden von (Pecht et al., 1991), (Persson, 1991), (Paetow, et al. 1990a), (Paetow et al., 1990b) und (Paetow, 1991) weitere Materialmodelle für die Simulation von Zugbeanspruchungen vorgestellt. Auf die Einbeziehung der Anisotropie des Materials konzentrieren sich (Jones, 1968), (Mann et al., 1980) und (Mäkelä et al., 2003) und modellieren das Material als orthotropes Gebilde. Eine zweite, inzwischen ausgeprägtere Richtung für die Modellierung von Papier, ist die Betrachtung der Faserstruktur als mikroskopisches Netzwerk. Ausgehend von einer als linear elastisch angenommenen Einzelfaser und den Bindungseigenschaften zwischen den Fasern wird über statistische und stochastische Ansätze ein Fasernetz modelliert. Derartige Modelle werden in den Arbeiten von (Page, 1969), (Van Den Akker, 1970), (Perkins et al., 1991), (Deng et al., 1994), vorgestellt. Ein umfassender Überblick über den Stand der Wissenschaft bei der Modellierung von Papier als Fasernetzwerk bis 2002 wird in (Mark et al., 2002) gegeben. Durch (Ramasubramanian et al., 2007), (Ribeiro et al., 2007) sowie (Strömbro et al., 2008) werden die bestehenden Modelle aufgegriffen und weiterentwickelt. Voraussetzung für diese Modelle ist eine mikroskopische Untersuchung des Materials zur Bestimmung spezifischer Strukturmerkmale wie Fasergeometrie, Bindungsanzahl und Größe der Bindungsfläche zwischen den Fasern.

Den theoretischen Ansätzen gehen eine Reihe empirischer Untersuchungen voraus. Dokumentierte Einflussgrößen auf das Beanspruchungsverhalten in der Blattebene sind Zeit, Belastungsvorgeschichte, Beanspruchungsgeschwindigkeit, Feuchte, Temperatur sowie Anisotropie und Trocknungszugspannungen des Materials bei der Herstellung. Der Einfluss der Zeit im Sinne der Belastungsdauer äußert sich in der Abweichung des Beanspruchungsverhaltens von dem linearelastischer Materialien. Im Spannungs-Dehnungs-Diagramm in der Blattebene zeigt sich dieser Zeiteinfluss (Abbildung 20).



**Abbildung 20:** Rheologisches Verhalten von Papier und Karton unter Zugbeanspruchung nach (Brecht et al., 1971a) und (Paetow, 1991)

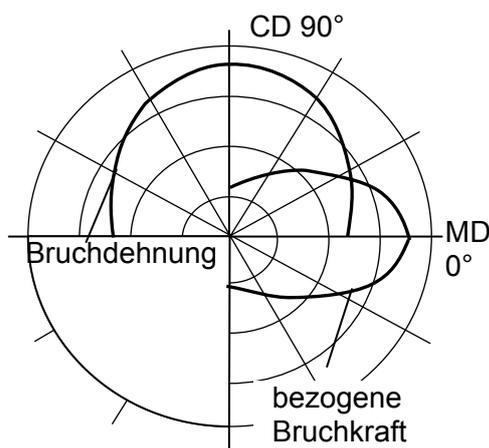
Nach (Brecht et al., 1971a) weist Papier zunächst einen geringen Bereich linear elastischen Materialverhaltens auf (Abbildung 20 a), Bereich 0-F. Der Punkt F wird als Fließpunkt bezeichnet. Wird das Material über diesen Punkt hinaus beansprucht, kommen zur elastischen Dehnung, ein plastischer und ein zeitabhängiger, viskoelastischer Anteil hinzu. Abbildung 20 b) zeigt qualitativ den charakteristischen Verlauf der drei Verformungsanteile an der Gesamtverformung. Zu Beginn der Verformung steigt der Anteil elastischer Verformung schnell und die plastische Verformung nur langsam. Im Verlauf dreht sich dieser Trend und die plastische Verformung steigt annähernd proportional mit der Gesamtverformung. Der viskoelastische Verformungsanteil steigt annähernd linear an. Die Ermittlung der einzelnen Anteile erfolgt über Zwischenentlastungen (siehe Abbildung 20 a) und die jeweilige Messung der spontanen und zeitbedingten Rückbildung sowie der bleibenden Verformung. Die Messungen von (Brecht et al., 1971a) zeigen den Einfluss der Belastungsgeschichte eines Papiers bzw. Kartons. Bei Wiederbeanspruchung „erinnert“ sich das Material an den vorherigen Spannungs-Dehnungszustand und hat diesen schnell wieder erreicht. Bei ausreichender Wiederholung von Belastungszyklen mit gleicher Last zeigt das Material ein rein elastisches Verhalten und wird als mechanisch konditioniert bezeichnet (Grossmann et al., 1993). Die Belastungszeit hat zudem Einfluss auf das Verhalten des Materials unter konstanter Last bzw. konstanter Dehnung. Nach (Brecht et al., 1959) stellt sich bei gleichbleibender Belastung ein Zustand ein, der als Kriechen bezeichnet wird. Das Material erfährt ohne Laststeigerung eine weitere Verformung. Mit fortlaufender Zeit nimmt die Verformung weiter zu und es kommt nach hinreichender Zeit zum Bruch des Materials. Eine konstante Dehnung führt dagegen zu einem Spannungsabfall, der als Relaxation bezeichnet wird.

Die Dehnungsgeschwindigkeit hat nach (Götsching, 1970) und (Brecht et al., 1971b) weiteren Einfluss auf das Beanspruchungsverhalten von Papier bzw. Karton. Danach weist das Material bei schneller Belastung eine höhere Bruchspannung aber geringere Bruchdehnung auf. Aus diesem Grund ist bei der Prüfung mechanischer Materialeigenschaften die Beanspruchungsgeschwindigkeit anzugeben.

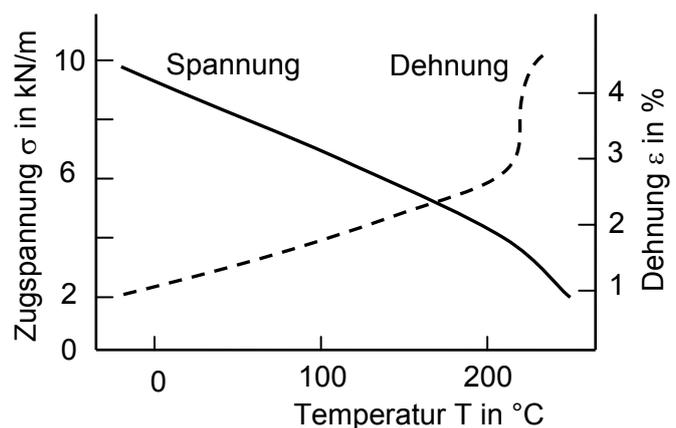
Die Untersuchung des Feuchteinflusses wird durch die Transportproblematik in Papiermaschinen bei frei tragendem Zug angeregt. Brecht untersucht initial nasse Papiere und zeigt einen deutlichen Anstieg der Festigkeit mit Verringerung der Feuchte im Material (Brecht et al., 1954). Es wird jedoch nicht die übliche Bruchstelle gefunden, sondern nach dem Kraftmaximum folgt ein exponentieller Kraftabfall, der auf aneinander vorbeigleitende Fasern zurückgeführt wird. Kubát zeigt den Einfluss der Luftfeuchte von 20 bis 100 % und damit der zugehörigen Gleichgewichtsfeuchte des Materials auf das Beanspruchungsverhalten (Kubát, 1969). Die Bruchfestigkeit wird in diesem Bereich annähernd halbiert, während die Bruchdehnung mit der Belastungsrichtung unterschiedlich stark ansteigt. Diese Ergebnisse werden durch die Untersuchungen von (Brecht et al., 1959) sowie (Salmén et al., 1985) bestätigt.

Die Untersuchung des Einflusses der Temperatur im Material ist nur schwer vom Einfluss der Feuchteentwicklung zu trennen. Aus diesem Grund stellt (Salmén et al., 1977) eine Vorrichtung vor, mit der eine Probe vollständig getrocknet und anschließend durch Beanspruchung in Öl mit definierter Temperatur geprüft wird. Salmén und Back weisen nach, dass das Öl vernachlässigbaren Einfluss auf das mechanische Verhalten der Probe hat. Für ein Wellenpapier wird ein annähernd linearer Abfall der Bruchfestigkeit bei gleichzeitigem Anstieg der Bruchdehnung bis 200 °C aufgezeigt (Abbildung 21 b).

a) Anisotropie von Bruchdehnung und Bruchfestigkeit



b) Temperaturabhängigkeit von Spannung und Dehnung bei Wellenpapier



**Abbildung 21:** Verlauf von Bruchfestigkeit und Bruchdehnung in Polarkoordinaten nach (Steenberg, 1947) und Temperaturabhängigkeit von Spannung und Dehnung nach (Salmén et al., 1977)

Oberhalb 200 °C wird diese Tendenz wesentlich verstärkt. Als Ursache benennen Samén und Back den Glasübergang von Materialkomponenten, wodurch die Messmethode zur Bestimmung der Glasübergangstemperatur von Papier empfohlen wird.

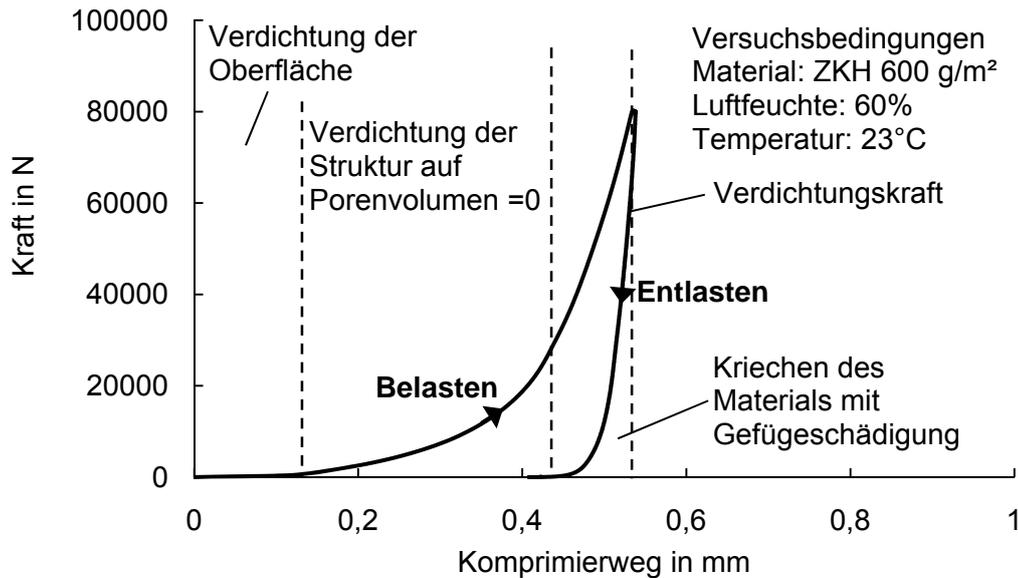
Die Abhängigkeit von Bruchfestigkeit und Bruchdehnung von der Anisotropie des Materials wird durch (Steenberg, 1947) aufgezeigt. Mit der Änderung der Beanspruchungsrichtung zur Faserlängsrichtung sinkt die Bruchfestigkeit bzw. steigt die Bruchdehnung. In Polarkoordinaten über dem Winkel bezogen auf die Maschinenlaufrichtung (MD) aufgetragen, stellt sich der Zusammenhang an einem Industrierpapier annähernd als linearer Übergang dar (Abbildung 21 a).

Die bislang beschriebenen Wirkungen beziehen sich auf den einachsigen Spannungszustand. Dieser liegt jedoch im Normalfall nicht vor. Karton weist ähnlich wie Metalle oder Kunststoffe parallel zur Längsdehnung eine Querdehnung auf, die durch die Poissonzahl (Querkontraktionszahl) beschrieben wird. Von dem Ansatz der Volumenkonstanz kann jedoch nicht ausgegangen werden. Thematisiert wird die Querdehnung in (Brecht et al., 1963), (Öhrn, 1965), (Baumgarten et al., 1973), (Paetow et al., 1990c), (Paetow, 1991). Nach diesen empirischen Untersuchungen wird die Breite und Dicke der Probe mit zunehmender Längsdehnung verringert. Die Poissonzahlen liegen nach (Brecht et al., 1963) zwischen 0,1 und 0,4. Durch abnehmenden Mahlgrad des Faserstoffes, zunehmende Trocknungsbehinderung bei der Herstellung und steigende Feuchte im Material nimmt die Querkontraktion und damit die Poissonzahl zu. Es werden jedoch zu Beginn der Beanspruchung negative Querdehnungen durch Verbreiterung des Materials besonders in z-Richtung beschrieben. Nach (Grossmann et al., 1993) sind die Ursachen für dieses Phänomen und damit auch die physikalischen Zusammenhänge bei der Querkontraktion nicht vollständig geklärt.

Die entgegengesetzt gerichtete Belastung zur Zugbelastung ist die Kompression in der Blattebene, die in der vorliegenden Arbeit als Stauchung bezeichnet wird. Die Spannungs-Dehnungs-Kurve weist nach (Grossmann et al., 1993) bis zum Bruch eine annähernd deckungsgleiche Charakteristik auf wie bei Zugbeanspruchung. Die Werte der Bruchspannung und Bruchdehnung sind jedoch um den Faktor 2 bis 3 geringer, was mit einem unterschiedlichen Bruchmechanismus begründet wird. Der Bruchmechanismus wird als instabiler Bruch beschrieben, der zu einem delaminierenden Kollaps der Materialstruktur führt. Die Einflüsse von Temperatur und Feuchtigkeit auf die Festigkeit sind analog denen bei Zugbeanspruchung. Von (El-Hosseiny 1998) wird darüber hinaus ein linearer Zusammenhang zwischen der Schrumpfung während des Trocknens und dem Stauchwiderstand beschrieben.

### **2.3.4.2 Kompression in z-Richtung**

Für den Ziehprozess wird neben den Beanspruchungen in Blattebene die Kompression des Materials orthogonal zur Blattebene von Bedeutung. Untersuchungen von (Klingelhöffer, 1958), (Brecht et al., 1963), (Schädler, 1963), (Jackson et al., 1964), (Algar, 1966), (Wink et al., 1967), (Fellers, 1980), (Osaki et al., 1980) und (Großmann et al., 1985) zeigen die fundamentalen Zusammenhänge bei der Kompression in z-Richtung. Danach erfolgt zu Beginn der Beanspruchung eine hohe Verformung bei geringer Kraft. Im weiteren Verlauf der Verformung dagegen entsteht eine stark ansteigende Kurve (Abbildung 22).



**Abbildung 22:** Kraft-Verformungs-Verlauf bei der Kompression in z-Richtung am Beispiel des Ziehkartons MM ZKH mit 510 g/m<sup>2</sup>

Ähnlich wie bei Beanspruchungen in Blattebene verhält sich das Material viskoelastisch. Brecht ermittelt an Papieren eine zeitabhängige Verformung unter konstanter Belastung und ein zeitabhängiges Rückschwelligsverhalten (Brecht et al., 1963). Das Verhalten des Materials unter Kompression lässt sich nach (Großmann, 1994) mit der Ausgangsdicke des Materials  $d_a$  und der Dicke im komprimierten Zustand  $d_k$  durch die relative Kompressibilität

$$\kappa = \frac{d_a - d_k}{d_a} \cdot 100\% \quad (2.14)$$

und die relative Rückschwelligung

$$R = \frac{d_r - d_k}{d_a - d_k} \cdot 100\% \quad (2.15)$$

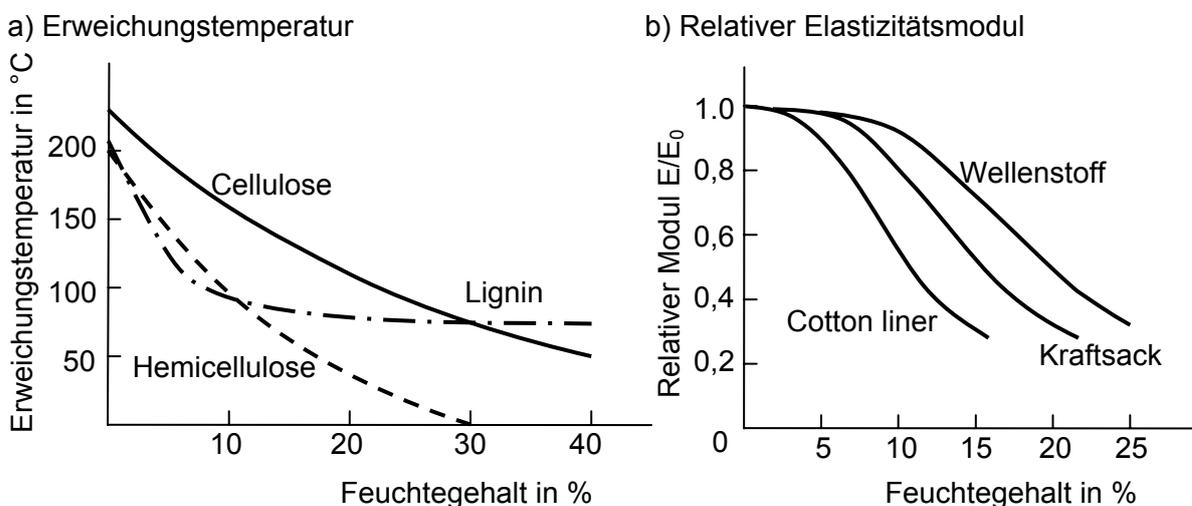
mit der Dicke nach der Rückschwelligung  $d_r$  beschreiben. Nach (Scherer, 1932) und (Klingelhöffer, 1958) wird durch die Komprimierung eine Faserschädigung verursacht. Großmann findet, dass eine signifikante Faserschädigung erst nach einer Komprimierung auf Porenvolumen Null entsteht (Großmann, 1985). Die zerstörungsfreie Verdichtung bis zum Bruch lässt sich daher in zwei Phasen unterteilen. Zunächst erfolgt eine Verdichtung der Oberfläche, die nach (Schaffrath et al., 1991) und (Schaffrath, 1993) vorrangig von der Oberflächenrauigkeit des Materials abhängt. Nach Verformung der Oberfläche wird das Gefüge durch Verringerung des Porenvolumens verdichtet. Dabei werden Fasern und Hilfsstoffe bis zu einem porenfreien Zustand zusammengedrückt.

Die Kompression in z-Richtung wird aufgrund des Einflusses dieser Beanspruchung auf eine Vielzahl von Prozessen der Papierverarbeitung wie Kalandrieren, Wickeln, Satinieren, Drucken, Prägen aber auch Schneiden untersucht. Durch (Chapman et al., 1969) und (Haglung et al., 1974) werden die Grundlagen des Kalandrierprozesses beschrieben. Crologino stellt unter Einbeziehung von Temperatur, Feuchte, Linienkraft und Walzengeometrie ein Regressionsmodell mit empirisch ermittelten Koeffizienten vor

(Crotofino, 1984). Ein ähnliches empirisches Regressionsmodell erarbeitet (Hartmann, 1994) für den Prägeprozess mit Termen für Temperatur, Druckspannung, Zeit und Rückschwellung.

Ein analytischer Modellansatz für die Beschreibung des Kompressionsverhaltens in z-Richtung wird erstmals durch (Pfeiffer, 1966) mit dem Ansatz einer Exponentialfunktion vorgestellt. Weitere Modelle werden in der Folge durch (Colley et al., 1972), (Liew, 1973) und (Liew, 1974), (Habeger et al., 1983), (Pfeiffer, 1990), (Schaffrath et al., 1992), (Schaffrath, 1993), (Hofer, 2000), (Urbanik, 2002) und (Stenberg, 2003) erarbeitet. Auf der Grundlage konstanter Temperatur und Feuchtebedingungen werden gute Übereinstimmungen zwischen Messung und Rechnung erreicht.

Der Einfluss der Temperatur auf die Eigenschaften bei der Komprimierung wird in der Literatur im Zusammenhang mit der Untersuchung des Riffel- und Prägeprozesses durch (Otto, 1978), (Höke et al., 1982), (Höke, 1984) und (Hartmann, 1994) auf die Erweichung der Komponenten Lignin, Hemicellulose bzw. Cellulose im Sinne eines Glasüberganges zurückgeführt. Zu diesem Glasübergang liefern (Gohring, 1963), (Back et al., 1967), (Salmén et al., 1980) und (Salmén et al., 1985) empirische Zusammenhänge. Die Feuchte steht nach (Gohring, 1963) in Wechselwirkung mit der Temperatur. Mit höherer Feuchte verringert sich die Erweichungstemperatur signifikant (Abbildung 23 a). Eine deutliche Verringerung des relativen Elastizitätsmoduls bei steigender Feuchte weist darüber hinaus (Salmén et al., 1985) nach (Abbildung 23 b).



**Abbildung 23:** Abhängigkeit von Erweichungstemperatur und relativem Elastizitätsmodul von der Feuchte nach (Gohring, 1963) und (Salmén et al., 1985)

### 2.3.4.3 Biegung

Die Biegung um eine gerade verlaufende Biegelinie ist in der Verarbeitung von Papier, Karton und Pappe eine häufige Beanspruchung. Nach (Tenzer et al., 1982), (Tenzer, 1975) und (Tenzer, 1989) entsteht bei der Biegung eines Kartons um eine Kante bzw. einen Radius ein charakteristischer Verlauf der Biegekraft in Abhängigkeit des Biegewinkels. Die Biegekraft steigt bis zu einem Biegewinkel von 10 bis 15 ° annähernd linear an. In diesem Bereich gilt linear elastisches Materialverhalten nach Hooke. Bei höheren Biegewinkeln entsteht zunächst ein Übergangsbereich in dem zunehmend Schubbeanspruchungen

wirken. Die Kraft steigt bis zum Kraftmaximum, an dem eine Gefügeschädigung einsetzt. Die Schädigung setzt sich je nach Materialaufbau aus Rissen an der Zugseite und Delaminieren der Lagen mit einsetzendem Auswölben des Materials auf der Druckseite zusammen. Nach dem Bruch erfolgt ein fortlaufendes Delaminieren des Materials. Dafür ist eine geringere Kraft erforderlich, so dass die Kraft leicht abfallend verläuft. Die Wölbung und die elastischen Verformungen erzeugen eine Rückstellneigung des Materials, die durch den Rückstellwinkel wiedergegeben wird. Durch Risse auf der Zugseite wird die Rückstellneigung verringert.

Das Biegeverhalten des Materials wird in der Literatur im Zusammenhang mit der Herstellung und Anwendung von Faltschachteln z. B. in (Buchanan et al., 1964), (Buchanan, 1968), (Angerhöfer, 1999) und (Güzelarlan, 2003) thematisiert. Bei der Stauchung von Faltschachteln durch die Gewichtskraft gestapelter Packungen entsteht bei Überschreiten der Biegesteifigkeit  $S$  ein instabiles Ausweichen durch plastische Biegung des Materials. Für die mechanische Stabilität von Faltschachteln ist demnach die Biegesteifigkeit im elastischen Bereich das entscheidende Qualitätskriterium. Der elastische Bereich der Biegesteifigkeit  $S$  lässt sich nach (Tenzer, 1989) mit dem Elastizitätsmodul bei Biegung  $E_b$ , dem Flächenträgheitsmoment des beanspruchten Querschnittes  $I$  vereinfacht beschreiben. Für einen Rechteckquerschnitt mit der Materialdicke  $s$  und der Breite  $b$  des Materials berechnet sich die Biegesteifigkeit  $S$  nach

$$S = E_b \cdot I = E_b \cdot \frac{s^3 \cdot b}{12} \quad (2.16)$$

Carlsson stellt einen detaillierteren Ansatz vor, in dem die Wirkung einer gleichzeitigen Biegung in einer zweiten Richtung orthogonal zur ersten Biegelinie berücksichtigt wird (Carlsson et al., 1980). Diese mehrdimensionale Biegung wird als Folge der erzeugten Querkontraktion des Materials während der Beanspruchung beschrieben. Durch dieses Modell wird nach Carlsson und Fellers eine ca. 5 % bessere Übereinstimmung mit der Messung erreicht. Der Einfluss des Lagenaufbaus des Materials auf die Biegesteifigkeit wird durch (Luey, 1963), (Carlsson et al., 1980) und (Borschke, 2001) beschrieben. Danach lassen sich die Lageneigenschaften durch die Charakterisierung von Querschnittsfläche und E-Modul der jeweiligen Einzellage und deren Abstand zur neutralen Faser in die Modellierung einbeziehen. Die Anisotropie des Materials hat für die Biegesteifigkeit nach (Angerhöfer, 1999) ähnlichen Einfluss wie bei Beanspruchungen in Blattebene.

Der Übergangsbereich und der plastische Bereich werden bei der Vorbereitung von Biegestellen für Faltschachteln untersucht. Die Biegestelle wird durch unterschiedliche Verfahren wie Ritzen, Perforieren und Rillen definiert vorgeschwächt, um den Bruch der Zugseite und eine Delaminierung der Lagen sowie Wölbung auf der Druckseite weitgehend zu vermeiden. Das am weitesten verbreitete Verfahren ist das Rillen, da es eine zerstörungsfreie Vorschwächung ermöglicht. Die Wirkung und Auslegung der Rillung wird in zahlreichen Arbeiten wie (Hine, 1969), (Emslie et al., 1967), (Hohmann et al., 1974), (Grebe et al., 1977), (Falkenhagen et al., 1981), (Großmann, 1985) und (Nagasawa et al., 2003) untersucht. Dabei steht die Bestimmung und Vorhersage der geometrischen Parameter der Rillung abhängig von den Materialeigenschaften im Vordergrund, die zu einem optimalen Aussehen der Biege- und Fallstellen führt. Gleichzeitig wird für Aufrichtvorgänge mit der Rillung eine definierte Rückstellspannung angestrebt, um ein prozesssicheres Öffnen der vorgefalteten Aufrichtzuschnitte zu sichern. Angeregt durch

Beschädigungen von Schichten auf der Zugseite erarbeiten (Barbier et al., 2005a), (Barbier et al., 2005b) und (Barbier et al., 2006) ein Modell, mit dem ein Faltvorgang von kunststoffbeschichtetem Karton um eine gerade Faltkante bis zu einem Biegewinkel von 120 ° unter Berücksichtigung dynamischer Effekte abgebildet wird.

### 2.3.5 Zusammenfassung

Die Beschreibung des Ziehprozesses wird nach ersten Untersuchungen und Ersatzversuchen in (Scherer, 1932), (Heinz, 1966) und (Heinz, 1967) nicht weiterverfolgt. Die theoretischen Ansätze konzentrieren sich auf die Berechnung des Konizitätswinkels und des Ziehspaltes. Eine Einbeziehung der unterschiedlichen Formänderungen des Materials erfolgt nicht, da die Reibkräfte als überwiegender Einfluss gesehen werden. Die Eigenschaften des Materials unter mechanischer Beanspruchung sind zu diesem Zeitpunkt kaum beschrieben und Messsysteme lassen eine derartige Untersuchung nur bedingt zu.

Für das rheologische Materialverhalten von Karton werden für Einzelbeanspruchungen Modelle vorgestellt, die für die jeweils gewählten Materialien und Geltungsbedingungen dem realen Verhalten nahe kommen. Für eine komplexe Kombination der Einzelbeanspruchungen sind diese Modelle nicht direkt nutzbar, da der Einfluss von Temperatur und Feuchte als dynamische Größen nicht berücksichtigt wird. Zusätzlich gehen beim Ziehprozess verschiedene Beanspruchungszustände ineinander über. Die rheologischen Eigenschaften des Materials sind von der Belastungsvorgeschichte abhängig, so dass mehrere Modelle durch Schnittstellen verbunden werden müssen.

Die Modellvorstellungen von Karton konzentrieren sich zunehmend auf die Abbildung der Materialstruktur im mikroskopischen Maßstab. Die dazu erforderlichen strukturellen Eigenschaften des Fasernetzwerkes wie z. B. Bindungsstärke oder Bindungsfläche sind bislang physikalisch nicht vollständig geklärt.

Für die Beschreibung des Bruchmechanismus an den Falten ist bislang kein Modellansatz bekannt. Eine Ersatzprüfmethode des Stauchverhaltens unter Komprimierung sowie unter Temperatureinfluss wird nicht beschrieben.

Die Ansätze der Simulation des thermodynamischen Systems bei der Papiertrocknung sind als Basis für eine Anpassung an die Verhältnisse im Ziehprozess geeignet. Es bestehen jedoch wesentliche Unterschiede, die eine direkte Nutzung verhindern. Im Ziehprozess ist keine freie Oberfläche für die Abgabe von Dampf an die Umgebung vorhanden und die Temperatureinbringung ändert sich dynamisch im Prozessverlauf. Es ist zu klären wie sich Wärmeübergang und -leitung bei Dampfbildung im Material und ein spätere Abgabe des Dampfes auswirken. Außerdem ist zu ermitteln wann dieser Effekt auftritt. Zudem ist der Einfluss unterschiedlicher Komprimierungszustände auf Wärmeübergang und Wärmeleitung nicht bekannt.

Die Ansätze zur Modellierung des Tribosystems Karton-Stahl sind bedingt geeignet für die Nutzung bei der Abbildung des Ziehprozesses. Der Einfluss von Temperatur, Feuchte und gleichzeitig der Komprimierung ändern das Tribosystem durch Oberflächenverformung. Es ist nicht geklärt in wie weit die Voraussetzung geschmierter Reibung unter diesen Bedingungen zutrifft. Zusätzlich sind Änderungen von Oberflächenspannung und Adhäsionsverhalten unbekannt.

### 3 Zielsetzung der Arbeit und Vorgehensweise

Der Stand der Technik im Bereich der Ziehmaschinen zeigt, dass bislang funktionsintegrierte Maschinen mit zentralem Antriebssystem verwendet werden. Die Einflussnahme auf den Prozess beschränkt sich auf die Änderung des Ziehspaltes und der Temperatur der Ziehbüchse. Die Informationsgewinnung aus dem Prozess wird durch die Kopplung der Bewegungen der Arbeitsorgane und den Einsatz ungleichförmig übersetzender Mechanismen erschwert. Es sind wenige wissenschaftliche Arbeiten zu den Prozesszusammenhängen beim Ziehen von Karton bekannt, die 1932 bis 1967 erarbeitet wurden und daher die aktuellen technischen und wissenschaftlichen Werkzeuge nicht berücksichtigen (siehe Abschnitt 2.2.3). Die vorgestellten Untersuchungen benennen phänomenologisch mögliche Einflussgrößen. Die Bewertung der Ergebnisse erfolgt subjektiv, so dass keine belastbaren Aussagen erarbeitet werden. Aufgrund dieses geringen Standes gesicherter Kenntnisse und die bislang ungenutzten Möglichkeiten weiterentwickelter Materialien, Antriebstechnik und Messtechnik entstehen Verbesserungspotentiale hinsichtlich Qualität der Formteile, Formgestaltung und Umformgrad.

Das zentrale Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, durch die empirische und theoretische Beschreibung des Ziehprozesses von Karton die maßgeblichen Wirkmechanismen und Korrelationen zwischen der Qualität der Formteile und den technologischen Einflussgrößen zu ermitteln und damit den Einfluss der zahlreichen Größen qualitativ und quantitativ zu beurteilen. Die Nutzung dieser Zusammenhänge in der Praxis setzt voraus, dass eine messbare Größe als Werkzeug für die Nachverfolgung der Qualitätsänderungen identifiziert wird, die eine charakteristische Veränderung mit der Qualität der Formteile aufweist. Das Zusammenspiel der Formänderungen Stauchung, Biegung, Zug und Komprimierung im Karton lässt eine charakteristische Änderung des Verlaufes der Kraft am Stempel erwarten. Die einzelnen Formänderungen nach Abschnitt 2.3 erfahren jeweils mit den im Prozess maßgeblichen Parametern Temperatur und Feuchte wesentliche Änderungen.

Im Vorfeld der Arbeit ist kein Versuchsträger bekannt, der für das Ziehen von Karton ausgerüstet ist und die Ziehmaschinen sind für die wissenschaftliche Versuchsdurchführung ungeeignet. Daraus leitet sich das Teilziel ab, als Grundlage der wissenschaftlichen Untersuchung, einen Versuchsträger zu entwickeln, der eine Variation aller potentiellen Einflussgrößen mit ausreichender Variationsbreite ermöglicht und zusätzlich eine umfangreiche Informationsgewinnung gewährleistet. Es ist zu erwarten, dass der Einsatz eines dezentralen Antriebssystems und die damit verbundene Entkopplung der Arbeitsorgane eine Verbesserung der Einflussnahme auf den Ziehprozess sowie die getrennte Messung prozessrelevanter Größen zulässt.

Durch die Dezentralisierung des Antriebssystems wird der Einsatz einer definierten Faltenhalterkraft von Beginn des Umformens an als neuer technologischer Ansatz im Ziehprozess von Karton ermöglicht. Beim Tiefziehen von Metallblech ist die Faltenhalterkraft das maßgebliche Werkzeug zur Beeinflussung des Materialverhaltens und bewirkt eine Erweiterung der Prozessgrenzen (siehe Abschnitt 2.2.2). Die Nutzung dieses modifizierten Prozessansatzes beim Ziehen von Karton lässt eine Verbesserung der Ziehteilqualität erwarten und wird für den Versuchsträger vorgesehen. In bisherigen wissenschaftlichen

Untersuchungen zum Ziehen von Karton werden nach Abschnitt 2.2.3 zudem Komprimierung sowie Temperatur und Feuchte als wesentliche Einflussgrößen benannt. Für eine gezielte Einstellung von Ziehspalt und eingebrachter Wärmeenergiemenge, sowie der Richtung des Massestroms Wasser im hygroskopischen Karton ist eine Entkopplung beider Größen durch die unabhängige Regelung von Stempel und Ziehbüchsentemperatur notwendig.

Für die Identifizierung, Bewertung und Quantifizierung des Einflusses der prozessrelevanten Größen ist eine Bewertungsstrategie für die Qualität der Formteile als Verarbeitungsergebnis Voraussetzung. In bisherigen Arbeiten werden Defekte wie Risse und Schwärzungen beobachtet und subjektiv beurteilt. Daher ist es ein Teilziel, auf Basis definierter Messgrößen eine Grundlage für die Bewertung der Qualität von Formteilen zu erarbeiten. Gleichzeitig werden für den Vergleich der Formteilqualität mit dem Kraftverlauf am Stempel charakteristische Werte bestimmt, mit dem die wesentlichen Änderungen dieses Verlaufes beschrieben werden können.

Mit diesen Voraussetzungen wird eine systematische experimentelle Untersuchung des Ziehprozesses durchgeführt, durch die sich Rückschlüsse auf die physikalischen Zusammenhänge sowie eine verbesserte Formteilqualität ableiten lassen. Die Einbeziehung aller potentiellen Einflussgrößen des Ziehprozesses erzeugt einen zu umfangreichen Versuchsraum. Aus diesem Grund wird durch Voruntersuchungen eine Auswahl der maßgeblichen Prozessparameter bestimmt. Mit den gewählten Parametern wird eine vollfaktorielle Variation durchgeführt. Für jede Kenngröße der Formteilqualität und des Kraftverlaufes am Stempel wird mit statistischen Methoden ein Regressionspolynom innerhalb des Versuchsraumes berechnet. Der Vergleich der Regressionskoeffizienten ermöglicht dann die Bewertung des Einflusses der Parameter auf die jeweilige Kenngröße der Formteilqualität sowie den Rückschluss auf den Verlauf der Stempelpkraft.

Eine optimale Voraussetzung für die gezielte Prozessführung ist ein analytisches Modell mit dem entsprechende Parameterkonstellationen und die zugehörige Qualität der Formteile simuliert werden können. Im Gegensatz zu Materialien wie Metall oder Kunststoff ist der Kenntnisstand für die Beschreibung von Karton vergleichsweise gering und es hat sich keine Materialtheorie durchgesetzt mit der ein vergleichbar komplexes Systemverhalten hinreichend genau beschrieben werden kann. Innerhalb des Ziehprozesses wirken mehrere physikalische Systeme zusammen, die in anderen Anwendungen eigenständige Forschungsschwerpunkte sind und deren Beschreibung noch nicht ausreichend gelingt. Es treten mechanische Beanspruchungen in Wechselwirkung mit einem thermodynamischen und tribologischen System des hygroskopischen Materials Karton. Dennoch ist es ein Ziel der vorliegenden Arbeit einen ersten Modellansatz aufzuzeigen, der die Wirkungen des Prozesses grundlegend abbildet und als Basis für weitere Untersuchungen die fehlenden Grundlagen zur hinreichenden Beschreibung des Ziehprozesses aufzeigt. Eine Voraussetzung dafür ist, dass der Prozess weitgehend vom Systemverhalten des Versuchsträgers und des Antriebssystems entkoppelt wird. Die Verifikation erfolgt mit Hilfe der definierten Kenngrößen des Kraftverlaufes.

Mit den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen und der Modellierung wird eine gezielte Prozessführung bezogen auf die Qualität der Formteile erreicht. Durch die technologischen Modifikationen und deren Einsatz in Ziehmaschinen ist eine Verbesserung der Formteilqualität sowie eine Erweiterung der geometrischen Grenzen der Formteile zu erwarten. Ein Rückschluss zwischen Kenngrößen des Kraftverlaufes am Stempel und den

Qualitätskenngrößen ist als Ansatz für die Prozessüberwachung zu betrachten und lässt die Entwicklung von Reaktionsstrategien zur aufwandsminimierten Verbesserung der Formteilqualität zu. Die Abbildung der wesentlichen Wirkmechanismen in einem ersten Modell trägt zur Klärung des komplexen Zusammenwirkens der physikalischen Systeme bei und ist Ansatz für eine Weiterentwicklung des Prozessmodells auf mikromechanischer Ebene. Durch ein derartiges Prozessmodell ist eine durchgängige Simulation vom Prozess bis zum Antrieb möglich und lässt die Vorherbestimmung der Formteilqualität in Abhängigkeit materialspezifischer, antriebstechnischer und technologischer Größen zu.

## **4 Entwicklung eines flexiblen Versuchsträgers zum Ziehen von Karton**

### **4.1 Zielsetzung und Anforderungen an den Versuchsträger**

#### **4.1.1 Zielsetzung**

Wissenschaftliche Untersuchungen zum Ziehprozess von Karton wurden bislang an Standardpressen durchgeführt (Abschnitt 2.2.3.3) und haben gezeigt, dass die dabei genutzte Werkzeug- und Antriebstechnik für eine detaillierte wissenschaftliche Analyse der physikalischen Wirkungen der Formänderungen und Reibungen sowie deren Zusammenspiel im Prozess nicht geeignet sind. Gleichzeitig sind empirische Untersuchungen an Ziehmaschinen nicht zielführend, da eine funktionsbedingte Verknüpfung der Arbeitsorganbewegungen besteht und keine Prozessreaktionsgrößen (Faltenhalterkraftverlauf, Stempelkraftverlauf) erfasst werden. Die Entwicklung eines Versuchsträgers und die damit einhergehende Bestimmung von gezielten Anforderungen ist daher als erster wichtiger Schritt für die Untersuchung des Umformprozesses Ziehen von Papier und Karton zu betrachten.

Das Ziel die Flexibilität des Ziehprozesses beurteilen und entsprechende Formen und Formate mit unterschiedlichen Qualitäten und Geschwindigkeiten herstellen zu können, erfordert die Einbeziehung der möglichen Prozessablaufvarianten des Ziehprozesses (siehe Abschnitt 2.2.3.1, Abbildung 9). Dementsprechend ist eine Modifizierung des Verarbeitungssystems gegenüber den in der Praxis eingesetzten Systemen erforderlich. Für die direkt im Eingriff mit dem Karton befindlichen Arbeitsorgane bzw. deren Funktionsflächen lassen sich dagegen die Erfahrungen mit Arbeitsorgane von Ziehmaschinen in der Praxis nutzen. Neben den Prozessablaufvarianten ist im Sinne der Flexibilität die aufwandsarme Austauschbarkeit der Arbeitsorgane für die Umstellung von Formen und Formaten der Formteile zu gewährleisten.

Wie sich in der Praxis erwiesen hat, ist der Weg zur flexiblen Maschine häufig mit der Umstellung eines zentralen auf ein dezentrales Antriebssystem verbunden. Der Grund dafür ist die Möglichkeit auf die Einzelantriebe und damit auf die einzelnen Arbeitsorgane unabhängig voneinander Einfluss zu nehmen. Mit dem zusätzlichen Einsatz der Servotechnik entsteht die Möglichkeit auf veränderte Prozessbedingungen mit der Anpassung des Bewegungsdesigns zu reagieren. Für den Versuchsträger entsteht daher das Ziel ein dezentrales Antriebssystem zu entwickeln und für entsprechende Flexibilität bzgl. Kraft- und Bewegungsgrößen auszurüsten. Eine derart flexible Versuchseinrichtung in Verarbeitungssystem und Antriebssystem ist nicht nur für wissenschaftliche Untersuchungen geeignet, sondern zusätzlich Voraussetzung für die Einschätzung möglicher konstruktiver Anpassungen oder Änderungen an aktuellen Ziehmaschinen. Einer Auflösung des zentralen Antriebssystems beispielsweise steht bislang hoher Aufwand bis hin zur kompletten Umkonstruktion der Maschine einem nicht einschätzbaren Nutzen gegenüber.

Die wissenschaftliche Analyse des Prozesses und der Wirkmechanismen erfordert die Entwicklung und Anpassung eines Messsystems für die Gewinnung prozessentscheidender Größen. Die Kraftgrößen innerhalb des Prozess sowie die Weg-Zeit-Verläufe der entkoppelten Bewegungsachsen sind grundlegende Informationen, die Bedeutung für die

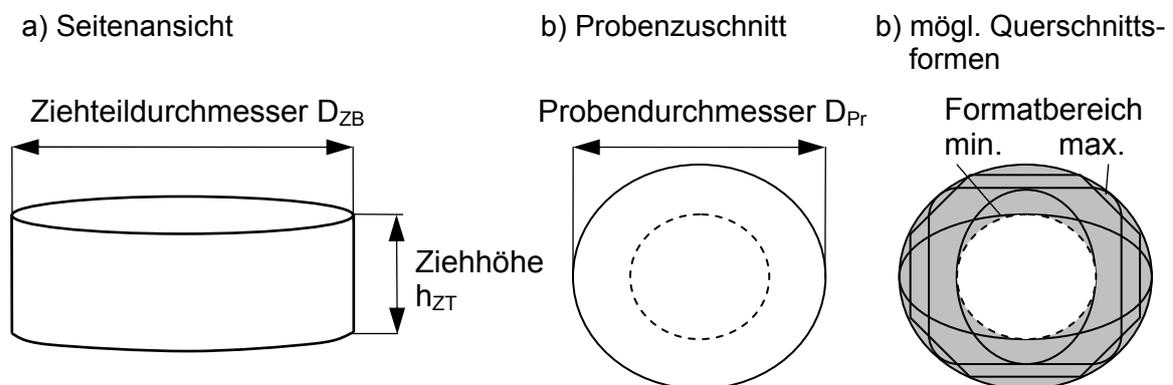
Untersuchung des Prozesses haben. Zusätzlich ist es ein Ziel, die Teilkräfte aus Beschleunigung und Reibungen innerhalb der Kraftverläufe zu kennzeichnen. Die Druckkräfte in Ziehbüchse und Kalibrierbüchse sind von der Temperatur abhängig. Gleichzeitig hat die Temperatur Einfluss auf die Trocknung des Kartons und ist daher eine wichtige Mess- bzw. Regelgröße.

Neben der Informationsgewinnung ist für den Versuchsträger die Reproduzierbarkeit der Versuchsdurchführung entscheidend. Diese ist von der Bewegungsgüte der Arbeitsorgane und der Steifigkeit der Mechanik abhängig. Die Mechanik wird eng toleriert, um die fertigungsbedingten Abweichungen der Teile in Summation an der Wirkstelle gering zu halten. Gleichzeitig ist bei der Konstruktion die Steifigkeit als Auslegungsgrundlage zu wählen, um die Abweichungen durch elastische Verformung des Verarbeitungssystems zu minimieren. Weiteren Einfluss auf die Reproduzierbarkeit hat die Zuführung der Proben bzw. die Entnahme der Formteile. Die Proben sind reproduzierbar für den Zyklus zu positionieren und bei der Entnahme ist eine konstante Auswurfzeit bzw. ein gleichbleibender Auswurfzyklus erforderlich. Die Einwirkzeit der Temperatur verändert maßgeblich das Verarbeitungsergebnis, so dass unregelmäßige Einwirkzeiten bei der Zuführung und am Auswurf zu veränderten Ergebnissen führen. Bei der Positionierung der Kartonprobe über der Ziehbüchse hängt die Reproduzierbarkeit von einer zuverlässigen konzentrischen Ausrichtung der Probengeometrie mit der Ziehbüchsengeometrie ab.

#### 4.1.2 Generierung von Parameterbereichen für den Versuchsträger

##### Formatbereich

Die Abschätzung von Parameterbereichen für die bei der Konstruktion zu beachtenden Größen Kraft, Temperatur und den Genauigkeiten setzt zunächst die Festlegung eines Formatspektrums voraus. Das Format der Ziehteile wird als Referenz an den derzeitigen Anwendungen orientiert, so dass ein breiter Bereich innerhalb der Primär- und Sekundärverpackungen abgedeckt wird. Daraus entsteht für die Praxis der Vorteil, dass die Ergebnisse direkt nutzbar und kurzfristig umsetzbar sind. Das Format der Formteile ist innerhalb einer zylindrischen Grundfläche von 50 bis 110 mm Durchmesser mit einer Ziehhöhe von 5 bis 50 mm wählbar (Abbildung 24).



**Abbildung 24:** Bezeichnungen an Ziehteil und Zuschnitt

Dieser Formatbereich der Grundfläche entspricht den Maßen von Käseschachtelkomponenten wie sie auf der Schachtelziehmaschine des Typs BSZ II der Fa. Manz Automation Thübingen GmbH (vormals Majer GmbH) hergestellt werden. Nur die

Ziehhöhe der bisherigen Anwendungen überschreitet 30 mm bislang nicht. Innerhalb des Grundflächenbereiches ist die geometrische Form variabel.

##### Kräfte

Die Spezifikation genauer Anforderungen an den Versuchsträger aus diesem Formatbereich wird durch den geringen wissenschaftlich gesicherten Erkenntnisstand erschwert. Quantitative Aussagen zu Kräften sind teilweise aus den Veröffentlichungen von (Scherer, 1932), (Heinz, 1967) und (Tenzer, 1989) zu gewinnen, jedoch sind diese schwer einschätz- bzw. bewertbar, da die Versuchstechnik nicht beschrieben wird und die untersuchten Materialien nicht vergleichbar mit den aktuell am Markt erhältlichen und eingesetzten Kartonsorten sind. Mit dem jeweils maximalen Wert für Ziehteildurchmesser  $D_{ZB}$ , Probendurchmesser  $D_{Pr}$  und Ziehhöhe  $h_{ZT}$  lässt sich nach

$$A_v = \frac{\pi}{4}(D_{Pr}^2 - D_{ZB}^2) - D_{ZB} \cdot \pi \cdot h_{ZT} \quad (4.1)$$

die zu verpressenden Fläche  $A_v$  zu 7854 mm<sup>2</sup> berechnen. Daraus entsteht mit dem von (Scherer, 1932) und (Tenzer, 1989) empfohlenen Pressdruck  $p_v$  in der Ziehbüchse von ca. 10 MPa über

$$F_N = p_v \cdot A_v \quad (4.2)$$

eine Normalkraft  $F_N$  in der Ziehbüchse von ca. 79 kN. Grundlage der Berechnung sind die „charakteristischen Dreiecke“, wie sie in Abbildung 10, Abschnitt 2.2.3.2 gezeigt sind. Bei einer radial auf die Ziehbüchse wirkenden Kraft von ca. 80 kN ergibt sich die daraus resultierende Reibkraft bei einem angenommenen Reibbeiwert  $\mu$  von 0,15 für die Reibpaarung Papier – Stahl nach

$$F_R = \mu \cdot F_N \quad (4.3)$$

zu 12 kN. Für diese Abschätzung wird ein konstanter Reibkoeffizient unter der Annahme rein Coulomb'scher Reibung vorausgesetzt. Diese Näherung ist für eine erste Abschätzung der Reibkraft geeignet. Die angegebene Reibkraft in der Ziehbüchse ist als maßgeblicher Bestandteil der Prozesskraft zu betrachten und daher für die Abschätzung der Beanspruchungen des Versuchsträgers geeignet. Vergleichbar ist der ermittelte Kraftwert mit einer Messung an einer Schachtelziehmaschine des Typs BSZ II der Fa. Manz Automation Tübingen GmbH für ein 20 mm hohes Formteil. Aus dem gemessenen Kraftverlauf, wie er in (Hauptmann et al., 2009a) beschrieben ist, lässt sich lt. Hersteller ein Kraftmaximum von ca. 13 kN bestimmen.

Es ist davon auszugehen, dass die Umformkraft mit steigender Ziehhöhe aufgrund des wachsenden Materialüberschusses ansteigt und eine dementsprechend höhere Kraft zu berücksichtigen ist. Der Zusammenhang ist jedoch wissenschaftlich nicht vollständig geklärt, so dass näherungsweise eine mit der verpressten Fläche linear ansteigende Kraft angenommen wird. Ein Schnittring zum Beschneiden des Zargenrandes kommt nicht zum Einsatz, um die Auswirkungen des Umformens in Form von Zipfelbildung in die Bewertung der Formteile einbeziehen zu können. Bei der vorliegenden Kraftmessung ist zu beachten, dass keine Entkopplung der Kraftbestandteile möglich ist. Massenkräfte, Prozesskräfte und

Gewichtskräfte hängen von einer komplexen integrierten Maschinenstruktur der BSZ II ab. Erfahrungen der Fa. Manz haben gezeigt, dass besonders beim Anfahren der Maschine das Antriebsmoment des Motors unzureichend ist, obgleich es im Dauerbetrieb ausreicht. Die Abschätzung der Kraft aus diesen Betrachtungen ist demnach als grobe Näherung zu betrachten. Mit einer maximalen Umformkraft von 30 kN für den Versuchsträger und einer Sicherheit von 10 kN gegen das Festfahren des Werkzeuges ist weitreichender Handlungsspielraum für die Untersuchung des Umformprozesses zu erwarten.

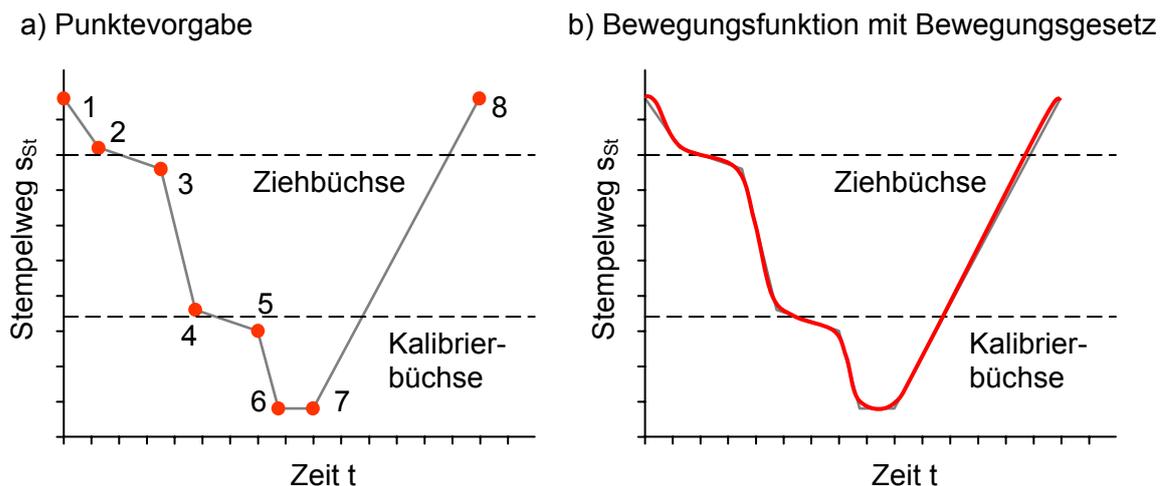
Die Faltenhalterkraft ist wesentlich geringer als die Stempelkraft, da die Rückhaltewirkung in engem Zusammenhang mit der Bruchfestigkeit bei Zugbeanspruchung des Materials im Prozess steht. Um die maximale Faltenhalterkraft für ein großes Materialspektrum aufbringen zu können, wird diese mit 10 kN festgelegt. Daraus entsteht analog Gleichung 4.3 eine Rückhaltekraft von ca. 1,5 kN. Die Gegenhalterkraft ist eine Prägekraft und wird mit einem Richtwert von 10 kN angenommen.

### Temperatur

Die Temperaturen beim Umformen werden als Richtwerte in (Scherer, 1932) und (Tenzer, 1989) mit 120 bis 160 °C für die Ziehbüchse angegeben. Nach den Untersuchungen von (Gohring, 1963) und (Salmén et al., 1980) liegen die Glasübergangstemperaturen der Stoffbestandteile von Karton abhängig von der Feuchte teilweise bei über 200 °C. Daher lässt die Beheizung von Ziehbüchse und Stempel bis zu einer Temperatur von 200 bzw. 250 °C einen entsprechenden Effekt im Material erwarten.

### Bewegungen

Die Bewegung der Arbeitsorgane wird über Bewegungsfunktionen realisiert. Für Faltenhalter und Gegenhalter sind die aufgebrachten Kräfte entscheidend, daher wird die Bewegung im Prozess durch eine Kraftregelung bestimmt. Die Stempelbewegung hingegen hat Einfluss auf die Materialbeanspruchung und erfordert aus diesem Grund eine parametrierbare Bewegungsfunktion (Abbildung 25).



**Abbildung 25:** Bewegungsvorgaben am Stempel (Hauptmann et al., 2009a)

Es werden Stützpunkte vorgegeben, zwischen denen eine Änderung der Geschwindigkeit erfolgt. Die Wahl der Stützpunkte orientiert sich am Prozessablauf. Das Einfahren des Stempels in Zieh- bzw. Kalibrierbüchse (Zonen 2-3 und 4-5) erfolgt mit geringer Geschwindigkeit, um eine materialschonende Bewegung in die Komprimierungszonen zu

sichern. Der Übergang (Zonen 4 und 6) zwischen den Einfahrzonen wird mit höherer Geschwindigkeit gefahren. Die Vorschubrichtung bei Ausfahren des Zylinders bzw. Einfahren des Stempels in die Ziehbüchse ist in der Maschinensteuerung negativ definiert, so dass sich der in Abbildung 25 gezeigte Verlauf ergibt.

Bei der Umsetzung der Kraft- und Bewegungsvorgaben werden zudem Anforderungen an Bewegungsdesign und die Güte der Regelung gestellt. Minimale Beanspruchungen des Kartons sind durch Bewegungsfunktionen realisierbar, die nach (VDI 2143 Blatt 1, 1980) und (VDI 2143 Blatt 2, 1987) mit polynomischen Bewegungsgesetzen in Beschleunigungszonen ruckfrei gestaltet werden. Gleichzeitig ist die Regelung der Sollverläufe eine Fehlerquelle, die Einfluss auf den Umformprozess hat.

Die Geschwindigkeit des Stempels während des Umformens in der Ziehbüchse bestimmt die Beanspruchung des Kartonzuschnittes. In Ziehmaschinen wird bislang eine maximale Geschwindigkeit von 600 mm/s erreicht, die einer Ausbringung von 100 Stck./min entspricht. An den Stempeltrieb wird die Anforderung gestellt eine maximale Geschwindigkeit von 800 mm/s zu realisieren, um eine Ausbringungsoptimierung und Untersuchung dynamischer Effekte im Prozess in weiterführenden Forschungsarbeiten zu ermöglichen.

### **Genauigkeiten**

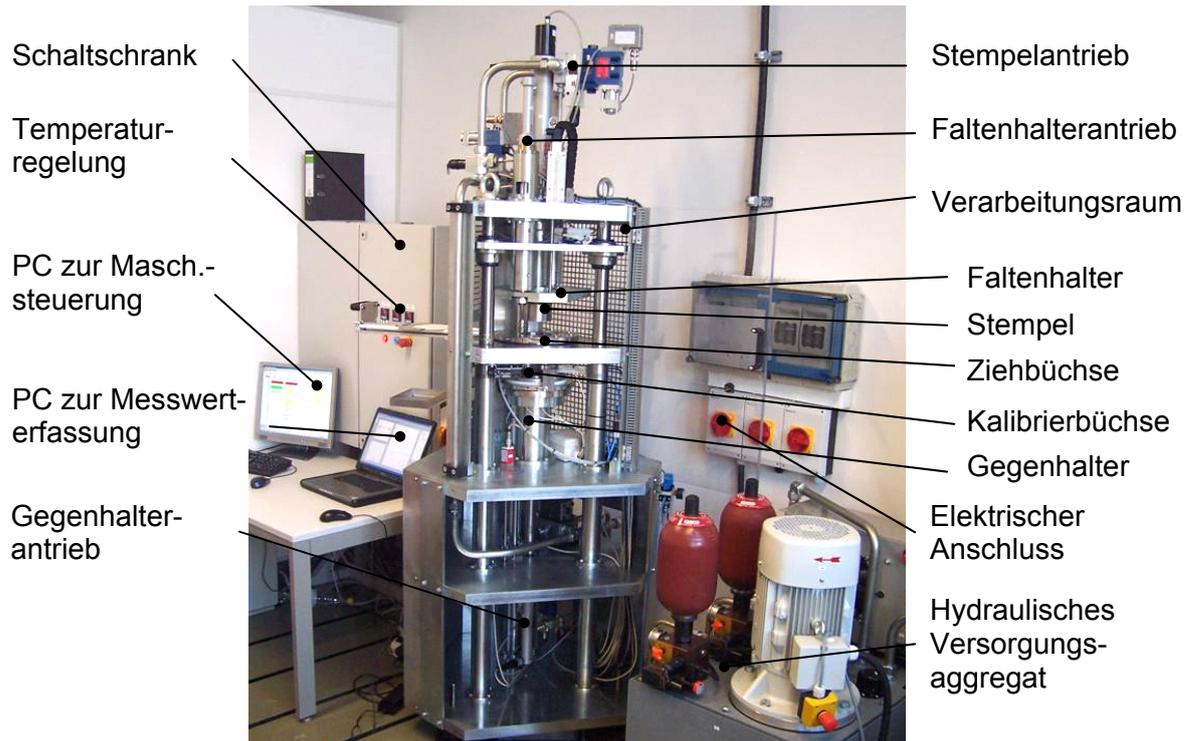
Für die Untersuchung der physikalischen Zusammenhänge an der Versuchseinrichtung ist besonders bei den erwarteten hohen Prozesskräften eine hohe Steifigkeit des Stützsystems erforderlich, um Störeinflüsse durch elastische Formänderungen zu minimieren.

Neben den Steifigkeitsanforderung an die Mechanik ist die Genauigkeit der Bewegung der Arbeitsorgane Stempel, Ziehbüchse und Kalibrierbüchse zueinander entscheidend für die qualitative und reproduzierbare Durchführung des Ziehprozesses. Deutlich wird die Bedeutung der Bewegungsgenauigkeit bei der Analyse des Verdichtungsverhaltens von Karton. Die Kraft steigt annähernd exponentiell mit dem Komprimierweg an (siehe Abschnitt 2.3.4.2, Abbildung 22). Bei Komprimierung des Ziehkartons ZKH von Mayr/Melnhof entsteht im höheren Druckbereich bei einer Bewegung um 100  $\mu\text{m}$  ein Kraftanstieg von 40 kN. Dieser Effekt wirkt auf gleiche Weise in der Ziehbüchse bei der Verpressung der Falten als Normalkraft. Hohe Qualität der Formteile wird durch eine gleichmäßige Presskraftverteilung über dem Umfang der Zarge als Ergebnis des geometrisch eingestellten Zieh- bzw. Kalibrierspaltes erreicht. Bestimmt wird die Bewegungsgenauigkeit durch die Maßtoleranzen bei der Fertigung und die Menge der verwendeten Bauteile zwischen denen eine Toleranzkette entstehen kann. Für den Ziehspalt wird eine Toleranz von  $\pm 0.025$  mm festgelegt, die hohe Ansprüche an die Fertigung und Konstruktion stellt. Weitere Einzelheiten und detaillierte Anforderungsbereiche sind in (Hauptmann et al., 2008) zusammengestellt und beschrieben (siehe Anlage 1).

## **4.2 Beschreibung des Versuchsträgers**

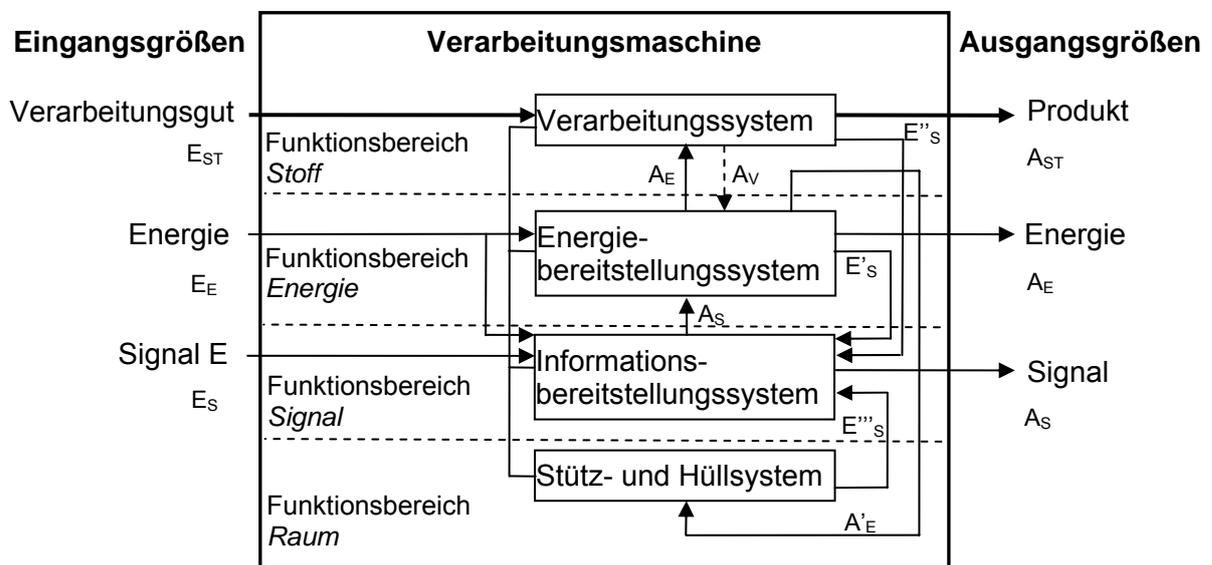
### **4.2.1 Struktureller Aufbau**

Der innerhalb der vorliegenden Arbeit entwickelte Versuchsträger (Abbildung 26) ist in seiner Struktur als vollwertige Verarbeitungsmaschine zu betrachten.



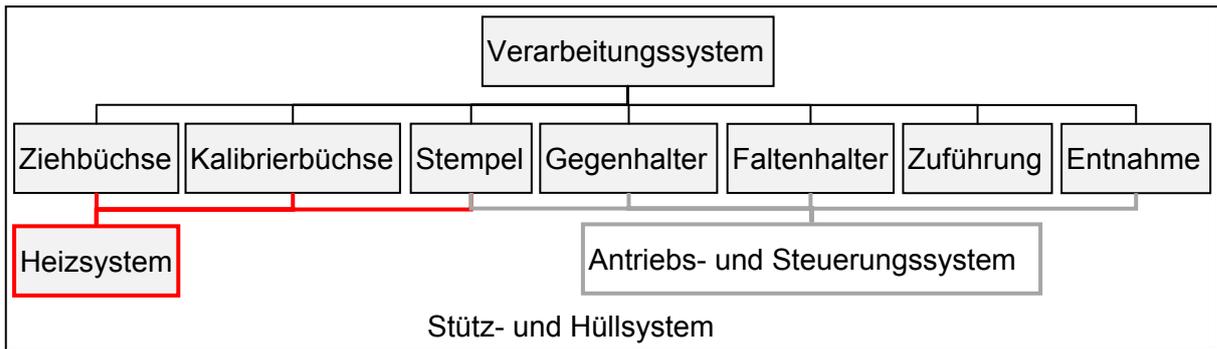
**Abbildung 26:** Versuchsträger zur Untersuchung des Ziehprozesses nach (Hauptmann et al., 2009a) und (Hauptmann et al., 2009b)

Die komplexe Struktur lässt sich nach (Langer, 2004) in Teilsysteme gliedern (Abbildung 27).



**Abbildung 27:** Schematischer Aufbau von Verarbeitungsmaschinen nach (Langer, 2004)

Diese Einteilung ermöglicht eine gezielte Betrachtung der funktionsentscheidenden Schnittstellen zwischen Verarbeitungssystem, Stützsystem sowie Antriebs- und Steuerungssystem. Das Verarbeitungssystem wird im Gegensatz zur integrierten Arbeitsweise in Ziehmaschinen vollständig entkoppelt. Diese Auflösung des komplexen mechanischen Aufbaus ermöglicht die Unterteilung dieses Systems in eine systematische Baugruppenstruktur (Abbildung 28).

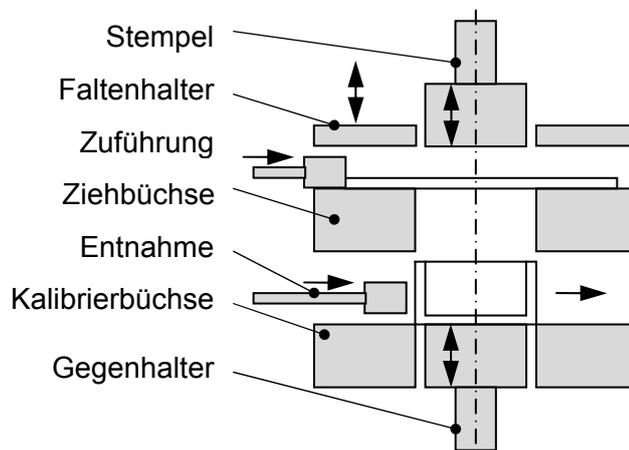


**Abbildung 28:** Baugruppenstruktur des Versuchsträgers

Die einzelnen Baugruppen sind ohne Kopplung miteinander mit dem Stützsystem verbunden. Neben den für den Ziehprozess notwendigen Baugruppen Ziehbüchse, Kalibrierbüchse, Stempel, Gegenhalter und Faltenhalter werden mit den Baugruppen Zuführung und Entnahme zwei Hilfssysteme eingesetzt. Beide Systeme sind für die sichere und reproduzierbare Versuchsdurchführung und die Gewährleistung der Arbeitssicherheit erforderlich. Das Heizsystem hat Einfluss auf die Baugruppen Ziehbüchse, Kalibrierbüchse und Stempel. Zudem sind für dieses Teilsystem Wechselwirkungen mit dem Messsystem zu beachten.

#### 4.2.2 Verarbeitungssystem

Das Verarbeitungssystem besteht aus den fünf wesentlichen Baugruppen Ziehbüchse, Kalibrierbüchse, Faltenhalter, Stempel und Gegenhalter sowie den Hilfssystemen Zuführung und Entnahme (Abbildung 29).

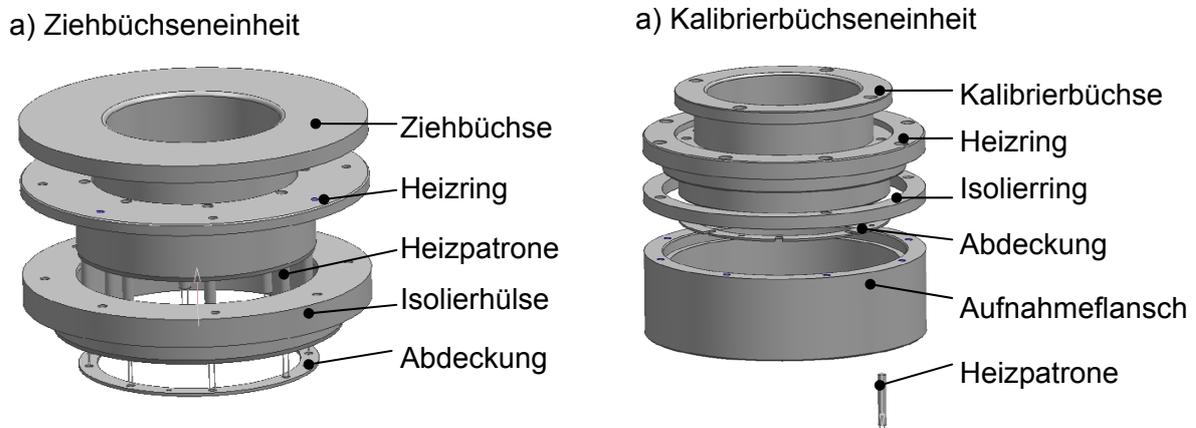


**Abbildung 29:** Schematischer Aufbau des Verarbeitungssystems

#### Zieh- und Kalibrierbüchse

Die Ziehbüchse als Arbeitsorgan steht in direktem Kontakt mit dem Karton. Durch die Faltenhalterkraft, die Presskraft innerhalb der Ziehbüchse sowie die Zugkraft an der Einzugs-kante wird aufgrund der Relativbewegung des Stempels zur Ziehbüchse Reibung erzeugt. Die Kontaktflächen der Ziehbüchse mit dem Karton sind poliert auf eine Rautiefe von  $R_a$  0,4 bis 0,2  $\mu\text{m}$  um die Reibkräfte zu minimieren. Die Vermeidung von Bohrungen, Senkungen oder ähnliche Elementen erzeugt eine durchgängige störungsfreie Kontaktfläche

für den Karton und verhindert lokale Materialschädigungen. Die erforderliche hohe Genauigkeit des Ziehspaltes zwischen Ziehbüchse und Stempelkopf wird durch eine entsprechend enge Tolerierung des Ziehdurchmessers zur Aufnahme im Stützsystem erreicht. Der Aufbau der Ziehbüchsenbaugruppe (Abbildung 30 a) wird durch Forderung einer gleichmäßigen Umformtemperatur an der Wirkstelle bestimmt.



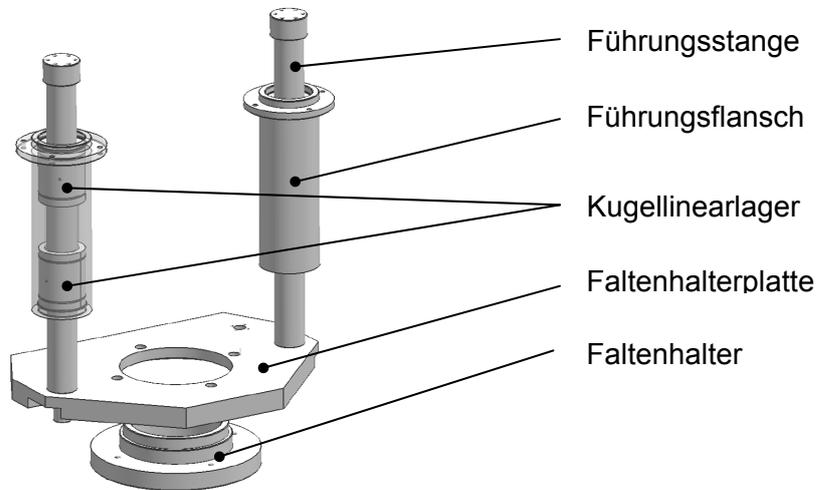
**Abbildung 30:** Aufbau von Zieh- und Kalibrierbüchsenbaugruppe

Die Temperatur wird durch einen Heizring, in dem acht Heizelemente integriert sind und in den die Ziehbüchse eingesetzt wird, erzeugt. Die Trennung der Heizelemente von der Ziehbüchse durch den Heizring ermöglicht das aufwandsarme Wechseln der Ziehbüchse. Eine gleichmäßige Temperaturverteilung an der Wirkstelle wird durch die gewählte Isolationslösung erreicht. Ein Ring aus dem Hochleistungskunststoff PEEK mit geringer thermischer Leitfähigkeit bei gleichzeitig hoher Steifigkeit trennt die Einheit aus Heizring und Ziehbüchse vollständig thermisch vom Stützsystem und erhält dennoch die Genauigkeit zwischen Ziehbüchse und Stempel bzw. Gegenhalter. Die stationäre Simulation der Temperaturverteilung in der Ziehbüchse (Hufnagl, 2008) zeigt, dass mit dieser Isolation eine gleichmäßige Temperatur an der Wirkstelle erreicht wird und diese der vorgegebenen Temperatur entspricht. Die Wirkung der Temperatur auf das Stützsystem und das Führungssystem des Stempelschlittens wird zudem durch die Isolation minimiert. Im stationären Zustand werden bei Umgebungstemperatur von 23 °C maximal ca. 50 °C im Stützsystem erreicht. Durch diese Temperatur wird die Steifigkeit nicht wesentlich verringert und die Führungseigenschaften nicht beeinflusst. Eine Temperatur in der Ziehbüchse von 200 °C wird nach der transienten Simulation des Aufheizvorganges innerhalb einer Zeit von 12 min erreicht und mit einer Genauigkeit von  $\pm 1$  °C geregelt (Hufnagl, 2008).

Der Aufbau der Kalibrierbüchsenbaugruppe (Abbildung 30 b) ist analog dem der Ziehbüchse gestaltet. Wie auch bei der Ziehbüchse sind die Kontaktflächen mit dem Karton auf eine Rautiefe  $R_a$  von 0,4 bis 0,2  $\mu\text{m}$  poliert. Der einzige Unterschied liegt in der Isolationslösung. Die geringeren Temperaturen, die beim Kalibriervorgang genutzt werden, erfordern nicht die vollständige Isolation vom Stützsystem. Es wird eine minimale Zentrierfläche zwischen Heizring und Aufnahme mit direktem Kontakt zugelassen. Die entsprechenden Temperatursimulationen zeigen, dass die Aufheizzeit etwas höher ist, aber eine gleichmäßige Temperaturverteilung nicht gefährdet wird.

##### Faltenhalter

Der Faltenhalter (Abbildung 31) bringt eine Druckkraft von maximal 10 kN auf den Kartonzuschnitt bzw. die Ziehbüchse auf.

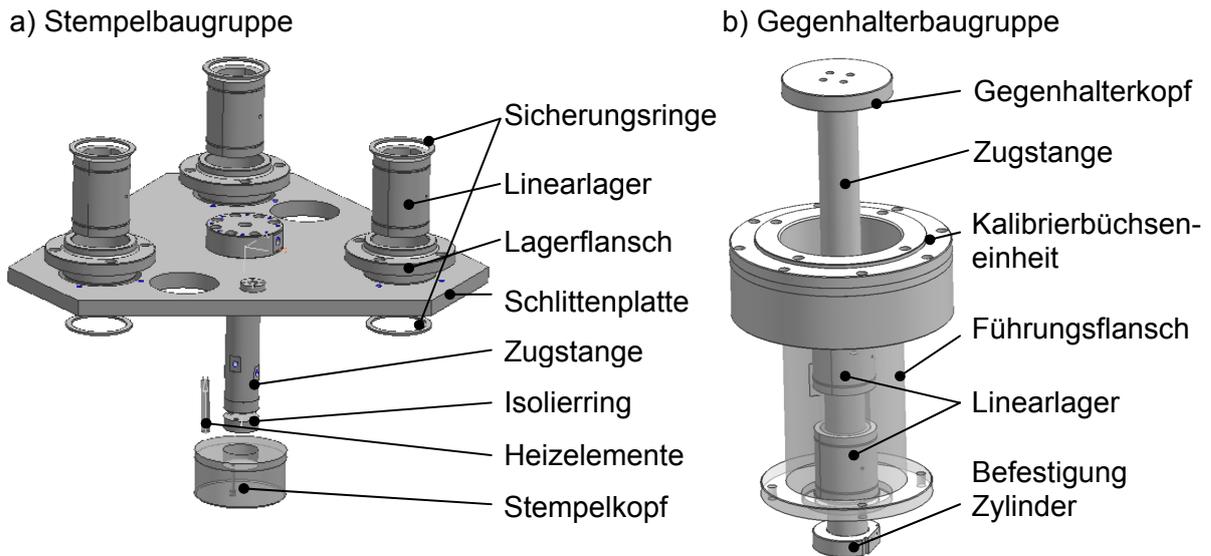


**Abbildung 31:** Aufbau der Faltenhalterbaugruppe

Der Kontakt zum Kartonzuschnitt erfordert ähnlich wie bei der Ziehbüchse eine kantenfreie Kontaktfläche des Faltenhalters. Durch die Druckkraft wird in Umformrichtung eine Rückhaltekraft in Form einer Reibkraft auf den Kartonzuschnitt aufgebracht, um auf die Verteilung der Falten Einfluss zu nehmen. Die Kontaktfläche ist daher poliert auf eine Rautiefe  $R_a$  von  $0,4-0,2 \mu\text{m}$ . Anders als bei den Kontaktflächen von Kalibrierbüchse und Ziehbüchse dient die Minimierung des Reibkoeffizienten nicht der Vermeidung von Beschädigungen am Karton, sondern erzeugt einen geeigneten Spielraum für die Dosierung der Rückhaltekraft über die Einstellung der vom Faltenhalter aufbrachten Normalkraft. Für die gleichmäßige Verteilung der Rückhaltekraft über der Probenfläche ist über der Kontaktfläche des Faltenhalters eine hohe Steifigkeit zu gewährleisten. Der zylindrische Querschnitt der Faltenhalterbuchse ist in eine massive Trägerplatte integriert und bringt somit ein zusätzliches Widerstandsmoment gegen die Durchbiegung zwischen den Führungsstangen auf, durch die die Kraft eingeleitet wird. Zusätzlich erfüllt der Faltenhalter eine Stützfunktion für den Stempel, der durch den Hub von 185 mm im Falle von Querkräften einen entsprechend langen Biegebalken darstellt. Diese Stützfunktion erfordert eine eigenständige Führung des Faltenhalters unabhängig von der Zylinderführung des Antriebes. Über jeweils zwei Kugellinearlager mit einem Stützabstand von 100 mm werden die Lage und eine hohe Steifigkeit gesichert.

##### Stempel und Gegenhalter

Der Aufbau der Stempelbaugruppe wird durch den zu verfahrenen Hub von 185 mm bestimmt. Dem Hub entsprechend ist eine Zugstange als Aufnahme für den Stempelkopf mit der Schlittenplatte befestigt. Die Schlittenplatte wird an den im Stützsystem integrierten Führungsstangen mit Kugellinearlagern geführt, wodurch eine entsprechende Bewegungsgenauigkeit des Stempelkopfes gesichert ist (Abbildung 32 a).



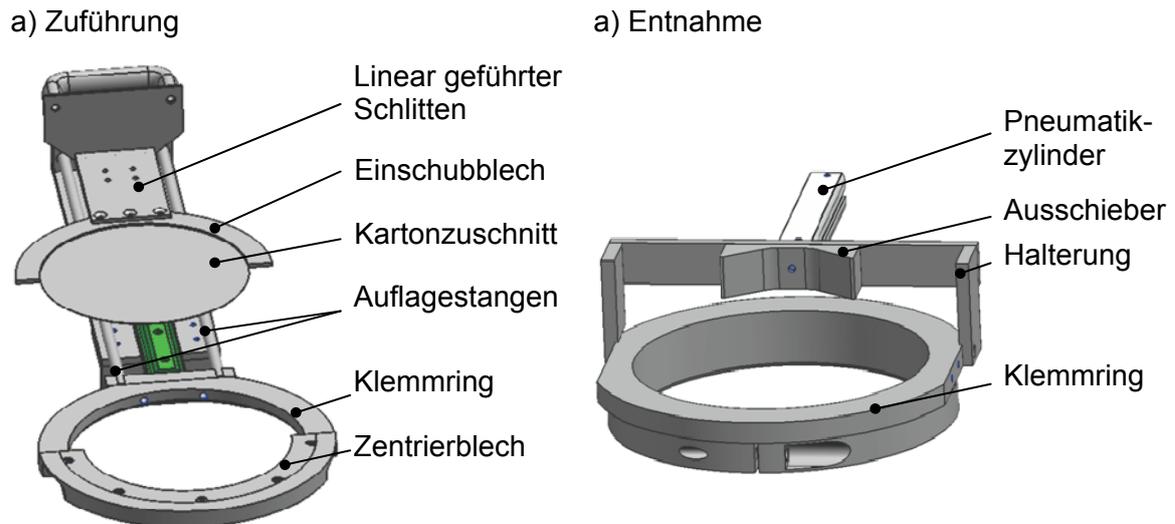
**Abbildung 32:** Aufbau von Stempel- und Gegenhalterbaugruppe

In den Stempelkopf sind am Umfang nahe der Wirkstelle vier Heizelemente integriert. Die Isolation über einen Isolerring zwischen dem austauschbaren Stempelkopf und der Stempelstange erschwert die Temperatureinleitung in die Stempelstange ausreichend. Simulationsergebnisse der thermischen stationären und transienten Simulationen zeigen, dass eine gleichmäßige vorgegebene Temperatur mit einer Genauigkeit von  $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  erreicht wird und die Temperatur an der Schlittenplatte bereits unter  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  beträgt. Eine Beeinflussung der Steifigkeit der Schlittenplatte ist demnach nicht gegeben. Die Oberfläche des Stempelkopfes steht in direktem Kontakt mit dem Karton. Nach den Untersuchungen von (Scherer, 1932) führt eine Politur der Oberfläche wie bei der Ziehbüchse zu stärkeren Beanspruchungen am Formteilboden (siehe Abschnitt 2.2.3.2). Aus diesem Grund wird eine Rautiefe  $R_z$  von  $6,3 \text{ } \mu\text{m}$  gewählt, die Scherer als geeigneten Richtwert angibt.

Der Aufbau der Gegenhalterbaugruppe (siehe Abbildung 32 b) ist analog der Stempelbaugruppe maßgeblich durch den notwendigen Hub von  $185 \text{ mm}$  beeinflusst. Der Unterschied zwischen beiden Baugruppen ist, dass für den Gegenhalter eine direkte Innenführung realisierbar ist. Die Zugstange ist daher direkt als Führungsstange ausgeführt und stellt die Schnittstelle zum Gegenhalterantrieb dar. Auf der Zugstange wird der Gegenhalterkopf montiert und ist aufwandsarm austauschbar. Die Zugstange ist mechanisch gegen Verdrehen gesichert. Eine Beheizung des Gegenhalterkopfes ist nicht vorgesehen, da der mögliche gleichzeitige Prägevorgang zunächst nicht im Fokus der Untersuchungen steht. Die Führung erfolgt auch beim Gegenhalter mit zwei Kugellinern, die durch einen Stützabstand von  $100 \text{ mm}$  entsprechende Führungssicherheit aufweist. Der Führungsflansch der Linearlager ist gleichzeitig Aufnahme für die Kalibrierbüchsen-einheit.

### Zuführung und Entnahme

Zusätzlich werden mit Zuführung und Entnahme zwei Hilfssysteme eingesetzt. Die Zuführung der Kartonzuschnitte in den Verarbeitungsraum erfolgt manuell über einen Zuführschlitten (Abbildung 33 a).

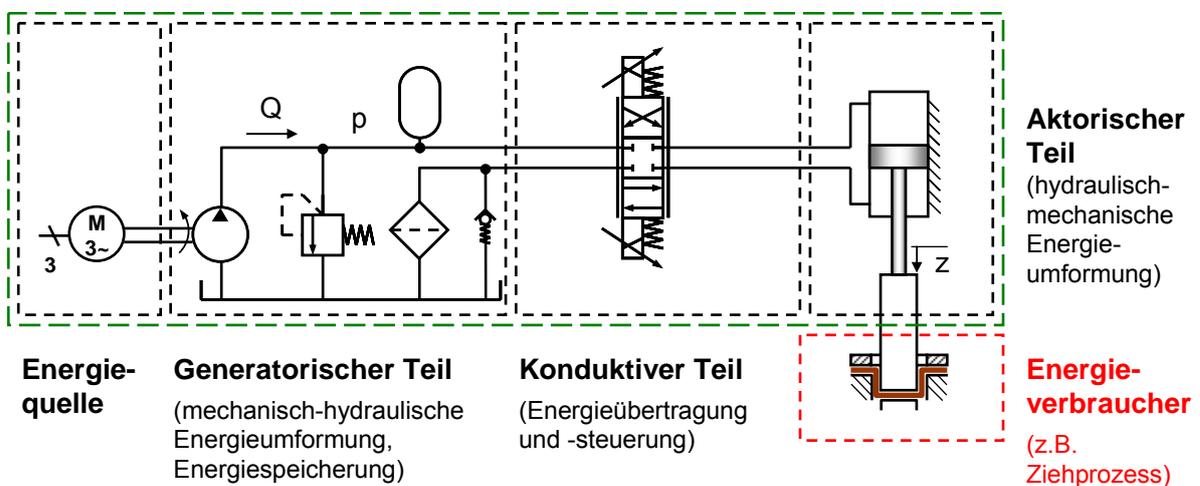


**Abbildung 33:** Aufbau der Baugruppen Zuführung und Entnahme

Der Kartonzuschnitt wird auf zwei Kunststoffstangen durch einen linear geführten Schlitten in den Verarbeitungsraum des Versuchsmoduls geschoben. Die Lagesicherung während des Transportes und die Zentrierung des Zuschnittes über der Ziehbüchse erfolgt durch ein geteiltes Blech (Einschubblech, Zentrierblech), welches der Kontur des Zuschnittes entspricht. Die Kunststoffstangen isolieren die Zuschnitte von der Wärmequelle der Ziehbüchse und verhindern eine vorzeitige unkontrollierte Erwärmung des Materials. Die Entnahme der umgeformten Ziehlehre erfolgt durch das Ausstoßen mit Hilfe eines Ausschiebers, der durch einen Pneumatikzylinder angetrieben ist (Abbildung 33 b). Über ein Schaltventil wird der Ausschieber betätigt.

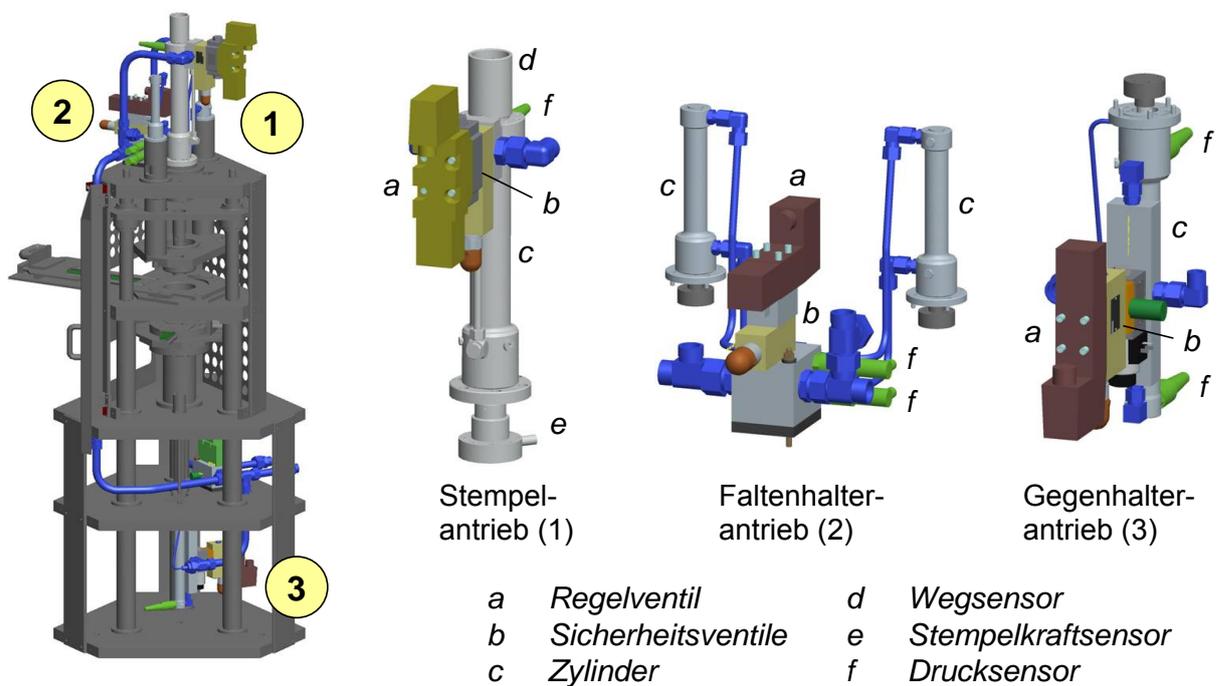
### 4.2.3 Antriebs- und Steuerungssystem

Der Versuchsträger wird durch ein servohydraulisches System angetrieben. Die Grundstruktur dieses Antriebssystems besteht, wie in Abbildung 34 skizziert, aus Energiequelle, generatorischem Teil, konduktivem Teil, aktorischem Teil und Energieverbraucher.



**Abbildung 34:** Prinzipieller Aufbau eines hydraulischen Antriebssystems nach (Helduser, 2008)

Entscheidender Unterschied zu den bisherigen Antriebslösungen in der Praxis ist die Auflösung des Zentralantriebes in drei Einzelantriebe. Die Schnittstellen für die Anbindung dieser Antriebe sind durch die Mechanik vorgegeben. Energiequelle und generatorischer Teil werden in einem zentralen Versorgungsaggregat (Abbildung 26) kombiniert was über ein Hoch- und ein Niederdruckniveau den notwendigen Volumenstrom für die Antriebe zur Verfügung stellt und gleichzeitig Ölspeicher- und Ölaufbereitungsaufgaben übernimmt. Das Hochdruckniveau (300 bar) wird für die Umformbewegung genutzt, bei der kurzzeitig ein hoher Volumenstrom erforderlich ist. Die Rückbewegung der Arbeitsorgane wird durch das Niederdruckniveau (50 bar) realisiert. Der Einsatz von Hydrospeichern für beide Druckniveaus ermöglicht eine energetisch günstige Dimensionierung der Versorgung bezogen auf den mittleren erforderlichen Volumenstrom. Ein Elektromotor treibt eine Innenzahnradpumpe an. Diese Pumpe speist über eine energieeffiziente Ladeschaltung beide Hydrospeicher und stellt dadurch den Betriebszustand her. (Hauptmann et al., 2009a)



**Abbildung 35:** Hydraulische Antriebe am Versuchsträger nach (Hauptmann et al., 2009a) und (Lohse et al., 2010)

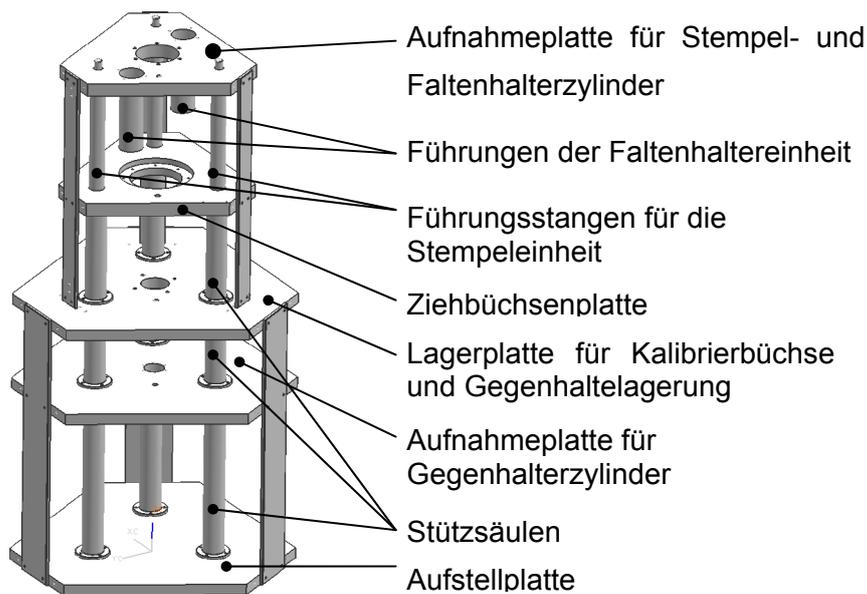
Der konduktive und aktorische Teil des Antriebssystems wird durch die direkt am Versuchsträger montierten Zylinderantriebe für Stempel, Faltenhalter und Gegenhalter übernommen (siehe Abbildung 35). Ein Druckbegrenzungsventil sowie entsprechende Rückschlagventile verhindern einen unzulässigen Druckanstieg und das unkontrollierte Ausfahren der Zylinderantriebe. Durch die Regelventile wird eine dynamische Regelung von Lage und Kraft ermöglicht. Der Stempelantrieb wird in Lageregelung mit einem PD-Regler und Geschwindigkeitsvorsteuerung betrieben. Dadurch wird der Schleppfehler verringert und das dynamische Verhalten der Antriebe verbessert. Faltenhalter und Gegenhalter arbeiten in Wegregelung mit einem P-Regler und Geschwindigkeitsvorsteuerung und schalten positionsabhängig in eine PID-Kraftregelung um. Grund dafür ist, dass für den Prozess besonders die Faltenhalterkraft als einstellbare Größe vorgesehen ist und die Regelung eines entsprechenden Wertes bzw. Verlaufes erfordert. Die Steuerung des Versuchsträgers

erfolgt durch das modulare MSC (Moog Servo Controller) und die zugehörige Software MACS (Moog Axis Control Software) in der eine Programmstruktur bestehend aus den Bestandteilen Ablaufsteuerung, Antriebsregelung und Sollverlaufberechnung, die betriebs- und sicherheitstechnischen Funktionen steuert. (Hauptmann et al., 2009a)

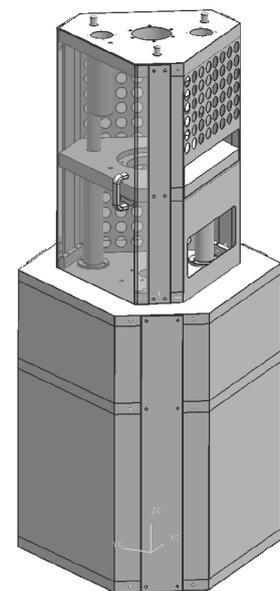
#### 4.2.4 Stütz- und Hüllsystem

Das Stützsystem (Abbildung 36) nimmt Kräfte und Reaktionskräfte des Prozesses und der Massenbewegungen auf.

a) Stützsystem



a) Hüllsystem



**Abbildung 36:** Stütz- und Hüllsystem des Versuchsträgers

Es werden hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Werkzeugschnittstellen zueinander gestellt, um die Ausrichtung und Positionierung der Werkzeuge zu sichern. Diese Genauigkeiten, die zwischen Stempel und Zieh- bzw. Kalibrierbüchse erforderlich sind, setzen zudem eine hohe Steifigkeit des Stützsystems voraus. Aus diesem Grund ist das Stützsystem in Säulenbauweise ausgeführt. Drei zylindrische Stützsäulen sind um die Mittelachse, entlang der die Arbeitsorgane bewegt werden, symmetrisch in Form eines gleichschenkligen Dreieckes angeordnet. Die Bewegungsachse ist gleichzeitig Kraftangriffspunkt. Daher ist diese Achse im Schnittpunkt der Mittelsenkrechten des gleichschenkligen Dreieckes der Stützsäulen angeordnet und leitet somit die Prozesskräfte zentrisch in das Stützsystem ein. Auf diese Weise werden Biegebeanspruchungen im Gestell minimiert.

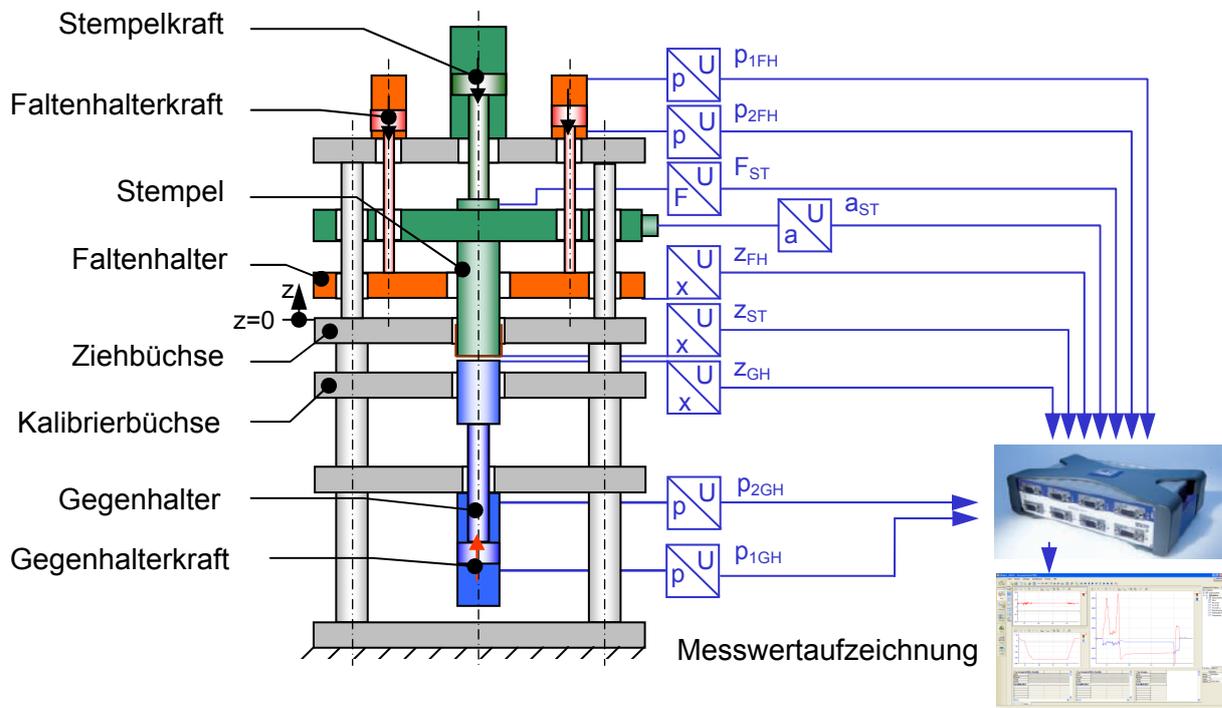
Durch enge Tolerierung der Säulen im Bezug zur Bewegungsachse der Arbeitsorgane werden die geforderten hohen Genauigkeiten der geometrischen Anordnung der Arbeitsorgane zueinander erfüllt. Die Schnittstellen zu den Baugruppen Ziehbüchse, Kalibrierbüchse, Gegenhalter und Faltenhalter sowie zu den drei Antrieben sind demnach durch entsprechende Passungen vorgegeben. Innerhalb des Stützsystems sind als obere Stützsäulen die Führungsstangen für die Linearführung der Stempelbaugruppe integriert.

Die Verformungen des Stützsystems bei der Ausführung mit drei Säulen liegen nach den Berechnungen mittels der Finiten Elemente Methode nach (Hauptmann et al., 2009a) und (Meyer, 2008) bei maximaler Last unter 0,05 mm und sind für die experimentellen Untersuchungen vernachlässigbar.

Das gesamte Stützsystem wird durch ein Hüllsystem umgeben. Verkleidungsbleche verhindern den Zugriff in den Verarbeitungsraum. Eine Überhitzung des Innenraumes wird durch entsprechende Lochmuster in den Verkleidungen verhindert. Für Störungsbeseitigung und Umrüstungen ist eine Tür vorgesehen, die durch eine Sicherheitszuhaltung gesichert ist.

#### 4.2.5 Messsystem

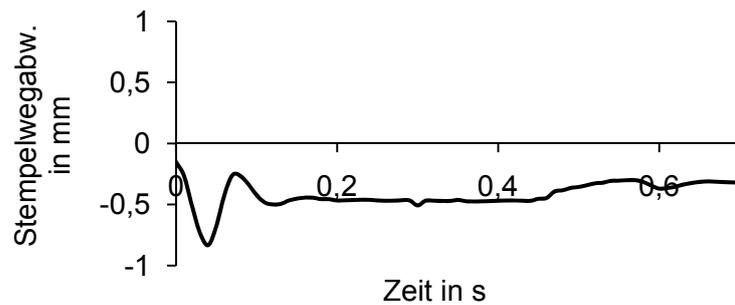
Für die Gewinnung umfangreicher Informationen aus dem Prozess ist ein Messsystem (Abbildung 37) implementiert, was die Erfassung der Weg- und Kraftverläufe der Arbeitsorgane ermöglicht. Zusätzlich wird für die weggeregelte Stempelachse ein Beschleunigungsaufnehmer eingebunden, um die entsprechenden Beschleunigungskräfte, die neben Reib- und Umformkräften auf den Stempelantrieb wirken, bestimmen zu können.



**Abbildung 37:** Schematischer Aufbau des Messsystems am Versuchsträger

#### Wegmessung

Der Stempel arbeitet in Lageregelung. Die Regelung wird über das Wegsignal des Stempelweges aufgebaut. Die Wegmessung erfolgt durch einen magnetostriktiven Wegaufnehmer der Temposonics® R-Serie von MTS. Dieser Sensor zeichnet sich durch hohe Genauigkeit von  $\pm 5 \mu\text{m}$  und einer Messzykluszeit von 1 ms aus. Eine Testmessung bei dem in Abschnitt 4.1.2, Abbildung 25 gezeigten Bewegungsverlauf mit einer Geschwindigkeit von 20 mm/s zeigt eine maximale Regelabweichung von ca. 0,8 mm (siehe Abbildung 38).



**Abbildung 38:** Testmessung zur Regelabweichung der Stempelposition

Die maximale Abweichung ist von der Geschwindigkeit des Stempels abhängig. Bei Maximalgeschwindigkeit von 800 mm/s entsteht eine Abweichung von ca. 2,5 mm. Die Messung und Regelung des Gegenhalterweges erfolgt analog mit dem gleichen Sensortyp.

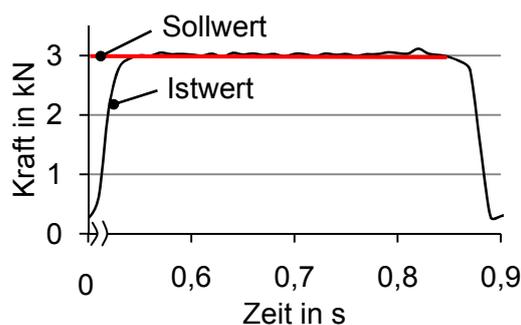
Der Weg des Faltenhalters wird durch einen potentiometrischen Wegsensor von Novotechnik Typ LWH gemessen. Die Zugstange des Sensors ist durch die Befestigung in der Faltenhalterplatte mechanisch gekoppelt. Die Anforderungen an die Güte der Wegregelung sind geringer, da eine Zustellbewegung zu regeln ist und anschließend auf eine Kraftregelung umgeschaltet wird. Eine Genauigkeit von 0,01 mm ist für diese Aufgabe ausreichend.

### Kraftmessung

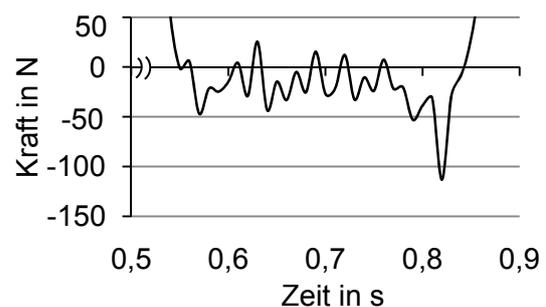
Die Kraft am Stempel wird durch einen, zwischen Stempelschlitten und Hydraulikantrieb angeordneten Kraftsensor von GTM, Serie K mit einer Nennkraft von 63 kN erfasst. Bei einer Linearisierung von zwei Volt Ausgabespannung auf 63 kN Nennkraft als Messbereich wird eine Auflösung von ca. 60 N erreicht. Damit ist im Bereich unterhalb 10 % der Nennkraft eine hinreichende Messgenauigkeit gegeben.

Die Kräfte für Faltenhalter und Gegenhalter werden indirekt über eine Druckmessung im Hydrauliksystem erfasst. Dazu werden Drucksensoren mit einer Genauigkeitsklasse von 0,25% eingesetzt. Aus den Drucksignalen wird über das Druckgleichgewicht auf Zuleitungs- und Rückleitungsseite die aufzubringende Kraft zur Realisierung der Bewegung errechnet. Die Regelung der Faltenhalterkraft ist für die Untersuchungen von besonderem Interesse. Testmessungen zeigen, dass die vorgegeben Sollkraft mit einer durchschnittlichen Abweichung von ca. 20 N und einer maximalen Abweichung von ca. 113 N ausgeregelt wird (Abbildung 39).

a) Faltenhalterkraftverlauf



b) Abweichung der Faltenhalterkraft



**Abbildung 39:** Testmessung zur Regelabweichung der Faltenhalterkraft bei 3000 N

### **Beschleunigungsmessung**

Die Beschleunigung des Stempelschlittens wird durch einen kapazitiven Sensor der Fa. Synotech Typ PCB 3711 für niederfrequente Beschleunigungsmessungen eingesetzt. Der Aufnehmer ist für einen Messbereich von  $\pm 20 \text{ g}$  ( $\pm 196 \text{ m/s}^2$ ) bei einer Empfindlichkeit von  $100 \text{ mV/g}$  ausgelegt und ist damit bei Einsatz eines Filters (Tiefpass  $10 \text{ Hz}$ ) für die Erfassung geringer niederfrequenter Ausschläge geeignet.

### **Temperaturmessung**

Die Temperaturen von Stempel, Ziehbüchse und Kalibrierbüchse werden durch PT 100 Widerstandssensoren gemessen und über Temperaturregelgeräte mit einer Genauigkeit von  $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  geregelt. Bei der Einstellung des Wertes ist gegebenenfalls ein Einschwingverhalten zu beachten. Die Erfassung der eingestellten Temperaturen erfolgt manuell. Detailinformationen zu den eingesetzten Sensoren sind in Anlage 2 zusammengestellt.

### **Auswertung der Messsignale**

Die Signale der Sensoren erfasst ein Messwertverstärker der Fa. Hottinger Baldwin Typ MX 840. Die Konditionierung der Daten erfolgt in der Software DIAdem® der Fa. National Instruments. Über einen Treibereingang werden die Signale vom Messwertverstärker übernommen und durch Linearisierungsglieder bzw. Kalibrierfaktoren in die vorgesehene Einheit für Wege (mm), Kräfte (N) und Beschleunigung ( $\text{m/s}^2$ ) umgerechnet. Innerhalb des Messprogramms wird die Abtastrate der Messsignale mit  $100 \text{ Hz}$  für alle Aufnehmer vorgegeben, kann jedoch bei Bedarf für schnelle Bewegungen bis  $9,6 \text{ kHz}$  erhöht werden. Mit Stempelweg, Faltenhalterweg, Stempelkraft, Faltenhalterkraft, Gegenhalterkraft und Beschleunigung des Stempels werden sieben Kanäle zusätzlich zur Systemzeit aufgezeichnet. Der Gegenhalterweg wird nicht ausgegeben, da er innerhalb des Zyklus in Kraftregelung dem Stempelweg gleicht. Die Steuerung gibt auf dem verbliebenen freien Kanal des Messwertverstärkers ein binäres Schaltsignal  $0$  bis  $5 \text{ V}$  aus. Dieses Signal wird als Triggersignal genutzt und aktiviert die Messwertaufzeichnung bei einem Stempelweg von  $20 \text{ mm}$  über der Kartonprobe bzw. stoppt diese nach dem Zyklus an gleicher Position. Auf diese Weise ist auch die Systemzeit verschiedener Messungen vergleichbar.

## 5 Experimentelle Untersuchungen zum Ziehprozess von Karton

### 5.1 Untersuchungen zur Vorauswahl von Einflussgrößen auf den Ziehprozess

Auf den Ziehprozess haben zahlreiche Größen und Bedingungen Einfluss. Die Menge der Einflüsse lässt sich wie in Tabelle 1 darstellen.

**Tabelle 1:** Systematik der Einflussgrößen auf den Ziehprozess von Karton

<b>Material</b>		
Stoffbedingte Eigenschaften	Strukturbed. Eigenschaften	Grundeigenschaften
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faserart</li> <li>- Fasereigenschaften</li> <li>- Füll- und Hilfsstoffe</li> <li>- Mengenanteile</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Porosität</li> <li>- Blattbildungsprozess</li> <li>- Ausrüstung, Veredelung</li> <li>- Lagenaufbau</li> <li>- Flächenbezogen Masse</li> <li>- Dichte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Viskoelastizität</li> <li>- Anisotropie</li> <li>- Inhomogenität</li> <li>- Zweiseitigkeit</li> <li>- Hygrokopizität</li> </ul>
Rheologische Eigenschaften	Sorptive Eigenschaften	Oberflächeneigenschaften
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Biegesteifigkeit</li> <li>- Komprimierbarkeit</li> <li>- Zugfestigkeit</li> <li>- Dehnungen</li> <li>- Stauchfestigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adsorption, Desorption</li> <li>- Quellung, Schrumpfung</li> <li>- Feuchte, Präparation</li> <li>- Wärmeleitung, Wärmeübergang</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rauheit</li> </ul>
<b>Technologie</b>		
Form- und Format	Arbeitsorgane	Prozess
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geometrie der Grundfläche</li> <li>- Bodenrundung</li> <li>- Format</li> <li>- Ziehhöhe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ziehspaltbreite</li> <li>- Ziehbüchsenrundung</li> <li>- Konizität Stempel</li> <li>- Stempelrundung</li> <li>- Höhe der Ziehbüchse</li> <li>- Werkstoff</li> <li>- Oberflächenrauheit</li> <li>- Höhe der Ziehbüchse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperatur Ziehbüchse</li> <li>- Temperatur Stempel</li> <li>- Temperatur Kalibrierbüchse</li> <li>- Temperaturverteilung</li> <li>- Temperaturdifferenz Faltenhalterkraft</li> </ul>
<b>Bewegungstechnik</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wegverlauf</li> <li>- Geschwindigkeitsverlauf</li> <li>- Beschleunigungsverlauf</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bewegungsgesetze</li> <li>- Bewegungs-synchronisierung</li> <li>- Trägheiten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Taktzeit</li> <li>- Regelabweichung, Regelgüte</li> </ul>

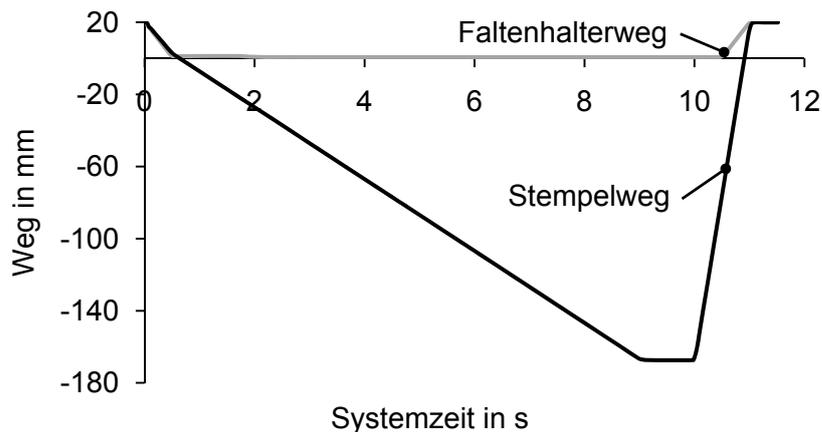
Die Einbeziehung aller Einflussgrößen ergibt einen zu hohen Versuchsumfang und erschwert das gezielte Erarbeiten von Korrelationen. Daher ist durch die folgenden Untersuchungen eine Vorauswahl von Parametern erforderlich, deren Einfluss wesentliche Änderungen in Qualität und Kraftkurve erwarten lässt.

### Material

Für grundlegende Untersuchungen zu den technologischen Einflussgrößen des Prozesses wird innerhalb der vorliegenden Arbeit ein repräsentatives Material als Grundlage gewählt, um die strukturspezifischen Einflussgrößen zu fixieren. Der Ziehkarton ZKH der Fa. Mayr/Melnhof ist ein in der Praxis gängiges Material und für die Untersuchungen geeignet. Es ist ein ungestrichener Triplexkarton (UT2) mit Sekundärzellstofffasern als Decklage. Einlage und Bodenlage bestehen aus rezyklierten Fasern (siehe Anlage 3). Zusätzlich ist die Oberfläche der Decklage mit einer Seifenlösung vom Hersteller präpariert. Die Änderungen der prozentualen Stoffanteile des Materials sind in verschiedenen flächenbezogenen Massen gering, so dass der Einfluss struktureller Eigenschaftsänderungen wie Stoffzusammensetzung, Art der Stoffe, Dichte etc. vernachlässigbar ist.

### Bewegungstechnik

Der Einfluss des Antriebes und der bewegungstechnischen Größen nach Tabelle 1 wird durch die Wahl eines gleichbleibenden Bewegungszyklus minimiert (Abbildung 40).



**Abbildung 40:** Wegverlauf von Stempel und Faltenhalter

Nach Berühren der Kartonprobe beschleunigt der Stempel auf eine Geschwindigkeit von 20 mm/s und fährt mit dieser Geschwindigkeit bis in seine Endlage in der Kalibrierbüchse. Der Faltenhalter klemmt die Kartonprobe kurz bevor der Stempel diese erreicht. Auf diese Weise sind Aussagen zum Einfluss technologischer Größen auf die Qualität der Formteile vom Systemverhalten der Versuchseinrichtung weitgehend entkoppelt. Die Beschleunigung nach Aufsetzen des Stempels auf das Material ist vernachlässigbar. Dementsprechend können die Trägheitskräfte, die durch diese Beschleunigung entstehen, vernachlässigt werden. Eine Änderung bewegungstechnischer Größen während dem Durchfahren der Ziehbüchse erzeugt Trägheitskräfte, verändertes Regelungsverhalten und gleichzeitig ist das Materialverhalten insbesondere die mechanischen Eigenschaften des Materials von der Beanspruchungsgeschwindigkeit abhängig.

### Technologie

Für eine gezielte Ermittlung von Zusammenhängen durch Variation der Einflussgrößen ist eine weitere Eingrenzung der in Tabelle 1 aufgelisteten Menge technologischer Einflussgrößen erforderlich. Die Untersuchung der geometrischen Gestaltung der Grundfläche und von Größeneffekten bei unterschiedlichen Formaten ist eine Entwicklungszielstellung für die eine Wissensbasis zu variierbaren Prozessgrößen Voraussetzung ist. Den Untersuchungen im Rahmen der Arbeit wird eine zylindrische Grundflächenform mit einem Durchmesser von 110 mm zugrundegelegt, um bei vergleichbaren Anwendungen mit der Praxis die qualitativen Änderungen einschätzen zu können.

In den Arbeiten von (Scherer, 1932), (Heinz, 1966) und (Hauptmann et al., 2010) wird der Einfluss von Ziehbüchsen- und Stempelrundung, Oberflächeneigenschaften der Werkzeuge und Konizität des Stempels untersucht. Die Rundungen der Arbeitsorgane haben vergleichsweise geringen Einfluss. Nach Erfahrungen der Praxis ist für die Ziehbüchse ein Radius von 3 mm und für den Stempel ein Radius von 0,2 mm geeignet.

Die Oberflächen der Arbeitsorgane dagegen haben signifikanten Einfluss. Eine Einbeziehung in die Untersuchungen lässt dennoch wenig Erkenntnisgewinn erwarten, da fertigungstechnisch mit vergleichsweise geringem Aufwand eine hochwertige Oberfläche herstellbar ist. Die weitere Verringerung des Reibwiderstandes durch die Oberfläche ist vielmehr im Zusammenhang des tribologischen Systems Stahl – Papier als eigenständiges Forschungsthema zu betrachten, ähnlich wie es aus der Tiefziehtechnik von Metallblech bekannt ist. Für die Untersuchungen werden die Arbeitsorgane daher an allen Kontaktflächen mit dem Karton auf eine Rautiefe  $R_a$  von 0,2  $\mu\text{m}$  poliert. Es ist zu beachten, dass eine Differenz der Reibkoeffizienten zwischen Karton/Ziehbüchse und Karton/Stempel entscheidend für das Rissverhalten der Formteile ist. Ist der Reibkoeffizient zwischen Stempel und Karton geringer als der zwischen Ziehbüchse und Karton wird das Material an der Stempelrundung innerhalb der Ziehbüchse weiter beansprucht und es kommt zu ausgeprägtem Rissverhalten am Boden des Formteils, wie es auch (Scherer, 1932) beschreibt (siehe Abschnitt 2.2.3). Der Unterschied beider Reibkoeffizienten steht im Zusammenhang mit der Zweiseitigkeit des Materials (Hauptmann et al., 2010). Das zugrunde liegende Material ZKH der Fa. Mayr Melnhof weist bei Prüfung am Tribometer von CETR Typ UTM-2 mit einem auf  $R_a$  0,2  $\mu\text{m}$  polierten Probenkörper aus dem identischen Material der Arbeitsorgane (Stahl X210 CrW12) auf Ober- und Unterseite annähernd den gleichen Reibkoeffizienten von 0,125 auf. Dementsprechend lässt sich ein Unterschied des Reibkoeffizienten durch die Oberflächenrauheit des Stempels herstellen. Eine Rauheit von  $R_z$  6,3 ist nach Vorversuchen ausreichend um keine verstärkte Rissbildung zu erhalten.

Die Anpassung des Ziehspaltes ist für die Komprimierung des Materialüberschusses bei ansteigender Ziehhöhe entscheidend. Eine Variation dieser Einflussgröße ist nicht zweckmäßig, da die Einstellung durch spanende Bearbeitung des Stempels erfolgt. In (Tenzer, 1989) wird für das Spaltmaß zwischen Ziehbüchse und Stempel ein Richtwert von 0,5 bis 0,75 facher Materialdicke angegeben. Das unterschiedliche Komprimierungsverhalten verschiedener Kartonsorten erfordert dennoch eine jeweils spezifische Anpassung des Ziehspaltes durch Verringerung des Stempeldurchmessers bis rissfreie Formteile erreicht werden. Typisch für zu geringe Spaltmaße sind Abrisse an der Bodenfläche bzw. Ausstanzungen des Bodens. Gleichzeitig sind Temperaturdifferenz, Wärmeenergiemenge,

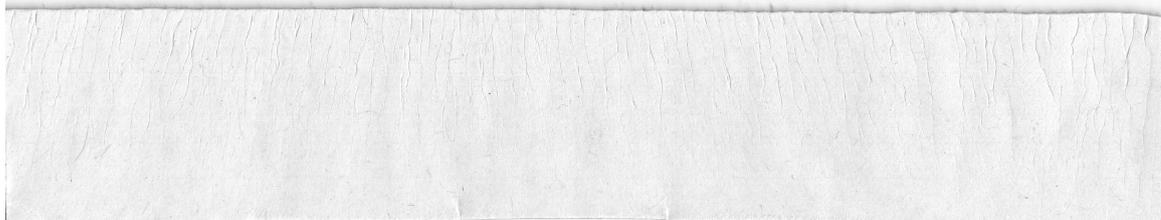
Faltenhalterkraft und flächenbezogene Masse des Materials zu beachten, so dass zum Einrichten des Ziehspaltes ohne Kenntnis des Zusammenhangs dieser Größen eine iterative Vorgehensweise innerhalb der Voruntersuchungen durchgeführt wird.

Neben dem Ziehspalt hat die Konizität des Stempels Einfluss auf die Komprimierung über der Zarge, da der Materialüberschuss entsprechend ansteigt. Tenzer beschreibt einen Zusammenhang durch den eine konstante Verteilung der Presskraft über der Ziehhöhe erreicht wird (Tenzer, 1989). Die nach den Gleichungen 2.3 bis 2.7 berechnete Konizität des Stempels von  $0,59^\circ$  bewirkt innerhalb der Voruntersuchungen eine schwärzungsfreie Zarge, während eine zylindrische Stempelform zum Zargenrand hin zunehmende Schwärzung erzeugt (Abbildung 41).

a) zylindrischer Stempelkopf



b) konischer Stempelkopf



**Abbildung 41:** Vergleich von Formteilzargen mit zylindrischem und konischem Stempelkopf

Scherer beschreibt eine bessere Umformbarkeit von Karton und Pappe bei ansteigender Wärmeenergiemenge (Scherer, 1932). Bei gleichbleibender Kontaktzeit der Arbeitsorgane mit dem Karton aufgrund des gewählten und unveränderten Bewegungszyklus und konstantem Format bei einer Ziehhöhe von 25 mm, sowie näherungsweise konstanter Materialdichte und Wärmeleitfähigkeit ist die zugeführte Wärmeenergiemenge proportional der Summe der Temperaturen von Ziehbüchse  $T_{ZB}$  und Stempel  $T_{ST}$ . Im Weiteren wird die Wärmeenergiemenge daher als Parameter mit Hilfe der Temperatursumme von Stempel und Ziehbüchse beschrieben. Für die Voruntersuchungen zeigt sich, dass eine Temperatursumme über 200 K geeignet ist, um die Arbeitsorgane einzurichten. Bei mehr als 200 K werden verschiedene Temperaturdifferenzabstufungen von 100 K bis 0 K zwischen Stempel und Ziehbüchse gewählt. Auf diese Weise wird der Ziehspalt um bis zu 0,13 mm beeinflusst.

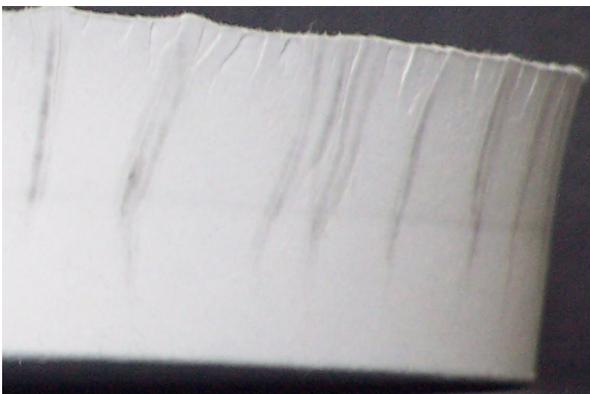
Eine weitere Möglichkeit zur Beeinflussung der Komprimierung ist die Dicke des Kartons, die sich mit der flächenbezogenen Masse ändert. Die Nutzung des Materials mit einer flächenbezogenen Masse von 510 und 600 g/m<sup>2</sup> bringt eine Dickenänderung um ca. 0,12 mm. Die einhergehende Erhöhung der Komprimierung mit Hilfe der Temperaturdifferenz und der flächenbezogenen Masse lässt die schrittweise Einstellung des Stempeldurchmessers zu.

Ein Abriss am Formteilboden kann gleichermaßen durch zu geringe oder deutlich zu hohe Spaltmaße im Ziehspalt entstehen. Ein zu geringer Ziehspalt erzeugt zu hohe Verdichtungen, die zur Schädigung des Materials führt, ähnlich wie es bei Schneid- und Stanzvorgängen bekannt ist. Ein zu großer Ziehspalt erhöht die freie Länge des Materials, die auf Zug beansprucht ist. Es entsteht eine höhere und länger andauernde Belastung an der Ziehbüchsenrundung. Am Ergebnis ist die genaue Ursache nicht erkennbar. Zusätzlich hat die Aufdickung des Materials über der Ziehhöhe Einfluss auf die Komprimierung in der Ziehbüchse. Auf diese hat vorrangig der Faltenhalter Einfluss. Bei zu geringen Faltenhalterkräften entsteht eine verstärkte örtliche Ansammlung des Materialüberschusses an wenigen Stellen des Zargenumfangs. An diesen Stellen wird eine ausgeprägte Komprimierung und demnach eine hohe Reibkraft erzeugt, die den Riss des Materials zur Folge hat. Zu hohe Faltenhalterkräfte dagegen bringen eine zu hohe Zugspannung an der Einlaufkante auf und das Material liegt zu nahe an seiner Bruchkraft. Aus diesem Grund wird bei jeder Iterationsstufe die Faltenhalterkraft variiert. Das Spaltmaß wird so eingestellt, dass eine Variation der vorstehend beschriebenen Größen möglich ist. Die Untersuchungen ergeben dafür eine Maß von 0,45 mm.

Aus diesen Untersuchungen wird deutlich, dass Temperaturdifferenz und flächenbezogene Masse für die Variation der Komprimierung geeignet sind. Es sind von beiden Größen auch eigenständige Wirkungen zu erwarten. Durch die Temperaturdifferenz ändert sich die Temperaturverteilung im Material und aufgrund des thermodynamische Zusammenhangs, der in (Wilhelmsson, 1995), (Gaillemard, 2006) und (Roonsprasang, 2008) beschrieben wird, die Feuchte im Karton. Die höhere Dicke des Materials bei größerer flächenbezogener Masse bedeutet eine größere Menge Wasser im Material und einen längeren Weg der Wärme bis zur Materialmitte bzw. des Wassers bis zur Oberfläche bei Diffusion.

Die Faltenhalterkraft wird in bisherigen wissenschaftlichen Untersuchungen nicht durch bestimmte geregelte Kraftwerte variiert, sondern entsteht durch Aufdickung unter der auf einen bestimmten Abstand (Richtwert 0,2 mm) eingestellten Faltenhalterplatte im Verlauf des Umformvorganges. Die Voruntersuchungen zeigen, dass die Faltenhalterkraft maßgeblichen Einfluss insbesondere auf die Verteilung des Materialüberschusses hat (Abbildung 42).

a) 100 N Faltenhalterkraft



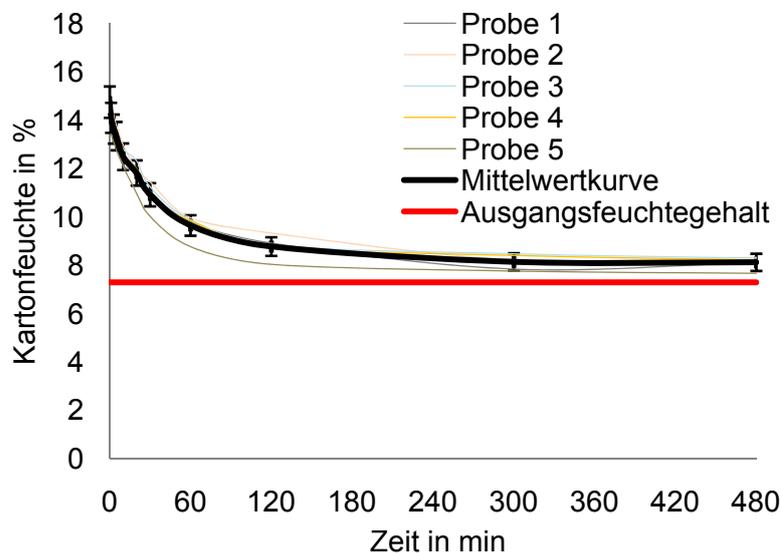
b) 1500 N Faltenhalterkraft



**Abbildung 42:** Vergleich der Faltenverteilung bei 100 und 1500 N Faltenhalterkraft

Bei Erhöhung der Faltenhalterkraft werden die Faltenabstände geringer. Der Vergleich der Formteile in Abbildung 42 zeigt, dass die Verringerung der Abstände der Falten und deren Verteilung geringere lokale Schwärzungen und Zipfelbildung erzeugen.

Die Untersuchungen von (Scherer, 1932) beschreiben die Feuchte des Materials als wichtigsten Einfluss für die Verbesserung der Formteilqualität. Daher wird die relative Feuchte des Kartons als Parameter in die Untersuchungen einbezogen, um einen Vergleich ihres Einflusses zu den anderen Größen herzustellen. Bei der Bestimmung der Feuchtwerte ist das hygroskopische Materialverhalten und die Sorptionshysterese (nach Abbildung 3, Abschnitt 2.1.3) von Papier und Karton zu beachten. Die Ausgangsfeuchte des Ziehkartons ZKH liegt nach Herstellerangaben bei  $7,3 \% \pm 0,4 \%$ . Ausgehend von dieser relativen Feuchte wird das Material bei  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $99 \%$  Luftfeuchte 24 Stunden konditioniert. Im Klima des Versuchsträgers bei einer Temperatur von  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $54 \%$  Luftfeuchtigkeit wird die Massendifferenz bezogen auf die Ausgangsfeuchte der Kartonprobe und damit der aktuelle Wert der Feuchte bestimmt. Es stellt sich ein Desorptionsverlauf nach Abbildung 43 ein.



**Abbildung 43:** Desorptions-Zeit-Verlauf für MM ZKH 510g/m<sup>2</sup>

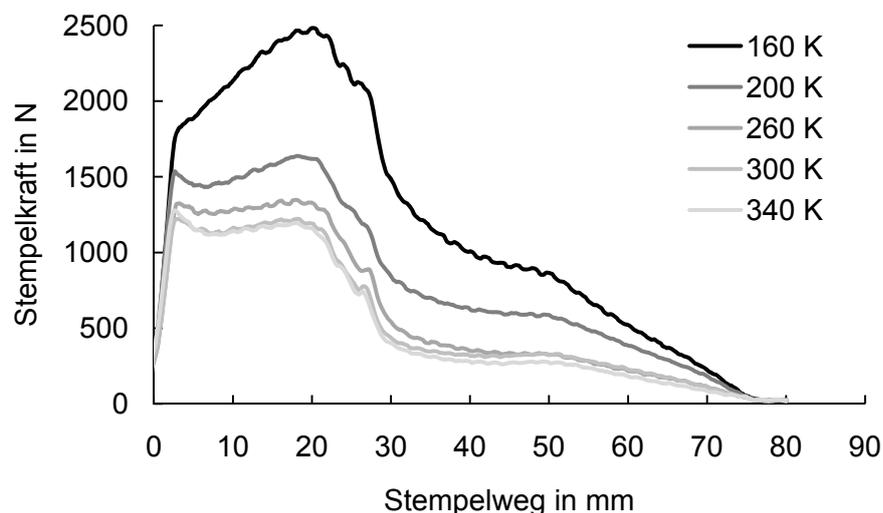
Die ermittelten Feuchtwerte können von den tatsächlichen Werten abweichen, da die klimatischen Bedingungen während der Lieferung unbekannt sind und ein korrekter Absolutwert nur über die Ermittlung der jeweiligen Trockenmasse der Probe bestimmt werden kann. Da die Differenzwerte der Feuchte im Bezug zum Ausgangszustand konstant bleiben und alle Proben aus einer Charge entnommen werden, so dass Abweichungen aufgrund einer unterschiedlichen klimatischen Vorgeschichte ausgeschlossen werden, sind die errechneten Feuchtwerte für die Untersuchungen nutzbar und führen zu belastbaren Aussagen. Für die Einstellung der Feuchtedifferenz ist eine Abweichung von  $\pm 0,3\%$  zu berücksichtigen.

Nach diesen Untersuchungen werden die fixierten Größen und die für die experimentellen Untersuchungen variablen Größen festgelegt. Tabelle 2 zeigt diese Größen zusammenfassend. Die gewählten variablen Größen Faltenhalterkraft, Temperatursumme, Temperaturdifferenz, flächenbezogene Masse und Feuchte haben sich als entscheidende Einflussgrößen erwiesen.

**Tabelle 2:** Übersicht fixierter und variabler Größen für die experimentellen Untersuchungen

Fixierte Größen		Variable Größen (Parameter)	
Benennung	Werte	Benennung	Wertebereich
Karton	ZKH von MM	Faltenhalterkraft	0 – 10 kN
Oberflächenrauheit	ST: $R_z$ 6,3 ZB, FH, KB $\leq R_a$ 0,2	Temperatursumme	0 – 400 K
Konizität Stempel	0,59°	Temperaturdifferenz	0 – 160 K
Geschwindigkeit des Stempels (konstant)	20 mm/s	Feuchte des Materials	7,3 – 15%
Form und Format	zylindrisch, $\varnothing$ 110 mm	Flächenbez. Masse	510 – 600 g/m <sup>2</sup>
Höhe der Ziehbüchse	50 mm		
Ziehhöhe	25 mm		
Ziehspaltminimum	0,45 mm		
Stempelrundung	0,2 mm		
Ziehbüchsenrundung	3 mm		

Die Voruntersuchungen zeigen, dass die Variation dieser Parameter deutliche Änderungen des charakteristischen Verlaufes der Stempelkraft erzeugen. Bei Erhöhung der Temperatursumme werden Kraft und Arbeitsbedarf verringert (Abbildung 44).

**Abbildung 44:** Stempelkraftverlauf bei Variation der Temperatursumme

Die Änderungen im Verlauf der Kraftkurve lassen einen Zusammenhang mit der Formteilqualität erwarten. Ähnlich charakteristische Änderungen sind auch für Faltenhalterkraft, Temperaturdifferenz, flächenbezogene Masse und Feuchte des Materials zu beobachten. Eine Untersuchung dieser Größen lässt daher entsprechende Rückschlüsse zwischen Kraftverlauf und Qualität erwarten.

## 5.2 Ermittlung von Kenngrößen für den Ziehprozess

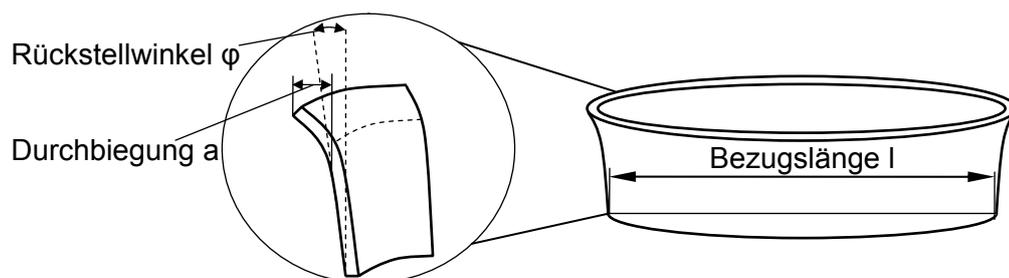
### 5.2.1 Bewertungskriterien für die Qualität von Ziehteilen

#### 5.2.1.1 Formhaltigkeit

Innerhalb der vorliegenden Arbeit wird mit der Bewertung der Qualität der Ziehteile eine weitere Problematik aufgeworfen, die in der Verpackungstechnik immer wieder thematisiert wird. Bei Versagensfällen durch mechanische Belastungen werden Ersatzprüfmethode wie z. B. Stapelstauchwiderstand bei Schachteln oder Streifenstauchwiderstand bei Wellenrohpapieren herangezogen. Für Anforderungen wie Dichtigkeit sind Prüfmethode entwickelt worden und ermöglichen die Gewinnung definierter Werte. Bei der Beurteilung von Formhaltigkeit und optischer Qualität von Formteilen ist die Bestimmung geeigneter Messgrößen schwieriger. Qualitätsstandards und –anforderungen werden in der Praxis aufgrund von Kundenaussagen durch Marketingabteilungen und Anwendungstechniker definiert. Dennoch ist die Grundlage der Bewertung das subjektive Empfinden. Für tiefgezogene Formteile stellt (Heinz, 1966) fest, dass auch für wissenschaftliche Untersuchungen bislang keine objektive Bewertungsgrundlage existiert. An diesem Zustand hat sich nichts geändert.

Für die Beschreibung von Formteilmerkmalen sind aussagekräftige Größen notwendig, die entsprechend reproduzierbar gemessen werden können. Solche Größen lassen sich durch die Analyse auftretender Defekte gewinnen. Eine Auflistung der Defekte zeigt Anlage 4. Grundsätzlich werden erkennbare strukturelle Schädigungen wie Risse und Blasen subjektiv als gravierende Defekte nicht genauer bewertet, da das Formteil im Grunde bereits unbrauchbar ist. Der Einfluss der Prozessparameter auf die Qualität strukturell intakter Formteile erfordert eine detailliertere Bewertung.

Für die Bewertung der Formhaltigkeit sind Rückstellung und Durchbiegung der Zarge geeignete Kriterien. Die Ovalität des Zargenrandes gibt die akkumulierte Wirkung von Rückstellung und Durchbiegung wieder. Für beide Abweichungen sind jedoch unterschiedliche Ursachen zu erwarten, die demnach durch die Messung der Ovalität als Abweichung von der Grundflächenform nicht zu erfassen sind. Es werden jeweils in Längs- und Querrichtung des Kartons digitale Aufnahmen des Formteils mit feststehender Perspektive ausgewertet. Für jedes Formteil werden jeweils zwei Werte für den Rückstellwinkel  $\varphi$  und den horizontalen Abstand  $a$  des Zargenrandes von dem Punkt, an dem die Zarge vom geraden Verlauf abweicht, in Längs- und in Querrichtung ermittelt (Abbildung 45).

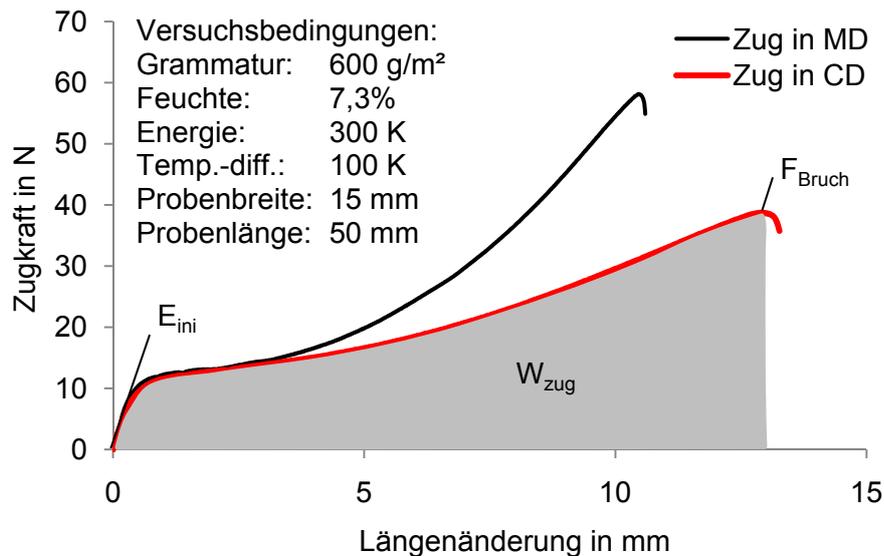


**Abbildung 45:** Schematische Darstellung der Messgrößen Rückstellwinkel  $\varphi$  und Durchbiegung  $a$  der Zarge am Formteil

Über den bekannten Durchmesser der Grundfläche und die gemessene Bezugslänge wird der Bezug der digitalen zur realen Abweichung  $a$  hergestellt, mit der die Durchbiegung der Zarge beschrieben werden kann. Für Rückstellwinkel und horizontalen Abstand liegen nach der Auswertung von drei Formteilen in MD und CD je sechs Messwerte vor. Alle Antwortgrößen werden als t-verteilte statistische Messgrößen betrachtet. Mit 12 Messwerten wird für die Formwerte eine statistische Sicherheit gewährleistet.

### 5.2.1.2 Formstabilität

Auf die Formstabilität lässt sich ein bedingter Rückschluss durch die Formhaltigkeit ziehen. Eine bestimmte Festigkeit der Verpressung ist notwendig, um den Spannungen entgegen zu wirken, die durch die Rückstellkräfte des Materials bei Biegung und eine mögliche Nachrocknung entstehen. Es ist jedoch darüber hinaus keine Aussage zur Festigkeit des Formteils insbesondere im Bezug auf das wieder Öffnen der Falten durch äußere Belastungen möglich. Eine direkte Messung des Widerstandes gegen das Rückformen des Ziehteils in Richtung des Ausgangszustandes ist technisch nicht ohne weiteres realisierbar, da das radiale und gleichzeitig winkelige Öffnen des Ziehteils durch eine Art Spreizvorrichtung erfolgen müsste. Einer indirekten Messung liegt folgende Überlegung zugrunde: Die wesentliche Festigkeit des Ziehteils wird durch die verpressten Falten erreicht. Das heißt, ein definiertes Aufformen dieser Falten durch eine Zugbelastung der von der Grundfläche abgeschnittenen Zarge erlaubt eine Aussage zur Festigkeit des Ziehteils gegen dessen Rückformung. Um das Auffalten ideal nachzustellen, müsste entsprechend dem Verlauf des Materialüberschusses über der Zargenhöhe die Zarge in einem bestimmten Radius aufgeformt werden. Auf diese Weise erfolgt eine Gleichverteilung der Beanspruchung, da die Dehnung mit dem Materialüberschuss proportional ist. Eine Aussage lässt sich jedoch bereits bei einachsiger Zugprüfung gewinnen, wenn nicht die gesamte Zargenhöhe beansprucht wird, da nahe der Bodenschnittstelle der Materialüberschuss Null ist und demnach nur eine Zugprüfung des Ausgangsmaterials bei geringer Breite erfolgt. Bei Wahl eines hinreichenden Abstandes von der Bodenflächenkante der Zarge wird die Aufformung der Falten entsprechend der Schnitthöhe gemessen. Aus diesem Grund werden aus der Zarge in Längs- und Querrichtung des Materials mit 15 mm Abstand vom Zargenrand Standardzugproben auf eine Länge von 50 mm Länge zugeschnitten und mit einachsiger Zugspannung beaufschlagt. Die Zugprüfung erfolgt an einer Standard-Zugprüfmaschine der Fa. Zwick, Typ UPM Z020. Für die Kraftmessung wird ein Kraftsensor mit einem Messbereich von 200 N eingesetzt. Es werden Dehnungen von bis zu 28 % erreicht. Dehnungen des Ausgangsmaterials bei einem Standardzugversuch liegen bei 10 mm Einspannlänge maximal im Bereich von 10-12 %. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein Aufformen des verpressten Materials die hohen Dehnungswerte verursacht. Für einen optimalen Widerstand des Formteils ist entscheidend, dass zu Beginn der Beanspruchung eine möglichst hohe Kraft aufgewendet werden muss, um die Falten aufzuformen. Für diese Eigenschaft scheint grundsätzlich der initiale E-Modul  $E_{ini}$  im Bereich der ersten Datenwerte geeignet (Abbildung 46).



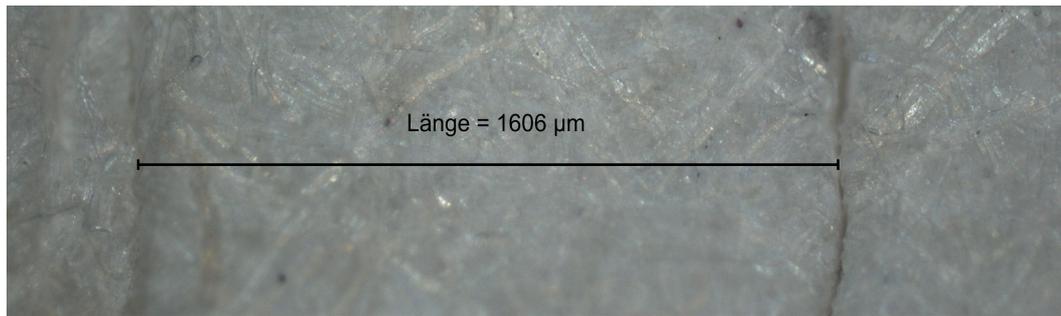
**Abbildung 46:** Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Zarge für das Material MM ZKH nach dem Umformen

Ein derartiger E-Modul ist jedoch beim Aufformen der Falten nicht als Kenngröße für eine elastische Dehnung geeignet, da nicht von einer elastischen Verformung auszugehen ist. Zudem wird nicht berücksichtigt welcher Widerstand einer weiteren plastischen Verformung entgegengesetzt wird. Die Bruchkraft  $F_{\text{Bruch}}$  gibt keine Auskunft über den Widerstand der in der Anfangsphase des Aufformens aufgewendet werden muss. Die Zugarbeit bis zur Bruchkraft dagegen erfasst den gesamten Bereich der Kurve und ist geeignet das Aufformverhalten zu beschreiben. Aus einem Formteil werden je zwei Proben in MD und CD geprüft. Für jeden Versuchspunkt entstehen 12 Messwerte, die das Ergebnis statistisch absichern.

### 5.2.1.3 Optische Qualität

Der Boden des Formteils erfährt keine wesentlichen optischen Veränderungen während dem Umformen. Signifikante Wirkungen sind dagegen an der Zarge festzustellen. Aus Defekten wie lokalen Schwärzungen, einheitlicher Schwärzung und Vergilbung, Rissen in der Zarge und am Bodenrand, Zipfelbildung und Blasenbildung (siehe Anlage 4) wird deutlich, dass sowohl Schäden in der Materialstruktur als auch an der Oberfläche zu einer Beeinträchtigung des optischen Erscheinungsbildes führen. In den Voruntersuchungen von Abschnitt 5.1 hat sich gezeigt, dass ein direkter Zusammenhang zwischen dem Auftreten lokaler Schwärzungen bzw. Zipfelbildung und der Anzahl bzw. Verteilung der Falten am Zargenumfang besteht. Der Abstand zwischen den einzelnen Falten ist proportional zur ihrer Anzahl und die zugehörige Standardabweichung lässt eine direkte Aussage zur Verteilung der Falten zu. Mit Hilfe des Faltenabstandes sind demnach beiden optischen Defekte beschreibbar.

Die Messung der Faltenabstände  $F$  erfolgt an einem Mikroskop der Fa. Nikon vom Typ Eclipse LV 100 mit einem Objektiv bei fünffacher Vergrößerung. Dazu werden die Zargen von der Grundfläche getrennt und als Abwicklung unter Aufsicht mit fünffacher Vergrößerung ausgemessen (Abbildung 47).



**Abbildung 47:** Mikroskopische Aufnahme der Falten in der Zarge bei fünffacher Vergrößerung

Die Kalibrierung der Auflösung erfolgt über eine Kalibrierungsmessung mit einem Glaslineal. Dadurch wird ein auf ca.  $10 \mu\text{m}$  genauer Kalibrierfaktor ermittelt, der die Pixelauflösung des Bildes in Mikrometer umrechnet. Bei der Messung ist ein konstanter Abstand vom Zargenrand zu gewährleisten, um die Reproduzierbarkeit der Messung sicher zu stellen. Nahe dem Zargenrand sind die Falten deutlich sichtbar, so dass ein geringer Abstand von 3 mm gewählt wird. Die Falten weisen meist einen unregelmäßigen Verlauf über der Zargenhöhe auf. In Folge stellt sich eine verhältnismäßig hohe Standardabweichung für die Messung ein. Aus diesem Grund werden für drei Formteile jeweils in Längs- und Querrichtung des Materials zehn Faltenwerte ermittelt. Für jeden Versuchspunkt entstehen 60 Werte, die eine ausreichende statistische Sicherheit für die Werte des Faltenabstandes sichert.

#### 5.2.1.4 Gesamtqualitätswert

Die Untersuchung der Formteilqualität mit Hilfe der vorstehend beschriebenen Messgrößen ist für die Beschreibung einzelner Qualitätsziele Voraussetzung und ermöglicht eine zugeschnittene Optimierung. Eine neutrale Bewertung der Gesamtqualität der Formteile erfordert eine kombinierte Größe, die alle Einzelgrößen berücksichtigt. Die unterschiedlichen Wertebereiche der Qualitätskenngrößen lassen sich durch eine Normierung auf die jeweilige Variationsspanne anpassen. Mit dem Mittelwert  $x_i$  der jeweiligen Qualitätsgröße eines Versuchspunktes  $i$ , dem kleinsten aufgetretenen Wert  $x_0$  und dem größten aufgetretenen Wert  $x_{\text{max}}$  aller Messung wird nach

$$X_{Q,i} = \frac{(x_i - x_0)}{(x_{\text{max}} - x_0)} \quad \text{mit} \quad 0 \leq X_{Q,i} \leq 1 \quad (5.1)$$

der normierte Wert  $X_{Q,i}$  der jeweiligen Qualitätskenngröße für die Berechnung des Gesamtqualitätswertes bestimmt. Tabelle 3 zeigt die innerhalb aller in der Arbeit durchgeführten Messungen aufgetretenen Maximalwerte der Qualitätskenngrößen und die daraus entstehenden Normierungswerte.

**Tabelle 3:** Variationsspanne und Normierungswerte der Qualitätskenngrößen

	Faltenabstand	Rückstellwinkel	Zargendurchbiegung	Zugarbeit
$x_0$	5,68 mm	0,41 °	0,09 mm	131,0 mJ
$x_{\text{max}}$	0,67 mm	7,1 °	1,51 mm	494,4 mJ
$x_{\text{max}}-x_0$	5,01 mm	6,69 °	1,42 mm	363,4 mJ

Die Zargendurchbiegung  $b$ , der Rückstellwinkel  $\varphi_R$ , der Faltenabstand  $F$  und die zugehörige Standardabweichung  $s_F$  beschreiben bei ansteigenden Werten eine Verminderung der Formteilqualität. Höhere Zugarbeitswerte  $A_z$  dagegen sind für bessere Formteilqualität charakteristisch. Dementsprechend wird durch

$$Q = X_b + X_{\varphi_R} + (X_F + X_{s_F}) - X_{A_z} \quad \text{mit} \quad -1 \leq Q \leq 3 \quad (5.2)$$

ein Gesamtqualitätswert  $Q$  generieren. Mit dieser Kenngröße lässt sich feststellen welche Parameter in jedem Fall die Gesamtqualität verbessern. Auf diese Weise ist eine Optimierung der Gesamtqualität des Formteils möglich.

### 5.2.2 Bestandteile und Kenngrößen des Stempelkraftverlaufes

Die experimentellen Untersuchungen sind auf Wirkungen fokussiert, die vom Prozess und der Änderung der Prozessparameter ausgehen. Dementsprechend ist es entscheidend, die Reib- und Formänderungskräfte als Prozesskräfte aus dem komplexen Zusammenhang des Gesamtsystems einzuschätzen und falls notwendig weitgehend zu isolieren. Lotze beschreibt am Beispiel einer Quersiegeleinheit das Systemverhalten des Drehmomentes am Antrieb durch kinetostatische, statische, technologische und reibungsbedingte Momentenanteile (Lotze, 2009). Dieser Ansatz kann entsprechend auf Kraftanteile übertragen werden und ergibt eine Gesamtkraft am Stempel  $F_{ST,ges}$  mit

$$F_{ST,ges} = F_{kin} + F_{stat} + F_r + F_{tech} \quad (5.3)$$

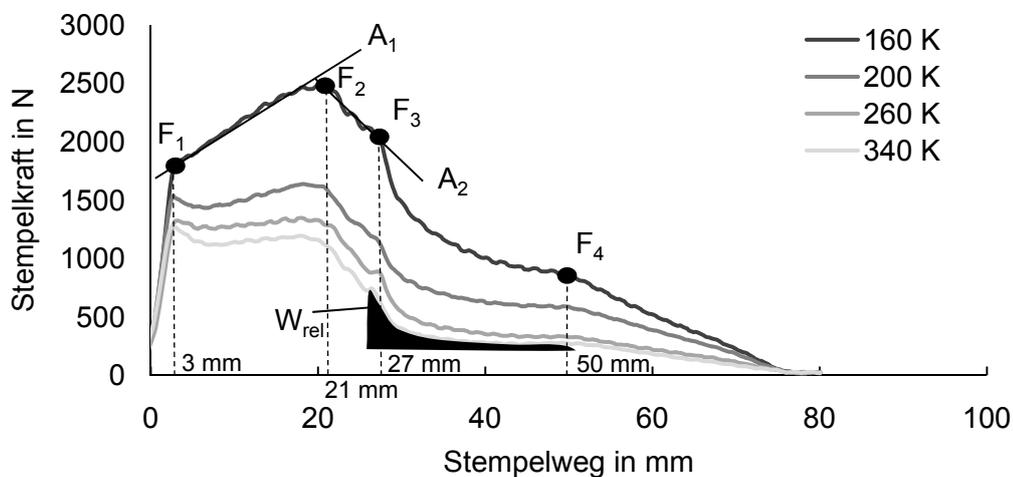
Für die Untersuchung der Wirkmechanismen beim Umformen und des Einflusses der Prozessparameter ist die technologische Kraft  $F_{tech}$  kennzeichnend. Sie beschreibt alle durch das Verarbeitungsgut erzeugten Kraftanteile. Ziel ist es demnach, diese Kraft zu isolieren. Unter der kinetostatischen Kraft  $F_{kin}$  wird die Summe der durch Trägheiten der mechanischen Übertragungsstrecke erzeugten Kraftanteile verstanden. Der Einfluss der Trägheitskräfte auf den Verlauf der Stempelkraft wird durch die Wahl eines gleichbleibenden Bewegungsverlaufes mit konstanter Geschwindigkeit von 20 mm/s eliminiert (siehe Abschnitt 5.1, Abbildung 40). Durch diesen Bewegungszyklus ist ein Einfluss von Schwingungen nicht zu erwarten. Der Versuchsträger kann nur durch die Regelung der hydraulischen Antriebe zu Schwingungen angeregt werden, wenn sich diese im Bereich der Eigenfrequenzen bewegen. (Meyer, 2008) zeigt, dass Eigenfrequenzen und mögliche Erregerfrequenzen keine Übereinstimmungen aufweisen und demnach keine Resonanz auftritt. Der Einfluss der Gewichtskraft wird im statischen Kraftanteil  $F_{stat}$  berücksichtigt. Diese konstante Kraft lässt sich durch eine Linearisierung des Kraftsensors bei beaufschlagter Gewichtskraft kompensieren. Dadurch liegt der Nullpunkt der Kraftmessung bei der Gewichtskraft. Die Reibkräfte  $F_r$  in der mechanischen Übertragungsstrecke entstehen durch die Reibung der drei Linearlager des Stempelschlittens, die Reibung der Zylinderlagerung und die Reibungsverluste im Hydrauliksystem. Alle Kraftanteile der Reibkraft sind beständig vorhanden und können als konstant angenommen werden. Eine Beeinträchtigung der Messungen durch geschwindigkeitsabhängige Reibkraftanteile kann aufgrund der gleichbleibenden Bewegungsgrößen im Zyklus ausgeschlossen werden. Gleichzeitig ist der Einfluss der Temperatur durch Längenänderungen auf die Linearlagerung vernachlässigbar, da im stationären Zustand durch die Isolationslösungen nicht mehr als 50 °C auf die

Lagerstellen einwirken. Die Arbeit ohne Gegenhalter verhindert zudem die Überlagerung des Stempelkraftverlaufes mit der, während des Zyklus ausgeregelten Gegenhalterkraft.

Die entstehende Kraftkurve am Stempel gibt den Verlauf der technischen Kraft  $F_{\text{tech}}$  wieder, der durch die charakteristischen Wirkmechanismen im Prozess erzeugt wird. Dazu gehören die Reibkräfte unter dem Faltenhalter  $F_{R,FH}$ , in der Ziehbüchse  $F_{R,ZB}$  und an der Einlaufkante  $F_{R,EK}$  sowie die Formänderungen am Karton durch Stauchung in Blattebene zu Falten  $F_{St}$  und Biegung  $F_B$ . Mit diesen Kraftanteilen berechnet sich dann die Kraft am Stempel durch

$$F_{ST,ges} = F_{R,FH} + F_{R,ZB} + F_{R,EK} + F_{St} + F_B \quad (5.4)$$

Mit der Variation der Prozessparameterniveaus ändert sich das Aussehen des Kraftverlaufes am Stempel signifikant. Abbildung 48 zeigt am Beispiel verschiedener Temperatursummen von Ziehbüchse und Stempel die Änderungen des Stempelkraftverlaufes.



**Abbildung 48:** Kenngrößen des Kraftverlaufes am Beispiel der Variation der Temperatursumme

Im Verlauf der Kraftkurven sind vier charakteristische Punkte  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  und  $F_4$  erkennbar, die sich mit den Prozessparametern wie der Energiemenge ändern und jeweils eine charakteristische Änderung des Kurvenverlaufes einleiten. Diese Punkte bleiben bei der Änderung der Prozessparameter bestimmbar und werden als Kenngrößen für die Untersuchungen gewählt. Zusätzlich ändern sich systematisch die beiden annähernd linearen Bereiche zwischen 10 und 20 mm bzw. 20 und 27 mm Stempelweg. Aus diesem Grund sind die Anstiege  $A_1$  und  $A_2$  einer Regressionsgeraden in diesen Bereichen geeignete Kenngrößen für die experimentellen Untersuchungen. Das Bestimmtheitsmaß der Regressionsgeraden liegt zwischen 0,95 und 1. Demnach steht der Anwendung einer linearen Regression nichts entgegen. Für die Verpressung und Relaxation des Materials in der Ziehbüchse ist der Bereich zwischen 20 mm und 50 mm Stempelweg kennzeichnend. Ein geeigneter Wert zur Beschreibung dieser Eigenschaft ist die Arbeit im entsprechenden Wegbereich. Der Einfluss der Reibung wird verringert, in dem die durch  $F_4$  gekennzeichnete Reibarbeit im gleichen Wegbereich abgezogen wird.

Die Ermittlung der Kraftwerte, Anstiege und der Relaxationsarbeit als charakteristische Kenngrößen des Kraftverlaufes am Stempel erfolgt an 6 Proben, um eine statistische Absicherung zu gewährleisten.

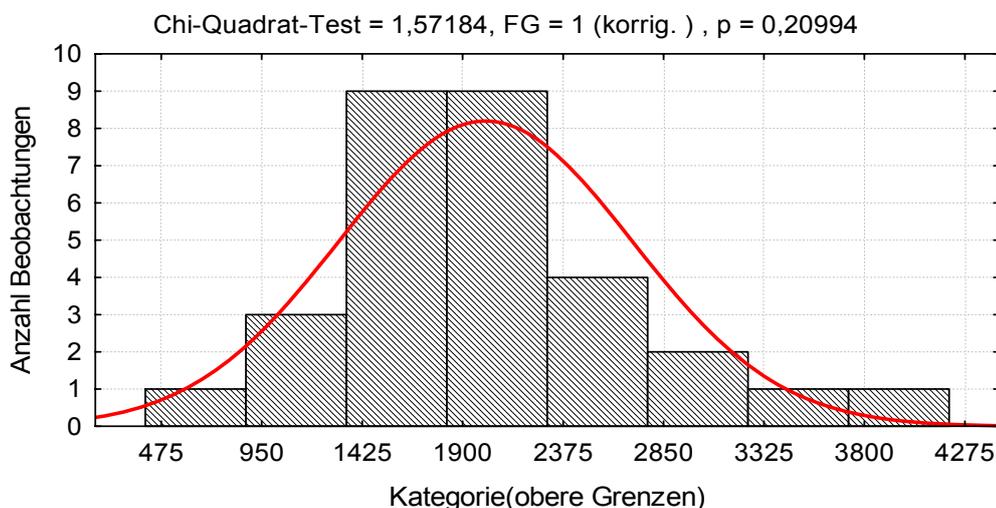
## 5.3 Umformversuche

### 5.3.1 Vorgehensweise

Die in Abschnitt 5.1 beschriebenen Voruntersuchungen zeigen, dass bereits eine Vielzahl möglicher Einflussgrößen zu fixieren sind, um Kenntnisse über den Einfluss technologischer Parameter erarbeiten zu können. Mit Faltenhalterkraft, Temperatursumme, Temperaturdifferenz zwischen Stempel und Ziehbüchse, Feuchte und flächenbezogener Masse des Materials entsteht dennoch ein fünfdimensionaler Versuchsraum. Die Untersuchung des jeweils einzelnen Einflusses der Parameter ist nicht ausreichend. Der Prozess ist ein komplexer Zusammenhang von Einzel- und Wechselwirkungen sowie zufälliger unbekannter Störgrößen. Für die Erfassung der Wechselwirkungen zwischen den Parametern wird in den Methoden der statistischen Versuchsplanung von (Scheffler, 1997) ein geeignetes Werkzeug vorgestellt. Durch einen vollfaktoriellen Versuchsplan wird unter Annahme linearer Effekte ein Regressionspolynom der Form

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_7 \cdot x_1 \cdot x_2 + \dots + b_{32} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \quad (5.5)$$

bestimmt. In das Polynom werden die Einzelwirkungen der Faktoren  $x_1$  bis  $x_5$  sowie die kombinatorischen Wechselwirkungen zweiter bis fünfter Ordnung einbezogen. Die Parameter (auch Faktoren) werden auf zwei Niveaus kombinatorisch variiert. Nach der Transformation der Koordinaten entsprechen die beiden Niveaus a und b den Werten -1 und 1. Der als Planmatrix bezeichnete Versuchsplan lässt sich dann wie in Anlage 5 darstellen. Jeder Versuchspunkt wird mehrfach durchgeführt. Es wird angenommen, dass die Antwortgrößen normal- bzw. t-verteilt sind. Die Prüfung der Verteilung für die Antwortgrößen nach dem  $\chi^2$ -Test zeigt, dass diese Annahme an einem zufällig ausgewählten Versuchspunkt für die Antwortgrößen nicht widerlegt werden kann, da der errechnete p-Wert nach (Weiß, 2007) nicht unterhalb 0,01 liegt (siehe Anlage 6). Am Beispiel der Faltenabstände wird dies mit dem in Abbildung 49 dargestellten Histogramm verdeutlicht, indem sich bei Einteilung der Messwerte in 8 Klassen näherungsweise eine Normalverteilung einstellt.



**Abbildung 49:** Histogramm am Beispiel der Faltenabstände in CD für den Versuchspunkt nach Anlage 6, ermittelt in STATISTICA®

Aus der Planmatrix wird durch Multiplikation der zur jeweiligen Wirkung gehörenden transformierten Parameterniveaus die Matrix der unabhängigen Variablen erstellt (siehe Anlage 7). Zur statistischen Sicherung der Ergebnisse werden die Versuchspunkte mehrfach realisiert. Tabelle 4 zeigt die jeweilige Anzahl der Messungen der verschiedenen Parameter.

**Tabelle 4:** Anzahl der Messungen für die Antwortgrößen

Parameter	Anzahl der Messungen	Parameter	Anzahl der Messungen
Faltenabstand	60	Kraftwerte	6
Durchbiegung	12	Anstieg A1	6
Rückstellwinkel	12	Anstieg A2	6

Die einzelnen Messwerte sowie die Mittelwerte und Varianzen der jeweiligen Versuchspunkte bilden die Antwortmatrix. Der Effekt E eines Parameters oder einer Wechselwirkung errechnet sich mit den zugehörigen Spaltenwerten der Matrix der unabhängigen Variablen  $x_i$ , den Mittelwerten der Messungen  $y_i$  und der Anzahl der Versuchspunkte N zu

$$E = \frac{\sum x_i \cdot y_i}{\frac{N}{2}} \quad (5.6)$$

Durch Vergleich des Effektbetrages mit einer Konfidenzgrenze wird die Signifikanz der Effekte bestimmt. Die Konfidenzgrenze berechnet sich auf Basis des für den Versuchsraum vorgegebenen Konfidenzniveaus von 0,95 bei einer Vertrauenswahrscheinlichkeit 95% und des danach bestimmten t-Wertes sowie den Varianzen der Versuchspunkte  $s_i^2$  nach

$$F_{95} = t_{95} \cdot \sqrt{\frac{4}{N} \cdot \frac{\sum s_i^2}{N}} \quad (5.7)$$

Der Vergleich zeigt in wie weit die Effekte in der Student- bzw. t-Verteilung mit der vorgegebenen Wahrscheinlichkeit enthalten sind oder durch eine Störgröße als zufällige Wirkung bzw. Rauschen zu betrachten sind. Die Regressionskoeffizienten  $b_i$  ergeben sich dann aus

$$b_i = \frac{\sum x_i \cdot y_i}{N} \quad (5.8)$$

Die Konstante  $b_0$  entspricht dem Mittelwert aller  $y_i$ . Das entstehende Regressionsmodell ist so ausgelegt, dass es den Versuchsraum vollständig beschreibt. Dementsprechend nimmt das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  des Modells den Wert 1 an. Für Optimierungen ist ein derartiges Modell nur geeignet, wenn der lineare Ansatz für die Parameter zutreffend ist, was nicht für alle Einflussgrößen zu erwarten ist. Vielmehr lassen sich die maßgeblichen Größen, deren Richtung und gegebenenfalls wichtige Wechselwirkungen bestimmen. Neben der Identifikation der wichtigsten Einflussgrößen ist diese Regressionsanalyse ein geeignetes Werkzeug die Antwortgrößen miteinander zu vergleichen, um Korrelationen festzustellen. Ein Vergleich der Größen erfordert aufgrund unterschiedlicher Wertebereiche die Normierung der Regressionskoeffizienten auf den jeweiligen Wertebereich nach Gleichung 5.1.

Nach diesen Untersuchungen wird der lineare Ansatz der wichtigsten Einflussgrößen überprüft. Auf der Basis der Variation einzelner Parameter auf mindestens fünf Niveaus lässt sich die jeweilige Einzelwirkung an einem Versuchspunkt als Regressionsfunktion wiedergeben. Der erneute Vergleich der Regressionsfunktionen zwischen den Antwortgrößen lässt eine detaillierte Abschätzung möglicher Korrelationen zu.

### **5.3.2 Ermittlung der Parameterniveaus**

Für eine vollfaktorielle Variation der Parameter Faltenhalterkraft, Temperatursumme, Temperaturdifferenz, Feuchte und flächenbezogener Masse ist die Herstellung strukturell intakter Formteile Voraussetzung, da Strukturfehler wie Risse oder Blasen bei der Bewertung der Qualität nicht berücksichtigt werden. Aus diesem Grund werden die Niveaus in Vorversuchen unter Kombination der jeweiligen Extremwerte ermittelt, um einen möglichst großen Versuchsraum abzubilden.

#### **Begrenzungen durch Rissbildung**

Im Bezug auf die Bildung von Rissen am Formteilm Boden sind flächenbezogene Masse und Temperaturdifferenz zwischen Stempel und Ziehbüchse zu beachten. Das gewählte Material steht in den Grammaturen 450, 510 und 600 g/m<sup>2</sup> zur Verfügung. Ein höhere flächenbezogene Masse lässt höhere Bruchlasten bei Zugbeanspruchung und damit größeren Spielraum bei der Parametervariation zu, so dass eine Abstufung von 510 und 600 g/m<sup>2</sup> gewählt wird. Bei maximaler flächenbezogener Masse und minimaler Temperaturdifferenz entsteht die höchste Komprimierung, die bevorzugt Bodenabrisse verursacht. Für eine flächenbezogene Masse von 600 g/m<sup>2</sup> lässt sich eine Temperaturdifferenz von 0 bis 100 K realisieren, bevor die lokale Komprimierung an den Falten zu Rissen am Boden der Formteile führt.

Das Rissverhalten wird gleichzeitig durch Temperatursumme und Feuchte beeinflusst. Die Bruchkraft bei Zugbeanspruchung wird nach (Kubát, 1969) und (Salmén et al., 1985) durch beide Parameter signifikant verringert. Diese Eigenschaft des Materials ist für die Bestimmung der Faltenhalterkraftniveaus zu beachten. Die Faltenhalterkraft erhöht die Zugbeanspruchung im Material. Zu hohe Faltenhalterkraft verursacht Abrisse am Zargenrand. Zu geringe Faltenhalterkraft kann dagegen bei gleichzeitig geringer Temperaturdifferenz, Energie und Feuchte aufgrund zu starker lokaler Materialanhäufung zu komprimierungsbedingtem Abriss am Formteilm Boden führen. Für den gewählten Karton sind 500 N Faltenhalterkraft ausreichend um diesen Defekt zu vermeiden und bei 1500 N treten keine Abrisse am Zargenrand auf. Oberhalb 1500 N entsteht für eine Grammaturn von 510 g/m<sup>2</sup> bei 11 % Feuchte und über 300 K Temperatursumme ein Übergangsbereich mit ansteigender Risshäufigkeit.

#### **Begrenzungen durch Blasenbildung**

Die Voruntersuchungen in Abschnitt 5.1 zeigen, dass eine Temperatursumme von 200 K geeignet ist und sich das Material entsprechend umformen lässt. Geringere Temperatursummenwerte führen zu erhöhter Risshäufigkeit am Boden. Die maximale Energiemenge ist im Zusammenhang mit der Feuchte des Materials zu betrachten. Bei hoher Feuchte von 15 % setzt bereits wenig über 200 K Temperatursumme eine Blasenbildung bzw. Lagenspaltung des Materials ein. Der Grund ist, dass durch Steigerung der Temperatursumme schneller das Wasser im Material verdampft. Ein Austritt des

Dampfes ist erst bei Verlassen der Ziehbüchse möglich, so dass ein Dampfdruck entsteht, der die Materialstruktur zerstört. Die oberen Niveaus für Energie und Temperatur sind demnach im Kompromiss festzulegen. Höhere Grammaturen beinhalten eine größere Menge Wasser im Material, das verdampft wird. Die Blasenbildung setzt entsprechend eher ein. Es zeigt sich, dass eine Feuchte von 11 % und ein Energieeintrag von 300 K eine geeignete Kombination darstellt, bei der für eine flächenbezogene Masse von 600 g/m<sup>2</sup> noch keine Blasenbildung auftritt. Wird eine der beiden Größen erhöht bilden sich erste Blasen. Tabelle 5 zeigt zusammenfassend die ermittelten Parameterniveaus bei denen strukturelle Fehler an Formteilen vermieden und die für die Parametervariation genutzt werden.

**Tabelle 5:** Parameterniveaus für den vollfaktoriellen Versuchsplan

Parameter	Bezeichnung	Unteres Niveau	Oberes Niveau
Faltenhalterkraft	1	500 N	1500 N
Energie	2	200 K	300 K
Temperaturdifferenz	3	0 K	100 K
Feuchte	4	7,3 %	11 %
Flächenbezogene Masse	5	510 g/m <sup>2</sup>	600 g/m <sup>2</sup>

### 5.3.3 Wirkungen der Prozessparameter auf Qualität der Formteile und Stempelkraft

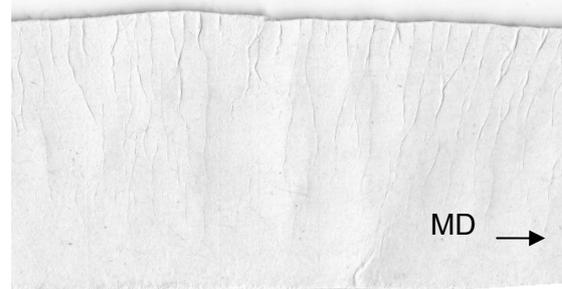
#### 5.3.3.1 Optische Qualität

Die optische Qualität wird wie in Abschnitt 5.2.1.3 beschrieben durch die Abstände der Falten und deren Standardabweichung beschrieben. Die Faltenbildung entlang der Längs- und Querrichtung unterscheidet sich an gleichen Versuchspunkten voneinander. Das Faltenbild entlang der Querrichtung des Materials zeigt deutlich höhere Faltenabstände und eine höhere Standardabweichung (Abbildung 50).

a) Längsrichtung

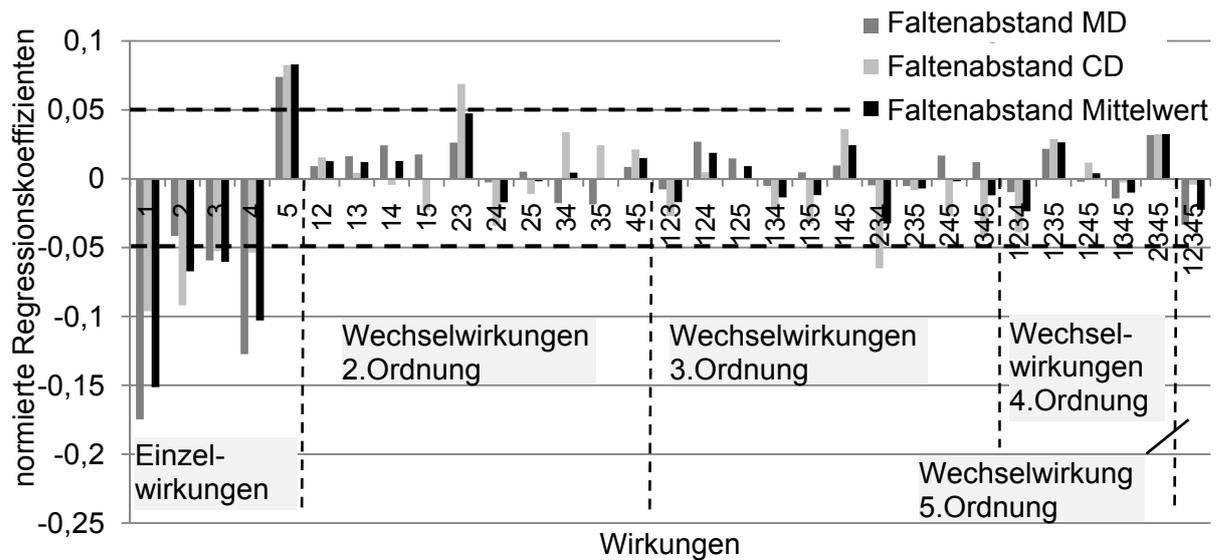


b) Querrichtung



**Abbildung 50:** Vergleich der Faltenbildung längs und quer zur Maschinelaufrichtung (MD)

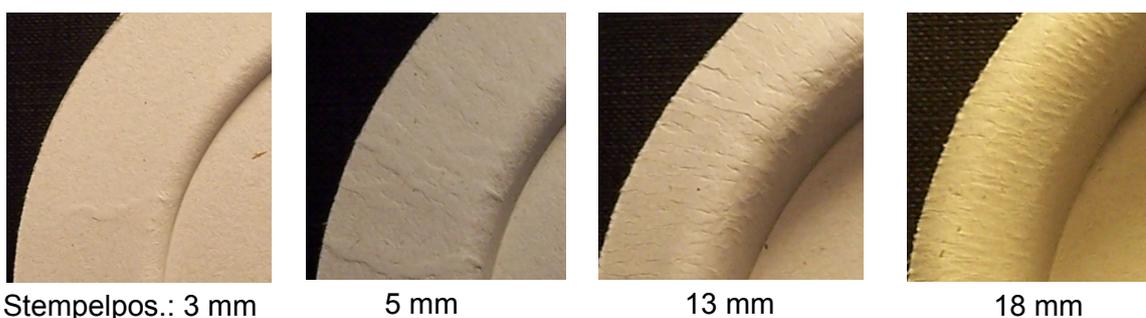
Die Falten richten sich entlang der Faserlängsrichtung (MD) aus. Mit höheren Faltenabständen verstärkt sich diese Richtungsorientierung. Eine vollständige lineare Regression bei Variation der Parameter nach Tabelle 5 ergibt die in Abbildung 51 gezeigten Wirkungen. Für die Auswertung der Regressionsanalysen werden die Bezeichnungen aus Tabelle 5 für die Wirkungen der Parameter eingeführt. Die Wechselwirkungen setzen sich aus diesen Parametern und den zugehörigen Bezeichnungen zusammen.



**Abbildung 51:** Normierte Regressionskoeffizienten für die Antwortgröße Faltenabstand

Auf die Faltenabstände haben vorrangig die Einzelwirkungen Einfluss. Die Wirkungen der Parameter sind in Längs- und Querrichtung vergleichbar. Unterschiede sind im Betrag der Wirkungen festzustellen. Als Grenze für den Einfluss einer Wirkung wird eine Änderung von über 5 % (0,05) des Wertebereiches der Antwortgröße eingeführt. Die wichtigste Größe zur Verringerung des Faltenabstandes ist die Faltenhalterkraft. Die eingebrachte Zugkraft verändert den Spannungszustand im Material. Die einsetzende Querkontraktion bewirkt, dass der Materialüberschuss nicht mehr ausschließlich zum Aufstauchen des Materials führt, sondern beide Wirkungen sich überlagern. Die Erhöhung der Temperatursumme und eine höhere Feuchtigkeit im Material verringern den Faltenabstand weiter. Der Grund dafür ist die Verringerung der Festigkeiten, wie Sie von (Kubát, 1969) und (Salmén et al., 1985) nachgewiesen wird.

Mit ansteigender Temperaturdifferenz und geringerer flächenbezogener Masse wird die Komprimierung verringert. Gleichzeitig nehmen die Faltenabstände mit diesen Parameteränderungen signifikant ab. Eine steigende Komprimierung behindert demnach die Faltenbildung. Diese Vermutung lässt sich durch die Analyse der Faltenentstehung bestärken. Die Falten werden nicht in vollständiger Anzahl zu Beginn des Umformvorganges gebildet. Bei Unterbrechung des Umformprozesses bei Abstufungen von 3, 5, 13 und 18 mm Stempelweg weist das Formteil eine entsprechend ansteigende Anzahl von Falten auf (Abbildung 52).



**Abbildung 52:** Faltenbildung in Abhängigkeit des Stempelweges

Bei einer Stempelposition von 3 mm nach Berührung des Kartonzuschnittes beginnt die Faltenbildung. Die Falten gehen vom Formteilboden aus und ziehen sich im Verlauf des Umformprozesses bis zum Zargenrand. Während dem das Material eingezogen wird, entstehen fortlaufend weitere Falten. Eine ansteigende Komprimierung behindert diese fortlaufende Bildung von Falten, da das Material in der Ziehbüchse und unter dem Faltenhalter sich nicht voneinander losgelöst bewegen kann.

Die Wechselwirkungen streuen und weisen besonders bei höherer Ordnung auf zufällige Fehler durch Störgrößen hin, die durch das Regressionsmodell mit beschrieben werden (siehe auch Abschnitt 5.3.1). Nur die Wechselwirkung 23 zwischen Temperatursumme und Temperaturdifferenz tritt bei beiden Richtungen (MD und CD) auf und liegt über 5 %. Eine mögliche Ursache für diese Wechselwirkung ist der unterschiedliche Temperatur- und damit auch Feuchtegradient, der sich mit Veränderung der Temperaturdifferenz im Material einstellt. Ein Nachweis dieses Zusammenhangs erfordert jedoch eine detaillierte thermodynamische Untersuchung.

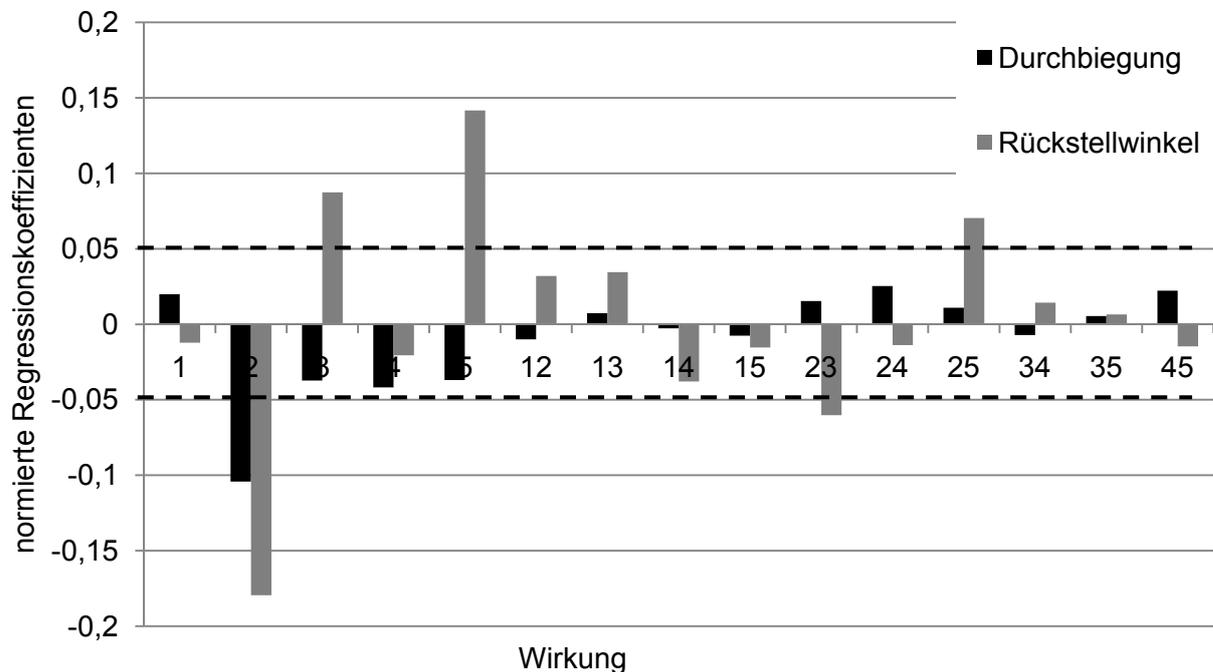
Die Wechselwirkung 23 hat auch auf die Gleichmäßigkeit der Verteilung der Falten über dem Zargenumfang Einfluss, für die als Kennwert die Standardabweichung des Faltenabstandes geeignet ist (siehe Anlage 8). Die Faltenhalterkraft hat den maßgeblichen Einfluss auf die Verteilung der Falten. Temperatursumme, Temperaturdifferenz und Materialfeuchte zeigen vergleichbare Wirkungen wie auf den Faltenabstand. Eine Ausnahme ist die flächenbezogene Masse, die keinen signifikanten Einfluss auf die Standardabweichung aufweist. Die Schwankungen der Wechselwirkungen höherer Ordnung sind analog zu den Faltenabständen zufälligen Fehlern durch Störgrößen zuzuordnen.

Faltenabstand und Standardabweichung beschreiben demnach die Gleichmäßigkeit und Anzahl der Falten über dem Zargenumfang und weisen ähnliche Wirkungen auf die Variation der Prozessparameter auf. Wechselwirkungen höherer Ordnung, die nahe an der 5 % Grenze liegen sind auf zufällige Fehler der Messgröße bzw. Abweichungen vom linearen Regressionsansatz zurückzuführen und werden daher im Folgenden nicht weiter dargestellt.

### 5.3.3.2 Formhaltigkeit

Die Bewertung der Formhaltigkeit erfolgt mit Hilfe von zwei Formwerten, der Durchbiegung und dem Rückstellwinkel der Zarge (siehe Abschnitt 5.2.1.1, Abbildung 45). Beide Abweichungen entstehen durch das elastische und viskoelastische Rückstellverhalten des Materials. Der Rückstellwinkel beschreibt die elastische Rückfederung an der Biegestelle um den Stempelradius, bei der eine Biegung um 90 ° erfolgt und gleichzeitig die Wölbung des Formteilbodens. Die Zargendurchbiegung entsteht durch Biegung des Materials um den Ziehbüchsenradius. Diese plastische Biegung wird beim Einziehen wieder entgegen der Biegerichtung zurückgeformt. Es entsteht eine Differenz zwischen den plastischen Formänderungsanteilen bei Hin- und Rückbiegung, die beim Ziehprozess auch nicht durch ein Überbiegen ausgeglichen werden kann. Hinzu kommt eine örtliche Komprimierung am Ziehbüchsenradius, die die Durchbiegung verstärkt. Dieser Effekt lässt sich durch Unterbrechung des Ziehprozesses bei ca. halber Ziehhöhe des späteren Formteils beobachten. Die Zarge des entnommenen teilweise geformten Kartonteils stellt sich erst schräg entgegen der Rückformbewegung oder rollt sich direkt ein (siehe auch Abbildung 52, bei 16 mm Stempelweg).

Die Untersuchung der Wirkungen zeigt, dass auf beide Formwerte eine ansteigende Temperatursumme die Verringerung der normierten Regressionskoeffizienten bewirkt (Abbildung 53).



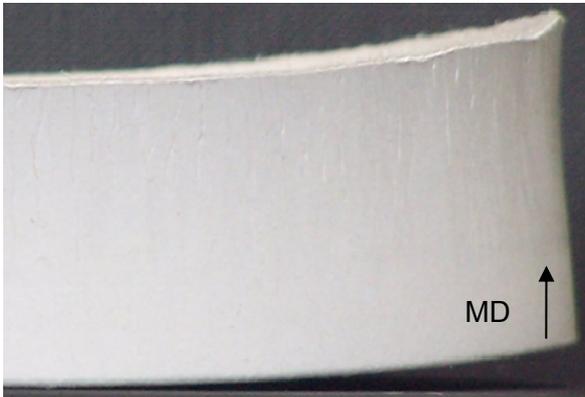
**Abbildung 53:** Normierte Regressionskoeffizienten für Rückstellwinkel und Durchbiegung der Zarge

Die eingebrachte Wärmeenergie verursacht nach (Gohring, 1963) und (Salmén et al., 1980) eine Erweichung von Materialkomponenten. Mit ansteigender Temperatur im Material durch Erhöhung der Temperatursumme wird das Material weicher, der Anteil der plastischen Formänderung steigt an und die Rückstellung bzw. Durchbiegung wird verringert. Die Durchbiegung der Zarge weist keine weiteren Wirkungen auf, die eine Änderung von mehr als 5% des Wertebereiches beträgt.

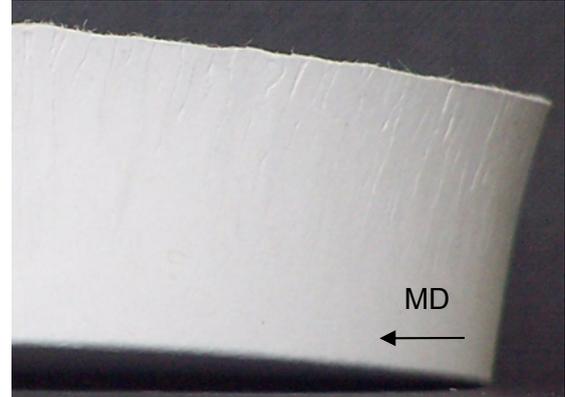
Für den Rückstellwinkel dagegen haben Temperaturdifferenz und flächenbezogene Masse als Einzelwirkungen signifikanten Einfluss. Dieser ist nicht mit der Komprimierung zu begründen. Eine ansteigende Temperaturdifferenz verringert die Komprimierung während eine höhere flächenbezogene Masse die Komprimierung verstärkt. Beide Parameteränderungen bewirken eine Verstärkung der Rückstellung des Materials. Die Temperaturdifferenz beeinflusst gleichzeitig den Temperatur- und damit den Feuchtegradienten, der sich im Material ausbildet. Durch den Feuchtegradienten werden Spannungen im Material erzeugt, die auf die Rückstellung Einfluss haben. Die Erhöhung der flächenbezogenen Masse bewirkt eine stärkere Verdichtung, wodurch sich die thermodynamischen Eigenschaften des Materials, insbesondere der Wärmeübergangs- und Wärmeleitkoeffizient ändern. Gleichzeitig weisen Materialien mit höherer flächenbezogener Masse höhere Biegesteifigkeitswerte auf und dementsprechend steigt die Rückstellkraft an. Auch wenn im Ziehspalt die Dicke zwangsläufig gleich gehalten wird, erreicht das Material nach Entlastung wieder eine höhere Dicke und damit ein höheres Flächenträgheitsmoment.

Der Rückstellwinkel weist in Längs- und Querrichtung einen Richtungsunterschied auf. In Längsrichtung des Materials stellt die Zarge entgegen der Umformrichtung zurück. Die Querrichtung dagegen wird von diesem Rückstellverhalten beeinflusst und in die entgegengesetzte Richtung gezogen (Abbildung 54).

a) Längsrichtung



b) Querrichtung

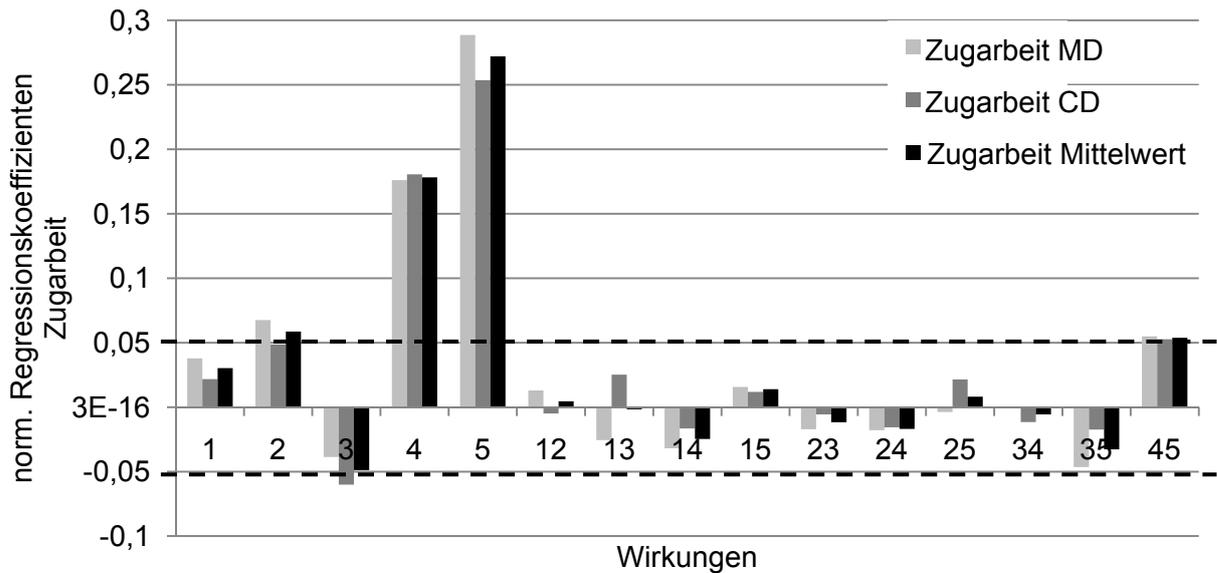


**Abbildung 54:** Rückstellung der Zarge in Längs- und Querrichtung im Vergleich

Im idealisierten Fall sind die Winkel gleichgroß und unterscheiden sich nur in der Richtung. Über die Versuchspunkte lässt sich jedoch eine variierende Differenz beider Winkelbeträge feststellen, die auf eine Überlagerung von Einflüssen hinweist. Diese Vermutung wird bei der Untersuchung dieser Differenz bestätigt. Die maßgeblichen Einflüsse sind Temperatursumme, Temperaturdifferenz und flächenbezogene Masse (siehe Anlage 8). Die mechanische Kopplung der Winkel in Längs- und Querrichtung wird demnach durch die Temperaturverteilung und den davon abhängigen Massenstrom des Wassers bei der Diffusion zur Oberfläche des Materials überlagert. Die Richtung der Wirkungen von Temperatursumme, Temperaturdifferenz und flächenbezogener Masse lassen den Schluss zu, dass eine erhöhte Dampfbildung im Material qualitätsmindernd wirkt. Es ist entscheidend, dass der Dampf in eine Richtung an die Materialoberfläche befördert wird. Ist die Temperaturdifferenz gleich Null, wird der Massenstrom des Wassers in die Mitte der Materialdicke gerichtet und erzeugt im Material einen Dampfdruck, der die Formwerte beeinträchtigt.

### 5.3.3.3 Formstabilität

Die Stabilität des Formteils bzw. der Zarge gegenüber dem Aufformen entgegen der Umformrichtung wird durch die Arbeit beschrieben, die notwendig ist, um eine Zugprobe der Zarge von 15 mm Breite gemessen vom Zargenrand und 50 mm Länge bis zum Bruch zu beanspruchen (siehe auch Abschnitt 5.2.1.2). Die Variation der Parameter zeigt, dass Feuchte und flächenbezogene Masse des Materials die maßgeblichen Wirkungen sind (Abbildung 55). Der Einfluss der Feuchte weist darauf hin, dass zunächst durch die geringere Festigkeit der Fasern im Faserverbund beim Umformen eine bessere Verschiebung der Fasern gegeneinander erreicht wird. Die ineinander geschobenen Fasern werden durch die Komprimierung, ähnlich wie bei der Papierherstellung ineinander vergautscht und es entstehen mechanische Verhakungen.



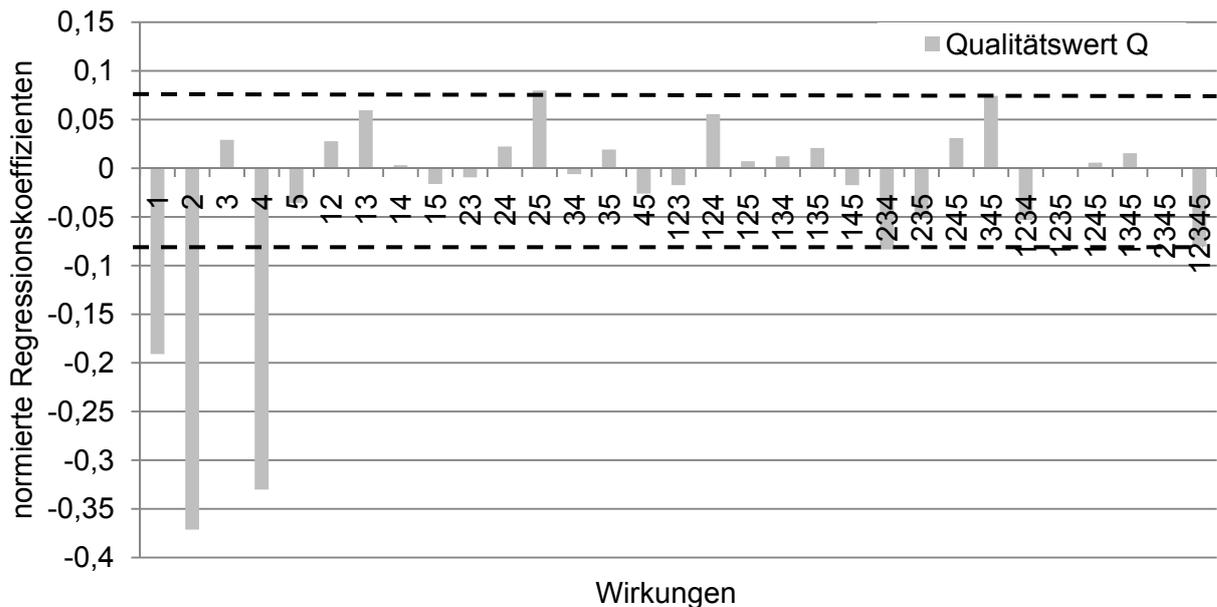
**Abbildung 55:** Normierte Regressionskoeffizienten für die Zugarbeit

Der Einfluss der flächenbezogenen Masse bestätigt diese Annahme, da mehr Fasern ineinander gestaucht und gepresst werden. Zusätzlich lässt die Dimension beider Wirkungen gegenüber allen anderen Wirkungen die Vermutung zu, dass neben mechanischem Vergautschen auch die Bildung neuer Wasserstoffbrücken die Festigkeitssteigerung bewirkt. Auf diesen Zusammenhang deutet auch die Wechselwirkung 45 hin. Bei Steigerung von Feuchte und Flächengewicht wird zusätzlich durch diese Wechselwirkung eine Verbesserung der Festigkeit erreicht. Bei der Interpretation ist jedoch zu beachten, dass Materialien mit höherer flächenbezogener Masse gleichzeitig eine höhere Bruchlast und damit Zugarbeit aufweisen.

Die Streuung der Wirkungen höherer Ordnung ist gering. Daher lassen sich aus Wirkungen im Bereich zwischen 2,5 und 5% weitere Tendenzen zur Beeinflussung der Formstabilität ableiten. Die Verringerung der Zugarbeit bei steigender Temperaturdifferenz weist auf den Einfluss der Komprimierung hin. Mit höherer Verdichtung werden die mechanischen Verbindungen zwischen den Fasern durch Ineinanderverschieben gefördert. In diesem Zusammenhang ist auch die Wirkung der Faltenhalterkraft erklärbar. Die Stauchlänge an einer Falte nimmt ab und es werden nicht Materiallagen übereinandergelegt oder durch Delamination geschwächt. Die Falten werden enger angeordnet und es wird eine bessere Faser zu Faser Bewegung beim Stauchen ermöglicht. Die Erhöhung der Energie bewirkt das Erweichen von Materialbestandteilen. Es ist anzunehmen, dass dadurch die Faserbeweglichkeit weiter verbessert wird und die Trocknung zur Bildung von Wasserstoffbrücken führt.

#### 5.3.3.4 Gesamtqualitätswert

In den Gesamtqualitätswert fließen alle bislang beschriebenen Antwortgrößen ein. Dementsprechend werden die zufälligen Fehler dieser Größen übernommen. Die Wechselwirkungen streuen daher und sind nicht eindeutig einem Einfluss auf den Qualitätswert zuzuordnen (Abbildung 56). Daher wird der Einfluss der Wirkungen erst oberhalb 7,5 % als signifikant betrachtet.

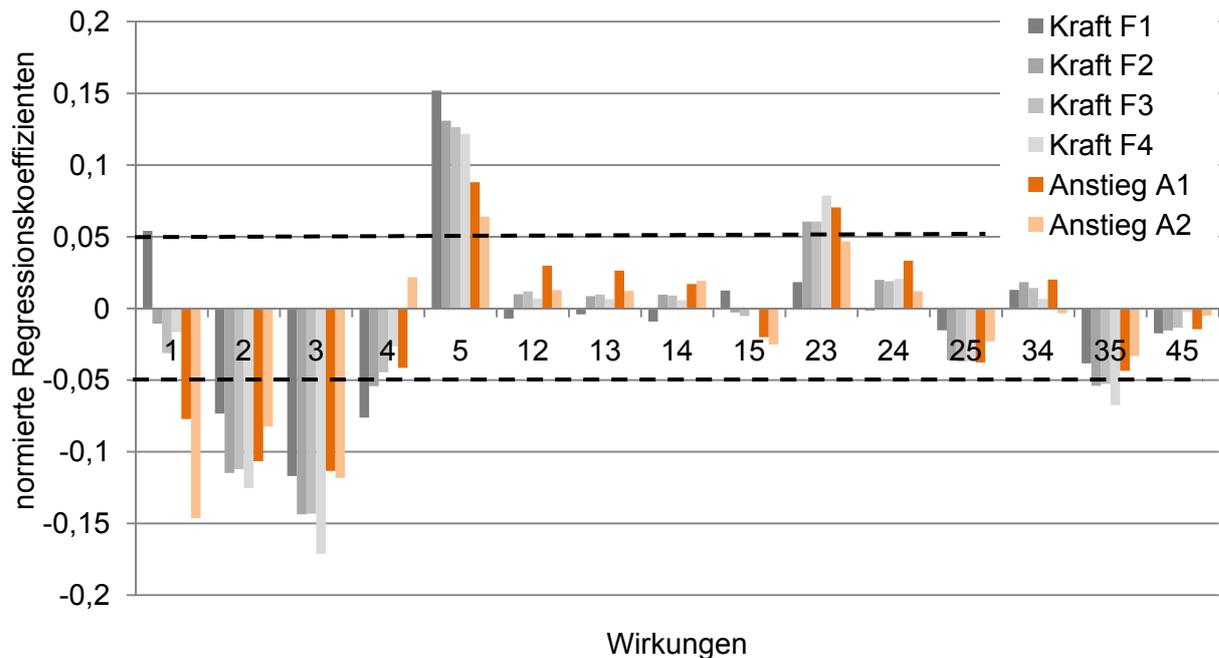


**Abbildung 56:** Normierte Regressionskoeffizienten für den Gesamtqualitätswert

Der Wertebereich des Qualitätswertes ist eine Summation von Abweichungen mit Ausnahme der Zugarbeit, die zur Gleichrichtung abgezogen wird. Demnach bedeutet eine Verringerung des Wertes Q eine Verbesserung der Formteilqualität. Die Auswertung der Parametervariation des Qualitätskennwertes zeigt, dass für die grundlegende Verbesserung der Formteilqualität die Einzelwirkungen von Faltenhalterkraft, Temperatursumme und Feuchte des Materials zentralen Einfluss aufweisen. Ein optimaler qualitativer Kompromiss lässt sich demnach durch die Steigerung der Faltenhalterkraft, die Erhöhung der Temperatursumme und eine höhere Ausgangsfeuchte des Kartons erreichen. Für die praktische Anwendung ist besonders die Faltenhalterkraft eine schnell variierbare und nachjustierbare Größe. Es ist jedoch zu beachten, dass die Faltenhalterkraft abhängig vom Material bei einem bestimmten Wert zum Abriss am Zargenrand führt und im Grenzbereich zunächst eine zunehmende Risshäufigkeit entsteht bevor jedes Ziehteil den Abriss aufweist. Der zugrundeliegende Ziehkarton ZKH lässt bei 510 g/m<sup>2</sup> flächenbezogener Masse eine Faltenhalterkraft bis 2000 N zu. Mit ansteigender Temperatursumme und Feuchte des Materials verringert sich der Wert auf 1500 N, da beide Parameteränderungen die Bruchfestigkeit bei Zugbeanspruchungen verringern. Eine detaillierte Untersuchung dieses Rissverhaltens am Zargenrand führt (Oehm, 2010) durch.

### 5.3.3.5 Kenngrößen des Stempelkraftverlaufes

Der Kraftverlauf am Ziehstempel lässt sich durch vier charakteristische Kraftwerte  $F_1$  bis  $F_4$  bei Stempelpositionen von 3, 21, 27 und 50 mm sowie durch die Anstiege einer Regressionsgeraden in den Bereichen zwischen den Stempelpositionen von 10 und 20 mm ( $A_1$ ) bzw. 20 und 27 mm beschreiben (siehe Abschnitt 5.2.2, Abbildung 48). Bei der Variation der Parameter stellen sich für Kraftwerte und Anstiege vergleichbare Wirkungen ein. Die Wechselwirkungen 3., 4. und 5. Ordnung liegen unter 2 % der jeweiligen Variationsbreite und sind daher vernachlässigbar (Abbildung 57). Es ist ein geringer zufälliger Fehler für die ermittelten Kraft- und Anstiegswerte zu erwarten.



**Abbildung 57:** Normierte Regressionskoeffizienten für die Kenngrößen der Stempelkraft

Die Wirkungen von Temperatursumme und Temperaturdifferenz auf die Kraft  $F_1$  sind im Vergleich zu den Kräften  $F_2$  bis  $F_4$  geringer. Durch Feuchte und flächenbezogene Masse dagegen wird eine größere Wirkung auf die Kraft  $F_1$  erzeugt als auf die anderen Kräfte. Ein ähnlicher Trend ist für die Entwicklungen der Kräfte  $F_2$  und  $F_3$  im Vergleich zu  $F_4$  festzustellen. Diese Unterschiede in den Wirkungen sind durch die Einwirkzeit der Wärme zu erklären. Die Temperatur im Material steigt von  $F_1$  bei 3 mm Stempelweg bis  $F_4$  bei 50 mm Stempelweg kontinuierlich an. Die steigende Temperatur im Material führt zu einer zunehmenden Festigkeitsverminderung, die dann bei 50 mm Stempelweg maximal ist. Die Verringerung des Widerstandes gegen Komprimierung hat auf die Kräfte  $F_2$  bis  $F_4$  den maßgeblichen Einfluss.

Gleichzeitig wird das Wasser in der Materialstruktur in Dampf umgewandelt. Der Dampf kann nicht entweichen. Dennoch weist die Entwicklung des Feuchteinflusses von  $F_1$  bis  $F_4$  darauf hin, dass die festigkeitsmindernde Wirkung der Feuchte nachlässt. Die Erhöhung der flächenbezogenen Masse bewirkt eine höhere Verdichtung. Gleichzeitig führt die höhere Biegesteifigkeit zu einer stärkeren Wirkung bei  $F_1$ , da die Kraft  $F_1$  durch die Biegekraft am Stempelradius überlagert wird (siehe auch Abbildung 48). Die Biegesteifigkeit wird durch die Materialfeuchte verringert. Dadurch lässt sich der höhere Einfluss der Feuchte auf die Kraft  $F_1$  erklären.

Die Faltenhalterkraft hat scheinbar keinen wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung der Stempelkraft. Nur bei der Kraft  $F_1$  kommt die erhöhte Zugkraft zum tragen, die auf das Material einwirkt und demnach direkt in die Stempelkraft eingeht. Es entsteht eine Erhöhung des Kraftwertes. Die Faltenhalterkraft ist auch an den Wegposition der Kräfte  $F_2$  und  $F_3$  wirksam. Die zu erwartende Erhöhung dieser Kräfte ähnlich wie bei  $F_1$  bleibt jedoch aus. Grund dafür ist die Veränderung der Faltenanzahl und die damit verbundene Änderung der Materialanordnung über der Ziehhöhe.

Die Kraft  $F_4$  beschreibt den Reibwiderstand bei voll eingezogener Zarge und relaxiertem Material, bevor dieses die Ziehbüchse verlässt. Die Wirkungen der Parameter und die signifikanten Wechselwirkungen 23, 25 und 35 deuten auf einen komplexen Zusammenhang von Temperatursumme, Temperaturdifferenz und flächenbezogener Masse des Materials und zusätzlich auf ein mögliches nichtlineares Verhalten der Kenngrößen im Bezug zu den Parameteränderungen hin.

Der Anstieg  $A_1$  beschreibt die Änderung des Verdichtungsverhaltens des Materials. Durch die Regelung der Stempelposition und den unruhigen Verlauf der Kraftkurve entsteht ein geringer zufälliger Fehler (siehe Abbildung 57). Die hauptsächlichen Wirkungen sind vergleichbar mit denen der Kraftwerte. Der Anstieg  $A_2$  der sich überwiegend im negativen Bereich bewegt, lässt einen Rückschluss auf die Endphase der Faltenbildung zu. Bei einer Stempelposition von 20 bis 21 mm verringert sich die Anzahl der neu entstehenden Falten bzw. der Widerstand, den das Material einem weiteren Aufstauchen des Materials in Falten entgegen setzt. Die Wirkung der Feuchte liegt in diesem Zusammenhang im Bereich des zufälligen Fehlers und kann nicht als signifikant angenommen werden. Temperatursumme, Temperaturdifferenz und Faltenhalterkraft erzeugen eine beschleunigte Faltenbildung. Während eine höhere flächenbezogene Masse den Widerstand gegen das Aufstauchen der Falten erhöht.

Abbildung 57 zeigt darüber hinaus, dass zwei Wechselwirkungen zweiter Ordnung maßgeblichen Einfluss auf Kräfte und Anstiege haben. Die gleichzeitige Erhöhung von Temperatursumme und Temperaturdifferenz (Wechselwirkung 23) bewirkt eine Erhöhung der Werte von Kräften und Anstiegen. Dagegen zeigt die Wechselwirkung 35, dass eine Erhöhung der Komprimierung durch ansteigende Temperaturdifferenz oder höhere flächenbezogene Masse die Werte der Kräfte und Anstiege weiter verringert.

Die Wirkungen der Parameter auf die Relaxationsarbeit (siehe auch 5.2.2) sind vergleichbar mit denen auf die Kraft  $F_4$  (siehe Anlage 8). Es stellt sich ein komplexer Zusammenhang zwischen Temperatursumme, Temperaturdifferenz und flächenbezogener Masse dar, bei dem auch die Wechselwirkung dritter Ordnung 235 signifikanten Einfluss hat. Die Streuung der Wechselwirkungen ist gering, so dass von einem geringen zufälligen Fehler ausgegangen werden kann. Zusätzlich sind in diesem Bereich mögliche Veränderungen des tribologischen Systems durch Glättung in Abhängigkeit der Komprimierung zu beachten. Ein direkter Rückschluss von der Relaxationsarbeit auf die Entwicklung der Bindungen im Material ist nicht möglich.

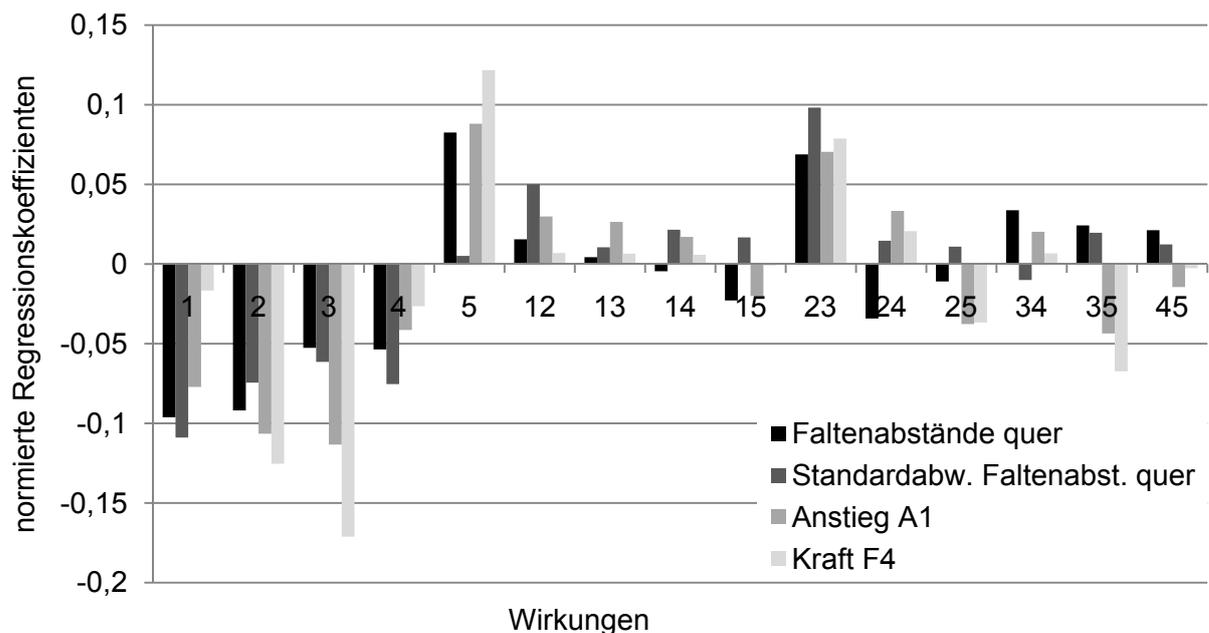
### 5.3.4 Vergleich von Formteilqualität und Kraftkenngrößen

Die Untersuchungen aus Abschnitt 5.3.3 haben die maßgeblichen Einflussgrößen auf die Kenngrößen der Formteilqualität und des Stempelkraftverlaufes aufgezeigt. Nach den Ergebnissen der Auswertung der Kraftkenngrößen ist eine Eingrenzung der Antwortgrößen sinnvoll, da sich die Wirkungen der Relaxationsarbeit sowie der Kraft- und Anstiegswerte nicht grundlegend unterscheiden. Die sich gegenseitig kompensierenden Wechselwirkungen der Relaxationsarbeit sind für die Nutzung als Vergleichsgröße nicht vorteilhaft, da eine Interpretation erschwert wird. Die Unterschiede der Kraft  $F_1$ ,  $F_2$  und  $F_3$  werden durch die Anstiege  $A_1$  und  $A_2$  beschrieben. Diese beiden Anstiege sind in ihren Wirkungen vergleichbar, so dass die Nutzung des Anstieges  $A_1$  für den Vergleich mit den

Qualitätskengrößen geeignet ist. Die Beschreibung der Entwicklung der Reibkraft mit minimaler Überlagerung von Formänderungen ist durch die Kraft  $F_4$  möglich.

Eine weitere Einschränkung lässt sich bei den Qualitätskennwerten vornehmen. Die Ergebnisse aus den Abschnitten 5.3.3.1 und 5.3.3.3 zeigen, dass die anisotropiegebundenen Größen Faltenabstand und Zugarbeit in Längs- und Querrichtung die gleichen Wirkungen aufweisen, die sich jeweils im Ausmaß geringfügig unterscheiden. Die jeweiligen Werte an einem Versuchspunkt zeigen deutliche Differenzen. Bei der Nutzung des Mittelwertes entsteht keine normal- bzw. t-verteilte Größe, sondern zwei Verteilungen gehen je nach Größe der Differenz ineinander über. Die Kopplung zwischen Längs- und Querrichtung des Rückstellwinkels lässt dagegen die Nutzung eines Mittelwertes zu. Für den Faltenabstand, die zugehörige Standardabweichung und die Zugarbeit ist jeweils die Querrichtung qualitätsbegrenzend und eignet sich für den Vergleich mit den Kenngrößen des Stempelkraftverlaufes. In dieser Richtung entstehen höhere Abstände der Falten und gleichzeitig werden geringere Zugfestigkeiten beim Aufformen der Falten erreicht.

Der Vergleich der Regressionskoeffizienten von Faltenabstand und Standardabweichung des Faltenabstandes mit Kraft  $F_4$  und Anstieg  $A_1$  zeigt eine weitgehende Übereinstimmung der Wirkungen die durch Einzelparameter erzeugt wird (Abbildung 58).



**Abbildung 58:** Vergleich der Regressionskoeffizienten von Faltenabstand und Kraftkenngrößen

Die Mittelwerte der Faltenabstände zeigen in den Einzelwirkungen und zusätzlich bei der Wechselwirkung 23 zwischen Temperatursumme und Temperaturdifferenz annähernd identische Wirkungen wie sie beim Anstieg  $A_1$  zu erkennen sind. Auch das Ausmaß der Wirkungen liegt in vergleichbaren Bereichen. Die Standardabweichung der Faltenabstände weist ähnliche Wirkungen auf. Die einzige Ausnahme entsteht bei der flächenbezogenen Masse, die keinen Einfluss auf die Gleichmäßigkeit der Faltenverteilung und damit auf die Standardabweichung hat. Die Kraft  $F_4$  zeigt im Vergleich zu den anderen Antwortgrößen eine deutlich Abweichung bei der Wirkung der Faltenhalterkraft. Gleichzeitig ist besonders die Wirkung der Temperaturdifferenz deutlich höher auf die Kraft  $F_4$  als auf Faltenabstand bzw.

Standardabweichung. Eine Beschreibung der optischen Qualität ist nicht vollständig durch  $F_4$  möglich. Eine Tendenz ist jedoch ablesbar und im Bezug zur praktischen Anwendung mit geringem Aufwand nutzbar. Eine weitgehende Beschreibung der Faltenabstände, deren Gleichmäßigkeit und damit der optischen Qualität der Formteile ist durch die Änderung des Anstieges  $A_1$  möglich.

Für die Formwerte Durchbiegung und Rückstellwinkel ist eine derart ausgeprägte Übereinstimmung der Wirkungen mit den Kenngrößen des Stempelkraftverlaufes nicht gegeben (siehe Anlage 9). Die Kraft  $F_4$  ermöglicht bei konstanter flächenbezogener Masse einen Rückschluss auf die tendenzielle Entwicklung der Durchbiegung. Für die Praxis ist eine derartige Tendenzermittlung wertvoll, da das Material bzw. die flächenbezogene Masse kein variierender Parameter ist, sondern durch den Anwender festgelegt wird. Die Durchbiegung der Zarge zeigt für Temperatursumme, Temperaturdifferenz und Feuchte tendenziell Übereinstimmungen der Wirkungen. Mit Erhöhung dieser Parameterwerte wird die Durchbiegung verringert und damit die Formhaltigkeit des Ziehteils verbessert. Die Faltenhalterkraft hat keinen maßgeblichen Einfluss auf die Durchbiegung und auf die Kraft  $F_4$ . Der Anstieg  $A_1$  dagegen weist durch ansteigende Faltenhalterkräfte deutlich geringere Werte auf. Ein signifikanter Unterschied zwischen Durchbiegung und Kraftkenngrößen ist in der Wirkung der flächenbezogenen Masse festzustellen. Die Beschreibung der Durchbiegung mit Hilfe des Anstieges  $A_1$  ist danach nicht möglich. Die Einflüsse von Faltenhalterkraft bzw. flächenbezogener Masse auf  $A_1$  und Durchbiegung wirken einander entgegen. Temperatursumme und Temperaturdifferenz erzeugen hingegen vergleichbare Wirkungen. Der Rückstellwinkel der Zarge weist Gemeinsamkeiten mit den Kraftkenngrößen beim Einfluss der Temperatursumme, der flächenbezogenen Masse und tendenziell der Feuchte auf. Die Faltenhalterkraft hat auf den Rückstellwinkel keinen signifikanten Einfluss. Gegenläufige Wirkungen zwischen Kraftkennwerten und Rückstellwinkel werden durch die Temperaturdifferenz, sowie die Wechselwirkungen 23 und 25 bewirkt. Durch diese Wirkungen ist ein Rückschluss auf die Kenngrößen des Kraftverlaufes nicht möglich. Die Formhaltigkeit der Ziehteile lässt sich zusammenfassend nur ansatzweise durch den Verlauf der Stempelkraft beschreiben.

Ähnliche Schwierigkeiten ergeben sich beim Vergleich der Formstabilität mit den Kraftkenngrößen. Der Vergleich der Zugarbeit mit  $A_1$  und  $F_4$  zeigt Übereinstimmungen der Wirkungen für Temperaturdifferenz und flächenbezogenen Masse (siehe Anlage 9). Das Ausmaß beider übereinstimmenden Wirkungen weist deutliche Unterschiede zwischen Zugarbeit und Kraftkenngrößen auf. Faltenhalterkraft, Energie und Feuchte bewirken gegenläufige Änderung der Werte von Zugarbeit und Kraftkenngrößen. Auch die Wechselwirkung 23 ist für die Zugarbeit keine signifikante Wirkung. Eine belastbare Aussage zur Entwicklung der Formstabilität lässt sich aus dem Verlauf der Stempelkraft nicht gewinnen, da sich die übereinstimmenden und gegensätzlichen Wirkungen gegenseitig kompensieren und kein optimaler Kraftverlauf bestimmt werden kann.

Der Qualitätskennwert  $Q$  ist eine Kombination aus allen Qualitätskenngrößen. Die Mehrzahl dieser Größen ist nicht vollständig durch den Verlauf der Stempelkraft beschreibbar. Eine Übereinstimmung der Wirkungen zwischen  $Q$  und den Kraftkenngrößen ist nicht zu erwarten. Die Einzelwirkungen auf den Qualitätswert  $Q$  stimmen in Faltenhalterkraft, Temperatursumme und Feuchte in ihrer Richtung mit denen der Kraftkenngrößen überein. Temperaturdifferenz und flächenbezogene Masse sowie die Wechselwirkungen 23 und 25 erzeugen gegensätzliche Wirkungen bei den Antwortgrößen von Qualität und Kraft. Die

gegenläufigen Wirkungen von Temperaturdifferenz und flächenbezogener Masse sind bei der Wirkung auf den Qualitätswert verhältnismäßig gering, so dass eine Tendenz für den Qualitätskennwert aus dem Verlauf der Stempelkraft abgelesen werden kann.

### **5.3.5 Untersuchung der Wirkungen von Prozessparametern mit nichtlinearem Ansatz**

#### **5.3.5.1 Auswahl der Parameter**

Wie in Abschnitt 5.3.3 beschrieben, weisen die Streuungen der Wechselwirkungen höherer Ordnung bei Qualitätskenngrößen den Einfluss von Störgrößen sowie Abweichungen vom linearen Ansatz des Regressionsmodells hin. Die Einzelwirkungen haben den größten Einfluss auf die Kenngrößen.

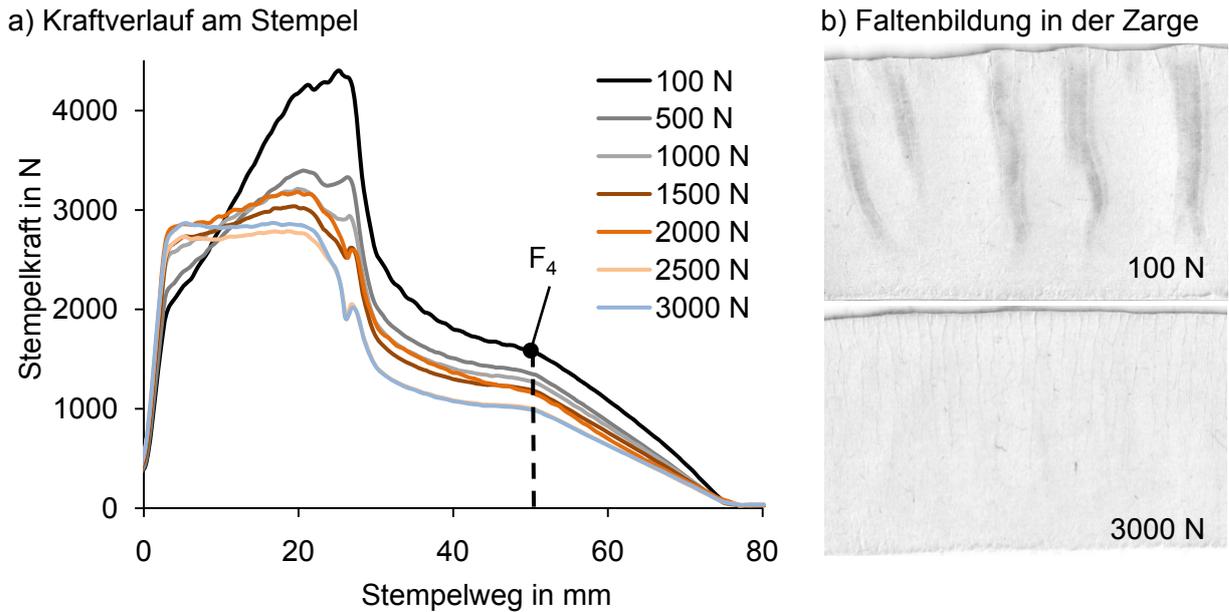
Die flächenbezogene Masse und die Feuchte des Materials sind als Materialeigenschaften keine einstellbaren Größen in beliebigen Werten. In der Praxis wird ein Material festgelegt und der Prozess der Formteile bezogen auf dieses Material und die zugehörige flächenbezogene Masse eingerichtet.

Die Einstellung eines präzisen Feuchtwertes ist bereits im Labormaßstab mit hohem Aufwand verbunden. Durch die hygroskopischen Eigenschaften des Materials stellt sich nach Konditionierung eine dynamische Desorption ein, die einen Feuchtegradienten zur Folge hat. Die Inhomogenität des Materials erzeugt zudem Schwankungen bei der Feuchteaufnahme und Abgabe. Eine Konditionierung oder Befeuchtung, wie Sie vom Riffelprozess in der Wellpappenherstellung bekannt ist, wird beim Ziehen von Papier und Karton bislang nicht eingesetzt und ist als Ansatzpunkt für weitere Forschungsarbeiten zur Präparation und deren Einbindung in Umformmaschinen zu betrachten.

Faltenhalterkraft, Temperatursumme und Temperaturdifferenz sind einstellbare Größen und bei der Einrichtung sowie im Betrieb der Maschinen veränderbar. Für diese Parameter wird im Weiteren überprüft, in wie weit ein linearer Ansatz zur Beschreibung des Einflusses auf die Antwortgrößen zutreffend ist. Dazu werden die Parameter bei einem festgelegten Versuchspunkt einzeln auf mindestens fünf Niveaus über einen größeren Wertebereich variiert, als es für die vollfaktorielle Parametervariation möglich ist (siehe auch Abschnitt 5.3.2). Die Untersuchungen werden an dem Ziehkarton ZKH mit einer flächenbezogenen Masse von  $600 \text{ g/m}^2$  bei einer Feuchte von ca. 7,3 % durchgeführt.

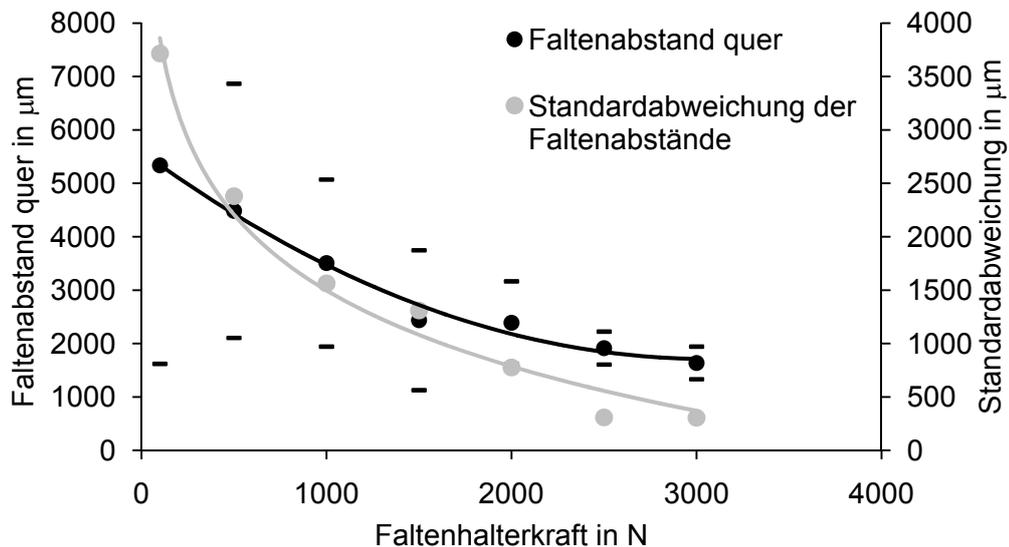
#### **5.3.5.2 Einfluss der Faltenhalterkraft**

Die Erhöhung der Faltenhalterkraft von 100 bis 3000 N bei fixierten Werten von 40 K Temperaturdifferenz und 280 K Temperatursumme bewirkt signifikante Änderungen des Stempelkraftverlaufes. Die Verringerung des Anstieges  $A_1$  bei zunehmender Faltenhalterkraft ist nach den Ergebnissen aus Abschnitt 5.3.3 zu erwarten und wird durch die einzelne Variation bestätigt (Abbildung 59 a). Zusätzlich weist die Kraft  $F_4$  Änderungen auf, die im Bereich zwischen 500 und 1500 N gering sind und daher bei der vollfaktoriellen Variation der Parameter nicht als signifikante Änderung erkannt werden.

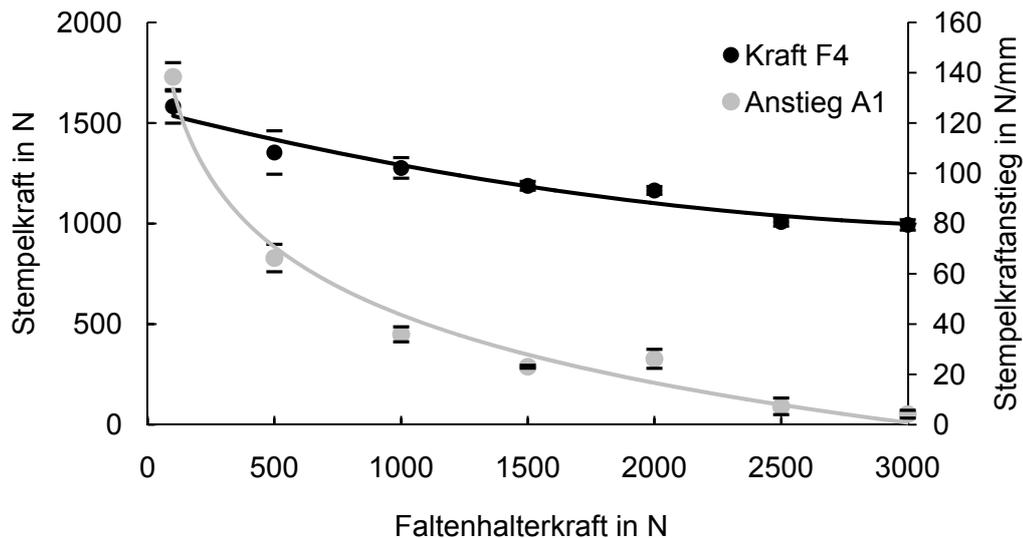


**Abbildung 59:** Kraft-Weg-Verlauf am Stempel bei Variation der Faltenhalterkraft und Vergleich der Faltenbildung in der Zarge

Der Vergleich zwischen den Entwicklungen der Kraftkenngrößen  $A_1$ ,  $F_4$  und den Faltenabständen zeigt eine qualitative Übereinstimmung der Regressionskurven. Die Faltenabstände werden durch die Bildung einer größeren Faltenanzahl und eine gleichmäßigere Verteilung der Falten verringert (Abbildung 59 b). Die Standardabweichung der Falten ist eine charakteristische Größe für die Gleichmäßigkeit der Faltenverteilung und zeigt mit steigender Faltenhalterkraft einen ähnlichen logarithmischen Verlauf wie der Anstieg  $A_1$  (Abbildung 60 und Abbildung 61).

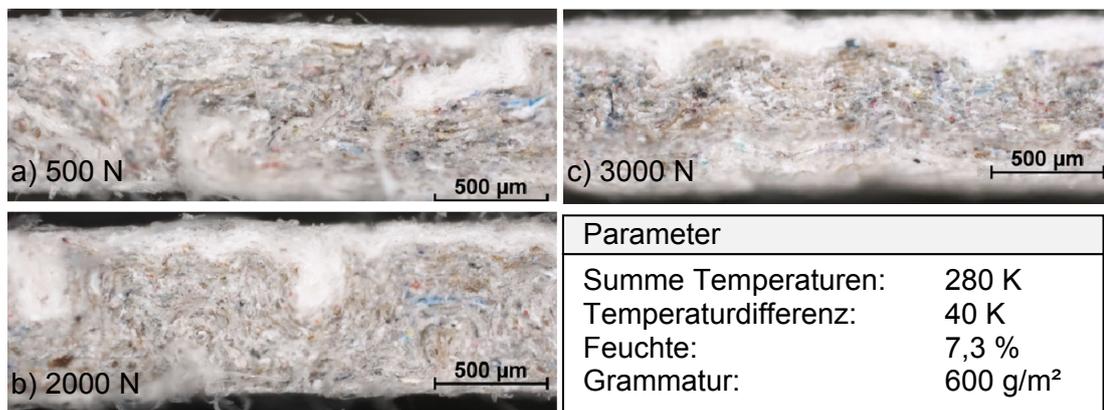


**Abbildung 60:** Regressionsverlauf von Faltenabstand und Standardabweichung bei Variation der Faltenhalterkraft



**Abbildung 61:** Regressionsverlauf der Kraftkonstanten  $A_1$  und  $F_4$  bei Variation der Faltenhalterkraft

Der mittlere Faltenabstand weist einen flachen quadratischen Verlauf auf. Eine ähnliche Regressionskurve stellt sich für die Kraft  $F_4$  ein. Beide Parallelen zeigen, dass die Änderungen der Faltenabstände durch den Einfluss der Faltenhalterkraft mit den beiden Kraftkonstanten  $A_1$  und  $F_4$  zuverlässig beschrieben werden. Der Verlauf der Kraft  $F_4$  weist darauf hin, dass die Komprimierung in der Ziehbüchse bei einer höheren Anzahl von Falten mit gleichmäßigen Abständen verringert wird. Diese Wirkung entsteht durch eine Änderung im Ausmaß des instabilen Materialausweichens und den davon abhängigen lokalen Dickenanstieg an den Falten. Eine mikroskopische Untersuchung des Zargenquerschnittes nach dem Umformen bestätigt diese Annahme (Abbildung 62).



**Abbildung 62:** Vergleich mikroskopischer Aufnahmen des Zargenquerschnittes bei Faltenhalterkräften von 500 N, 2000 N und 3000 N und einer Ziehhöhe von 25 mm

Die Falten verändern ihr Aussehen deutlich. Bei geringer Faltenhalterkraft von 500 N wird der Materialüberschuss stark aufgestaucht und es setzt eine unregelmäßige Verteilung des Materials ein. Die Materiallagen schieben sich annähernd z-förmig übereinander und es entsteht eine höhere lokale Verdichtung, die entsprechend höhere Reibkräfte verursacht. Mit steigender Faltenhalterkraft wird eine derart unregelmäßige Anordnung des Materialüberschusses verhindert. Im Bereich zwischen 1000 und 2000 N Faltenhalterkraft staucht sich das Material in eine alternierende Rechteckform auf. Mit weiterer Steigerung der

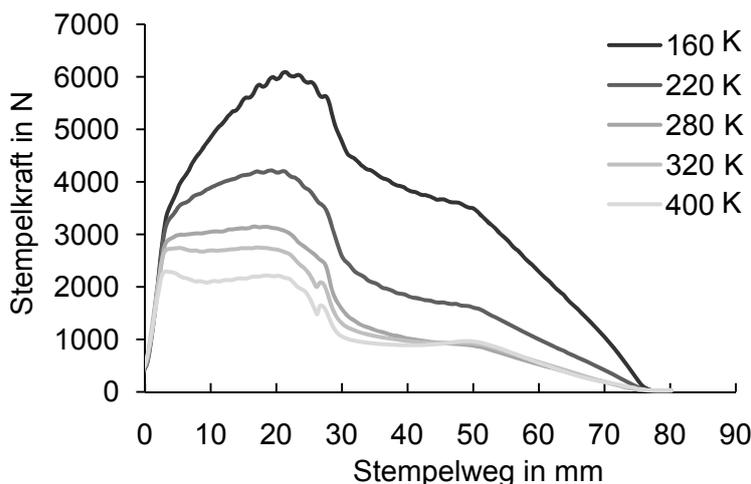
Faltenhalterkraft geht die Rechteckform in eine Wellenform über, die als optimale Faltenform zu betrachten ist. Die Falten sind in dieser Form kaum sichtbar. Die Änderung der Faltenform im Querschnitt der Zarge lässt sich an der Entwicklung der Kraft  $F_4$  nachvollziehen. Bis zu einer Faltenhalterkraft von 1000 N wird  $F_4$  signifikant verringert und bleibt dann bis 2000 N annähernd konstant. Bei Erhöhung der Faltenhalterkraft auf 2500 N erfolgt nochmals eine Verringerung der Kraft  $F_4$ . Eine weitere Erhöhung der Kraft am Faltenhalter bringt keine weitere Änderung von  $F_4$ . Diese Grenzen stimmen mit den beobachteten Änderungen der Faltenform überein und sind zusätzlich von den anderen in Abschnitt 5.3.3.1 beschriebenen Parametern wie Feuchte, Temperatursumme und Temperaturdifferenz abhängig.

Die Formwerte Rückstellwinkel und Durchbiegung zeigen wie erwartet geringe Änderungen (siehe Anlage 10). Die Durchbiegung der Zarge nimmt mit ansteigender Faltenhalterkraft annähernd linear zu. Diese Wirkung ist mit der höheren Reibung an der Einlaufkante zu erklären. Der Rückstellwinkel dagegen nimmt linear ab. Dieses Verhalten weist darauf hin, dass die Änderung der Faltenform eine geringe Verbesserung der Festigkeit gegenüber dem Aufformen bewirkt. Die Zugarbeit weist eine leicht ansteigende Tendenz auf. Bemerkenswert ist der wesentlich geringere Wert der Zugarbeit bei der minimalen Faltenhalterkraft von 100 N. Beide Verläufe bestätigen die Tendenzen, die aus der Variation der Prozessparameter von Abschnitt 5.3.3 hervorgehen. Der Faltenhalter und dessen Reibkraft als Rückhaltewirkung auf das Material ist ein zentrales Werkzeug für die Beeinflussung der Formteilqualität.

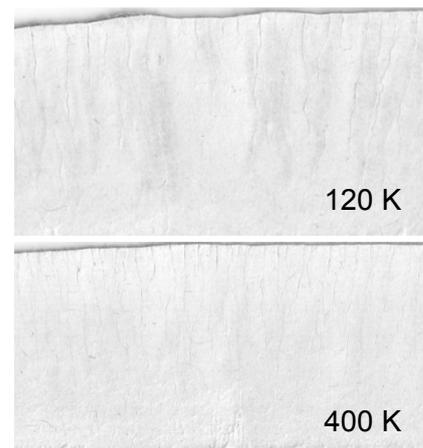
### 5.3.5.3 Einfluss der Temperatursumme

Die Untersuchung des Einflusses der Temperatursumme mit Hilfe von fünf verschiedenen Niveaus zwischen 120 K und 400 K bei fixierten Werten von 40 K Temperaturdifferenz und 2000 N Faltenhalterkraft zeigt eine deutliche Verringerung der Faltenabstände mit ansteigender Energiemenge (Abbildung 63, b).

a) Kraftverlauf am Stempel



b) Faltenbildung in der Zarge

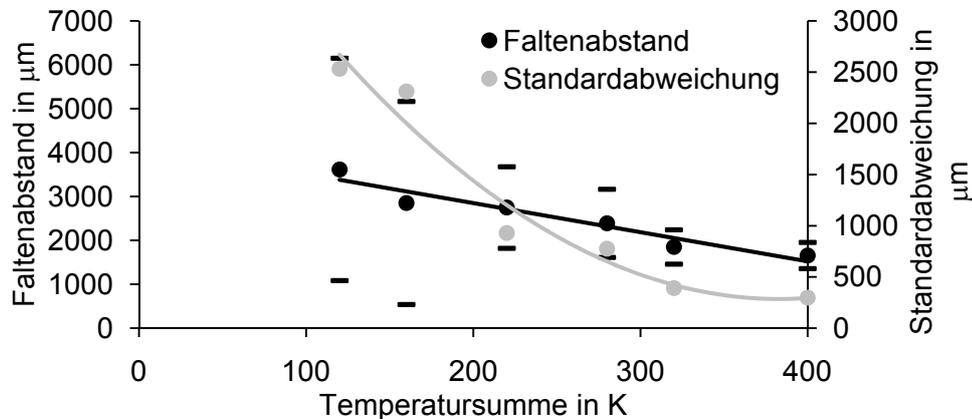


**Abbildung 63:** Stempelkraftverlauf bei Variation der Temperatursumme im Vergleich zur Faltenbildung in der Zarge

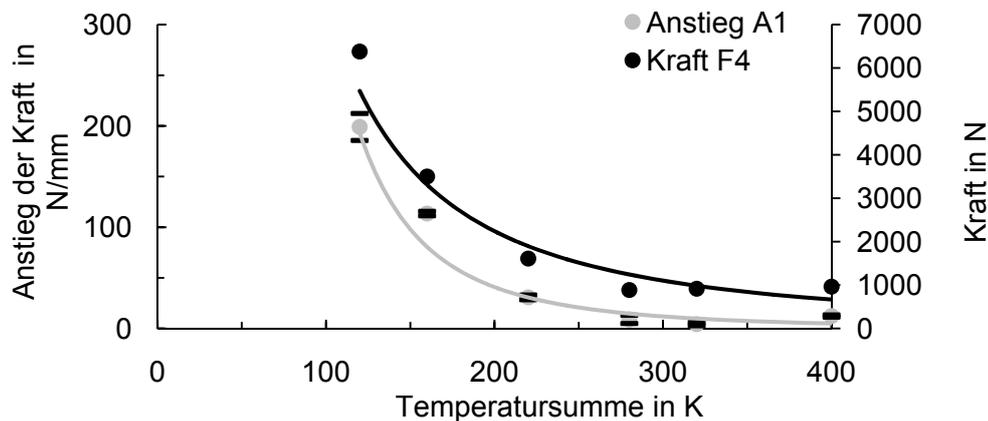
Mit der Verringerung des Faltenabstandes werden der Anstieg  $A_1$  und die Kraft  $F_4$  signifikant verringert. Diese Änderungen zeigen sich bei Betrachtung der Kraftverläufe unter schrittweiser Steigerung der Temperatursumme (siehe Abbildung 63 a). Beide Effekte

bestätigen die Untersuchungen der Parametervariation aus Abschnitt 5.3.3. Der Verlauf der Kraftkenngrößen über der Temperatursumme lässt sich jeweils durch Potenzfunktionen annähern (Abbildung 64 b).

a) Regressionsverlauf von Faltenabstand und Standardabweichung



b) Regressionsverlauf der Kraftkenngrößen

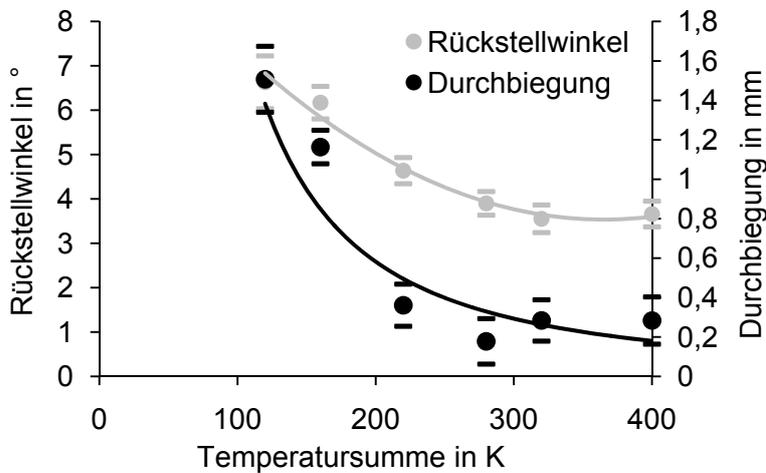


**Abbildung 64:** Vergleich der Regressionsverläufe von Faltenabstand, Standardabweichung und den Kraftkenngrößen bei Variation der Temperatursumme

Der Verlauf beider Kraftkenngrößen zeigt, dass sich die Werte bei einer Temperatursumme von ca. 280 K einem Wert nähern, der sich mit weiterer Erhöhung der Temperatursumme nicht wesentlich ändert. Die Standardabweichung der Faltenabstände weist einen ähnlichen Verlauf auf. Eine geeignete Regressionsfunktion ist auch hier die Potenzfunktion (Abbildung 64 b). Bei einer Temperatursumme von 300 bis 320 K wird eine vergleichbare Grenze wie für die Verläufe der Kraftwerte erreicht. Nach Erreichen dieser Temperatursumme stellt sich keine wesentliche Änderung mehr ein. Der Faltenabstand verringert sich dagegen tendenziell linear mit ansteigender Temperatursumme. Ein Vergleich der Versuchspunkte von 320 K und 400 K bei geringer Standardabweichung lässt jedoch auch für den Faltenabstand die Vermutung zu, dass die Steigerung der Energiemenge über 320 K hinaus keine wesentliche Verbesserung bewirkt. Durch diese Untersuchungen lässt sich für das jeweilig eingesetzte Material und das gewählte Format des Formteils eine optimale Temperatursumme bestimmen. Die Gleichmäßigkeit der Faltenverteilung am Zargenumfang ist durch die Kenngrößen des Stempelkraftverlaufes beschreibbar, da die Verläufe von  $A_1$  und  $F_4$  denen der Standardabweichung der Faltenabstände ähneln.

Parallelen zu den Kraftkenngrößen zeigt auch der Verlauf der Zargendurchbiegung, der durch eine Potenzfunktion angenähert werden kann (Abbildung 65 a).

a) Regressionsverlauf von Rückstellwinkel und Durchb.



b) Abbildung der Zarge



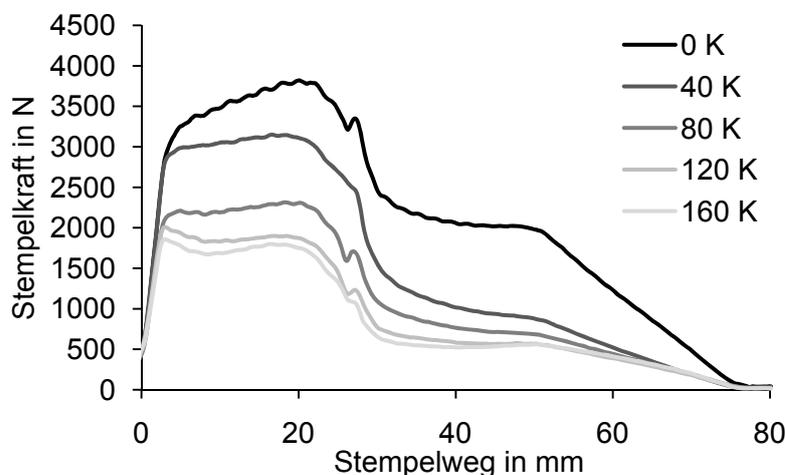
**Abbildung 65:** Regressionsverlauf von Rückstellwinkel und Durchbiegung im Vergleich zur Abbildung der Zarge bei Variation der Temperatursumme

Die Verläufe beider Formwerte zeigen Übereinstimmung mit den Aussagen der Parametervariation. Mit zunehmender Temperatursumme werden beide Abweichungswerte der Formhaltigkeit deutlich verringert und erreichen ähnlich wie die Faltenabstände bei ca. 280 K einen Wert, der mit weiterer Erhöhung keine wesentlichen Änderungen erfährt.

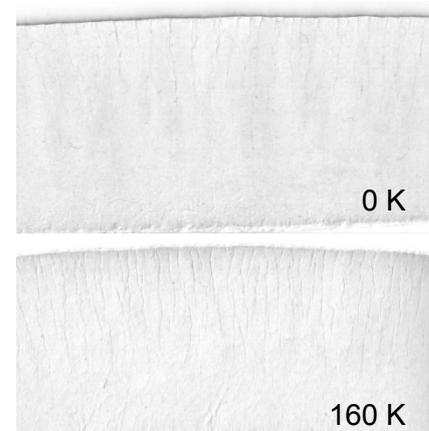
### 5.3.5.4 Einfluss der Temperaturdifferenz

Die Temperaturdifferenz zwischen Stempel und Ziehbüchse hat durch unterschiedliche Längenänderung der Arbeitsorgane Einfluss auf die Komprimierung des Materials. Gleichzeitig werden Temperatur- und damit auch Feuchteverteilung im Material beeinflusst. Bei höherer Temperaturdifferenz entsteht ein größerer Ziehspalt und die Reibkraft, die auf den Stempel einwirkt wird deutlich verringert.

a) Kraftverlauf am Stempel



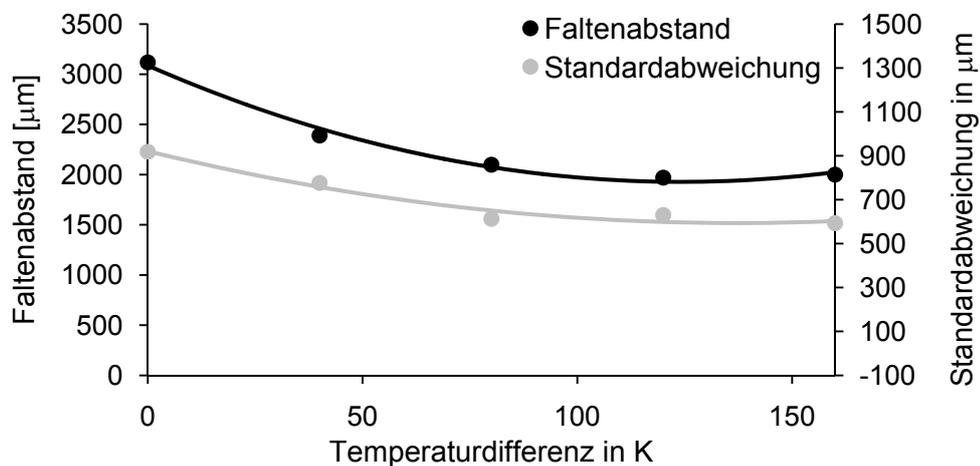
b) Faltenbildung in der Zarge



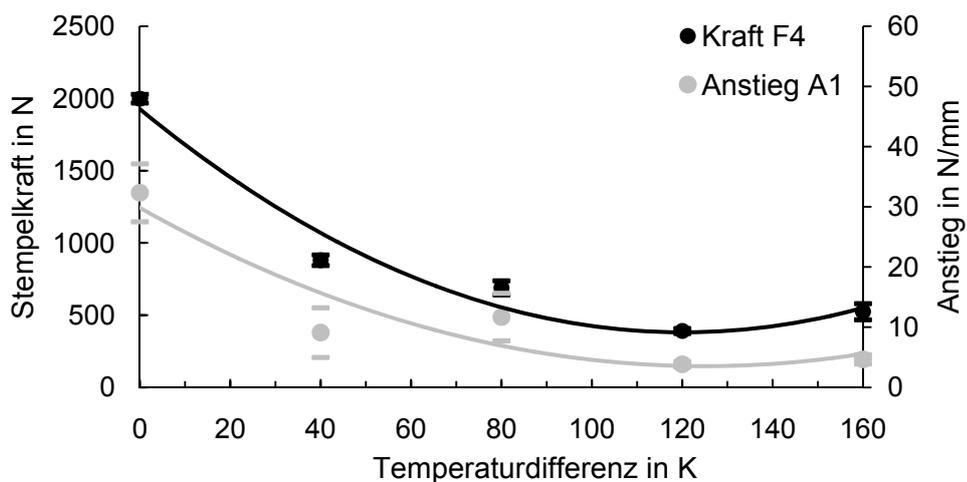
**Abbildung 66:** Stempelkraftverlauf bei Variation der Temperaturdifferenz im Vergleich zur Faltenbildung in der Zarge

Die Verringerung der Reibkraft lässt sich an den Kraftverläufen bei verschiedenen Temperaturdifferenzen nachvollziehen (siehe Abbildung 66 a). Der Einfluss der Temperaturdifferenz auf die Abstände der Falten ist vergleichsweise gering. Grund dafür ist der gewählte Versuchspunkt für die Variation der Temperaturdifferenz. Durch 2000 N Faltenhalterkraft und 280 K Temperatursumme sind Faltenabstand und Standardabweichung bereits gering, so dass weitere Änderungen optisch schwerer erkennbar sind (siehe Abbildung 66 b) als bei Faltenhalterkraft- und Temperatursummenvariation. Diese Entwicklung lässt den Schluss zu, dass die Temperaturdifferenz geringeren Einfluss auf Faltenabstand und -verteilung hat als Faltenhalterkraft und Temperatursumme. Eine Tendenz zur Verringerung der Faltenabstände mit höherer Temperaturdifferenz ist dennoch festzustellen. Mittlerer Faltenabstand und Standardabweichung zeigen einen flachen quadratischen Verlauf. Bei einem Wert von ca. 80 K wird ein Zustand erreicht, der mit weiterer Erhöhung der Temperaturdifferenz nur noch minimale Änderungen erfährt (Abbildung 67 a).

## a) Regressionsverlauf von Faltenabstand und Standardabweichung



## b) Regressionsverlauf der Kraftkenngrößen

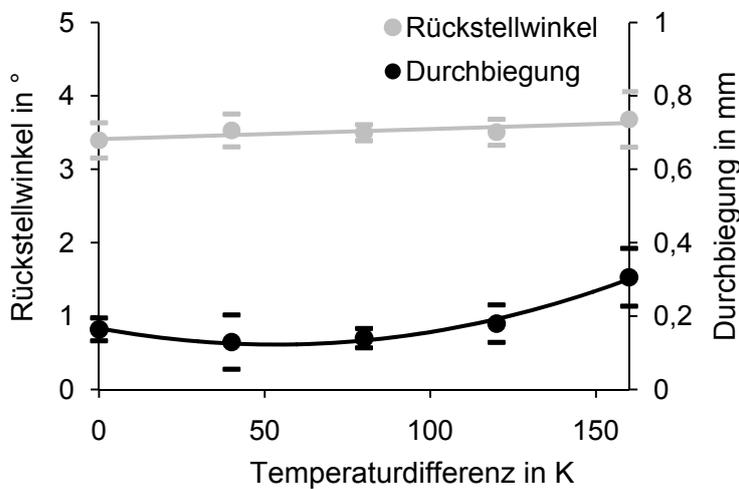


**Abbildung 67:** Vergleich der Regressionsverläufe von Faltenabstand, Standardabweichung und den Kraftkenngrößen bei Variation der Temperaturdifferenz

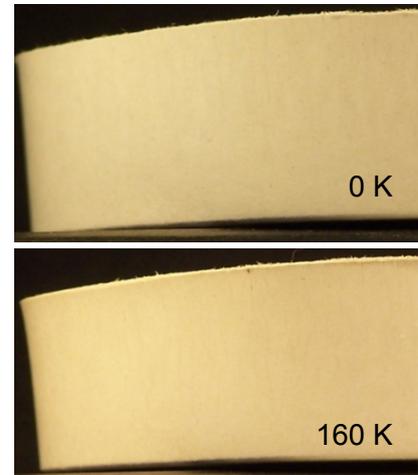
Die Verläufe der Kraftkenngrößen  $A_1$  und  $F_4$  weisen einen vergleichbar flachen quadratischen Verlauf zu dem der Faltenabstände bzw. Standardabweichung auf (Abbildung

67 b). Diese qualitative Übereinstimmung lässt den Rückschluss zwischen Kraftkenngrößen und Faltenabständen zu. Durchbiegung und Rückstellwinkel hingegen zeigen geringe Veränderungen (Abbildung 68).

a) Regressionsverlauf von Rückstellwinkel und Durchb.



b) Abbildung der Zarge



**Abbildung 68:** Regressionsverlauf von Rückstellwinkel und Durchbiegung im Vergleich zur Abbildung der Zarge bei Variation der Temperaturdifferenz

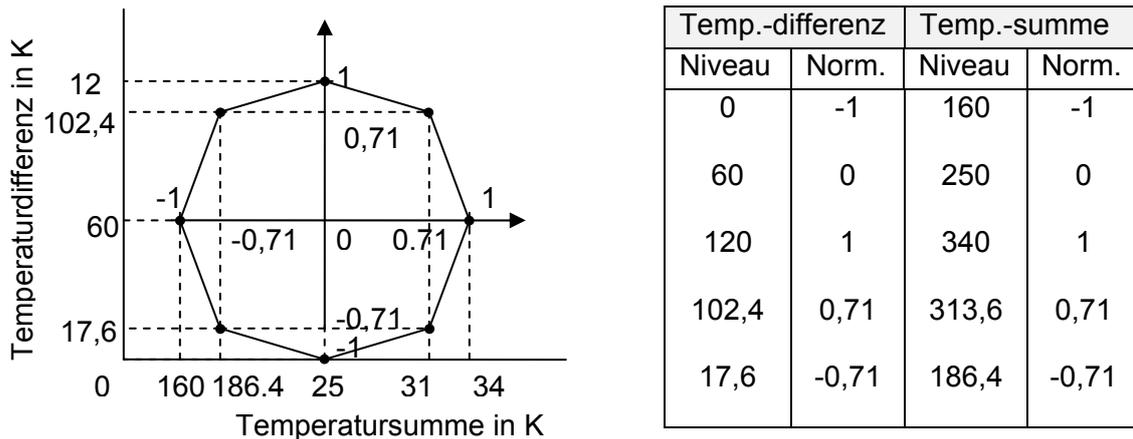
Für die Durchbiegung ist dieses Ergebnis zu erwarten. Tendenziell nimmt die Durchbiegung mit steigender Temperaturdifferenz zu. Ein Grund dafür ist die geringere Komprimierung und damit Verpressung des Materials, die geringere Festigkeiten der Falten und verstärktes Rückbiegen des Materials bewirkt. Für den Rückstellwinkel ist nach Abschnitt 5.3.3.2 eine signifikante Wirkung zu erwarten. Danach wird mit steigender Temperaturdifferenz der Rückstellwinkel erhöht. Diese Wirkung ist nur als Tendenz durch einen leicht ansteigenden linearen Verlauf festzustellen, nicht jedoch in der Höhe, wie es aus den Untersuchungen von Abschnitt 5.3.3.2 hervorgeht. Ursache ist analog der Entwicklung der Faltenabstände die Parameterwahl des Versuchspunktes, insbesondere der Temperatursumme.

### 5.3.5.5 Wechselwirkung zwischen Temperatursumme und Temperaturdifferenz

Die Untersuchungen in Abschnitt 5.3.4 zeigen, dass die Wechselwirkung 23 zwischen Energie und Temperaturdifferenz entscheidenden Einfluss auf die Abstände der Falten und die Kenngrößen des Stempelkraftverlaufes  $A_1$  und  $F_4$  hat. Die Darstellung dieses Zusammenhanges gelingt durch ein Regressionsmodell der Form

$$f(x_1, x_2) = b_0 + b_1 \cdot x_1^2 + b_2 \cdot x_1 + b_3 \cdot x_2^2 + b_4 \cdot x_2 + b_5 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (5.9)$$

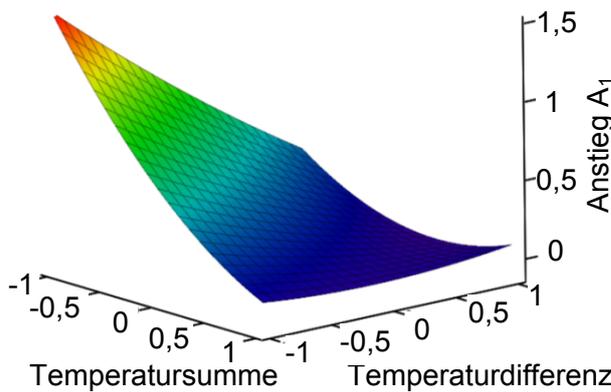
mit quadratischem Ansatz für die Einzelwirkungen  $x_1$  und  $x_2$  und linearer Wechselwirkung  $x_1 x_2$ . Ein quadratischer Ansatz ist nach den Ergebnissen der Einzelvariation in Abschnitt 5.3.5 eine geeignete Näherung. Die Ermittlung des Regressionspolynoms erfolgt über einen reduzierten Versuchsraum mit acht Stützpunkten um einen Mittelpunkt, wie er von (Scheffler, 1997) vorgestellt wird. Daraus ergibt sich ein oktagonaler Versuchsraum, in dem der Zusammenhang zweier Parameter auf eine Antwortgröße ermittelt wird. Wie beim vollfaktoriellen Versuchsraum erfolgt nach Festlegung der Parameterniveaus eine Achsentransformation (Abbildung 69).



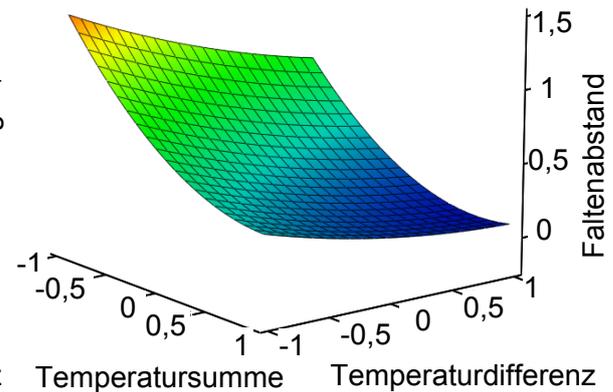
**Abbildung 69:** Achsentransformation und Parameterniveaus für den oktagonalen Versuchsplan nach (Scheffler, 1997)

Die zugehörige Planmatrix sowie die Matrix der unabhängigen Variablen zeigen Anlage 13 und Anlage 14. Die mit den fünf Niveaus und sechzehn Versuchspunkten ermittelten Regressionspolynome lassen sich in einem dreiachsigen kartesischen Koordinatensystem darstellen (Abbildung 70).

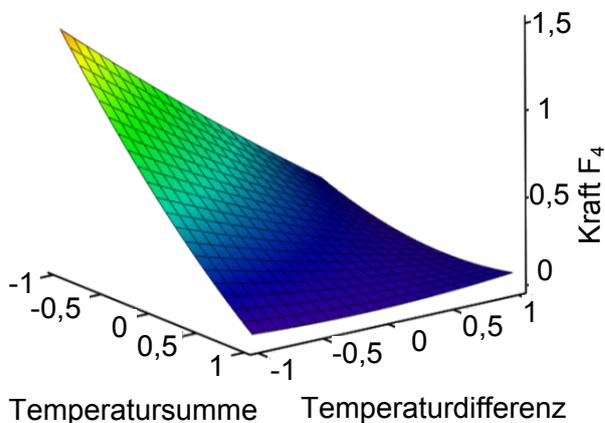
a) Anstieg  $A_1$



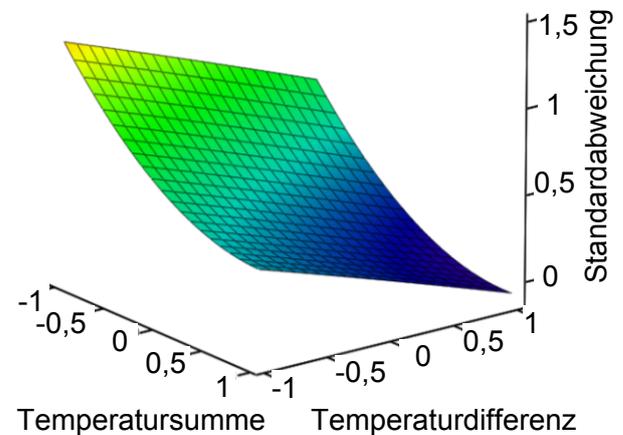
b) Faltenabstand



c) Kraft  $F_4$



d) Standardabweichung der Faltenabst.



**Abbildung 70:** Verlauf von Anstieg  $A_1$  und Kraft  $F_4$  sowie von Faltenabstand und Standardabweichung in Abhängigkeit von Temperatursumme und Temperaturdifferenz in normierter Darstellung

Die Verläufe der Flächen zeigen auch bei Einbindung der Wechselwirkung eine weitgehende Übereinstimmung. Die Gleichungen zeigen, dass die Wechselwirkung 23 zwischen den Parametern Temperatursumme und Temperaturdifferenz im Vergleich von Faltenabständen bzw. Standardverteilung und den Kenngrößen des Stempelkraftverlaufes geringen Einfluss aufweist. Eine Ursache dafür liegt im quadratischen Ansatz für die Einzelparameter, der eine bessere Näherung darstellt als ein linearer Ansatz.

## 6 Modellierung des Ziehprozesses

### 6.1 Teilsysteme und Systemgrenzen der Modellierung

Die experimentellen Untersuchungen in Abschnitt 5 haben gezeigt, dass Rückschlüsse zwischen Qualität der Formteile und dem Verlauf der Stempelkraft möglich sind und sich darüber hinaus im Falle der Faltenabstände Korrelationen ableiten lassen. Eine Modellierung des Kraftverlaufes am Stempel ermöglicht weitere Einblicke in die Wirkmechanismen, die innerhalb des Prozesses die Qualität der Formteile beeinflussen. Eine hinreichend genaue Beschreibung des Kraftverlaufes mit den zugehörigen Teilkräften aus Formänderung und Reibung, abhängig von den Prozessparametern, lässt eine Simulation von Parameterkonstellationen zu und ergibt den zugehörigen Kraftverlauf am Stempel. Die aufgezeigten Beziehungen zwischen den Kenngrößen des Kraftverlaufes und den Qualitätskriterien der Formteile ermöglichen dann die Simulation und Vorhersage der Formteilqualität. Eine derartige Vorhersage setzt ein Prozessmodell voraus, für das eine Entkopplung vom Maschinensystem erforderlich ist. Grundlage für ein funktionsfähiges Prozessmodell ist, dass innerhalb des abgebildeten Bereiches der Prozessparameter keine strukturellen Schäden wie Risse, Blasen oder Kriechbrüche auftreten, da diese den Verlauf der Kraft unvorhersehbar verändern.

Der Kraftverlauf am Stempel ist durch eine Überlagerung zahlreicher Teilkräfte gekennzeichnet. Dazu gehören bei durchgängiger Betrachtung des Gesamtsystems Formänderungskräfte am Karton, Reibkräfte zwischen Karton und Arbeitsorganen, Trägheitskräfte der Mechanik, Reibkräfte der mechanischen Übertragungsstrecke und im Hydrauliksystem sowie regelungstechnisch bedingte Kräfte. Eine gleichzeitige Betrachtung aller Kraftkomponenten lässt keine Aussagen zu einem der Teilsysteme Prozess, Mechanik oder Antrieb zu. Aus diesem Grund werden die Eingrenzungen von Abschnitt 5.2.2 genutzt, so dass die Gesamtkraft am Stempel  $F_{ST,ges}$  aus Gleichung 5.1 auf die technologische Kraft  $F_{tech}$  reduziert wird. Diese Kraft beschreibt den Ziehprozess und setzt sich nach

$$F_{ST,ges} = F_{R,i} + F_j \quad (6.1)$$

aus technologisch bedingten Reibkräften zwischen Karton und Arbeitsorganen  $F_{R,i}$  sowie den Kraftbestandteilen  $F_j$ , die für die Formänderung des Materials erforderlich sind, zusammen. Formänderung und Reibung sind als Teilsysteme des Ziehprozesses zu betrachten, die in Wechselwirkungen miteinander stehen und zusätzlich durch den thermodynamischen Zusammenhang von Temperatur und Feuchte des Materials als drittes Teilsystem beeinflusst werden.

#### Formänderung

Die Untersuchungen der Spannungszustände im Material bei der Metallblechumformung zeigt die Komplexität der überlagerten Formänderungswirkungen (siehe Abschnitt 2.2.2) auf die erforderliche Kraft am Stempel. Der Rechenweg zur analytischen Bestimmung der Umformkraft basiert auf dem Erreichen der Fließspannung des Materials und geht davon aus, dass diese erreicht aber nicht überschritten wird. Eine Umsetzung auf die Berechnung der Ziehkraft für Karton ist daher nicht möglich. Zudem ergeben sich durch die Faltenbildung und -komprimierung, die für den Prozess charakteristisch und für die Ausbildung einer entsprechenden Formstabilität und Formhaltigkeit notwendig sind, Unterschiede in den

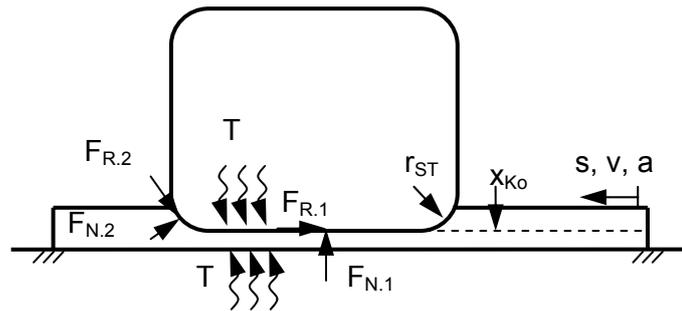
Beanspruchungen. Maßgeblich ist die Erfassung des Faltenmechanismus und der Faltenform. Daher fokussiert sich die Modellierung auf die Zusammenstellung eines Modellentwurfs, der ohne den Ansatz plastischen Fließens den Kraftverlauf am Stempel mit Hilfe der Formänderungen im Karton beschreibt und das Zusammenwirken von Stempel und Faltenhalter berücksichtigt. Formänderungen entstehen im Ziehprozess durch Zug- und Druckbeanspruchungen in Blattebene, Biegebeanspruchungen sowie Druckbeanspruchungen in z-Richtung. Die Eigenschaften des Kartons ändern sich mit Sorte und flächenbezogener Masse signifikant. Daher wird der Modellierung der Ziehkarton ZKH mit einer flächenbezogenen Masse von  $510 \text{ g/m}^2$  zugrundegelegt, der bereits in den Experimenten genutzt wird. Die Komprimierung des Materials wird durch die Geometrie der Arbeitsorgane erzeugt, so dass Ziehspalt und Konizität des Stempels zu berücksichtigen sind. Für Faltenhalterkraft, Temperatursumme und Temperaturdifferenz werden Wertebereiche aus den experimentellen Untersuchungen nach Abschnitt 5 genutzt, bei denen keine strukturellen Schäden auftreten. Die geometrischen Eigenschaften der Werkzeuge und des Formteils werden entsprechend den in Abschnitt 5 genutzten Werkzeugen festgelegt und fixiert. Tabelle 6 zeigt zusammenfassend die Gültigkeitsgrenzen des Modells.

**Tabelle 6:** Gültigkeitsgrenzen für die Modellierung

Parameter	Wertebereich
Faltenhalterkraft	500-2000 N
Temperatursumme	200-400 K
Temperaturdifferenz	0-100 K
Material	MM ZKH
Flächenbezogene Masse	$510 \text{ g/m}^2$
Ziehhöhe	25 mm
Durchmesser Ziehbüchse	110 mm
Ziehspalt (max.)	0,45 mm
Radien ZB/ST	3 mm / 0,2 mm
Konizität ST	0-0,59°

## Reibung

Die Reibung zwischen Papier und Karton ist als eigenständiges Teilsystem innerhalb des Prozesses zu betrachten. Bislang wird dieses System durch den Ansatz Coulomb'schen Reibverhaltens mit konstantem Reibkoeffizienten angenähert. Bei der Nutzung dieser Annahme entstehen für den Ziehprozess Abweichungen, da die Reibkräfte einen Großteil der Stempelkraft darstellen. Es ist zu erwarten, dass sich der Reibkoeffizient mit den Temperaturen der Arbeitsorgane, der Temperatur im Material, der Verdichtung des Materials, der durch den Kontakt verringerten Oberflächenrauheit der Zarge, sowie der Feuchte ändert. Zudem ist nicht geklärt, in wie weit die Annahme eines geschmierten Reibungszustandes für das vorliegende Material und unter den spezifischen Prozessbedingungen zutrifft. Durch den Komprimierungsweg  $x_{K0}$  des Materials entsteht an der Einlaufrundung der Ziehbüchse durch  $F_{N,2}$  und  $F_{R,2}$  ein Formeffekt zwischen Arbeitsorgan und unkomprimiertem Material, dessen Einfluss nicht berücksichtigt und in der Literatur bislang nicht für Karton beschrieben wird (Abbildung 71).

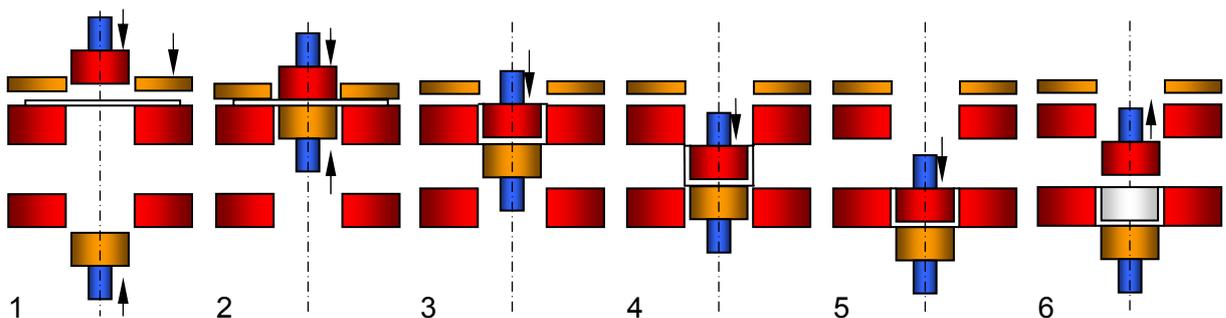


**Abbildung 71:** Schematischer Ablauf der Reibung eines Stahlprüfkörpers auf Karton unter Komprimierung

Wie in Abschnitt 2.3.3 beschrieben, zeigen einzelne empirische Untersuchungen Zusammenhänge der Reibung von Feuchte und Werkzeugtemperaturen  $T$  für die jeweilig genutzten Materialien auf. Eine analytische Beschreibung der Effekte ist bislang nicht bekannt. Gleichzeitig ist die Messung unter prozessnahen Bedingungen bei definierter Komprimierung und Temperatur nicht an Standardprüfgeräten möglich. Aussagen im Bezug zum Einfluss der Oberfläche des Kartons sind bislang teilweise widersprüchlich und eine Abhängigkeit des Reibkoeffizienten von der Geschwindigkeit, wie bei Kunststoffen ist nicht auszuschließen, jedoch auch nicht allgemeingültig nachgewiesen. Diese Tatsachen zeigen, dass das Tribosystem zwischen Karton und Stahl bezogen auf den Ziehprozess und dessen spezifische Bedingungen einer weiteren grundlagenorientierten wissenschaftlichen Untersuchung bedarf und als eigenständiger Forschungscomplex zu betrachten ist. Aus diesem Grund wird für die Abbildung der Reibung im Modell weiterhin Coulomb'sche Reibung angenommen.

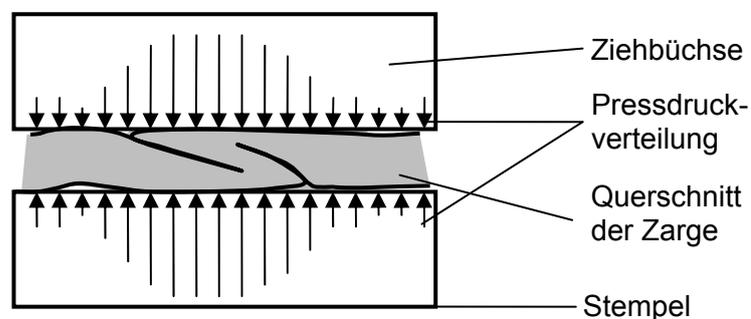
### Thermodynamik

Ein eigenes wissenschaftliches Forschungsgebiet ist auch das thermodynamische Verhalten des Kartons. Abschnitt 2.3.2 zeigt, dass besonders im Bereich der Trockenpartie von Papiermaschinen wissenschaftliche Arbeiten das Ziel verfolgen den Temperatur- und Feuchteverlauf im Material als instationäres System zu beschreiben. Dazu werden für einen Trockenzylinder 4 Phasen definiert, die durch unterschiedliche Zustände der Wärmeeinbringung gekennzeichnet sind. Mit diesem Ablauf und unter der Annahme einer konstanten Materialdicke sowie eines eindimensionalen Wärmedurchgangs erfolgt über eine vorgegebene Anzahl von Stützpunkten die numerische Berechnung von Temperatur- und Feuchteverlauf des Materials (Roonsprasang, 2008). Für den Ziehprozess lassen sich ähnliche Kontaktzustände der Wärmeeinbringung definieren (Abbildung 72).



**Abbildung 72:** Kontaktzustände der Wärmeeinbringung beim Ziehprozess von Karton

Die Erwärmung des Kartons in Zustand 1 beginnt, sobald er durch den Faltenhalter mit einer definierten Kraft an die Stirnfläche der Ziehbüchse gedrückt wird. Mit der Berührung des Materials durch Stempel und Gegenhalter beginnt Zustand 2. Der Temperatureintrag auf den Formteilm Boden hält während der Formung an. Der Stempel zieht das Material in die Ziehbüchse ein und die Fläche mit direktem Kontakt zum Stempel nimmt zu, so dass in Zustand 3 von zwei Seiten Wärmeenergie ins Material eingetragen wird. Nach dem Austritt aus der Ziehbüchse erfolgt der weitere Energieeintrag durch den Stempel und es ist erstmals in Zustand 4 ein Entweichen der Feuchte an der Oberfläche des Materials möglich. Zustand 5 beschreibt einen ähnlichen Zustand der Wärmeeinbringung wie Zustand 3 nur mit unterschiedlicher Temperatur, die durch die Kalibrierbüchse eingebracht wird. Nach Ausfahren des Stempels wird in Zustand 6 weiter Feuchte durch die Innenseite der Zarge abgegeben. Die beschriebenen Zustände gehen jeweils instationär ineinander über. Es sind meist zwei Zustände gleichzeitig wirksam. Im Unterschied zur Modellierung des thermodynamischen Systems von Karton in Papiermaschinen sind in den Zuständen von Abbildung 72 unterschiedliche Komprimierungszustände in z-Richtung des Materials zu beachten. Eine Abgabe des Dampfes an die Umgebung ist erst nach Verlassen der Ziehbüchse möglich. Unter dem Faltenhalter entsteht nach anfänglich nur leichter Komprimierung bei Herausziehen des Kartonzuschnittes ein starker Pressdruckanstieg. Auch die Druckverhältnisse in der Ziehbüchse sind nicht konstant, da der Materialüberschuss mit der Ziehhöhe unverhältnismäßig stark ansteigt und damit veränderte Verhältnisse beim Wärmedurchgang abhängig von der Ziehhöhe erzeugt werden. Die Faltenbildung, die eine Dickenerhöhung der Zarge zur Folge hat, führt zusätzlich zu lokalen Komprimierungsunterschieden am Zargenumfang (Abbildung 73).



**Abbildung 73:** Pressdruckverteilung bei Komprimierung der Zarge im Ziehspalt

Durch diese Wirkungen ist zu erwarten, dass ein Feuchtegradient über Umfang und Dicke der Zarge sowie über der Ziehhöhe entsteht und nicht von eindimensionalem Wärmedurchgang ausgegangen werden kann. Nach den Untersuchungen von Abschnitt 5.3.5.1 ändert sich die Art der Falten mit Änderung der Prozessparameter (siehe auch Abbildung 62). Gleichzeitig sind die Kontaktverhältnisse zwischen Karton und Ziehbüchse bzw. Stempel von der Faltenart und der örtlichen Materialanhäufung abhängig.

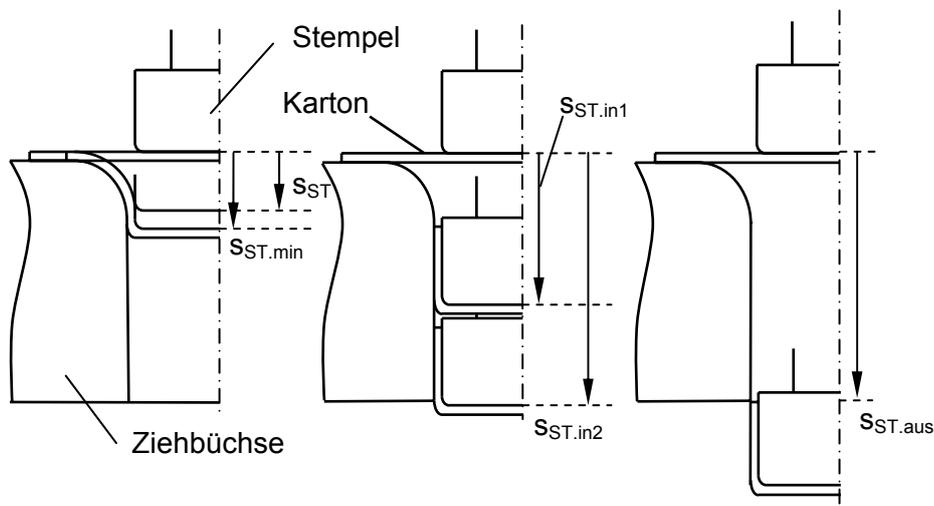
Diese Zusammenhänge und Einflüsse des thermodynamischen Systems beim Ziehen von Papier und Karton zeigen, dass die bisherigen Ansätze aus der Modellierung der Trockenvorgänge in Papiermaschinen nur ansatzweise nutzbar sind. Vielmehr ist eine detaillierte Anpassung auf die Kontaktzustände des Ziehprozesses notwendig. Für die Modellierung ist die Annahme eines eindimensionalen Wärmedurchgangs zudem eine grobe Näherung und lässt Abweichungen erwarten. Grundlage einer thermodynamischen

Modellierung ist die Klärung der Dickenänderung und der Faltenverteilung in der Zarge. Eine Simulation der thermodynamischen Verhältnisse ist daher eine wissenschaftliche Zielstellung, die als Ansatz weiterführender Forschungsarbeiten zu betrachten ist.

Für die Modellierung ist dennoch ein Ansatz für die Einbeziehung des Temperatureinflusses erforderlich, da ein Umformen ohne Wärmeeintrag nicht vorgenommen wird und auch kaum realisierbar ist. Die Veränderung der Feuchte innerhalb des Prozesses und deren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Materials werden nicht modelliert, da bereits für die Änderung dieser Eigenschaften mit der Materialtemperatur eine Annahme zu treffen ist. Es ist zudem in der Literatur ungeklärt, welche Eigenschaftsänderungen zu erwarten sind, wenn die Feuchtigkeit an der Oberfläche des Materials nicht entweichen kann, wie es in der Ziehbüchse der Fall ist. Entsprechend kann der Kraftverlauf konditionierter Materialien nicht abgebildet werden. Daher wird von einer Ausgangsfeuchte des Materials von 7,3 % lt. Herstellerangaben ausgegangen.

## 6.2 Modellierung der geometrischen Verhältnisse

Die Modellierung des Kraftverlaufes am Stempel setzt zunächst die Erfassung der geometrischen Verhältnisse der Werkzeuge voraus. Die Beschreibung der wirkenden Kräfte gelingt durch die Erfassung der jeweiligen Wirkbereiche über dem Stempelweg. Dazu werden die im Prozess entscheidenden Wegpositionen des Stempels definiert (Abbildung 74).



**Abbildung 74:** Positionen des Stempelweges

Die Nullposition der Stempelwegkoordinate  $s_{ST}$  wird bei Aufsetzen des Stempels auf den Kartonzuschnitt definiert. Nach Einfahren des Stempels in die Ziehbüchse entsteht die maximale Komprimierung des Kartons erstmals bei

$$s_{ST.min} = d_{Mat} + r_{ST} + r_{ZB} . \quad (6.2)$$

Zu diesem Zeitpunkt wird der minimale Ziehspalt erreicht. Anschließend wird das Material vollständig in die Ziehbüchse eingezogen und bei

$$s_{ST.in1} = s_{ST.min} + h_{ZT} - r_{ST} \quad (6.3)$$

ist unter Vernachlässigung der Längsdehnung der Zarge die Mantelfläche über der gesamten Ziehhöhe  $h_{ZT}$  in der Ziehbüchse unter Komprimierung. Der Zargenrand hat die Position  $s_{ST.min}$  erreicht. Die Ziehbüchse weist im Modell eine größere Höhe  $h_{ZB}$  auf als das Ziehteil. Das Material wird unter Komprimierung durch die Ziehbüchse gezogen und erreicht bei

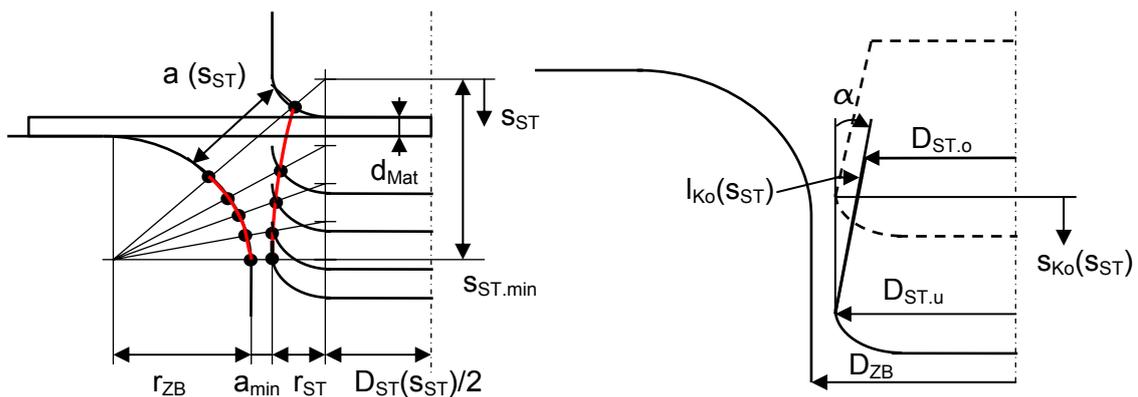
$$s_{ST.in2} = s_{ST.min} + h_{ZB} \quad (6.4)$$

die Stempelposition von der an das Material die Ziehbüchse verlässt. Durch

$$s_{ST.aus} = s_{ST.min} + h_{ZB} + h_{ZT} - r_{ST} \quad (6.5)$$

wird die Position beschrieben, an dem das Material vollständig die Ziehbüchse verlassen hat und die Stempelkraft annähernd den Wert Null annimmt.

Für die Komprimierung als wesentliche Wirkung innerhalb des Ziehprozesses sind die geometrischen Verhältnisse am Einlauf der Ziehbüchse entscheidend (Abbildung 75).



**Abbildung 75:** Abstandsfunktion am Einlauf des Materials in den Ziehspalt

Das Einsetzen der Komprimierung ist durch die Entwicklung des Abstandes zwischen Stempel und Ziehbüchse gekennzeichnet. Dieser Abstand kann als zusammengesetzte Funktion  $a(s_{ST})$  in Abhängigkeit des Stempelweges abgebildet werden. Die Funktion besteht aus zwei Teilen. Der erste Teil beschreibt den Einlauf des Materials bis zum Erreichen des minimalen Ziehspaltes  $a_{min}$ . Der Abstand der Berührungspunkte an Stempel und Ziehbüchse ergibt sich durch die Verbindung der Rundungsmittelpunkte von Stempelradius  $r_{ST}$  und Ziehbüchsenradius  $r_{ZB}$  und lässt sich aus der geometrischen Anordnung mit dem maximalen Durchmesser des Stempels  $D_{ST.u}$  durch

$$a_1(s_{ST}) = \sqrt{\left(r_{ZB} + a_{min} + r_{ST} + \frac{D_{ST.u}}{2}\right)^2 + (s_{ST.min} - s_{ST})^2} - r_{ZB} - r_{ST} \quad (6.6)$$

berechnen. Der Durchmesser des Stempels ist nicht konstant. Der Stempel ist vom Boden an konisch verjüngt. Der obere Durchmesser des Stempels  $D_{ST.o}$  wird nach (Tenzer, 1989) mit dem Durchmesser der Ziehbüchse  $D_{ZB}$ , der Ziehhöhe  $h_{ZT}$  und der Dicke des verpressten

Kartons, die dem minimalen Ziehspalt  $a_{\min}$  entspricht, aus der Querschnittsflächenbilanz des Materials

$$(D_{ZB}^2 - D_{ST.o}^2) \cdot \frac{\pi}{4} = (D_{ZB} + 2 \cdot h_{ZT}) \cdot a_{\min} \quad (6.7)$$

nach

$$D_{ST.o} = \sqrt{D_{ZB}^2 - 4 \cdot (D_{ZB} + 2 \cdot h_{ZT}) \cdot a_{\min}} \quad (6.8)$$

ermittelt. Der untere Stempeldurchmesser  $D_{ST.u}$  wird durch

$$D_{ST.u} = D_{ZB} - 2 \cdot a_{\min} \quad (6.9)$$

berechnet. Mit den Gleichungen 6.8 und 6.9 ergibt sich der Konuswinkel des Stempels  $\alpha$ , bei dem ein annähernd konstanter Pressdruck über der Ziehhöhe erreicht wird durch

$$\tan \alpha = \frac{D_{ST.u} - D_{ST.o}}{2 \cdot h_{ZT}} \quad (6.10)$$

Der Einfluss der Konizität auf den Ziehspalt wird durch einen stempelwegabhängigen Durchmesser  $D_{ST}(s_{ST})$  berücksichtigt. Zur Vereinfachung wird die Laufkoordinate  $s_{Ko}(s_{ST})$  mit

$$s_{Ko}(s_{ST}) = s_{ST} - s_{ST.min} \quad (6.11)$$

eingeführt (siehe auch Abbildung 75). Für die Verringerung des Stempeldurchmessers  $l_{Ko}(s_{ST})$  gilt zwischen  $s_{ST.min}$  und  $s_{ST.in1}$

$$l_{Ko}(s_{ST}) = \sqrt{(s_{Ko}(s_{ST}) \cdot \cos \alpha)^2 - s_{Ko}(s_{ST})^2} \quad (6.12)$$

Damit ergibt sich der Durchmesser des Stempels in Abhängigkeit des Stempelweges und unter Berücksichtigung der Konizität durch

$$D_{ST}(s_{ST}) = D_{ST.u} - 2 \cdot l_{Ko}(s_{ST}) \quad (6.13)$$

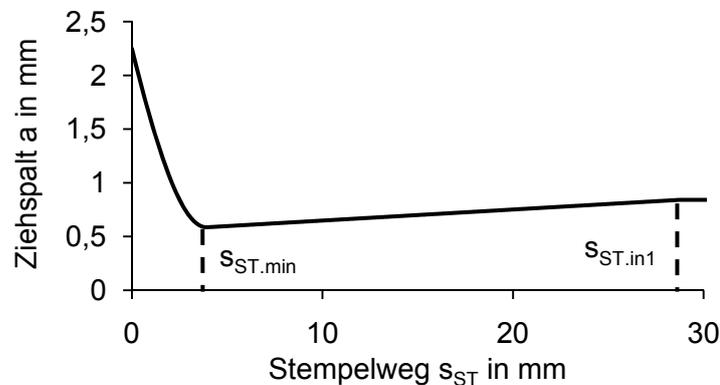
Ausgehend vom minimalen Ziehspalt  $a_{\min}$  steigt das Spaltmaß als zweite Teilfunktion  $a_2(s_{ST})$  damit nach

$$a_2(s_{ST}) = \frac{D_{ZB} - D_{ST}(s_{ST})}{2} + \Delta l_a \quad (6.14)$$

linear an. Abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen Stempel und Ziehbüchse stellt sich ein Unterschied der thermischen Längenänderung ein, der mit dem Koeffizienten für thermische Längenänderung  $\alpha_1$  und den Temperaturen der Umgebung  $T_U$ , der Ziehbüchse  $T_{ZB}$  und des Stempels  $T_{ST}$  durch

$$\Delta l_a = \frac{\alpha_l}{2} \cdot (D_{ZB} \cdot (T_{ZB} - T_U) - D_{ST} \cdot (T_{ST} - T_U)) \quad (6.15)$$

in Gleichung 6.14 berücksichtigt wird. Die zusammengesetzte Abstandsfunktion  $a(s_{ST})$  weist dann beim Einlauf in die Ziehbüchse den in Abbildung 76 gezeigten Verlauf auf.



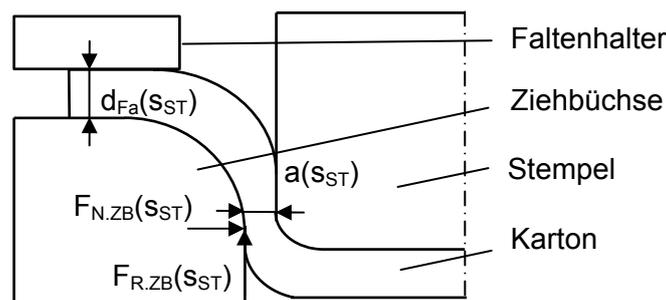
**Abbildung 76:** Ziehspalt als Funktion des Stempelweges

## 6.3 Ermittlung und Modellierung der Formänderungskräfte

### 6.3.1 Beanspruchung in z-Richtung

Innerhalb des Ziehprozesses entstehen Formänderungskräfte durch Stauchung, Komprimierung und Biegung des Materials. Die Stauchung erzeugt zudem eine Zugbeanspruchung im Material, die bei Erreichen der Bruchlast zum Riss führt. Um Aussagen über das Zusammenwirken der einzelnen Bestandteile der Formänderungskraft zu erarbeiten, werden die erzeugten Kräfte mit Hilfe von Ersatzprüfmethoden am vorliegenden Material bestimmt. Die Einbindung der gemessenen Kraftverläufe erfordert dann eine geometrische Anpassung der Probengeometrie auf die Verhältnisse im Prozess und entsprechende Ansätze zur Berücksichtigung der Wirkung der Temperaturänderung. Die Einbeziehung bekannter Modelle für die Beschreibung mechanischer Beanspruchungen ist erst sinnvoll, wenn ein erster verifizierter Modellentwurf besteht, um eine Summation von Ungenauigkeiten zu vermeiden. Zudem ist eine Prüfung der Gültigkeit dieser Modelle für den vorliegenden Triplexkarton und die Prozessbedingungen erforderlich.

Beim Ziehprozess von Karton wird entgegen der Praxis beim Tiefziehen von Metallblech mit einer definierten Verdichtung des Materials gearbeitet. Die bei der Verdichtung erzeugte Kraft  $F_{N,ZB}$  wirkt radial in der Ziehbüchse und erzeugt die Reibkraft  $F_{R,ZB}$  (Abbildung 77).

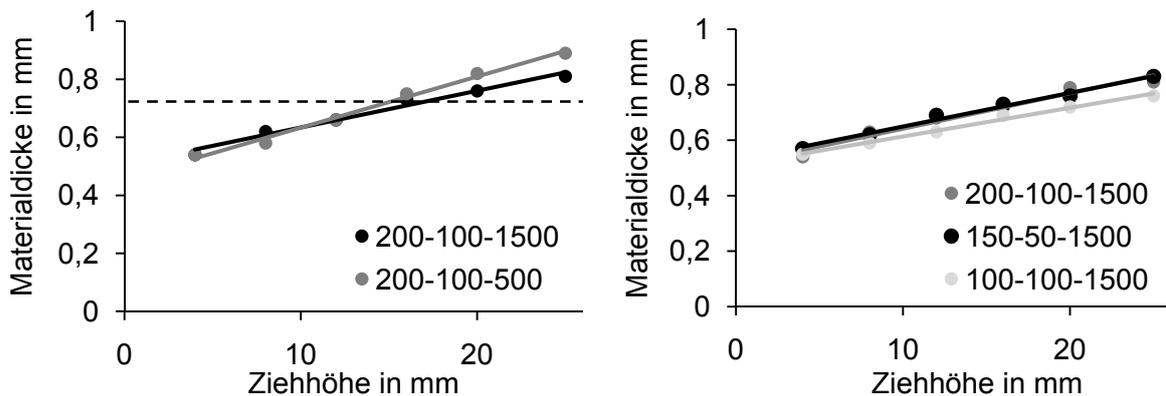


**Abbildung 77:** Schematische Darstellung der Verhältnisse in der Ziehbüchse

Die Komprimierung des Materials in der Ziehbüchse  $\kappa_{Fa}$  ergibt sich in Abhängigkeit des Stempelweges aus der Materialdicke  $d_{Fa}(s_{ST})$  und der Ziehspaltfunktion  $a(s_{ST})$  zu

$$\kappa_{Fa}(s_{ST}) = \frac{d_{Fa}(s_{ST}) - a(s_{ST})}{d_{Fa}(s_{ST})} \quad (6.16)$$

Die Materialdicke ist nicht konstant, sondern nimmt mit dem Materialüberschuss über der Ziehhöhe und damit über dem Stempelweg zu. Die Dickenmessung an Formteilen zeigt, dass unter Berücksichtigung der bleibenden Formänderung ein maximaler Dickenzuwachs von ca. halber Materialdicke angenommen werden kann. Der Verlauf der Dicke über der Ziehhöhe ist den Messungen zu Folge annähernd linear (Abbildung 78).



**Abbildung 78:** Gemessene Dicke der Zarge über der Ziehhöhe am Formteil

Die Änderungen von Temperatursumme, Temperaturdifferenz und Faltenhalterkraft zeigen, dass sich ein linearer Anstieg der Dicke über der Ziehhöhe einstellt. Die Dickenzunahme ist vorrangig von der Faltenhalterkraft abhängig. Mit zunehmender Faltenhalterkraft weist der Verlauf der Dicke über der Ziehhöhe einen geringeren Anstieg auf. Höhere Temperatursumme bei gleicher Temperaturdifferenz bringt keine Änderung der Dicke. Mit geringerer Temperaturdifferenz wird die Dicke verringert, da durch den engeren Ziehspalt aufgrund thermischer Längenänderung eine höhere Komprimierung entsteht. Der Anstieg der Dicke weist dabei einen geringen Unterschied auf. Daraus lässt sich im Bereich von Beginn der Komprimierung  $s_{ST.min}$  und der Stempelposition bei vollständig eingezogenen Material  $s_{ST.in1}$  die lineare stempelwegabhängige Dickenfunktion

$$d_{Fa}(s_{ST}) = d_{Mat} + \Delta d_{Mat}(s_{ST}) \quad (6.17)$$

mit dem Dickenzuwachs

$$\Delta d_{Mat}(s_{ST}) = K_{FH} \cdot \frac{d_{Mat}}{2} \cdot \left( \frac{s_{ST} - s_{ST.min}}{s_{ST.in1} - s_{ST.min}} \right) \quad (6.18)$$

und dem aus den Dickenmessungen ermittelten Faktor  $K_{FH}$ , zur Berücksichtigung des Einflusses der Faltenhalterkraft auf den Dickenzuwachs mit

$$K_{FH} = K_{FH.min} + (K_{FH.max} - K_{FH.min}) \cdot \left( 1 - \frac{F_{FH} - F_{FH.min}}{F_{FH.max} - F_{FH.min}} \right)^2 \quad (6.19)$$

bestimmen. Der Verlauf der Kraft für die Komprimierung des Materials wird durch einen Druckversuch in z-Richtung gemessen. Dazu wird eine Probe mit einer Fläche  $A_{Pr}$  verwendet und mit einer Druckkraft von 80 kN belastet. Die Messung des Komprimierweges erfolgt über einen externen Wegsensor mit einer Genauigkeit von 2  $\mu\text{m}$ , da die hohen Kräfte im Systemverhalten von Standardzugprüfmaschinen zu Fehlern aufgrund elastischer Verformungen führen. Der charakteristische Kraftverlauf (siehe Abschnitt 2.3.4.2, Abbildung 22) kann in Abhängigkeit der Komprimierung durch lineare Interpolation der Messpunkte in eine Funktion  $F_{int}(s_{ST})$  bei der Beschreibung der komprimierungsbedingten Kraft abhängig vom Stempelweg genutzt werden. Für den Pressdruck im Ziehprozess bezogen auf die Probenfläche gilt dann

$$p_{Ko}(s_{ST}) = \frac{F_{int}(\kappa_{Fa}(s_{ST}))}{A_{Pr}} \quad (6.20)$$

Die wirkende Fläche für die Komprimierung in der Ziehbüchse  $A_{Ko}(s_{ST})$  entspricht der Mantelfläche des Ziehteils und nimmt nach

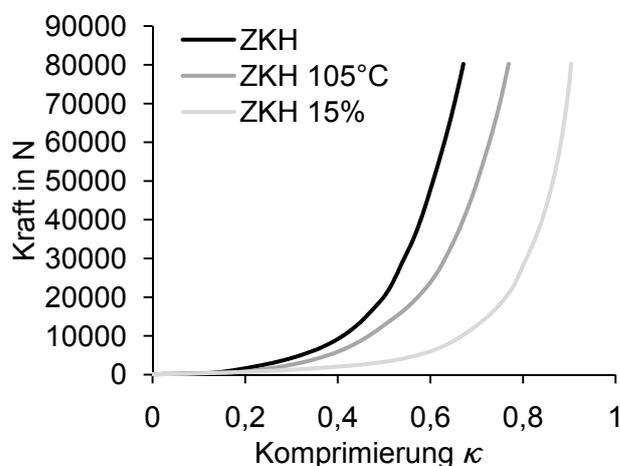
$$A_{Ko}(s_{ST}) = D_{ZB} \cdot \pi \cdot s_{Ko}(s_{ST}) \quad (6.21)$$

ab Erreichen des Komprimierungszustandes  $s_{ST,min}$  mit der eingezogenen Ziehhöhe  $s_{Ko}(s_{ST})$  und damit proportional dem Stempelweg  $s_{ST}$  zu. Für die Presskraft in der Ziehbüchse  $F_{Ko}(s_{ST})$  gilt dann

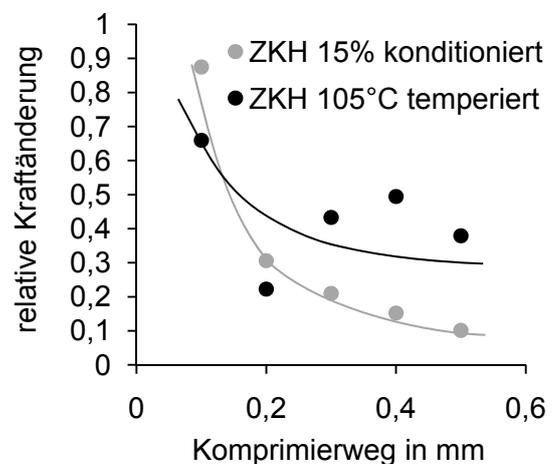
$$F_{Ko}(s_{ST}) = p_{Ko}(s_{ST}) \cdot A_{Ko}(s_{ST}) \quad (6.22)$$

Die Temperatur hat wesentlichen Einfluss auf den Widerstand, den der Karton seiner Verdichtung entgegen setzt. Eine Probe, die auf 105 °C im Ofen erwärmt wird, weist trotz schneller Abkühlung bis zum Start und während der Prüfung eine geringere Presskraft bei gleicher Komprimierung auf (Abbildung 79 a).

a) Kraftverlauf bei Komprimierung



b) Relative Kraftänderung bei Kompr.



**Abbildung 79:** Vergleich von Kraftverlauf und relativer Kraftänderung bei unbehandeltem Ziehkarton ZKH, nach Erwärmung auf 105 °C und nach Konditionierung auf 15 % Feuchte

Werden die Werte der temperierten Probe an fünf Stützstellen auf die Werte der nicht temperierten Probe normiert, entsteht ein abfallender Verlauf (Abbildung 79 b). Die Wirkung der Wärmeenergie ist demnach von der Komprimierung abhängig. Bei hoher Komprimierung wirkt sich die verringerte Widerstandsfähigkeit des Materials stärker aus. Der gleiche Effekt stellt sich für eine auf 15 % Feuchte konditionierte Probe ein. Die Werte der temperierten Probe weisen keinen gleichmäßigen Verlauf auf, sondern fallen zunächst im Bereich geringer Komprimierung stark ab und steigen danach noch einmal an, bevor sich ein leicht abfallender Verlauf einstellt. Dieser Effekt ist auf die Abkühlung durch den Kontakt des Materials zum Presswerkzeug mit Raumtemperatur zurückzuführen. Die Temperatur des Materials steigt jedoch während des Ziehvorgangs an. Aus dem Verlauf lässt sich schließen, dass bei einem ansteigenden Temperaturverlauf im Material während der Komprimierung ein kontinuierlich abfallender Verlauf des Kraftverhältnisses entsteht. Bei konstantem Bewegungsablauf bleibt die Kontaktzeit konstant und der Temperaturverlauf im Material kann als Verlauf über dem Stempelweg beschrieben werden. Für die Beschreibung der Materialtemperatur in Abhängigkeit der Stempelposition sind, wie in Abschnitt 6.1 beschrieben, die bekannten Modelle nicht ohne weiteres nutzbar. Aus diesem Grund wird ausgehend von der Umgebungstemperatur  $T_U$  ein zu erwartender schnell ansteigender Temperaturverlauf durch eine Potenzfunktion nach

$$T_{Mat}(s_{ST}) = T_U + (T_{max} - T_U) \cdot \left( \frac{s_{ST}}{s_{ST.in2}} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (6.23)$$

für den Bewegungsbereich bis zum Verlassen der Ziehbüchse angenommen. Die maximal erreichbare Temperatur  $T_{max}$  im Material wird mit einem Drittel der Summe der Werkzeugtemperaturen festgelegt. Der Temperaturgradient in Dickenrichtung des Materials und die Änderung dieses Gradienten sowie der Kerntemperatur mit der Änderung der Temperaturen von Ziehbüchse und Stempel bei gleicher Temperatursumme werden vernachlässigt. Mit steigender Temperatursumme ist hingegen zu erwarten, dass eine entsprechend höhere Temperatur im Material erzeugt wird. Die Änderung der mechanischen Materialeigenschaften in Blattebene und z-Richtung aufgrund des Temperatureinflusses, werden durch den empirischen Temperaturfaktor  $K_T$  im Modell berücksichtigt.  $K_T$  entsteht durch

$$K_T(s_{ST}) = \left[ 1 - \frac{T_{Mat}(s_{ST})}{T_{max}} + \frac{T_U}{T_{max}} \right] \cdot \left[ (K_{E.max} - K_{E.min}) \cdot \left( 1 - \frac{E_{ges} - E_{min}}{E_{max} - E_{min}} \right) + K_{E.min} \right] \quad (6.24)$$

und berücksichtigt den Temperaturverlauf  $T_{Mat}(s_{ST})$  aus Gleichung 6.23 sowie den Einfluss der Temperatursumme  $E_{ges}$  innerhalb des Geltungsbereichs für die Temperatursumme von  $E_{min}$  bis  $E_{max}$  nach Tabelle 6. Die Abhängigkeit der Temperaturwirkung von der Komprimierung wird nach dem Verlauf des Kraftverhältnisses in Abbildung 79 durch den Faktor  $K_\kappa$  berücksichtigt, der nach

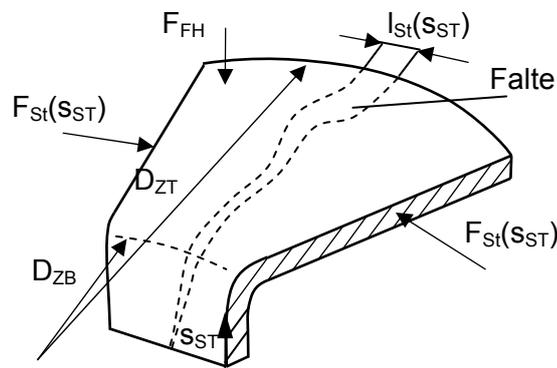
$$K_\kappa = K_{\kappa.min} + (K_{\kappa.max} - K_{\kappa.min}) \cdot \left( 1 - \left( \frac{\kappa_{Fa}(s_{ST.min}) - \kappa_{min}}{\kappa_{max} - \kappa_{min}} \right)^{\frac{1}{5}} \right) \quad (6.25)$$

in Abhängigkeit von der nach Gleichung 6.16 errechneten maximalen Komprimierung  $\kappa_{Fa(s_{ST,min})}$  bestimmt wird. Die Werte  $\kappa_{max}$  und  $\kappa_{min}$  entsprechen der maximalen und minimalen Komprimierung innerhalb des Geltungsbereiches des Modells. Die tatsächliche Presskraft in der Ziehbüchse berechnet sich dann zu

$$F_{N,ZB}(s_{ST}) = p_{Ko}(s_{ST}) \cdot A_{Ko}(s_{ST}) \cdot K_T(s_{ST}, E_{ges}) \cdot K_k \quad (6.26)$$

### 6.3.2 Beanspruchungen in Blattebene

Beanspruchungen in Blattebene entstehen beim Einziehen des Kartons in die Ziehbüchse durch den Überschuss des Materials, der Druckspannungen erzeugt (Abbildung 80).



**Abbildung 80:** Schematische Darstellung der Verhältnisse im Flanschbereich

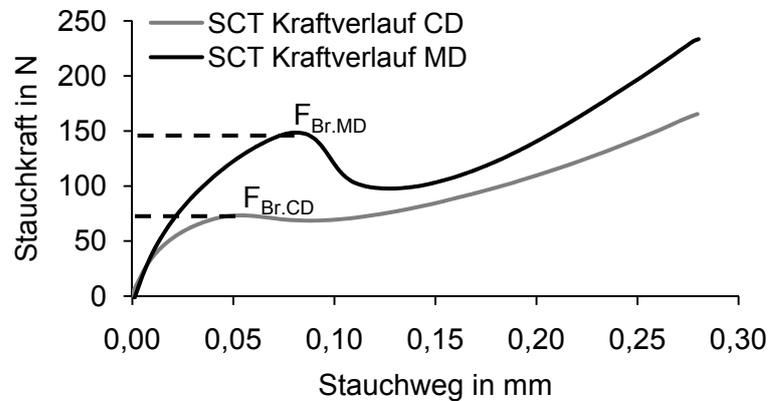
Karton weist kein ausgeprägtes Fließverhalten auf. Eine Faltenbildung, wie sie beim Tiefziehen von Metallblech als Defekt beschrieben wird, ist daher nicht zu vermeiden und durch die gezielte Komprimierung des aufgestauchten Materials Grundlage für die Formhaltigkeit des umgeformten Teils. In Abhängigkeit des Stempelweges  $s_{ST}$  wird das Material um einen Weg  $l_{St}$  gestaucht, der von der halben Differenz aus Ziehbüchsendurchmesser  $D_{ZB}$  und Rondendurchmesser des Kartonzuschnittes  $D_{ZT}$  bestimmt wird. Für die Beschreibung der bei der Stauchung entstehende Kraft  $F_{St}(s_{ST})$  kommt die Prüfmethode des Streifenstauchwiderstandes (SCT) den Bedingungen unter dem Faltenhalter am nächsten. Das Material ist unter dem Faltenhalter einer leichten Komprimierung ausgesetzt und kann daher nicht direkt zum Biegeausweichen übergehen, wie es ohne Faltenhalter einsetzt (siehe Abbildung 81).



**Abbildung 81:** Teilweise gezogenes Kartonteil ohne Einsatz des Faltenhalters

Erst nach Erreichen der Bruchkraft, die innerhalb des vorliegenden Modells durch den SCT beschrieben wird, geht die Beanspruchung in Biegung über. Der SCT wird nach (DIN 54518, 2004) bestimmt, indem ein Probestreifen eingespannt und auf Druck in Blattebene

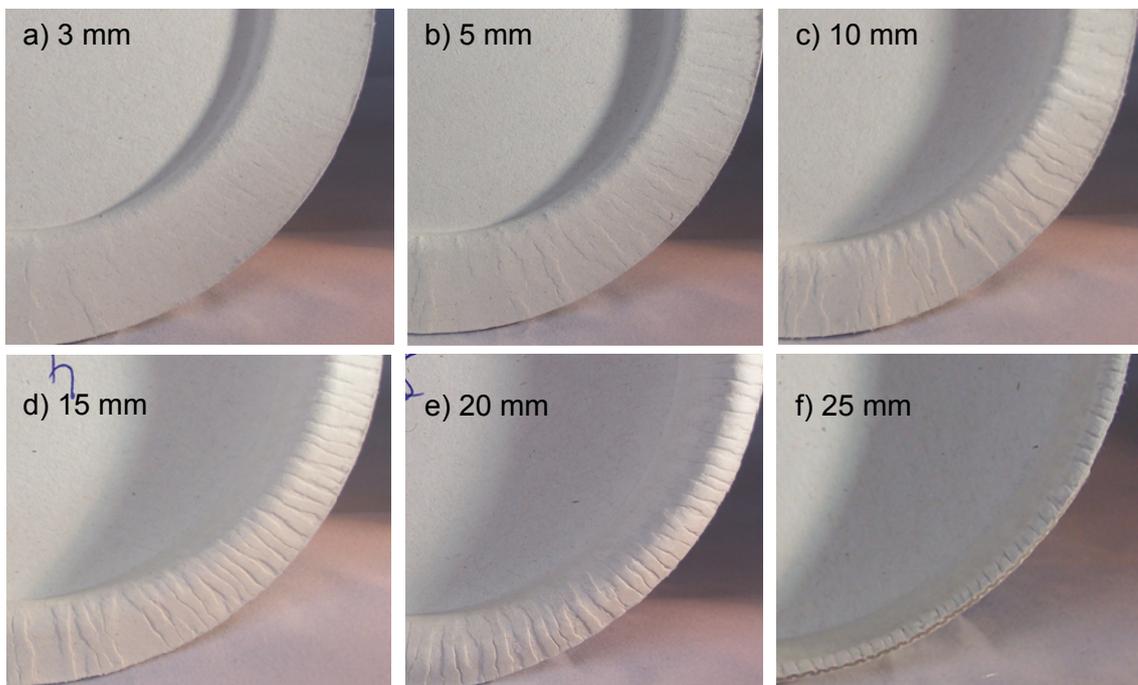
beansprucht wird. Der freie Abstand zwischen den Einspannstellen beträgt 0,7 mm. Ein instabiles Ausweichen wird verhindert. Ein freier Abstand ist unter dem Faltenhalter nicht gegeben, so dass der SCT als Näherung zu betrachten ist. Die maximale Kraft  $F_{Br}$  wird auf den Probenquerschnitt bezogen und ist von der Faserorientierung abhängig (Abbildung 82).



**Abbildung 82:** Verlauf der Kraft unter Kompression in Blattebene für Längs- (MD) und Querrichtung (CD) der Faserorientierung

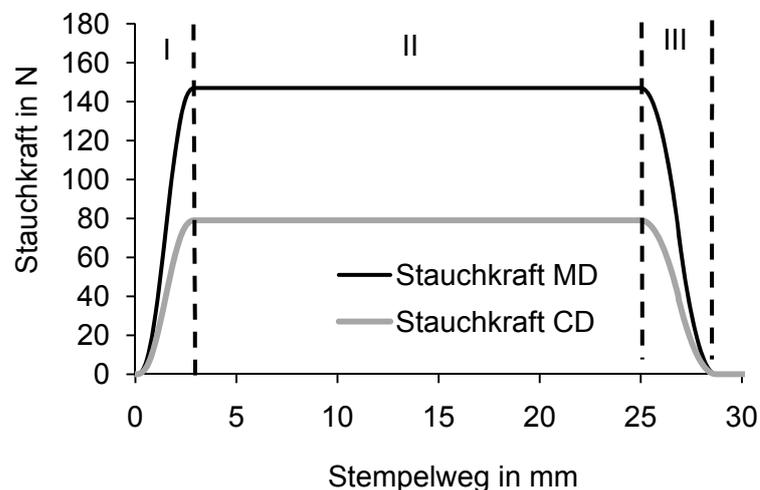
In Querrichtung der Faser werden geringere Kraftwerte erreicht. Ein weiteres Zusammenstauchen nach dem Bruch ist bei der Prüfanordnung nicht zielführend, da nach dem Bruch eine Delamination des Materials einsetzen und bei dem geringen Abstand das ausweichende Material im Spalt komprimiert werden kann.

Die Untersuchung des Flanschbereiches teilweise eingezogener Formteile zeigt, dass nicht von Beginn des Ziehvorgangs an alle Falten auf der ganzen Ziehhöhe entstehen (Abbildung 83).



**Abbildung 83:** Vergleich teilweise gezogener Formteile bei Stempelwegpositionen von 3 mm, 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm und 25 mm

Es erfolgt eine fortlaufende Bildung neuer Falten. Im Längsbereich des Formteils wirkt die Stauchkraft quer zur Faserlängsrichtung. In dieser Richtung ist der SCT wesentlich geringer und es entsteht eine höhere Anzahl Falten. Diese Falten breiten sich schnell bis zum Zargenrand aus. Ein gegenteiliger Effekt ist im Bereich der Querrichtung mit Druckbeanspruchung längs zur Faserrichtung festzustellen. Es werden weniger Falten gebildet und diese breiten sich langsam bis zum Rand aus. Daraus entsteht die Schwierigkeit den wirksamen Querschnitt des Materials zu kennzeichnen, der dem Stauchbruch entgegen wirkt. Bislang ist es nicht möglich diesen Materialquerschnitt als Verlauf des Stempelweges messtechnisch zu bestimmen. Aus diesem Grund wird für die Modellierung ein vereinfachter theoretischer Ansatz gewählt. Es wird davon ausgegangen, dass die Stauchkraft an einer Falte über den gesamten Querschnitt wirksam ist, der durch die Dicke des Materials und die Ziehhöhe bestimmt wird. Von Beginn des Ziehvorgangs an ist ein geringer Anteil der Falten wirksam, die am fertigen Formteil festzustellen sind, so dass ein entsprechend angepasster wirksamer Materialquerschnitt im Modell entsteht. Der Verlauf der Stauchkraft setzt sich aus drei Teilen zusammen (Abbildung 84).



**Abbildung 84:** Verlauf der Stauchkraft in Längs- und Querrichtung

Teil eins beschreibt den Anstieg der Kraft durch ein Polynom fünften Grades nach (VDI 2143-1, 1980) bis zum ermittelten Streifenstauchwiderstand. Anschließend bleibt der Maximalwert konstant wirksam, da ein fortlaufendes Aufstauchen des Materials durch Bildung neuer Falten erfolgt. Nach Verlassen des Faltenhalters fällt die Kraft nach einem Polynom zweiter Ordnung ab und nimmt den Wert Null an, sobald das Material vollständig in die Ziehbüchse eingezogen ist. Durch Multiplikation mit dem Verhältnis aus Ziehhöhe und Probenbreite wird die Stauchkraft für den Querschnitt einer Falte über der Ziehhöhe als Verlauf des Stempelweges beschrieben. Der Biege­widerstand beim weiteren Aufstauchen der Falten nach dem Bruch wird vernachlässigt. Der Betrag der Stauchkraft nimmt ähnlich wie bei Zugbeanspruchung mit ansteigender Materialtemperatur und damit auch Temperatursumme ab. Bei Annahme eines vergleichbaren Einflusses der Temperatur auf den Stauchwiderstand kann der Temperaturbeiwert  $K_T$  aus Gleichung 6.24 genutzt werden. Das Ausweichen des Materials wird durch den Ziehspalt behindert. Eine geringe Temperaturdifferenz zwischen Stempel und Ziehbüchse erzeugt einen engen Ziehspalt. Es ist zu erwarten, dass eine hohe Komprimierung und die Verbindung des eingezogenen Materials zu dem noch nicht eingezogenen Material eine Behinderung bei der Bewegung des

Materials unter dem Faltenhalter verursacht. Dieser Effekt lässt sich durch die empirische Beziehung

$$K_{\Delta T} = K_{\Delta T.max} - (K_{\Delta T.max} - K_{\Delta T.min}) \cdot \left( \frac{\Delta T - \Delta T_{min}}{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}} \right) \quad (6.27)$$

darstellen. Für die Stauchkraft an einer Falte gilt dann unter Annahme eines linearen Übergangs der Kraft mit der Anisotropie des Materials und vergleichbarer Verringerung des Stauchwiderstandes bei Erhöhung der Materialtemperatur wie bei der Komprimierung

$$F_{St.1F}(s_{ST}) = K_T(s_{ST}) \cdot K_{\Delta T} \cdot \frac{F_{St.MD} + F_{St.CD}}{2} \quad (6.28)$$

Für die Berechnung der gesamten Stauchkraft wird durch

$$i_{F.w}(s_{ST}) = i_{F.start} + (i_{F.start} \cdot K_{\delta} - i_{F.start}) \cdot \left( \frac{s_{ST} - s_{ST.1}}{s_{ST.2} - s_{ST.1}} \right) \quad (6.29)$$

mit der zu Beginn des Ziehvorgangs wirksamen Anzahl Falten  $i_{F.start}$  ein Verlauf wirksamer Falten  $i_{F.w}(s_{ST})$  über dem Stempelweg bestimmt. Bis zum Ausweichen des Materials beim Bruch der ersten Falten bleibt die wirksame Faltenanzahl  $i_{F.start}$  konstant. Der Bruch setzt nach der SCT Prüfung bei einem Stauchweg von ca. 0,05-0,08 mm ein. Über den Verlauf des Stauchweges  $l_{st}(s_{ST})$ , als Differenz aus dem stempelwegabhängigen aktuellen Rondenumfang und dem Umfang der Ziehkante, wird die Stempelposition  $s_{ST.1}$  beim Bruch ermittelt. Nach Verlassen des Faltenhalters bei der Stempelposition  $s_{ST.2}$  ist davon auszugehen, dass die Faltenbruchbildung weitgehend abgeschlossen ist. Zwischen beiden Stempelpositionen ändert sich die wirksame Anzahl Falten nach den Untersuchungen von Abschnitt 5.3.3.1 mit den Prozessparametern Faltenhalterkraft, Energiemenge und Temperaturdifferenz. Diese Änderung wird durch den Faktor  $K_{\delta}$  berücksichtigt. Um den dreidimensionalen Zusammenhang der Einflussgrößen auf die Faltenanzahl abzubilden wird der Verlauf der gemessenen Faltenabstände aus Abschnitt 5.3.3.1 für die Faltenhalterkraft als wichtigste Wirkung genutzt, da die Faltenanzahl  $i_F$  am Umfang der Zarge  $U_{ZB}$  über

$$i_F = \frac{U_{ZB}}{\delta_{Fa}} \quad (6.30)$$

proportional zum mittleren Faltenabstand  $\delta_{Fa}$  ist. Für die Wirkungen von Temperatursumme und Temperaturdifferenz können die Beziehungen aus Gleichung 6.24 und 6.27 genutzt werden. Mit diesen Beziehungen und den Faltenabständen  $\delta_{Fa.min}$  und  $\delta_{Fa.max}$ , an den Grenzen des Geltungsbereiches der Faltenhalterkraft  $F_{FH.min}$  und  $F_{FH.max}$  wird der mittlere Faltenabstand durch

$$\delta_{Fa} = K_T(E_{ges}) \cdot K_{\Delta T} \cdot \left[ \delta_{Fa.min} + (\delta_{Fa.max} - \delta_{Fa.min}) \cdot \left( 1 - \left( \frac{F_{FH} - F_{FH.min}}{F_{FH.max} - F_{FH.min}} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right] \quad (6.31)$$

bestimmt.  $K_{\delta}$  wird dann aus

$$K_{\delta} = K_{\delta.min} + (K_{\delta.max} - K_{\delta.min}) \cdot \left( \frac{\delta_{Fa} - \delta_{min}}{\delta_{max} - \delta_{min}} \right) \quad (6.32)$$

berechnet und beschreibt den Anstieg der wirksamen Anzahl Falten über dem Stempelweg in Abhängigkeit der Prozessparameter Temperaturdifferenz, Temperatursumme und Faltenhalterkraft. Die Werte  $\delta_{min}$  und  $\delta_{max}$  entsprechen den Extremwerten der Faltenabstände innerhalb dieses dreidimensionalen Parameterraumes. Mit der Anzahl wirksamer Falten  $i_{F,w}$  und der Stauchkraft an einer einzelnen Falte  $F_{St,1F}$  entsteht die im Prozess aufzubringende Stauchkraft, die auf den Stempel wirkt zu

$$F_{St}(s_{ST}) = i_{F,w}(s_{ST}) \cdot F_{St,1F}(s_{ST}) \quad (6.33)$$

Die Stauchkraft ist als Widerstand gegen das Einziehen des Materials zu betrachten und erzeugt zusammen mit der Reibkraft unter dem Faltenhalter eine Zugbeanspruchung im Material. Die theoretisch ertragbare Zugbeanspruchung im Material wird durch die Bruchlast aus dem Zugversuch nach (DIN EN ISO 1924-3, 2007) bestimmt. Unter Einbeziehung des Temperatureinflusses  $K_T(s_{ST})$  und dem von der Stempelposition abhängigen Materialquerschnitt  $U(s_{ST})$  entsteht die im Prozess ertragbare Zugkraft  $F_{Z,Br}(s_{ST})$  zu

$$F_{Z,Br}(s_{ST}) = K_T(s_{ST}) \cdot \frac{F_{Z,Br.MD} + F_{Z,Br.CD}}{2} \cdot \frac{U_z(s_{ST})}{b_{Pr}} \quad (6.34)$$

Die Gegenüberstellung der Belastung durch die Summe von Stauchkraft und Reibkraft unter dem Faltenhalter mit der ertragbaren Zugkraft zeigt, dass im Ziehprozess eine Zugbeanspruchung zwischen 40 und 60% der Bruchlast erzeugt wird. Es ist zu erwarten, dass die relative Beanspruchung unter diesen Werten liegt, da die Beanspruchungsgeschwindigkeit höher ist, als die im genormten Zugversuch genutzte Geschwindigkeit. Mit höherer Beanspruchungsgeschwindigkeit steigt nach (Göttsching, 1970) und (Brecht et al., 1971b) die Bruchlast des Materials an.

### 6.3.3 Biegung

Biegebeanspruchungen treten auf, während das Material in die Ziehbüchse gezogen wird. Die erzeugten Kräfte wirken in Summation auf den Stempel. Es sind Biegekräfte um die Stempelrundung  $F_{B,1}(s_{ST})$ , um die Ziehbüchsenrundung  $F_{B,2}(s_{ST})$ , die Rückbiegekraft der Zarge  $F_{B,3}(s_{ST})$  und die Biegekraft um die Grundflächengeometrie  $F_{B,4}(s_{ST})$  zu unterscheiden (Abbildung 85).

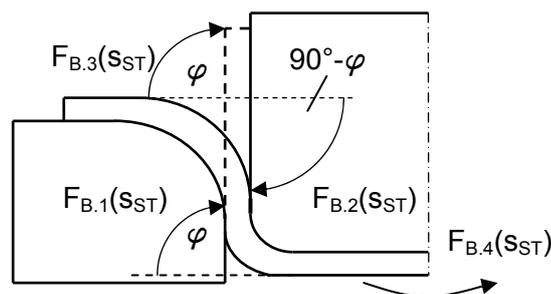
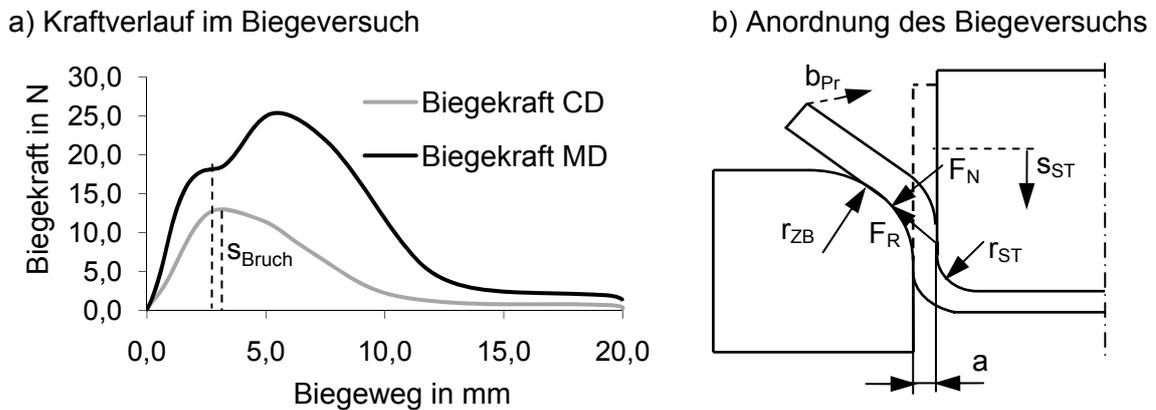


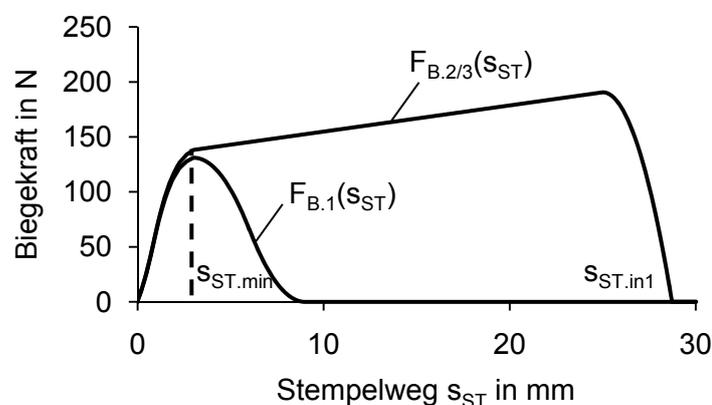
Abbildung 85: Biegestellen beim Ziehprozess von Karton

Die Prüfung der Biegesteifigkeit nach der Dreipunktmethode gemäß (DIN 53121, 2008) im elastischen Bereich des Materials liefert eine Biegekraft von maximal 1,5 N. Diese Kraft kann für die Biegung des Materials um die Grundfläche von 110 mm genutzt werden und ist gering im Vergleich zur Gesamtkraft.  $F_{B,4}$  ist demnach vernachlässigbar. Die Kraft  $F_{B,1}(s_{ST})$  wird durch einen Biegeversuch mit spezifischen prozessnahen Bedingungen angenähert. Die Geometrie der Versuchsanordnung entspricht weitgehend den Verhältnissen im Ziehprozess (Abbildung 86).



**Abbildung 86:** Schema und ermittelter Kraftverlauf im Biegeversuch unter prozessnahen Bedingungen

Ein rechteckiger Stempel formt einen Probenstreifen mit einer Breite  $b_{Pr}$  von 15 mm an zwei gegenüberstehenden Biegematrizen um. Die Radien  $r_{ZB}$  und  $r_{ST}$  entsprechen denen von Ziehbüchse und Stempel beim Ziehprozess. Der Spalt  $a$  zwischen Matrize und Stempel ist einen Zehntelmillimeter größer als die Materialdicke, so dass keine Komprimierung entsteht und die Reibkräfte gering sind. Das Material wird nicht durch einen Niederhalter beeinflusst. Es entsteht jedoch am Radius der Matrize eine Reibkraft  $F_R$ . Zudem erfolgt eine plastische Biegung an diesem Radius. Bei einem Weg von ca. drei Millimetern tritt ein lokales Maximum in der Biegekraftkurve auf. Zu diesem Zeitpunkt ist der Biegebruch an der Stempelrundung erreicht. Der weitere Anstieg der Biegekraft in Längsrichtung (MD) ist auf die plastische Formänderung der Probe an der Matrizenrundung zurückzuführen. Der Verlauf bis zum ersten Maximum wird durch lineare Interpolation der Messpunkte mit  $F_{B,int}(s_{ST})$  im Modell genutzt (Abbildung 87).



**Abbildung 87:** Verlauf der modellierten Biegekräfte  $F_{B,1}$  und  $F_{B,2/3}$  in Abhängigkeit des Stempelweges  $s_{ST}$

Vom Maximum an nimmt die Biegekraft  $F_{B.1}(s_{ST})$  nach einem Polynom zweiter Ordnung ab. Eine Stempelposition bei der  $F_{B.1}(s_{ST})$  gleich Null ist, kann nicht bestimmt werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass bei einsetzender Komprimierung in der Ziehbüchse die Biegekraft gering gegenüber der Reibkraft ist, da nur noch die Rückstellkräfte wirksam sind. An der Matrizenrundung wirkt die Biegekraft als Normalkraft und erzeugt über den Reibkoeffizienten  $\mu_{ZB}$  eine Reibkraft, die entsprechend vom Kraftverlauf abzuziehen ist. Die Biegekraft  $F_{B.1}(s_{ST})$  im Ziehprozess ergibt sich mit Bezug zum Umfang des Ziehteils  $U_{ST}$  als zylindrischem tragenden Querschnitt durch

$$F_{B.1}(s_{ST}) = F_{B.int}(s_{ST}) \cdot \frac{U_{ST}}{2 \cdot b_{Pr}} \cdot (1 - \mu_{ZB}) . \quad (6.35)$$

Der interpolierte Kraftverlauf  $F_{B.int}(s_{ST})$  kann auch für die Biegekräfte  $F_{B.2}(s_{ST})$  und  $F_{B.3}(s_{ST})$  genutzt werden, wobei zu beachten ist, dass  $F_{B.3}(s_{ST})$  aufgrund der Vorschädigung und der Rückstelleigenschaften des Materials geringer ist als  $F_{B.2}(s_{ST})$ . Zudem ändert sich der tragende Querschnitt während dem das Material in die Ziehbüchse eingezogen wird mit dem Stempelweg, da auch der Materialüberschuss als wirksamer Querschnitt zu berücksichtigen ist. Dieser Zusammenhang wird durch den stempelwegabhängigen Umfang des Zuschnittes  $U_Z(s_{ST})$  nach

$$U_Z(s_{ST}) = (D_{ZB} + 2 \cdot s_{ST}) \cdot \pi \quad (6.36)$$

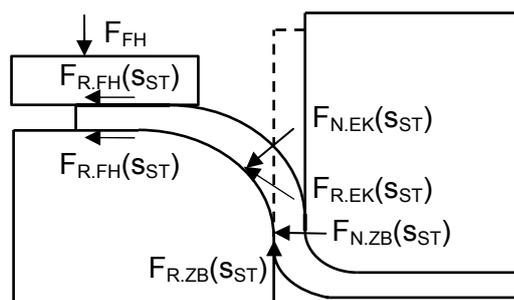
abgebildet und es wird

$$F_{B.2/3}(s_{ST}) = F_{B.int}(s_{ST}) \cdot \frac{U_{ST}}{2 \cdot b_{Pr}} \cdot \frac{U_Z(s_{ST})}{U_{ZB}} \cdot (1 - \mu_{ZB}) . \quad (6.37)$$

Beide Biegekräfte wirken bis das Material bei  $s_{ST.in1}$  vollständig in die Ziehbüchse eingezogen ist, da beim Einziehen kontinuierlich Material bis zum Bruch beansprucht wird. Der lineare Verlauf nach Erreichen der maximalen Biegekraft bei  $s_{Bruch}$  wird durch den ansteigenden Umfang  $U_Z(s_{ST})$  erzeugt (Abbildung 87).

#### 6.4 Modellierung der Reibkräfte

Innerhalb des Ziehprozesses treten Reibkräfte auf, die einen wesentlichen Anteil an der Gesamtkraft des Stempels haben. Ähnlich dem Tiefziehen von Metallblech entsteht unter dem Faltenhalter durch die gezielt variierte Faltenhalterkraft  $F_{FH}$  eine Reibkraft  $F_{R.FH}(s_{ST})$  die an zwei Reibstellen wirkt (Abbildung 88).



**Abbildung 88:** Reibkräfte innerhalb des Ziehprozesses von Karton

In der Ziehbüchse wirkt durch die Komprimierung des Materials radial eine Normalkraft  $F_{N,ZB}(s_{ST})$ , die eine entsprechende Reibkraft  $F_{R,ZB}(s_{ST})$  verursacht. Zusätzlich entsteht beim Einziehen des Materials eine Reibkraft an der Ziehbüchsenrundung  $F_{R,EK}(s_{ST})$ . Mit den Formänderungskräften aus Abschnitt 6.3 lassen sich die Reibkräfte im Modell abbilden. Der Reibkoeffizient zwischen Karton und der polierten Oberfläche der Arbeitsorgane wird durch eine Messung am Tribometer der Fa. CETR Typ UMT-2 im Normklima unter Berücksichtigung der Zweiseitigkeit des Materials ermittelt. Auf der Kontaktseite mit der Ziehbüchse stellt sich ein Gleitreibungskoeffizient  $\mu_{ZB}$  von 0,129 ein, während die gegenüberliegende Seite einen Wert  $\mu_{FH}$  von 0,125 aufweist. Die Messungen des Reibkoeffizienten nach Glättung zeigen, dass der Reibkoeffizient tendenziell mit zunehmender Glätte abnimmt. Die Wirkung ist für den gewählten Ziehkarton gering und wird im Modell vernachlässigt. Die Berechnung der Reibkräfte erfolgt vereinfacht unter der Annahme Coulomb'scher Reibung. Mit der geregelten Faltenhalterkraft  $F_{FH}$  gilt dann für die Reibkraft unter dem Faltenhalter bis das Material den Faltenhalter vollständig verlassen hat

$$F_{R,FH}(s_{ST}) = F_{FH} \cdot (\mu_{ZB} + \mu_{FH}). \quad (6.38)$$

Die Reibkraft in der Ziehbüchse ergibt sich aus der nach Gleichung 6.26 ermittelten Presskraft  $F_{N,ZB}(s_{ST})$  durch die Komprimierung der Zarge nach

$$F_{R,ZB}(s_{ST}) = F_{N,ZB} \cdot \mu_{ZB}. \quad (6.39)$$

Für die Beschreibung der Reibkraft an der Ziehbüchsenrundung wird die Eytelwein'sche Gleichung der Seilreibung verwendet, wie es beim Tiefziehen von Metallblech bekannt ist. Mit dem Umschlingungswinkel  $\alpha$  und der Summe aus Stauchkraft  $F_{St}(s_{ST})$  und Reibkraft unter dem Faltenhalter  $F_{R,FH}(s_{ST})$ , die bei der Bewegung des Materials wirkt, gilt

$$F_{R,EK}(s_{ST}) = (e^{\mu_{ZB} \cdot \alpha} - 1) \cdot (F_{St}(s_{ST}) + F_{R,FH}(s_{ST})). \quad (6.40)$$

## 6.5 Prozessmodell und Verifizierung

Die beschriebenen Beziehungen für die Teilkräfte aus Formänderungen und Reibung werden durch entsprechende Logikbedingungen über die in Abschnitt 6.2 definierten Stempelpositionen verknüpft. Das Gesamtmodell der Stempelkraft beim Ziehen von Karton entsteht durch die Summierung der Teilkräfte als stempelwegabhängiger Verlauf durch

$$F_{ST,ges}(s_{ST}) = F_{R,FH}(s_{ST}) + F_{R,EK}(s_{ST}) + F_{R,ZB}(s_{ST}) + F_{St}(s_{ST}) + F_{B,1}(s_{ST}) + 2F_{B,2/3}(s_{ST}). \quad (6.41)$$

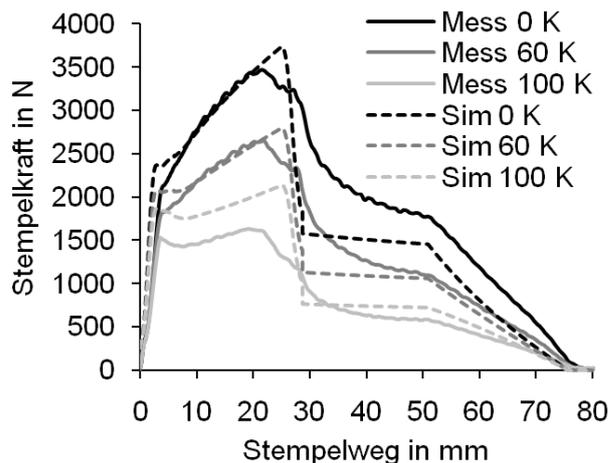
Vorgaben sind für Geometrie und Temperaturen der Arbeitsorgane, sowie für die mechanischen Eigenschaften des Ziehmaterials erforderlich. Veränderliche Prozessparameter sind Temperaturdifferenz  $\Delta T$ , Temperatursumme  $E$ , jeweils durch Vorgabe der Temperaturen an den Arbeitsorganen und die Faltenhalterkraft  $F_{FH}$ . Die Verifizierung des in Abschnitt 6.2 bis 6.4 beschriebenen Modellansatzes erfolgt über die Variation dieser Größen auf jeweils drei Niveaus nach Tabelle 7.

**Tabelle 7:** Versuchspunkte und Parameterniveaus für die Verifizierung des Prozessmodells

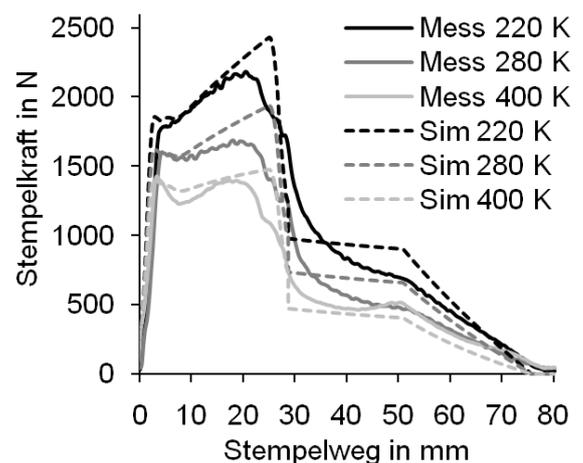
Versuchspunkt			$\Delta T$	E	$F_{FH}$	Konizität
$\Delta T$	E	$F_{FH}$				
-	200 K	1000 N	0 K 60 K 100 K	-	-	-
40 K	-	1000 N	-	220 K 280 K 400 K	-	-
40 K	220 K	-	-	-	500 N 1000 N 1500 N	-
100 K	300 K	500 N	-	-	-	0 ° 0,59 °

Der Vergleich der Kraftverläufe am Stempel zeigt, dass eine weitgehende Übereinstimmung der Änderungen zwischen gemessener und simulierter Stempelkraft bei Variation der Prozessparameter im Gültigkeitsbereich erreicht wird (Abbildung 89).

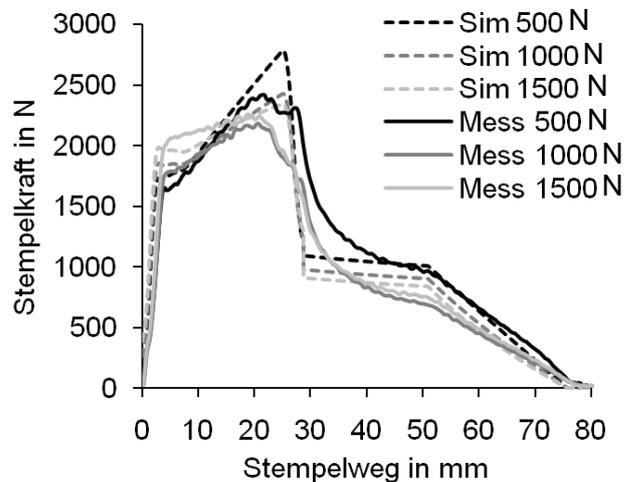
a) Variation der Temperaturdifferenz



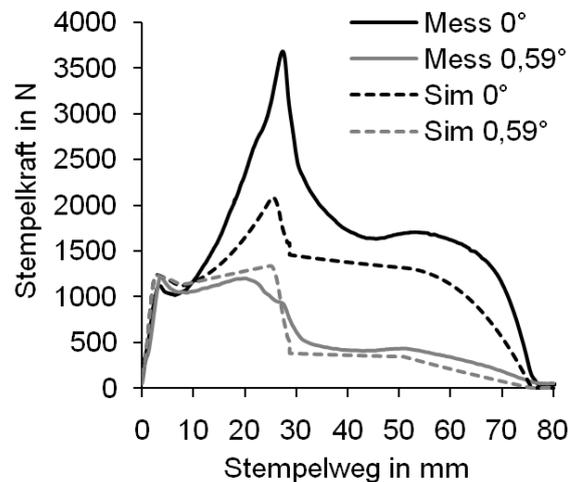
b) Variation der Temperatursumme



c) Variation der Faltenhalterkraft



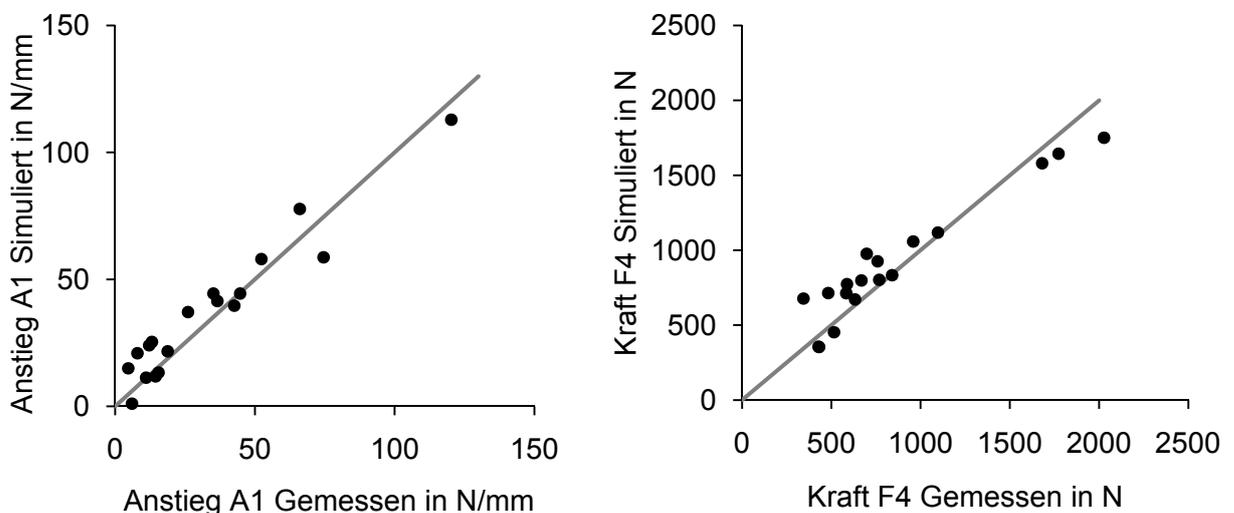
d) Variation des Konizitätswinkels

**Abbildung 89:** Vergleich gemessener und simulierter Verläufe der Stempelkraft unter Variation von Temperaturdifferenz, Temperatursumme, Faltenhalterkraft und Konizität

Die wesentlichen Prozesskräfte entstehen durch die Komprimierung des Materials in z-Richtung in der Ziehbüchse und die Stauchung des Materialüberschusses in Falten. Mit Verringerung der Kraft entsteht bei  $F_1$  ein lokales Maximum in der Kraftkurve, was durch Biegekräfte verursacht wird. Diese sind dann im Verhältnis zu den Stauch- und Komprimierungskräften sichtbar. Abweichungen des simulierten Kraftverlaufes sind durch die vernachlässigten Einflüsse auf die Reibung und die Vernachlässigung der Feuchte, sowie die Annahmen im Bezug auf die mechanischen Eigenschaften unter Temperatureinfluss zu erklären. Der Abfall der Kraftkurve bei der Stempelposition von ca. 21-28 mm ist im Modell nicht berücksichtigt. Eine mögliche Ursache dafür ist ein Abfall des wirksamen Materialquerschnitts bei der Stauchung der zu diesem Zeitpunkt eintritt und mit ansteigender Faltenanzahl stärker wirkt. Die übrige Kraft ist eine akkumulierte Biegekraft aller Falten. Um diese Wirkung zu berücksichtigen, ist ein modifizierter Ansatz notwendig, der die Stauchkraft als SCT und auch die Biegekraft nach Erreichen des SCT einbezieht.

Eine weitere Abweichung ist der sprunghafte Abfall der Stauchkraft im Modell, der aus der logischen Verknüpfung der Kräfte bezogen auf die zugehörige Stempelposition resultiert. Die Stauchkraft ist zu diesem Zeitpunkt als Biegekraft zu betrachten und lässt langsam nach bis bei  $F_4$  annähernd die Reibkraft in der Ziehbüchse erreicht ist. Der langsame Abfall der Kraft deutet auf Relaxationsvorgänge hin, die weniger in Dickenrichtung stattfinden, da diese mehr Zeit beanspruchen würden. Vielmehr ist eine Relaxation der Falten in Blatt- bzw. Zargenebene zu vermuten, die durch die anhaltende Komprimierung einem Kriechen des Materials ähnelt. Für die Klärung dieser Wirkung sind weitere intensive Untersuchungen erforderlich, für die eine Methode zur experimentellen Nachbildung der Stauchbeanspruchung und der entstehenden Kraft unter prozessnahen Bedingungen Voraussetzung ist. Bei Änderung der Konizität wird durch das Modell die grundsätzliche Änderung des Verlaufes der Stempelkraft wiedergegeben. Diese Entwicklung zeigt, dass der Ansatz für die Beschreibung der Komprimierung und der Reibung in der Ziehbüchse grundsätzlich geeignet ist.

Für die Nutzung des Modells zur Vorhersage der Faltenabstände und damit der optischen Qualität der Zarge nach den in Abschnitt 5.3 gefundenen Zusammenhängen sind besonders die Übereinstimmungen des Anstieges  $A_1$  bzw. der Kraft  $F_4$  zwischen Messung und Simulation entscheidend (Abbildung 90).



**Abbildung 90:** Vergleich von Simulation und Messung für die Kraftkenngrößen  $A_1$  und  $F_4$

Die Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten Werte zeigt, dass weitgehende Übereinstimmungen bestehen, da die Versuchspunkte um die jeweiligen optimalen Werte mit geringem Abstand streuen und systematisch der Geraden optimaler Übereinstimmung folgen. Die Abweichungen werden zudem durch die Streuung der Messungen überlagert. Für die beiden Kraftkennwerte sind am zugrundegelegten Ziehkarton durch die Simulation belastbare Aussagen zum Faltenabstand vorherbestimmbar.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

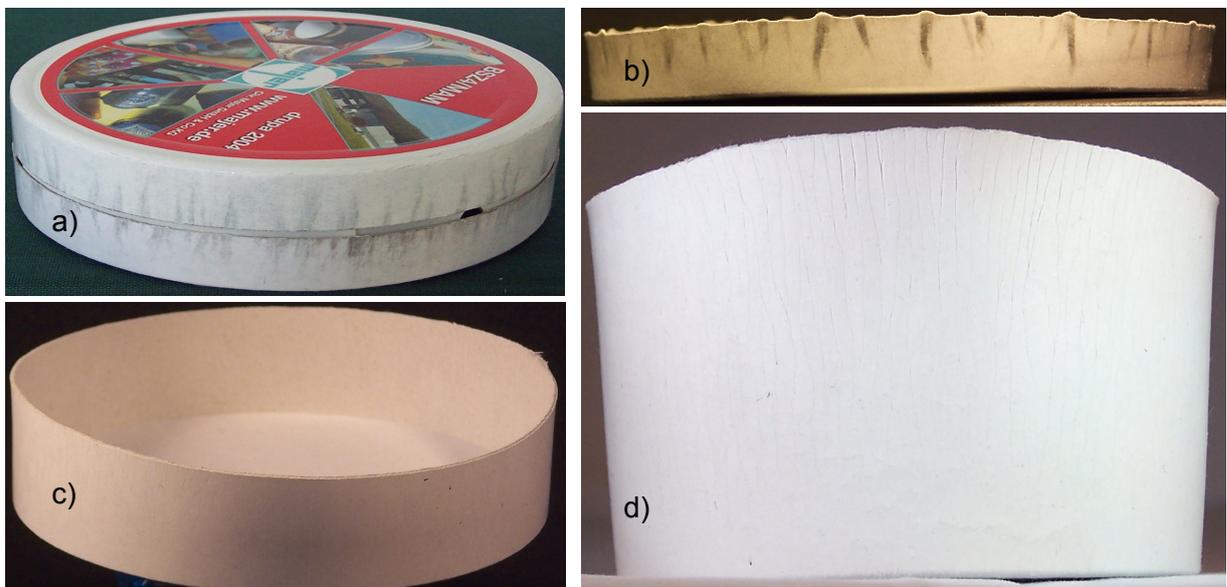
Innerhalb der vorliegenden Arbeit ist ein hochflexibler Versuchsträger zum Umformen von Karton entstanden, der die experimentelle Untersuchung der Einflussgrößen auf den Ziehprozess ermöglicht und weitgehende Parametervariationsräume bietet. Es hat sich gezeigt, dass Kräfte und Temperaturen die Abdeckung eines Materialspektrums von Papier bis hin zu Pappen zulassen. Das Messsystem, mit dem umfangreiche Informationen wie Kräfte, Beschleunigungen, Temperaturen und Wege aus dem Prozess gewonnen werden, sowie die Flexibilität des Versuchsträgers im Bezug auf Formate und Formgestaltung der Ziehteile sind Voraussetzungen für die weitere wissenschaftliche Arbeit am Themengebiet des mehrdimensionalen Umformens von Papier, Karton und Pappe.

Mit vier charakteristischen messbaren Größen für die Bewertungskriterien Formhaltigkeit, optische Qualität und Formstabilität von Kartonformteilen ist es gelungen innerhalb des Verarbeitungsbereiches, in dem keine strukturellen Schädigungen des Materials auftreten, quantifizierte Aussagen zum Zusammenhang dieser Größen mit den Prozessparametern Feuchte, flächenbezogene Masse, Temperaturdifferenz, Temperatursumme sowie Faltenhalterkraft zu generieren. Die Entwicklung des Gesamtqualitätswertes  $Q$  zeigt, dass Faltenhalterkraft, Temperatursumme und Feuchte des Materials zentralen Einfluss auf die Qualität der Formteile haben und signifikante Verbesserungen bewirken. Auf die einzelnen Qualitätskriterien haben auch die flächenbezogene Masse und die Temperaturdifferenz Einfluss. Ursache dafür ist einerseits die mit beiden Parametern veränderte Verdichtung. Andererseits werden Randbedingungen des thermodynamischen Systems geändert.

Der Verlauf der Prozesskraft am Stempel hat sich als geeignetes Werkzeug für die Prozessüberwachung erwiesen. Die Kenngrößen des Kraftverlaufes zeigen im Vergleich mit den Qualitätskriterien und deren Reaktionen auf die Variation der Prozessparameter signifikante Korrelationen. Insbesondere die Art der Falten, deren Verteilung über der Zarge und die damit einhergehende optische Qualität der Zarge stehen in direktem Zusammenhang mit dem Anstieg  $A_1$  der Kraftkurve im Bereich zwischen 10 und 20 mm Stempelweg und der Kraft  $F_4$  bei einer Stempelposition von 50 mm. Die Wirkungen der Prozessparameter auf Faltenabstände und Kraftkenngrößen sind auch in ihrem Verlauf vergleichbar. Die Änderung der Faltenform ist ein zentraler Effekt, der auf die Formhaltigkeit und die Formstabilität Einfluss nimmt, da sich geringere lokale Komprimierungen einstellen und eine höhere mittlere Komprimierung über dem Zargenumfang erreichen lässt. Die damit einhergehende Umverteilung der Kraft auf einen höheren Anteil tragender Fläche in der Zarge bewirkt die signifikante Verringerung bzw. Vermeidung von Schwärzungen und Zipfelbildung. Der Zusammenhang von Qualitäts- und Kraftkenngrößen ermöglicht eine gezielte Prozessführung und ist als Ansatz für die Prozessüberwachung und indirekte Qualitätskontrolle anhand des Verlaufes der Kraft am Stempel nutzbar. Dabei ist zu beachten, dass die Reibkraft  $F_4$  durch Abrisse am Zargenrand verändert wird. Diese Abrisse entstehen bei grenzwertigen Faltenhalterkräften aufgrund des extremen Druckanstieges kurz vor Verlassen des Faltenhalters durch das Material. Die Nutzung von  $A_1$  als primären Parameter lässt hier eine Unterscheidung zwischen Riss und Minimierung der Faltenabstände zu. Die Arbeit im Stempelwegbereich zwischen 32 und 50 mm gekoppelt mit der Stempelposition des Kraftmaximums  $F_2$  ermöglicht die Erkennung der Abrisse am Zargenrand bis zu einer Rissfläche von  $50 \text{ mm}^2$  (Oehm, 2010).

Das vorgestellte Prozessmodell der Stempelkraft stellt in Abhängigkeit der Geometrie der Arbeitsorgane, der Temperaturen und der Faltenhalterkraft eine erste Beschreibung der Formänderungen und Reibungen vor, die für das gewählte Material weitgehende Übereinstimmungen mit den Messungen zeigt. Für dieses Material ist innerhalb des Gültigkeitsbereiches des Modells und unter Nutzung der Kenntnisse aus den experimentellen Untersuchungen eine Aussage zur Entwicklung der Faltenabstände an den Formteilen bei Variation der Prozessparameter möglich. Es ist zu erwarten, dass die grundlegenden Zusammenhänge auch auf andere Kartonsorten und Grammaturen übertragbar sind. Die Kompression des Materials in z-Richtung und in Blattebene erzeugen nach den Zusammenhängen im Modell die wesentlichen Formänderungskräfte im Prozess. Die empirische Erfassung der Materialeigenschaften zeigt, dass eine Reihe von prozessspezifischen Wirkungen bislang nicht mit Standardprüfmethoden ermittelt werden können. Dazu gehören insbesondere die Entwicklung der Formänderungskräfte bei definierter Materialtemperatur und -feuchte sowie eine Ersatzprüfmethode für den Bruchmechanismus der Falten unter prozessnahen Bedingungen. Für die Wirkung der Temperatur und die Stauchung der Falten werden im vorliegenden Modell erste empirische und theoretische Ansätze aufgezeigt. Dem Verlauf von Temperatur im Material innerhalb des Prozesszyklus liegt jedoch bislang kein Modell zugrunde, so dass das vorliegende Modell des Ziehprozesses als erster Entwurf zur Erfassung und Kombination der Formänderung von Karton zu betrachten ist und die Ansatzpunkte für eine umfassende Modellierung aller Teilsysteme aufzeigt.

Durch die Nutzung der Erkenntnisse aus Experimenten und Modellierung gelingt bei der Optimierung der Formteilqualität ein Durchbruch hinsichtlich Qualität und Ziehhöhe von Formteilen (Abbildung 91).



**Abbildung 91:** Vergleich der Qualitäten des Standes der Technik a), b) und eines optimierten Formteils c), Formteil mit einem Ziehverhältnis von 0,63 e)

Die Qualität der optimierten Formteile bei höherem Verhältnis aus Grundfläche und Ziehhöhe (Ziehverhältnis) ist in allen Qualitätskriterien wesentlich besser als an Formteilen, die in der Praxis auf Ziehmaschinen bislang produziert werden. Das von (Scherer, 1932) benannte

Grenzziehverhältnis liegt bei 0,5 und wird am Beispiel bereits bei einem Grundflächendurchmesser von 80 mm und einer Ziehhöhe von 50 mm mit einem Wert von 0,63 überschritten.

Die gezielte Beeinflussung des Materialüberschusses, die zu den beschriebenen Verbesserungen der Formteilqualität und der Ziehhöhe von Formteilen führt, ist gleichzeitig als Mittel für die Erweiterung der geometrischen Grenzen bei der Formgestaltung der Querschnittsfläche zu betrachten. Die geometriespezifische Optimierung der Formteile unter Berücksichtigung der Zusammenhänge von Prozessparametern und Qualitätskenngrößen ermöglicht den flexiblen Einsatz des Verfahrens, wie es durch den Versuchsträger abgebildet wird. Die Umstellung von Formaten und geometrischen Grundflächenformen ist nach Ermittlung der Parameterbereiche mit geringem Aufwand durch Wechsel der Arbeitsorgane zu realisieren. In diesem Zusammenhang ist der Einsatz unterschiedlicher Kartonsorten und die damit verbundene Änderung der Eigenschaften des Materials zu beachten durch den sich die Parameterbereiche ändern. Der Versuchsträger ist eine geeignete Basis zur Ermittlung der Einsatzgrenzen unterschiedlicher Materialien und deren optimalen Parameterbereichen, so dass die Voraussetzung für eine wirtschaftliche Nutzung des Ziehprozesses gegeben ist.

Die Umsetzung der technischen und technologischen Modifikationen des Ziehprozesses in der Praxis lässt eine Verbesserung der Prozesssicherheit und der Flexibilität derartiger Verarbeitungsmaschinen zu. Durch eine Prozessüberwachung anhand der Stempelkraft steht ein Mittel für die aufwandsminimierte Einrichtung der Maschinen und die Qualitätskontrolle der Formteile zur Verfügung. Voraussetzung dafür ist die Untersuchung und Einbeziehung des Einflusses der bewegungstechnischen Größen am Stempel. Die Geschwindigkeit, mit der der Stempel auf das Material auftrifft bzw. die Beschleunigung, die auf das Material innerhalb der Ziehbüchse einwirkt, erzeugen zusätzliche Beanspruchungen. Gleichzeitig ändern sich die mechanischen Eigenschaften mit der Beanspruchungsgeschwindigkeit, so dass ein dynamisches System von Wechselwirkungen entsteht. Die Weiterentwicklungen dieser Überwachungsstrategie lässt die Eignung des Kraftverlaufes am Stempel für eine Prozessüberwachung und -regelung von Temperaturen und möglicher Feuchteapplikationen erwarten.

Ein wesentlicher Ansatz in der weiteren Verbesserung des Prozessablaufes besteht in einem angepassten Verlauf der Faltenhalterkraft an die Stempelbewegung, um den Rissen am Zargenrand zu begegnen, die durch den exponentiell ansteigenden Druck bei konstanter Faltenhalterkraft entstehen. Bei Änderung der geometrischen Form der Querschnittsfläche sind die Segmentierung des Faltenhalters sowie die chemische und mechanische Vorbereitung der Zuschnitte erfolgsversprechende Maßnahmen zur lokalen Einflussnahme auf den Materialüberschuss und dessen Anordnung in der Zarge. Vergleichbare Entwicklungen haben in der Tiefziehtechnik von Metallblech wesentliche Verbesserungen bei komplexen Teilegeometrien bewirkt.

Ein Schwerpunkt für die Weiterentwicklung des Prozessmodells ist die Entwicklung von Prüfmethode für Materialeigenschaften unter prozessspezifischen Bedingungen und die Erarbeitung eines Modells zur Kennzeichnung des dynamischen Temperatur- und Feuchteverlaufes im Material während des Ziehprozesses. Auf diese Weise kann eine entsprechende Änderung der mechanischen Eigenschaften mit den thermodynamischen Größen berücksichtigt werden. Die dazu notwendige thermodynamische Modellierung lässt

einen gezielteren Umgang mit der Feuchte zu, die das Material erweicht und die Entstehung neuer Bindungen im Prozess ermöglicht. Ein hinreichend genaues thermodynamisches Modell kann genutzt werden, um die Strategie bei der gezielten Prozessüberwachung zu erweitern. Abhängig von den Umgebungsbedingungen des Produktionsraumes und möglicher Befeuchtungsmaßnahmen der Zuschnitte vor dem Umformen können die Prozessparameter so angepasst werden, dass die Formteile im thermodynamischen Gleichgewichtszustand den Verarbeitungsraum verlassen. Eine derartige Weiterentwicklung von Maschinen in Kombination mit einem wissenschaftlichen Modell ist gleichermaßen eine anspruchsvolle Zielstellung für weiterführende Arbeiten wie ein Fortschritt bei der Beherrschung des hygroskopischen Materials und dessen Trocknungsspannungen bei und nach dem Umformen.

Ein weiterer Schwerpunkt zukünftiger Forschungsarbeiten ist die Abbildung des tribologischen Systems Karton-Stahl unter Prozessbedingungen wie Temperatur, Feuchte, Geschwindigkeit, Verdichtung des Materials oder mit Änderung der Materialglätte in der Ziehbüchse. Durch die hohen Kräfte bei der Komprimierung kommt dem Reibkoeffizienten im Bezug zur Gesamtkraft am Stempel entsprechende Bedeutung zu. Für die Untersuchung bzw. Verifikation des Reibverhaltens sind keine Prüfmethode bekannt, mit denen die Ermittlung des Reibkoeffizienten unter den genannten Prozessbedingung realisiert werden kann, so dass auch die Entwicklung eines entsprechenden Reibmessgerätes eine Zielstellung weiterer Forschungsarbeiten ist.

Nach Einbindung der beschriebenen physikalischen Zusammenhänge und Teilmodelle ist eine durchgängige Modellierung vom Prozess bis zum Antrieb möglich. Dafür ist ein detailliertes Modell der Mechanik, gekennzeichnet durch Trägheiten und Reibungen, sowie ein Modell des Antriebes und des zugehörigen Verhaltens der Regelkreise von Position und Kraft, wie es von (Lotze, 2009) am Beispiel der Quersiegeleinheit einer Schlauchbeutelmaschine aufgezeigt wird, als Zielsetzung für weiterführende Arbeiten zu betrachten.

Im Hinblick auf die industrielle Anwendung sind bei der weiteren wissenschaftlichen Arbeit Oberflächenveredelungen von Karton sowie mögliche Beschichtungen einzubeziehen, damit Anforderungen wie optische Ästhetik und Dichtigkeits- bzw. Barriereigenschaften erreicht werden. Der Karton ordnet sich als Trägerschicht in ein Verbundmaterial ein. Der Umformprozess wird demnach besonders bei Kunststoffbeschichtungen zu einer Kombination aus Ziehen und Thermoformen, die es auf Basis des Verhaltens der Einzelmaterialien wissenschaftlich zu charakterisieren gilt.

## Literaturverzeichnis

- Algar, W.H. 1966.** *Effect of structure on the mechanical properties of paper*. s.l. : Consolidation of the paper web, Technical society of the british paper and board makers association, 1966.
- Amontons, M. 1699.** *De la resistance cause dans les machines*. s.l. : Des Science Academie Royale Paris, 1699.
- Angerhöfer, M. 1999.** *Die Anisotropie der Biegesteifigkeit von Faltschachtelkarton und ihr Einfluss auf den Stauchwiderstand kleinformatiger Faltschachteln*. München : Papiertechnische Stiftung (PTS), PTS-Forschungsbericht PTS-FB 11/99, 1999.
- Arramon, Y. P., et al. 2000.** A multidimensional anisotropic strength criterion based on Kelvin modes. *International Journal of Solids and Structures*. 2000, Volume 37, Issue 21, Pages 2915-2935.
- Back, E. L. 1991.** *Paper to paper and paper to metal friction*. s.l. : International Paper Physics Conference Proceedings, 1991.
- Back, E. L., et al. 1967.** Ultrasonic measurement of the thermal softening of paper products and the influence of thermal auto-cross-linking reactions. *Tappi Journal*. 1967, 50, Nr. 11., S. 542-547.
- Back, E.L. und Olsson, A.-M. 1983.** The effect of temperature on gloss calendering of paper board as evaluated in a press simulator. *Svensk Papperstidning*. 1983, 86 (3): R31.
- Barbier, C., et al. 2005b.** On dynamic effects at folding of coated papers. *Composite Structures*. 2005b, Vol. 67, Issue 4, Pages 395-402.
- Barbier, C., et al. 2005a.** Numerical investigation of folding of coated papers. *Composite Structures*. 2005a, Vol. 67, Issue 4, S. 383-394.
- Barbier, C., et al. 2006.** On the effect of high anisotropy at folding of coated papers. *Composite Structures*. 2006, Vol. 72, Issue 3, S. 330-338.
- Bastian, H. 2001.** *Non-linear viscoelasticity of linear and long-chain-branched polymer melts in shear and extensional flows*. Stuttgart : Dissertation, Universität Stuttgart, 2001.
- Baumgaertel, M. und Winter, H. 1989.** Determination of discrete relaxation and retardation time spectra from dynamic mechanical data. *Rheologica Acta*. 1989, 28.
- Baumgarten, H. L. und Götsching, L. 1973.** *Triaxial deformation of paper under tensile load*. Cambridge, England : Proceedings of the 1973, The fundamental properties of paper related to its uses, The british paper and board industry federation, 1973.
- Baumgarten, H. L. und Klingelhöffer, H. 1979.** : Über die Reibung an Papieroberflächen und den Wechsel zwischen Haften und Gleiten. *Wochenblatt für Papierfabrikationen*. 1979, 107, Nr. 23/24, S. 941 – 946.
- Böhme, M. 2003.** *Untersuchungen zur Verbesserung der dreidimensionalen Formbarkeit von Furnier*. Dresden : Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, 2003.
- Bolling, R.W.Jr. 1964.** Measuring Frictional Properties of Multiwall Bag Papers. *Tappi Journal*. 1964, 47, Nr. 7, S. 439 – 444.

- Borchers, B. 2003.** *Erhöhung der Papierfestigkeiten durch den Einsatz chemischer Additive beim Sprühen nativer Stärkeslurries auf feuchte Papierbahnen.* 2003. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 227/02, Bundesministerium für Wirtschaft .
- Borschke, D. 2001.** *Ausbildung von Rohkartoneigenschaften über die Faserauswahl und –behandlung.* Wien : Auszug Vortrag, Voith Paper Kundentagung "ahead 2001", 2001.
- Bos, J.H., et al. 2006.** *Das Papierbuch, Handbuch der Papierherstellung.* s.l. : 2. Auflage, Wolters-Noordhoff Verlag, Niederlande, 2006.
- Bowden, F.P. und Tabor, D. 1950.** *The friction and lubrication of solids.* s.l. : Clarendon Press and Univ. Press, Oxford, 1950.
- Brecht, W. und Führlbeck, E. 1959.** Das rheologische Verhalten von Papier verschiedenen Feuchtigkeitsgehaltes bei kurzzeitiger Zugbeanspruchung. *Das Papier.* 1959, 13,Nr. 13.-14., S. 293-301.
- Brecht, W. und Schädler, M. 1963.** Über neue Messungen der Kompressibilität von Papieren. *Das Papier.* 1963, 17, S.626-634.
- Brecht, W. und Volk, W. 1954.** Kraft-Dehnungsmessung an Papieren im Zustand initialer Nässe. *Das Papier.* 1954, 6, Nr. 17.-18., S. 365-370.
- Brecht, W. und Wanka, R. 1963.** Die Querkontraktion von Papieren. *Das Papier.* 1963, 17, Nr. 4., S. 141-147.
- Brecht, W., Götsching, L. und Baumgarten, H. L. 1971b.** Beiträge zur Rheologie des Papiers. *Das Papier.* 1971b, 25, Nr.10, S. 569-582.
- Brecht, W., Knittweis, H.-J. und Schmidt, W. 1971a.** Neuere Untersuchungen über das Dehnungsverhalten verschiedener Papiere. *Wochenblatt für Papierfabrikation.* 1971a, 99, Nr. 8, S. 267-292.
- Broughton, G. und Gregg, J. L. 1952.** Some observations on the kinetic coefficient of friction of paper. *Tappi Journal.* 1952, 35, Nr. 11, S. 489 – 493.
- Buchanan, J. S. 1968.** Die Steifigkeit - ihre Bedeutung und Erlangung. *12 EUCEFA-Konferenz Karton und Pappe, Schriften des Vereins Zellcheming .* 1968, 31, S. 153-168.
- Buchanan, J.S., Draper, J. und Teague, G.W. 1964.** Combined board characteristics that determine box performance. *Paperboard packaging.* 1964, 43, Nr.9, S.74-84.
- Carl David & Sohn. 1894.** *Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von Schachteln aus Pappe, Leder, Blech und dgl. auf der Ziehpresse. 2000, Klasse 54 Österreich, 5.. Juni 1894.* Patentschrift.
- Carlsson, L.A. und Fellers, C.N. 1980.** Flexural stiffness of multi-ply paperboard. *Fiber Science and Technology.* 1980, Vol. 13, Issue 3, S. 213-223.
- Chapman, D. L. T. und Peel, J. D. 1969.** Calendering process and the compressibility of paper. *Paper Technology* 10, 116-124, Nr. 2., 1969Chapman D. L. T., Peel J. D.: Calendering process and the compressibility of paper. *Paper Technology.* 1969, 10, Nr. 2., S.116-124.
- Chatraei, S. und Macosko, C. 1981.** Lubricated Squeezing Flow: A New Biaxial Extensional Rheometer. *Journal of Rheology.* 1981, 25.
- Colley, J. und Peel, J. D. 1972.** Calendering process and the compressibility of paper. *Paper Technology.* 1972, 13, Nr. 10., S. 350-357.

- Coulomb, C.A. 1785.** *Théorie des machine simple, en ayant égard de leur partrés, et la roideur des cordages.* s.l. : Mém Math. Phys. Paris, 1785.
- Crotogino, R.H. 1984.** *Das Glätten von ungestrichenen holzhaltigen Papieren.* 1984.
- Czichos, H. 1978.** *Tribology.* Amsterdam : Elsevier Science Publication, 1978.
- Czichos, H. und Feinle, P. 1984.** Reibungs- und Verschleißuntersuchungen an thermoplastischen Kunststoffen. *Tribologie und Schmierungstechnik.* 1984, 31 (1), 14.
- Debbaut, B. und Homerin, H. 1997.** *3-D numerical simulation of thermoforming – prediction of thickness and extension.* Kanada : Proceedings of the Annual Technical Conference (ANTEC) of the Society of Plastics Engineers (SPE), S. 720-725, 1997.
- Dempsey, E.N. Peerless Machine and Tool Cooperation Marion (U.S.A.). 1983.** *Press for forming sheet material.* 95680 A2 Europa, 7.. Dezember 1983. Europäische Patentschrift.
- Deng, M. und Dotson, C.T.J. 1994.** Paper. An engineered stochastic structure. *Tappi Press.* 1994.
- Detroit, C. 2001.** *Untersuchungen zur Dehnrheologie und Verarbeitbarkeit von Halbzeugen beim Thermoformen sowie Simulation und Optimierung der Umformphase.* Aachen : Dissertation RW-TH Aachen, 2001.
- DIN 53121. 2008.** *Prüfung von Papier, Karton und Pappe – Bestimmung der Biegesteifigkeit nach der Balkenmethode.* 2008.
- DIN 54518. 2004.** *Prüfung von Papier und Pappe - Streifenstauchwiderstand.* 2004.
- DIN 6730. 2006.** *Papier und Pappe, Begriffe.* 2006. Deutsche Industrienorm.
- DIN 8580. 2003.** *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung.* 2003.
- DIN 8582. 2003.** *Fertigungsverfahren Umformen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Alphabetische Übersicht.* 2003.
- DIN 8584-1. 2003.** *Fertigungsverfahren Zugdruckumformen - Teil 1: Allgemeines - Einordnung, Unterteilung, Begriffe.* 2003.
- DIN 8584-3. 2003.** *Fertigungsverfahren Zugdruckumformen - Teil 3: Tiefziehen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe.* 2003.
- DIN EN 643. 2002.** *Papier und Pappe - Europäische Liste der Standardsorten für Altpapier und Pappe.* 2002. Europäische Norm.
- DIN EN ISO 1924-3. 2007.** *Papier und Pappe, Bestimmung von Eigenschaften bei zugförmiger Belastung, Teil 3: Verfahren mit konstanter Dehngeschwindigkeit 100 mm/min.* 2007.
- Doege, E., et al. 2002.** *Umformen von Magnesiumfeinblechen mit temperierten Werkzeugen.* 2002. EFB Forschungsbericht Nr. 195.
- Doege, E., Meyer-Nolkemper, H. und Saeed, I. 1986.** *Fließkurvenatlas metallischer Werkstoffe.* München : 1.Auflage Carl Hanser Verlag, 1986.
- Doege, E. und Behrens, B.-A. 2006.** *Handbuch Umformtechnik, Grundlagen, Technologien, Maschinen.* Berlin : Springer-Verlag, 2006. ISBN 3-540-23441-1.
- El-Hosseiny, F. 1998.** Influence of the “Giertz Effect” on Development of Short-Span Compression Strength. *Tappi Journal.* 1998, Vol. 81, Nr. 2.

- Emslie, A.G. und Brennemann, R.S. 1967.** A theoretical and experimental study of the scoring and bending of boxboard. *Tappi Journal*. 1967, Nr.6, S.289-297.
- Falkenhagen, E., Großmann, V. und Tenzer, H.-J. 1981.** *Bewertung der Rillbarkeit von Karton*. Dresden : Vortrag zum Papiertechnischen Kolloquium, 22., 23. 10. 1981, 1981.
- Fellers, C. 1980.** *The significance of structure on the compression behaviour of paper*. Stockholm : Dissertation, Stockholm, Kuklinga Tekniska Högskolan, 1980.
- Fellers, C., Backstrom, M. und Htun, M. 1998.** Paper-to-paper friction – paper structure and moisture. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*. 1998, 13, Nr. 3, S. 225 – 232.
- Fellers, C., et al. 1999.** *Influence of Wood Extractives on Paper-to-Paper Friction*. s.l. : International Paper Physics Conference Proceedings, 1999.
- Fortney, J. Peerless Machine and Tool Cooperation Marion (U.S.A.). 1998.** *Pressed paper cut in place die*. EP 1051 139 A1 Europa, 1.. Dezember 1998. Europäische Patentschrift.
- Gaillemard, C. 2006.** *Modeling the Moisture Content of Multi-Ply Paper Board in the Paper Machine Drying Section*. s.l. : Licentiate Thesis, Department of Mathematics, KTH, Stockholm, Sweden, 2006.
- Geleji, A. 1961.** *Bildsame Formgebung der Metalle in Rechnung und Versuch*. Berlin : Akademie-Verlag, 1961.
- Gohring, D. A. I. 1963.** Thermal softening of lignin, hemicellulose and cellulose. *Pulp and Paper Magazine of Canada*. 1963, 64, Nr. 5., S. T517-T527.
- Goldhahn, H. 1969.** *Aufbau eines Systems verarbeitungstechnischer Grundlagen*. Dresden : Dissertation Technische Universität Dresden, 1969.
- Gossweiler, K. Schwarzenberg. 1906.** *Ziehmatrize zur Herstellung von Pappe- oder Blechhohlformen*. 28252 Österreich, 15.. Dezember 1906. Patentschrift.
- Gossweiler, Karl. 1908.** *Verfahren zum Ziehen von Hohlgefäßen aus Pappe*. 34760, Klasse 54a Österreich, Wien, 10. Oktober 1908. Patentschrift.
- Götttsching, L. 1970.** Das Festigkeitsverhalten von Papier unter statischer und dynamischer Beanspruchung. *Papieri ja Puu*. 1970, Teil 1: 52, S. 535-554, 1970; Teil 2: 52, S. 655-669, 1970; Teil 3:52, S. 781-794, 1970; Teil 4: 53, S. 27-36, 1971 .
- Götze, T. und Erhard, K. 2004.** *Verbesserung der Spaltfestigkeit von Papier durch CMC-modifizierte Faserstoffe*. 2004. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 408/03, Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit.
- Grebe, W. und Glaser, J. 1977.** Das Rillen, Untersuchungen an Bandstahlwerkzeugen. *Technologische Schriftenreihe Frankfurt/Main*. 1977, Heft 4, S. 26-33.
- Großmann, H. 1985.** *Das Verhalten von Papier und Pappe unter Einwirkung des Druckschnittes*. München : PTS-Forschungsbericht zum AIF Vorhaben Nr. 5874, PTS-Verlag, 1985.
- Großmann, H. 2009.** *Papierverarbeitung*. Dresden : Lehrskripte zur Lehrveranstaltung: Technische Universität Dresden, 2009.
- Großmann, H. und Baumgarten, H. L. 1985.** Zum Verhalten von Papier und Karton in der Kompressionsphase des Messerschnittes. *Das Papier*. 1985, 10A, V74 - V82 .

- Grossmann, H. und Hofer, H. 1993.** *Kraft-Verformungsverhalten, Verfahrenstechnische Grundlagen der Papier-, Karton- und Pappenverarbeitung, Papier- und Pappeneigenschaften.* s.l. : Papiertechnische Stiftung, PTS-PTI Seminar PV-SE 371, Abschn. 2.3 S.1-28, 1993.
- Großmann, H. 1994.** *Verfahrenstechnische Grundlagen der Papierherstellung.* München, Heidenau : 3. Auflage, Papiertechnische Stiftung für Papiererzeugung und Papierverarbeitung, 1994. PTS-Manuskript.
- Großmann, V. 1985.** *Untersuchungen zum Verarbeitungsverhalten von Karton beim Rillen mit Bandstahlschnittwerkzeugen.* s.l. : Dissertation A, Technische Universität Dresden, 1985.
- Gurnagul, N., et al. 1992.** Factors affecting the coefficient of friction of paper. *Journal of Applied Polymer Science.* 1992, 46, S. 805 – 814.
- Güzelarslan, M.K. 2003.** *Vorausberechnung der Belastbarkeit von Faltschachteln als Voraussetzung zur wirtschaftlichen Optimierung des Packstoffeinsatzes.* München : Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben AiF 12803, Papiertechnische Stiftung (PTS), PTS-Verlag, 2003.
- Habeger, C.C. und Whitsitt, W.J. 1983.** A mathematical model of compressive strength in paperboard. *Fibre Science and Technology.* 1983, Volume 19, Issue 3, S. 215-239.
- Haglung, L. und Robertson, G. 1974.** *Local thickness reduction in a calander nip- an experimental study.* s.l. : STFI Report Nr. 232B, 1974.
- Hartmann, B. 1994.** *Kennzeichnung des Druckkraft – Verformungsverhaltens von Karton und Pappen als Voraussetzung zur Optimierung von Umform- und Trennprozessen.* München : PTS Forschungsbericht PTS-FB 05/94, PTS Verlag, 1994.
- Hauptmann, M. und Lohse, H. 2008.** *Pflichtenheft zum Versuchsmodul zum mehrdimensionalen Umformen von Papier und Karton.* Dresden : Selbstverlag, Technische Universität Dresden, 2008.
- Hauptmann, M., et al. 2009b.** *Flexible Verpackungskomponenten durch mehrdimensionale Umformung von Papier und Karton.* Dresden : VV Tagung Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik, Technische Universität Dresden, 2009b.
- Hauptmann, M., et al. 2010.** *Untersuchung der physikalischen Zusammenhänge und Einschätzung der Anwendung des mehrdimensionalen Umformverfahrens: Tiefziehen von Papier, Karton und Pappe.* Dresden : Forschungsbericht zum FNR Förderprojekt FKZ 22006906, 2010.
- Hauptmann, M., Lohse, H. und Enz, B. 2009a.** *Entwicklung und technische Umsetzung eines Versuchsmoduls zum mehrdimensionalen Umformen von Papier und Karton.* Dresden : Abschlussbericht zum AIF Vorhaben KF0013906PK7, Selbstverlag Technische Universität Dresden, 2009a.
- Hegemann, B. 2004.** *Deformationsverhalten von Kunststoffen beim Thermoformen- experimentelle und virtuelle Bestimmung.* Stuttgart : Dissertation Universität Stuttgart, 2004.
- Heidenreich, E., Goldhahn, H. und Dietz, W. 1978.** *Verarbeitungstechnik, Verfahrenstechnik.* Leipzig : 1. Auflage, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1978.
- Heinz, O. 1966.** Ungenügende Ziehqualität und ihre Ursachen. *Papier und Druck.* 1966, Fachteil Buchbinderei und Papierverarbeitung 6, S.89-95.
- Heinz, O. 1967.** Ziehkraftdiagramme beim Ziehen von Karton und Pappe. *Papier und Druck.* 1967, Fachteil Buchbinderei und Papierverarbeitung 9, S.136-139.

- Helduser, S. 2008.** *Fluidtechnische Antriebe und Steuerungen, Teil 1: Hydraulik.* Dresden : Lehrskripte zur Vorlesung, 2008.
- Hesse, F. und Tenzer, H.-J. 1963.** : *Arbeitsverfahren der Papierverarbeitung, Grundlagen der Papierverarbeitung.* Leipzig : Verlag für Fach- und Bibliothekswesen, 1963. Bd. 2.
- Hill, R. 1948.** A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. *Proc. Roy. Soc. London A193*: 281-297. 1948.
- Hine, D.J. 1969.** Untersuchungen über die Rillbarkeitseigenschaften von Faltschachtelkartonen. ,. *Verpackungsrundschau.* 1969, Technisch-wissenschaftliche Beilage 2, S.9-14.
- Hofer, H. 2000.** Die Kraftverteilung beim Druckschnitt - ein erster Zugang mittels FEM. [Buchverf.] R. Wilken und J. Heindl. *Stanz- und Schneidtechnik – Wirtschaftliches Trennen mit moderner Technologie.* München : PTS-Verlag, 2000.
- Hohmann, H.J. und Mazurkowski, F. 1974.** Die Problematik der Rillbarkeitsprüfung von Karton. *Verpackungsrundschau.* 1974, Technisch-wissenschaftliche Beilage Nr. 5, S.33-38.
- Höke, U. 1984.** *Die Formung der Welle bei der Wellpappenherstellung und deren Einfluss auf Wellpappeneigenschaften.* Darmstadt : Dissertation, Technische Hochschule, Darmstadt, 1984.
- Höke, U. und Götsching, L. 1982.** Physikalisch-technologische Charakterisierung des Riffelprozesses. Teil I: Der IfP-BHS-Wellenbildner. *Wochenblatt für Papierfabrikation.* 1982, 110, Nr. 13, S. 451-456.
- Hufnagl, D. 2008.** *Konstruktive Entwicklung des mechanischen und messtechnischen Systems einer Versuchseinrichtung zum Tiefziehen von Karton.* Dresden : Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Betreuer: M. Hauptmann, 2008.
- Illig, A. 1997.** *Thermoformen in der Praxis.* München : Carl Hanser Verlag, 1997.
- Inoue M., Gurnagul N., Aroca P. 1990.** Static friction properties of linerboard. *Tappi Journal.* 1990, 73, Nr. 12, S.81 – 85.
- Jackson, M. und Ekström, L. 1964.** Studies concerning the compressibility of paper. *Svensk Papperstidning.* 1964, 67, S. 807-821.
- Järschke, M. Sächsische Cartonnagen Maschinen Akt. Ges. Dresden. 1928.** *Ziehpresse zur Herstellung von Schachtelteilen.* 526181 Deutsches Reich, 9.. März 1928. Patentschrift.
- Johansson, A., et al. 1998.** Paper friction-influence of measurement conditions. *Tappi Journal.* 1998, 81, Nr. 5, S. 175 – 183.
- Jones, A.R. 1968.** An experimental investigation of the in-plane elastic moduli of paper. *Tappi Journal.* 1968, 51, Nr. 5, S.203-209.
- Jones, N. und Peel, J. D. 1967.** Frictional properties of paper and their importance in supercalendering. *Paper Technology.* 1967, 8, Nr. 1, S. 43 – 50.
- Karlsson, M. und Stenström, S. 2005a.** Static and Dynamic Modeling of Cardboard Drying Part 1: Theoretical Model. *Drying Technology.* 2005a, Vol. 23, S. 143-163.
- Karlsson, M. und Stenström, S. 2005b.** Static and Dynamic Modeling of Cardboard Drying Part 2: Simulation and Experimental Results. *Drying Technology.* 2005b, Vol. 23, S. 165-186.
- Käss, W.E. Wekaschaal Papierwarenfabrik N.V. Amsterdam. 1938.** *Vorrichtung zum Pressen, Prägen, Ziehen, Formen u. dgl. von Gegenständen aus Pappe, Karton,*

insbesondere Frucht- und Fleischschälchen aus Fasermaterial. 720988 Deutsches Reich, 3.. September 1938. Patentschrift.

**Kießler, B. 2006.** Einfluss unterschiedlicher verfahrenstechnischer Bedingungen bei der Herstellung kationischer Stärken auf deren Eigenschaften und ihre Auswirkungen auf relevante Prozess- und Qualitätsparameter bei der Herstellung von Papier. 2006. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 22008304, Fachagentur nachwachsender Rohstoffe.

**Klementsitz, W., Häner, A. und Dreier, F. 1972.** Untersuchungen über den Haftreibungskoeffizienten von Zellstoffen und Papieren. *Das Papier*. 1972, 26, Nr. 11, S. 733 – 737.

**Klingelhöffer, H. 1958.** Die Verdichtbarkeit von Vollpappe. *Allgemeine Papierrundschau*. 1958, 11, S. 544.

**Klingelhöffer, H. 1962.** Prägbarkeit. *Allgemeine Papierrundschau* 15. 1962.

**Klingelhöffer, H. 1964.** Prägen und Ziehen von Karton in mehreren Lagen. *Allgemeine Papierrundschau* 6. 1964.

**Klingelhöffer, H. und Proksch, A. 1961.** Physikalische Messungen über die Reibung und Haftung von Glanzpapieren. *Das Papier*. 1961, 15, Nr. 10a, S. 601 – 603.

**Kouba, K., Novotny, P. und Saha, P. 1999.** Fitting of K-BKZ model parameters for the simulation of thermoforming. *International Polymer Processing*. 1999, 3, S. 291-295.

**Krautwald, R. Maschinenfabrik Dresden. 1922.** Zieh- und Prägepresse mit Kraftantrieb. 402082 Deutsches Reich, 11.. Juli 1922. Patentschrift.

**Kubát, J. 1969.** Rheology of paper. Rheology, Theory and applications. *Academic press, New York and London*. 1969, Vol. 5.

**Ladner, O. Hilko Papier- und Pappenwarenfabrik. 1956.** Ziehpresse. 195234 Österreich, 8. Juni 1956. Patentschrift.

**Langer, P. 2004.** Dynamische Wechselwirkungen der Teilsysteme einer Digitaldruckmaschine. Dresden : Dissertation, Technische Universität Dresden, Selbstverlag, 2004.

**Le, P.-C. 2004.** Verbesserung der Qualität von Mehrzweck-Kopierpapieren durch gezielte Oberflächenleimung. 2004. AiF Abschlussbericht zum Vorhaben AiF 13354.

**Liew, G. P. V. 1973.** *The deformation of paper in the z-direction*. Appleton, Wisconsin : Ph.D. Thesis, The Institute of paper chemistry, Lawrence University, 1973.

**Liew, G. P. V. 1974.** The z-direction deformation of paper. *Tappi Journal*. 1974, 57, Nr. 11, S.121-124.

**Lohse, H., et al. 2010.** Ziehen von Papier und Karton, Elektrohydraulisches Antriebssystem ermöglicht flexible Prozessgestaltung. *O+P, Ölhydraulik und Pneumatik*. 2010, Teil 1: 04/2010 S.118-123, Teil 2: 05/2010 S.192-196.

**Lotze, A. 2009.** *Steuerungsintegrierte Vorgangsd Diagnose am Beispiel der Quersiegeleinheit*. Dresden : Dissertation, Technische Universität Dresden, 2009.

**Luey, A.T. 1963.** Stiffness of multiply boxboard. *Tappi Journal*. 1963, 46, Nr. 11, S.159A-162A.

- Mäkelä, P. und Östlund, S. 2003.** Orthotropic elastic–plastic material model for paper materials. *International Journal of Solids and Structures*. 2003, Volume 40, Issue 21, S. 5599-5620.
- Mann, R.W., Baum, G.A. und Habberger, C.C. 1980.** Determination of all nine orthotropic elastic constants for machine-made paper. *Tappi Journal*. 1980, 63, Nr. 2., S. 163-166.
- Mark, R.E., et al. 2002.** *Handbook of physical testing of paper. Volume 1, Second edition, revised and expanded.* s.l. : Dekker M., 2002.
- McDonald, J. D., Gratton, M. F. und Ménard, A. 1996.** *Measuring Paper Friction: Testing Conditions and Papermaking Factors* . s.l. : Finishing and Converting Conference Proceedings S. 163 – 171, 1996.
- Meyer, C. 2008.** *Auslegung der Maschinensteuerung einer hydraulisch angetriebenen Versuchseinrichtung zum Umformen von Papier und Karton.* Dresden : Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, 2008.
- Möller, A. 1989.** *Dreidimensionales Biegverformbares Flächenelement und Verfahren zur Biegverformung eines derartigen Flächenelementes.* DD 271 670 Deutschland, 1989. Patentschrift.
- Möller, E. 2006.** *Verbesserung spezifischer Festigkeitseigenschaften von Papieren aus Primärfaserstoffen durch Erhöhung des Stärkeanteils in der Masse.* 2006. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 22008204, Fachagentur nachwachsender Rohstoffe.
- Müller, O. 1929.** *Holzblech, seine spanlose Formung zu Hohlkörpern.* Dresden : Dissertation, Technische Hochschule Dresden, 1929.
- N.N., Jagenberg-Werke Aktiengesellschaft Düsseldorf. 1938.** *Ziehpresse zum Ziehen von Werkstücken aus Papier, Karton, Pappe u. dgl.* 680771 Deutsches Reich, 20.. August 1938. Patentschrift.
- N.N., Aktiengesellschaft für Cartonnagenindustrie Dresden. 1934.** *Vorrichtung zum Pressen, Prägen, Ziehen, Formen oder dgl. von Gegenständen aus Pappe, Karton oder ähnlichen Werkstoffen.* 604262 Deutsches Reich, 27.. September 1934. Patentschrift.
- N.N., Peerless Machine and Tool Cooperation Marion (U.S.A.). 1959.** *Verfahren zum Herstellen von Schalen, Tellern o. dgl. aus Papier, Pappe o. ähnl. faserigem Blattmaterial und nach diesem Verfahren hergestellte schalen Teller o. dgl.* 232364 Österreich, 9.. Februar 1959. Patentschrift.
- N.N., Sächsische Cartonnagen Maschinen Act. Ges. Dresden. 1929.** *Vorrichtung zum Ziehen von Schachtelteilen o. dgl.* 547016 Deutsches Reich, 29.. November 1929. Patentschrift.
- N.N., Sächsische Cartonnagen Maschinen Act. Ges. Dresden. 1924.** *Werkzeug zum Ziehen, Formen, Prägen und Überziehen von Schachtelteilen für Ziehpressen o. dgl.* 414786 und 473589 Deutsches Reich, 8.. März 1924. Patentschrift.
- N.N., Sächsische Cartonnagen Maschinen Akt. Ges. Dresden. 1921b.** *Maschine zum Ziehen und Kalibrieren von Schachtelteilen.* 355446 Deutsches Reich, 4.. Juni 1921b. Patentschrift.
- N.N., Sächsische Cartonnagen Maschinen Akt. Ges. Dresden. 1921c.** *Maschine zum Ziehen und Prägen von Schachtelteilen.* 368257 Deutsches Reich, 14.. Dezember 1921c. Patentschrift.

- N.N., Sächsische Cartonnagen Maschinen Akt. Ges. Dresden. 1921a.** *Schachtelform- und -prägemaschine mit Kniehebelantrieb.* 371839 Deutsches Reich, 14.. Dezember 1921a. Patentschrift.
- Nagasawa, S., et al. 2003.** Effect of crease depth and crease deviation on folding deformation characteristics of coated paperboard. *Journal of Materials Processing Technology.* 2003, Vol. 140, Issues 1-3, S. 157-162.
- Nilsson, L. 2004a.** Heat and Mass Transfer in Multicylinder Drying Part I. Analysis of Machine Data . *Chemical Engineering Processing.* 2004a, Vol. 43, S. 1547-1553.
- Nilsson, L. 2004b.** Heat and Mass Transfer in Multicylinder Drying Part II. Analysis of Internal and External Transport Resistances. *Chemical Engineering Processing.* 2004b, Vol. 43, S. 1555-1560.
- Ninforge, D. 1998.** *Improvement of tailored blanks stamping by using a control and localisation of the blank holder.* Clauthal Zellerfeld : s.n., 1998. Industriekolloquium des SFB 362 Fertigen in Feinblechen.
- Nishioka, A., et al. 2000.** Description of uniaxial, biaxial and planar elongational viscosities of polystyrene melt by the K-BKZ model. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics.* 2000, 89.
- Niskanen, K. 1998.** *Paper physics, Papermaking science and technology.* Helsinki : 16. Fapet Oy, 1998.
- Nissan, A. H. und George, H. H. 1961.** Heat and Mass Transfer Transients in Cylinder Drying: Part II. Felted Cylinders. *A.I.Ch.E. Journal.* 1961, Vol. 7, No. 4, S. 635-641.
- Nissan, A. H. und Hansen, D. 1960.** Heat and Mass Transfer Transients in Cylinder Drying: Part I. Unfelted Cylinders. *A.I.Ch.E. Journal.* 1960, Vol. 6, No. 4, S. 606-611.
- Oberrauch, A. Waiblingen. 1950.** *Maschine zum Prägen und Ziehen von Pappe-Schachteln und -Tellern sowie zum Stanzen von Zuschnitten.* 869290 Bundesrepublik Deutschland, 22.. August 1950. Patentschrift.
- Oehm, L. 2010.** *Untersuchung des Einlaufverhaltens beim Tiefziehen von Papier und Karton.* Großer Beleg (500h), Technische Universität Dresden, Betreuer: M. Hauptmann : s.n., 2010.
- Öhrn, O. E. 1965.** Thickness variations of paper on stretching. *Svensk Papperstidning.* 1965, 68, Nr. 5, S. 141-149.
- Osaki, S. und Fujii, J. 1980.** Compressive properties of paper in z-direction. *Japan Tappi .* 1980, 34, Nr.6, S.367-374.
- Otto, W. 1978.** *Über das mechanisch-thermische Umformen von Papier bei der Wellpappenherstellung im Hinblick auf das Laufverhalten von Wellenpapier.* Darmstadt : Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1978.
- Paetow, R. 1991.** *Über das Spannungs- Verformungsverhalten von Papier.* s.l. : Dissertation Technische Hochschule Darmstadt, 1991.
- Paetow, R. und Götsching, L. 1990b.** Das Nachgiebigkeits-Materialmodell für Papier. *Zellstoff Papier.* 1990b, 39, S. 9-14.
- Paetow, R. und Götsching, L. 1990c.** Querkontraktionszahl von Papier. *Das Papier.* 1990c, 44, Nr. 6, S. 229-237.

- Paetow, R. und Götttsching, L. 1990a.** Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Papier - ein neues Materialmodell. *Das Papier*. 1990a, 44, 10A, S. V75-V83.
- Page, D.H. 1969.** A theory of the tensile strength of paper. *Tappi Journal*. 1969, 52, Nr.4, S. 674-681,.
- Panknin, W. 1961.** Die Grundlagen des Tiefziehens im Anschlag unter besonderer Berücksichtigung der Tiefziehprüfung. *Bänder, Bleche, Rohre*. 1961, Heft 6.
- Pecht, M., Henry, W. und Haslach, Jr. 1991.** A viscoelastic constitutive model for constant rate loading at different relative humidities. *Mechanics of Materials*. 1991, Volume 11, Issue 4, Pages 337-345.
- Perkins, Jr. R.W., Sinha, S. und Mark, R.E. 1991.** *Micromechanics and Continuum Models for Paper Materials of Medium to High Density*. s.l. : International Paper Physics Conference Proceedings, 1991.
- Persson, K. 1991.** *Material model for paper, experimental and theoretical aspects*. Lund : M.Sc. Thesis, Department of Solid Mechanics, Lund Institute of Technology, 1991.
- Pfeiffer, J.D. 1966.** Internal pressures in wound roll of paper. *Tappi Journal*. 1966, 49, Nr. 8, S.342-347.
- Pfeiffer, J.D. 1990.** Surface winding to overcome strain deficiency. *Tappi Journal*. 1990, 73, Nr.10, S. 247-250.
- Poméon, A. Etablissement A. Poméon et ses Fils St-Chamond. 1920.** *Vorrichtung zum Ziehen von Dosen und Schachteln aus Pappe*. 371448 Deutsches Reich, 8.. Juli 1920. Patentschrift.
- Possehn, T. 1998.** Segmentierte Niederhalter verhindern Risse - Werkzeugtechnische Maßnahmen beim Ziehen von Tailored Blanks. *Industrieanzeiger*. 1998, Bd. 120, Heft 10, S. 32-33.
- Ragab, M.S. und Sommer, N. 1984.** Elastische Niederhalter zum Tiefziehen im Anschlag. *Bänder, Bleche, Rohre*. 1984, Bd. 25, Heft 10, S. 255-258.
- Ramasubramanian, M.K. und Wang, Y. 2007.** A computational micromechanics constitutive model for the unloading behavior of paper. *International Journal of Solids and Structures*. 2007, Volume 44, Issues 22-23, Pages 7615-7632.
- Reihle. 1961.** Ein einfaches Verfahren zur Aufnahme der Fließkurven von Stahl bei Raumtemperatur. *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. 1961, Heft 5: S.331-336.
- Ribeiro, H.A. und Costa, C.A.V. 2007.** Modelling and simulation of the nonlinear behaviour of paper: A cellular materials approach. *Chemical Engineering Science*. 2007, Volume 62, Issue 23, Pages 6696-6708.
- Rittmeier, S. 2007.** Systemunterstützte Umformung. *Dissertation, Technische Universität Dresden*. 2007.
- Roonsprasang, K. 2008.** *Thermal Analysis of Multi-Cylinder Drying Section with variant Geometry*. Dresden : Dissertation, Technische Universität Dresden, 2008.
- Salmén, L. und Back, E. L. 1980.** Moisture-dependent thermal softening of paper evaluated by its elastic modulus. *Tappi Journal*. 1980, 63, Nr.6., S. 117-120.
- Salmén, N. L. und Back, E. L. 1985.** Effects of temperature and moisture on the tensile properties of packaging papers. *Papieri ja Puu*. 1985, 67, Nr. 9., S. 477-482,.

- Salmén, N. L. und Back, E. L. 1977.** Simple stress-strain measurement on dry papers from -25°C to 250°C. *Svensk papperstidning*. 1977, 78, Nr. 6., S. 178-183.
- Schädler, M. 1963.** *Über die Zusammendrückbarkeit von Papier*. Darmstadt : Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, FB Maschinenbau, 1963.
- Schaffrath, H.-J. 1993.** *Über das Kompressions- und Reibverhalten von Papier vor dem Hintergrund des Rollenwickelns*. Darmstadt : Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1993.
- Schaffrath, H.J. und Gottsching, L. 1991.** *Behaviour of paper under compression in z-direction*. s.l. : International Paper Physics Conference Proceedings, 1991.
- Schaffrath, H.-J. und Göttching, L. 1992.** Modellierung der Kompression in z-Richtung bei niedriger Flächenpressung. *Das Papier*. 1992, 46, Nr. 7, S.350-355.
- Scheffler, E. 1997.** *Statistische Versuchsplanung und -auswertung*. Leipzig : 3. Aufl., Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1997.
- Scherer, K. 1932.** *Untersuchungen über Ziehfähigkeit und den Ziehvorgang von Pappe*. Dresden : Dissertation, Technische Hochschule Dresden, 1932.
- Schiller, O. Sächsische Cartonnagen Maschinen Akt. Ges. Dresden. 1929.** *Maschine zum Formen von Schachtelteilen mit mehreren Werkzeugsätzen*. 551002 Deutsches Reich, 2.. Juni 1929. Patentschrift.
- Schmidt, A. Firma Albert Schmidt in Leipzig. 1928.** *Vorrichtung zum Ziehen von Kapseln, Bechern und ähnlichen Gefäßen aus Papier, Pappe, Stanniol, Pergament u. dgl.* 478609 Deutsches Reich, 18.. September 1928. Patentschrift.
- Schmidt, A. 1927.** *Maschine zur Herstellung faltengeprägter Papierbecher*. 462120 Deutsches Reich, 4.. Februar 1927. Patentschrift.
- Schwarz, O., Ebeling, F.-W. und Furth, B. 2005.** *Kunststoffverarbeitung*. Würzburg : Vogel Verlag, 10. Auflage, 2005.
- Siebel, E. 1954.** Der Niederhalterdruck beim Tiefziehen. *Stahl und Eisen*. 1954, Bde. 74., S.155-158.
- Siebel, E. 1932.** *Die Formgebung im bildsamen Zustande, Theoretische Grundlagen der technischen Formgebungsverfahren*. Düsseldorf : Stahleisen, 1932.
- Siebel, E. und Panknin, W. 1956.** Ziehverfahren der Blechumformung. *Zeitschrift für Metallkunde* 47. 1956, Heft 4: S. 207-212.
- Siebel, E. und Schwaigerer, S. 1944.** Zur Mechanik des Zugversuchs. *Archiv für das Eisenhüttenwesen* . 1944, S. 145-152.
- Siebel, G. 1940.** *Technology of magnesium and its alloys*. London : Hughes, 1940.
- Siegert, K. und Hohnhaus, J. 1998.** *Analyse und Optimierung des Systems Zieheinrichtung/ Werkzeug bei einfach wirkenden Pressen mit Vielpunkt- Zieheinrichtung im Pressentisch*. Stuttgart, Hannover : IFU , EFB, 1998. Abschlussbericht zum Forschungsbericht AIF 10347N.
- Siegert, K. und Ziegler, M. 1998.** Pulsating blankholder force. *Production Engineering*. 1998, Bd. 5, Heft 1, S.27-30.
- Siegert, K., et al. 1995.** Closed-Loop control system for blank holders forces in deep drawing. *CIRP Annals*. 1995, Bd. 44/1.

- Siegert, K., et al. 1997.** Optimierung des Ziehvorgangs beim Umformen gschweißter Bleche (Tailored Blanks). *Werkstatttechnik*. 1997, Bde. 87: S. 304-309.
- Simon, H. 1989.** *Rechnerunterstützte Ziehteilauslegung mit elementaren Berechnungsmethoden*. Hannover : Dissertation, Universität Hannover, 1989.
- Soininen, M. 1995.** Modeling of web drying. *Drying Technology*. 1995, 13(4), 823-866.
- Sommer, N. 1986.** Niederhalterdruck und Gestaltung des Niederhalters beim Tiefziehen von Feinblechen. *Dissertation, Universität Hannover*. 1986.
- Sperrschneider, U. 1996.** *Optimierung eines Verfahren zur Herstellung von dreidimensional geformtem Sperrholz*. Dresden : Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, 1996.
- Steenberg, B. 1947.** Paper as a visco-elastic body. *Svensk Papperstidning*. 1947, Part 1: General survey. 50, Nr.6 S.127-140.
- Stenberg, N. 2003.** A model for the through-thickness elastic-plastic behaviour of paper. *International Journal of Solids and Structures*. 2003, Volume 40, Issue 26, S. 7483-7498.
- Stock, G. 1996.** Alternative Verfahren zur Verbesserung der Tiefziehergebnisse auf einfach wirkenden Pressen. *Dissertation, Universität Hannover*. 1996.
- Stockhausen, N. 1989.** *Anwendung von schwingungsanalytischen Methoden auf die Beschreibung der mechanischen Eigenschaften von Papier als Werkstoff*. München : FOGRA Forschungsbericht 4.031, 1989.
- Strömbro, J. und Gudmundson, P. 2008.** Mechano-sorptive creep under compressive loading – A micromechanical model. *International Journal of Solids and Structures*. 2008, Volume 45, Issue 9, Pages 2420-2450.
- Suh, N.P. 1981.** The genesis of friction. *Wear*. 1981, Vol. 69 S.91-114.
- Tenzer, H.-J. 1989.** *Leitfaden der Papierverarbeitungstechnik*. Leipzig : VEB Verlag, 1989. ISBN 3-343-00448-0.
- Tenzer, H.-J. und Hesse, F. 1971.** *Verpackungsmittel aus Papier, Karton und Pappe*. Leipzig : VEB Fachbuchverlag, 1971.
- Tenzer, H.-J. und Klein, R. 1982.** Bedeutung Charakterisierung und Beeinflussung des Biegeverhaltens von Karton. *Zellstoff und Papier*. 1982, Nr. 3, S. 125-130.
- Tenzer, H.-J. 1975.** Untersuchungen an Biegestellen von Faltschachteln aus Karton. *Papier und Druck*. 1975, Fachteil Druck und Verarbeitung, Nr. 1, S. 12-16; Nr.2, S.30-32.
- Tschätsch, H. 2005.** *Praxis der Umformtechnik, Arbeitsverfahren, Maschinen, Werkzeuge*. Wiesbaden : Vieweg Verlag, 2005.
- Uesaka, T. 2002.** Dimensional stability and environmental Effects on Paper Properties. [Buchverf.] R.E. Mark, et al. *Handbook of physical testing of paper. Volume 1, Second edition, revised and expanded*. s.l. : Dekker M., 2002.
- Urbanik, T. J. 2002.** A more mechanistic model of the compression strain-load response of paper. *Journal of Pulp and Paper Science*. 2002, Vol. 28, Nr. 6.
- Van Den Akker, A.J. 1970.** Structure and tensile characteristics of paper. *Tappi Journal*. 1970, 53, Nr.3, S.388-400.
- VDI 2143 Blatt 1. 1980.** *Bewegungsgesetze für Kurvengetriebe, Theoretische Grundlagen*. Berlin : Beuth Verlag, 1980.

---

**VDI 2143 Blatt 2. 1987.** *Bewegungsgesetze für Kurvengetriebe, Praktische Anwendung.* Berlin : Beuth Verlag, 1987.

**VDI 2143-1. 1980.** *Bewegungsgesetze für Kurvengetriebe, Theoretische Grundlagen.* 1980.

**Wagenführ, A. und Buchelt, B. 2004b.** 3-D Umformung von Furnier. *HOB, Holzbearbeitung.* 2004b, 3, S. 89-92.

**Wagenführ, A. und Buchelt, B. 2004a.** *Dreidimensionale Verformung von Furnier.* Dresden : Abschlussbericht zum AIF Forschungsvorhaben Nr. 13287 BR, 2004a.

**Weiß, C. 2007.** *Datenanalyse und Modellierung mit STATISTICA.* München : Oldenbourg Verlag, 2007. ISBN 3-486-57959-2.

**Wennerblom, A. 1988.** Low friction – A slippery problem. *Nordliner Technical News.* 1988, 23.

**Wilhelmsson, B. 1995.** *An Experimental and Theoretical Study of Multi-Cylinder Paper Drying.* s.l. : Dissertation, Dept. of Chemical Engineering I, Lund University, Lund, Sweden, 1995.

**Wilken, R. 1993.** *Grundzüge der Papier- und Pappenherstellung, Sortenübersicht, Verfahrenstechnische Grundlagen der Papier-, Karton- und Pappenverarbeitung.* 1993. PTS-PTI Seminar Unterlagen PV-SE 371.

**Wink, W. A. und Eperen, R. H. V. 1967.** Evaluation of z-direction tensile strength. , . *Tappi Journal.* 1967, 50, Nr. 8, S.393-400 .

**Withiam, M. C. 1991.** The effect of fillers on paper friction properties. *Tappi Journal.* 1991, 74, Nr. 4, S. 249 – 256.

**Ziegler, M.C. 1999.** *Schwingende Niederhalterkräfte und Regelkreise beim Tiefziehen axialsymmetrischer Blechformteile, Beiträge zur Umfortechnik.* Bd. 19, Hrsg. Siegert K., Oberursel : DGM Informationsgesellschaft-Verlag, 1999.

---

## Anlagenverzeichnis

Anlage 1:	Liste der Anforderungen nach (Hauptmann, et al., 2008)	136
Anlage 2:	Daten der eingesetzten Sensoren	139
Anlage 3:	Spezifikation des eingesetzten Ziehkartons ZKH von Mayr/Melnhof	140
Anlage 4:	Defekte beim Ziehen von Karton	141
Anlage 5:	Planmatrix zum vollfaktoriellen Versuchsplan mit 5 Faktoren auf je 2 Niveaus	142
Anlage 6:	Ergebnisse des $\chi^2$ -Test bei einem zufällig gewählten Versuchspunkt	143
Anlage 7:	Matrix der unabhängigen Variablen bei vollfaktoriellem Versuchsplan mit 5 Faktoren und 2 Niveaus zur Planmatrix nach Anlage 2	144
Anlage 8:	Darstellung der Wirkung der vollfaktoriellen Parametervariation auf Qualitäts- und Kraftkenngrößen	145
Anlage 9:	Vergleich der Wirkungen der vollfaktoriellen Parametervariation zwischen Qualitäts- und Kraftkenngrößen	149
Anlage 10:	Diagramme zur Variation der Faltenhalterkraft	151
Anlage 11:	Diagramme zur Variation der Temperatursumme	153
Anlage 12:	Diagramme zur Variation der Temperaturdifferenz	155
Anlage 13:	Planmatrix für den oktagonalen Versuchsraum zweier unabhängiger Variablen	157
Anlage 14:	Matrix der unabhängigen Variablen für den oktagonalen Versuchsraum zweier unabhängiger Variablen entsprechend der Planmatrix nach Anlage 8	158
Anlage 15:	Darstellung der Regressionspolynome von Kraftkenngrößen und Faltenabständen bzw. Standardverteilung mit quadratischem Ansatz und Wechselwirkung für Temperatursumme und Temperaturdifferenz	159

## **Anlagen**

**Anlage 1:** Liste der Anforderungen nach (Hauptmann, et al., 2008)

Forderung/ Wunsch	Anforderungen
	<b>1. Packstoff / Packmittel</b>
W	Kartonsorten ohne Einschränkung
F	Flächengewicht Karton 200...800 g/m <sup>2</sup>
F	Feuchteanteil Karton 5...30 %
F	Probendurchmesser 60...220 mm
F	Ziehteildurchmesser 50...120 mm
F	Ziehhöhe 5...50 mm
F	Probendicke 0,1...3 mm
F	Geometrische Querschnittsform ohne Einschränkung innerhalb Formatbereich
	<b>2. Verarbeitungssystem</b>
F	Minimal mögliche Zeit für einen Arbeitszyklus 4 s
F	Prinzipieller Arbeitszyklus siehe Arbeitsdiagramm
F	Maximale Stempelprozesskraft 0...30 kN
F	Maximale Faltenhalterprozesskraft 0...10 kN
F	Maximale Prägekraft (Gegenhalterprozesskraft) 0...10 kN
F	Progressive Pressdruckverteilung über der Ziehhöhe
F	Formateile wechselbar (Stempelaufsatz, Ziehbüchse, Kalibrierbüchse, Gegenhalteraufsatz)
F	Stempelabrundung 1...3 mm
F	Ziehbüchsenabrundung 1...10 mm
F	Kalibrierbüchsenabrundung 1...10 mm
F	Ziehspaltbreite 0,5...1,5 x Materialdicke
F	Ziehspaltgenauigkeit +/-0,025 mm
F	Prozesstemperatur geregelt, stufenlos auf ganze °C einstellbar 20...200 °C
F	Reibbeiwert zwischen Ziehbüchse und Karton ≤0,3
F	Reibbeiwert zwischen Stempel und Karton 0,1...0,4
F	Reproduzierbare konzentrische Zuschnittpositionierung (manuell)
F	Kalibrierspaltbreite 0,01...0,1 mm
F	Gleichmäßige Verteilung der Faltenhalterkraft
F	Faltenhalter hat Führungs- und Stützfunktion für den Stempel
	<b>3. Antriebs- und Steuerungssystem</b>
F	Gleichzeitiges Verfahren aller Antriebe
F	Sofortiger Stopp aller Bewegungen bei Eindringen eines Körperteils oder Gegenstands in den Arbeitsraum

Forderung/ Wunsch	Anforderungen
F	Freie Vorgabe von Weg-Zeit- und Kraft-Zeit-Verläufen
F	Zu bewegende Stempelmasse ca. 70 kg
F	Maximale Kraft des Stempels beim Ziehen 40 kN (Prozesslast + Gegenhalterkraft)
F	Maximale Kraft des Stempels beim Rückhub 10 kN (aus Reibkraft)
F	Maximaler Hub des Stempels 240 mm
F	Geschwindigkeit des Stempels beim Ziehen 0...0,8 m/s
F	Geschwindigkeit des Stempels beim Rückhub 0...0,1 m/s
F	Lageregelung des Stempels
W	Begrenzung der maximalen Presskraft mit Hilfe der Druckerfassung, um Beschädigungen des Werkzeugs zu vermeiden
F	Zu bewegende Faltenhaltermasse 55 kg
F	Kraft des Faltenhalters 0...10 kN
F	Hub des Faltenhalters im Prozess 20 mm
F	Maximaler Hub des Faltenhalters für Werkzeugwechsel 100 mm
F	Geschwindigkeit des Faltenhalters 0...0,03 m/s
F	Gleichmäßige Aufbringung der Faltenhalterkraft über die Fläche
F	Druckregelung des Faltenhalters beim Ziehen
F	Lageregelung des Faltenhalters in allen Phasen außer Ziehen
F	Automatische Strukturumschaltung zwischen Positions- und Druckregelung des Faltenhalters
F	Masse Gegenhalter 10 kg
F	Kraft des Gegenhalters 0...10 kN
F	Maximaler Hub des Gegenhalters 180 mm
F	Geschwindigkeit des Gegenhalters beim Ziehen 0...0,8 m/s
F	Geschwindigkeit des Gegenhalters außerhalb Ziehphase 0...0,3 m/s
F	Druckregelung des Gegenhalters beim Ziehen
F	Lageregelung des Gegenhalters in allen Phasen außer Ziehen
F	Automatische Strukturumschaltung zwischen Positions- und Druckregelung des Gegenhalters
<b>4. Stütz- und Hüllsystem</b>	
F	Aufnahme der Prozesskräfte für Stempel, Faltenhalter, Gegenhalter
F	Querkräfte 10 kN
F	Verformung max. 0,04 mm
F	Standsicherheit
W	Arbeitshöhe 1...1,5 m
F	Wärmeisolation an Schnittstellen zu Werkzeugkomponenten

Forderung/ Wunsch	Anforderungen
F	Schutz vor Prozesswärme
W	Wirkpaarungen sind sichtbar
F	Öffnungsmöglichkeiten für Wartung und Umrüstung
F	Sicherheitstechnikausrüstung (Verriegelung, Sicherheitsschalter)
	5. Messsystem
F	Erfassung der Zylinderkräfte für Stempel, Faltenhalter, Gegenhalter
F	Messung des Weges für Stempel, Faltenhalter, Gegenhalter mit Genauigkeit 0,1 mm
W	Messung der Stempelbeschleunigung
F	Messung der Temperatur für Stempel, Ziehbüchse, Kalibrierbüchse mit Genauigkeit von 1 K
F	Temperaturmessbereich 0...300 °C
W	Auswertung der Messwerte über PC mit Messwertkarte

**Anlage 2:** Daten der eingesetzten Sensoren**Wegaufnehmer**

<b>Stempel/ Gegenhalter</b>	
Bezeichnung	MTS Sensors Temposonics® R-Serie
Auflösung	5 $\mu\text{m}$
Linearitätsfehler	0,01 %
Reproduzierbarkeit	0,001 %
<b>Faltenhalter</b>	
Bezeichnung	Novotechnik Typ LWH
Auflösung	0,01 mm
Linearitätsfehler	0,09 %
Reproduzierbarkeit	0,01 %

**Kraftsensor**

<b>Stempel</b>	
Bezeichnung	GTM, Serie K
Nennkraft	63 kN
Genauigkeitsklasse	0,02
Linearitätsfehler	0,015 %
Reproduzierbarkeit	0,003 %
Empfindlichkeit	2 mV/V

**Drucksensoren**

<b>Faltenhalter</b>	
Bezeichnung	Hydac HDA 4745-B-400-000 und HDA 4745-B-250-000
Nenndruck	400 bar, 250 bar
Genauigkeitsklasse	0,25 %

**Beschleunigungssensor**

<b>Stempel</b>	
Bezeichnung	Synotech PCB 3711
Messbereich	$\pm 20$ g
Empfindlichkeit	100 mV/g
Linearitätsfehler	< 1 %

**Temperatursensoren**

<b>Stempel/ Ziehbüchse/ Kalibrierbüchse</b>	
Bezeichnung	Hotset, PWF 2
Typ	Pt 100
Messbereich	0 – 400 °C
Norm	DIN EN 60751

**Anlage 3:** Spezifikation des eingesetzten Ziehkartons ZKH von Mayr/Melnhof

<b>Kartonaufbau</b>			
Decke	Frischfasern und weiße Recyclingfasern		
Schonschicht	Helle und graue Recyclingfasern		
Mittelschicht	Helle und graue Recyclingfasern		
Rückseite	Frischfasern und weiße Recyclingfasern		
<b>Prozentuale Zusammensetzung</b>			
Faserstoff		ZKH 510 g/m <sup>2</sup>	ZKH 600 g/m <sup>2</sup>
Frischfasern	%	22	21
Weißer Recyclingfaser	%	11	9
Graue Recyclingfaser	%	67	70
Anteil Recyclingfaser	%	77	78
Seife	%	1,2	1,0
Volumen	cm <sup>3</sup> /g	1,37	1,37
L+W 5° MD	mNm	102	156,5
CD		30,2	48,0
Dicke	mm	0,70	0,82

**Anlage 4:** Defekte beim Ziehen von Karton**Defekt****Beispiel**

1. Blasenbildung



2. Rissbildung



3. Lokale Schwärzung

4. Ungleichmäßige  
Faltenbildung5. Zipfelbildung am  
Zargenrand6. Vergilbung,  
gleichmäßige  
Schwärzung

7. Durchbiegung der Zarge



8. Rückstellung der Zarge



**Anlage 5:** Planmatrix zum vollfaktoriellen Versuchsplan mit 5 Faktoren auf je 2 Niveaus

	Faktoren				
Versuchspunkte	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
1	-	-	-	-	-
2	+	-	-	-	-
3	-	+	-	-	-
4	+	+	-	-	-
5	-	-	+	-	-
6	+	-	+	-	-
7	-	+	+	-	-
8	+	+	+	-	-
9	-	-	-	+	-
10	+	-	-	+	-
11	-	+	-	+	-
12	+	+	-	+	-
13	-	-	+	+	-
14	+	-	+	+	-
15	-	+	+	+	-
16	+	+	+	+	-
17	-	-	-	-	+
18	+	-	-	-	+
19	-	+	-	-	+
20	+	+	-	-	+
21	-	-	+	-	+
22	+	-	+	-	+
23	-	+	+	-	+
24	+	+	+	-	+
25	-	-	-	+	+
26	+	-	-	+	+
27	-	+	-	+	+
28	+	+	-	+	+
29	-	-	+	+	+
30	+	-	+	+	+
31	-	+	+	+	+
32	+	+	+	+	+

**Anlage 6:** Ergebnisse des  $\chi^2$ -Test bei einem zufällig gewählten Versuchspunkt

<b>Antwortgröße</b>	<b><math>\chi^2</math>- Wert</b>	<b>p-Wert</b>
Faltenabstand	1,57	0,21
Durchbiegung	7,45	0,024
Rückstellwinkel	9,32	0,054
Kraft $F_4$	1,90	0,17
Anstieg $A_1$	2,97	0,39

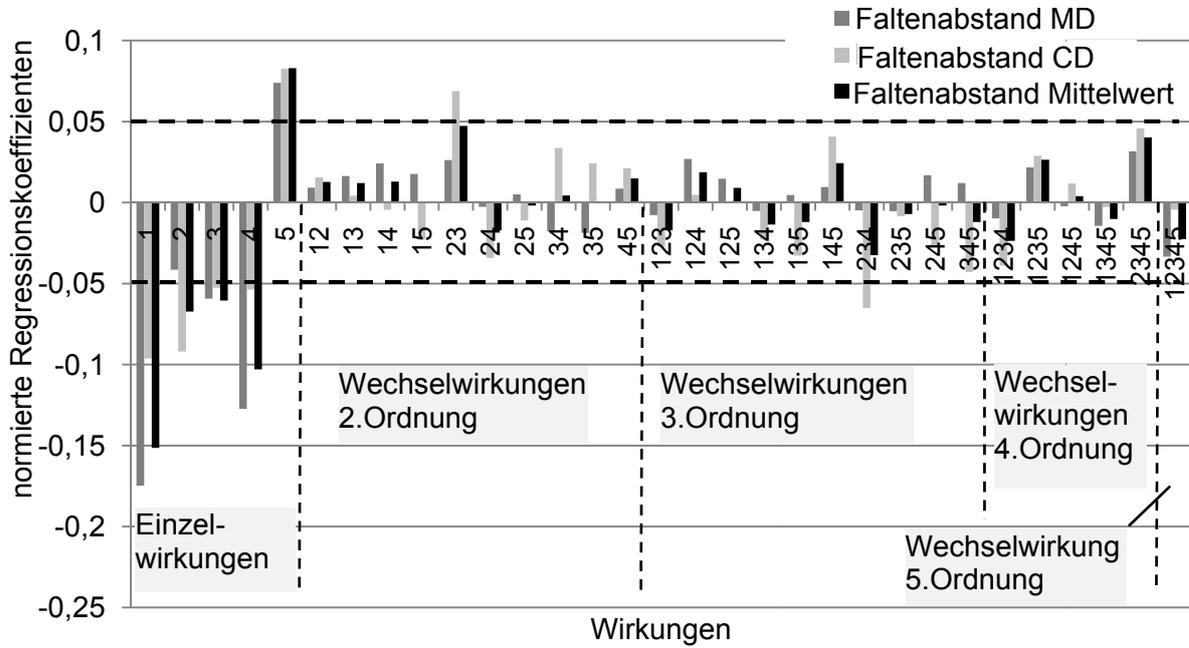
<b>Versuchspunkt</b>	
Faltenhalterkraft	2000 N
Energie	250 K
Temperaturdifferenz	60 K
Feuchte	7,3%
Flächenbezogene Masse	600 g/m <sup>2</sup>

**Anlage 7:** Matrix der unabhängigen Variablen bei vollfaktoriellem Versuchsplan mit 5 Faktoren und 2 Niveaus zur Planmatrix nach Anlage 2

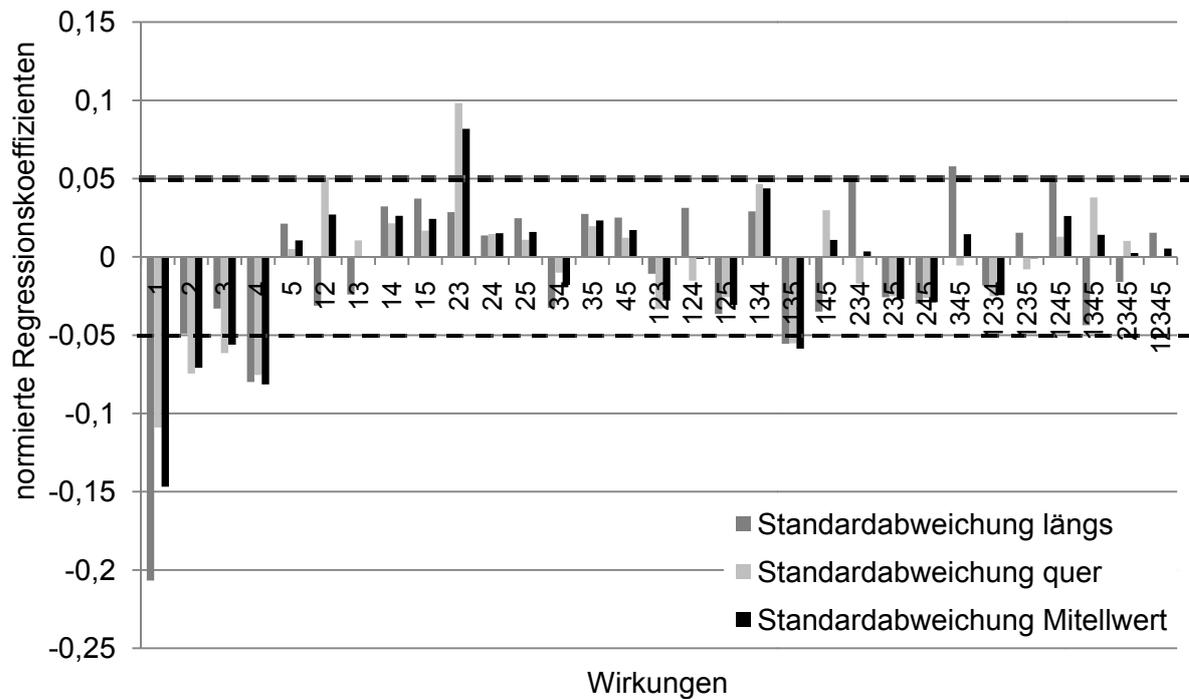
Matrix der unabhängigen Variablen																																				
I	0	1	2	3	4	5	12	13	14	15	23	24	25	34	35	45	123	124	125	134	135	145	234	235	245	345	1234	1235	1245	1345	2345	12345				
1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1		
2	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
3	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
4	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	
5	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
12	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	
13	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
14	1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
15	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
23	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
24	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
25	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
34	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
35	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
45	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
123	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
124	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
125	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
134	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
135	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
145	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
234	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
235	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
245	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
345	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
1234	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
1235	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
1245	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
1345	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
2345	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
12345	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1

**Anlage 8:** Darstellung der Wirkung der vollfaktoriellen Parametervariation auf Qualitäts- und Kraftkenngrößen

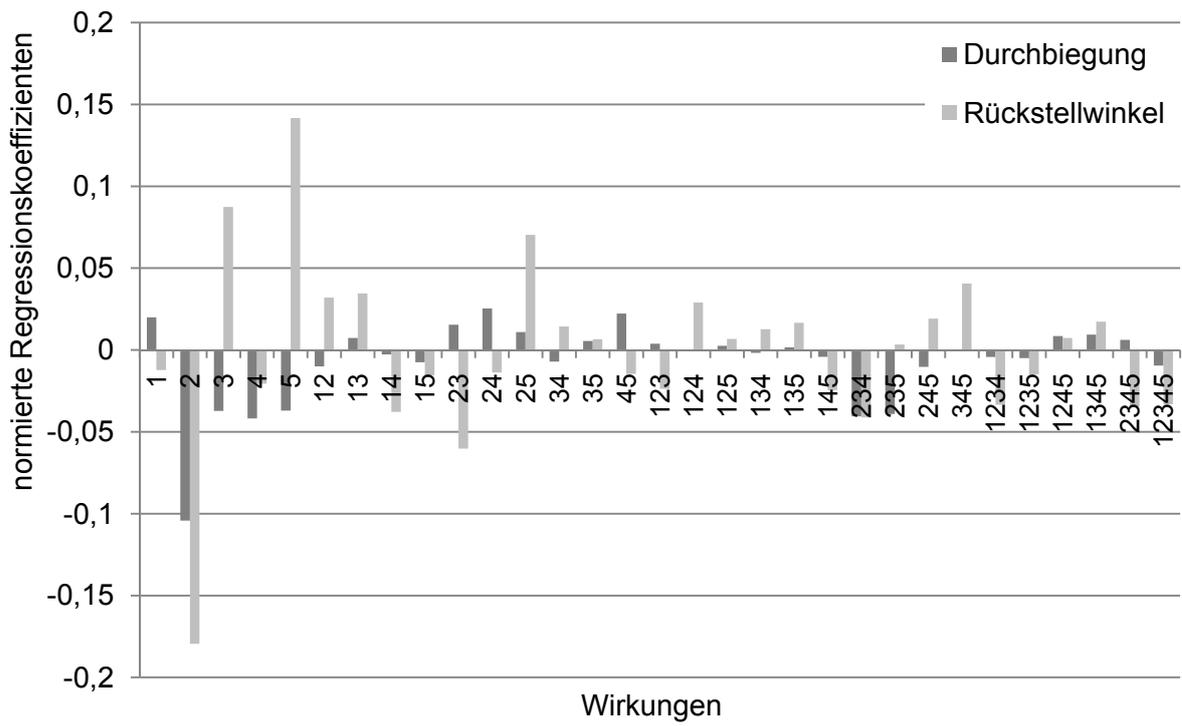
**Faltenabstand**



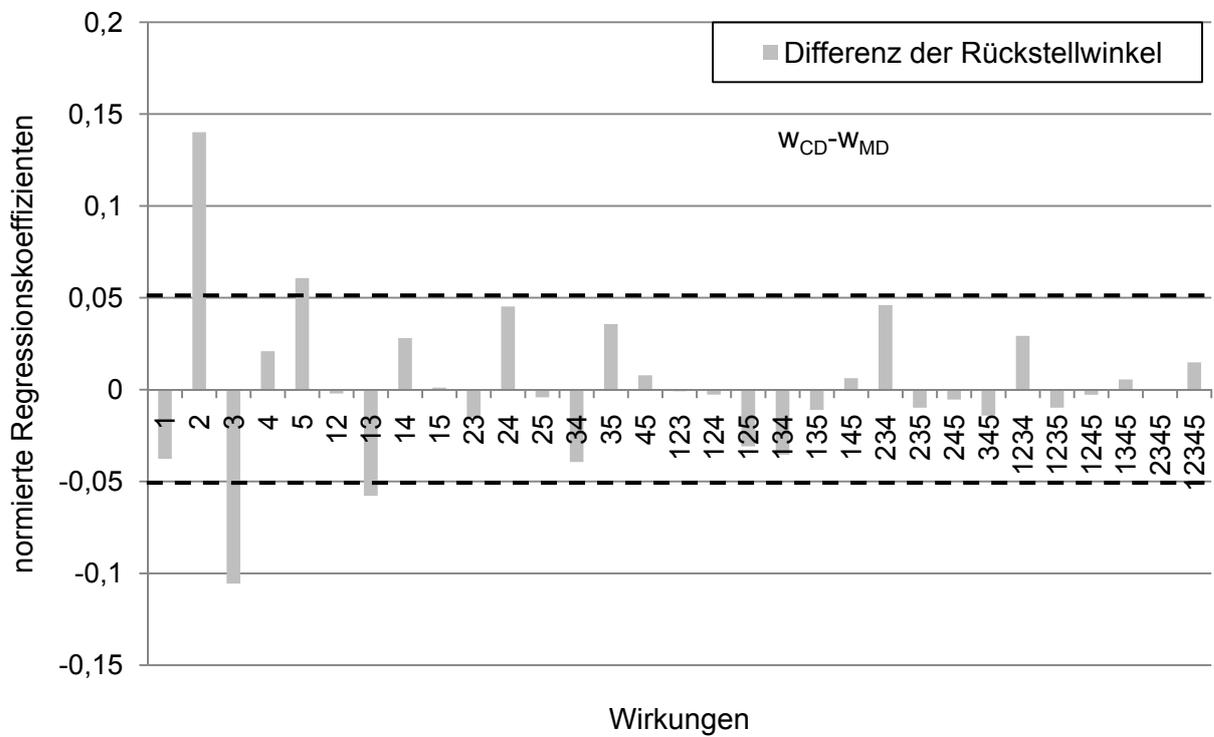
**Standardabweichung der Faltenabstände**



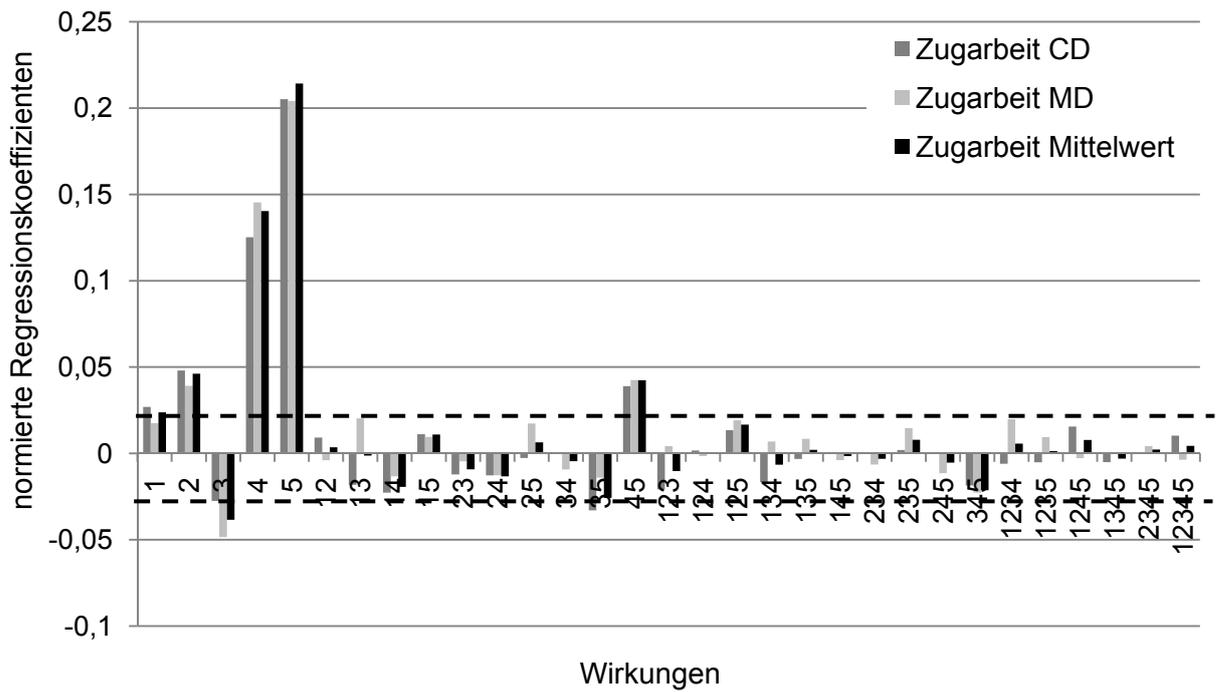
**Rückstellwinkel und Durchbiegung der Zarge**



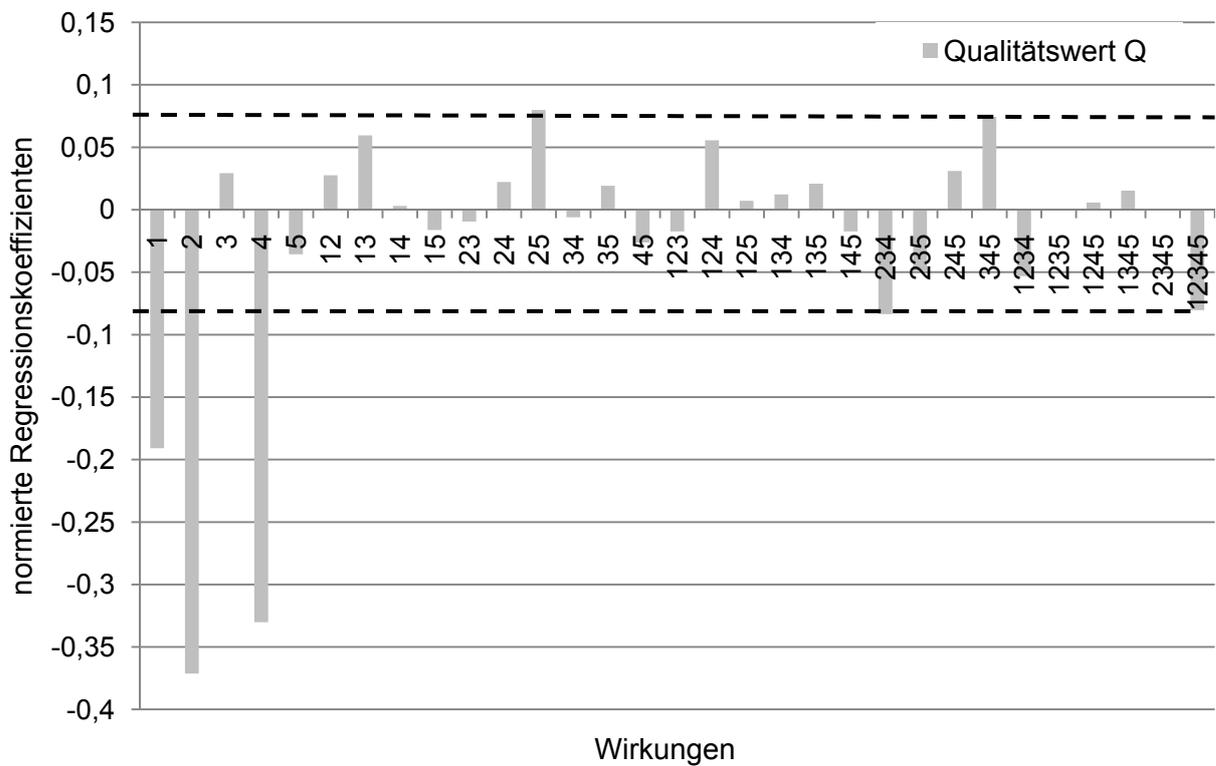
**Differenz der Rückstellwinkel in MD und CD**



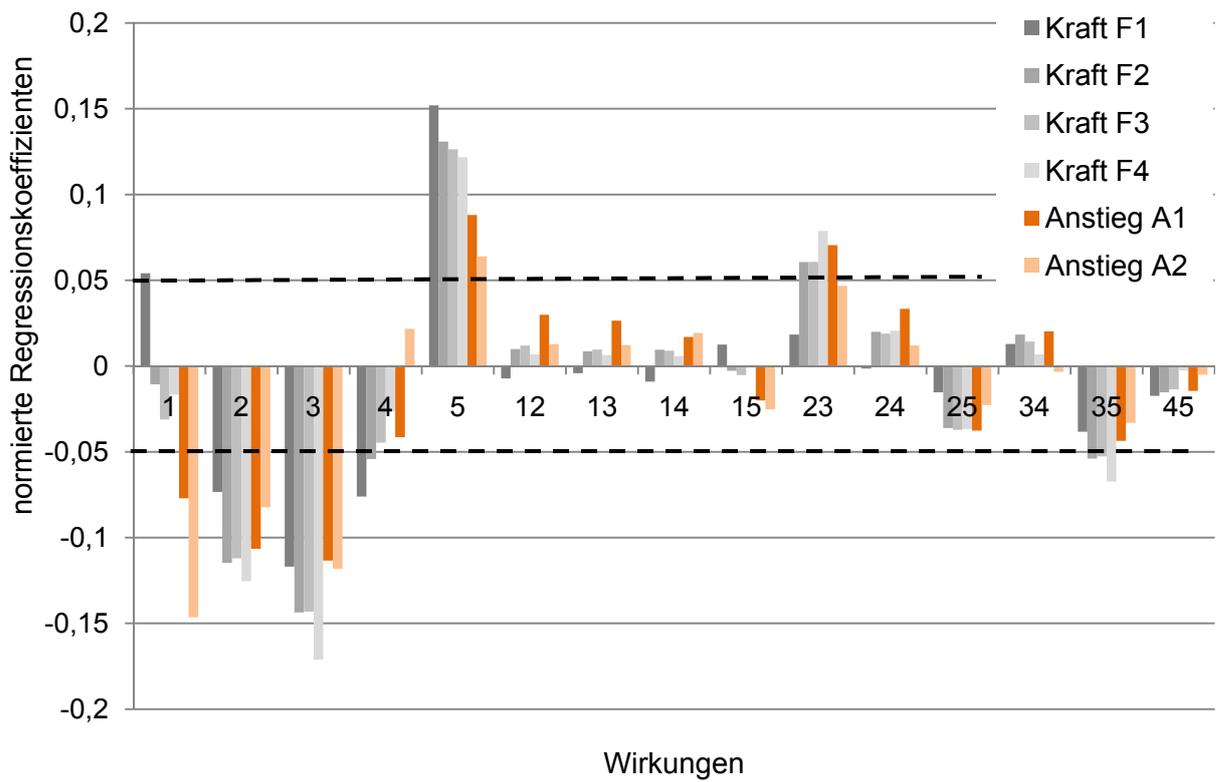
**Zugarbeit**



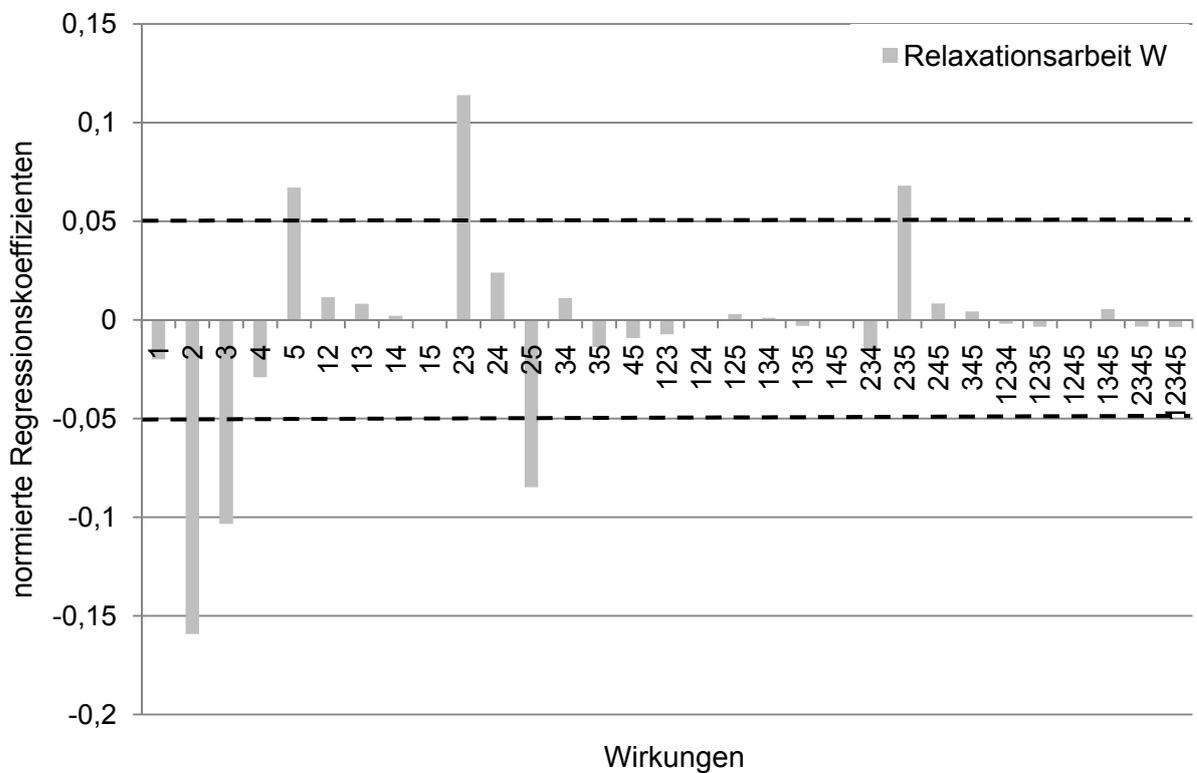
**Qualitätswert**



### Kraftkenngrößen

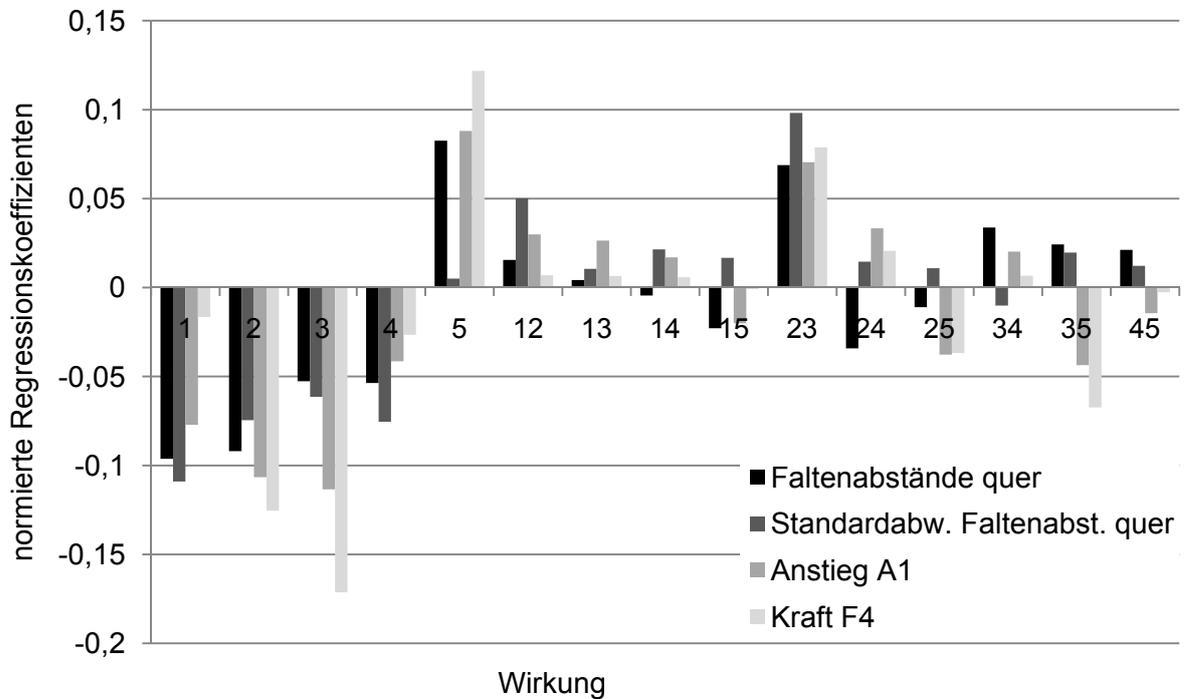


### Relaxationsarbeit

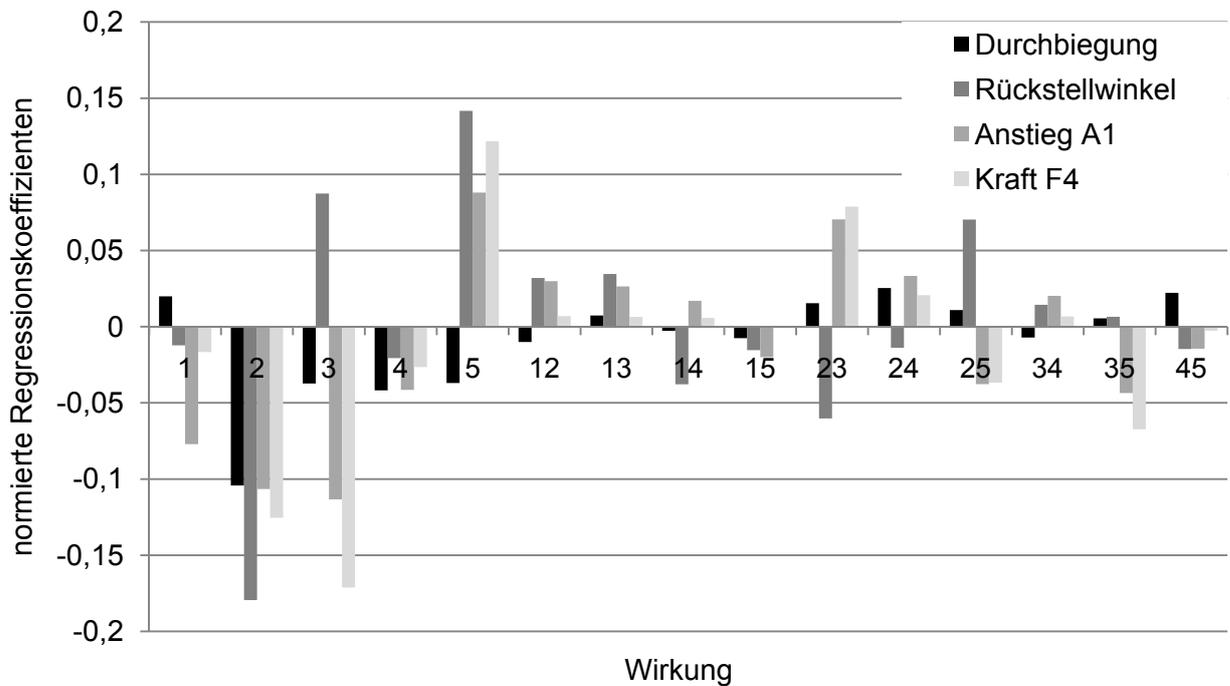


**Anlage 9:** Vergleich der Wirkungen der vollfaktoriellen Parametervariation zwischen Qualitäts- und Kraftkenngrößen

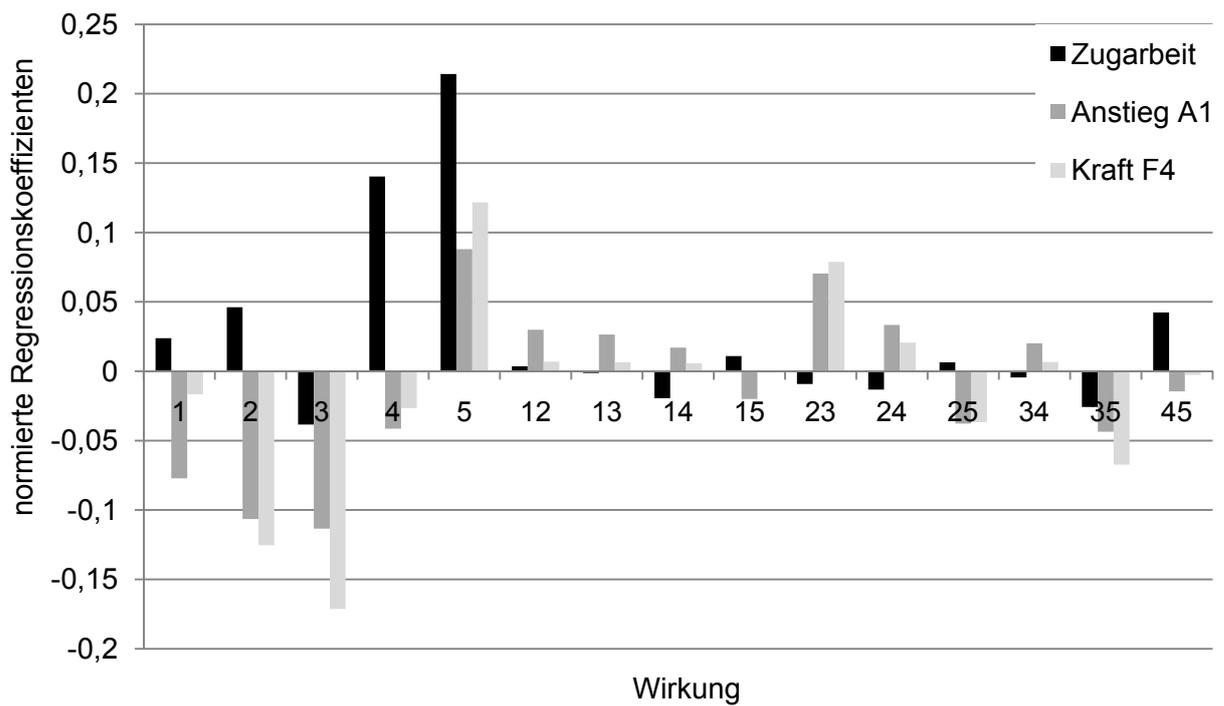
**Vergleich von Faltenabstand/ Faltenverteilung mit Kraftkenngrößen**



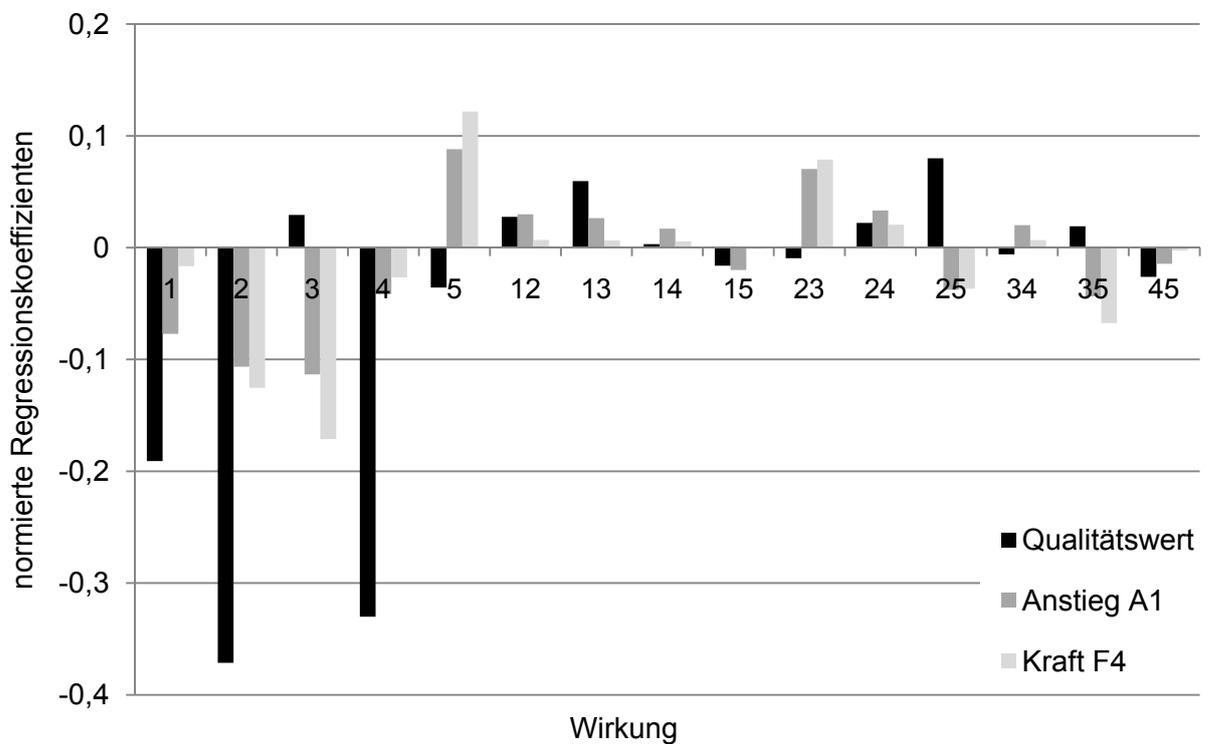
**Vergleich von Rückstellwinkel und Durchbiegung mit den Kraftkenngrößen**



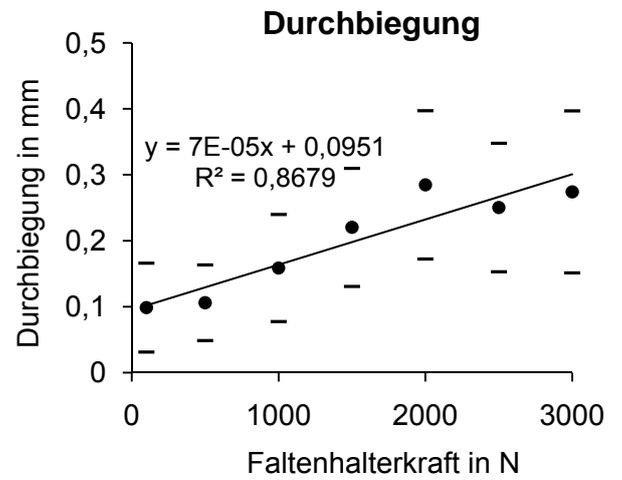
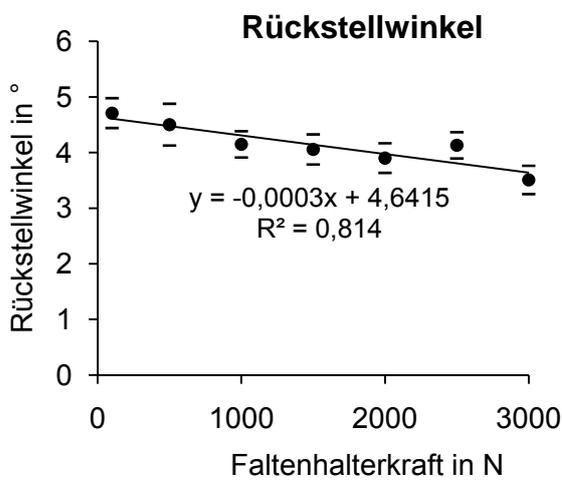
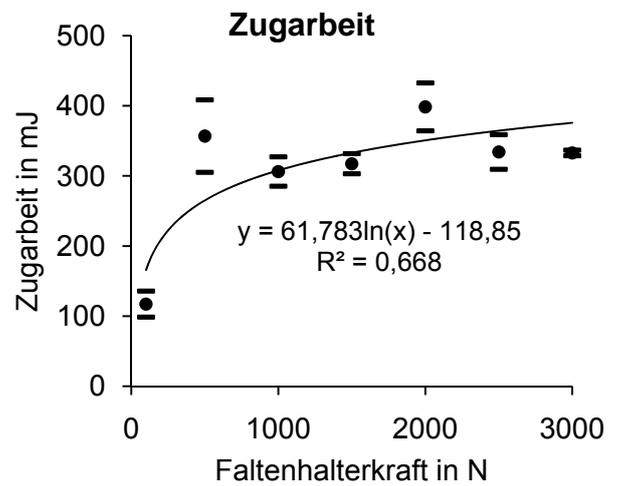
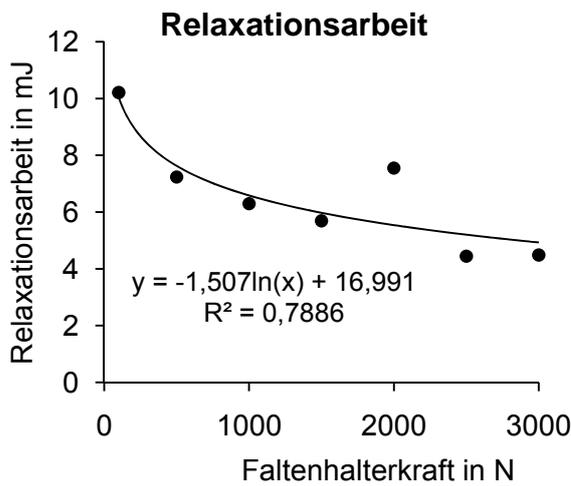
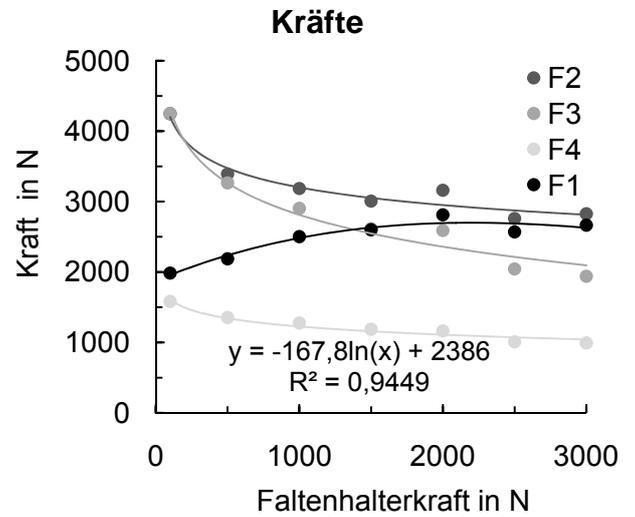
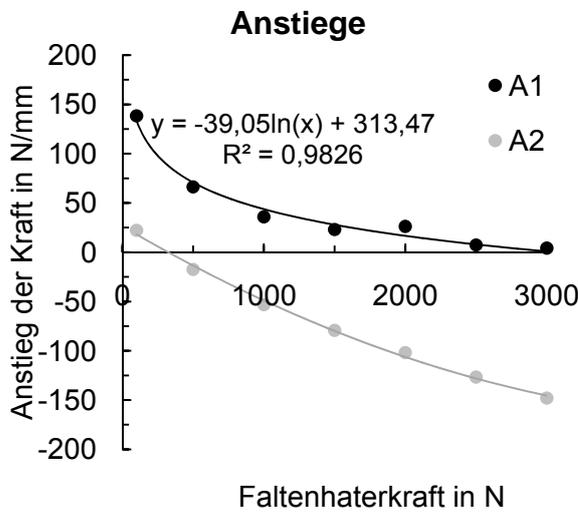
Vergleich der Zugarbeit mit den Kraftkenngrößen

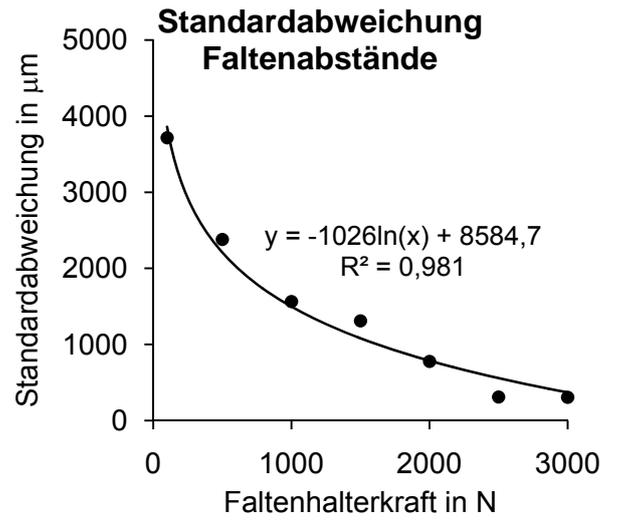
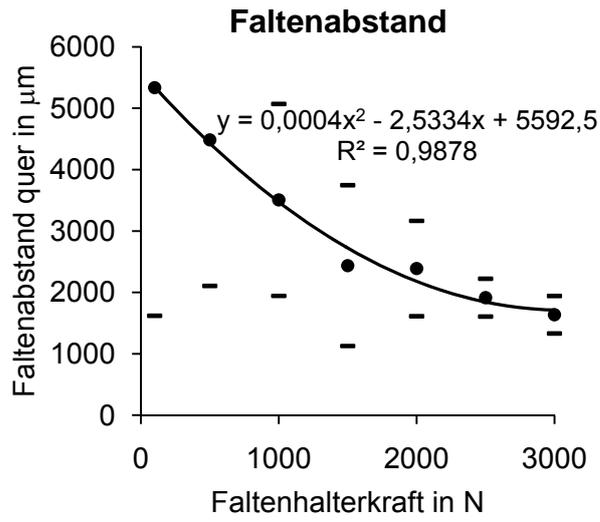


Vergleich des Qualitätswertes mit den Kraftkenngrößen

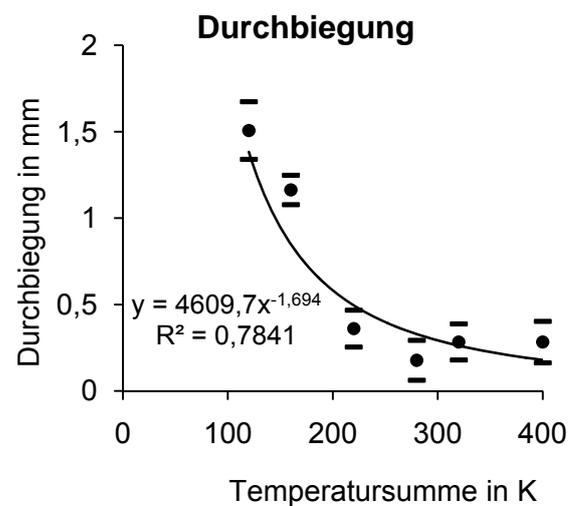
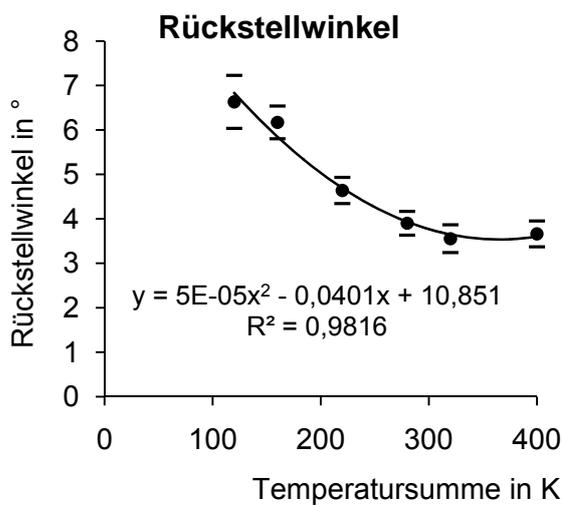
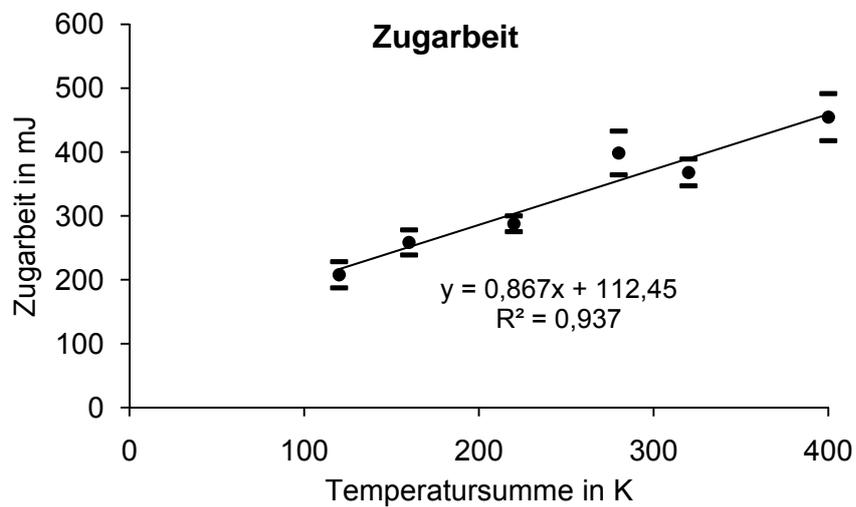
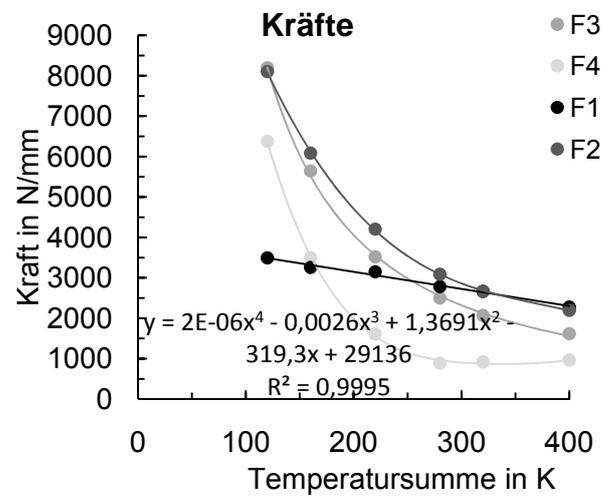
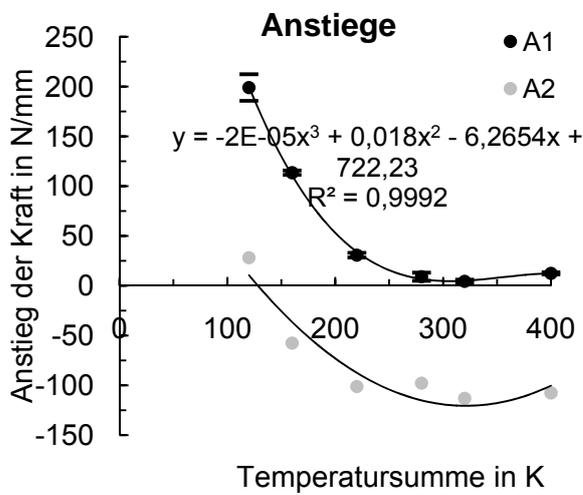


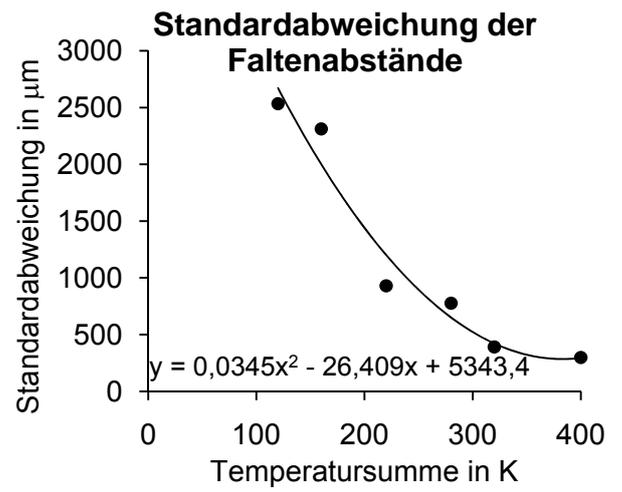
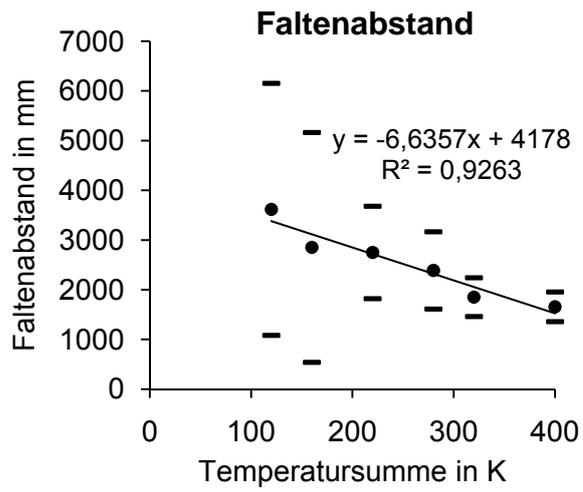
Anlage 10: Diagramme zur Variation der Faltenhalterkraft



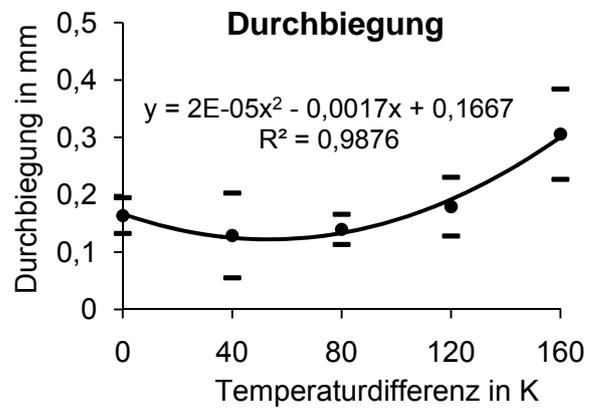
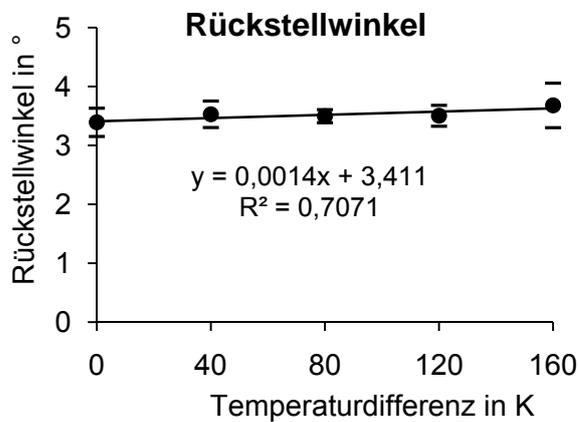
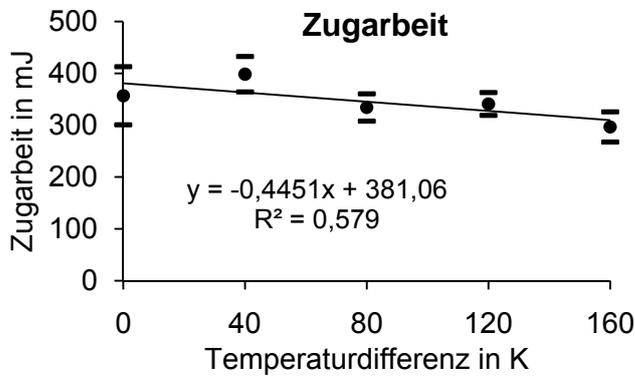
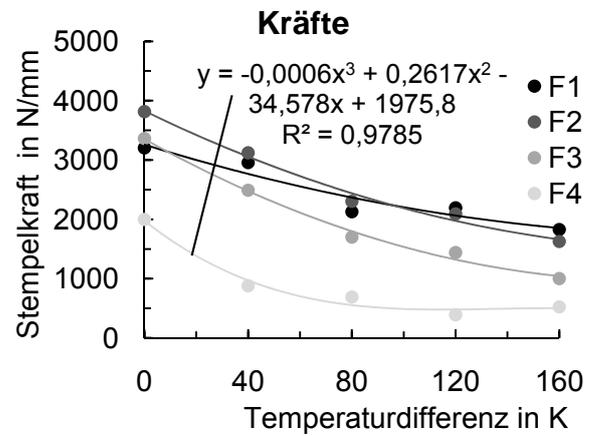
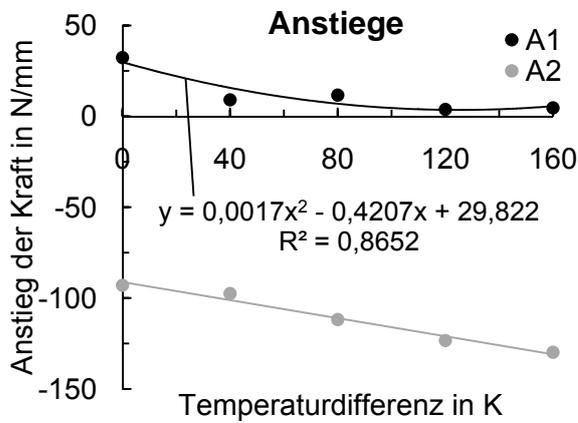


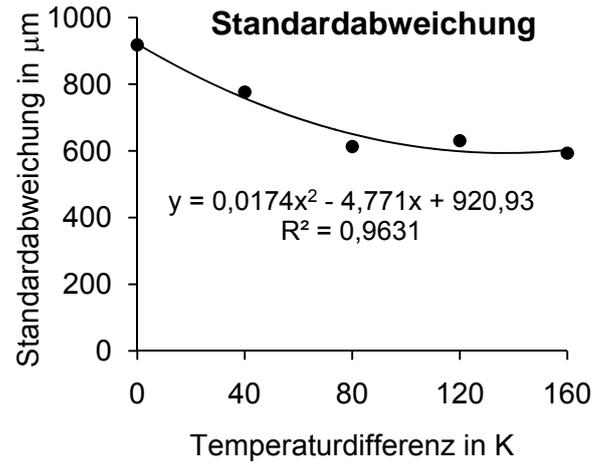
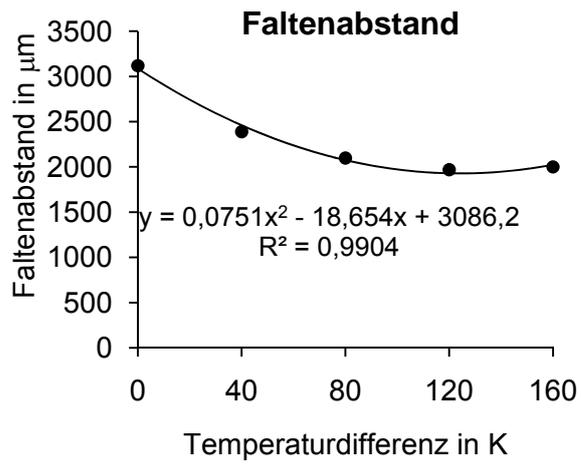
Anlage 11: Diagramme zur Variation der Temperatursumme





Anlage 12: Diagramme zur Variation der Temperaturdifferenz





**Anlage 13:** Planmatrix für den oktagonalen Versuchsraum zweier unabhängiger Variablen

Planmatrix		
Variable/Faktoren	x1	x2
Einheit	[-]	[-]
1	1	0
		-
2	0,707	0,707
3	0	-1
	-	-
4	0,707	0,707
5	-1	0
	-	
6	0,707	0,707
7	0	1
8	0,707	0,707
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0

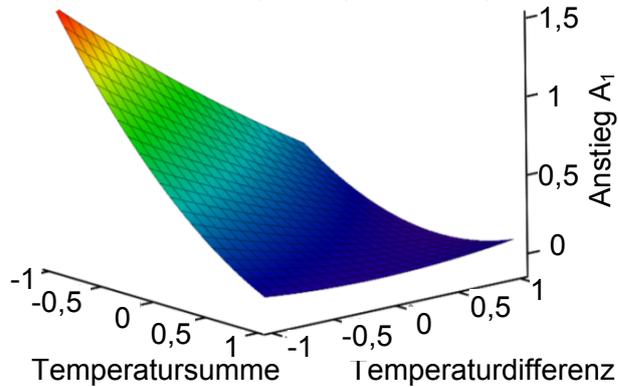
**Anlage 14:** Matrix der unabhängigen Variablen für den oktagonalen Versuchsraum zweier unabhängiger Variablen entsprechend der Planmatrix nach Anlage 8

Matrix der unabhängigen Variablen					
I	0	1	2	1 <sup>2</sup>	2 <sup>2</sup>
1		1	0	0,00	-0,25
1		0,707	-0,707	0,00	0,25
1		0	-1	0,00	0,75
1		-0,707	-0,707	0,00	0,25
1		-1	0	0,00	-0,25
1		-0,707	0,707	0,00	0,25
1		0	1	0,00	0,75
1		0,707	0,707	0,00	0,25
1		0	0	0,00	-0,25
1		0	0	0,00	-0,25
1		0	0	0,00	-0,25
1		0	0	0,00	-0,25
1		0	0	0,00	-0,25
1		0	0	0,00	-0,25
1		0	0	0,00	-0,25
1		0	0	0,00	-0,25
1		0	0	0,00	-0,25

**Anlage 15:** Darstellung der Regressionspolynome von Kraftkenngrößen und Faltenabständen bzw. Standardverteilung mit quadratischem Ansatz und Wechselwirkung für Temperatursumme und Temperaturdifferenz

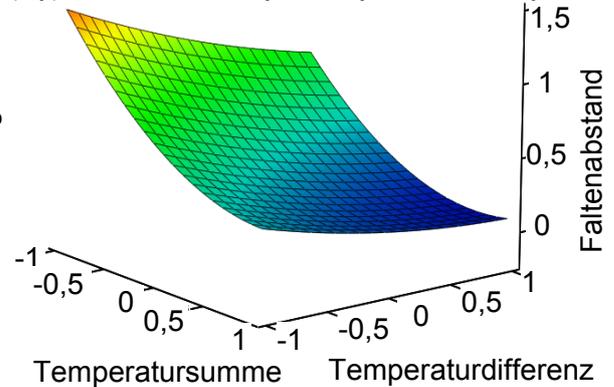
a) Anstieg  $A_1$ 

$$f(x,y) = 0,25 - 0,42x - 0,3y + 0,31xy + 0,2x^2 + 0,05y^2$$

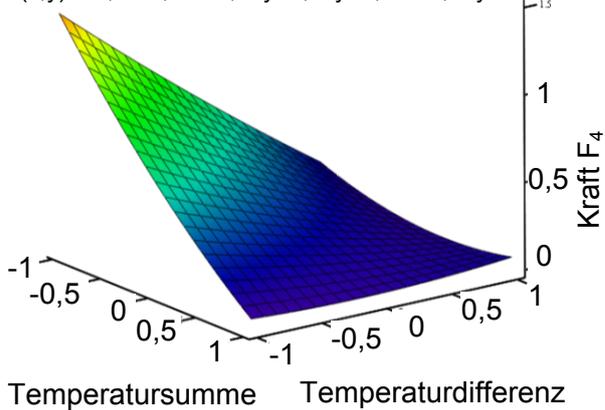


b) Faltenabstand

$$f(x,y) = 0,34 - 0,4x - 0,24y + 0,09xy + 0,24x^2 + 0,06y^2$$

c) Kraft  $F_4$ 

$$f(x,y) = 0,29 - 0,35x - 0,29y + 0,3xy + 0,1x^2 + 0,03y^2$$



d) Standardabweichung der Faltenabst.

$$f(x,y) = 0,38 - 0,39x - 0,27y + 0,02xy + 0,2x^2$$

