

**Nutzung von Prozesswissen
beim Thermoformen von Verpackungen**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften,
Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der

Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades

eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Andreas Moser
aus
Bad Friedrichshall

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Johannes Wortberg
Prof. Dr.-Ing. Elmar Moritzer
Tag der mündlichen Prüfung: 12.06.2013

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Produkt Engineering am Lehrstuhl für Konstruktion und Kunststoffmaschinen IPE-KKM der Universität Duisburg-Essen in den Jahren 2009 bis 2012.

Dem Inhaber des Lehrstuhls, Herrn Prof. Dr.-Ing. Johannes Wortberg, möchte ich herzlichst für die wertvollen Anregungen zu dieser Arbeit und die jederzeit gewährte Unterstützung bei der Durchführung danken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Elmar Moritzer danke ich für die Übernahme des Korreferats und die kritische Durchsicht der Arbeit. Mein Dank gilt weiterhin dem Vorsitzenden der Prüfungskommission Herrn Prof. Dr. rer. nat. Johannes Gottschling sowie dem Mitprüfer Herrn Prof. Dr.-Ing. Wojciech Kowalczyk

Mein besonderer Dank gilt außerdem allen wissenschaftlichen und technischen Mitarbeitern des Instituts, den Studien- und Abschlussarbeitern sowie den studentischen Hilfskräften, die durch ihr tatkräftiges Mitwirken diese Arbeit ermöglicht haben. Meinen langjährigen Bürokollegen Herrn Dipl.-Ing. Burkhard Gronhoff und Dipl.-Ing. Alexander Porsch danke ich für das tolle Arbeitsklima, die anregenden Gespräche und die schöne Zeit.

Weiterhin möchte ich besonders Herrn B.Eng. Andreas Raisch sowie Frau Sana Wakim für die kritische Durchsicht meiner Arbeit danken.

Für die Unterstützung mit maschinen- und labortechnischer Ausstattung gilt mein Dank der ILLIG Maschinenbau GmbH & Co. KG. Mein besonderer Dank gilt hierbei Herrn Karl Schäuble für die Unterstützung und die Ermöglichung dieses Vorhabens. Ebenso möchte ich Herrn Joachim Endres für die Unterstützung im Unternehmen während meiner Promotionszeit danken.

Für die Möglichkeit im Produktionsumfeld Messungen und Versuche durchzuführen, danke ich im Besonderen der Pöppelmann GmbH & Co. KG in Lohne und der RPC Tedeco-Gizeh GmbH in Bouxwiller.

Meiner Freundin möchte ich für die Motivation und Unterstützung während der Promotionszeit herzlich danken.

Weinsberg, im Juni 2013

Andreas Moser

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1
1.1	Zielsetzung	2
1.2	Der Thermoformprozess	3
1.3	Die Technikumsanlage	4
2	STAND DER FORSCHUNG UND TECHNIK	6
2.1	Maschinen- und Werkzeugtechnik	6
2.2	Einflüsse von Halbzeugeigenschaften und Extrusionsbedingungen	7
2.3	Modellbildung und Simulation des Thermoformprozesses	9
2.4	Einflüsse der Prozessparameter in der Thermoformanlage auf die Formteilqualität	10
2.5	Regelung von Formteileigenschaften	12
2.6	Statistische Methoden des prozessnahen Qualitätsmanagements	13
2.6.1	Statistische Versuchsmethodik	13
2.6.2	Statistical Process Control (SPC)	14
2.6.3	Kontinuierliche Qualitätskontrolle	15
2.6.4	Multiple Regressionsrechnung	15
2.6.5	Neuronale Netzwerke	17
3	VERFAHRENSABLAUF IN DER VERSUCHSANLAGE.....	19
3.1	Heizen	19
3.2	Formen	19
4	AUFBAU DES MESSSYSTEMS.....	22
5	ANALYSE UND OPTIMIERUNG DES PROZESSABLAUFS IN EINER THERMOFORMMASCHINE	23
5.1	Analyse der Vorheizung	23
5.2	Untersuchung der Infrarotheizung	25
5.3	Analyse des Formprozesses in Thermoformanlagen	26
6	IDENTIFIZIERUNG DER QUALITÄTSBESTIMMENDEN MASCHINENEINSTELLPARAMETER IM THERMOFORMEN	28
6.1	Qualitätsmerkmale von thermogeformten Verpackungen	28
6.1.1	Masse	28
6.1.2	Wanddickenverteilung	28
6.1.3	Mechanische Anforderungen und Topload	29
6.1.4	Geometrische Anforderungen	29
6.1.5	Barriereanforderungen	30
6.2	Versuchsplanung und -durchführung	31
6.2.1	Einflüsse der Formprozesseinstellungen auf die Wanddickenverteilung	33
6.2.2	Einflüsse der Formprozesseinstellungen auf die Siegelrandgeometrie	40
6.2.3	Einflüsse der Formprozesseinstellungen auf mechanische Formteileigenschaften	40
6.2.4	Einfluss der Vorstreckergeometrie und Vorstreckerkinematik auf die Formteileigenschaften	47
6.2.5	Einflüsse der Temperaturführung auf die Formteileigenschaften	49
6.2.6	Zusammenfassung der Einflussparameteranalyse	52
7	ANALYSE DER ABHÄNGIGKEITEN DER PROZESSGRÖßEN UND PROZESSKENNWERTEN	54

7.1	Charakterisierung der Kraftverläufe mittels Prozesskennzahlen	54
7.2	Analyse der Verstreckkräfte	55
7.2.1	Versuchsaufbau und Durchführung	55
7.2.2	Versuche zur Bestimmung der Reibungs- und Trägheitseinflüsse	56
7.2.3	Einflüsse des Materials auf die Verstreckkraft	59
7.3	Analyse der Schließ- und Schnittkräfte	65
8	KORRELATION DER FORMTEILPARAMETER MIT PROZESSKENNWERTEN UND MATERIALIEN.....	72
8.1	Verwendete Prozessgrößen und Versuchsdurchführung	72
8.2	Ergebnisse der untersuchten Formteilmerkmale	76
8.2.1	Wanddickenverteilung	76
8.2.2	Stauchdruck	80
8.2.3	Formteilhöhe	82
8.2.4	Masse	83
8.3	Zusammenfassung der Korrelationsanalyse	84
9	IMPLEMENTIERUNG EINES PROZESSÜBERWACHUNGS- UND REGELUNGSSYSTEMS....	86
9.1	Grundeinstellungsberechnung	86
9.2	Schaltzeitenkompensation der pneumatischen Aktoren	88
9.3	Automatische Schnitthöheneinstellung	89
9.4	Regelung der Halbzeugtemperatur und Verstreckenergie	90
10	PROZESSÜBERWACHUNG EINES INLINEPRODUKTIONSPROZESSES	93
10.1	Das Produkt und die installierte Qualitätssicherung	93
10.2	Identifikation von Störgrößen beim Inlinethermoformen	93
10.3	Korrelation der Qualität mit den Prozessgrößen	96
10.4	Regelung der Umformtemperatur und Verstreckenergie	97
11	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	99
12	CONCLUSION AND FORECAST	102
13	LITERATUR.....	105
13.1	Unveröffentlichte studentische Arbeiten	109
13.2	Betreute studentische und eigene Arbeiten	109
14	ANHANG.....	110
14.1	Aufbau einer Vorheizung und Modellbildung	110
14.2	Bewegungsablaufs von Unterwerkzeug und Vorstrecker	114
14.3	Ermittelte Ventilschaltzeiten	117
14.4	Versuchsplan zur Bestimmung von Beschleunigungs- und Reibungseinflüssen	119
14.5	Lineare Regressionskoeffizienten zwischen Temperaturen und Formteileigenschaften	119
14.6	Daten der verwendeten Polypropylene	120
15	LEBENS LAUF	121

FORMEL UND ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abkürzungen	Bezeichnung
FEM	Finite Elemente Methode
IR	Infrarot
MFI	Melt Flow Index
OSG	Obere Spezifikationsgrenze
USG	Untere Spezifikationsgrenze
SPC	Statistical Process Control
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
POM	Polyoxymethylen
PP	Polypropylen
PPH	Polypropylenhomopolymer
PPC	Polypropylencopolymer

Formelzeichen	Si-Einheit	Bezeichnung
b_i	–	Regressionskoeffizienten
\bar{x}	–	Mittelwert
x_i	–	unabhängige Variablen
y_i	–	abhängige Variablen
σ	–	Standardabweichung
C_P	–	Prozessfähigkeit
C_{pk}	–	Kritische Prozessfähigkeit
R^2	–	Bestimmtheitsmaß
α	W/m ² K	Wärmeübergangswiderstand
k_P	–	Proportionalverstärkung
V	–	Gewichtung der Vorsteuerung
d	m	Dicke (Wanddicke)
b_{Folie}	m	Folienbreite
d_{Folie}	m	Foliendicke
d_A	m	Durchmesser
E_{ver}	J	Verstreckenergie
$E_{längs}$	N/mm ²	E-Modul in Extrusionsrichtung
E_{quer}	N/mm ²	E-Modul senkrecht zur Extrusionsrichtung
F	N	Kraft
i_A	–	Übersetzungsverhältnis
I_d	–	Inhomogenität der Wanddickenverteilung
λ_1, λ_2	–	lineare Verstreckgrade
M_A	Nm	Antriebsmoment des Motors
ω	1/s	Winkelgeschwindigkeit
$\dot{\omega}$	1/s ²	Winkelbeschleunigung
φ	–	Drehwinkel
p_F	Pa	Formdruck
p_{vor}	Pa	Niederhaltervordruck
p_{NDH}	Pa	Niederhalterhauptdruck
r	m	Restschnittdicke
s	m	Position/Weg

s_d	m	Standardabweichung der Wanddickenverteilung
s_{VS}	m	Ziehtiefe des Vorstreckers
t	s	Zeit
t_{FS}	s	Zeitpunkt Start Formen (Ende des Anschneidens)
$t_{F, \text{ein}}$	s	Zeitpunkt Start Formdruckaufbau
$t_{F, \text{aus}}$	s	Zeitpunkt Start Formdruckabbau
t_{Form}	s	Formzeit (Zeit in der das Werkzeug geschlossen)
$t_{VS, \text{ab}}$	s	Zeitpunkt Start Vorstrecker ab
$t_{VS, \text{unten}}$	s	Zeitpunkt Vorstrecker unten
$t_{vor, \text{ein}}$	s	Zeitpunkt Niederhaltervordruck ein
$\Delta t_{vor,}$	s	Dauer Niederhaltervordruck
$t_{NDH, \text{ein}}$	s	Zeitpunkt Niederhalterhauptdruck ein
Δt_{NDH}	s	Dauer Niederhalterhauptdruck
$t_{VS, \text{auf}}$	s	Zeitpunkt Start Vorstrecker auf
v_{VS}	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit des Vorstreckers

Abbildungsverzeichnis

BILD 1: VERARBEITUNGSMENGE NACH BRANCHEN IN DEUTSCHLAND [PLA11]	1
BILD 2: VERARBEITUNGSMENGE NACH KUNSTSTOFFTYP UND BRANCHE [PLA11]	2
BILD 3: RDK 90-MASCHINE (4) MIT ZUSTELLMASCHINEN, WIE FOLIENABWICKELEINRICHTUNG ROK (1), WERKZEUGTEMPERIERUNG (2), FOLIENVORHEIZUNG VHW (3) UND STAPELUNG (5). (QUELLE DER FOTOGRAFIE: ARCHIVBILD VON ILLIG MASCHINENBAU GMBH)	4
BILD 4: EINFLUSS DER KÜHLRATE AUF DIE DURCHSCHNITTLICHE SPHÄROLITHGRÖÙE BEI POLYPROPYLEN. VERGLEICH ZWISCHEN NICHT NUKLEIERTEN POLYPROPYLEN (FINA 5060S) UND NUKLEIERTEN POLYPROPYLEN (BASF 1148L) [MAC98B]	8
BILD 5: EINFLUSS DER STEMPELTEMPERATUR AUF DIE TEMPERATUR DES HALBZEUGS - IM BODENBEREICH UND DER SEITENWAND - AM ENDE DES VORSTRECKVORGANGS (STEMPELMATERIAL: POLYOXYMETHYLEN (LINKS), SYNTAKTISCHER SCHAUM (RECHTS)) [COL02]	9
BILD 6: ÜBERSICHT DER EINFLÜSSE AUF DIE WANDDICKENVERTEILUNG EINES THERMOGEOFORMTEN BECHERS (LINKS: EINFLUSS DER TEMPERATUR; RECHTS: EINFLUSS DES REIBUNGSKOEFFIZIENTEN ZWISCHEN VORSTRECKER UND HALBZEUG) [DUA04]	11
BILD 7: NOTWENDIGE RAHMENBEDINGUNG FÜR EINE KONTINUIERLICHE QUALITÄTSÜBERWACHUNG	15
BILD 8: PRINZIPIELLER AUFBAU EINES NEURONALEN NETZES UND EINES VERARBEITUNGSKNOTENS [WAL99]	18
BILD 9: ABBILDUNGSFEHLER EINES NEURONALEN NETZES IN ABHÄNGIGKEIT DER TRAININGSEPOCHEN FÜR TRAININGS- UND TESTDATEN [WAL99]	18
BILD 10: AUFBAU UND LAGE DER VERSCHIEDENEN HEIZUNGSSYSTEME EINES ROLLENAUTOMATEN	19
BILD 11: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES SCHNITTS DURCH EINE KAVITÄT MIT NIEDERHALTER (1), SCHNITTPLATTE (2), KÜHLSYSTEM (3), VORSTRECKERSTANGE (4), VORSTRECKER (5), FORMEINSATZ (6), AUSWERFER (7) UND SCHNITTSTEMPEL (8)	20
BILD 12: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES FORMPROZESSES, SCHRITT 1 (LINKS) UND 2 (RECHTS)	20
BILD 13: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES FORMPROZESSES, SCHRITT 3 (LINKS) UND 4 (RECHTS)	21
BILD 14: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES FORMPROZESSES, SCHRITT 5 UND SCHRITT 6	21
BILD 15: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG ALLER BETEILIGTEN KOMPONENTEN UND DEREN VERBINDUNGEN IN EINER THERMOFORMANLAGE (STEUERUNG UND VISUALISIERUNG SIND BEISPIELHAFT).	22
BILD 16: THERMOGRAFIE DER TEMPERATUR AM AUSLAUF DER WALZENVORHEIZUNG. DARSTELLUNG DER TEMPERATURVERTEILUNG (ANZAHL PIXEL MIT ENTSPRECHENDER TEMPERATUR).	23
BILD 17: DIFFERENZEN UND MITTLERE TEMPERATUR ÜBER EINE FORMFLÄCHE AM AUSLAUF DER VORHEIZUNG	24
BILD 18: HALBZEUGTEMPERATUR AM AUSLAUF DER VORHEIZUNG UND LEISTUNGSBEDARF IN ABHÄNGIGKEIT DES WÄRMEÜBERGANGSKOEFFIZIENTS (WALZENTEMPERATUR UND LINIENGESCHWINDIGKEIT KONSTANT)	24
BILD 19: NEUE UND ALTE SOLLPOSITIONSVORGABE FÜR DEN HAUPTANTRIEB (WERKZEUGUNTERTEIL) ÜBER EINEN ZYKLUS VON 2,4 S	26
BILD 20: ABHÄNGIGKEIT DES SCHLEPPABSTANDS UND DES RESTHUBS BEI SOLLPOSITION „WERKZEUG GESCHLOSSEN“ VON DEN EINSTELLUNGEN PROPORZIONALVERSTÄRKUNG KP UND VORSTEUERUNG V DES ANTRIEBSREGLERS	27
BILD 21: PRINZIP DER STAUCHPRÜFUNG UND BEULMUSTER AN GESTAUCHTEM FORMTEIL	29
BILD 22: FORMTEILZEICHNUNG MIT BEMAßUNG UND ZIEHUNGSCHÄRFEN	30
BILD 23: ZEITLICHE ABFOLGE DES ZEITPUNKTS "WERKZEUG GESCHLOSSEN" UND START DER VORSTRECKBEWEGUNG.	34
BILD 24: MITTLERE MASSE UND STAUCHDRUCK DER FORMTEILE IN ABHÄNGIGKEIT DES STARTZEITPUNKTES DES VORSTRECKERS	34
BILD 25: MITTLERE WANDDICKEN DER BECHERSEITENWAND EINER KAVITÄTENREIHE EINES 24FACH WERKZEUG (LINKS). AUF DIE MITTLERE WANDDICKE NORMIERTE STANDARDABWEICHUNG DER WANDDICKENVERTEILUNG DER BECHERSEITENWAND (RECHTS).	35
BILD 26: WANDDICKENVERTEILUNG AM UMFANG DER MANTELFLÄCHE EINES BECHERS. SIEGELRANDNAHE WANDDICKE (LINKS), WANDDICKE AUF HALBER BECHERHÖHE (MITTE), BODENNAHE WANDDICKE (RECHTS)	35
BILD 27: VORSTRECKERPOSITION UND DRUCKVERLÄUFE DES FORMDRUCKS MIT UNTERSCHIEDLICHEN DRUCKAUFBAUZEITPUNKTEN IN BEZUG AUF DAS ENDE DER VORSTRECKBEWEGUNG	36

BILD 28: WANDDICKENVERLAUF DER FORMTEILSEITENWAND BEI VARIATION DES ZEITPUNKTS DES FORMDRUCKAUFBAUS (LINKS) UND EINFLUSS DES FREI VERSTRECKTEN BEREICHS IN ABHÄNGIGKEIT DER VORSTRECKERPOSITION ZUM ZEITPUNKT DES FORMDRUCKAUFBAUS	36
BILD 29: WANDDICKENMITTELWERTE AN ZWEI POSITIONEN DES BECHERS BEI VARIATION DES EINSATZZEITPUNKTS DER FORMLUFT BEZOGEN AUF DAS ENDE DES MECHANISCHEN VERSTRECKENS.	37
BILD 30: WANDDICKE AM BODEN (92 MM) UND WANDDICKE AUF HALBER FORMTEILHÖHE (52 MM) IN ABHÄNGIGKEIT DER UMFORMTEMPERATUR (IR-MESSUNG)	38
BILD 31: EFFEKTE AUF DIE BODENNAHE WANDDICKE (PHD: DRUCK DES NIEDERHALTERS; THD = DAUER, DIE NIEDERHALTERDRUCK ANLIEGT; DTVS: ZEITVERSATZ DES STARTS DER VORSTRECKERBEWEGUNG IN BEZUG AUF DEN DRUCKAUFBAU DES NIEDERHALTERS; VVS: VORSTRECKERGESCHWINDIGKEIT)	39
BILD 32: EFFEKTE AUF DIE MITTIGE WANDDICKE (PHD: DRUCK DES NIEDERHALTERS; THD = DAUER, DIE NIEDERHALTERDRUCK ANLIEGT; DTVS: ZEITVERSATZ DES STARTS DER VORSTRECKERBEWEGUNG IN BEZUG AUF DEN DRUCKAUFBAU DES NIEDERHALTERS; VVS: VORSTRECKERGESCHWINDIGKEIT)	39
BILD 33: EFFEKTE AUF DIE SIEGELRANDDICKE (PHD: DRUCK DES NIEDERHALTERS; THD = DAUER, DIE NIEDERHALTERDRUCK ANLIEGT; DTVS: ZEITVERSATZ DES STARTS DER VORSTRECKERBEWEGUNG IN BEZUG AUF DEN DRUCKAUFBAU DES NIEDERHALTERS; VVS: VORSTRECKERGESCHWINDIGKEIT)	40
BILD 34: EFFEKTE VON NIEDERHALTER UND VORSTRECKER AUF STAUCHDRUCK	41
BILD 35: KRAFT-WEG-VERLÄUFE DER STAUCHDRUCKMESSUNG FÜR DREI FORMTEILE AUS VERSCHIEDENEN ZYKLEN.	42
BILD 36 PRINZIPSKIZZE DES SIMULATIONS-AUFBAUS, MIT ZWEI DRUCKPLATTEN UND ZU PRÜFENDEM FORMTEIL	42
BILD 37: MITTLERE WANDDICKEN ENTLANG DER LAUFKOORDINATE DER UNTERSUCHTEN FORMTEILE	43
BILD 38: WANDDICKE UM DEN UMFANG AN POSITION 96 MM (LINKS) UND POSITION 52 MM (RECHTS)	43
BILD 39: SIMULIRTER UND GEMESSENER KRAFTVERLAUF DER STAUCHPRÜFUNG DES ANISOTROPEN ANSATZES	45
BILD 40: ABHÄNGIGKEIT DES STAUCHDRUCKS UND STAUCHWEG VOM BODENRADIUS	46
BILD 41: VARIATION DER VORSTRECKERGEOMETRIE	47
BILD 42: WANDDICKENVERTEILUNG VON POLYPROPYLENROHLINGE UND EINEM ZUGEHÖRIGEN FORMTEIL ENTLANG DER HÖHENKOORDINATE	48
BILD 43: WANDDICKENVERTEILUNG VON FORMTEILEN DURCH VORSTRECKEN MIT UNTERSCHIEDLICHEN VORSTRECKERGEOMETRIEN	49
BILD 44: VERLAUF DER GEMESSENEN EINLAUF- UND AUSLAUFTEMPERATUR, BEZOGEN AUF DAS IM JEWEILIGEN ZYKLUS PRODUZIERTE FORMTEIL.	50
BILD 45: KORRELATION ZWISCHEN EINLAUF- UND AUSLAUFTEMPERATUR BEI KONSTANTER INFRAROTHEIZUNGSTEMPERATUR UND VARIIERENDER EINLAUFTEMPERATUR BEI UNTERSCHIEDLICHEN ZYKLUSZEITEN	50
BILD 46: ABHÄNGIGKEIT DES STAUCHDRUCKS VON DER EINLAUFTEMPERATUR (DIE SCHÄTZUNG BERUHT AUF EINER MULTIPLER REGRESSIONSANALYSE AUS EIN- UND AUSLAUFTEMPERATUR)	51
BILD 47: ABHÄNGIGKEIT DER FORMTEILHÖHE VON DER AUSLAUFTEMPERATUR (DIE SCHÄTZUNG BERUHT AUF EINER MULTIPLER REGRESSIONSANALYSE AUS EIN- UND AUSLAUFTEMPERATUR)	51
BILD 48: MOMENTEN- UND DREHZAHNVERLAUF DES VORSTRECKERANTRIEBS IN EINEM ZYKLUS (NEGATIVE WERTE = WIRKRICHTUNG NACH UNTEN).	56
BILD 49: VERGLEICH VON BERECHNETEM UND GEMESSENEM VORSTRECKERMOMENT IN VERSUCHSPUNKT 1; WERKZEUG-SERIALNR.: 40250; VORSTRECKERGESCHWINDIGKEIT: 1,15 M/S; VERFAHRWEG: 96 MM.	58
BILD 50: ABHÄNGIGKEIT DES ENERGIEUMSATZES UND DER ENERGIEDIFFERENZ ZWISCHEN BERECHNUNG UND MESSUNG VON DER VORSTRECKERGESCHWINDIGKEIT UND ZIEHTIEFE	58
BILD 51: VERGLEICH VON BERECHNETER UND GEMESSENER VERSTRECKKRAFT IN VERSUCHSPUNKT 1 FÜR DIE VORSTRECKERRÜCKFAHRT; WERKZEUG-SERIALNR.: 40250	59
BILD 52: TEMPERATURABHÄNGIGKEIT DER VERSTRECKKRÄFTE IM VERARBEITUNGSFENSTER VON POLYPROPYLEN OHNE BESCHLEUNIGUNGS- UND REIBUNGSEINFLÜSSE (MATERIAL: ISOTAKTISCHES POLYPROPYLEN)	60
BILD 53: TEMPERATURABHÄNGIGKEIT DES MOMENTENBEDARFS OHNE BESCHLEUNIGUNGSEINFLÜSSE DES VORSTRECKERMOTORS IM VERARBEITUNGSFENSTER VON POLYPROPYLEN	61
BILD 54: VERSTRECKKRAFT OHNE BESCHLEUNIGUNGSEINFLÜSSE IN ABHÄNGIGKEIT DER MAXIMALEN VORSTRECKERGESCHWINDIGKEIT (PP, 1,2 MM)	61
BILD 55: KRAFTVERLAUF IN DER VORSTRECKERSTANGE ÜBER EINEN KOMPLETTEN FORMVORGANG BEI DER VERSTRECKUNG VON POLYPROPYLEN	62

BILD 56: ZEITABHÄNGIGER KRAFTABBAU IN DER VORSTRECKERSTANGE BEI VERSCHIEDENEN UMFORMTEMPERATUREN AUFGRUND RELAXATIONEFFEKTEN ZWISCHEN MECHANISCHER VERSTRECKUNG UND PNEUMATISCHEM AUSFORMEN (MATERIAL: ISOTAKTISCHES POLYPROPYLEN)	63
BILD 57: VERSTRECKKRÄFTE BEIM VORSTRECKEN VON POLYETHYLENTEREPHTHALAT BEI UNTERSCHIEDLICHEN TEMPERATUREN MIT UND OHNE BESCHLEUNIGUNGS- UND REIBUNGSEINFLÜSSE	63
BILD 58: ZEITABHÄNGIGER KRAFTABBAU IN DER VORSTRECKERSTANGE BEI VERSCHIEDENEN UMFORMTEMPERATUREN AUFGRUND RELAXATIONEFFEKTEN ZWISCHEN MECHANISCHER VERSTRECKUNG UND PNEUMATISCHEM AUSFORMEN (MATERIAL: AMORPHES POLYETHYLENTEREPHTHALAT)	64
BILD 59: MESSAUFBAU SCHLIEßKRAFTMESSUNG	65
BILD 60: SCHLIEßKRAFTVERLAUF ÜBER EINEN ZYKLUS	66
BILD 61: SCHNITTKRAFTVERLAUF IN EINEM ZYKLUS	66
BILD 62: EINFLUSSPARAMETER AUF DIE SCHNITTKRÄFTE BEIM THERMOFORMEN	67
BILD 63: EINFLUSS DER HALBZEUGTEMPERATUR AUF DIE ANSCHNITT- UND DURCHSCHNITTKRAFT. ANSCHNITT T = 0,4 S, DURCHSCHNITT T = 2,2 S (MATERIAL: POLYPROPYLEN D = 1,4 MM, RESTSCHNITTDICKE R = 0 MM)	68
BILD 64: EINFLUSS DER RESTSCHNITTDICKE AUF DIE ANSCHNITT- UND DURCHSCHNITTKRAFT (MATERIAL: POLYPROPYLEN D = 1,4 MM)	68
BILD 65: TEMPERATURABHÄNGIGKEIT DER SCHNITTKRAFT (ANSCHNITT) VON POLYPROPYLEN (RESTSCHNITTDICKE R = 0 MM)	69
BILD 66: TEMPERATURABHÄNGIGKEIT DER SCHNITTKRÄFTE (ANSCHNITT UND DURCHSCHNITT) VON PET (RESTSCHNITTDICKE R = 0 MM)	70
BILD 67: SCHNITTKRÄFTE IN ABHÄNGIGKEIT DER RESTSCHNITTDICKE BEI APET UND PP	71
BILD 68: TEMPERATUREN DER TRANSPARENTEN POLYPROPYLENTYPEN ZWISCHEN VORHEIZUNG UND FORMMASCHINE WÄHREND DER VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	73
BILD 69: HEIZUNGSTEMPERATUR DER INFRAROTHEIZUNG DER FORMMASCHINEN WÄHREND DER VERSUCHSDURCHFÜHRUNG MIT DEN TRANSPARENTEN POLYPROPYLENTYPEN	73
BILD 70: HEIZUNGSTEMPERATUR DER INFRAROTHEIZUNG DER FORMMASCHINEN WÄHREND DER VERSUCHSDURCHFÜHRUNG MIT DEN TRANSPARENTEN POLYPROPYLENTYPEN	74
BILD 71: TEMPERATUREN DER HALBZEUGE NACH DER INFRAROTHEIZUNG UND VERLAUF DER VERSTRECKENERGIE	74
BILD 72: ERMITTELTE VERSTRECKENERGIE BEI VERSCHIEDENEN HALBZEUGTEMPERATUREN (TEMPERATURMESSWERTE GEGLÄTTET DURCH TIEFPASSFILTER)	75
BILD 73: STANDARDABWEICHUNG DER WANDDICKENVERTEILUNG (LINKS) UND INHOMOGENITÄT DER WANDDICKENVERTEILUNG ÜBER DIE ZIEHTIEFE. VERGLEICH ZWISCHEN NIEDRIG- (PPH 4022) UND HOCHNUKLEIERTEM (PPH 4026) HALBZEUG	78
BILD 74: INHOMOGENITÄT DER WANDDICKENVERTEILUNG UM DEN UMFANG. VERGLEICH ZWISCHEN NIEDRIG- (PPH 4022) UND HOCHNUKLEIERTEM (PPH 4026) HALBZEUG	78
BILD 75: EINFLUSS DES UMFORMVERHALTENS, ABGEBILDET DURCH DIE VERSTRECKENERGIE, AUF DIE STANDARDABWEICHUNG DER WANDDICKENVERTEILUNG (LINKS) UND DIE WANDDICKENINHOMOGENITÄT ÜBER DIE ZIEHTIEFE (RECHTS). VERGLEICH ZWISCHEN NIEDRIG- (PPH 4022) UND HOCHNUKLEIERTEM (PPH 4026) HALBZEUG	79
BILD 76: STANDARDABWEICHUNG (LINKS) UND INHOMOGENITÄT (RECHTS) DER WANDDICKENVERTEILUNG VON TRANSPARENTEM UND EINGEFÄRBTEN PP. VERGLEICH ZWISCHEN TRANSPARENTEM PP (PPH 4022), WEIß EIGEFÄRBTEN (PPH 4022 + TiO ₂) UND WEIß EINGEFÄRBTEN PP/PP+PE-BLEND (PPC 4022/4660)	79
BILD 77: EINFLUSS DES UMFORMVERHALTENS, ABGEBILDET DURCH DIE VERSTRECKENERGIE, AUF DIE STANDARDABWEICHUNG DER WANDDICKENVERTEILUNG (LINKS) UND DIE WANDDICKENWERTE AN ZWEI HÖHENKOORDINATEN DES FORMTEILS ÜBER DIE ZIEHTIEFE (RECHTS)	80
BILD 78: ERMITTELTEN STAUCHDRUCK IN ABHÄNGIGKEIT DER VERSTRECKENERGIE UND DER HALBZEUGTEMPERATUR VOR DEM UMFORMEN (TRANSPARENTEN PP-TYPEN).	81
BILD 79: ERMITTELTEN STAUCHDRUCK IN ABHÄNGIGKEIT DER VERSTRECKENERGIE UND DER HALBZEUGTEMPERATUR VOR DEM UMFORMEN (TRANSPARENTEN PP-TYPEN).	81
BILD 80: STAUCHDRUCK IN ABHÄNGIGKEIT DER VERSTRECKENERGIE DES VORSTRECKERS UND SCHNITTKRAFT DES WERKZEUGS (POLYPROPYLENHOMOPOLYMER; 1,6 MM)	82
BILD 81: ERMITTELTE FORMTEILHÖHE IN ABHÄNGIGKEIT DER VERSTRECKENERGIE UND DER HALBZEUGTEMPERATUR VOR DEM UMFORMEN.	82

BILD 82: ERMITTELTE FORMTEILHÖHE IN ABHÄNGIGKEIT DER VERSTRECKENERGIE UND DER HALBZEUGTEMPERATUR VOR DEM UMFORMEN.	83
BILD 83: ERMITTELTE FORMTEILMASSE WÄHREND DER VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND STANDARDABWEICHUNGEN DER MASSE ÜBER DIE ZYKLEN	84
BILD 84: ERMITTELTE FORMTEILMASSE IN ABHÄNGIGKEIT DER VERSTRECKENERGIE UND DER HALBZEUGTEMPERATUR VOR DEM UMFORMEN.	84
BILD 85: FORMZEIT IN ABHÄNGIGKEIT DER FOLIENDICKE. FORMTEILE MIT BÖRDELRAND (LINKS) UND FORMTEILE MIT SIEGELRAND (RECHTS)	86
BILD 86: NIEDERHALTERDRUCK UND EINSATZZEITPUNKT BEZOGEN AUF DEN ZEITPUNKT WERKZEUG GESCHLOSSEN	87
BILD 87: FORMDRUCK UND VORSTRECKERSTARTZEITPUNKT BEZOGEN AUF DEN ZEITPUNKT WERKZEUG GESCHLOSSEN.	87
BILD 88: ERMITTELTE SCHALTZEITEN EINES PNEUMATISCHEN VENTILS IN ABHÄNGIGKEIT DER DEFINIERTEN SCHALTHYSTERESE	88
BILD 89: NIEDERHALTERDRUCK UND -POSITION MIT UND OHNE SCHALTZEITENKOMPENSATION (MIT VORDRUCK)	89
BILD 90: FORMDRUCK MIT UND OHNE SCHALTZEITENKOMPENSATION, SCHALTZEITPUNKT 0 MS NACH VORSTRECKER UNTEN	89
BILD 91: BLOCKSCHALTBILD DES REGELKREISES ZUR ENERGIEREGELUNG	90
BILD 92: EIN- UND AUSLAUFTEMPERATUR AN DER INFRAROTHEIZUNG OHNE (LINKS) UND MIT (RECHTS) REGELUNG DER VERSTRECKENERGIE	91
BILD 93: STAUCHDRUCKVERLAUF WÄHREND DER STARTTAKTE OHNE REGELUNG (LINKS) UND MIT REGELUNG DER VERSTRECKENERGIE (RECHTS)	91
BILD 94: VERLAUF DER BECHERHÖHE WÄHREND DER STARTTAKTE OHNE REGELUNG (LINKS) UND MIT REGELUNG DER VERSTRECKENERGIE (RECHTS)	92
BILD 95: TEMPERATUR AM MASCHINENEINLAUF UND VOR DEM FORMWERKZEUG; FOLIENEINLAUFTEMPERATUR NACH PRODUKTIONSPAUSE UM 4 K ABGEFALLEN	94
BILD 96: HEIZUNGSTEMPERATUR UND VERSTRECKENERGIE; FOLIENEINLAUFTEMPERATUR NACH PRODUKTIONSPAUSE UM 4 K ABGEFALLEN	94
BILD 97: TEMPERATUR AM MASCHINENEINLAUF UND VOR DEM FORMWERKZEUG; FARBWECHSEL DER UNTEREN DECKSCHICHT VON WEIß AUF SCHWARZ NACH DER PRODUKTIONSPAUSE	95
BILD 98: KORRELATION ZWISCHEN UMFORMTEMPERATUR UND VERSTRECKENERGIE FÜR VERSCHIEDENE MESSREIHEN (RECHTS: GLEITENDER MITTELWERT ÜBER 2 MIN. LINKS: MITTELWERT DER DATEN FÜR DIE ZEITRÄUME, IN DENEN PRODUKTE ENTNOMMEN WURDEN).	96
BILD 99: PARTIELLE REGRESSIONSDIAGRAMME, ABHÄNGIGE VARIABLE: STAUCHDRUCK, UNABHÄNGIGE VARIABLEN: EINLAUF- UND AUSLAUFTEMPERATUR	96
BILD 100: VERHALTEN DER VORSTEUERUNG BEI ZU GROßER VERSTÄRKUNG (LINKS) UND STABILER EINSTELLUNG (RECHTS).	97
BILD 101: VERSTRECKENERGIE DES VORSTRECKERS UND HEIZUNGSTEMPERATUREN MIT UND OHNE AKTIVIERTER VERSTRECKENERGIEREGELUNG	98
BILD 102: MITTELWERT DES STAUCHDRUCKS UND DER FORMTEILHÖHE UND ERMITTELTE STANDARDABWEICHUNG.	98
BILD 103: AUFBAU DER VERWENDETEN VORHEIZUNG, MIT UMLENKROLLEN (1), ELEKTRISCH BEHEIZTEN HEIZWALZEN (2), FOLIENBAHN (3), ANTRIEBSWALZE (4), KONVEKTIONSHEIZUNG (5), BREMSEINRICHTUNG (6), SENSORIK ZUR REGELUNG DES DURCHSATZES (7) UND EINEM ISOLIERTEN GEHÄUSE (8)	110
BILD 104: MATERIALKENNWERTE VON POLYPROPYLEN UND RESULTIERENDES AUFHEIZVERHALTEN IN EINER VORHEIZUNG	112
BILD 105: VERGLEICH ZWISCHEN SIMULIRTER UND GEMESSENER TEMPERATUR AM MASCHINENEINLAUF DER FORMMASCHINE NACH BEHEIZEN DURCH DIE VORHEIZUNG.	112
BILD 106: LEISTUNGSBEDARF DER VORHEIZWALZEN 1 UND 2; NENNTemperatur DER WALZEN $T = 140 \text{ }^\circ\text{C}$; HALBZEUGBREITE $B = 700 \text{ mm}$; HALBZEUG: POLYPROPYLEN	113
BILD 107: ERREICHBARE TEMPERATUR AM AUSLAUF DER VORHEIZUNG BEI VORGEGEBENEM HALBZEUG UND GEGEBENER LINIENGESCHWINDIGKEIT (POLYPROPYLEN $B = 730 \text{ mm}$)	113
BILD 108: SOLLWERTVORGABE DES HAUPTANTRIEBS IN DEN VERSCHIEDENEN PROZESSABSCHNITTEN	114
BILD 109: NEUE UND ALTE SOLLPOSITIONSVORGABE FÜR DEN HAUPTANTRIEB (EL. KURVENSCHIBE)	115
BILD 110: NEUE UND ALTE SOLLPOSITIONSVORGABE FÜR DEN HAUPTANTRIEB (EL. KURVENSCHIBE)	115
BILD 111: SCHLEPPABSTAND DES HAUPTANTRIEBS ÜBER EINEN ZYKLUS	116

BILD 112: ABHÄNGIGKEIT DES SCHLEPPABSTANDS UND DES RESTHUBS BEI SOLLPOSITION WERKZEUG GESCHLOSSEN	116
BILD 113: DRUCKVERLÄUFE VON FORM- UND NIEDERHALTERDRUCK ÜBER EINEN ZYKLUS. ZWEISTUFIGER NIEDERHALTER (LI.) UND EINSTUFIGER NIEDERHALTER (RE.). FORMLUFTVENTILE AM WERKZEUG (LINKS) UND MASCHINENSEITIGE FORMLUFTVENTILE (RECHTS)	117
BILD 114: STREUUNGEN DER SCHALTZEITEN EINES FORMLUFTVENTILS IN EINER FORMMASCHINE	118

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: BEISPIELHAFTE QUALITÄTSANFORDERUNGEN.....	10
TABELLE 2: ÜBERARBEITETE MASCHINENEINSTELLPARAMETER DES FORMPROZESSES	31
TABELLE 3: VERSUCHSPUNKTE ZUR UNTERSUCHUNG DER INTERAKTION VON KLEMMEN UND VORSTRECKEN	32
TABELLE 4: VERSUCHSPUNKTE ZUR UNTERSUCHUNG DER INTERAKTION VORFORMEN UND AUSFORMEN	32
TABELLE 5: RADII AN STAPELKANTE (STAPELRADIUS)	44
TABELLE 6: GEMESSENE E-MODULN UND ZUGFESTIGKEIT DES THERMOGEOFORMTEN FORMTEILS.....	45
TABELLE 7: VERWENDETE VORSTRECKERGEOMETRIEN UND VERSUCHSPARAMETER.....	47
TABELLE 8: ÜBERSICHT DER EINFLUSSPARAMETER AUF AUSGEWÄHLTE FORMTEILMERKMALE BEIM THERMOFORMEN VON VERPACKUNGEN IN KOMBINIERT FORMENDEN UND STANZENDEN THERMOFORMMASCHINEN.....	53
TABELLE 9: AUS PROZESSGRÖßEN ERMITTELTE KENNZAHLEN.....	54
TABELLE 10: VERWENDETER POLYPROPYLENTYP	56
TABELLE 11: MODELLPARAMETER FÜR TRÄGHEITS- UND REIBMOMENTE VERSCHIEDENER WERKZEUGE	57
TABELLE 12: MODELLPARAMETER FÜR TRÄGHEITS- UND REIBKRÄFTE. ALLE WERTE BEZIEHEN SICH AUF DIE GESAMTE FORMFLÄCHE.	59
TABELLE 13: VERSUCHSPUNKTE MIT VARIATION DER NIEDERHALTERDRÜCKE UND EINSCHALTZEITPUNKTE	67
TABELLE 14: INFORMATIONSGEHALT VON VERSCHIEDENEN PROZESSGRÖßEN	72
TABELLE 15: VERWENDETE HALBZEUGE	72
TABELLE 16: WANDDICKENVERTEILUNG ÜBER DIE BECHERMANTELFLÄCHE.....	76
TABELLE 17: VERGLEICH DER SIMULIERTEN UND GEMESSENEN LEISTUNGSDATEN EINER VORHEIZUNG.....	112
TABELLE 18: ERMITTELTE VENTILSCHALTZEITEN	118
TABELLE 19: DRUCKAUFBAUZEITEN ABHÄNGIG VON DER FORMLUFTVERSORGUNGSTECHNIK	118
TABELLE 20: VERSUCHSPLAN ZUR BESTIMMUNG VON BESCHLEUNIGUNGS- UND REIBUNGSEINFLÜSSEN	119
TABELLE 21: LINEARE REGRESSIONSKOEFFIZIENTEN ZWISCHEN TEMPERATUREN UND FORMTEILEIGENSCHAFTEN	119
TABELLE 22: DATEN DER VERWENDETEN POLYPROPYLENE	120

1 Einleitung und Zielsetzung

Das Thermoformen von Thermoplasten wird zur Herstellung von Verpackungsmitteln und technischen Bauteilen eingesetzt. Bei der Herstellung von Verpackungsmitteln, wie Becher, Schalen und Blister, zählt es zu den wichtigsten Kunststoff verarbeitenden Verfahren. Der Verpackungsmittelsektor ist, neben dem Bausektor, der größte Verbraucher von Kunststoffen. In Deutschland entfallen 39 % der 46 Mt in Europa in 2010 verarbeiteten Polymere auf den Verpackungsmittelsektor (Bild 1). Dies entspricht einer Produktion von 18 Mt Verpackungen im Jahr 2010.

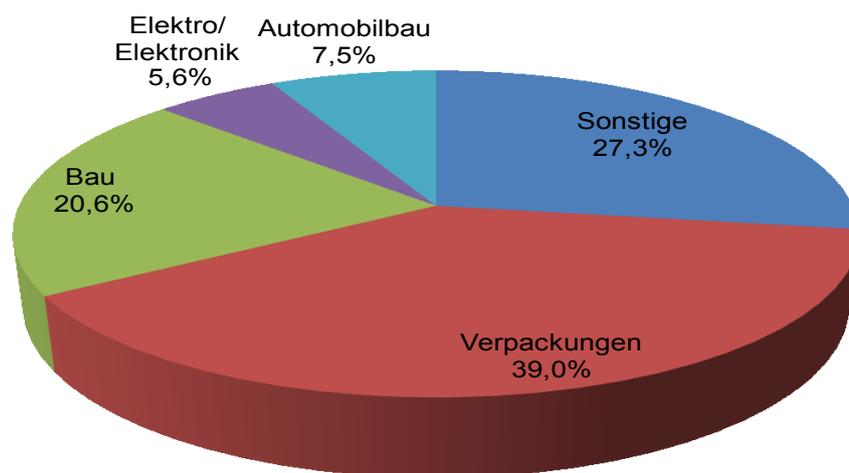


Bild 1: Verarbeitungsmenge nach Branchen in Deutschland [Pla11]

Im Verpackungsmittelbereich dominieren die Polymersorten Polyolefine (Polyethylen, Polypropylen) und Polyester (Polycarbonat, Polyethylenterephthalat). Polyethylenterephthalat (PET) findet überwiegend in der Getränkeflaschenherstellung Verwendung. Polyethylen (PE) wird überwiegend zu Verpackungsfolien verarbeitet, wird aber auch vereinzelt bei der Herstellung von Verpackungsbechern eingesetzt (Bild 2). Wichtigstes Polymer im Thermoformbereich zur Herstellung von Bechern und Schalen ist heute aufgrund des Preises und seinen Gebrauchseigenschaften Polypropylen (PP). Bis in die 1990er Jahre war Polystyrol (PS) der wichtigste Thermoformwerkstoff. Dieser wurde aufgrund seiner guten Verarbeitbarkeit eingesetzt, ist aber im Gegensatz zu Polypropylen teurer, weniger temperaturbeständig und besitzt eine geringere Barriere gegen Wasserdampf als Polypropylen.

Durch die Entwicklung von Anlagen, auf denen es möglich war, Polypropylen zu verarbeiten, löste Polypropylen das Polystyrol als wichtigsten Werkstoff ab. Polypropylen ist im Gegensatz zu Polystyrol ein teilkristallines Polymer. Daher ergibt sich ein sehr viel schmaleres Verarbeitungsfenster insbesondere hinsichtlich der Prozesstemperaturen und eine größere Empfindlichkeit gegenüber Prozessschwankungen. Diesen Anforderungen kamen die Maschinenhersteller durch die Einführung servoelektrischer Antriebstechnik nach, die eine höhere Reproduzierbarkeit gegenüber pneumatischen oder konventionellen Drehstromantrieben besitzt. Aktuelle Thermoformanlagen sind somit in der Lage definierte vorgegebene Prozessschritte zyklusweise reproduzierbar zu wiederholen.

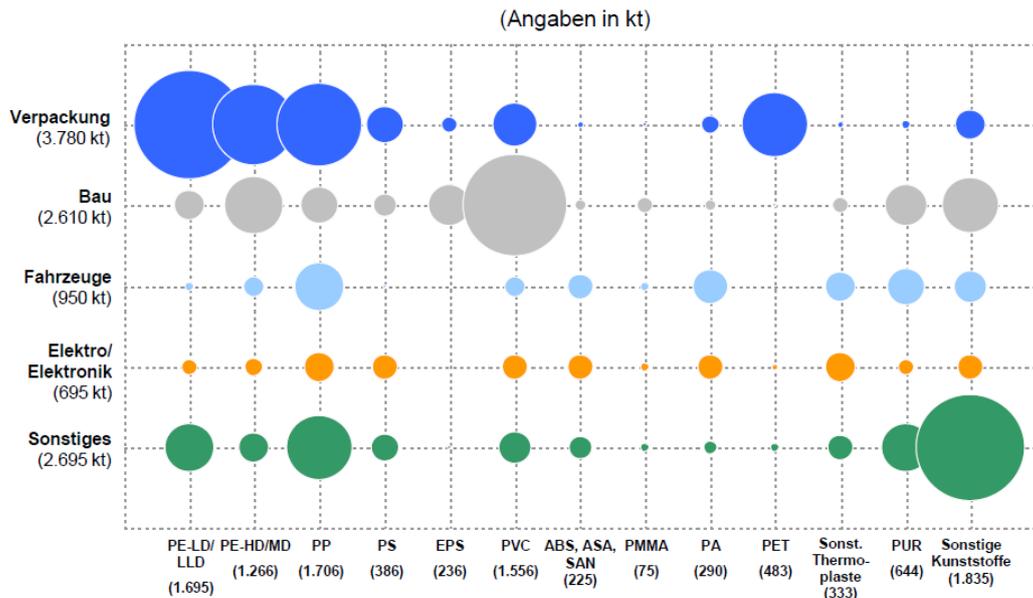


Bild 2: Verarbeitungsmenge nach Kunststofftyp und Branche [Pla11]

Da ungefähr 90 % der Herstellkosten von Thermoformteilen auf Rohstoffkosten beruhen, ist neben der Reproduzierbarkeit der Maschine die Reproduzierbarkeit der Formteilqualität ein entscheidendes Kaufkriterium für oder gegen eine Maschinen-Werkzeugkombination. Die Qualitätsstreuungen sollen minimal gehalten werden, um mit minimalem Materialeinsatz die gewünschten Eigenschaften zu erreichen.

Da der Thermoformprozess durch die Produktionsumgebung sowie das Halbzeug beeinflusst wird, reicht es nicht aus, den Prozessablauf konstant zu halten. Es müssen Änderungen des Materials beziehungsweise der Umgebungsbedingungen erkannt werden. Auf diese Änderungen muss der Prozess reagieren und gegensteuern können. Erst wenn dieses Ziel erreicht ist, kann mit einem minimalen Materialaufwand jederzeit die beste Formteilqualität sichergestellt werden.

1.1 Zielsetzung

Durch die Marktforderungen nach effizienteren Maschinen [Sto11] wurden die Maschinen- und Anlagenbauer dazu angehalten, Maschinen- und Werkzeugtechnik weiterzuentwickeln. Zentrale Forderung ist, bei vergrößerten nutzbaren Formflächen, den Rohstoffverbrauch pro Formteil bei gleichen Eigenschaften zu minimieren.

Die Maschinen wurden mit servomotorischen Antrieben und leistungsfähigeren Maschinensteuerungen ausgestattet. Diese Steuerungsstrukturen erlauben eine Wiederholgenauigkeit des Zyklusablaufs der mechanischen Antriebe im Millisekundenbereich. Parallel wurde die Werkzeugtechnik weiterentwickelt, sodass Qualitätsunterschiede über die Formfläche minimiert werden konnten. Die Beheizung der Halbzeuge erfolgt durch Infrartheizungssysteme, denen Kontaktheizungen (Walzenvorheizungen) oder Konvektionsheizungen vorgeschaltet sind.

Trotz der hochpräzisen Maschinen ist eine konstante Qualität der Formteile nicht garantiert. Störgrößen können auf den Prozess beziehungsweise dessen Eingangsparameter wirken und den Prozess beeinflussen. Diese Störgrößen bestehen aus Umgebungsbedingungen, aus Mate-

rialeigenschaftsänderungen und aus Verschleiß der verwendeten Bauteile in einer Thermoformanlage. Umgebungsbedingungen, die die Formteilqualität beeinflussen, sind die Temperaturen in der Produktionsumgebung. Diese können die thermische Prozessführung beeinflussen und wirken sich dadurch direkt auf das Umformergebnis aus. Chargenschwankungen der verwendeten Rohstoffe und Halbzeuge äußern sich in Materialeigenschaftsänderungen, die zu geänderten kalorischen oder mechanischen Eigenschaften im Halbzeug führen können. Zuletzt unterliegen alle nicht servoelektrischen Aktoren einer Thermoformanlage höheren Ungenauigkeiten. Als Beispiel können die Keramikstrahler der Infrarotheizungen oder pneumatische Aktoren genannt werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, den Prozessablauf einer Folien verarbeitenden Thermoformanlage zu analysieren und Möglichkeiten aufzuzeigen, wie eine sich ändernde Formteilqualität durch eine Prozessbeobachtung ohne 100 %-Prüfung der Formteile identifiziert werden kann.

Störgrößen sollen durch geeignete Sensorik durch die Anlage selbst identifiziert werden können. Dadurch soll es möglich sein, zum einen die Qualität der Formteile zu optimieren, zum anderen Rückschlüsse auf den Anlagenzustand zu ziehen. Diese Rückschlüsse erleichtern die Bedienung der Maschine und erlauben eine vorbeugende Instandhaltung der Anlage. Zudem sollen Möglichkeiten aufgezeigt werden, wie auf erkannte Störeinflüsse reagiert werden kann. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde der Thermoformprozess in die Teilprozesse Vorheizen, Heizen und Formen unterteilt. Diese Teilsysteme wurden zunächst analysiert und optimiert, um möglichst geringe Störungen oder unerwünschte Abhängigkeiten zu erhalten.

Es sind bereits Lösungen zur Identifizierung und Vermeidung von Umgebungseinflüssen, die sich in Temperatur oder Feuchtigkeit der Umgebungsluft oder des Halbzeugs äußern, bekannt. Ein wesentlicher Teil der Arbeit ist deshalb die Identifizierung von Störungen, die durch das Material in den Prozess eingebracht werden. Insbesondere soll der Werkstoff Polypropylen im Solid-Phase-Thermoformen untersucht werden. Bei diesem Verfahren zur Polypropylenverarbeitung wird das vorliegende Halbzeug unterhalb der Kristallitschmelztemperatur umgeformt.

1.2 Der Thermoformprozess

Unter Thermoformen versteht man ein Verfahren zur Gestaltänderung eines thermoplastischen Halbzeuges zu einem Formteil. In der VDI-Richtlinie 2008 ist es als Streckziehen eines erwärmten fest eingespannten Zuschnitts unter Ausdünnung der Ausgangswanddicke definiert. Es ist damit ein Umformen eines thermoplastischen Halbzeuges bei erhöhter Temperatur zu Formteilen. Diese Halbzeuge können je nach Thermoformanlage und Formteil als Folienware oder als Plattenzuschnitt vorliegen. Je nach Halbzeugtyp unterscheidet man die Thermoformanlagen in Rollenautomaten und Plattenautomaten.

Unabhängig von der Anlagen- oder Maschinenausführung untergliedert sich der Thermoformprozess in folgende Prozessschritte:

- Bereitstellung des Halbzeugs: Dies kann als Folienwickel vorliegen (Bild 3, 1), durch einen direkt vorgeschalteten Extruder bereitgestellt werden oder als Plattenware bereitstehen.

- Erwärmen des Halbzeugs: Dies erfolgt durch Infrarotheizungen und je nach Anforderungen durch eine vorgeschaltete Vorheizung (Bild 3, 3), die als Konvektions- oder Kontaktheizung arbeiten können. In einigen Anwendungsfällen, wie Füll- und Verschließanlagen, Blisterpackanlagen oder Skinpackanlagen, werden Kontaktheizungen eingesetzt, um das Halbzeug auf Umformtemperatur zu erwärmen. Hierbei ist eine Antihafbeschichtung der Folie notwendig, um ein Kleben der Folie bei hohen Temperaturen zu vermeiden.
- Umformen des Halbzeugs: Dies erfolgt durch mechanische und pneumatische Kräfte oder ausschließlich durch pneumatische Kräfte. Eine rein mechanische Umformung findet sich in der Thermoformung nicht.
- Nachbearbeitung: Diese ist je nach Formteil unterschiedlich.



Bild 3: RDK 90-Maschine (4) mit Zustellmaschinen, wie Folienabwickleinrichtung ROK (1), Werkzeugtemperierung (2), Folienvorheizung VHW (3) und Stapelung (5). (Quelle der Fotografie: Archivbild von ILLIG Maschinenbau GmbH)

1.3 Die Technikumsanlage

Die Versuche in dieser Arbeit wurden auf einer kombiniert formend und stanzend arbeitenden Maschine RDM 70K der Firma ILLIG Maschinenbau GmbH durchgeführt. Die Linienzusammenstellung war folgende:

- Rollenabwicklung ROK 90
- Walzenvorheizung VHW 90/2b
- Thermoformautomat für kombiniertes Formen und Stanzen Typ RDM 70K 3. Gen
- Raststapelung SZS 70

Als Werkzeug wurde überwiegend ein ILLIG-Form- und Stanzwerkzeug mit 24 Kavitäten, Formluftreduzierung, direkt gekühltem Niederhalter und mit seitlichen Formluftventilen eingesetzt. Das Formteil ist hier ein Joghurtbecher mit einem Füllvolumen von 200 ml. Im Weiteren wird kurz auf die technischen Spezifikationen der einzelnen Systeme eingegangen.

Die verwendete Kombination aus Folienrollenabwicklung und Walzenvorheizung unterstützt einen kontinuierlichen Abzug des Halbzeugs, dadurch ist eine homogenere Erwärmung in der Walzenvorheizung sichergestellt. Die Abzugsgeschwindigkeit reicht von 1 m/s bis 40 m/s. Die Walzenvorheizung besitzt zwei Heizwalzen mit einer maximalen Heizleistung von 32,4 kW. Die maximale Folienbreite beträgt 900 mm. Zur Verringerung der Aufheizzeit ist zusätzlich eine unterstützende Raumheizung mit 1,5 kW verbaut.

Die Thermoformanlage verfügt über eine Infrarotheizung aus Keramikstrahlern mit 86,4 kW Anschlussleistung. Diese ist symmetrisch auf Ober- und Unterheizung aufgeteilt. Ober- und Unterheizung bestehen aus je zwölf Strahlerreihen quer zur Durchlaufrichtung des Halbzeugs. Jede Strahlerreihe besteht aus neun Einzelstrahlern und kann separat auf eine eingestellte Temperatur geregelt werden. Dadurch ergeben sich für die Heizung 24 einstellbare Temperaturen. Die maximale Formfläche der Anlage beträgt 680 mm x 300 mm. Die maximale Taktleistung beträgt 42 Zyklen/min. Die maximale Schließkraft des Formaggregats beträgt 320 kN. Sowohl der Werkzeugtisch der Anlage, als auch der Vorstreckerantrieb sind mit Servomotoren angetrieben.

2 Stand der Forschung und Technik

Der Thermoformprozess hat sich mittlerweile zu einem hoch automatisierten und hochdynamischen Prozess entwickelt. Durch die unterschiedlichen Anforderungen an die Formteile wurde eine Vielzahl von Maschinentypen entwickelt. Die Unterteilung kann zunächst in Platten- und Rollenautomaten erfolgen. Plattenmaschinen finden ihren Einsatz bei dicken Halbzeugen, die vorwiegend für technische Produkte wie Gehäuse, Paletten, u. a. eingesetzt werden. Die Halbzeuge liegen hier in der Regel als Platten vor. Rollenautomaten werden vorwiegend bei Verpackungsprodukten, die in hoher Stückzahl produziert werden, eingesetzt. Die Halbzeuge liegen in diesen Anlagen als Folienbahnen vor, die durch Folienwickel oder einen direkt vorgeschalteten Extruder (Inlinethermoformen) der Maschine zugeführt werden.

2.1 Maschinen- und Werkzeugtechnik

Die Maschinensteuerung von Thermoformanlagen übernehmen verschiedene Steuerungssysteme. Zeitkritische Aktionen werden durch Motorsteuerungen übernommen. Durch die Einführung von servomotorischen Aktoren war es möglich, alle mechanischen Achsen elektronisch zu synchronisieren. Dadurch wird eine hohe Wiederholgenauigkeit und konstante Zykluszeit erzielt. Zusätzlich können digitale Ausgänge der Steuerung definiert werden, die ebenso auf eine Leitachse synchronisiert werden können. Diese Digitalausgänge können genutzt werden, um über Digitalausgänge an der Steuerung Aktoren zu schalten. Zeitunkritische Aufgaben, wie die Temperaturregelung der Heizungen werden bis heute von speicherprogrammierbaren Steuerungen übernommen.

Bei der Heizungstechnik können zwei verschiedene Systeme angeführt werden. Zum Ersten Infrarotheizsysteme als Hauptheizung in der Thermoformmaschine und zum Zweiten Vorheizungen, die das Halbzeug über Kontakt oder Konvektion erwärmen.

Vorheizsysteme werden überwiegend bei der Verarbeitung von Polypropylen eingesetzt, da bei hohen Durchsätzen die Durchlaufzeit durch die Infrarotheizungen nicht lang genug ist, um ausreichend Wärme in das Halbzeug zu übertragen. Daher wurden Systeme entwickelt, die vor die eigentliche Formmaschine platziert werden und den zusätzlichen Energiebedarf abdecken. Vorheizsysteme werden vereinzelt auch für andere Materialien eingesetzt, da sie aufgrund ihrer Konstruktion Vorteile gegenüber der reinen Infrarotbeheizung besitzen. Das Halbzeug ist in den Vorheizsystemen nicht fest eingespannt, dadurch besitzt es die Möglichkeit der freien Wärmeausdehnung. Zudem verlängert sich die Aufheizstrecke, wodurch ein über die Dicke gleichmäßigeres Erwärmungsbild entsteht. Die Energieeffizienz der Vorheizungen ist aufgrund der isolierten Konstruktion sehr hoch.

Bei den Infrarotheizungen haben sich Keramikstrahler oder Quarzglasstrahler bewährt. Die Optimierung der Heizungen und deren Ansteuerung und Regelung waren in den letzten Jahrzehnten Inhalt zahlreicher wissenschaftlicher Untersuchungen. Diese befassten sich mit der physikalischen Modellierung des Systems ([Bri79], [Pol93], [Wei87]) und der Regelung der Halbzeugtemperatur ([Gau08], [Gau09], [Gir03], [Mar96]). Es wurden Modelle erarbeitet, die eine Aussage über die flächige Temperaturverteilung und über die Foliendicke erlauben. Im

Weiteren wurde, auf Basis dieser Modellierungen, die Regelung der Halbzeugtemperaturen und Algorithmen für selbstoptimierende Heizungseinstellungen untersucht.

Aufgrund steigender Anforderungen an die Ausstoßleistung der Anlagen wurden die Thermoformwerkzeuge kontinuierlich weiterentwickelt. Je nach Maschinentyp unterscheiden sich der Werkzeugaufbau und die Funktion. Die Varianten reichen von einfachen Prototypenwerkzeugen aus Holz in Plattenmaschinen bis zum hochkomplexen Aufbau eines Produktionswerkzeugs mit Scherschnitt. Die Form- und Stanzwerkzeuge mit Scherschnitt besitzen die höchste Schnittqualität und können die größten Verstreckverhältnisse aller Werkzeugtypen realisieren. Das Werkzeug übernimmt die Aufgabe die Folie zu klemmen, auszuformen und zu stanzen. Direkt im Anschluss wird das Produkt an eine Stapelung übergeben.

Im Fokus der Werkzeugentwicklung standen die effizientere Folienausnutzung, verbesserte Formteileigenschaften, Minimierung der Qualitätsstreuungen und effizienteres Medienmanagement. Erreicht wurde dies vorwiegend durch symmetrische Medienzuleitungen und Reduzierung der Füllvolumina beim pneumatischen Ausformen.

Im Rahmen steigender Qualitätsanforderungen und dem daraus resultierenden Bedarf das Prozessverständnis zu erhöhen, wurden Systeme entwickelt, die dem Bediener den realen Prozessablauf darstellen können. Zum einen wurden von Maschinen- und Anlagenhersteller Systeme entwickelt, die auf der Steuerungstechnik der Maschinen basieren und auf Signale reduziert sind, die der Steuerung bekannt sind. Zum anderen wurden Systeme von Drittanbietern entwickelt, die auf externer Messtechnik aufbauen und einen zusätzlichen Installationsaufwand an Sensoren benötigen. Intention dieser Systeme ist, mehr Transparenz in den Thermoformprozess zu bringen.

2.2 Einflüsse von Halbzeugeigenschaften und Extrusionsbedingungen

Der Thermoformprozess und die Qualitätseigenschaften thermogeformter Produkte sind maßgeblich von der Rohstoffart und den Halbzeugeigenschaften abhängig. Teilkristalline Werkstoffe wie Polypropylen können sich durch unterschiedliche Verarbeitungsbedingungen in der Extrusion und unterschiedliche Zusatzstoffe in den Halbzeugeigenschaften bei gleichem Rohstoff deutlich unterscheiden. Aus diesem Grund wurden in Forschungsarbeiten die Einflüsse von Nukleierungsmitteln und Extrusionsbedingungen auf die Halbzeugeigenschaften untersucht ([Har99], [Bei10], [Mac98b], [Har04], [Har98], [Mac98a], [Swe02], [Lim06], [Mar03], [Win82]).

Es ist bekannt, dass der Zusatz von Nukleierungsmitteln bei Polypropylen dafür sorgt, dass kleinere Sphärolithstrukturen ausgebildet werden (Bild 4, [Mac98b]). Es wurde zudem festgestellt, dass bei nukleierten Polypropylen die Kühlrate einen geringeren Einfluss auf die durchschnittliche Sphärolithgröße hat als bei nicht nukleierten Polypropylen (Bild 4, [Mac98b]).

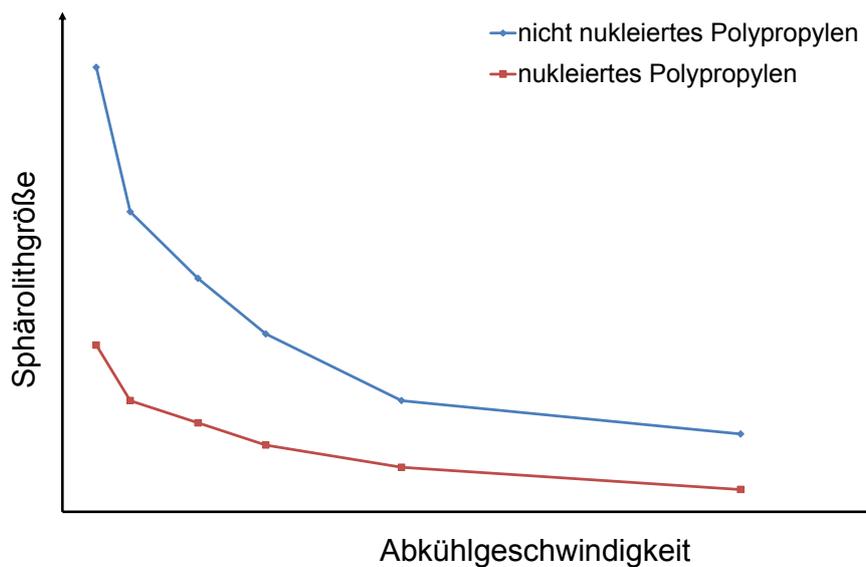


Bild 4: Einfluss der Kühlrate auf die durchschnittliche Sphärolithgröße bei Polypropylen. Vergleich zwischen nicht nukleierten Polypropylen (FINA 5060S) und nukleierten Polypropylen (BASF 1148L) [Mac98b]

Weiter kann eine Anhebung der Kristallisationstemperatur durch Zugabe von Nukleierungsmitteln festgestellt werden [Mac98b]. Neben der Rohstoffzusammensetzung beeinflussen die Extrusionsbedingungen die Eigenschaften des Halbzeugs ([Mac98a], [Bei10], [Har99], [McM08]). Es konnte gezeigt werden, dass sich ändernde Extrusionsbedingungen, wie Schmelztemperatur, Ausstoßleistung und Temperaturen des Glättwerks, sich im Wesentlichen durch die dadurch geänderten Abkühlbedingungen äußern [Har99]. Diese wiederum haben direkten Einfluss auf die Kristallinität, die Bildung unterschiedlicher Kristallmodifikationen und damit auf mechanische und optische Eigenschaften des Halbzeugs. Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass höhere MFI eine Minimierung des Durchgangs bewirken, da Polypropylene mit höherem MFI tendenziell eine höhere Kristallinität aufweisen [Har99]. Die Untersuchungen wurden nur für nicht nukleierte Polypropylene durchgeführt. In einer weiteren Untersuchung wurde nukleierter Rohstoff untersucht [Mac98a]. Neben den Einflüssen auf Kristallinität und mechanische Eigenschaften wurden Einflüsse auf die Anisotropie des Halbzeugs in und quer zur Extrusionsrichtung ermittelt. Die Anisotropien beruhen demnach auf den Orientierungen durch höhere Liniengeschwindigkeiten. Die Glättwerkstemperaturen spielen im betrachteten Prozessfenster eine untergeordnete Rolle. Um die Auswirkungen auf Thermoformteile zu ermitteln, wurden die Zusammenhänge zwischen Rohstoffeigenschaften, Extrusionsbedingungen, Thermoformbedingungen und Eigenschaften des thermogeformten Halbzeugs ermittelt ([Bei10],[Har99]). Um die Einflüsse auf die thermogeformten Produkte zu quantifizieren, wurden Kennwerte gebildet, die eine Aussage über das Thermoformergebnis liefern. Dies waren Kennwerte wie Homogenität der Wanddickenverteilung, geschwindigkeitsabhängiges Verformungsverhalten und das optische Erscheinungsbild [Bei10]. Auch hier wurde bestätigt, dass nukleierte Polypropylene robuster gegenüber Änderungen in Materialzusammensetzung und Extrusionsbedingungen verhalten. Dadurch konnten die Qualitätsunterschiede an thermogeformten Formteilen, die durch Chargenschwankungen verursacht werden, minimiert werden. Zudem wurde eine homogenere Deformation bei Halbzeugen ohne Streckgrenze und mit geringerer Kristallinität und kleinsphärolitischen Strukturen festgestellt.

2.3 Modellbildung und Simulation des Thermoformprozesses

Simulationen zur Beschreibung des Thermoformvorgangs wurden seit den 80er Jahren entwickelt ([Wei87], [Küp91], [McC07], [Kou92], [Mic95], [Mic96], [Mar10], [McC08], [Sch93]). Zum Einsatz kommen hyperelastische [O'C08] oder viskoelastische Materialmodelle ([O'C10], [Hos06], [Kou92], [Tsh03]). Ziel der Simulationen ist die Berechnung der sich ergebenden Wanddickenverteilung, auf Basis eines vorgegebenen Halbzeugs, der Prozessparameter und der Werkzeuggeometrie. Neben Modellen, die vorwiegend im FEA-Tool Abaqus aufgebaut wurden, sind kommerziell erhältliche Simulationstools zur Thermoformsimulation, wie T-Sim der Firma Accuform oder PamForm der Esi-Group, auf dem Markt. Die temperaturabhängigen Eigenschaften der Kunststoffe werden durch eine Arrheniusbeziehung [Nov99] oder durch den Ansatz von Williams, Landel und Ferry (WLF) beschrieben ([Heg04], [McC07]). Mit allen Modellansätzen kann das reine isotherme pneumatische Formen gut beschrieben werden. Probleme bestehen noch bei der Beschreibung der Interaktion des Stempels mit der Folie und der Abgrenzung der Reibungseinflüsse vom rheologischen Materialverhalten. Zudem bestehen noch Ungenauigkeiten bei der Simulation teilkristalliner Werkstoffe wie Polypropylen, die im Solid-Phase-Thermoformen verarbeitet werden.

Von [Col02] wurde gezeigt, dass je nach Stempelmaterial und Temperatur des Vorstreckers die Halbzeugtemperatur auch bei kurzen Kontaktzeiten beeinflusst werden kann ([Mar01], Bild 5). Aus diesem Grund muss geprüft werden, ob das Auskühlen des Halbzeugs einen signifikanten Einfluss beim Thermoformen besitzt. Zudem konnte gezeigt werden, dass moderne Stempelwerkstoffe wie syntaktische Schäume (Verbundmaterial aus einer Polymermatrix mit eingelagerten Glashohlkugeln) einen geringen Einfluss auf die Temperatur des Halbzeugs besitzen.

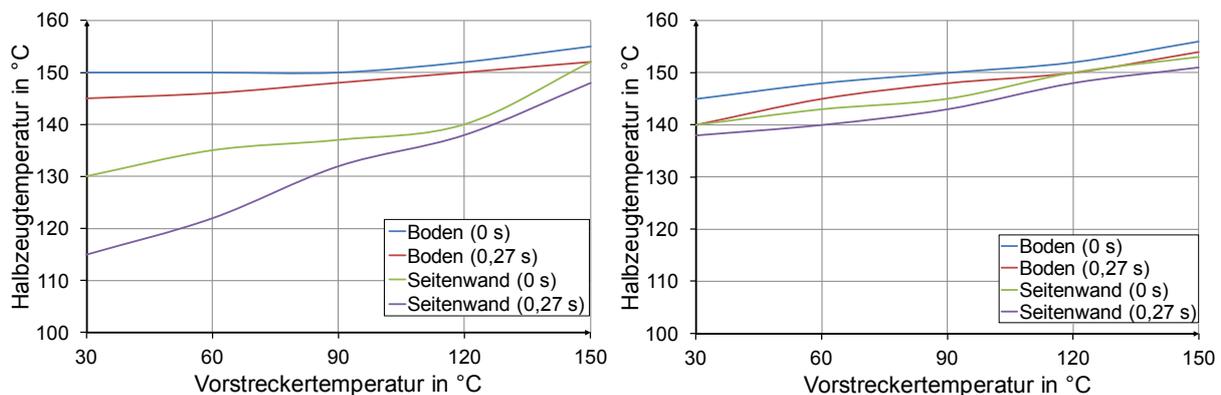


Bild 5: Einfluss der Stempeltemperatur auf die Temperatur des Halbzeugs - im Bodenbereich und der Seitenwand - am Ende des Vorstreckvorgangs (Stempelmaterial: Polyoxymethylen (links), syntaktischer Schaum (rechts)) [Col02]

Neben der Umformsimulation wurde der Aufheizprozess beim Thermoformen durch Simulationen abgebildet. Dabei wurden konvektive Heizungssysteme, Kontaktheizungen und Infrarotheizungen untersucht. Grundlage der Simulationen waren die Differenzialgleichungen der Wärmeleitung und Wärmestrombilanzierungen. Neben analytischen Ansätzen [Bri79] zur Berechnung der Temperaturprofile über die Halbzeugdicke und Zeit während des Aufheizens wurden numerische Simulationen auf Basis finiter Differenzen oder finiter Elemente entwickelt ([Wei87], [Fer07], [Gau05], [You01], [Ben05]). Vorteil der numerischen Verfahren ist die Möglichkeit nichtlineare Systeme wie die Infraroterwärmung und temperaturabhängige

Materialeigenschaften in der Simulation zu berücksichtigen. Abkühlsimulationen sind als Aufheizsimulationen mit geänderten Randbedingungen anzusehen. Die Schwierigkeiten bei der Validierung der Modelle ist dabei die Bestimmung der korrekten temperaturabhängigen Materialparameter (Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, Absorptionsspektrum der IR-Strahlung).

Anwendungen der Aufheizsimulationen sind zum einen die Berechnung von Maschineneinstellungen oder Optimierungen an den Temperatureinstellungen der Heizfelder ([Ben05], [Fer07a], [Gau05], [You01], [Fer07b]), zum anderen wurden auf Basis solcher Simulationen Reglerauslegungen zu Halbzeugtemperaturregelung erarbeitet ([Gau08], [Gau06], [Gau09], [Gir03], [Run03b]). Außerdem können die Simulationen von Anlagenbauern eingesetzt werden, um Auslegungen von Heizsystemen zu berechnen oder zu überprüfen.

2.4 Einflüsse der Prozessparameter in der Thermoformanlage auf die Formteilqualität

Die Qualitätsanforderungen thermogeformter Produkte werden durch deren Gebrauch und deren Anwendung festgelegt. Eine allgemeingültige Definition von Qualitätsparametern thermogeformter Produkte kann dadurch nicht gefunden werden. Ist in Forschungsarbeiten die Rede von Qualität bei thermogeformten Verpackungen, so wird meist die Wanddickenverteilung als Qualitätsmerkmal angeführt. Die Wanddickenverteilung ist meist aber nur Mittel zum Zweck, um davon abhängige Eigenschaften wie Barriereeigenschaften oder Steifigkeiten zu erfüllen. Weitere Qualitätsmerkmale stehen weniger im Fokus der Forschung, da sie meist durch den Thermoformanwender oder dessen Kunde definiert werden. Trotzdem soll auf einige dieser Eigenschaften im Folgenden eingegangen werden. Grundsätzlich gilt, dass je nach Produkt die relevanten Eigenschaften, die das Produkt zur Erfüllung seiner Funktion benötigt, als Qualitätsmerkmale angesehen werden müssen. Dies kann anhand eines Beispiels veranschaulicht werden. Bei dem Produkt handelt es sich um einen Joghurtbecher. Die Anforderung an das Produkt ist das sichere Aufbewahren von Joghurt über einen bestimmten Zeitraum. Die Eigenschaften, welche die Qualität definieren, sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Beispielhafte Qualitätsanforderungen

Anforderung	Definiert durch Bechermerkmal
Barriere gegen Wasserdampf/Sauerstoff	<ul style="list-style-type: none"> • minimale Schicht-/Wanddicke • Siegelfähigkeit
Widerstand gegen mechanische Belastung	<ul style="list-style-type: none"> • Wanddicke • Elastizitätsmodul
Transparenz	<ul style="list-style-type: none"> • Kristallinität • Sphärolithgröße • Oberflächenbeschaffenheit
Sicherstellung der Weiterverarbeitung in einer Abfüllstation	<ul style="list-style-type: none"> • Geometrie • Siegelrandgeometrie • Steifigkeit

Die Qualität der Thermoformteile hängt neben dem Halbzeug vom Verfahrensablauf, den Prozessparametern des Thermoformprozesses und Werkzeugparametern ab [Mai06]. Es konnte gezeigt werden, dass die erreichbare Wanddickenverteilung durch das verwendete Thermoformverfahren beeinflusst wird. Bei großen Verstreckverhältnissen und Ziehtiefen von Be-

chern kann eine homogene Wanddickenverteilung nur über Einsatz von Negativformung und mechanischem Vorstrecken erreicht werden [Dua04]. In Bild 6 ist eine Übersicht einiger Einflussfaktoren dargestellt. Der Einfluss der Temperatur beim Umformen von Polypropylen im Negativformen mit mechanischem Vorstrecken ist in Bild 6 (links) dargestellt. Eine relativ homogene Wanddickenverteilung wird dabei bei niedrigen Temperaturen erreicht. Bei höheren Temperaturen wird der Bodenbereich (Position 0 mm), durch Anhaften am Vorstrecker und geringe Reaktionskräfte im verstreckten Seitenwandbereich (Position 40 – 160 mm), nicht verstreckt. Ähnliche Effekte lassen sich durch Variation des Reibungskoeffizienten zwischen Halbzeug und Vorstrecker erreichen. Dieser wird wie die Materialparameter durch die Temperatur beeinflusst. Je größer der Reibungskoeffizient, desto mehr Material kann in den Bodenbereich transportiert werden. Zudem konnte der Einfluss verschiedener Materialien auf das Verstreckergebnis dargestellt werden [Dua04]. Es konnte gezeigt werden, dass sich die Materialien tendenziell ähnlich verhalten. Allerdings ist ein Vergleich aufgrund unterschiedlicher Verfahrensparameter, Vorstreckergeometrien und Werkstoffen nicht direkt möglich.

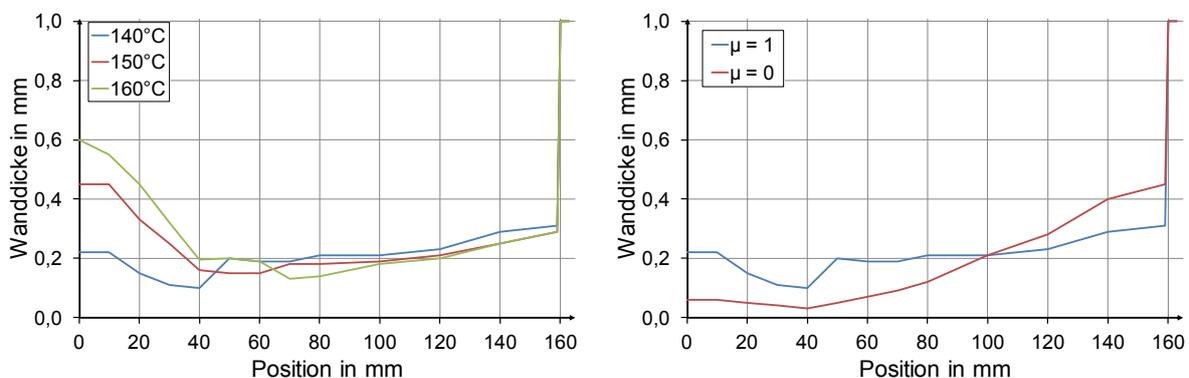


Bild 6: Übersicht der Einflüsse auf die Wanddickenverteilung eines thermogeformten Bechers (links: Einfluss der Temperatur; rechts: Einfluss des Reibungskoeffizienten zwischen Vorstrecker und Halbzeug) [Dua04]

Da diese Arbeit sich schwerpunktmäßig mit der Verarbeitung von Polypropylen befasst, wird im Folgenden speziell auf dieses Material eingegangen. Die Wanddickenverteilung wird primär durch den mechanischen Vorstrecker definiert. An Thermoformanlagen kann das mechanische Vorstrecken über die Parameter der Ziehtiefe und der maximalen Verstreckgeschwindigkeit definiert werden. Beide Parameter haben Einfluss auf die Wanddickenverteilung des Formteils [Bei10]. Eine Verringerung der Ziehtiefe führt zu einer geringeren Verstreckung der Seitenwand des Bechers und einer größeren Verstreckung des Bodenbereichs, was zu einer Wanddickenreduktion führt [Har01]. Zudem zeigen Polypropylene abhängig von Ihrer Zusammensetzung und Verarbeitungsbedingungen ein geschwindigkeitsabhängiges Verstreckverhalten. Des Weiteren ist die Wanddickenverteilung von der Geometrie des Vorstreckers, dessen Material, Oberflächenbeschaffenheit und Temperatur abhängig ([Heg04], [McC08a], [McC08b], [Col02], [Kho06], [Mar01]).

Neben der Wanddickenverteilung wird bei Verpackungen häufig eine Aussage zu mechanischen Kennwerten der Formteile gefordert. Diese mechanischen Anforderungen hängen von der erreichten Wanddickenverteilung, den lokalen Verstreckgraden und den mechanischen Eigenschaften des Halbzeugs ab. Ein weiteres Qualitätsmerkmal beim Thermoformen ist die Ausformschärfe. Diese wird im Wesentlichen durch das Druckniveau der pneumatischen Aus-

formung und die mechanischen Eigenschaften des Halbzeugs bestimmt. Zudem müssen die Stanzkontur und der Rand des Formteils gewissen Anforderungen genügen. Nimmt man die Ergebnisse der oben genannten Arbeiten zusammen, ist es nicht möglich allgemeingültige Aussagen zu treffen, die für alle Rohstoffe und Halbzeugausprägungen zutreffen.

2.5 Regelung von Formteileigenschaften

Die Idee der Regelung der Qualität von Formteilen wird seit Mitte der 80er Jahre verfolgt. Da die Qualität in hohem Maße von der Umformtemperatur beziehungsweise durch das Temperaturprofil über die Halbzeugdicke bestimmt wird, wurden Strategien entwickelt, über Temperaturänderungen der Heizungen die Qualität zu regeln.

Erste Ansätze eines geschlossenen Qualitätsregelkreises waren Wanddickenregelungen bei großformatigen technischen Formteilen. Als Stellgröße dienten die Strahlertemperaturen und Leistungen der Heizungen ([Mar96], [Pol93], [Dua04], [Moo03]). Ziel war es, eine homogene Wanddickenverteilung über das Formteil zu erhalten und diese Wanddickenverteilung konstant zu halten. Die Wanddicke wurde dafür an mehreren Stellen durch ins Werkzeug eingebaute Ultraschallsensoren ermittelt. Über mathematische Modelle, die auf Differenzialgleichungen der Wärmeleitung basieren, werden Korrekturwerte für die Heizungseinstellungen ermittelt. Limitiert war diese Regelungsstrategie durch die Messbereiche der Wanddickenmessung, da nur relativ dickwandige Formteile ($d > 0,3$ mm) vermessen werden konnten. Zum anderen mussten die Formteile großflächig sein, da sonst bedingt durch die Strahlergrößen kein Temperaturprofil über die Halbzeugfläche aufgeprägt werden kann. Diese Spezifikationen treffen demnach nur auf Plattenmaschinen und technische Bauteile zu. Zur Temperaturmessung hat sich berührungslose Infrarotmesstechnik als geeignet herausgestellt ([Nor11], [Rai11], [Sch97])

Bei schnell laufenden Rollenautomaten zur Herstellung von Verpackungsmitteln wurde aufgrund des Mehrkavitätenaufbaus der Werkzeuge und kleiner Formteile eine andere Strategie verfolgt. Ziel sind hier möglichst geringe Qualitätsunterschiede der Formteile der einzelnen Kavitäten sowie eine Langzeitkonstanz der Qualität. Dazu ist es zielgerichtet, eine homogene Temperatur über die Formfläche des Werkzeugs zu erreichen. Die Umformtemperatur muss dazu über die Formfläche und die Zeit konstant gehalten werden. Duarte stellt ein Verfahren zur Berechnung der Heizungstemperaturen in Rollenautomaten vor [Dua04], Nachteil dieses Verfahrens ist, dass alle Strahler des Versuchsaufbaus einzeln geregelt wurden. Diese Lösung ist Maschinenbauern zwar bekannt, allerdings durch den hohen Investitionsaufwand wenig eingesetzt. Bei den Anlagenbauern gibt es unterschiedliche Strategien. Es existieren Verfahren zur Kompensation von Änderungen der Einlauf- oder Umgebungstemperaturen anhand experimentell ermittelter Korrekturwerte [Sch06]. Diese Korrekturwerte werden während eines Produktionszyklus, in dem die Störung auftritt durch einen Rechenalgorithmus automatisch ermittelt. Andere Konzepte erreichen die Temperaturkonstanz über die Regelung der Oberflächentemperatur. Dabei werden über einen Infrarotsensor die oberflächennahen Temperaturen des Halbzeugs gemessen und die Heizungstemperaturen entsprechend korrigiert. Beide Konzepte befinden sich im Einsatz und haben sich bewährt, wobei als Nachteil der reinen Störgrößenkompensation die nicht vorhandene Berücksichtigung der Umformtemperatur anzuführen ist. Dadurch ist die Gültigkeit der Korrekturwerte nur im vorher erfassten Störbe-

reich zutreffend. Bei der reinen Halbzeugtemperaturregelung hingegen besteht dieses Problem nicht.

Ein weiterer Ansatz kann aus den Arbeiten von [Heg04], [Bei10] und [Har03] abgeleitet werden. Diese Arbeiten definieren die Umformkraft während des Vorstreckens als Beschreibung des Arbeitspunktes der Anlage. [Heg04] und [Bei10] verfolgen die Strategie, durch Erfassung der Stempelkraft eine Aussage über die Thermoformbarkeit eines Halbzeugs zu erreichen. [Har03] hingegen beschreibt eine Strategie, den Prozessablauf und Betriebspunkt durch Messung des Verstreckkraftverlaufs zu optimieren. Es wird vorgeschlagen, aufgrund der Verstreckkraft den Prozess zu kontrollieren, um bei definierten Abweichungen reagieren zu können. Des Weiteren wird vorgeschlagen, einen bestimmten Kraftverlauf durch Variation der Maschineneinstellung einzustellen, um eine bestimmte Produktqualität zu erhalten. Vorteil der Krafterfassung gegenüber einer Temperaturregelung, bei der Verformung von Polypropylen, ist die höhere Empfindlichkeit der Kraft im Prozessfenster. Die Untersuchungen wurden an einer Laboranlage mit Konvektionsofen und im industriellen Umfeld getestet. Der Nachweis, dass der Betriebspunkt durch die Verstreckkraftmessung definiert werden kann und dadurch eine konstante Qualität resultiert, wurde nicht erbracht, da keine Formteileigenschaften erfasst wurden. Ein weiterer offener Punkt ist die Auswertung der Kraftverläufe, die nicht automatisiert analysiert werden können.

2.6 Statistische Methoden des prozessnahen Qualitätsmanagements

Qualitätsmanagement ist die übergeordnete Strategie, die beschreibt, wie eine Qualität erreicht, geprüft und dauerhaft sichergestellt wird. Diese Strategie greift dabei auf unterschiedliche Ansätze und Werkzeuge zurück.

Bei der Untersuchung von Kunststoff verarbeitenden Prozessen wird das prozessnahe Qualitätsmanagement angewandt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das prozessnahe Qualitätsmanagement mit anderen Teilbereichen eines Qualitätsmanagementsystems gekoppelt ist. So werden die Anforderungen an die Formteile aus dem Kunststoff verarbeitenden Prozess, ob Thermoformanlage oder Spitzgießmaschine, aus Kundenanforderungen generiert. Um die Zusammenhänge zwischen Prozessparametern und Qualitätsmerkmalen zu beschreiben und zu modellieren, werden statistische Verfahren eingesetzt. Diese können nach Art der Integration in den eigentlichen Prozess und die Anwendungsart unterschieden werden in:

- Statistische Versuchsmethodik (STVM)
- Statistical Process Control (SPC)
- Kontinuierliche Qualitätskontrolle

Diese statistischen Methoden ermöglichen es, aus geringem Datenvolumen die Interaktionen und Zusammenhänge zu beschreiben, die die Qualitätsmerkmale und Streuungen beeinflussen.

2.6.1 Statistische Versuchsmethodik

Die statistische Versuchsplanung ist ein Werkzeug der prozessnahen Qualitätssicherung. Ziel der statistischen Versuchsplanung ist es, die Zusammenhänge und Interaktionen eines Prozes-

ses anhand definierter Versuchspunkte zu beschreiben. Die ermittelten Zusammenhänge können anschließend zur Ermittlung eines gewünschten Betriebspunktes, der anhand der Qualitätsmerkmale oder deren Streuungen definiert wird, genutzt werden.

Um den Versuchsumfang und Aufwand minimal zu halten, werden die Versuchspunkte über einen statistischen Versuchsplan beschrieben. Dabei werden die zu untersuchenden Parameter (unabhängige Variable) variiert. Die zu untersuchende Ergebnisgröße (abhängige Variable) wird in jedem Versuchspunkt gemessen.

Im Thermoformprozess wurde die statistische Versuchsmethodik eingesetzt um die Zusammenhänge zwischen Prozesseinstellungen und Formteilmerkmalen zu ermitteln ([Har01], [Ros06], [Mor06]). Darüber hinaus wurden die Einflüsse des Extrusionsprozesses auf das Halbzeug mithilfe statistischer Versuchsmethodik untersucht [Har99].

Merkmal dieser Untersuchungen waren die große Anzahl der möglichen Faktorkombinationen, sodass durch die Nutzung von statistischer Versuchsmethodik der Versuchsumfang minimal gehalten werden konnte. Ein weiterer Vorteil ist die Aussage über Wechselwirkungen der einzelnen Faktoren auf die abhängigen Variablen.

2.6.2 Statistical Process Control (SPC)

Die statistische Prozesskontrolle ist ein Verfahren zur Überwachung und Korrektur eines laufenden Prozesses. Bei dieser Methode werden dem laufenden Prozess stichprobenartig Proben entnommen. Beurteilt werden die Istwerte und Streuungen der Proben mit vorgegebenen Soll- und Grenzwerten. Die Beurteilung erfolgt anhand Prozessregelkarten, Mittelwert/Standardabweichungs- oder Mittelwert/Spannweiten-Karten.

Die Fähigkeit eines Prozesses eine gewünschte Eigenschaft einzuhalten wird durch spezielle Kennzahlen ermittelt. Die Prozessfähigkeit C_p vergleicht die Toleranzbandbreite der gewünschten Eigenschaft mit der Prozessstreuung:

$$C_p = \frac{OSG - USG}{6 \cdot \sigma} \quad 2-1$$

Der Kennwert gibt eine Aussage darüber, ob die Toleranzgrenzen vom Prozess mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,99966 % (sechs Sigma) eingehalten werden können. Im Gegensatz zur Maschinenfähigkeit ist die Prozessfähigkeit eine Aussage zur Langzeitfähigkeit des Prozesses mit Einfluss aller möglichen Störgrößen. In Erweiterung dazu gibt die kritische Prozessfähigkeit C_{pk} an, ob die aktuelle Prozesslage die Toleranzgrenzen mit dieser Wahrscheinlichkeit einhält:

$$C_{pk} = \frac{OSG - \bar{x}}{3 \cdot \sigma} \text{ oder } C_{pk} = \frac{\bar{x} - USG}{3 \cdot \sigma} \quad 2-2$$

Nachteile der SPC ist, dass keine 100 %-Kontrolle erfolgt, dadurch ergeben sich große Zeitintervalle von Auftreten von Prozessstörungen bis zur Identifikation (nächste Stichprobe). Um diesen Nachteil zu eliminieren wurden Verfahren zur kontinuierlichen Qualitätskontrolle entwickelt.

2.6.3 Kontinuierliche Qualitätskontrolle

Ziel der kontinuierlichen Qualitätskontrolle ist es, eine 100 %-Prüfung der qualitätsbestimmenden Produkteigenschaften in Form einer Messung oder Qualitätsprognose durchzuführen. Zusätzlich müssen die qualitätsrelevanten Prozessparameter bestimmt, erfasst und mit den Qualitätsmerkmalen korreliert werden.

Eine kontinuierliche Qualitätskontrolle kann in zwei Teilfunktionen unterteilt werden, zum einen kann die Prozesslage und deren Korrelation mit den Prozesseinstellungen ermittelt werden. Dies kann durch statistische Versuchsmethodik oder Regressions-/Korrelationsrechnung erfolgen. Ziel ist es ein Modell zu erhalten, das den Zusammenhang zwischen Qualitätsmerkmal oder Streuung des Qualitätsmerkmals und Einstellungen des Prozesses wiedergibt. Dieses Modell kann zur Einstellung der gewünschten oder robusten Prozesslage genutzt werden. Zur Prozessüberwachung kann dieses Modell nicht genutzt werden, da die Streuungen, die durch Ändern der Prozesseinstellungen eingebracht wurden, größer sind, als die Streuungen die in einem laufenden Prozess bei konstanten Maschineneinstellungen auftreten.

Um den Prozess überwachen zu können, muss ein zweites Modell gebildet werden, welches den aktuellen Betriebspunkt abbildet. Dazu werden gemessene Prozessgrößen und Materialdaten mit den Qualitätsbestimmenden Produktmerkmalen korreliert.

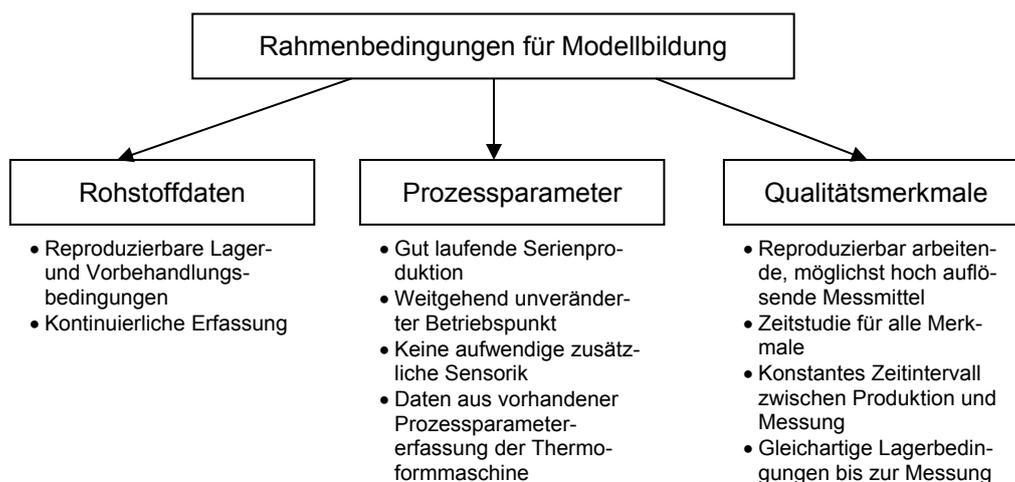


Bild 7: Notwendige Rahmenbedingung für eine kontinuierliche Qualitätsüberwachung

Zur Modellierung dieser Zusammenhänge bieten sich die multiple Regressionsanalyse oder neuronale Netzwerke an. Beispiel für die Prozessüberwachung, insbesondere für Störungen, die über das Material eingebracht werden, sind beim Spritzgießen [Sch09] und der Extrusion [Hoc12] bekannt. Erfasst werden hier Prozessparameter, die sich aufgrund Eigenschaftsänderungen im Material ändern, z. B. die Leistungsaufnahme der Plastifiziereinheit einer Spritzgießmaschine.

2.6.4 Multiple Regressionsrechnung

Mithilfe der Regressionsrechnung können funktionale Zusammenhänge zwischen einer oder mehrerer unabhängiger Variablen $x_1 \dots x_i$ und einer abhängigen Variable dargestellt werden. Basis der Regressionsanalyse sind Datensätze, die sowohl die abhängigen als auch unabhän-

gigen Variablen beinhalten. Zudem wird ein funktioneller Ansatz aufgestellt, der die Zusammenhänge beschreiben soll. Bei der linearen Regressionsanalyse ist dieser Ansatz eine lineare Gleichung.

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \cdot x_i \quad 2-3$$

Die Regressionsrechnung bestimmt die Koeffizienten nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Die Güte der Regressionsgleichung wird durch das Bestimmtheitsmaß R^2 beschrieben. Das Bestimmtheitsmaß beschreibt das Verhältnis der Variation der Regressionswerte zur Variation der realen Messwerte (Gleichung 2-4).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^* - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad 2-4$$

\bar{y} : Mittelwert der Messwerte
 y_i : reale Messwerte
 y_i^* : Regressionswerte

Das Regressionsmodell kann zur Analyse der Zusammenhänge zwischen abhängigen und unabhängigen Variablen genutzt werden. Diese können z. B. Prozesskennwerte und Qualitätsmerkmale darstellen. Zudem kann das Regressionsmodell eine Prognose für eine neue Kombination der unabhängigen Variablen berechnen. Es ist dadurch z. B. möglich, Qualitätsmerkmale von Produkten zu prognostizieren.

Neben der linearen multiplen Regressionsrechnung können Varianten der Regressionsrechnung genutzt werden. Bei der schrittweisen Regression werden automatisiert signifikante Variablen in die Regressionsgleichung aufgenommen. Nach jedem Schritt wird geprüft, ob alle Parameter noch signifikant sind. Die robuste Regression erlaubt eine Gewichtung der Einflussgrößen, dadurch besitzen Ausreißer oder stark zufällig streuende Parameter einen geringeren Einfluss auf das Regressionsmodell. Die logistische Regression eignet sich bei der Analyse nicht metrisch skalierte Variablen (z. B. Binärwerte).

Um Regressionsmodelle zu überprüfen, stehen statistische Verfahren zur Verfügung. Diese prüfen die Signifikanz des Bestimmtheitsmaßes oder die Signifikanz der Regressoren (unabhängige Variablen), d. h., es wird geprüft, ob die gefundenen Zusammenhänge zufällig sind, oder eine Gesetzmäßigkeit besteht. Das Bestimmtheitsmaß kann durch den F-Test geprüft werden. Dazu wird die Prüfgröße $F_{\text{prüf}}$ berechnet. Die Prüfgröße $F_{\text{prüf}}$ wird mit einem Tabellenwert F_{tab} verglichen. Ist $F_{\text{prüf}} < F_{\text{tab}}$ ist das Regressionsmodell nicht signifikant.

Die Signifikanz der unabhängigen Variablen wird durch den t-Test geprüft. Das Vorgehen ist analog zum F-Test, eine Prüfgröße $t_{\text{prüf}}$ wird berechnet und mit einem Tabellenwert t_{tab} verglichen. Ist $t_{\text{prüf}} < t_{\text{tab}}$ besteht kein signifikanter Einfluss.

Neben den Signifikanztests müssen die Annahmen der Regressionsrechnung überprüft werden. Abgefragt werden muss die Nichtlinearität, die Multikollinearität, die Autokorrelation und Heteroskedastizität. Nichtlinearitäten liegen vor, wenn sich der Zusammenhang zwischen Regressor und Regressand durch gekrümmte Kurven erklären lässt. Nichtlineare Abhängig-

keiten können durch Variablentransformationen vielfach in eine Geradengleichung (lineare Gleichung) überführt werden, sodass die Regressionsrechnung durchgeführt werden kann.

Multikollinearität führt zu sich ändernden Koeffizienten der Regressionsgleichung, bei Aufnahme oder Entfernen einer weiteren Variable. Hohe Korrelationskoeffizienten zwischen zwei unabhängigen Variablen deuten ebenfalls auf Multikollinearität hin. Sind zwei Regressoren linear abhängig, so ist die Ursache zu prüfen und gegebenenfalls eine neue Auswahl der Regressoren zu treffen. Eine Autokorrelation liegt vor, wenn die Restabweichungen (Residuen) nicht mehr zufällig sind, sondern einen Trend aufweisen. Überprüft werden kann die Autokorrelation durch einen Durbin/Watson-Test. Tritt diese auf, so ist der Modellansatz zu prüfen und gegebenenfalls anzupassen. Heteroskedastizität tritt auf, wenn die Streuung der Residuen von den Werten der abhängigen Variable abhängt. Trägt man die Residuen über der abhängigen Variable auf, so ist dann ein Trend zu erkennen.

Um ein Regressionsmodell zur Prognose verwenden zu können, ist es notwendig, eine Aussage zur Genauigkeit der Prognose zu machen. Dazu werden Bereiche für das Konfidenzintervall des Mittelwerts und das Konfidenzintervall für prognostizierte Werte berechnet. Das Konfidenzintervall des Mittelwerts gibt an, in welchem Bereich sich die Mittelwerte der Schätzung der abhängigen Variable mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit liegen. Ursache hierfür sind die Konfidenzbereiche der Regressionskoeffizienten. Für zukünftige Parameterkombinationen (Prognosen) wird das Prognoseintervall benötigt. Dies gibt an, in welchem Bereich sich zukünftige (einzelne) Werte mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit liegen. Man erkennt, dass die Prognose zukünftiger Einzelwerte unschärfer ist als das Konfidenzintervall der Mittelwerte.

2.6.5 Neuronale Netzwerke

Neben der multiplen Regressionsrechnung kann eine empirische Modellbildung über neuronale Netze erfolgen. Diese haben gegenüber der Regressionsrechnung den Vorteil, dass Nichtlinearitäten abgebildet werden können, ohne dass diese bekannt sind. Bei der Regressionsrechnung wäre eine Korrektur des Modellansatzes notwendig. Da in Kunststoff verarbeitenden Prozessen aufgrund der Komplexität der Einzelprozesse häufig Nichtlinearitäten auftreten, werden neuronale Netze zur Modellbildung eingesetzt ([Hoc12], [Lie10], [Mic99]). Dabei können die Einflüsse des Prozesses wie Werkzeugtemperierung oder Änderungen der Materialeigenschaften auf die Formteileigenschaften modelliert werden. Am Beispiel des Spritzgießprozesses sind Modelle für die Maßhaltigkeit und das Formteilmgewicht aufgebaut und erfolgreich getestet worden [Mus99].

Der prinzipielle Aufbau eines neuronalen Netzes ist in Bild 8 abgebildet. Ein neuronales Netz besitzen drei Verarbeitungsschichten, die Eingabeschicht, die Ausgabeschicht und eine oder mehrere verdeckte Schichten. Die Eingabeschicht ist mit den Eingangsvariablen verknüpft, die Ausgabeschicht gibt die zu berechnenden Werte aus. Jede Schicht besteht aus einzelnen Verarbeitungsknoten. Jeder Verarbeitungsknoten kann mehrere Eingänge besitzen, diese werden zunächst gewichtet und aufsummiert. Anhand der Summe wird über eine Aktivierungsfunktion, der Zustand des Neurons berechnet. Der Zustand des Neurons wird über die Ausgabefunktion mit dem Ausgang verknüpft.

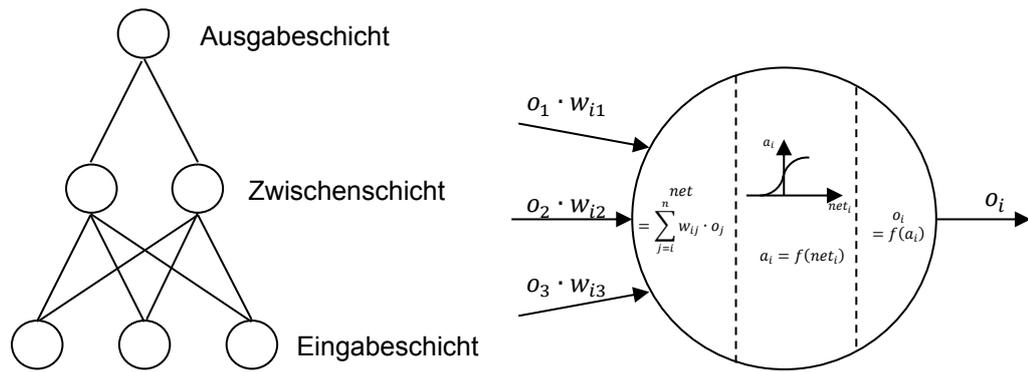


Bild 8: Prinzipieller Aufbau eines neuronalen Netzes und eines Verarbeitungsknotens [Wal99]

Das Parametrieren von neuronalen Netzwerken wird Training genannt. Dazu werden die Gewichte der Neuroneneingänge angepasst. Der Lernalgorithmus erfolgt iterativ, mittels eines Trainingsdatensatzes, bis ein definiertes Abbruchkriterium erreicht ist. Da bei neuronalen Netzen die Gefahr besteht, dass Sie die Trainingsdaten auswendig lernen, kann das Abbruchkriterium auf Basis von Testdaten ermittelt werden. Das Netz ist optimal parametrier, wenn der Abbildungsfehler für die Testdaten ein Minimum erreicht. Bei weiterem Training werden die Trainingsdaten „auswendig gelernt“, d. h., die Abbildungsgenauigkeit für den Trainingsdatensatz steigt und der des Testdatensatzes sinkt (Bild 9).

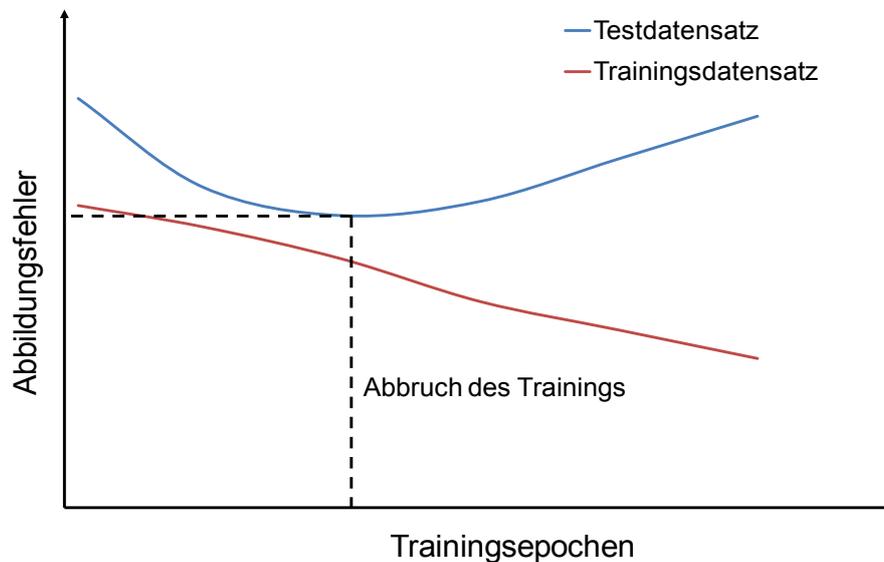


Bild 9: Abbildungsfehler eines neuronalen Netzes in Abhängigkeit der Trainingsepochen für Trainings- und Testdaten [Wal99]

3 Verfahrensablauf in der Versuchsanlage

Da sich Kunststoff verarbeitende Thermoformmaschinen im Aufbau und Verfahrensablauf unterscheiden, werden der Aufbau und das Verfahren der verwendeten Technikumsanlage beschrieben. Zur Verfügung stand ein Rollenautomat für kombiniertes Formen und Stanzen in einem Werkzeug in Patrize/Matritze-Schnitttechnik der Fa. ILLIG Maschinenbau GmbH & Co. KG. Zudem stand eine Vorheizung zur Verarbeitung von Polypropylen, eine Raststapelung und Peripherie zum Betreiben der Anlage zur Verfügung. Im Folgenden werden insbesondere die technische Ausführung der Heizungen und der Ablauf des Formprozesses beschrieben.

3.1 Heizen

Das Erwärmen der Folie wurde in der Versuchsanlage durch einen zweistufigen Heizprozess realisiert. Die erste Stufe übernimmt eine Vorheizung, die die Folie mittels Kontakterwärmung erwärmt. Die Vorheizung besitzt zwei Heizwalzen und eine maximale Heizleistung von 32 kW. Die maximale erreichbare Auslauftemperatur der Vorheizungen ist auf 140 °C begrenzt. Die weitere Erwärmung übernimmt eine Infrarotheizung in der Formmaschine. Diese besteht aus Ober- und Unterheizung und besitzt eine maximale Heizleistung von 86 kW. Zur Überwachung des Heizprozesses werden an drei Stellen der Infrarotheizung Temperaturen des Halbzeugs gemessen. Erfasst werden die Temperatur vor der Heizung (Einlauftemperatur an Position 1), die Strahlertemperaturen der Pilotstrahler (Position 2) und die Temperatur nach der Infrarotheizung (Auslauftemperatur an Position 3).

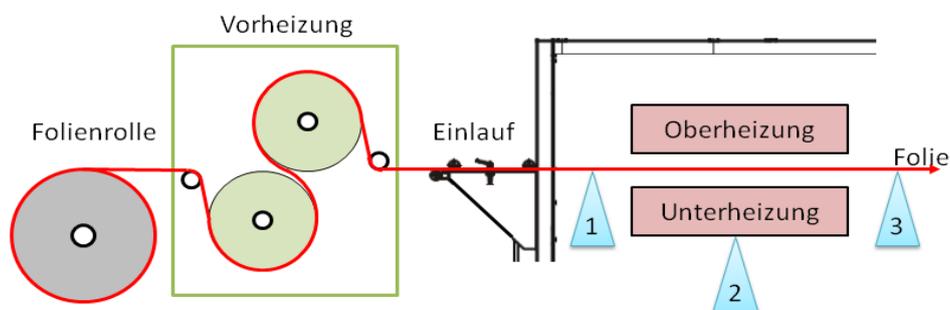


Bild 10: Aufbau und Lage der verschiedenen Heizungssysteme eines Rollenautomaten

3.2 Formen

In der Formstation wird das Thermoformwerkzeug aufgenommen. Die erwärmte Folie wird darin geklemmt, ausgeformt und gestanzt. Anschließend wird das Formteil einer Stapelung übergeben. In der Formstation befindet sich ein Formwerkzeug, im Fall der Versuchsmaschine ein Mehrkavitätenbecherwerkzeug mit 24 Kavitäten, aufgeteilt in drei Reihen. Das Formteil ist ein Joghurtbecher mit 200 ml Füllvolumen. Im Folgenden wird der Verfahrensablauf des Formens am Beispiel einer Kavität beschrieben. In Bild 11 ist der Aufbau eines typischen Form- und Stanzbecherwerkzeugs schematisch dargestellt. Das Werkzeug ist zweiteilig aufgebaut und besteht aus Ober- und Unterwerkzeug. Zwischen den Werkzeughälften wird die erwärmte Folie geführt.

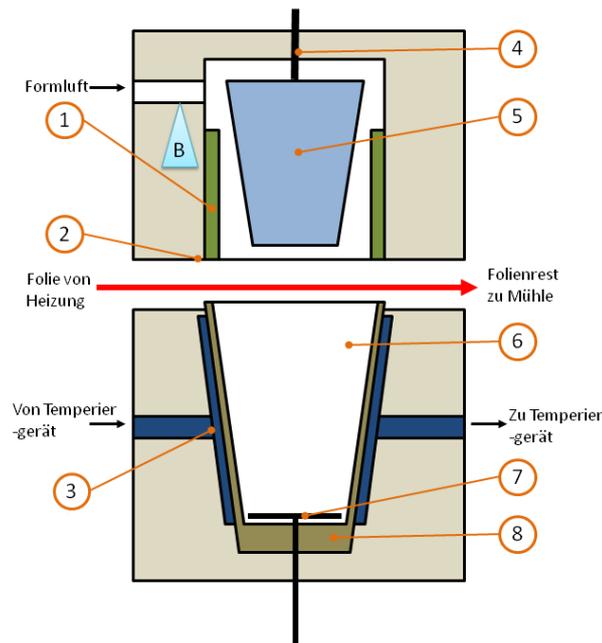


Bild 11: Schematische Darstellung eines Schnittdurchs einer Kavität mit Niederhalter (1), Schnittplatte (2), Kühlsystem (3), Vorstreckerstange (4), Vorstrecker (5), Formeinsatz (6), Auswerfer (7) und Schnittstempel (8)

Zunächst schließt das Werkzeug (Bild 12, Schritt 1). Dabei wird durch eine Vorspannung des Niederhalters die Folie geklemmt und kalibriert. Gleichzeitig dichtet die geklemmte Folie die Kavität ab. Die Vorspannung der Niederhalter erfolgt pneumatisch oder durch mechanische Federn. Im Folgenden wird durch weiteres Schließen des Werkzeugs die Folie angeschnitten. Dies erfolgt durch das Eintauchen des Schnittstempels in die Schnittplatte des Oberwerkzeugs. Durch den Niederhalter, den Formeinsatz und den Schnittstempel wird der Randbereich des Formteils während dieser Schritte gekühlt.

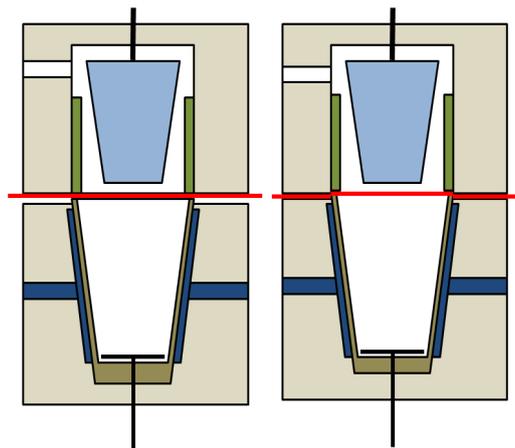


Bild 12: Schematische Darstellung des Formprozesses, Schritt 1 (links) und 2 (rechts)

Der erste Schritt des Verformens erfolgt durch den Vorstecker (Bild 13, Schritt 3). Dieser verstreckt die Folie mechanisch vor und hat die Aufgabe eine gewünschte Wanddickenverteilung zu gewährleisten. Anschließend wird die vorgeformte Folie durch einen pneumatischen Druck an die Werkzeugwand angelegt. Dadurch wird die gewünschte Geometrie hergestellt und die Kühlung des Formteils über das Werkzeug sichergestellt.

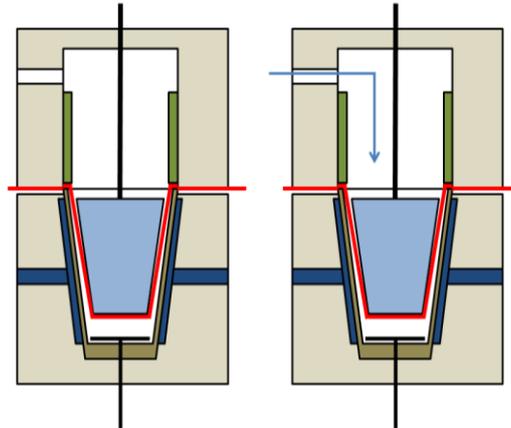


Bild 13: Schematische Darstellung des Formprozesses, Schritt 3 (links) und 4 (rechts)

Vor Öffnen des Werkzeugs wird das Formteil aus dem Folienrestgitter durch einen Hub des Unterwerkzeugs ausgestanzt. Zudem wird das Werkzeug entlüftet und der Vorstrecker fährt in seine Ausgangslage zurück. Danach öffnet das Werkzeug, das Unterwerkzeug schwenkt um 80° und übergibt die Formteile einer Stapelung oder einer Weiterverarbeitung. Die Entformung der Formteile aus dem Werkzeug erfolgt durch Auswerfer, die in der Regel den Boden des Formeinsatzes bilden.

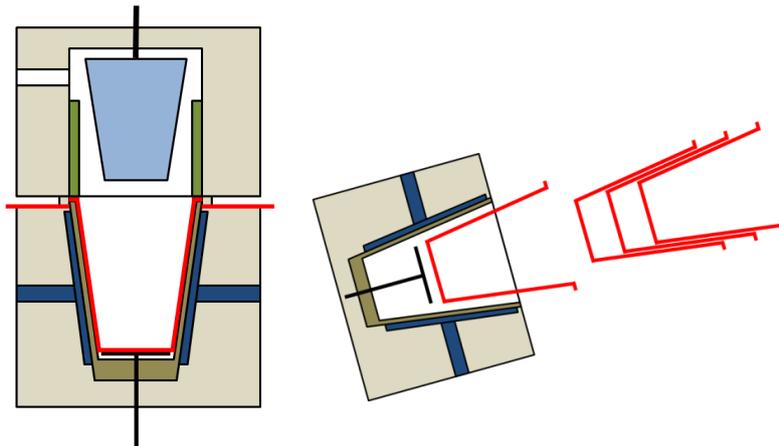


Bild 14: Schematische Darstellung des Formprozesses, Schritt 5 und Schritt 6

4 Aufbau des Messsystems

Da bei der Untersuchung des Thermoformprozesses die Prozessparameter und Einstellwerte zyklusgenau zugeordnet werden müssen, war es notwendig ein Messsystem zu entwickeln, welches mit der Maschinensteuerung kommunizieren kann. Die Maschinensteuerungen basieren auf speicherprogrammierbaren Steuerungen (Hard- oder Soft-SPS) und Motion-Control-Systemen zur Steuerung der Antriebe. Die Messwerterfassung erfasst sowohl Daten, die in der Maschinensteuerung vorliegen (Maschineneinstellungen, zeitunkritische Signale) und Daten, die durch zusätzliche Sensorik in der Maschine und am Werkzeug gemessen werden. Bild 15 zeigt schematisch den Aufbau des Systems und die Kommunikation zwischen dem Messsystem und der Steuerung. Analoge zeitkritische Signale werden über eine Messkarte digitalisiert und der Messwerterfassung auf dem Industrie PC (IPC) der Maschine bereitgestellt. Mess- und Einstellwerte der Maschine werden durch die Visualisierung über eine standardisierte OPC-Schnittstelle an die Messwertverarbeitung übertragen.

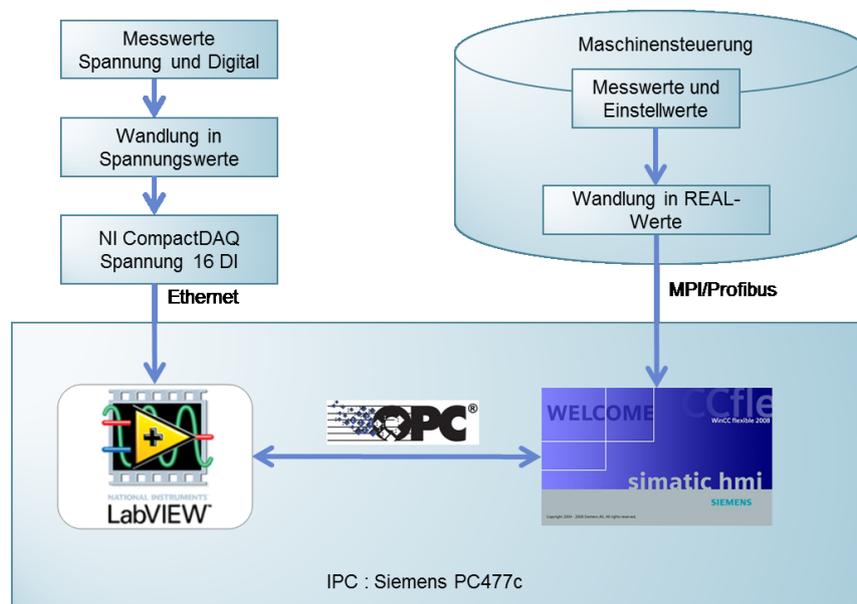


Bild 15: Schematische Darstellung aller beteiligten Komponenten und deren Verbindungen in einer Thermoformanlage (Steuerung und Visualisierung sind beispielhaft).

Es können alle Maschineneinstellungen und Messsignale übertragen werden, die der Steuerung der Maschine zur Verfügung stehen. Die Werte werden in der Steuerung in eine Fließkommazahl umgewandelt, um ein einheitliches Datenformat für die Übertragung zu erreichen. Als Entwicklungsumgebung und zur Messdatenverarbeitung wurde LabVIEW der Firma National Instruments (NI) eingesetzt. Für die Erfassung der Messdaten wurde ebenfalls ein System von NI eingesetzt.

5 Analyse und Optimierung des Prozessablaufs in einer Thermoformmaschine

Um grundlegende Erkenntnisse zum Zusammenwirken des Prozessablaufs und der Qualität von thermogeformten Teilen zu untersuchen, muss der Prozessablauf der Thermoformanlage bekannt sein und während der Untersuchungen überprüft werden können. Um diese Voraussetzungen zu schaffen, wurden vor der eigentlichen Untersuchung der qualitätsbestimmenden Parameter die Teilsysteme Vorheizung, Heizung und Formen und deren Verhalten in der Produktion untersucht. Die Ergebnisse sind in den folgenden Kapiteln zusammengefasst. Ziel war es, einen möglichst wiederholgenauen Umformprozess, mit reproduzierbaren Randbedingungen, zu gewährleisten. Insbesondere der Heizprozess ist näher betrachtet worden, da wie in Kapitel 2.4 beschrieben, die Umformtemperatur einen signifikanten Einfluss auf die Eigenschaften des Formteils besitzt.

5.1 Analyse der Vorheizung

Bei der in der Technikumsanlage verwendeten Vorheizung handelt es sich um eine Walzenvorheizung VHW 90/2b der Fa. ILLIG. Der Aufbau dieser Heizung ist in Kapitel 14.1 beschrieben. Ziel ist es mit der Vorheizung der Formmaschine ein konstant erwärmtes Halbzeug über die Formfläche und über die Zeit bereitzustellen. Im Rahmen verschiedener Arbeiten ([Cla08], [Fis09], [Mos08]) wurde festgestellt, dass das Halbzeug in der Vorheizung nicht homogen erwärmt wird (Bild 16, links). Diese Effekte zeigen sich insbesondere dann, wenn die Vorheizung nahe Ihrer Spezifikationsgrenze betrieben wird. Die Auswertung von Infrarotaufnahmen über eine Formfläche zeigte Temperaturdifferenzen von bis zu 10 K (Bild 16, rechts).

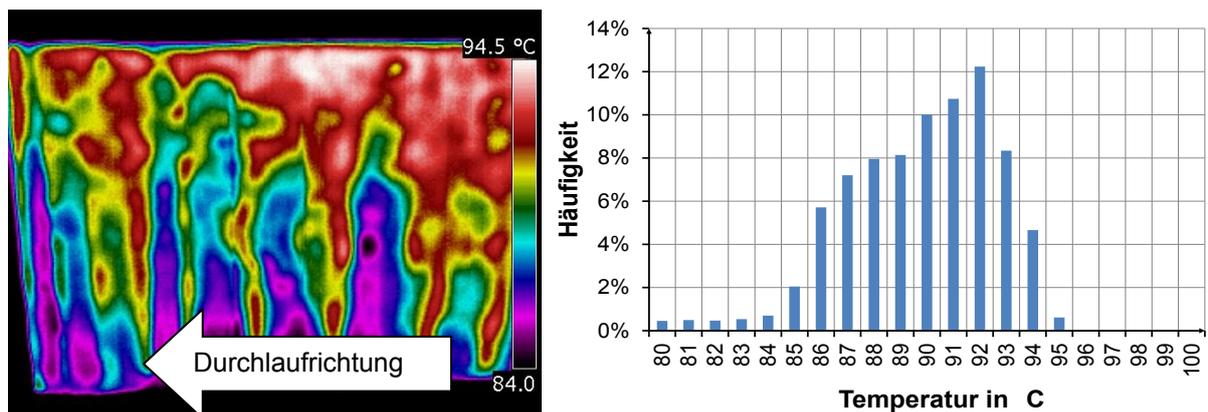


Bild 16: Thermografie der Temperatur am Auslauf der Walzenvorheizung. Darstellung der Temperaturverteilung (Anzahl Pixel mit entsprechender Temperatur).

Neben den Temperaturunterschieden über eine Formfläche konnten durch eine punktuelle Temperaturmessung am Folieneinlauf der Formmaschine zyklische Schwankungen der Halbzeugtemperatur detektiert werden. Ursächlich für die inhomogene Erwärmung ist ein inhomogener Wärmeübergangswiderstand zwischen der Walze und dem Halbzeug. Hervorgerufen wird dieser durch Toleranzen des Halbzeuges und der Vorheizung, die zu unterschiedlichen Spannungen in der Folie und damit unterschiedlicher Anlage an den Heizwalzen führen (Bild 17). In der Grafik ist zu erkennen, dass bei niedrigen Zugkräften und damit geringen Span-

nungen in der Folie Schwankung im Übergangswiderstand zu den erwähnten Temperaturdifferenzen über die Formfläche führen.

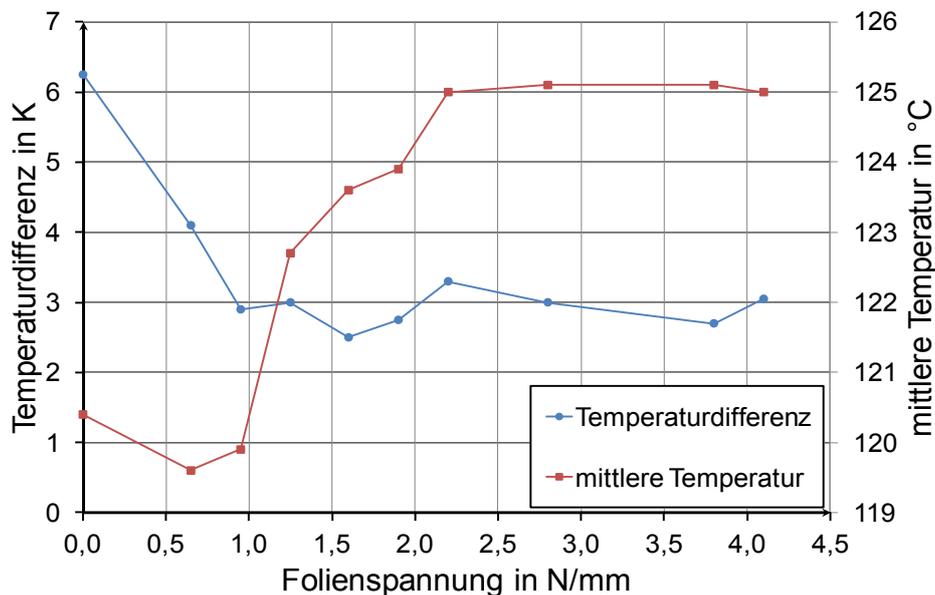


Bild 17: Differenzen und mittlere Temperatur über eine Formfläche am Auslauf der Vorheizung

Zudem konnte festgestellt werden, dass die mittlere erreichbare Temperatur bei Zugspannungen unter 2 N/mm^2 dazu führt, dass der Übergangswiderstand insgesamt signifikant abnimmt. Eine weitere Erhöhung der Folienspannung führt zu keiner sichtbaren Verbesserung des Wärmeübergangs. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei den eingestellten Prozessparametern ab 2 N/mm^2 das thermische Gleichgewicht am Ende der Heizstrecke erreicht wird, d. h., es wird nahezu keine Energie mehr von der Walze an das Halbzeug übertragen. Dieses Verhalten konnte durch eine Simulation ebenfalls verifiziert werden (Bild 18). Es zeigt sich ab einem Wärmeübergangswiderstand über $\alpha = 1500 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ keine signifikante Verbesserung der Erwärmung.

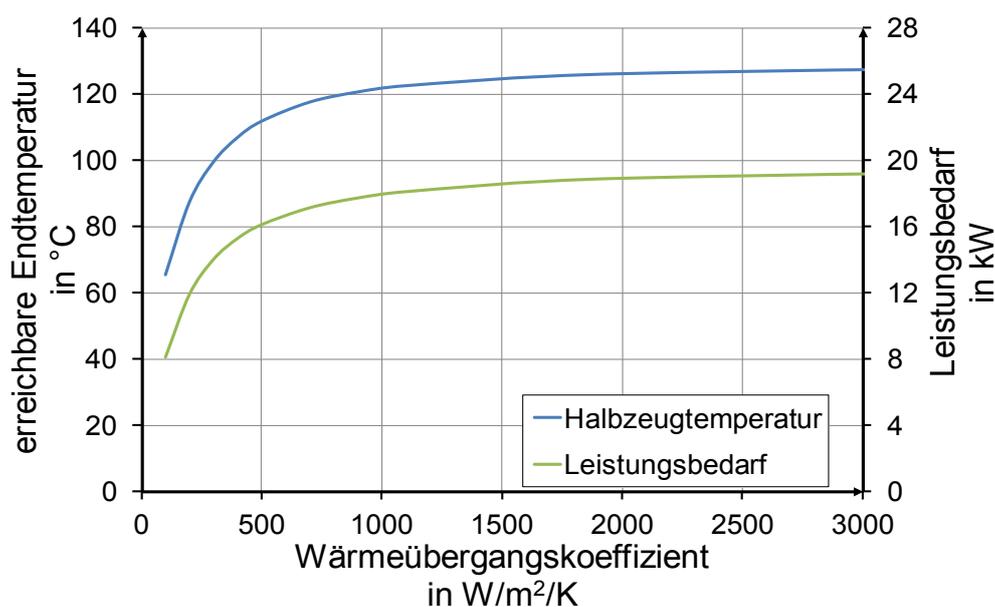


Bild 18: Halbzeugtemperatur am Auslauf der Vorheizung und Leistungsbedarf in Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizients (Walzentemperatur und Liniengeschwindigkeit konstant)

5.2 Untersuchung der Infrarotheizung

Die Heizung in Thermoformmaschinen ist als Strahlungsheizung realisiert. Bei Rollenautomaten wird das Halbzeug getaktet mittels eines Folientransports durch die Heizung transportiert. Die Infrarotheizung steht dabei permanent über dem Folientransport und dem darin eingespannten Halbzeug. Das Halbzeug befindet sich mehrere Maschinentakte, abhängig von der Vorschublänge und dem Maschinentyp, in der Heizung. Die Heizungen bestehen aus einzelnen Flächenstrahlern, die zu Heizfeldern zusammengefasst sind. Die Heizungen haben die Aufgabe das Halbzeug auf die Umformtemperatur zu erwärmen. Diese Temperatur muss über die einzelnen Zyklen und die Formfläche des Werkzeugs konstant gehalten werden. Nur bei entsprechender Konstanz der Umformtemperatur kann eine homogene und stabile Umformung gewährleistet werden.

Wichtigstes Kriterium bei Rollenautomaten ist es, das Halbzeug über eine Nutzenfläche des Werkzeuges auf eine konstante Temperatur zu erwärmen. Diese Forderung folgt aus dem Mehrkavitätenaufbau des Werkzeuges, damit jede Kavität des Werkzeuges gleiche Prozessbedingungen aufweist.

Die Regelung der Heizung erfolgt über sogenannte Pilotstrahler. Diese Pilotstrahler besitzen ein eingebautes Thermoelement, welches die Temperatur des Strahlers erfasst und mit der eingestellten Sollgröße vergleicht. Im einfachsten Fall handelt es sich dabei um eine Gesamtfeldregelung. Bei dieser wird die gesamte Heizung über einen Pilotstrahler eingestellt und geregelt. Um ein gleichmäßigeres Heizbild zu erhalten, kommt in den Heizungen meist eine Längsreihenregelung zum Einsatz. Bei dieser Ausführung wird jede Längsreihe durch einen Pilotstrahler geregelt. Dies erlaubt das Minimieren von Temperaturdifferenzen quer zur Vorschubrichtung.

Um Temperaturdifferenzen in Durchlaufrichtung zu minimieren, kann die Längsreihenregelung erweitert werden. Sie enthält dann zusätzlich Pilotstrahler zur Querreihenbeeinflussung. Dadurch soll erreicht werden, dass sich stets ein ganzzahliges Vielfaches des Vorschubes unter der Heizung befindet. Dadurch wird versucht ein gleichmäßiges Heizbild, über einem Nutzen, zu erhalten. Ein Nachteil der Heizungen der Rollenautomaten ist, dass die Temperaturverteilung des Halbzeuges nicht in jeder Anlage gemessen wird. Dadurch fehlt die Information, ob das Halbzeug gleichmäßig aufgeheizt wurde. Dies ist solange unproblematisch bis sich Halbzeug- und/oder Umgebungsbedingungen ändern. Eine weitere Problematik besteht darin, dass nur die Temperatur von einzelnen Strahlern gemessen wird. Dadurch ist das System im regelungstechnischen Sinn, wenn die Strahlertemperaturen geregelt werden sollen, nicht beobachtbar. Dazu kommt, dass durch die Parallelschaltung der Strahler in den Längsreihen, alle Strahler mit einer gemeinsamen Stellgröße beaufschlagt werden. Dadurch ist das System nicht steuerbar.

Zur Regelung der Halbzeugtemperatur können unterschiedliche Strategien verfolgt werden. Zum einen kann eine Niveauregelung durchgeführt werden, zum anderen ist es möglich, die Quereinstellung zu automatisieren. Zudem könnten beide Strategien kombiniert werden. In Kapitel 9 sind die Ergebnisse dieser Untersuchungen gelistet.

5.3 Analyse des Formprozesses in Thermoformanlagen

Neben dem Heizprozess ist der eigentliche Umformprozess entscheidend für die erreichbare Qualität der thermogeformten Formteile. Um einen reproduzierbaren Prozess zu gewährleisten, wurde der Formprozess, insbesondere der Antrieb des Werkzeugs, des Vorstreckers und die pneumatischen Aktoren untersucht und mit Sensorik überwacht. Bei den servomotorischen Antrieben wurde insbesondere auf die Trajektorien und die Schleppabstände der Achsen geachtet. Die pneumatischen Aktoren wurden hinsichtlich Ihrer Schaltzeiten untersucht. Die Werkzeuge in schnell laufenden Maschinen werden über einen Kniehebel angetrieben. Die Ansteuerung des Kniehebelantriebs des Werkzeugs erfolgt über ein Kurvengetriebe, das von einem Servomotor angetrieben wird. Da alle Aktionen des Formprozesses sich auf eine Winkelstellung der virtuellen Leitachse beziehen, wurde die Geschwindigkeitsvorgabe des Hauptantriebs angepasst (Bild 19). Eine ausführliche Beschreibung der Zusammenhänge ist dem Kapitel 14.2 zu entnehmen.

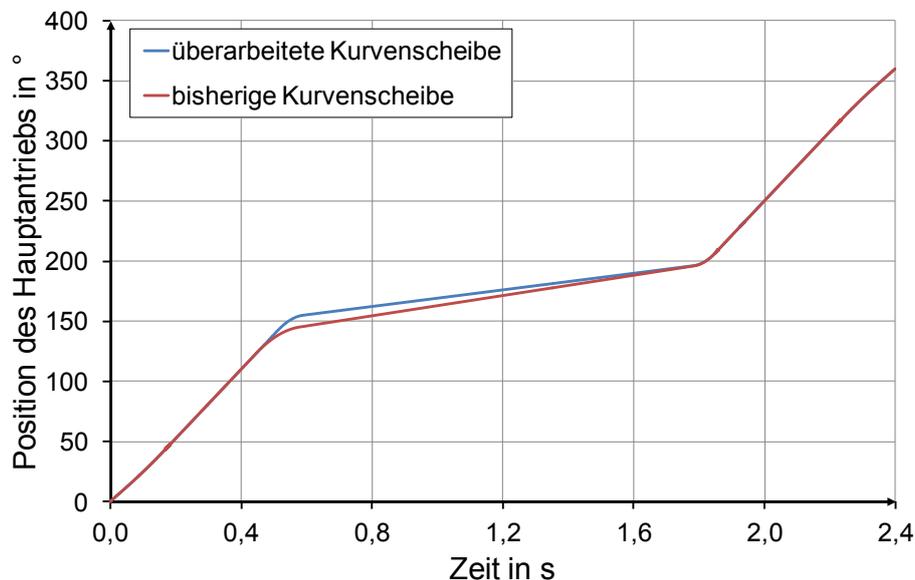


Bild 19: Neue und alte Sollpositionsvorgabe für den Hauptantrieb (Werkzeugunterteil) über einen Zyklus von 2,4 s

Durch Optimierung von Reglerparametern des Hauptantriebs konnte der Schleppabstand bei der Schließbewegung des Werkzeugs minimiert werden (Bild 20). Dieser spielt insbesondere bei Änderung der Taktleistung eine Rolle, die direkt den Schleppabstand und damit die Wechselwirkungen zwischen Schließbewegung des Werkzeugs und dem Formprozess bestimmt. Durch Erhöhung der Vorsteuerung von 20 % auf 100 % kann der Schleppabstand um 83 % oder $6,5^\circ$ reduziert werden. Dadurch wird der Resthub des Unterwerkzeugs zum Zeitpunkt „Start Formen“, auf den sich die Zeitpunkte des Formprozesses beziehen, von 1,3 mm auf unter 0,01 mm gesenkt.

Neben dem Hauptantrieb, der die Bewegung des Werkzeugs definiert, ist beim Thermoformen der Vorstreckere von zentraler Bedeutung. Da die Eigenschaften der Halbzeuge sowohl Temperatur als auch zeitabhängig sind, ist es für einen robusten Prozess notwendig, dass der Vorstreckere einen von der Belastung unabhängigen reproduzierbaren Ablauf besitzt.

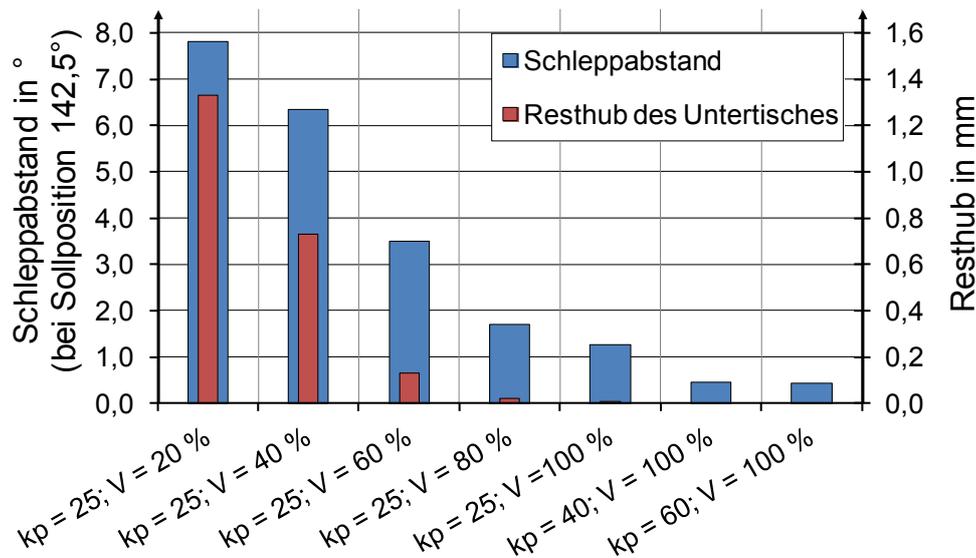


Bild 20: Abhängigkeit des Schleppabstands und des Resthubs bei Sollposition „Werkzeug geschlossen“ von den Einstellungen Proportionalverstärkung k_p und Vorsteuerung V des Antriebsreglers

Die Ansteuerung des Vorstreckers wurde ebenfalls überarbeitet, da die Visualisierung dem Bediener falsche Informationen über das Bewegungsprofil lieferte. Zudem sind die Reglerparameter optimiert worden, um den Schleppabstand zu minimieren.

Neben den servomotorischen Achsen in der Maschine werden pneumatische Aktoren und Prozessdrücke in der Werkzeugtechnik eingesetzt. Diese Aktoren besitzen eine Totzeit zwischen dem Schaltsignal der Maschinensteuerung und dem erwünschten Druckaufbau. Diese Totzeit ist dem Maschinenbediener nicht bekannt und variiert je nach Werkzeug. Um die qualitätsbestimmenden Parameter zu identifizieren, ist es notwendig, diese Zeiten zu kennen. Dies wurde durch die Messung der Schaltsignale der Ventile und der resultierenden Aktionen erreicht (Kapitel 14.3).

6 Identifizierung der qualitätsbestimmenden Maschineneinstellparameter im Thermoformen

Im Gegensatz zu veröffentlichten Arbeiten von Beilharz und Hegemann ([Bei10], [Heg04]) wird in diesem Kapitel nicht die Thermoformbarkeit (definiert durch die Wanddickenverteilung) verschiedener Materialien untersucht, sondern die Beeinflussungsmöglichkeiten einiger Formteilparameter durch die existierenden Manipulationsmöglichkeiten am Prozess. Die Untersuchung wurde beispielhaft an einem nukleierten Polypropylenhomopolymer der Firma Total Petrochemical durchgeführt (PPH 4022, Datenblatt in Kapitel 14.6).

Um qualitätsbestimmende Parameter beim Thermoformen von Verpackungen zu identifizieren, müssen die an die Formteile gestellten Qualitätsmerkmale bekannt sein. Diese Merkmale können von unterschiedlichen Instanzen definiert werden. Die erste Instanz ist der Verbraucher oder der Endnutzer der Verpackung, dieser kann Anforderungen an Transparenz oder Haptik eines Verpackungsmittels stellen. Weitere Anforderungen werden durch das zu verpackende Füllgut definiert, z. B. Wasser- oder Sauerstoffbarriere zum Schutz des Packguts. Nicht zuletzt werden Anforderungen an die mechanische Stabilität verlangt, um die Weiterverarbeitung der Verpackung nach dem Thermoformen, das Abfüllen, den sicheren Transport und Lagerung zu gewährleisten. Auch die Thermoformanlage und das Werkzeug setzen gewisse Formteileigenschaften für einen sicheren Prozessablauf voraus. Dies betrifft insbesondere die Stabilität des Formteilbodens, da in diesem Bereich die Auswerfer angreifen, und Geometrieabweichungen, die das Stapeln beeinflussen können. Im Folgenden werden die wichtigsten Formteilmerkmale beschrieben. In der Analyse wird ein Schwerpunkt auf die Untersuchung der Wanddickenverteilung und den daraus resultierenden mechanischen Eigenschaften gelegt.

6.1 Qualitätsmerkmale von thermogeformten Verpackungen

6.1.1 Masse

Ein wesentliches, das Formteil definierendes Merkmal, ist dessen Masse. Die Masse wird in erster Linie durch die verwendete Folienstärke beeinflusst. Durch die Masse werden unter anderem die mittlere Wanddicke und dadurch auch die mechanischen Festigkeiten festgelegt. Die Masse ist in erster Linie eine Hilfsgröße, die zur Erreichung anderer Eigenschaften dient. In Einzelfällen kann Sie als Qualitätsgröße selbst relevant werden, unter anderem dann, wenn die Füllrichtungen die Füllmenge über das Gesamtgewicht steuern und dadurch in zu leichte Formteile mehr Füllgut einfüllen. Dies kann zu erheblichen Verlusten führen.

6.1.2 Wanddickenverteilung

Die Wanddickenverteilung eines thermogeformten Formteils stellt das Ergebnis der Umformung des Halbzeugs dar. Die Wanddickenverteilung ist ein Qualitätsmerkmal, da viele Eigenschaften des Formteils von der Wanddickenverteilung abhängen. So ist zum einen der Prozessablauf von der erreichbaren Wanddickenverteilung abhängig, da diese die Kühlzeit beeinflusst. Zum anderen werden mechanische und optische Eigenschaften sowie Barriereigenschaften direkt von den Wanddicken und deren Verteilung beeinflusst. Eine homogene

Wanddickenverteilung ist bei thermogeformten Produkten nur in Ausnahmefällen erreichbar. Zudem muss eine homogene Wanddickenverteilung nicht immer mit der Verbesserung von mechanischen Eigenschaften eines Produkts korrelieren. Als wichtigste Einflussgrößen auf die Wanddickenverteilung werden, bei konstantem Halbzeug, in der Literatur die Umformtemperatur, die Geometrie, das Material und die Temperatur des Vorstreckers genannt.

6.1.3 Mechanische Anforderungen und Topload

Mechanische Anforderungen an das Formteil werden im Wesentlichen aus dem Handling in der Thermoformanlage, den Folgeprozessen und dem Transport gestellt. So muss das Formteil eine ausreichende Steifigkeit im Bereich des Formteilbodens aufweisen, da hier die Auswerfer im Thermoformwerkzeug angreifen.

Eine Größe zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften von Verpackungsmitteln ist der Stauchdruck oder Topload. Dieser beschreibt die Last, die ein Formteil aufnehmen kann, ohne zu beulen. Der Stauchdruck ist definiert als die maximale Kraft, bevor ein Kraftabfall von 5 % registriert wird. Der Kraftabfall wird durch das Ausbeulen des Formteils in der Seitenwand bewirkt (Bild 21). Wichtig ist diese Größe zur Beurteilung der Stapel- und Palettierbarkeit der Formteile. Der Stauchdruck ist neben den Halbzeugeigenschaften von der Wanddickenverteilung abhängig. Geprüft werden hier die leeren Formteile durch Stauchung zwischen zwei Druckplatten (Bild 21). Angelehnt ist die Prüfung der Formteile an die Norm „Stauchprüfung für Kunststoffbehältnisse“ nach DIN 55526.

Die Stauchprüfung wird eingesetzt, um die maximalen zulässigen Belastungen des Verpackungsmittels zu kennen. Diese Last darf bei Transport und Lagerung der gefüllten Formteile nicht überschritten werden. Geprüft werden in der Regel die leeren Formteile, da ein verschlossener und versiegelter Becher durch den sich aufbauenden Innendruck eine höhere Last erträgt und in der Regel keine versiegelten Formteile beim Thermoformer verfügbar sind.

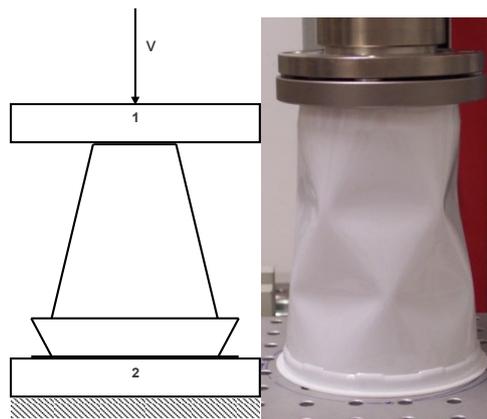


Bild 21: Prinzip der Stauchprüfung und Beulmuster an gestauchtem Formteil

6.1.4 Geometrische Anforderungen

Die Geometrie der Formteile wird durch die Negativform des Werkzeugs definiert. Es können jedoch Abweichungen von dieser Werkzeugkontur auftreten. Diese Abweichungen können Ziehunschärfen in Eckbereichen und an engen Radien darstellen oder durch Schwindung oder Verzug durch ungleichmäßiges Abkühlen hervorgerufen werden. Ziehunschärfen entstehen an

Kanten des Werkzeugs, die einen zu engen Radius aufweisen, sodass das Halbzeug hier nicht an die Werkzeugwand angelegt werden kann. In Bild 22 ist eine Ziehunschärfe im Übergang von Formteilmwand in Formteilm Boden vorgesehen. Dies ist daher begründet, dass sich hier ein Abluftspalt für die durch die Folie verdrängte Luft befindet, sodass hier kein Radius vorgesehen werden kann. Ziehunschärfen können bei kleinen Radien je nach Materialeigenschaften an verschiedenen Stellen des Formteils auftreten. Ziehunschärfen sollten möglichst vermieden werden, da an diesen Stellen keine direkte Kühlung durch die Werkzeugwand erfolgen kann. Dies kann zu Verzug und Geometrieabweichungen führen.

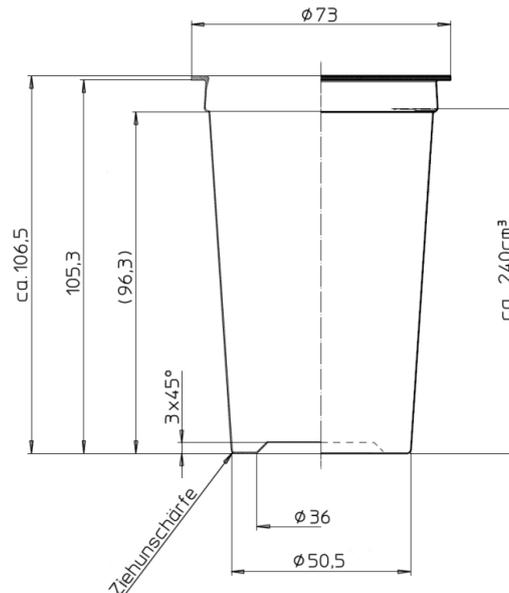


Bild 22: Formteilzeichnung mit Bemaßung und Ziehunschärfen

Insbesondere im Randbereich von Produkten kann es durch Materialanhäufungen zu Verzug durch ungleichmäßiges Abkühlen kommen. Dieser äußert sich hier in Form von sich aufstellenden Rändern oder Ovalitäten. Dabei stellen die sich aufstellende Siegelränder ein Problem bei der Weiterverarbeitung dar, da sich die Produkte nicht sicher siegeln lassen. Ovalitäten führen zu Schwierigkeiten beim Stapeln und Entstapeln, da die Produkte klemmen können.

6.1.5 Barriereanforderungen

Um optimalen Schutz des zu verpackenden Gutes zu gewährleisten, müssen die Formteile gewisse Barriereigenschaften aufweisen. Die Anforderungen variieren hier je nach Typ des zu verpackenden Guts. Die wichtigsten Barrieren im Verpackungsmittelsektor für Lebensmittel sind Barrieren gegen Wasserdampf, Sauerstoff und UV-Strahlung. Gute Barriereigenschaften gegen Wasserdampf bietet Polypropylen. Als Sauerstoffbarriere hat sich Ethylen-Vinylalkohol-Copolymer (EVOH) bewährt. Gegen UV-Strahlung werden eingefärbte Thermoplaste eingesetzt. Um mehrere Barriereigenschaften zu kombinieren, hat sich die Coextrusion von Mehrschichtfolien durchgesetzt. Im Bereich Lebensmittel ist ein Verbund aus PP und EVOH Stand der Technik im Bereich der Barrierefolien. Die Barriereigenschaften einer Folie sind von den jeweiligen Schichtdicken der Barrierschichten in der Folie und damit direkt von der Wanddickenverteilung im Formteil abhängig.

6.2 Versuchsplanung und -durchführung

Die Einflussanalyse setzt sich aus zwei Teilschritten zusammen. Im ersten Schritt sind Grundsatzuntersuchungen durchgeführt worden, die zum Ziel hatten kritische Prozesspunkte darzustellen. Zudem sind dabei Einflüsse der Werkzeuggeometrie, insbesondere der Vorstrecker, untersucht worden. Im zweiten Schritt wurden die Einstellparameter des Formprozesses in zwei vollfaktoriellen statistischen Versuchsplänen untersucht. Um die Versuchspläne so kompakt wie möglich zu gestalten, wurden nur Parameter in die Versuchsplanung mit aufgenommen, die während des Umformprozesses auf die Folie wirken. Bei einer kombiniert formenden und stanzenden Maschinen sind dies alle Einstellparameter des Formprozesses sowie das Material und dessen thermische Vorgeschichte. Alle anderen Einstellparameter beeinflussen nur den Aufheizprozess, etwa durch Variation der Zykluszeit, oder haben auf der Umformung keinen Einfluss. Der Aufheizprozess wurde anhand Einparameterversuche und Prozessbeobachtungen untersucht.

Die Einstellparameter des Formprozesses beziehen sich immer auf den Zeitpunkt, zu dem das Werkzeug vollständig geschlossen ist. Für die Durchführung der Versuche wurden die Einstellparameter verändert. So ist der Aufbauzeitpunkt des Formdrucks zu untersuchen, allerdings in Bezug auf den Zeitpunkt Vorstecker unten, zudem wird über die Dauer der Formluft die Kühlzeit bestimmt. Aus diesem Grund wurden die Einstellparameter der Versuchsanlage überarbeitet, mit dem Hintergrund, dass die Startzeitpunkte der Prozessdrücke und Vorstreckbewegung nur in Relation zueinander die Wanddickenverteilung oder andere Produktmerkmale beeinflussen können. Die Prozessdrücke werden deshalb, bis auf den Niederhaltervordruck, auf die Vorstreckerbewegung referenziert (Tabelle 2). Daraus ergibt sich der Vorteil, dass sich bei Änderung eines Parameters keine weiteren Änderungen im Prozessablauf ergeben.

Tabelle 2: Überarbeitete Maschineneinstellparameter des Formprozesses

Teilprozess	Alter Parameter	Neuer Parameter	Bezugszeitpunkt	Formelzeichen
Kühlen	Formzeit		t_{FS}	t_{Form}
Niederhalter (Klemmung)	Vordruck ein in ms		t_{FS}	$t_{vor,ein}$
	Vordruck aus in ms	Dauer Vordruck	-	Δt_{vor}
	Vordruck in bar		-	p_{vor}
	Hauptdruck ein in ms		$t_{VS,ab}$	$t_{NDH,ein}$
	Hauptdruck aus in ms	Hauptdruckdauer in ms	-	Δt_{NDH}
	Hauptdruck in bar		-	p_{NDH}
Vorstrecken	Start Vorstrecken in ms		t_{FS}	$t_{VS,ab}$
	Start Rückfahrt in ms	Wird automatisch auf spätesten Zeitpunkt gelegt.	-	$t_{VS,auf}$
	Ziehtiefe in mm		-	s_{VS}
	Geschwindigkeit in m/s		-	v_{VS}
Ausformen	Start Druckaufbau in ms		$t_{VS,unten}$	$t_{F,ein}$
	Start Druckabbau in ms	Dauer Formluft	-	$t_{F,aus}$
	Formdruck in bar		-	p_F

Im ersten Versuchsplan liegt der Fokus auf der Interaktion zwischen Klemmen und Vorstrecken des Halbzeugs (Tabelle 3). Variiert wurden die Klemmkraft (Hauptdruck) und der Einschaltzeitpunkt des Hauptdrucks, da diese Parameter die Kühlung und Kalibrierung des Siegelrands beeinflussen. Zudem wurde die Vorstreckerkinematik relativ zum Startzeitpunkt des Hauptdruckaufbauzeitpunktes variiert. Der Einstellbereich des Niederhalters und Vorstreckers in den Versuchen wurde an Maschineneinstellenden von Kundenmaschinen angelehnt. Der Startzeitpunkt des Hauptdrucks wurde im Bereich der Vorstreckerbewegung variiert. Der Startzeitpunkt Vorstrecker wurde um den Zeitpunkt Start Formen gelegt.

Tabelle 3: Versuchspunkte zur Untersuchung der Interaktion von Klemmen und Vorstrecken

Nr.	Hauptdruck in bar	Einschaltzeitpunkt Hauptdruck in ms	Startzeitpunkt Vorstrecker auf Hauptdruckstart bezogen in ms.	Vorstreckergeschwindigkeit in m/s
1	6,41	85	35	0,93
2	3,59	85	35	0,93
3	6,41	15	35	0,93
4	3,59	15	35	0,93
5	6,41	85	-35	0,93
6	3,59	85	-35	0,93
7	6,41	15	-35	0,93
8	3,59	15	-35	0,93
9	6,41	85	35	0,57
10	3,59	85	35	0,57
11	6,41	15	35	0,57
12	3,59	15	35	0,57
13	6,41	85	-35	0,57
14	3,59	85	-35	0,57
15	6,41	15	-35	0,57
16	3,59	15	-35	0,57

Im zweiten Versuchsplan sind die Einflüsse von Vorstrecken und Formdruckaufbau und deren Interaktion untersucht worden. Dabei war es unter anderem Ziel, zu zeigen, inwieweit die Kühlung (Variation von Formdruck und Dauer) und die Wanddickenverteilung (Variation der Vorstreckerkinematik und Formdruckaufbauzeitpunktes) beeinflusst werden können. Die Grenzen wurden hierbei durch die festgelegte Zykluszeit und Zentralpunkte des ersten Versuchsplans bestimmt.

Tabelle 4: Versuchspunkte zur Untersuchung der Interaktion Vorformen und Ausformen

Nr.	Formdruck in bar	Zeitversatz: Vorstrecker unten - Formluft EIN in ms	Dauer der Formluft in ms
1	3,0	-20	640
2	6,5	-20	640
3	3,0	20	640
4	6,5	20	640
5	3,0	-20	860
6	6,5	-20	860
7	3,0	20	860
8	6,5	20	860
9	3,0	-20	640

Nr.	Formdruck in bar	Zeitversatz: Vorstrecke unten - Formluft EIN in ms	Dauer der Formluft in ms
10	6,5	-20	640
11	3,0	20	640
12	6,5	20	640
13	3,0	-20	860
14	6,5	-20	860
15	3,0	20	860
16	6,5	20	860

Alle übrigen Maschineneinstellparameter sind konstant gehalten worden. Um Einflüsse durch Temperaturschwankungen auszuschließen, wurde die Halbzeugtemperatur vor dem Formen während der Versuchsdurchführung gemessen. Die Einstellung der Halbzeugtemperatur wurde anhand der Ausformschärfe bei einem Formdruck von 6,5 bar und Beurteilung der Transparenz festgelegt. Eine Variation der Temperatur wurde während dieser Versuche nicht durchgeführt. Die Einflüsse der Temperatur werden in den Kapiteln 6.2.5 dargestellt. Die Zykluszeit betrug bei den Versuchen 2,4 s.

6.2.1 Einflüsse der Formprozesseinstellungen auf die Wanddickenverteilung

Wie in Kapitel 6.1 bereits beschrieben ist die Wanddickenverteilung ein zentrales Qualitätskriterium, da von dieser weitere Eigenschaften wie mechanische Festigkeit und Barriereigenschaften direkt abhängen. Da die Formgebung mit Einsatz des Formdruckes und dem Anlegen des Halbzeugs an die Werkzeugwand beendet ist, können nur Größen vor diesem Zeitpunkt die Wanddickenverteilung beeinflussen. Dies sind die Vorstreckergeschwindigkeit, die Ziehtiefe des Vorstreckers und dessen Geometrie. Zudem kann die zeitliche Abfolge von Schließen des Werkzeugs, Klemmung durch die Niederhalter und Start der Vorstreckbewegung variiert werden.

Zunächst wurden die Grenzen des Versuchsraums definiert, um kritische Prozessabläufe zu vermeiden. Dies betrifft unter anderem den Startzeitpunkt der Vorstreckbewegung bezogen auf den Zeitpunkt eines geschlossenen Werkzeugs und den Formdruckeinsatzzeitpunkt bezogen auf das Ende der Vorstreckbewegung. Thermoformen ist, nach VDI-Richtlinie 2008, definiert als Streckziehen eines erwärmten fest eingespannten Zuschnitts unter Ausdünnung der Ausgangswanddicke. Entgegen dieser Definition besteht bei Rollenautomaten die Möglichkeit mit dem Verstrecken zu beginnen, ohne dass das Werkzeug geschlossen ist. Dadurch ist das verstreckte Material pro Kavität nicht definiert und es kann Material aus dem Restgitter oder einer benachbarten Kavität nachfließen.

Um den Einfluss dieses Verfahrensablaufs darzulegen, wurde ein Versuch mit zwei unterschiedlichen Startzeitpunkten des Vorstreckers durchgeführt (Bild 23). Der frühe Start des Vorstreckers wird von Maschinenbedienern favorisiert, da sich dadurch Zykluszeiteinsparungen ergeben und auf den ersten Blick verbesserte Formteileigenschaften einstellen. Die im Versuch getesteten Bewegungsprofile sind in Bild 23 dargestellt. Zudem ist die Position der Klemmeinrichtung (Niederhalter) dargestellt. Diese wird beim Schließen des Werkzeugs durch die Folie nach oben ausgelenkt. Durch diese Messung kann ermittelt werden, zu welchem Zeitpunkt eine Klemmung erfolgt und wann die Schließbewegung des Werkzeugs abge-

geschlossen ist. Der Vorstrecker wird zum Zeitpunkt „Werkzeug geschlossen“ (Start Formen) und 80 ms früher gestartet. Durch den früheren Start legt der Vorstrecker ca. 50 % seines Wegs zurück, bevor das Werkzeug komplett geschlossen ist. Ein erstes Klemmen erfolgt nach ca. 30 % des Wegs.

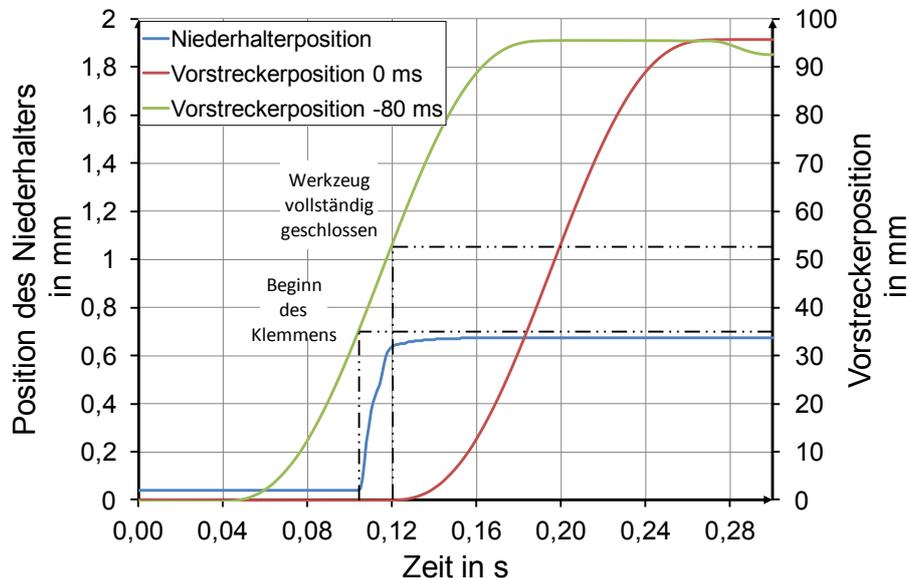


Bild 23: Zeitliche Abfolge des Zeitpunkts "Werkzeug geschlossen" und Start der Vorstreckbewegung.

Es konnte gezeigt werden, dass die mittleren Massen der Versuchspunkte sich um ca. 6 % unterscheiden (Bild 24). Die Vermutung, dass durch die fehlende Folienklemmung Material nachfließen kann, konnte bestätigt werden. Dadurch, dass das Material bei offenem Werkzeug ungehindert in die Kavität nachfließen kann, erhöht sich die mittlere Masse eines Nutzens. Eine später einsetzende Vorstreckerbewegung hat hingegen keinen Einfluss auf die Masse des Formteils.

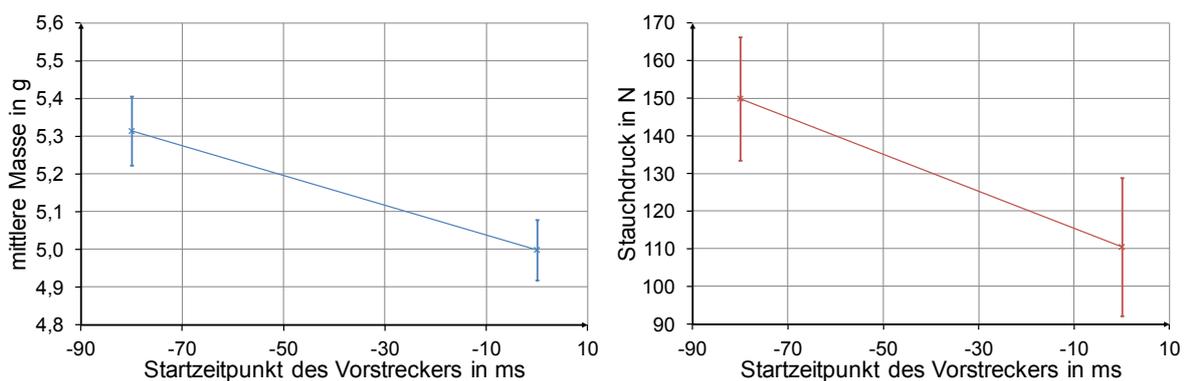


Bild 24: Mittlere Masse und Stauchdruck der Formteile in Abhängigkeit des Startzeitpunktes des Vorstreckers

Durch die größere Masse der Produkte konnte eine Zunahme der mittleren Wanddicke (Bild 25) und damit der Bechersteifigkeiten (Bild 24) festgestellt werden. Neben der Zunahme der mittleren Wanddicken nimmt auch die Inhomogenität der Wanddickenverteilung zu (Bild 25). Diese Inhomogenität lässt sich unter anderem dadurch erklären, dass die Kavitäten sich gegenseitig beeinflussen, solange die Folie nicht geklemmt ist und Material verstreckt wird.

Dabei können sich unter anderem lokale Temperaturunterschiede auf mehrere Kavitäten auswirken, auch wenn diese räumlich getrennt von der Kavität auftreten.

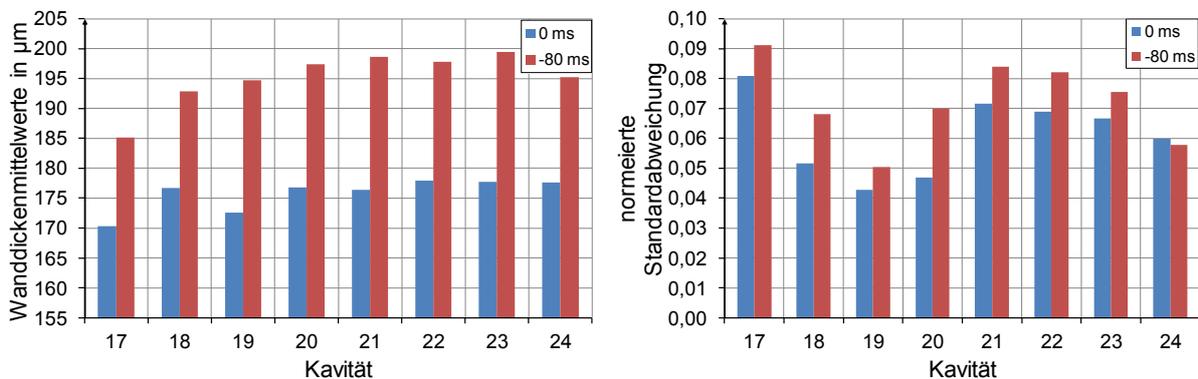


Bild 25: Mittlere Wanddicken der Becheseitenwand einer Kavitätenreihe eines 24fach Werkzeug (links). Auf die mittlere Wanddicke normierte Standardabweichung der Wanddickenverteilung der Becheseitenwand (rechts).

Untersucht man die Unterschiede der Wanddickenverteilung genauer, so lässt sich feststellen, dass die Zunahme der Wanddickeninhomogenität durch eine Dickstelle am Becherumfang verursacht wird. Diese Dickstelle nimmt in bodennahen Bereichen gegenüber der mittleren Wanddicke an der entsprechenden Höhe deutlich zu (Bild 26). Dass die Beeinflussung der Kavitäten unterschiedlich ist, kann an Kavität 24 festgestellt werden (Bild 25). An Formteilen dieser Kavität kann keine Zunahme der Inhomogenität festgestellt werden.

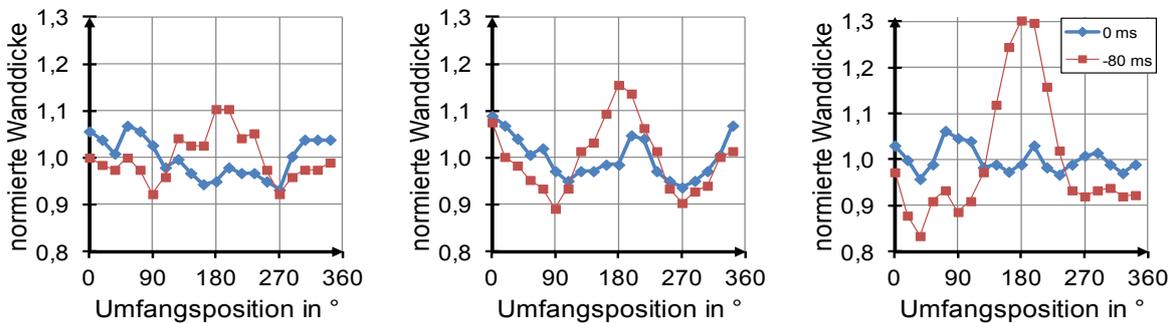


Bild 26: Wanddickenverteilung am Umfang der Mantelfläche eines Bechers. Siegelrandnahe Wanddicke (links), Wanddicke auf halber Becherhöhe (Mitte), bodennahe Wanddicke (rechts)

Damit konnte gezeigt werden, dass die Verbesserung der Formteileigenschaften bei früherem Vorstreckerstart durch die Zunahme der Formteilmasse begründet ist. Allerdings erhöhen sich bei diesem Betriebspunkt die Streuungen der Formteileigenschaften, sodass die Prozessfähigkeit der Anlage sinkt. Um einen robusten Betriebspunkt zu erhalten, ist es aus den beschriebenen Gründen notwendig im Einzelfall zu prüfen, wann der Vorstrecker mit seiner Verstrekbewegung einsetzen darf, ohne dass eine Zunahme des Formteilmasses festgestellt wird.

Einen weiteren Einfluss besitzt der Einsatzzeitpunkt der Formluft in Bezug auf die Vorstreckerbewegung. Die unterschiedlichen Prozessabläufe sind in Bild 27 dargestellt. Die Prozesseinstellungen sind bis auf die Einsatzzeitpunkte des Formdrucks identisch. Am Formdruckverlauf kann festgestellt werden, dass sich nicht nur zeitlich der Aufbau verschiebt, sondern zudem das eingestellte Druckniveau nicht erreicht wird. Intention des vorzeitigen Formdruck-

einsatzes ist wie oben genannt eine Einsparung von Zykluszeit, da der Vorstrecker die letzten Millimeter des Fahrwegs, bedingt durch das Abbremsen, relativ langsam zurücklegt. Für ca. 6 % (6 mm) des Verstreckwegs benötigt er, bei der gewählten Einstellung, 17 % (30 ms) der Bewegungszeit.

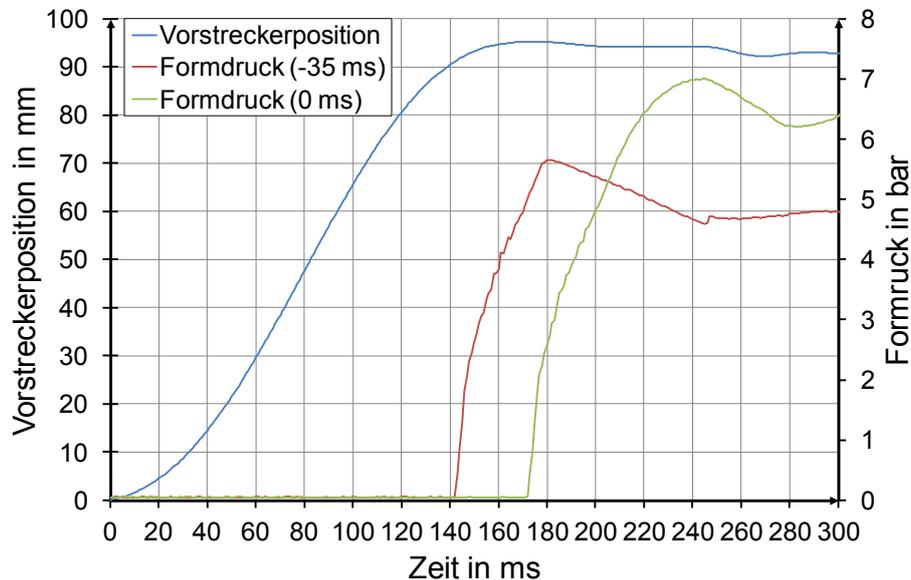


Bild 27: Vorstreckerposition und Druckverläufe des Formdrucks mit unterschiedlichen Druckaufbauzeitpunkten in Bezug auf das Ende der Vorstreckbewegung

Durch die geringe Verschiebung des Formdruckeinsatzzeitpunktes verändert sich allerdings das Verformungsergebnis signifikant. Typische Wanddickenverteilungen für beide Betriebspunkte sind in Bild 28 dargestellt. Die Wanddicke ist im frei verstreckten Seitenwandbereich bei beiden Prozessabläufen konstant. Setzt die Formluft vor Beendigung der Vorstreckerbewegung ein, ist dieser Bereich ca. 5 mm kürzer (Bild 28, rechts). Dies entspricht der Wegdifferenz, die durch den voreilenden Formlufteinsatz „eingespart“ wird.

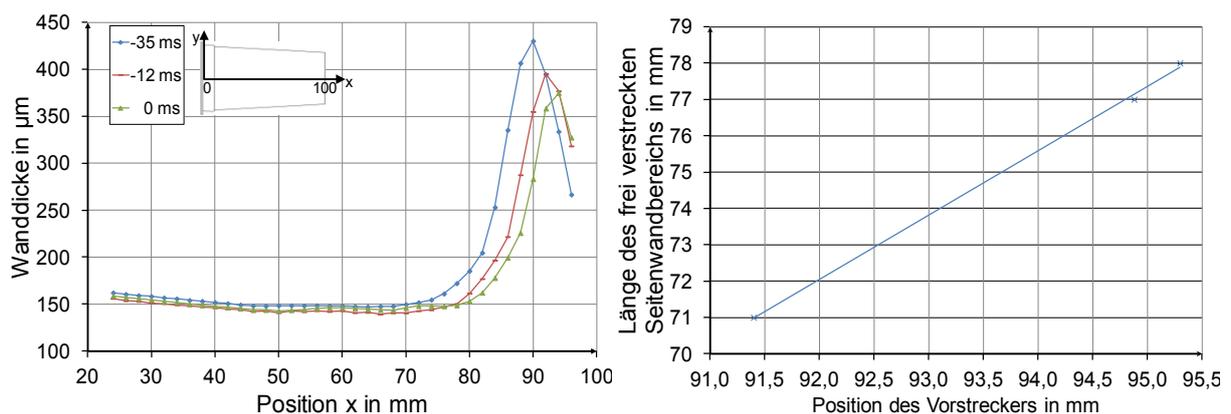


Bild 28: Wanddickenverlauf der Formteilseitenwand bei Variation des Zeitpunkts des Formdruckaufbaus (links) und Einfluss des frei verstreckten Bereichs in Abhängigkeit der Vorstreckerposition zum Zeitpunkt des Formdruckaufbaus

Anschließend an den relativ konstanten Teil ist eine Dickstelle zu erkennen, diese bildet sich durch weniger verstrecktes Material, das Kontakt mit dem Vorstrecker hatte. Auch die Dickstelle verschiebt sich durch den geänderten Einsatzzeitpunkt der Formluft. Durch die hohen

Verstreckgrade im Übergang von Seitenwand zu Boden nimmt die Wanddicke hier nochmals ab.

Betrachtet man verschiedene Einsatzzeitpunkte, so zeigt sich, dass bei früherem Einsetzen der Formluft der Bodenbereich des Formteils dünner wird (Bild 29), gleichzeitig verschiebt sich die Dickstelle in der Wandung des Formteils nach oben (Bild 28). Die Wirkungsweise ist vergleichbar mit der Variation der Ziehtiefe, wodurch der am Vorstrecker haftende Bereich des Halbzeugs stärker verstreckt wird. Nachteil ist hier allerdings, dass der Formlufteinsatz zu einem Zeitpunkt erfolgt, an dem kleine Änderungen des Druckaufbaus, z. B. von Kavität zu Kavität, große Wirkungen auf die Wanddickenverteilung zeigen. Bei einer Änderung des Einsatzzeitpunkts um 10 ms kann sich eine Änderung der Wanddicke um 25 % ergeben.

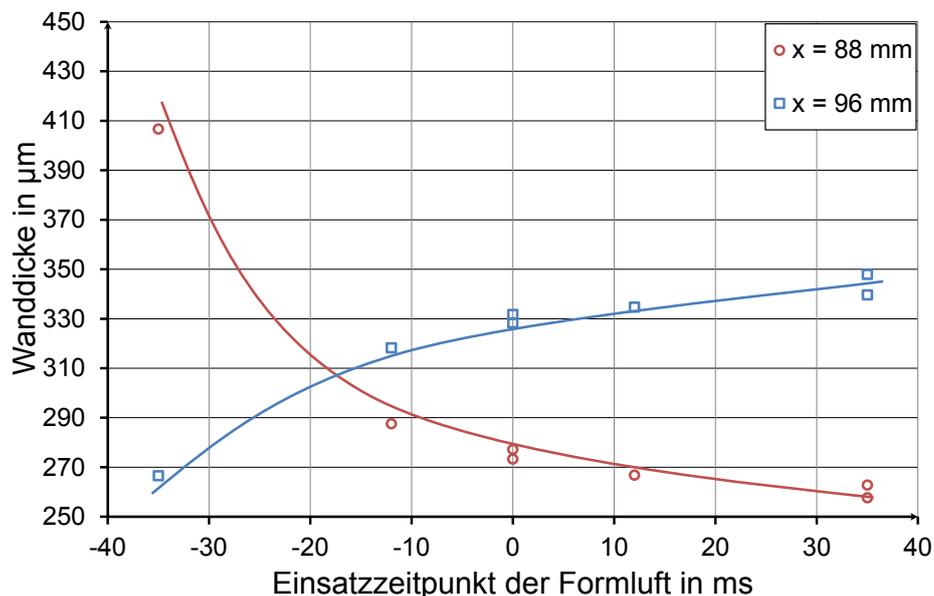


Bild 29: Wanddickenmittelwerte an zwei Positionen des Bechers bei Variation des Einsatzzeitpunkts der Formluft bezogen auf das Ende des mechanischen Verstreckens.

Nachteil bei beiden Einstellungen, sowohl bei einem voreilenden Vorstrecker als auch bei voreilender Formluft, ist, dass diese Betriebspunkte empfindlich auf Störeinflüsse reagieren. Dies zeigt sich in der Betrachtung der Standardabweichungen und Streubreiten. Zudem können diese Betriebspunkte Unterschiede über die Kavitäten verursachen. Daher sind diese Einstellungen zu meiden. Neben den oben genannten Parametern spielt die Umformtemperatur eine entscheidende Rolle bei der Ausprägung der Wanddickenverteilung. Da sich Temperaturänderungen nur relativ träge einstellen, wurde der Einfluss der Umformtemperatur in einem Einparameterversuch untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Bodenwanddicke mit steigender Temperatur zunimmt (Bild 30). Betrachtet man die Wanddicke der Seitenwand in Bodennähe (90 mm), so kann eine Erhöhung der Wanddicke um 75 % festgestellt werden. Die Seitenwanddicke auf halber Formteilhöhe (52 mm) kann nicht signifikant beeinflusst werden (Bild 30).

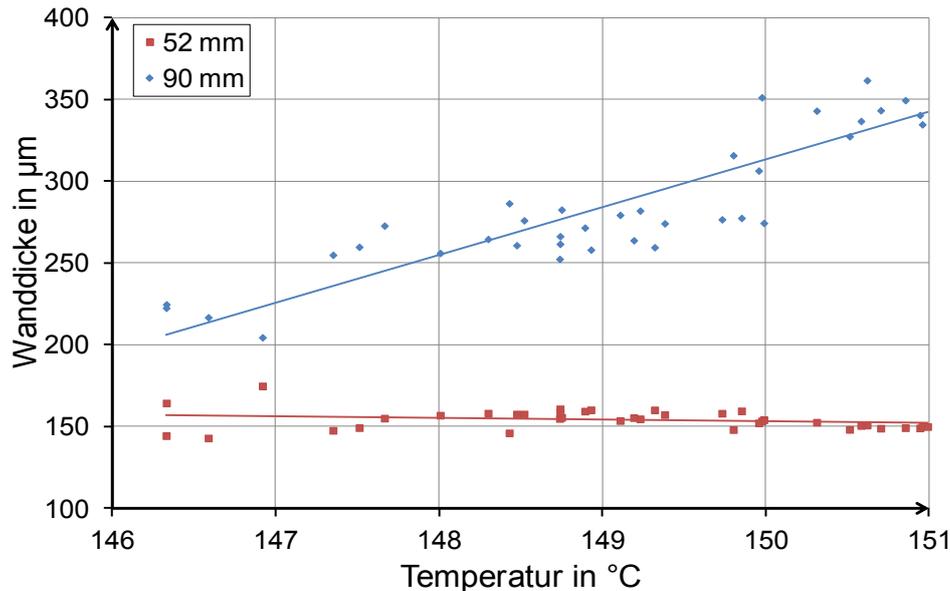


Bild 30: Wanddicke am Boden (92 mm) und Wanddicke auf halber Formteilhöhe (52 mm) in Abhängigkeit der Umformtemperatur (IR-Messung)

Bei der Untersuchung der Interaktion der Klemmung und der Vorstreckerkinematik (Bild 31, links) konnte eine signifikante Änderung der Wanddicke im bodennahen den Vorstrecker berührenden Bereich festgestellt werden. Die signifikanten Einflüsse waren die Vorstreckergeschwindigkeit und der Zeitversatz von Vorstrecken Start zu Klemmung Start. Dies deutet auf ein geschwindigkeitsabhängiges Versteckverhalten des verwendeten Polypropylens hin. Die Geschwindigkeitsabhängigkeit wurde von Beilharz ebenfalls beobachtet. Die Ausprägung der Abhängigkeit ist von dem Material abhängig [Bei10]. Zudem kann beim Start der Vorstreckerbewegung vor der Klemmung mehr Material aus dem Randbereich des Formteils nachgeführt werden. Dieser Effekt verstärkt sich, wenn die Vorstreckergeschwindigkeit zunimmt (signifikante 2-fach-Wechselwirkung). Im Vergleich mit dem Einfluss der Umformtemperatur von 57 % ist die Einflussmöglichkeit der bodennahen Wanddicken durch einen geänderten Formungsablauf auf 4 – 8 % beschränkt. Diese Werte sind nur erreicht worden, wenn die Einstellparameter deutlich verändert wurden. Der Versuchsraum der Vorstreckergeschwindigkeit betrug bei den Versuchen von $v = 0,57 \frac{m}{s}$ bis $v = 0,9 \frac{m}{s}$ und damit eine Variation von 37 %. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine verlängerte Vorstreckerfahrt direkt die Zykluszeit beeinflusst. Dies bedeutet auch, dass bei einer Änderung der Umformtemperatur oder des Versteckverhaltens eine Anpassung der Umformparameter nicht zielgerichtet ist. Vielmehr muss die Umformtemperatur beziehungsweise das Versteckverhalten konstant gehalten werden. Bei der Variation des Formdrucks (Bild 31, rechts) zeigte sich nur ein signifikanter Effekt, wenn der Formdruck vor Erreichen der Endposition des Vorsteckers aufgebaut wird. Dadurch wird erreicht, dass die bodennahe Wanddicke abnimmt, während sich die Dickstelle der Wanddicke in Richtung Siegelrand verschiebt. Dieser Effekt wurde schon in Bild 28 beschrieben.

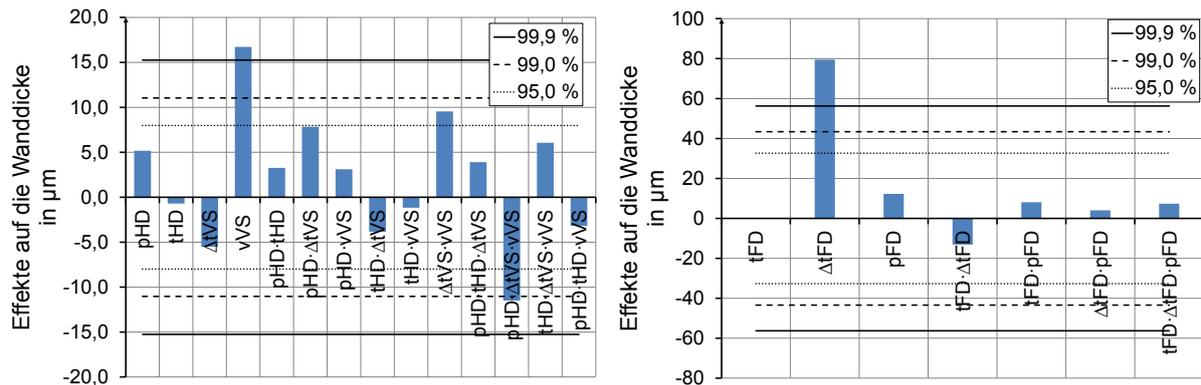


Bild 31: Effekte auf die bodennahe Wanddicke (pHD: Druck des Niederhalters; tHD = Dauer, die Niederhalterdruck anliegt; DtVS: Zeitversatz des Starts der Vorstreckerbewegung in Bezug auf den Druckaufbau des Niederhalters; vVS: Vorstreckergeschwindigkeit)

Die Wanddicken, die frei ohne Berührung des Vorstreckers verstreckt wurden, zeigen ebenfalls signifikante Einflussfaktoren. So kann durch Erhöhung der Klemmkraft (Niederhalterhauptdruck pHD) und schnelleres Klemmen (Einschaltzeitpunkt tHD) die Wanddicke erhöht werden. Dies ist dadurch begründet, dass durch das frühere und stärkere Klemmen der Siegelrand stärker geprägt wird und mehr Material zum Verstrecken bereitsteht. Die Wanddicke wird zudem durch Starten des Verstreckens vor dem Klemmen vermindert. Allerdings besitzen diese Effekte keine praktische Relevanz, da sie die Wanddickenverteilung in der Größenordnung von $\pm 0,5\%$ (Effekt von $1,5\ \mu\text{m}$) verändern (Bild 32).

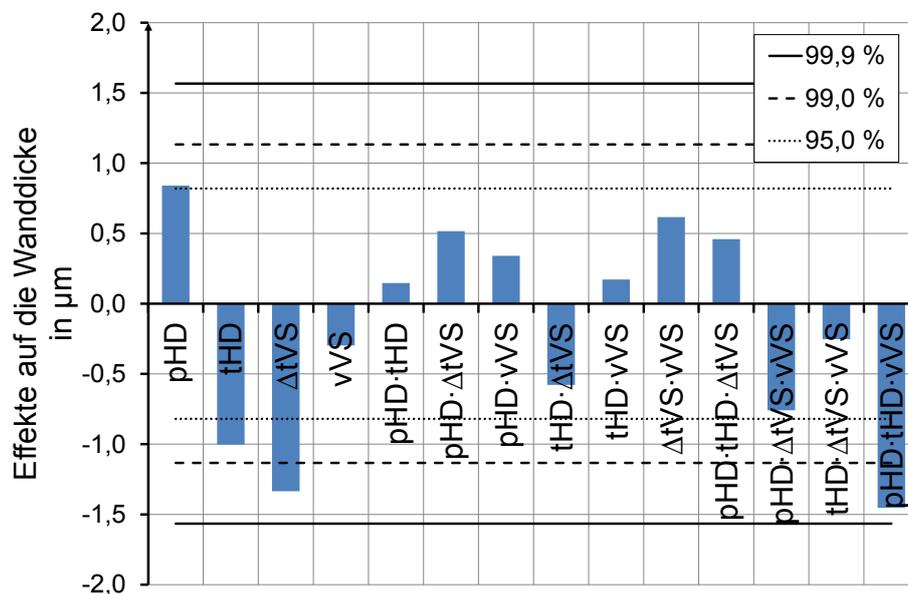


Bild 32: Effekte auf die mittige Wanddicke (pHD: Druck des Niederhalters; tHD = Dauer, die Niederhalterdruck anliegt; DtVS: Zeitversatz des Starts der Vorstreckerbewegung in Bezug auf den Druckaufbau des Niederhalters; vVS: Vorstreckergeschwindigkeit)

6.2.2 Einflüsse der Formprozesseinstellungen auf die Siegelrandgeometrie

Die Randgeometrie bei Verpackungen ist wichtig für die Nachbearbeitung nach dem Thermoformen. Die Randgeometrie beeinflusst die Siegel- oder Bördelfähigkeit des Randes. Neben der Siegelranddicke, die die Stabilität des Randes definiert, sind dabei unter anderem die Ovalität und der Siegelrandwinkel entscheidend für die Qualität eines Formteils.

Signifikante Effekte auf die Siegelranddicke besitzen die Einstellungen des Niederhalters (Bild 33). Bei einem Niederhalter mit zwei Druckstufen konnte festgestellt werden, dass die niedrige Druckstufe (Vordruck max. 2 bar) nur die Kühlung beeinflusst. Der Hauptdruck (pHD) hingegen kann zur Kalibrierung der Randdicke genutzt werden. Zudem kann durch eine auf den Druckaufbau des Hauptdrucks bezogene verzögerte Vorstreckbewegung (DtVS) die Siegelranddicke vergrößert werden. Durch den Hauptdruck wird das Material stark gekühlt und geklemmt, setzt nun die Vorstreckerbewegung verzögert ein, so kann weniger Material aus dem Klemmspalt gezogen werden, wodurch die Siegelranddicke größer wird. Der Einfluss der vergrößerten Verstreckgeschwindigkeit kann dadurch begründet werden, dass durch eine schnellere Vorstreckerbewegung dem Material weniger Zeit zur Retardation aus dem Klemmspalt gelassen wird.

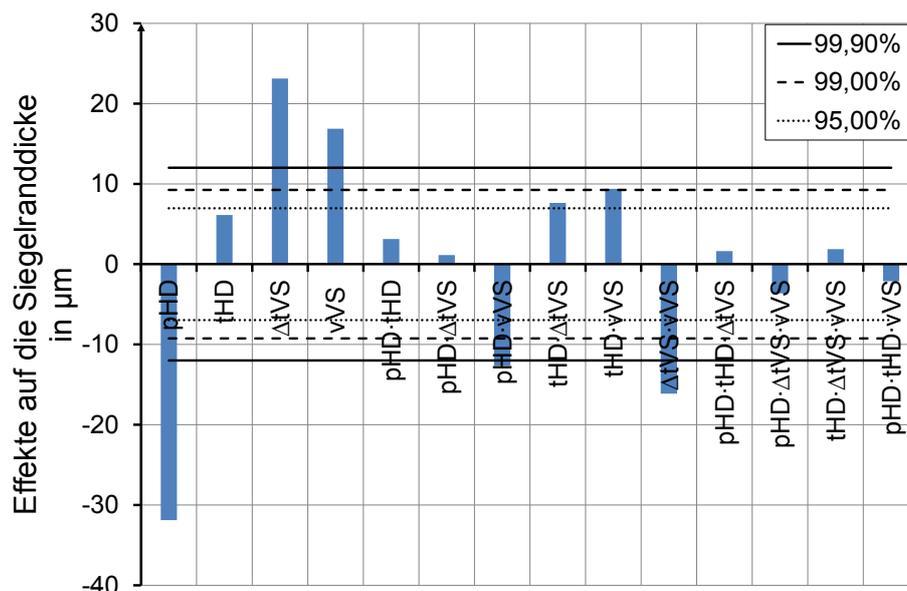


Bild 33: Effekte auf die Siegelranddicke (pHD: Druck des Niederhalters; tHD = Dauer, die Niederhalterdruck anliegt; DtVS: Zeitversatz des Starts der Vorstreckerbewegung in Bezug auf den Druckaufbau des Niederhalters; vVS: Vorstreckergeschwindigkeit)

6.2.3 Einflüsse der Formprozesseinstellungen auf mechanische Formteileigenschaften

Ein Kennwert um mechanische Eigenschaften von Verpackungen zu beschreiben, ist der Stauchdruck (Topload). Bei der Prüfung dessen wird das Versagen der Verpackungsmittel durch Beulen spezifiziert. Wie in Kapitel 6.1 beschrieben, wird der Topload von der Wanddickenverteilung und den Halbzeugeigenschaften bestimmt. Die im vorigen Kapitel beschriebene Zunahme der Masse bewirkt eine Zunahme der mittleren Wanddicken und damit eine Erhöhung des Stauchdrucks (Bild 24).

Aus den Versuchsplänen konnten für den Stauchdruck keine signifikanten Einflussparameter gewonnen werden (Bild 34). Dies liegt an der großen Streuung, der der Stauchdruck unterworfen ist. Betrachtet man die Theorie des Beulens, so kann gezeigt werden, dass das Stauchverhalten in vierter Potenz von den lokalen Wanddicken abhängt. Bei einer geringen Wanddickenänderung kann sich das Beulverhalten signifikant ändern.

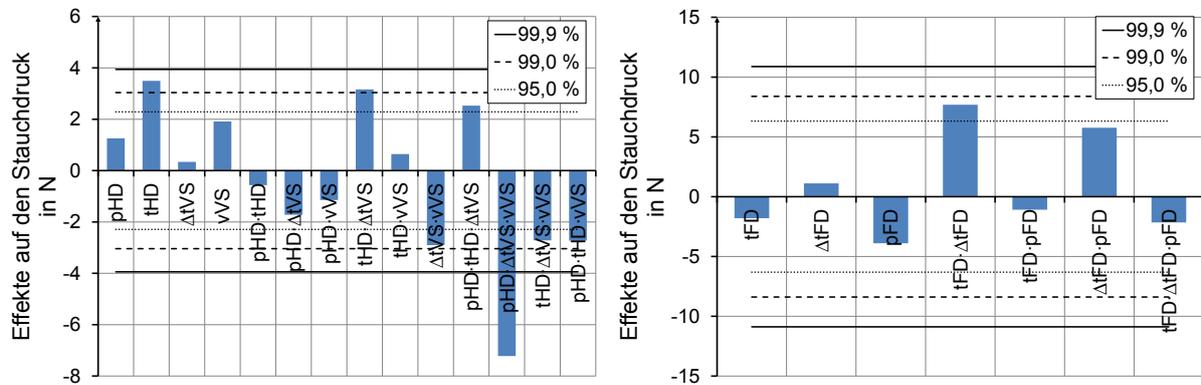


Bild 34: Effekte von Niederhalter und Vorstrecker auf Stauchdruck

Um die Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften des Formteils zu ermitteln, wurde die mechanische Prüfung mittels Finite-Elemente-Modellierung nachgebildet. Anhand der Simulation sind grundlegende Aussagen über die Zusammenhänge zwischen Formteilmerkmalen und mechanischen Formteileigenschaften möglich. Aus diesen Zusammenhängen können Rückschlüsse auf Maschineneinstellparameter gezogen werden. Im Bereich der PET-Flaschenformung konnte dieses Vorgehen bereits erfolgreich durchgeführt werden [Leo11].

Ziel der strukturmechanischen Simulation ist es, die Stauchprüfung realitätsnah abbilden zu können. Dazu sollen sowohl das Beulmuster als auch der Kraft-Weg-Verlauf berechnet werden können. Zur Validierung des Modells wurden mehrere thermogeformte Formteile aus Polypropylen vermessen. Es wurden die Wanddickenverteilung, der Stauchdruck und die Abweichungen von der Sollgeometrie erfasst. Um das Stauchverhalten besser nachbilden zu können, wurden Stauchmessungen durchgeführt, die nicht nach dem ersten signifikanten Kraftmaximum beendet wurden, sondern erst nachdem der Becher 2 mm gestaucht wurde. Die Kraft-Weg-Verläufe sind in Bild 35 dargestellt. Man erkennt dabei unterschiedliches Stauchverhalten. Die Becher Nr. 18 und Nr. 48 verhalten sich beim Einknicken ähnlich. Der Becher 48 zeigt jedoch bei kleinen Positionen einen deutlich geringeren Kraftanstieg. Dies ist auf die Winkelstellung des Siegelrandes zurückzuführen, der zu Beginn der Messung dafür sorgt, dass der Siegelrand nicht vollständig aufliegt. Ab ca. 0,25 mm besitzen beide Becher die gleiche Steifigkeit. Das Beulen erfolgt hierbei direkt aus dem fast linearen Kraftanstieg. Dieses Verhalten deutet darauf hin, dass der Becher bis zum Beulen keiner Geometrieänderung unterworfen ist. Becher 173 zeigt ein deutlich abweichendes Verhalten, er verläuft bis ca. 0,5 mm deckungsgleich zu Becher 18. Anschließend verläuft der Kraftverlauf degressiv, dies deutet auf eine Geometrieänderung des Produkts hin, das Beulen erfolgt hier, nachdem die Kraft wieder abgenommen hat.

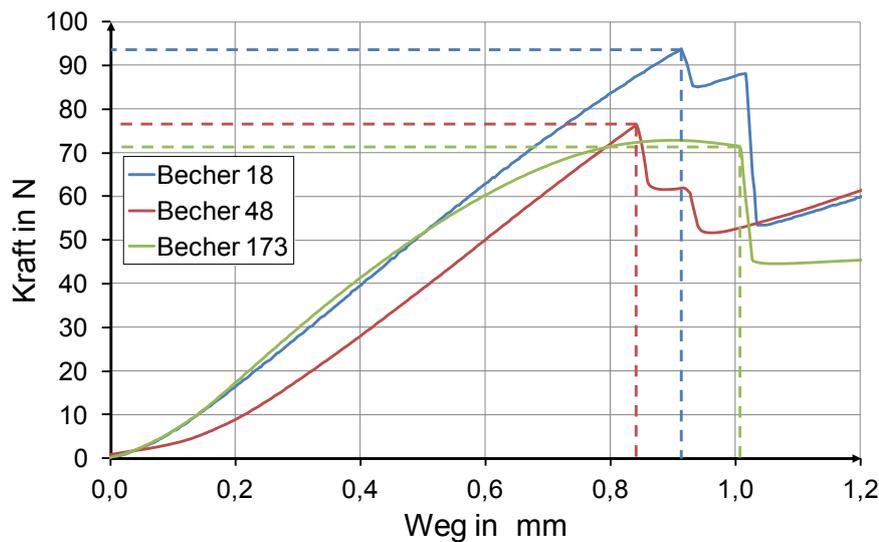


Bild 35: Kraft-Weg-Verläufe der Stauchdruckmessung für drei Formteile aus verschiedenen Zyklen.

Um dieses Verhalten darzustellen, wurde der Versuchsaufbau in der Simulationsumgebung Abaqus nachgebildet. Die Forderungen an die Simulation waren die Berechnung des Kraft-Weg-Diagramms unter Berücksichtigung realer Wanddickenverteilungen und Materialeigenschaften. Die Druckplatten wurden als nicht deformierbare Festkörper modelliert. Das Formteil wurde als Oberflächenmodell in SolidWorks modelliert und anschließend in Abaqus importiert. Anschließend wurde es als Schalenmodell in Abaqus modelliert und mit Schalenelementen vernetzt, da eine dreidimensionale Modellierung aufgrund der großen Elementanzahl ungeeignet war. Die Kontaktbedingung zwischen Druckplatten und Formteil wurde zwischen haftend und reibungsfrei variiert, um deren Einfluss auf das Simulationsergebnis zu erfassen. Die untere Druckplatte wurde fixiert, die obere Druckplatte besitzt einen translatorischen Freiheitsgrad in y-Richtung. Als Solver wurde Abaqus Explizit genutzt, sodass über die Singularität hinweg gerechnet werden kann.

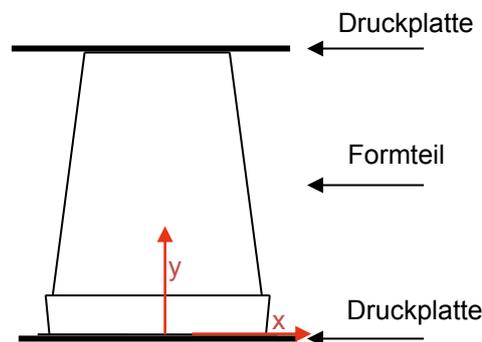


Bild 36: Prinzipskizze des Simulationsaufbaus, mit zwei Druckplatten und zu prüfendem Formteil

Um die Simulation möglichst realitätsnah abzubilden, wurden die Wanddicken der zu simulierenden Becher und deren Ovalitäten gemessen. Die Wanddicke wurde in y-Richtung in Schritten von 4 mm und am Umfang in 18°-Schritten vermessen. Zusätzlich wurden eine Position im Stapelrand und zwei Messpositionen im Boden vermessen. Die Formteile unter-

scheiden sich in der Wanddickenverteilung über der Höhe (Bild 37). Formteil 173 unterscheidet sich von den beiden anderen dadurch, dass die Seitenwand dünner und die Dickstelle bei ca. 90 mm deutlich dicker ist. Becher 18 und 48 unterscheiden sich hier nur minimal.

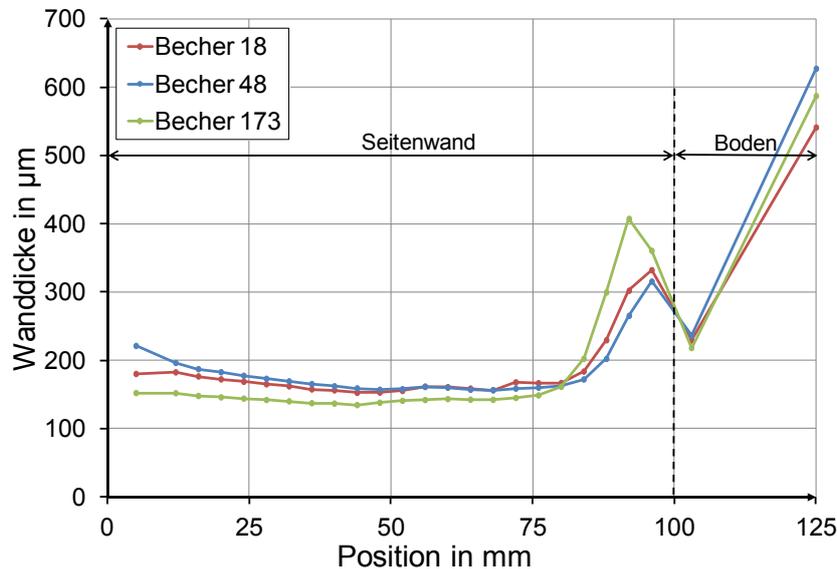


Bild 37: Mittlere Wanddicken entlang der Laufkoordinate der untersuchten Formteile

Neben den Unterschieden über die Höhe unterscheiden sich die Formteile in der Wanddickenverteilung um den Umfang (Bild 38). Dabei besitzt Becher 48 bei Koordinate 96 mm eine ausgeprägte Dickstelle, bei Koordinate 52 mm ist er allerdings homogener um den Umfang. Becher 18 besitzt diese Dickstelle bei Koordinate 52 mm. Becher 173 besitzt keine signifikante Dickstelle in der Wanddickenverteilung.

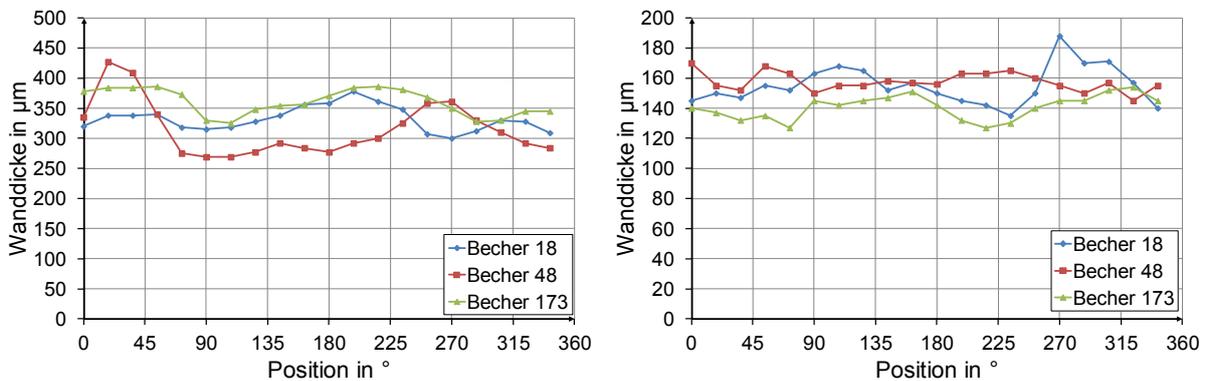


Bild 38: Wanddicke um den Umfang an Position 96 mm (links) und Position 52 mm (rechts)

Um die Wanddickenwerte in der FEM-Analyse positionsgenau zu übernehmen, wurde ein strukturiertes Netz erstellt. Jedem Knotenpunkt wurde ein Wanddickenwert zugeordnet. Fehlende Messwerte wurden linear interpoliert.

Neben den Wanddicken musste die Ausformschärfe der Formteile berücksichtigt werden. Diese wird durch eine veränderte Umformtemperatur verursacht und macht sich vor allem im Bodenradius (Stoßkante von Boden und Mantelfläche des Formteils) bemerkbar (Tabelle 5). Am Stapelradius waren keine Änderungen messbar.

Tabelle 5: Radien an Stapelkante (Stapelradius) und Übergang von Wand zu Boden (Bodenradius)

Bechernummer	Bodenradius	Stapelradius
18	1,13 mm	2,0 mm
48	1,40 mm	2,0 mm
173	0,75 mm	2,0 mm

Neben der realen Wanddickenverteilung und Geometrie soll in der Simulation die Anisotropie des Materials berücksichtigt werden. Dazu wurden Folienausschnitte aus dem Halbzeug und aus Formteilen in Zugversuchen untersucht und die Anisotropie in die Simulation übernommen. Um die FEM-Resultate bewerten zu können, wurden vorab einige grundsätzliche Untersuchungen durchgeführt. Ziel war es eine stabile und vernetzungsunabhängige Simulationsgrundlage zu schaffen.

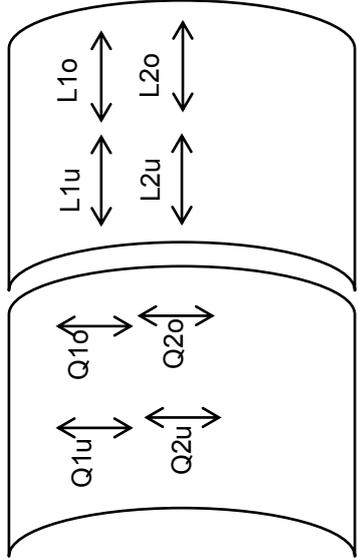
Da es sich um eine dynamische Simulation handelt, werden bei der Lösung der Differenzialgleichungen Trägheitskräfte berücksichtigt. Um die Berechnung zu beschleunigen, kann mithilfe einer Massenskalierung die Masse des zu simulierenden Körpers verändert werden. Da diese Option die Berechnungsergebnisse im Beulfall beeinflusst, wurde mit deaktivierter Massenskalierung gerechnet.

Neben dem Skalierungsfaktor haben die Art der Geometriemodellierung, Volumenkörper oder Schalenmodell und die Vernetzungs- und Elementart Einfluss auf das Simulationsergebnis. Um ein 3D-Modell aufzubauen, das eine gute Vernetzungsstruktur mit drei Elementen über der Wanddicke besitzt, werden aufgrund der geringen Wanddicke ca. 20 Mio. Elemente benötigt (Quaderelemente). Es wurde zudem festgestellt, dass bei einem 3D-Modell die Ergebnisse signifikant von der Elementgröße und Art abhängen. Aus diesem Grund wurde die Modellierung des Formteils als Schalenmodell durchgeführt. Dabei zeigte sich keine signifikante Abhängigkeit des Beulverhaltens von der Elementanzahl oder des Elementtyps.

Aus den Voruntersuchungen und anderen Arbeiten war bekannt, dass sowohl Abweichungen von der Rotationssymmetrie, als auch die Wanddickenverteilung das Beulverhalten beeinflussen, wurden von einzelnen Bechern die Ovalitäten ermittelt. Im Modell wurden die Ovalitäten als Ellipsen angenähert. Die Ovalitäten für die simulierten Becher waren konstant. Der größte gemessene Durchmesser eines Bechers war dabei 0,5 mm größer als der kleinste Durchmesser des entsprechenden Bechers. Die Wanddickenverteilung wurde wie oben beschrieben auf das Modell übertragen. Der E-Modul wurde für das verwendete Halbzeug bestimmt und als Anisotropie in die Berechnung mit eingeschlossen. Um die Anisotropie in die Simulation aufnehmen zu können, wurden Zugversuche an Halbzeug- und Formteilproben durchgeführt. Die Proben aus dem Formteil wurden aus der Ausgangsfolie und der Abwicklung der Bechermantelfläche gewonnen. Diese waren um den Umfang um 90° versetzt und auf 1/3 und 2/3 der Becherhöhe angeordnet. Die E-Moduln im extrudierten Halbzeug sind in Extrusionsrichtung ca. 10 % größer als quer dazu. Dies ist auf die Orientierung der Moleküle während des Extrusionsprozesses zurückzuführen.

Die lokalen Moduln des Formteils unterscheiden sich je nach Messposition um über 100 % (Tabelle 6). Hier ist der hohe Verstreckgrad und Orientierung der Moleküle beim Umformen ursächlich.

Tabelle 6: Gemessene E-Moduln und Zugfestigkeit des thermogeformten Formteils



	E-Moduln in N/mm ²	Zugfestigkeit in N/mm ²	Bruchdehnung in %	Wanddicke in mm
L1o	3080 ± 140	131 ± 8	43,6 ± 4,6	0,14
L1u	2620 ± 250	104 ± 18 (kein Versagen)	> 50	0,16
L2o	3600 ± 80	158 ± 7	35,1 ± 3,6	0,15
L2u	2870 ± 240	124 ± 18 (kein Versagen)	35,4 ± 8,8	0,19
Q1o	1610 ± 160	36,4 ± 1,5	> 50	0,14
Q1u	1490 ± 60	36,4 ± 0,9	> 50	0,15
Q2o	1700 ± 100	36,5 ± 0,5	11,4 ± 3,3	0,16
Q2u	1230 ± 110	34,3 ± 1,1	> 50	0,26

Anhand der Simulation und dem Vergleich mit den Messwerten eines Bechers sollen die Einflüsse von Wanddickenverteilung, Ovalitäten und anisotropem Werkstoffverhalten dargestellt werden (Bild 39). Dargestellt sind hier der Kraftverlauf verschiedener Simulationen mit unterschiedlichem Vereinfachungsgrad und die Messung einer Stauchprüfung. Man kann feststellen, dass die Berücksichtigung der realen Wanddickenverteilung eine Annäherung an die Realität ergibt. Die bei diesem Formteil gemessene Ovalität hat einen geringen Einfluss auf das Stauchverhalten. Die Stauchkraft bleibt näherungsweise konstant. Die Stauchposition nimmt minimal (ca. 6 %) zu. Einen großen Einfluss hat die Anisotropie, insbesondere der in Höhenrichtung durch den Thermoformprozess stark erhöhte E-Modul des Werkstoffs. Durch den gemessenen E-Modul und Wanddickenverteilung weicht die Simulation in der Stauchkraft nur um 6 % von der Realität ab. Die Stauchposition wird noch zu gering berechnet.

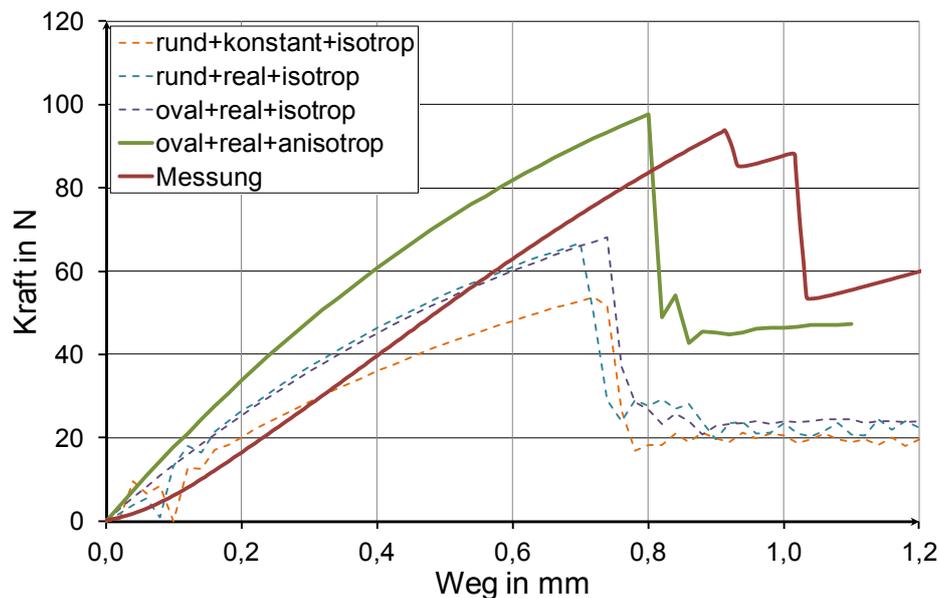


Bild 39: Simulierter und gemessener Kraftverlauf der Stauchprüfung des anisotropen Ansatzes

Die Simulation zeigt bei allen simulierten Bechern im Gegensatz zur Messung (Bild 35) kein versteifendes Verhalten in den ersten 0,25 mm. Dies kann dadurch begründet werden, dass die simulierte Geometrie einen Siegelrand besitzt, der plan auf der Druckplatte aufliegt. Der reale Rand des Formteils weist eine Winkelstellung auf und wirkt auf den ersten 0,25 mm als Biegefeder. Erst anschließend wird nur noch die Wandung gestaucht.

Neben der Wanddickenverteilung konnte die Ausformschärfe im Übergang von Boden in Wand als Einflussfaktor auf das Stauchverhalten identifiziert werden. Der entstehende Radius an der Kante von Boden zu Mantelfläche sorgt für eine Nachgiebigkeit des Formteils, diese lässt sich in Simulationsrechnungen an einer geringeren Bechersteifigkeit ablesen. Der Stauchdruck selbst ist nahezu unabhängig vom Radius, er beeinflusst ausschließlich den Stauchweg (Bild 40).

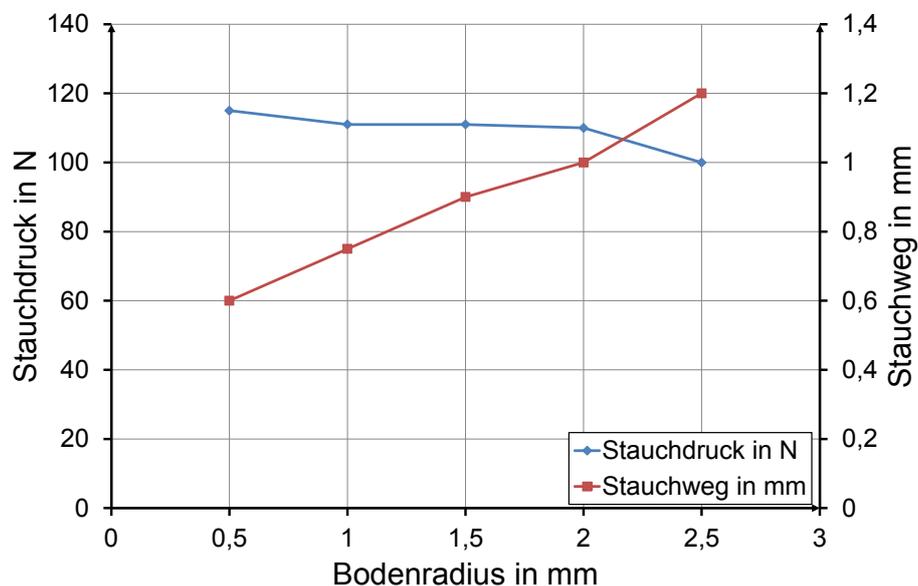


Bild 40: Abhängigkeit des Stauchdrucks und Stauchweg vom Bodenradius

Es konnte gezeigt werden, dass die Stauchprüfung in einer Simulation nachgebildet werden kann, sodass sie mit der Realität vergleichbare Ergebnisse liefert. Dazu ist die Wanddickenverteilung, Geometrieabweichungen und anisotropes Materialverhalten in der Simulation zu berücksichtigen.

Nachteilig an dieser Vorgehensweise ist, dass ein real existierendes Bauteil vorhanden sein muss, um das Simulationsmodell zu erstellen. Insbesondere die Wanddickenverteilung musste an einem real existierenden Bauteil gemessen und in die Simulation übertragen werden. Zudem wurden mit hohem Aufwand die anisotropen Materialeigenschaften am Formteil gemessen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Stauchdruck von mehreren Faktoren abhängt. Dies sind zum einen die Wanddickenverteilung der Produkte und zum anderen die Geometrie und die mechanischen Eigenschaften des Polymers nach dem Umformen. Wanddickenverteilung und Geometrie lassen sich leicht messen und die Einflussparameter sind durch die Untersuchungen in Kapitel 6.2.1 teilweise bekannt. Die Ermittlung der mechanischen Eigenschaften erweist sich als Herausforderung, da die Zugproben relativ kleine Abmessungen besitzen.

6.2.4 Einfluss der Vorstreckergeometrie und Vorstreckerkinematik auf die Formteileigenschaften

Neben den Maschineneinstellparametern, die den Prozessablauf steuern, haben die Werkzeuggeometrie, die Geometrie der Vorstrecker und die daraus resultierende Vorstreckbewegung einen Einfluss auf die Formteileigenschaften.

Um den Einfluss der Geometrie und Kinematik abschätzen zu können, wurden Vorstrecker mit unterschiedlicher Geometrie getestet. Neben dem Radius an der Stirnseite wurde der untere Durchmesser angepasst (Bild 41). Die Bezeichnung der Vorstrecker setzt sich aus diesen zwei geometrischen Größen zusammen (D47R12). Die Vorstrecker wurden aus einem synthetischen Schaum (HYTAC[®]-B1X) gefertigt.

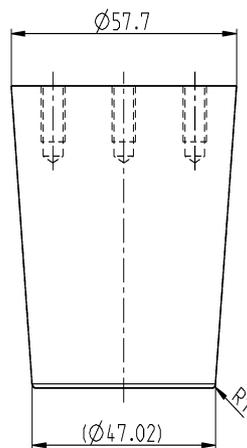


Bild 41: Variation der Vorstreckergeometrie

In Tabelle 7 sind die verwendeten Vorstreckergeometrien gelistet. Die Geometrie D42R02 war der Standardvorstrecker zur PET-Verarbeitung und D47R12 der Standardvorstrecker für PP-Verarbeitung mit dem verwendeten Werkzeug.

Tabelle 7: Verwendete Vorstreckergeometrien und Versuchsparameter

Vorstreckergeometrie
D49R01
D47R12
D42R02
D30R12
D39R15
D51R15
D35R01

Um die Unterschiede der Vorstrecker besser sichtbar zu machen, wurden auch die Wanddicken vorgestreckter Rohlinge (ohne pneumatisches Ausformen) miteinander verglichen.

An den Rohlingen und Formteilen kann gezeigt werden, dass sowohl der Radius als auch der Durchmesser des Vorstreckers Einfluss auf die Wanddickenverteilung haben. In Bild 42 erkennt man, dass der Durchmesser einen Einfluss auf den Bereich des Halbzeugs besitzt, der keine Anlage zum Vorstrecker besitzt. Die Größe dieses Bereichs definiert vereinfacht den Verstreckgrad in der Seitenwand. Bei einem Vorstrecker mit kleinem Durchmesser (D35R01) wird ein linearer Verstreckgrad von $\lambda_1 = 4,5$ erreicht, bei einem großen Vorstreckerdurchmesser (D47R12) erhöht sich dieser auf $\lambda_1 = 7,4$. Wird keine Verstreckung in Umfangsrich-

tung angenommen, ergibt sich aus der Annahme von Volumenkonstanz eine Wanddickendifferenz von ca. $74 \mu\text{m}$ in der Seitenwand. Dies entspricht der Größenordnung der beobachteten Differenz. Ein großer Radius führt zu einem stetigen Übergang zur Bodenwanddicke und zum Nachfließen von Material aus Bereichen, an denen das Material den Vorstrecker berührt.

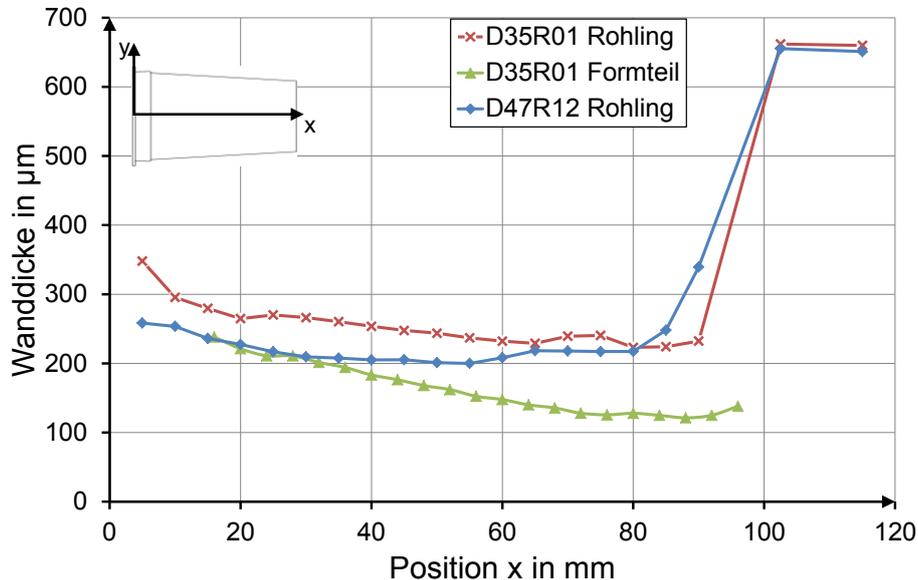


Bild 42: Wanddickenverteilung von Polypropylenrohlinge und einem zugehörigen Formteil entlang der Höhenkoordinate

Die endgültige Wanddickenverteilung ergibt sich durch den Abstand zwischen Vorstrecker und Formeinsatz. In Bereichen der Seitenwand ist überwiegend eine Umfangsverstreckung des Materials anzunehmen. Im Übergangsbereich und im Boden ergibt sich eine weitere Verstreckung in der Höhenrichtung. Betrachtet man die Position 80 mm, so ergibt sich ein Verstreckgrad von ca. $\lambda_2 = 0,4$ in Umfangsrichtung. Daraus wird die Wanddicke des Rohlings von $d = 220 \mu\text{m}$ eine Wanddicke des Formteils von ca. $d = 150 \mu\text{m}$. Auch diese Annahme deckt sich mit den in Bild 42 dargestellten Messwerten. Dadurch ergibt sich bei Vorstrecken mit kleinen Durchmessern eine starke Ausdünnung im Übergang von Seitenwand zum Boden (Bild 42).

In Bild 43 sind die Wanddickenverteilungen mehrerer Formteile dargestellt, die mit unterschiedlichen Vorstreckergeometrien hergestellt wurden. Man erkennt, dass die Formteile, die mit Vorstreckern mit großem Radius hergestellt wurden, eine Dickstelle im unteren Seitenwandbereich besitzen. Dies ist durch das Nachfließen von Material aus dem Bodenbereich während des Vorstreckens zu begründen (Bild 42, D47R12 Rohling). Diese Dickstelle kann durch die pneumatische Ausformung im Seitenwandbereich nicht eliminiert werden. Im Übergang von Seitenwand zu Boden wird, um die Ecke auszuformen, der Umfangsverstreckung eine Längsverstreckung überlagert, dadurch kann an dieser Stelle eine weitere lokale Dünnstelle entstehen (Bild 43, D51R15, Position $x = 100 \text{ mm}$).

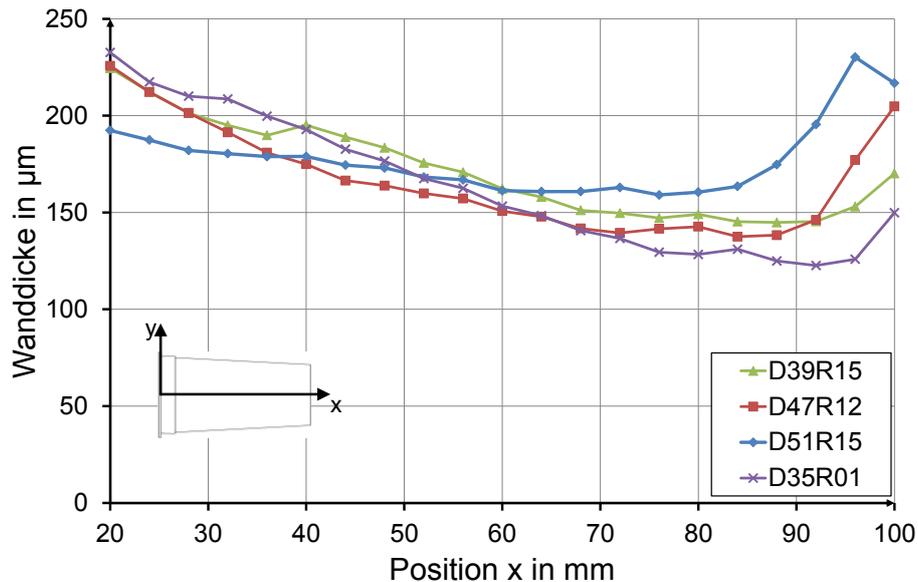


Bild 43: Wanddickenverteilung von Formteilen durch Vorstrecken mit unterschiedlichen Vorstreckergeometrien

Die Mechanismen des Vorstreckens hängen wie in den Kapiteln 2.3 und 2.4 beschrieben auch von den Reibwerten und Wärmeübergang zwischen Halbzeug und Vorstreckler ab und sind stark abhängig vom Vorstreckermaterial. Die grundlegenden Mechanismen bleiben jedoch bestehen.

6.2.5 Einflüsse der Temperaturführung auf die Formteileigenschaften

Neben den Ablaufeinstellungen des Formprozesses und den Eigenschaften des Vorstreckers beeinflusst die Temperaturführung das Thermoformergebnis. Bei der Temperaturführung wurde nicht nur die über Infrarotmessung messbare Umformtemperatur betrachtet, sondern die gesamte Erwärmungskette von Einlauf der Vorheizung bis Auslauf Infrarotheizung. Aufgrund der großen Trägheit der Heizungen wurde hier auf statistische Versuchspläne verzichtet und auf Einfaktorversuche zurückgegriffen. Dabei wurden die Temperaturen der Vorheizung und die Temperatur der Hauptheizung variiert.

Um die Auswertung zu vereinfachen, wurden die Prozessgrößen erfasst, die den Aufheizprozess beschreiben. Diese sind die Temperatur des Halbzeugs am Einlauf der Formmaschine und die Temperatur am Auslauf der Infrarotheizung. In Bild 44 ist das Verhalten von Einlauf- und Auslauftemperatur bei Änderung der Vorheizungstemperatur abgebildet. Man erkennt, dass durch die Vorheizung zyklische Schwankungen in der Einlauftemperatur vorhanden sind. In der Auslauftemperatur lassen sich diese Schwankungen durch die Temperaturmessung nicht mehr nachweisen. Zudem ist zu beachten, dass die Auslauftemperatur bei einer Steigerung der Einlauftemperatur um 12 K nur um ca. 5 K angehoben wird. Durch eine höhere Einlauftemperatur ist der von der Infrarotheizung übertragene Wärmestrom geringer, da sich der Temperaturgradient verringert. Zum anderen steigt bei Polypropylen die Wärmekapazität vor dem Kristallitschmelzpunkt stark an, wodurch eine Wärmeübertragung weniger stark in eine Temperaturerhöhung umgesetzt wird.

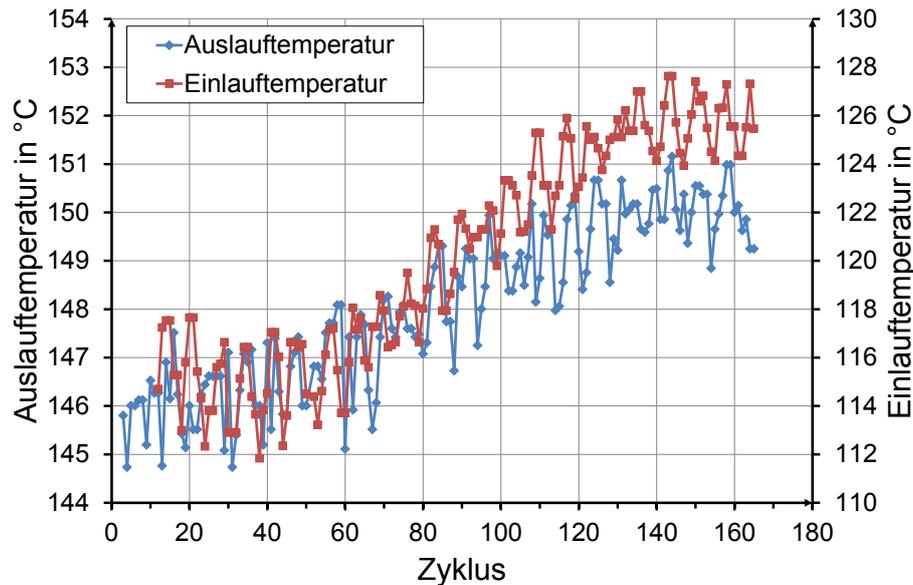


Bild 44: Verlauf der gemessenen Einlauf- und Auslaufemperatur, bezogen auf das im jeweiligen Zyklus produzierte Formteil.

Zudem muss beachtet werden, dass die Zusammenhänge zwischen Ein- und Auslaufemperatur neben dem Material von Heizzeit, Materialdicke und Strahlertemperatur abhängen. Zudem muss beachtet werden, dass die Infrarotmessung der Temperatur Material und materialdickenabhängig sein kann.

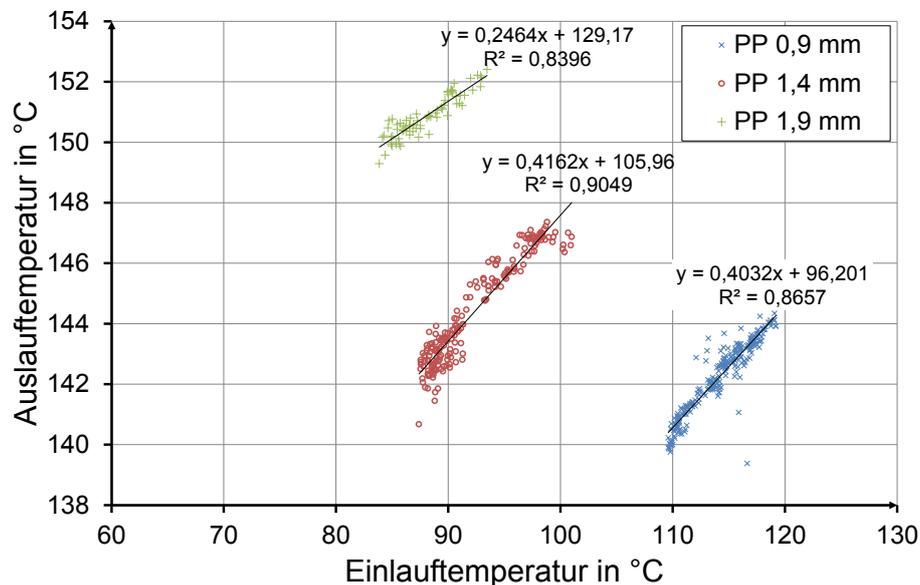


Bild 45: Korrelation zwischen Einlauf- und Auslaufemperatur bei konstanter Infrarotheizungs- temperatur und variierender Einlaufemperatur bei unterschiedlichen Zykluszeiten

Wie schon in früheren Arbeiten ([Har01], [Ros06], [Pol93]) beschrieben sind die Eigenschaften der Formteile von der Temperatur während des Umformvorgangs abhängig. Dies konnte für einige Formteilmerkmale bestätigt werden (Regressionskoeffizienten siehe Kapitel 14.5). Die ermittelten linearen Regressionskoeffizienten zeigen für Steifigkeit des Bechers, die Becherhöhe und die Formteilmasse eine Korrelation zwischen Temperatur und Formteilmerkmal. Beim Stauchdruck konnte keine lineare Abhängigkeit nachgewiesen werden.

Eine genauere Betrachtung des Stauchdrucks zeigt eine quadratische Abhängigkeit des Stauchdrucks von der Temperaturführung ((Bild 46).

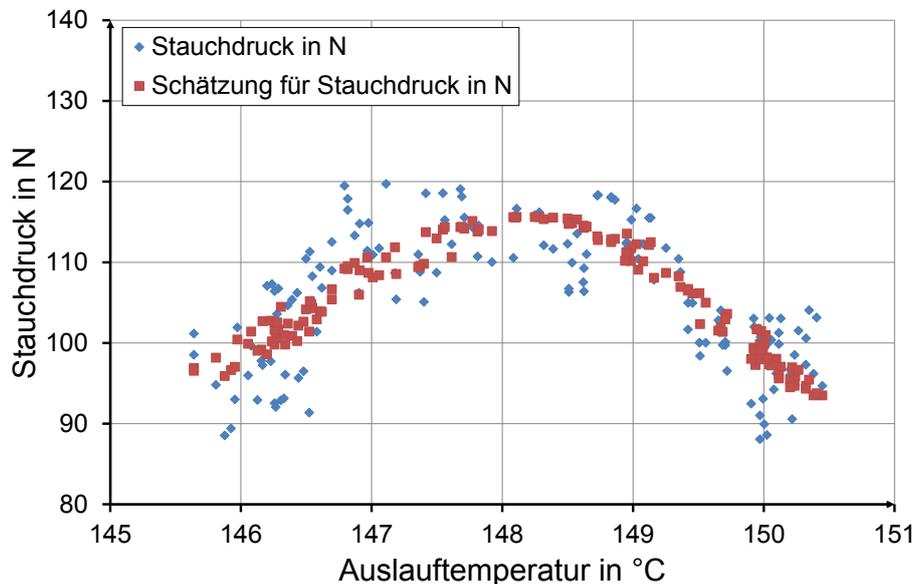


Bild 46: Abhängigkeit des Stauchdrucks von der Einlauftemperatur (die Schätzung beruht auf einer multiplen Regressionsanalyse aus Ein- und Auslauftemperatur)

Dieses Verhalten stellt sich ein, da Formteile, die bei niedriger Umformtemperatur umgeformt werden tendenziell eine geringere Bodenwandstärke besitzen. Das Formteil versagt dann in diesem Bereich. Formteile, die mit hoher Umformtemperatur umgeformt werden, besitzen hingegen eine geringere Seitenwandstärke. Im mittleren Umformtemperaturbereich ergibt sich aus der Werkzeuggeometrie und dem Materialverhalten eine optimale Wanddickenverteilung, die für ein Maximum des Stauchdrucks sorgt (Bild 46). Überlagernd zu diesem Effekt ist der Einfluss des Verstreckens auf den Elastizitätsmodul des Polypropylens.

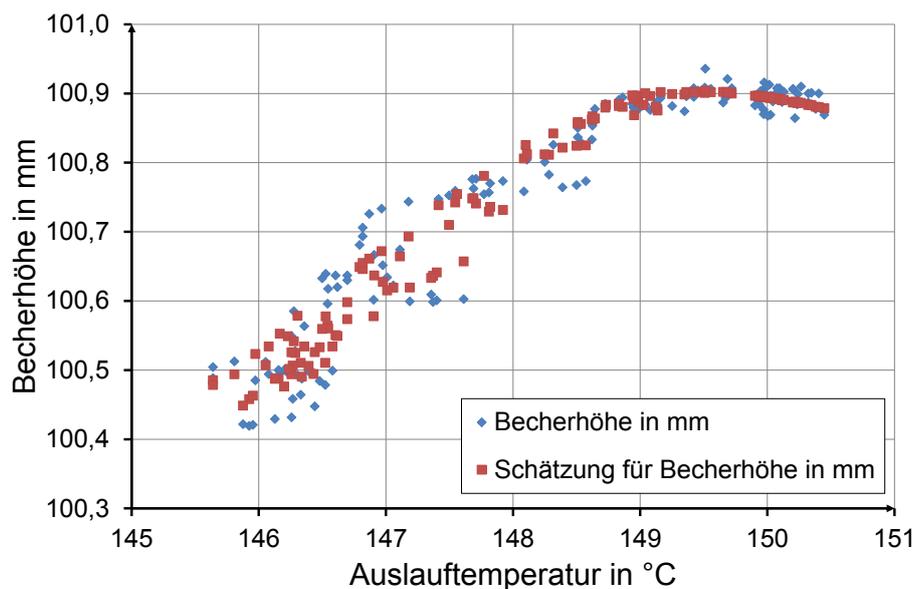


Bild 47: Abhängigkeit der Formteilhöhe von der Auslauftemperatur (die Schätzung beruht auf einer multiplen Regressionsanalyse aus Ein- und Auslauftemperatur)

Betrachtet man die Formteilhöhe ohne die Siegelranddicke, so erkennt man, dass diese bis zu einer bestimmten Temperatur ansteigt und anschließend in einen konstanten Bereich übergeht (Bild 47). Dieses Verhalten kann durch eine bessere Ausformung des Formteils mit steigender Temperatur und besserer Kühlung im Übergangsbereich von Boden zu Seitenwand, wodurch die Schwindung minimiert wird, erklärt werden. Würde die Becherhöhe inklusive der Siegelranddicke betrachtet, so würde die Formteilhöhe mit steigender Temperatur wieder abfallen, da der Siegelrand stärker geprägt wird.

6.2.6 Zusammenfassung der Einflussparameteranalyse

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass die Eigenschaften thermogeformter Verpackungsmittel signifikant von der Umformtemperatur abhängen. Dies betrifft fast alle Formteilmerkmale (Tabelle 8). Zudem konnte nachgewiesen werden, dass der Einfluss der Temperatur auf die Wanddickenverteilung um Faktor vier größer ist als der Einfluss jedes anderen Einstellparameters des Umformprozesses.

Einen ähnlich großen Einfluss auf die Wanddickenverteilung besitzen zudem die Eigenschaften des Vorstreckers. Diese stehen in der laufenden Produktion allerdings nicht als Einstellparameter zur Verfügung. Wie bei der Umformtemperatur kann eine falsche Vorstreckergeometrie nicht immer durch Variation der Einstellparameter ausgeglichen werden. Aus diesem Grunde werden Vorstrecke in der Praxis in vielen Fällen nachgearbeitet, wenn sich deren Eigenschaften über den Produktionszeitraum geändert haben.

Mit den Einstellmöglichkeiten des Umformprozesses können Detailoptimierungen einzelner Formteilmerkmale durchgeführt werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass das Verstreckverhalten nur von den temperaturabhängigen Materialeigenschaften und der Vorstreckergeometrie beeinflusst werden kann. Die Solleigenschaften des Formteils müssen deshalb zunächst mittels Temperatur- und Vorstreckervariation angenähert werden. Bei geringen Abweichungen kann anschließend der Verfahrensablauf angepasst werden.

Dies bestätigt die Ergebnisse aus früheren Forschungsarbeiten, die die Umformtemperatur als zentrale Einstellgröße identifizierten ([Har01], [Ros06], [Heg04]) und zu Halbzeugtemperaturregelungen zur Einstellung von Formteilparametern geführt haben ([Dua04], [Mar96], [Per07], [Pol93], [Run03], [Gau09]).

In Tabelle 8 sind die wesentlichen Einstellparameter des Umformprozesses und beeinflusste Formteilmerkmale dargestellt.

Tabelle 8: Übersicht der Einflussparameter auf ausgewählte Formteilmerkmale beim Thermoformen von Verpackungen in kombiniert formenden und stanzenenden Thermoformmaschinen

	Bodennahe Wanddicke	Seitenwanddicke auf halber Formteilhöhe	Stauchdruck	Formteilmasse	Formteilhöhe	Siegelranddicke	Siegelrandwinkel	Ausformschärfe	Schwindung
Große Einflussmöglichkeit: ↑↓ Geringe Einflussmöglichkeit: ↗↘									
Umformtemperatur	↑	↓	↑↓	↘	↑	↓		↑	↗
Klemmkraft						↓			
Zeitpunkt der Klemmung				↘		↗			
Dauer der Klemmung							↓		↘
Zeitpunkt des Vorstreckerstarts		↘		↘		↗			
Vorstreckergeschwindigkeit	↗			↘		↗			
Zeitpunkt des Formdruckstarts, bezogen auf Vorstrecker unten	↗								
Dauer des Formdrucks									↘
Formdruckniveau								↗	↘
Ziehtiefe	↓	↑↓	↑↓						

7 Analyse der Abhängigkeiten der Prozessgrößen und Prozesskennwerten

In Kapitel 6 sind die Einflüsse der Maschineneinstellung auf die Formteilmerkmale analysiert worden. Durch diese Kenntnis sind Stellgrößen bekannt, die Formteilmerkmale gezielt zu steuern. Nun müssen Prozessgrößen gefunden werden, die Änderungen der Formteilmerkmale identifizieren. Die Identifizierung soll indirekt dadurch erfolgen, dass die Prozessgrößen von Störgrößen beeinflusst werden. Störgrößen können Änderungen der Materialeigenschaften oder Änderungen in der Temperaturführung des Halbzeugs darstellen. Temperaturänderungen können durch Messung der Oberflächentemperatur mittels Infrarotmesstechnik erfolgen. Materialeigenschaftsänderungen können durch den Verarbeitungsprozess im Formprozess detektiert werden. Als infrage kommende Größen wurden der Verstreckwiderstand der Folie während des Vorstreckens und die für die Folie notwendige Schnittkraft beim Anschneiden und Durchschneiden untersucht. Um die Abhängigkeit von Materialeigenschaftsänderungen zu zeigen, wurden unterschiedliche Materialien untersucht. Die Untersuchungen und Ergebnisse sind in den folgenden Kapiteln beschrieben.

7.1 Charakterisierung der Kraftverläufe mittels Prozesskennzahlen

Auf Basis der Verstreck- und Schließ- oder Schnittkräfte können Zyklen zugeordnete Kennzahlen ermittelt werden. Ziel ist es, aus diesen Kennzahlen mögliche Einflussfaktoren zu identifizieren. Neben Störungen, die durch die Temperaturführung in den Prozess einfließen, sollen Störungen, die durch geänderte Materialeigenschaften hervorgerufen werden identifiziert werden können. Für jede Prozessgröße können mehrere Prozesskennzahlen ermittelt werden. Grundsätzlich muss für die Prozesskennzahlen gelten, dass sie ein großes Signal-Rausch-Verhältnis besitzen, um empfindlich auf die zu identifizierenden Größen zu reagieren.

Zur Charakterisierung des Vorstreckens wird die Energie berechnet, die der Vorstrecker benötigt, die Folie umzuformen. Zur Charakterisierung des Schnittvorgangs wurden die Maximalkräfte beim Schließen des Werkzeugs und beim Durchschneiden ermittelt (Tabelle 9)

Tabelle 9: Aus Prozessgrößen ermittelte Kennzahlen

Prozessgröße	Prozesskennzahl
Verstreckkraft	Verstreckenergie
Verstreckmoment	Verstreckenergie
Schließkraft	Maximale Anschnittkraft
	Maximale Durchschnittskraft

Die Verstreckenergie wird durch Integration des Momentes über die Drehwinkel beziehungsweise der Verstreckkraft über der Vorstreckerposition berechnet. Die Integrationsgrenzen sind jeweils Start- und Stoppzeitpunkte der Bewegung.

$$E_{ver} = \int_{s_1}^{s_2} F \cdot ds = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} M \cdot d\varphi \quad 7-1$$

Neben der Verstreckenergie werden aus dem Schließkraftverlauf des Formwerkzeugs die maximale Anschnittkraft und die maximale Durchschnittskraft ermittelt. Die Anschnittkraft wird

durch die maximale Kraft beim Schließen des Werkzeugs, die Durchschnittskraft durch die maximale Kraft während des Stanzhubs definiert.

7.2 Analyse der Verstreckkräfte

In verschiedenen Arbeiten ([Bei10], [Heg04], [Har03]) wurden die Reaktionskräfte auf den Vorstrecker beim mechanischen Verstrecken untersucht. Es wurde die Abhängigkeit der Verstreckkräfte von Temperatur, Materialtyp und Verarbeitungsbedingungen im Extrusionsprozess nachgewiesen [Bei10]. Anhand der Messung der Verstreckkraft kann ein optimales Verarbeitungsfenster für Polypropylenhalbzeuge gefunden werden ([Bei10], [Har03]). Nachteilig ist, dass nach der vorgestellten Methode Kraftverläufe analysiert werden müssen. Zudem kann der von Beilharz [Bei10] verwendete Versuchsaufbau nicht für eine Messung im laufenden Produktionsbetrieb genutzt werden. Die Verstreckkräfte wurden hier an einem feststehenden Vorstrecker gemessen. Die Relativbewegung wurde durch das Unterwerkzeug und Halbzeug ausgeführt. Dadurch wirken keine Kraftkomponenten, die aus Beschleunigungen und Reibungen resultieren auf die Kraftmessstelle und es wird die reine Verformungskraft gemessen. Der Aufbau von [Har03] wurde im industriellen Umfeld eingesetzt, die Grundlagenuntersuchungen der Verstreckkräfte wurden allerdings an einer Laboranlage mit einem Konvektionsofen durchgeführt. Hierbei wurde ein piezoelektrischer Kraftsensor direkt in den Vorstrecker integriert, dieser Aufbau diente als Vorbild für die hier verwendete Messstelle in der Vorstreckerstange. Zudem wird eine alternative Messmethode über den Antriebsmotor des Vorstreckers vorgestellt, sodass keine zusätzliche Sensorik zur Überwachung der Verstreckkräfte notwendig ist.

7.2.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Zur Messung der Verstreckkräfte wurden in zwei Vorstreckerstangen Kraftmessdosen implementiert. Die Kraftmessdosen wurden im Werkzeug durch einen pneumatisch angelegten Druck kalibriert. Neben den Signalen der Kraftmessdosen wurde das Istmoment des Servomotors aufgezeichnet. Das Drehzahlsignal und das Momentensignal werden am Servoregler ausgegeben. Zu beachten ist, dass alle Messstellen mehrere Kraft- bzw. Momentenkomponenten messen. Die Gesamtkraft ergibt sich aus der Reibungskraft des Antriebssystems, Trägheitskräften aufgrund der Beschleunigung und dem Widerstand des Halbzeugs gegen Verformung.

Zunächst wurde der Messaufbau verifiziert und Einflüsse aufgrund von Reibung und Trägheit untersucht. Ziel der Verifikation ist es, die Messung über die Signale des Servomotorreglers mit der Messung der Kraft in der Vorstreckerstange zu vergleichen. In der Produktion sollen die Signale des Motorreglers zur späteren Messung herangezogen werden, da dadurch keine zusätzliche Sensorik benötigt wird.

Neben den ungewünschten Abhängigkeiten wird der Kraftverlauf von den Materialeigenschaften beeinflusst. Diese sind vom Rohstoff, Extrusionsbedingungen und der Temperatur abhängig. Um nachzuweisen, dass sich die Verstreckkraft zur Identifikation von Materialeigenschafts- und Temperaturänderungen eignet, wurden Versuche durchgeführt, die die Empfindlichkeit des Systems auf Änderungen zeigen. Dazu wurde zunächst die Kraft bei unterschiedlichen Halbzeugtemperaturen bei konstantem Halbzeug untersucht. Anschließend

wurden verschiedene nukleierte Polypropylentypen miteinander verglichen. Nicht nukleierte Typen wurden nicht untersucht, da es Stand der Technik ist nukleierte Polypropylene, aufgrund verbesserter Eigenschaften in der Thermoformung, einzusetzen. Die Extrusion der Rohstoffe wurde nicht selbst durchgeführt, daher liegen keine genauen Daten zu den Extrusionsbedingungen vor. Das zur Verifikation des Messsystems verwendete Polypropylen ist in Tabelle 10 beschrieben.

Tabelle 10: verwendeter Polypropylentyp

Hersteller	Rohmaterialtyp	MFI	E-Modul	Farbe	Kristallitschmelzpunkt
Total	PPH 4022	3	$1700 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Transparent	165 °C

7.2.2 Versuche zur Bestimmung der Reibungs- und Trägheitseinflüsse

Zur Bestimmung des Einflusses der Reibung und der Trägheitskräfte auf die Kraft beziehungsweise das Moment wurden Messungen der Verfahrbewegung ohne Halbzeug durchgeführt (Bild 48). Abgebildet ist der Drehzahl- und Momentenverlauf des Vorstreckers über einen Zyklus. Negative Drehzahlen beschreiben die Abwärtsfahrt des Vorstreckers. Auf Basis der Daten ist ein Modell, das Trägheits- und Reibungskomponenten enthält, kalibriert worden. Mithilfe dieses Modells können aus der späteren Messung diese Kraftkomponenten herausgerechnet werden. In der Produktion ist die Kalibrierung des Modells anhand der Vorstreckerrückfahrt möglich.

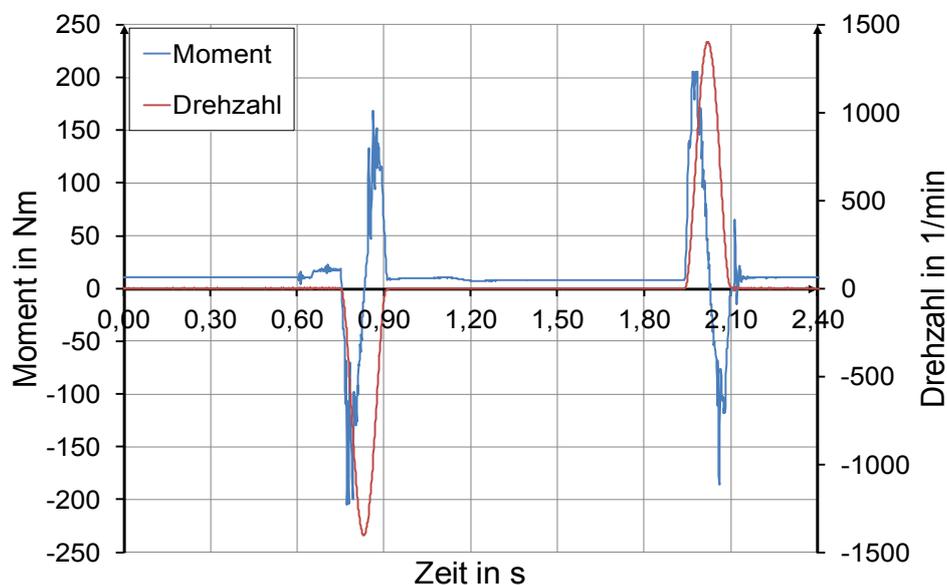


Bild 48: Momenten- und Drehzahlverlauf des Vorstreckerantriebs in einem Zyklus (negative Werte = Wirkrichtung nach unten).

Um den Geschwindigkeits- und Ziehtiefeneinfluss zu berücksichtigen, wurden beide Parameter variiert. Die Versuchsparameter sind Kapitel 14.4 zu entnehmen. Als Modellansatz des Antriebssystems wurde eine Differentialgleichung erster Ordnung angenommen (Gleichung 7-2). Gemessen wurde die Winkelgeschwindigkeit des Vorstreckerantriebs sowie dessen Antriebsmoment. Durch Parameteranpassung kann das berechnete Motormoment an den gemessenen Momentenverlauf angepasst werden.

$$\dot{\omega} \cdot J_{an} = M_{an} - M_R + M_G$$

$$\dot{\omega} \cdot J_{an} = M_{an} - b \cdot \omega + M_G$$

7-2

$\dot{\omega}$: Winkelbeschleunigung des Antriebs
 ω : Winkelgeschwindigkeit des Antriebs
 J : Massenträgheitsmoment des Systems
 M_{an} : Antriebsmoment
 M_R : Reibmoment
 M_G : Moment aus Gewichtskraft
 b : Dämpfung

Um den Ansatz zu prüfen, wurde an drei verschiedenen Thermoformwerkzeugen die Modellberechnung angewendet und verifiziert. Die bei der Kalibrierung ermittelten Werte sind in Tabelle 11 abgebildet. Angegeben ist jeweils die Ausprägung des Werkzeugs, das Trägheitsmoment des Antriebssystems die Dämpfung und das Haltemoment des Motors durch die Gewichtskraft des Systems. Für zwei Werkzeugtypen konnten fast gleiche Werte bei Trägheit und Haltemoment ermittelt werden. Konstruktionsbedingt weicht das Werkzeug mit der Druckluftversorgung über die Vorstreckerstangen (Werkzeugnummer 98563) davon ab, da hier der Gesamtaufbau deutlich schwerer ist als bei Werkzeugen mit anderen Formlufttechniken.

Tabelle 11: Modellparameter für Trägheits- und Reibmomente verschiedener Werkzeuge

Werkzeugnr.	Beschreibung	J_{an}	b	M_G
40250	24fach Becherwerkzeug Formluftreduziert Formluftventile an Kopfplatte	0,0485 kg m ²	0,18 Nms	10,43 Nm
24562	18fach Becherwerkzeug Ohne Formluftreduzierung Formluftventile maschinenseitig	0,050 kg m ²	0,3 Nms	10,00 Nm
98563	8fach Becherwerkzeug Formluftreduziert Formluftventile in Vorstreckerstange	0,059 kg m ²	0,2 Nms	15,00 Nm

Betrachtet man berechnete und gemessene Momentenverläufe, so zeigt sich eine gute Übereinstimmung (Bild 49). Zur Beurteilung des Restfehlers wird die Differenzenergie beider Verläufe ermittelt. Ziel ist es, die Beschleunigungseinflüsse und Reibungseinflüsse aus den Momentensignalen herauszurechnen. Zur Überprüfung des Modells wurden die weiteren Versuchspunkte herangezogen (Bild 50). Dabei zeigt sich zunächst, dass je nach Geschwindigkeit dem System Energie zugeführt oder entzogen werden muss. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei geringen Geschwindigkeiten das Eigengewicht des Motors ausreicht das System zu beschleunigen (durch das Bremsen wird dem System Energie entzogen). Bei Geschwindigkeiten über 0,8 m/s muss der Antrieb aktiv beschleunigen. Das Modell zeigt im Geschwindigkeitsbereich des Vorstreckers von 0,7 m/s bis 1,2 m/s eine gute Übereinstimmung mit der Realität. Der Modellfehler beträgt für das Gesamtsystem weniger als 5 J, dies entspricht bei 24 Kavitäten einem Fehler von 0,2 J. Je nach Formteil entspricht dies zwischen ein und zwei Prozent der realen Verstreckenergie. Bei einer Geschwindigkeit unterhalb 0,7 m/s stellen sich größere Differenzen ein, dies ist darauf zurückzuführen, dass die Reibungseffekte geschwindigkeitsabhängig sind und sich die Geschwindigkeit deutlich vom kalibrierten Betriebspunkt unterscheidet.

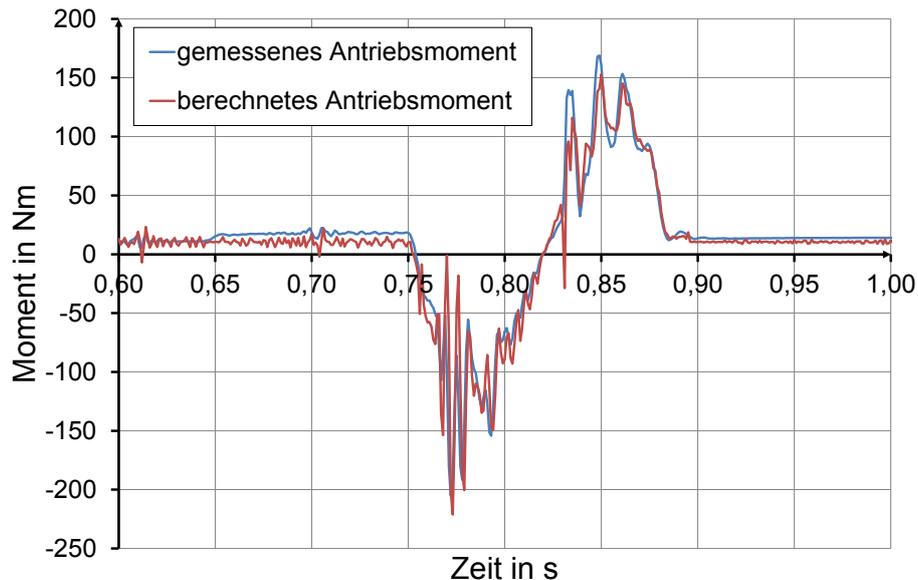


Bild 49: Vergleich von berechnetem und gemessenem Vorstreckermoment in Versuchspunkt 1; Werkzeug-Serialnr.: 40250; Vorstreckergeschwindigkeit: 1,15 m/s; Verfahrensweg: 96 mm.

Im realen Produktionsbetrieb kann das Modell im jeweiligen Betriebspunkt anhand der Rückfahrt des Vorstreckers kontinuierlich überprüft und adaptiert werden.

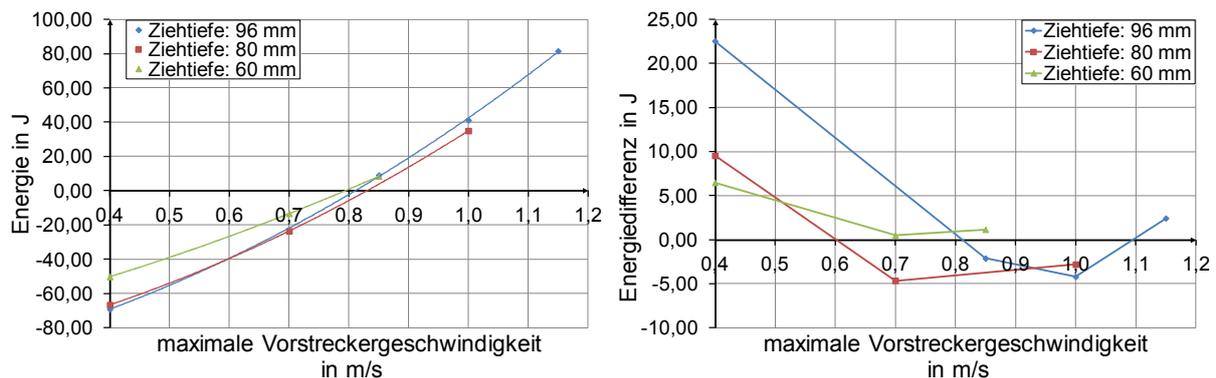


Bild 50: Abhängigkeit des Energieumsatzes und der Energiedifferenz zwischen Berechnung und Messung von der Vorstreckergeschwindigkeit und Ziehtiefe

Die gleiche Vorgehensweise kann für die Messung mit den Kraftmessdosen angewandt werden (Bild 51, Tabelle 12). Die Kraftverläufe sind im Leerlauf allerdings deutlich weniger von Ziehtiefe und Vorstreckergeschwindigkeit abhängig, da die beschleunigte Masse und die Reibung geringer sind, als bei dem Gesamtsystem. Da die Abhängigkeit geringer ist, wurde diese Strategie nur an einem Werkzeug getestet. Durch diese Modellannahme können Änderungen der Verschleißigenschaften aus der Messung der Kräfte und Momente berechnet und verglichen werden. Zudem können die Reibungseinflüsse aus der Verstreckenergie heraus gerechnet werden, dadurch bleibt bei sich ändernden Reibungsverhältnissen die ermittelte Verstreckenergie trotzdem konstant.

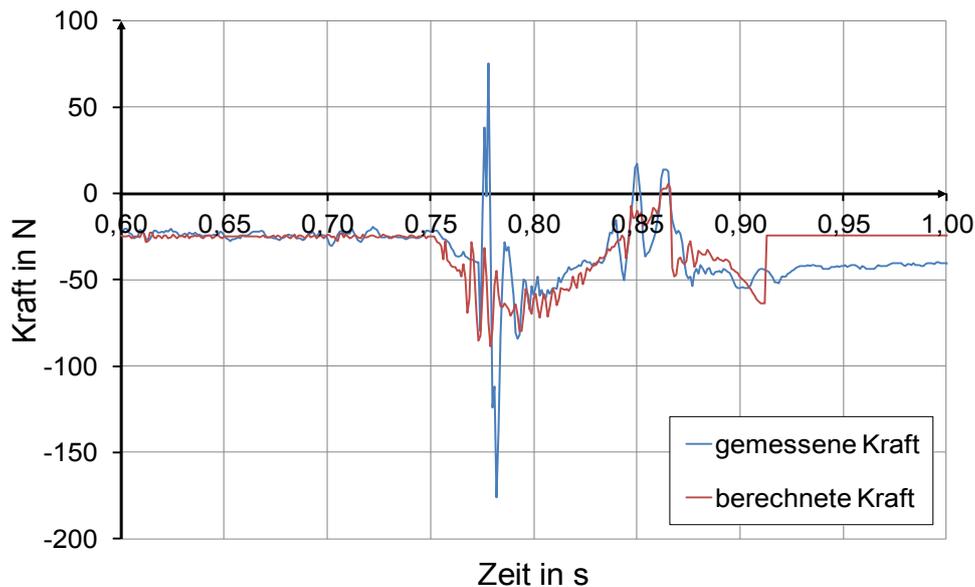


Bild 51: Vergleich von berechneter und gemessener Verstreckkraft in Versuchspunkt 1 für die Vorstreckerrückfahrt; Werkzeug-Serialnr.: 40250

Es konnte ebenso gezeigt werden, dass durch die modellbasierte Kennwertbildung zur Korrektur der ermittelten Energie des Antriebs, die Beschleunigungs- und Reibungseinflüsse zuverlässig eliminiert werden können. Der Nachweis wurde sowohl bei der Momentenmessung als auch bei der Kraftmessung in einer Vorstreckerstange überprüft. Dadurch ist es möglich, die Kräfte und Momente an beschleunigten Bauteilen aufzunehmen und Rückschlüsse auf das Verformungsverhalten des verstreckten Halbzeugs zu ziehen.

Tabelle 12: Modellparameter für Trägheits- und Reibkräfte. Alle Werte beziehen sich auf die gesamte Formfläche.

Werkzeugnr.	Beschreibung	m_{an}	b	F_G
40250	24fach Becherwerkzeug Formluftreduziert Formluftventile an Kopfplatte	0,25 kg	$2 \frac{\text{Js}}{\text{m}}$	25 N

7.2.3 Einflüsse des Materials auf die Verstreckkraft

Neben der Beschreibung des reinen Antriebssystems ist die Empfindlichkeit der Kraft und Momentenmessung in Bezug auf Temperaturänderungen des Halbzeugs und Änderungen in der Verstreckgeschwindigkeit untersucht worden. Dazu wurden zum einen ein isotaktisches PP-Homopolymer (PPH 4022) und ein amorphes PET bei verschiedenen Halbzeugtemperaturen umgeformt und die Verstreckkräfte in der Vorstreckerstange und Momente des Vorstreckerantriebs ermittelt (Bild 52). Um eine genauere Aussage über die reinen Verstreckkräfte zu erhalten, wurden die Beschleunigungseinflüsse aus den Kurven heraus gerechnet. Betrachtet man die Kraftverläufe, ist einen Kraftanstieg bei einer Position des Vorstreckers von 2 – 3 mm zu erkennen. In diesem Punkt berührt der Vorstreckler das Halbzeug und die Deformation startet. Durch den Impuls beim Auftreffen auf die Folie entsteht ein kurzzeitiger Kraftanstieg. Bis ca. 20 mm nimmt die Verstreckkraft degressiv zu. Die Deformation beginnt mit einer überwiegenden Biegebeanspruchung bis ca. 20 mm des Halbzeugs und ändert sich dann in eine fast reine Beanspruchung auf Zug. Diese Zugbeanspruchung charakterisiert den Bereich zwischen 20 mm und der finalen Ziehtiefe. Sie sorgt dabei für eine starke Orientie-

nung der Moleküle in Richtung der Verstreckung, was zu der in Kapitel 6.2.3 festgestellten Erhöhung des E-Moduls und der Festigkeit führt. Der Kraftanstieg kurz vor Ende der Verstreckung wird durch das Eingreifen der Dichtung zur Formluftreduzierung verursacht.

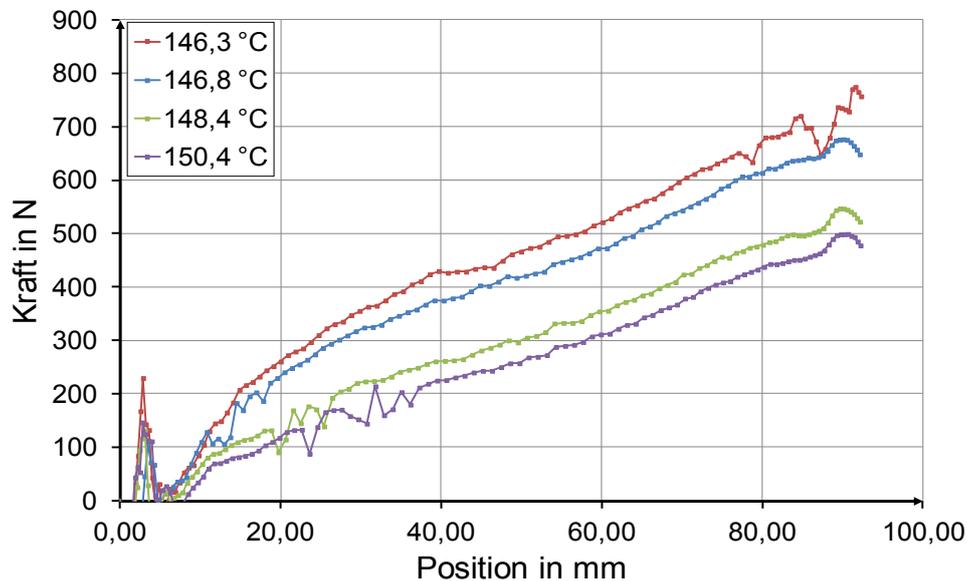


Bild 52: Temperaturabhängigkeit der Verstreckkräfte im Verarbeitungsfenster von Polypropylen ohne Beschleunigungs- und Reibungseinflüsse (Material: isotaktisches Polypropylen)

Die Temperaturabhängigkeit der Verstreckkraft bei der Verarbeitung von Polypropylen ist in Bild 52 gut zu erkennen. In dem betrachteten Temperaturbereich von 146,3 °C bis 150,4 °C ergibt sich eine Änderung der maximalen Verstreckkraft um 275 N, die entspricht einer Zunahme der Kraft um 55 %. Des Weiteren ist zu erkennen, dass sich die grundlegende Form des Kraftverlaufs bei den verschiedenen Temperaturen nicht ändert.

Neben der Kraft kann das Moment des Vorstreckerantriebs betrachtet werden (Bild 53). Auch hier zeigt sich die Korrelation zwischen Temperatur des Halbzeugs und dem Momentenbedarf zur Verstreckung bei konstantem Bewegungsprofil des Vorstreckers. Im Gleichen betrachteten Temperaturbereich ergibt sich eine Zunahme des maximalen Moments von ca. 60 Nm, was einer Zunahme von 60 % entspricht. Damit ist die Empfindlichkeit der beiden Messstellen fast gleich groß. Im Gegensatz zur Kraftmessung ist die Zunahme des Moments nach 20 mm Vorstreckerverweg nicht so ausgeprägt wie bei der Kraft. Dadurch eignet sich der Momentenverlauf zwar zur Beurteilung des Betriebspunktes, eine absolute Aussage zum Verformungsverhalten lässt sich hingegen nur über den Kraftverlauf bewerkstelligen. Dieser bietet sich damit für Versuchsaufbauten im Labor ([Bei10], [Heg04]) oder in Referenzanlagen an, die Momentenmessung kann kostengünstig zur Überwachung des Betriebspunktes von Produktionsanlagen eingesetzt werden.

Neben der Temperaturänderung haben Dehngeschwindigkeiten Einfluss auf die resultierenden Spannungen im Halbzeug ([Bei10], [Heg04]) und damit auch auf die messbaren Kräfte und Momente. Um diesen Einfluss bei dem vorliegenden Halbzeug zu ermitteln, wurden verschiedene Vorstreckergeschwindigkeiten eingestellt.

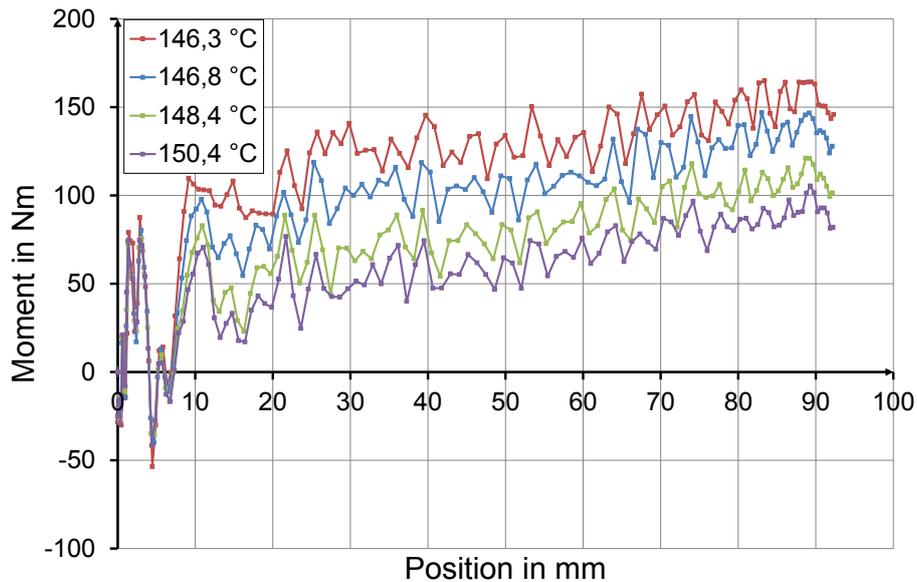


Bild 53: Temperaturabhängigkeit des Momentenbedarfs ohne Beschleunigungseinflüsse des Vorstreckermotors im Verarbeitungsfenster von Polypropylen

Die resultierenden Kraftverläufe sind in Bild 55 dargestellt. Man erkennt, dass die Kraft bei einer Vorstreckergeschwindigkeit von 0,75 m/s und 1 m/s und einer Vorstreckposition zwischen 20 mm und 75 mm um ca. 20 N größer ist, als bei einer Verstreckung mit einer Vorstreckergeschwindigkeit von 0,5 m/s. Bis 86 mm steigt die Differenz auf 40 N. Die Kraftverläufe deuten auf ein geringes geschwindigkeitsabhängiges Dehnverhalten des Materials hin.

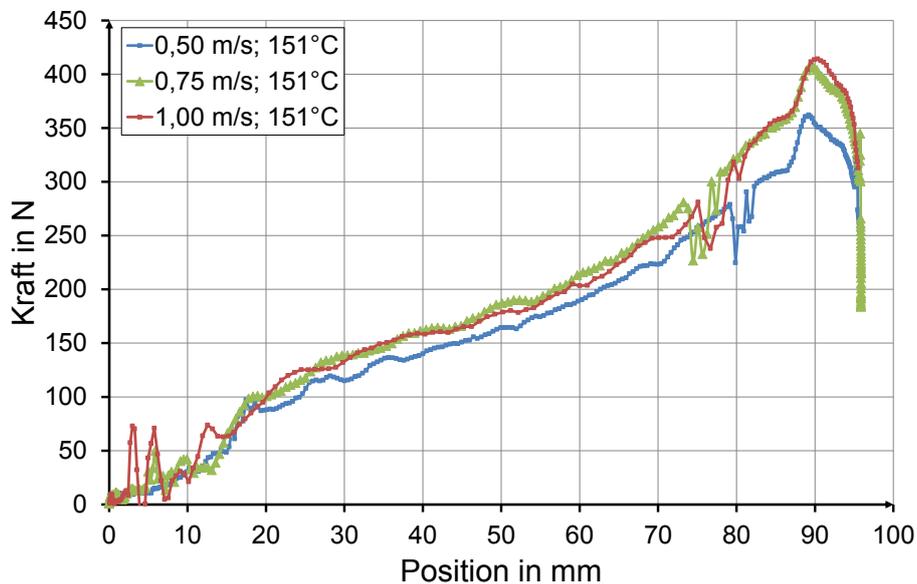


Bild 54: Verstreckkraft ohne Beschleunigungseinflüsse in Abhängigkeit der maximalen Vorstreckergeschwindigkeit (PP, 1,2 mm)

Dies bestätigt die Ergebnisse in Kapitel 6.2.1, dass die Verstreckgeschwindigkeit Einfluss auf die Wanddickenverteilung besitzt. Gleichzeitig zeigt sich, dass die Verstreckgeschwindigkeit in den maschinenspezifischen Grenzwerten einen deutlich geringeren Einfluss als das Thermoformfenster der Temperatur besitzt. Temperaturabweichungen können somit nicht oder nur eingeschränkt durch eine Veränderung der Verstreckgeschwindigkeit ausgeglichen werden.

Zudem verlängert eine langsamere Verstreckung die Zykluszeit direkt, sodass die Anlage idealerweise mit der maximalen Verstreckgeschwindigkeit betrieben werden sollte.

Betrachtet man den Kraftverlauf in der Vorstreckerstange über einen kompletten Zyklus, so existiert je nach Einstellung der Maschine zwischen mechanischem Verstrecken und pneumatischem Ausformen ein Bereich, in welchem die Kraft in der Vorstreckerstange abnimmt (Bild 55). Dies deutet darauf hin, dass sich hier Spannungen im Material durch Relaxationsvorgänge abbauen. Zu beobachten ist der Effekt auch in einem Teil der mechanischen Verstreckung, in dem die Verstreckgeschwindigkeit sehr gering ist.

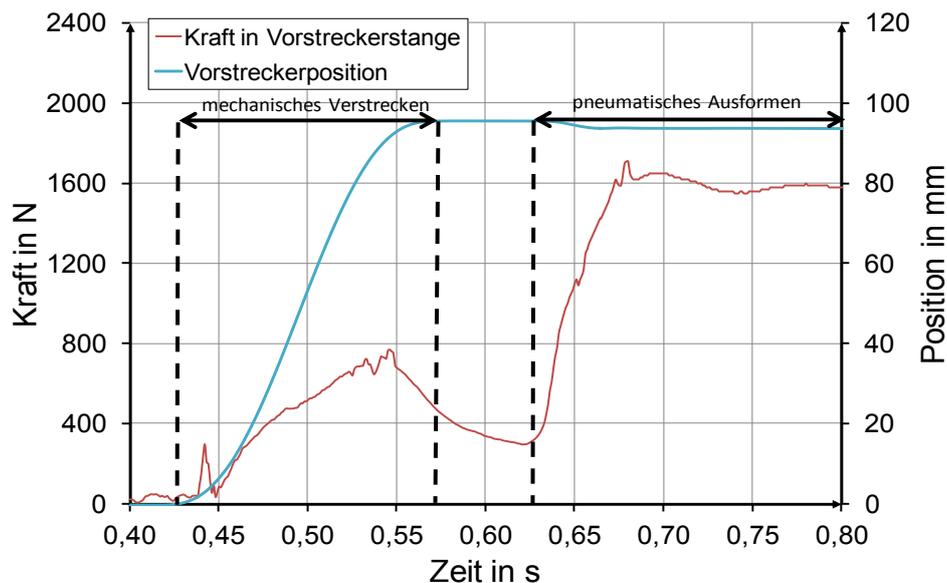


Bild 55: Kraftverlauf in der Vorstreckerstange über einen kompletten Formvorgang bei der Verstreckung von Polypropylen

Die Relaxationseffekte bestehen im kompletten Umformbereich; um diese zu vermeiden und eine möglichst kurze Zykluszeit zu erzielen, müsste das pneumatische Verstrecken ohne Verzögerung an das mechanische Verstrecken anschließen. Die Relaxationseffekte werden anhand des Bereichs zwischen mechanischem und pneumatischem Verstrecken untersucht (Bild 56). Betrachtet man den Kraftverlauf in Bild 56, zeigt sich, dass sich bei einer Temperatur von 146,3 °C innerhalb von ca. 55 ms die Kraft von 500 N auf 300 N abbaut. Dies entspricht einem Abbau von 40 % und ist ein nicht zu vernachlässigender Effekt. Zudem zeigt sich, dass durch eine höhere Temperatur eine deutlich geringe Kraft aufgebaut wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch eine niedrigere Viskosität des Materials bei hohen Temperaturen geringere Spannungen aufgebaut werden. Es ist zu vermuten, dass wenn die Relaxation verhindert wird, sich die Steifigkeit des Formteils durch die eingefrorenen Spannungen erhöht. Dieser Einfluss auf die Eigenschaften der Produkte konnte allerdings nicht nachgewiesen werden. Durch Verändern des Prozessablaufs, sodass keine Relaxation entsteht, wird entweder die Kühlzeit des Formteils oder die Taktleistung erhöht, was zu unterschiedlichen Heizprozessen führt. Ein Indiz dafür, dass durch die Relaxation messbare Änderungen der Formteileigenschaften hervorgerufen werden sind in Kapitel 6.2.1 und Bild 29 dargestellt. Dort zeigt sich eine Änderung der Wanddickenverteilung, wenn der Einsatzzeitpunkt der Formluft verschoben wird. Dies zeigt sich auch in einem Bereich, in dem der Vorstrecker seine Bewegung abgeschlossen hat (Bild 29, $t > 0$). Da in diesem Bereich keine Bewegungen auf das

Halbzeug einwirken, muss die Änderung der Wanddicke durch Umlagerung des Materials hervorgerufen werden.

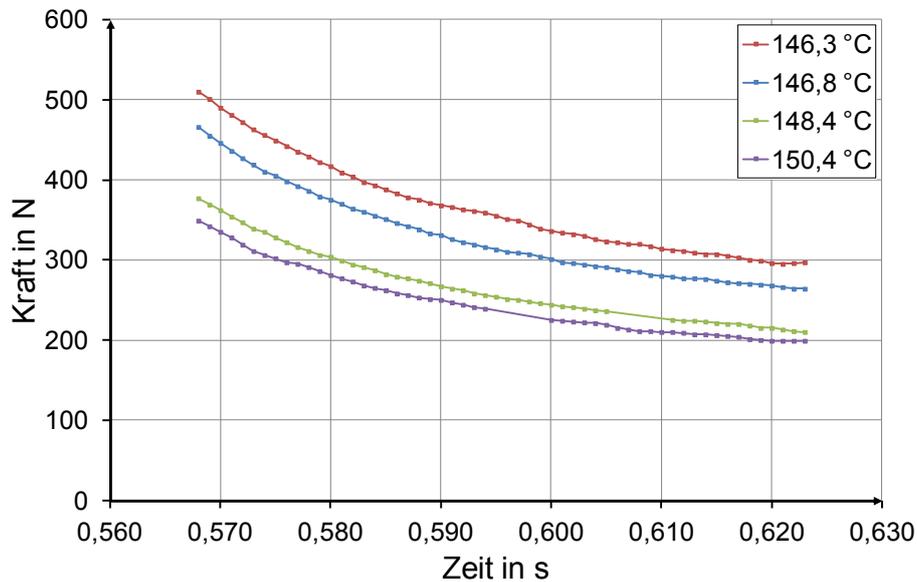


Bild 56: zeitabhängiger Kraftabbau in der Vorstreckerstange bei verschiedenen Umformtemperaturen aufgrund Relaxationseffekten zwischen mechanischer Verstreckung und pneumatischem Ausformen (Material: isotaktisches Polypropylen)

Auch beim Verstrecken von Polyethylenterephthalat (PET) kann eine Temperaturabhängigkeit der Verstreckkräfte nachgewiesen werden (Bild 57). Die Verstreckkraft zeigt im Vergleich zu PP einen signifikant anderen Verlauf. Der Kraftanstieg erfolgt von 10 mm bis 30 mm näherungsweise linear. Von 30 mm bis 70 mm bleibt die Kraft nahezu konstant, ab 70 mm nimmt diese wieder deutlich zu.

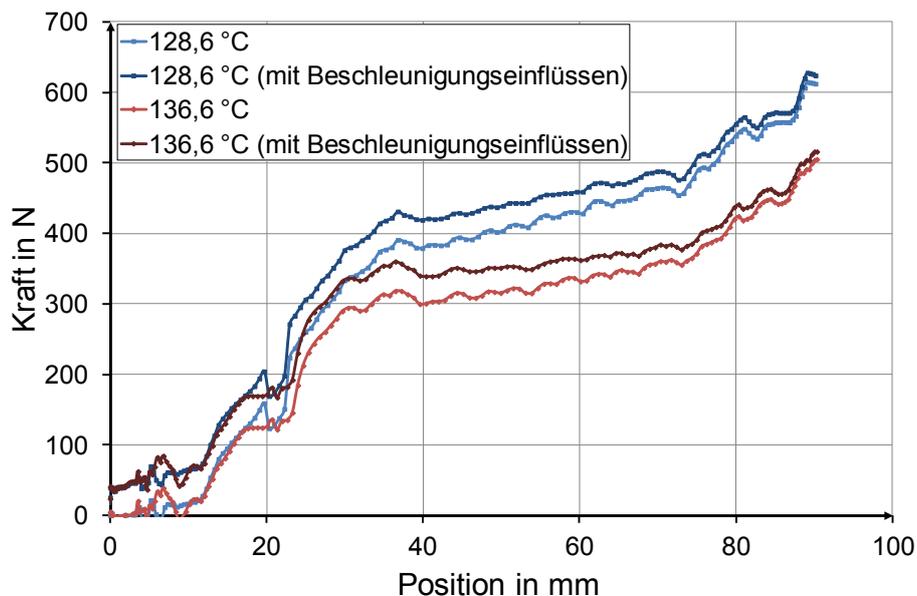


Bild 57: Verstreckkräfte beim Vorstrecken von Polyethylenterephthalat bei unterschiedlichen Temperaturen mit und ohne Beschleunigungs- und Reibungseinflüsse

Der Kraftverlauf deutet auf einen höheren Anteil viskoser Verformung hin, der kombiniert ist mit einer Dehnverfestigung bei hohen Verstreckgraden. Das Verhalten, mit der Unterteilung in drei Bereiche, wurde bereits von [Lie08] festgestellt und in Anlehnung an metallische

Spannungs-Dehnungs-Verläufe in die Bereiche der Dehngrenze (ca. 38 mm) und der Dehnverfestigung ab ca. 70 mm eingeteilt.

Dieses unterschiedliche Verhalten begründet die unterschiedlichen Gestaltungsregeln der Vorstreckergeometrie für beide Materialien. Zudem kann festgestellt werden, dass die Temperaturabhängigkeit der Verstreckkraft eine geringere Steigung besitzt. Bei PP führt eine um 4 K niedrigere Halbzeugtemperatur zu einem Anstieg der Kraft um 60 %. Bei der Verarbeitung von PET führt eine um 8 K niedrigere Temperatur zu einer Erhöhung der Kraft um 20 %. Dies kann dadurch begründet werden, dass PP im Solid-Phase-Verfahren nahe der Kristallitschmelztemperatur verformt wird und PET zwischen der Glasübergangstemperatur und der Kristallitschmelztemperatur.

Wie bei der Verarbeitung von PP zeigen sich bei PET nach dem Vorstrecken Relaxationseffekte (Bild 58). Diese sind im Gegensatz zu Polypropylen allerdings deutlich geringer. Während bei PP die Kraft in einer Zeit von 55 ms um 40 % abgebaut wird, erfolgt bei PET in der gleichen Zeit nur ein Abbau von 16 %. Auch diese Tatsache lässt sich mit dem Materialverhalten begründen. PET verhält sich bei der Umformung deutlich plastischer als Polypropylen.

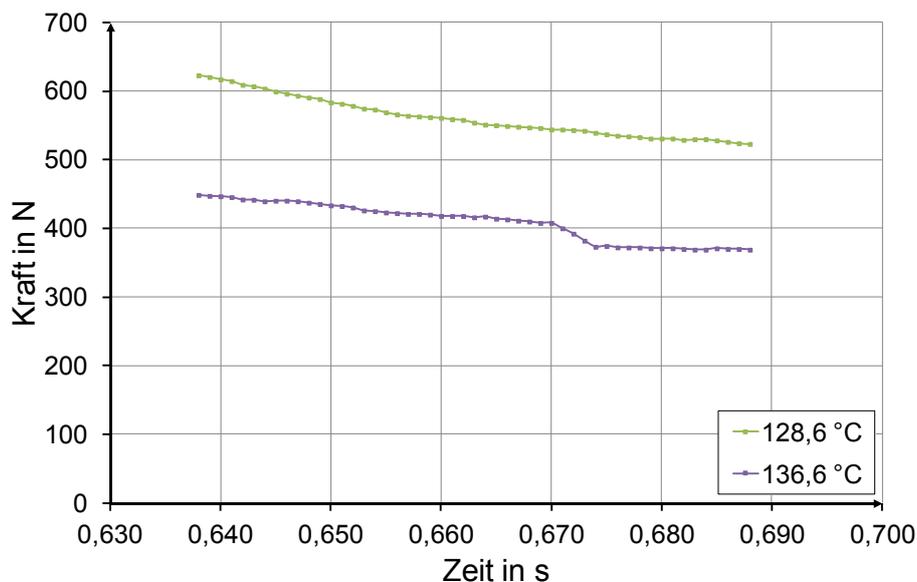


Bild 58: zeitabhängiger Kraftabbau in der Vorstreckerstange bei verschiedenen Umformtemperaturen aufgrund Relaxationseffekten zwischen mechanischer Verstreckung und pneumatischem Ausformen (Material: amorphes Polyethylenterephthalat)

Es konnte gezeigt werden, dass durch die Verwendung von Kraftmessdosen in einer Vorstreckerstange ein deutlicher Informationsgewinn erfolgt. Zudem konnte gezeigt werden, dass die Beschleunigungseinflüsse, die auf die Kraftmessdose wirken in vielen Fällen vernachlässigt werden können oder falls dies nicht der Fall ist rechnerisch kompensiert werden können. Es ist für die Charakterisierung des Prozesses und des Materialverhaltens nicht notwendig die Kraftmessstelle in den ruhenden Teil eines Werkzeugs zu integrieren, wie es [Heg04] fordert. Zudem konnte gezeigt werden, dass die Momente und Kräfte empfindlich auf Temperaturänderungen reagieren. Dies gilt sowohl für PP als auch für PET. Diese eignen sich somit zur Beschreibung des Materialverhaltens im Betriebspunkt der Anlage. Im Weiteren muss noch die Abhängigkeit verschiedener Halbzeugtypen gezeigt werden.

7.3 Analyse der Schließ- und Schnittkräfte

Zur Messung der Schließkraft wurde die Maschine mit einem Schließkraftmesssystem ausgestattet. Das System basiert auf Dehnungssensoren, die an beiden Kniehebeln des Werkzeuguntertisches die Dehnung aufnehmen (Bild 59). Durch die Kalibrierung der Dehnungssensoren im Formbereich kann dadurch die Kraft ermittelt werden, die auf die Kniehebel wirkt. Die primäre Funktion des Systems ist es eine Überlastung des Form- und Stanzaggregats der Maschine zu erkennen und zu verhindern.

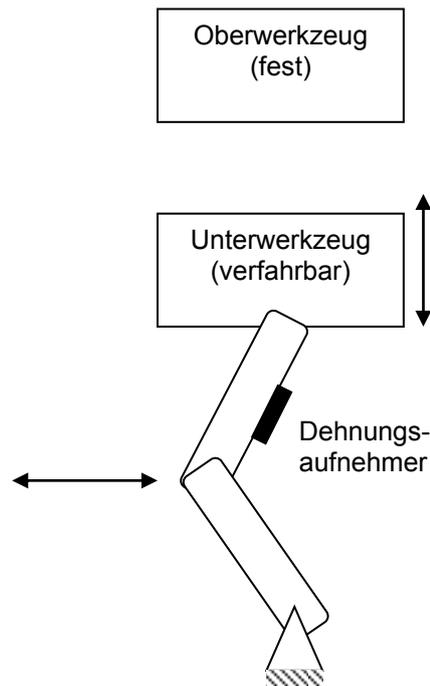


Bild 59: Messaufbau Schließkraftmessung

Die gemessene Schließkraft in kombiniert formend und stanzenden Maschinen ist eine zusammengesetzte Kraft. Sie setzt sich aus der Schnittkraft und Kräften, die durch Ausformen des Formteils oder der Klemmung der Formteile resultieren, zusammen. Als Schnittkraft ist diejenige Kraft definiert, die benötigt wird, ein Halbzeug zu schneiden. Die Schnittkräfte werden, wie die Verstreckkräfte, von den temperaturabhängigen Materialeigenschaften beeinflusst. Die Klemmkraft der Niederhalter und die Kraft durch die pneumatische Ausformung können aus der Schnittkraft heraus gerechnet werden, da die Druckverläufe zeitgleich gemessen werden und die Kolbenflächen im Werkzeug bekannt sind. Diese Kräfte lassen sich im Verlauf des Messsignals der Stanzkraft identifizieren (Bild 60). Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Schneiden bei diesen Werkzeugen zweigeteilt erfolgen kann. Das Anschneiden erfolgt beim Schließen des Werkzeugs, dabei verbleibt eine ungeschnittene Materialstärke von einigen zehnteln Millimetern. Diese sorgt für ein abgedichtetes Werkzeug. Das Durchschneiden erfolgt am Ende des Formprozesses kurz vor dem Öffnen des Werkzeugs durch einen zusätzlichen Stanzhub des Unterwerkzeugs. Das Schließen des Werkzeugs erfolgt bei 0,32 s, ab diesem Zeitpunkt wirkt die Schnittkraft, die notwendig ist, das Halbzeug anzuschneiden und zu klemmen. Ab 0,4 s ist ein Kraftanstieg zu erkennen, der dem Anheben des Klemmdrucks durch die Niederhalter von 2 bar auf ca. 5 bar entspricht. Bei 0,5 s wird der Formdruck eingeschaltet, um das Produkt auszuformen. Ab dem Zeitpunkt 1,5 s wird der Formdruck

wieder abgebaut. Ab 1,6 s wird der Niederhalterdruck abgebaut. Der Kraftanstieg bei 1,7 s ist auf das Durchschneiden der Restdicke der Folie zurückzuführen. Die Messung der jeweiligen Prozessdrücke (Bild 60) beweist, dass es sich bei den jeweiligen Kraftänderungen um die Aufbau- und Abbauzeitpunkte der Prozessdrücke handelt.

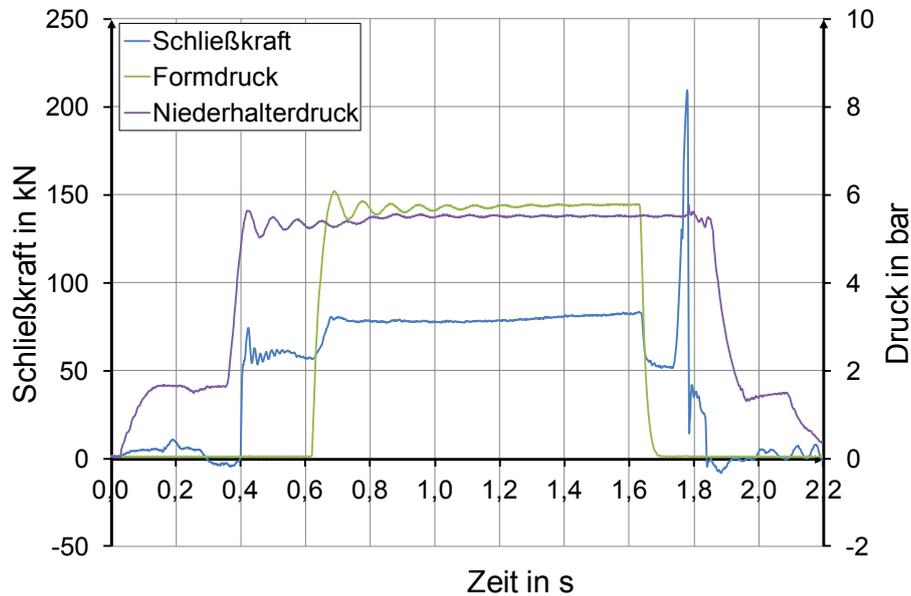


Bild 60: Schließkraftverlauf über einen Zyklus

Aus den Werkzeuggeometrien und den Verläufen der Prozessdrücke können die theoretisch auf die Kniehebel wirkenden Kräfte aufgrund der Drücke berechnet werden. Werden diese vom Schließkraftverlauf subtrahiert, ergibt sich die reine Schnittkraft mit wirkenden Trägheitskräften beim Abbremsen des Unterwerkzeugs (Bild 61). Dieses Vorgehen vermindert den Einfluss von Prozesseinstellungen auf das Messergebnis der Schnittkräfte.

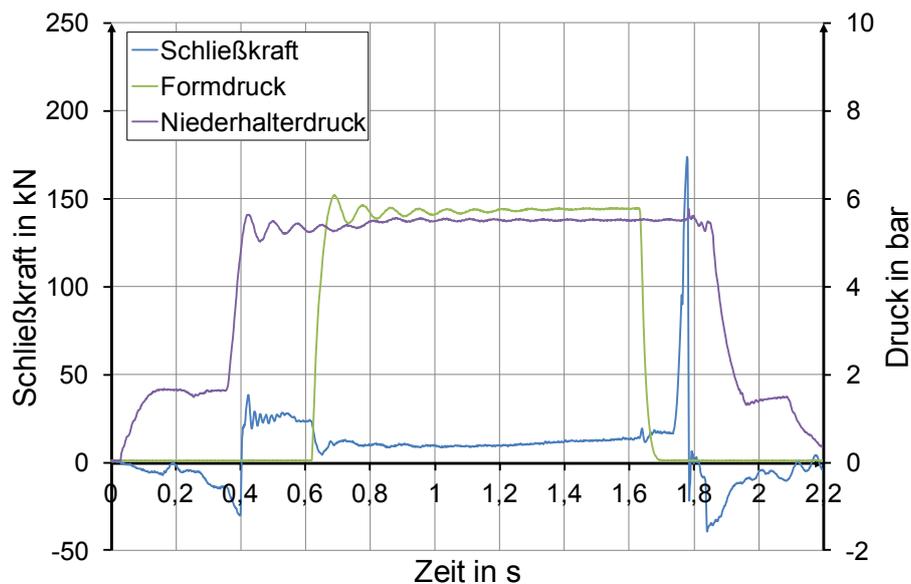


Bild 61: Schnittkraftverlauf in einem Zyklus

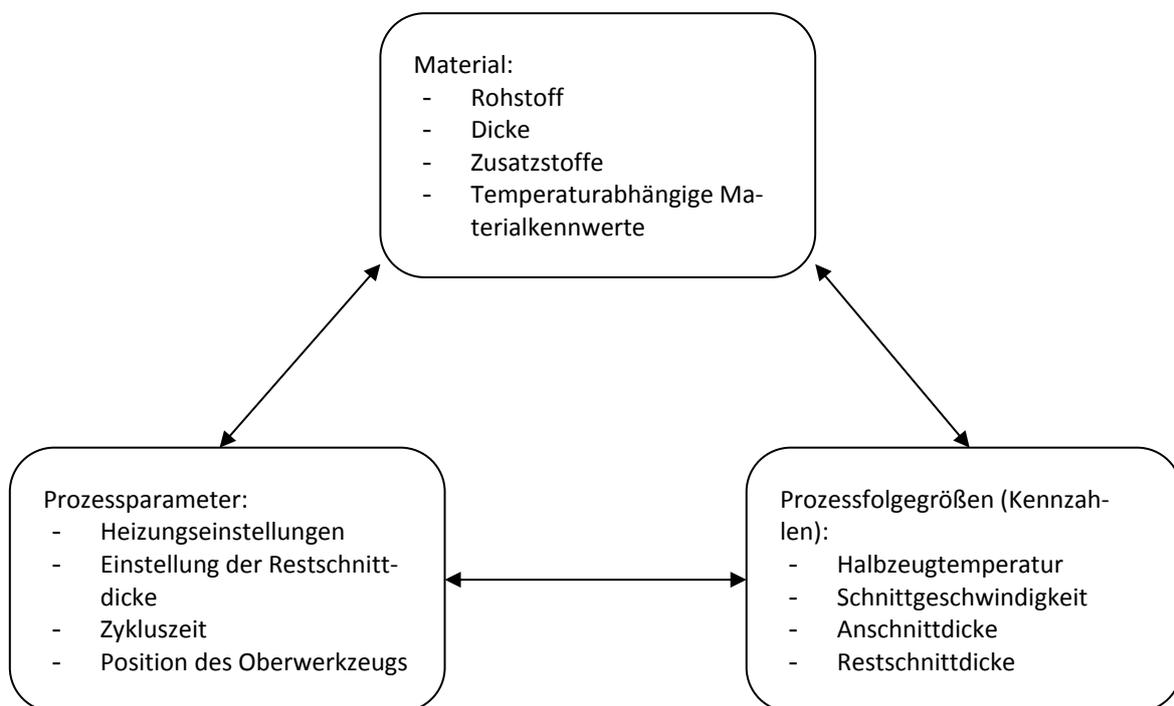
Zur Überprüfung dieser Hypothese wurden verschiedene Druckverläufe eingestellt und der Schließkraftverlauf überprüft (Tabelle 13).

Tabelle 13: Versuchspunkte mit Variation der Niederhalterdrücke und Einschaltzeitpunkte

Restschnitt- dicke	Niederhalter- vordruck	Niederhalter- hauptdruck	Einsatzzeitpunkt Niederhaltervordruck	Einsatzzeitpunkt Niederhalterhaupt- druck
0,5 mm	2 bar	6 bar	-250 ms	0 ms
0,5 mm	2 bar	3 bar	0 ms	0 ms
0,5 mm	0 bar	6 bar	0 ms	150 ms
0,5 mm	0 bar	3 bar	0 ms	150 ms
0,5 mm	2 bar	6 bar	-250 ms	0 ms

Die beschriebenen Zusammenhänge konnten für verschiedene Niederhalterdrücke, Formdrücke, sowie variierende Einschaltzeitpunkte bestätigt werden. Werden die Prozessdrücke aus den Kraftverläufen entfernt, kann von einer Schnittkraft, die notwendig ist ein bestimmtes Material zu schneiden, gesprochen werden. Bei der Schnittkraft kann zwischen Anschnittkraft und Durchschnittskraft unterschieden werden. Die Anschnittkraft tritt beim Schließvorgang des Werkzeugs auf, das Material wird bis auf eine gewünschte Restschnittdicke angeschnitten. Die Durchschnittskraft tritt beim Stanzhub des Werkzeugs auf, wenn das Formteil komplett vom Folienrestgitter getrennt wird.

Einfluss auf die Schnittkräfte nehmen das Material und die Prozesseinstellungen (Bild 62). Da die Prozesseinstellungen stark vom Material beeinflusst werden, wurden zur Analyse und Vergleichbarkeit Prozessfolgegrößen, wie Halbzeugtemperatur, zur Analyse herangezogen.

**Bild 62: Einflussparameter auf die Schnittkräfte beim Thermoformen**

In einer Messreihe konnte der Einfluss der Temperatur auf die Schnittkräfte ermittelt werden. In dieser wurde die Umformtemperatur variiert, um eine Aussage zum Verhalten der Schnittkräfte in Abhängigkeit der Temperatur zu erhalten. Dabei ist wie bei der Verstreckkraft eine messbare Abhängigkeit der Schnittkraft von der Temperatur festgestellt worden (Bild 63). Zum Zeitpunkt $t = 0,4$ s schließt das Werkzeug und schneidet die Folie an (bei der gezeigten

Obertischeinstellung wird das Halbzeug komplett durchgeschnitten). Die Schnittkraft zeigt hier eine Änderung von 35 kN bei einer Änderung der Umformtemperatur von ca. 1,7 °C. Dies entspricht einer Änderung der Schnittkraft um 66 %, diese weist damit eine ähnlich große Temperaturabhängigkeit auf wie die Verstreckenergie. Zum Zeitpunkt $t = 2,1$ s erfolgt der Kraftanstieg am Stanzhub des Werkzeugs. Der Kraftanstieg beruht hierbei auf Beschleunigungs- und Reibungseinflüssen, da das Halbzeug bereits beim Anschneiden komplett durchgeschnitten wurde (Restschnittdicke $r = 0$ mm).

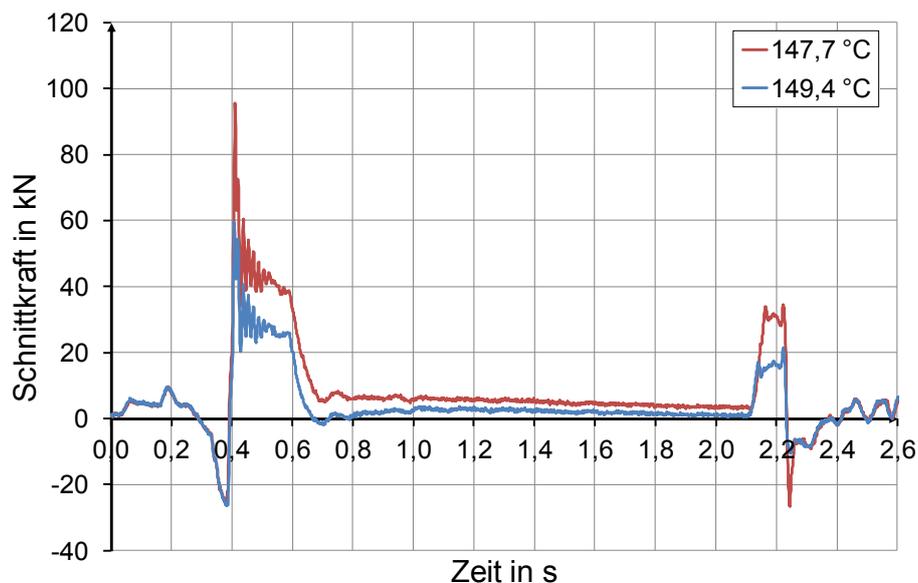


Bild 63: Einfluss der Halbzeugtemperatur auf die Anschnitt- und Durchschnittskraft. Anschnitt $t = 0,4$ s, Durchschnitt $t = 2,2$ s (Material: Polypropylen $d = 1,4$ mm, Restschnittdicke $r = 0$ mm)

Wird die Anschnittdicke reduziert und dadurch die Restschnittdicke am Stanzhub gesteigert, so verringert sich die Anschnittkraft und die Durchschnittkraft nimmt zu (Bild 64).

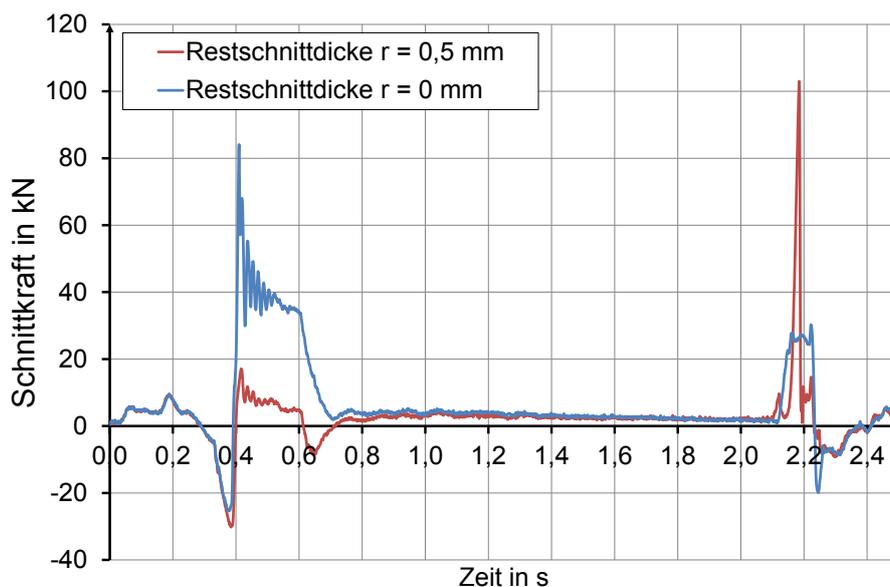


Bild 64: Einfluss der Restschnittdicke auf die Anschnitt- und Durchschnittskraft (Material: Polypropylen $d = 1,4$ mm)

Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Anschneiden am erwärmten Halbzeug, das Durchschneiden am gekühlten Formteil erfolgt. Dadurch ist für das Durchschneiden im Stanzhub tendenziell eine höhere Kraft aufgrund der höheren Materialfestigkeit notwendig. Zudem erkennt man, dass zwischen Anschneiden und Durchschneiden, außer den Prozessdrücken keine zusätzlichen Belastungen auf das Werkzeug einwirken.

Betrachtet man den Zusammenhang zwischen Temperatur und den ermittelten Schnittkräften, so kann sowohl bei Polypropylen als auch bei PET, ein nichtlinearer Zusammenhang im Bereich des Umformfensters festgestellt werden (Bild 65, Bild 66). Es wird zudem die Herausforderung bei der Thermoformung von Polypropylen sichtbar. Die Schnittkräfte sinken im Umformbereich überproportional zur Temperaturerhöhung, dies ist im Umformbereich nahe dem Kristallitschmelzpunkt begründet. Die festgestellten Anschnittkräfte variieren in diesem Bereich von 2 K um ca. 40 %.

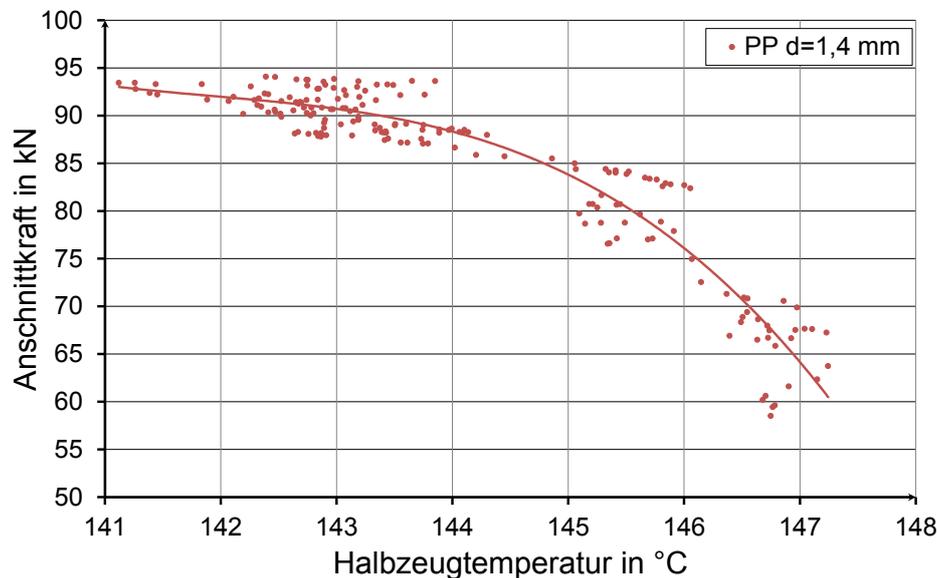


Bild 65: Temperaturabhängigkeit der Schnittkraft (Anschnitt) von Polypropylen (Restschnittdicke $r = 0$ mm)

Die ermittelten Kräfte bei der Verarbeitung von PET zeigen, dass zum einen der Temperaturbereich in dem eine Umformung möglich ist, deutlich breiter ist und zum anderen die Temperaturabhängigkeit geringer ist. Auffallend ist auch, dass die Umformung beim Thermoformen von PET deutlich über der Glasübergangstemperatur von ca. 80 °C erfolgt. Ursache hierfür ist, dass die Anlagen mit einem maximalen Formdruck von 10 bar betrieben werden können. Dadurch ist das Temperaturfenster bei gewünschter Ausformschärfe begrenzt. Neben dem schmaleren Temperaturfenster hat dies den weiteren Nachteil, dass aufgrund der hohen Temperaturen nur relativ geringe Dehnverfestigungen erreicht werden können [Leo11].

Die größere Temperaturabhängigkeit bei der Polypropylenverarbeitung führt dazu, dass die Messunsicherheit der Temperaturmessung des Halbzeugs zu größeren Streuungen der Messpunkte führt als bei PET. Die Schnittkräfte von PET ändern sich innerhalb 20 K um ca. 20 %. Eine Messunsicherheit von $\pm 0,5$ K führt damit zu Unsicherheiten von ± 10 % bei PP und $\pm 0,5$ % bei PET. Diese Unzulänglichkeit der Temperaturmessung begründet die in Bild 65 sichtbare große Streubreite der Messwerte.

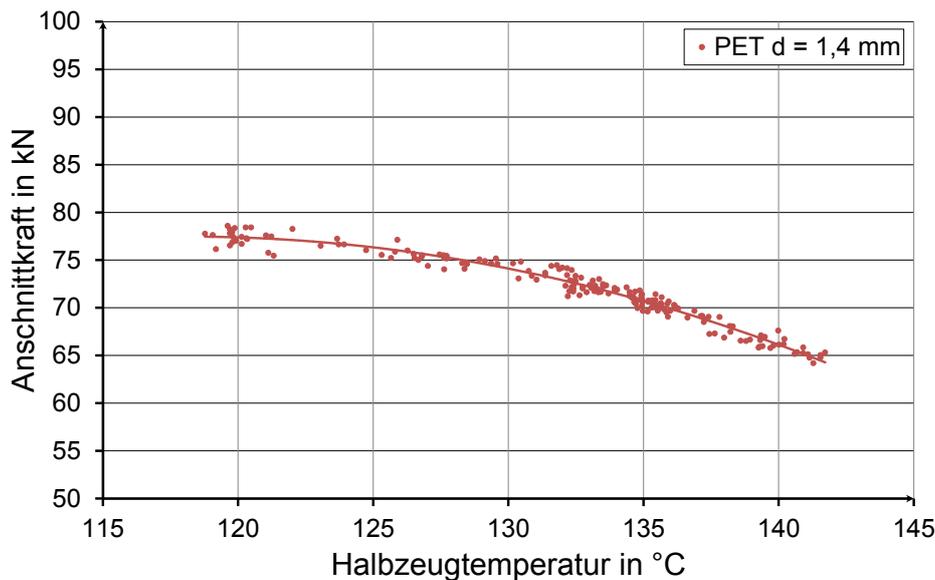


Bild 66: Temperaturabhängigkeit der Schnittkräfte (Anschnitt und Durchschnitt) von PET (Restschnittdicke $r = 0$ mm)

Neben der Umformtemperatur beeinflusst zudem die Anschnitttiefe die resultierenden Anschnitt- und Durchschnittkräfte. Zur Identifizierung des Einflusses der Anschnitttiefe wurden verschiedene Materialien getestet. Da die Zykluszeit nicht konstant gehalten werden konnte, wurde eine konstante Umformtemperatur vor dem Formen als Referenz angesetzt, um eine Vergleichbarkeit zu schaffen.

Die Auswertungen von Anschnitt- und Durchschnittkraft ergaben die in Bild 67 dargestellten Zusammenhänge. Dort werden die auftretenden Kräfte während des An- und Durchschneidens über der Restschnittdicke dargestellt. Eine negative Restschnittdicke bedeutet Durchschneiden des Materials beim Anschneiden. Die theoretische Restschnittdicke, die auf den Maschinen eingestellt werden kann, beträgt $s = 0,8$ mm, dies entspricht der Höhe des Stanzhubs. In der Praxis ergaben sich Abweichungen von dieser Theorie, die in der Verformung des Formaggregats durch die auftretenden Schließkräfte begründet sind.

Die Anschnitt- und Durchschnittkraft ist bei allen Materialien bei einer Restschnittdicke unter $r = 0$ mm konstant. Das Ansteigen der Durchschnittkraft, bei einer negativen Restschnittdicke, ist darin begründet, dass die Restschnittdicke der einzelnen Kavitäten aufgrund von Fertigungstoleranzen variieren kann. Zudem kann aufgrund der Viskosität des Materials trotz voll ineinandergreifender Matrize und Patrize im Schnittspalt eine Art Scharniergelenk bilden, das sich wie ein existierender Restschnitt verhält. Mit zunehmender Restschnittdicke (geringerer Anschnitttiefe) nimmt die Anschnittkraft ab, während die Durchschnittkraft zunächst konstant bleibt (Bild 67). Bei PET ist die Durchschnittkraft bis zu einer Restschnittdicke von ca. 0,2 mm konstant und fällt bis maximalen Restschnitt um mehr als 50 % ab (Bild 67, links). Bei PP ist Sie bis ca. 0,4 mm Restschnittdicke konstant und nimmt bis zur maximalen Restschnittdicke um 25 % ab (Bild 67, rechts). Dieses Verhalten kann durch eine Überlagerung von zwei Effekten beschrieben werden. Zum einen steigt die Schnittkraft mit zunehmender Restschnittdicke aufgrund des höheren Widerstands gegen Scherung durch eine größere Schnittfläche. Die Kraft müsste somit mit steigender Restschnittdicke stetig ansteigen. Durch die geringere Restschnittdicke wird allerdings die Kühlung im Bereich des Schnittspaltes ver-

bessert, d. h., bei größeren Restschnittdicken ist das Material im Schnittpalt tendenziell wärmer und besitzt daher eine geringere Viskosität. Des Weiteren ist bei der Verarbeitung von PP eine deutliche Abhängigkeit von der Dicke festzustellen, die bei PET nicht festgestellt werden konnte. Dies deutet bei Polypropylen mit einer Dicke von 1,9 mm darauf hin, dass durch die Dicke des Halbzeugs und den daraus sich ändernden Zykluszeiten sich die Temperatur des Halbzeugs, insbesondere im Dickenprofil, geändert hat. Durch eine Messung von Schließkräften und Verstreckkräften lässt sich der Betriebspunkt der Anlage bei der Verarbeitung von Polypropylen genauer identifizieren, als durch eine Messung der Temperatur des Halbzeugs. Zudem ergeben sich zusätzliche Informationen über die Erwärmung im Inneren des Halbzeugs, die durch eine berührungslose Temperaturmessung nicht erkannt werden können.

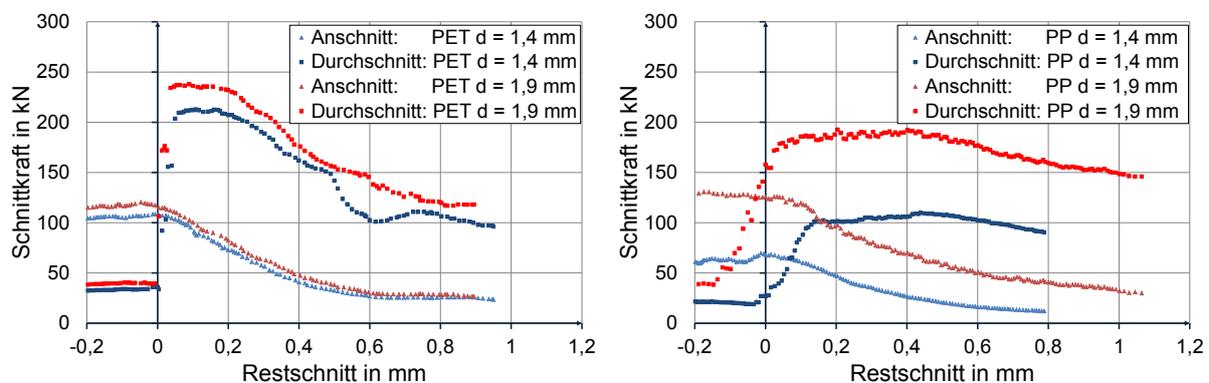


Bild 67: Schnittkräfte in Abhängigkeit der Restschnittdicke bei APET und PP

Neben der Verstreckkraft des Vorstreckers kann die Schnittkraft ebenso als Kennzahl zur Beurteilung des Betriebspunkts und des Materialverhaltens herangezogen werden, da sie empfindlich auf Temperaturänderungen (bei gleichbleibendem Material) reagiert. Analog zu der Betrachtung des Vorstreckermotors kann die Belastung durch das Anschneiden auch am Momentenbedarf des Hauptantriebs abgelesen werden. Dabei konnte beim Anschneiden ein Einfluss von Anschnitttiefe und Temperatur ermittelt werden. Das Durchschneiden kann vom Umrichter nicht aufgelöst werden, da er je nach Anschnittkraft die Momentenbegrenzung erreicht.

8 Korrelation der Formteilparameter mit Prozesskennwerten und Materialien

8.1 Verwendete Prozessgrößen und Versuchsdurchführung

In Tabelle 14 sind verschiedene Prozessgrößen genannt, die Produkteigenschaften beeinflussen oder anhand derer Änderungen im Prozess festgestellt werden können.

Tabelle 14: Informationsgehalt von verschiedenen Prozessgrößen

Prozessgröße	Abhängigkeit von	Beeinflusste Formteilmerkmale
Verstreckenergie	- Erwärmung des Materials - Materialeigenschaften - Kinematik des Vorstreckers	Reaktionsgröße auf Materialverhalten
Schnittkräfte	- Erwärmung des Materials - Materialeigenschaften - Restschnitt	Reaktionsgröße auf Materialverhalten
Niederhalterposition	- Dopplungserkennung - Messung Siegelranddicke	Reaktionsgröße auf die Siegelranddicke
Niederhalterdruck	- Einstellung an Maschine/Netz	Siegelranddicke
Formdruck	- Einstellung an Maschine/Netz	Ausformschärfe

Zur Untersuchung der in Kapitel 7.1 definierten Verstreckenergie als qualitätsrelevante Prozesskenngröße wurden unterschiedliche Polypropylene eingesetzt (Tabelle 15). Bei PPH 4026 handelt es sich um ein Polypropylen, dessen Granulat bereits hochnukleiert ist. Bei den Typen des Rohstoffs PPH 4022 handelt es sich um ein nukleiertes Polypropylen. PPH 4022+TiO₂ wurde mittels Titandioxid weiß eingefärbt. Bei PPH 4022+Clarifier wurde die Nukleierung in der Extrusion erhöht, dadurch wurde die Transparenz des Materials angehoben. PPC 4022/4660 ist ein Blend aus dem Homopolymer PPH 4022 und dem Copolymer PPH 4660. Die Foliendicke betrug 1,2 mm, mit einer Dickentoleranz von ± 2 %.

Tabelle 15: Verwendete Halbzeuge

Bezeichnung	Granulat	Zusatz in Extrusion	Rohstoff	MFI	E-Modul	Farbe	Kristallit-schmeltemp.
PPH 4026	PPH 4026	-	PP	3	2000 $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Transparent	165 °C
PPH 4022	PPH 4022	-	PP	3	1700 $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Transparent	165 °C
PPH 4022+TiO ₂	PPH 4022	TiO ₂	PP	3	1700 $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Weiß	165 °C
PPH 4022+Clarifier	PPH 4022	Clarifier	PP	3	1700 $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Transparent	165 °C
PPC 4022/4660	PPH 4022	-	PP	3	1700 $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Weiß	165 °C
	PPC 4660		PP/PE-COPO	3,5	1200 $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$		165 °C

Mit den beschriebenen Halbzeugen wurden Formteile hergestellt. Dazu wurden je 400 Zyklen gefahren. Dabei benötigte die Maschine mindestens 150 Takte, bis sie thermisch eingeschwungen war (Bild 68). Diese Zeit wird durch die verwendete Vorheizung, die aufgrund großer Massen sehr träge reagiert, bestimmt. Zudem besteht in den ersten 200 Takten ein

Gradient um den Umfang der Heizwalzen der Vorheizung, diese werden durch die in Kapitel 5.1 erörterten Effekte verursacht. Sichtbar werden diese durch ein Schwingen der Einlauf-temperatur. Der Effekt der schwingenden Einlauf-temperatur kann ebenfalls in der Verstreckenergie beobachtet werden (Bild 71). Zur weiteren Verifizierung wurden weitere Folien getestet, die sich in der Dicke unterscheiden.

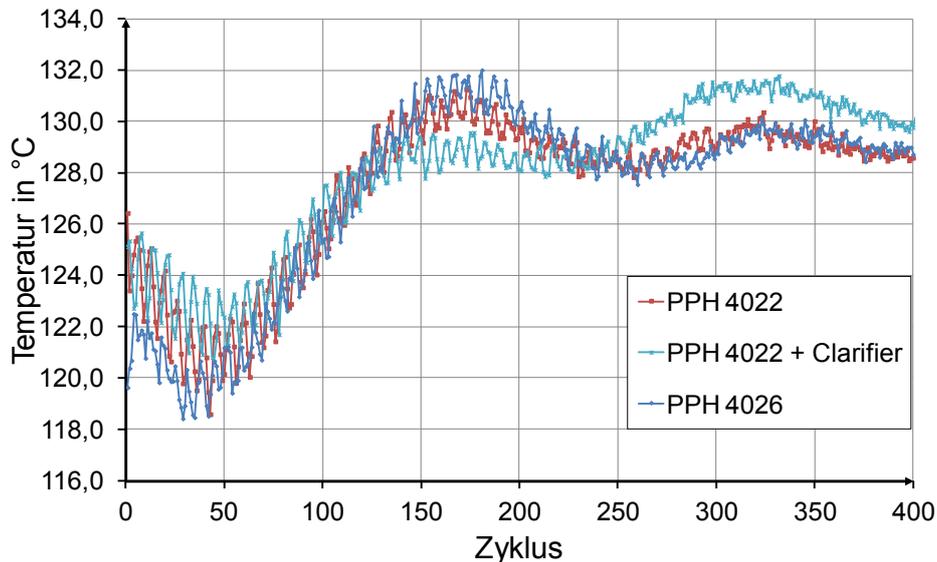


Bild 68: Temperaturen der transparenten Polypropylentypen zwischen Vorheizung und Formmaschine während der Versuchsdurchführung

Zunächst wurden die transparenten Halbzeuge, für die eine Maschineneinstellung verfügbar war verwendet (PPH 4026, PPH 4022, PPH 4022+Clarifier). Nach 200 Takten wurden die Strahlertemperaturen der Infrarotheizung gesenkt (Bild 69). Dies erfolgte bis zur unteren Grenze des Verarbeitungsfensters. Festgelegt wurde die Grenze durch die maximale mögliche Leistung des Vorstreckantriebs.

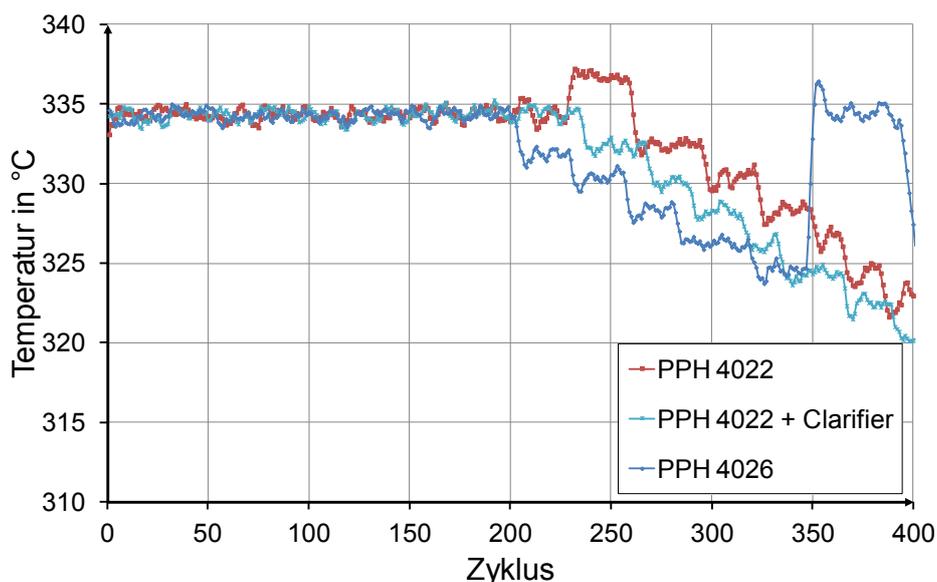


Bild 69: Heizungstemperatur der Infrarotheizung der Formmaschinen während der Versuchsdurchführung mit den transparenten Polypropylentypen

Der weiß eingefärbte PPC 4022/4660 wurde mit gleicher Einstellung wie die transparenten Typen angefahren. Da aufgrund der Einfärbung die Absorption der IR-Strahlung verbessert wurde und die Materialeigenschaften verändert wurden, mussten die Strahlertemperaturen vor Erreichen der 200 Takte korrigiert werden (Bild 70). Dabei sorgt der Polyethylenanteil im beigemischten Copolymer für ein Absenken des Temperaturfensters der Umformung. Bei der Verarbeitung des zweiten eingefärbten PPH 4022+TiO₂ ohne Polyethylenanteil musste die Strahlertemperatur wiederum angehoben werden (Bild 70), um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen.

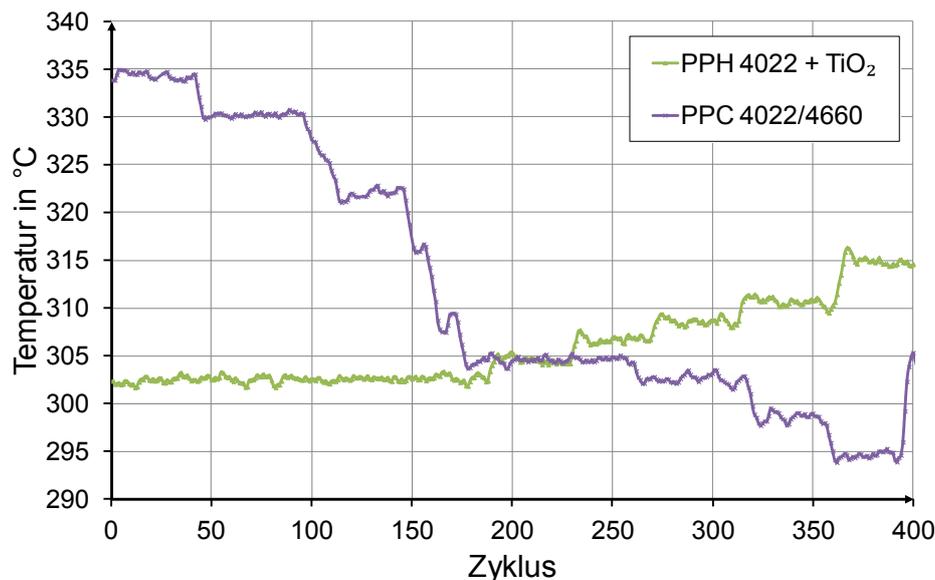


Bild 70: Heizungstemperatur der Infrarotheizung der Formmaschinen während der Versuchsdurchführung mit den transparenten Polypropylentypen

Aus der Temperatur nach der Vorheizung und der Temperaturen der Strahlerheizung ergibt sich das resultierende Temperaturniveau vor dem Umformen. Die Verläufe der gemessenen Oberflächentemperaturen des Halbzeugs vor dem Umformen sind in Bild 71 dargestellt. Deutlich zu erkennen sind die taktweisen Temperaturschwankungen von bis zu 2 K während der ersten 150 Takte. Die zugehörigen Verstreckenergien sind in Bild 71 dargestellt. Betrachtet man die Halbzeugtemperaturen und die dazugehörigen Verstreckenergien, so lässt sich vermuten, dass sich bei den Materialtypen PPH 4022 und PPH 4022 + Clarifier ab ca. 150 Takte keine nennenswerten Unterschiede in den Qualitätsparametern einstellen werden.

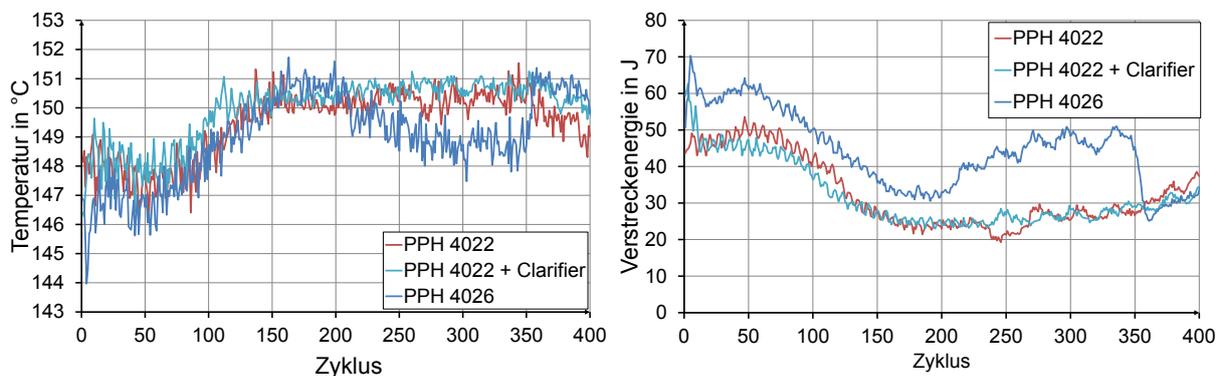


Bild 71: Temperaturen der Halbzeuge nach der Infrarotheizung und Verlauf der Verstreckenergie

In Bild 72 sind die Verstreckenergien der verschiedenen Halbzeuge als Funktion der Temperatur dargestellt. Die gemessene Temperatur wurde aufgrund der Messunsicherheit von $\pm 0,5\text{ °C}$ der IR-Sensoren von $\pm 0,5\text{ °C}$ durch einen Filter geglättet. Wie bei der Betrachtung der Schließkraft ergibt sich die Streuung der Messpunkte aus der Messunsicherheit des Sensors.

Betrachtet man die Verstreckenergien in Abhängigkeit der gemessenen Umformtemperatur, so lässt sich bei allen Materialien ein nahezu linearer Zusammenhang annehmen (Bild 72). Man kann folgende Beziehungen feststellen: der Halbzeugtyp 1 (PPH 4026), der eine hohe Nukleierung und eine höhere Festigkeit bei Umgebungstemperatur aufweist, besitzt bei gleicher Umformtemperatur eine um ca. 10 J höhere Verstreckenergie. Das weiß eingefärbte Homopolymer (PPH 4022+TiO₂) und der Polypropylenblend (PPC 4022/4660), dem ein Copolymer beigemischt wurde, besitzen ähnliche Verstreckenergieniveaus bei gleicher Temperatur. Die beiden transparenten Homopolymere (PPH 4022 und PPH 4026) besitzen ähnliche Verstreckenergien bei gleicher Temperatur trotz unterschiedlicher Nukleierung. Sie besitzen jedoch beide ein höheres Niveau als die weiß eingefärbten Typen.

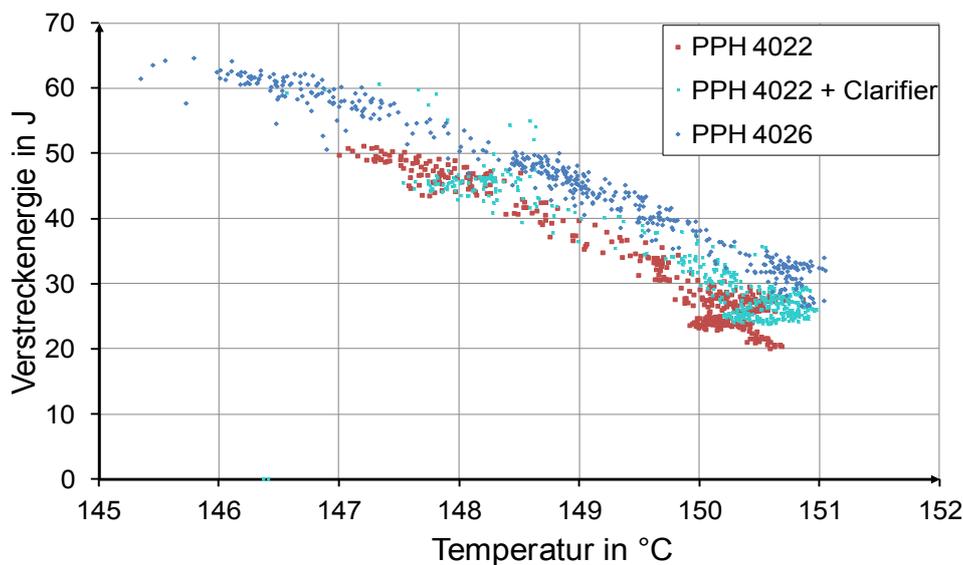


Bild 72: Ermittelte Verstreckenergie bei verschiedenen Halbzeugtemperaturen (Temperaturmesswerte geglättet durch Tiefpassfilter)

8.2 Ergebnisse der untersuchten Formteilmerkmale

Neben den Prozessgrößen wurden die Qualitätsmerkmale der Produkte ermittelt. Diese beschränken sich im Rahmen dieser Versuche auf die Wanddickenverteilung, den Stauchdruck, den Stauchweg, die Becherhöhe und die resultierende Größe Bechersteifigkeit. Im Folgenden wird auf die Messergebnisse und Erkenntnisse der Versuchsreihen eingegangen.

Um zunächst einen Überblick zu erhalten, welche Prozessparameter Einfluss auf die Produktqualität besitzen, wurde eine Korrelationsanalyse durchgeführt.

8.2.1 Wanddickenverteilung

Die Wanddickenverteilung wurde an jedem zehnten produzierten Becher der gleichen Kavität ermittelt. Die Wanddicke wurde in Höhenrichtung in 4 mm Abständen und am Umfang mit einer 18°-Teilung ermittelt (Tabelle 16).

Tabelle 16: Wanddickenverteilung über die Bechermantelfläche

		Position φ am Umfang in °																			
		0	18	36	54	72	90	108	126	144	162	180	198	216	234	252	270	288	306	324	342
Höhenkoordinate z in mm	12	0,18	0,18	0,18	0,20	0,18	0,17	0,18	0,19	0,18	0,17	0,17	0,18	0,19	0,19	0,19	0,17	0,17	0,18	0,17	0,18
	16	0,18	0,18	0,18	0,19	0,17	0,17	0,17	0,18	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,19	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18
	20	0,18	0,18	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,17	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16
	24	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
	28	0,18	0,17	0,17	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,16	0,15	0,16	0,16	0,16
	32	0,18	0,17	0,17	0,17	0,16	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,18
	36	0,17	0,17	0,17	0,16	0,16	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,18
	40	0,17	0,17	0,17	0,16	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,17
	44	0,17	0,17	0,17	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,17	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14	0,15	0,17
	48	0,17	0,17	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,17	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14	0,15	0,17
	52	0,17	0,17	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,16	0,15	0,16	0,16	0,16	0,17	0,16	0,16	0,15	0,14	0,15	0,15	0,17
	56	0,18	0,17	0,17	0,16	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,16	0,16	0,15	0,14	0,15	0,15	0,17
	60	0,18	0,17	0,17	0,16	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,16	0,15	0,15	0,14	0,15	0,15	0,17
	64	0,18	0,17	0,17	0,16	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14	0,15	0,17
	68	0,18	0,18	0,17	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,16	0,15	0,14	0,14	0,14	0,16
	72	0,18	0,17	0,17	0,16	0,16	0,16	0,15	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,16	0,15	0,15	0,14	0,15	0,16	0,16
	76	0,17	0,17	0,16	0,16	0,15	0,16	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14	0,15	0,16
	80	0,18	0,17	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16
	84	0,19	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19	0,20	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
	88	0,23	0,24	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,22
92	0,31	0,34	0,34	0,34	0,35	0,35	0,37	0,38	0,36	0,33	0,32	0,32	0,33	0,34	0,36	0,35	0,35	0,36	0,35	0,32	
96	0,34	0,33	0,32	0,33	0,33	0,32	0,33	0,34	0,32	0,29	0,29	0,33	0,31	0,32	0,33	0,33	0,32	0,34	0,32	0,30	

Zur Beurteilung der Wanddickenverteilung wurden Kennwerte gebildet, die die Verformungshomogenität beschreiben sollen. Dazu wurde die relative Wanddickendifferenz zweier Höhenkoordinaten ermittelt (Gleichung 8-1). Diese Kennzahl erlaubt eine Aussage, wie homogen das Verstrecken über die Höhe der Wand erfolgt ist.

$$I_d = \frac{\bar{d}(z = 92 \text{ mm}) - \bar{d}(z = 52 \text{ mm})}{\bar{d}(z = 92 \text{ mm})} \quad 8-1$$

Zur Beurteilung der Homogenität am Becherumfang wurde die Mitte der Becherwandung betrachtet. Dazu wurde die relative Wanddickendifferenz zwischen Dick und Dünnstelle um den Umfang der Höhenkoordinate ermittelt (Gleichung 8-2). Diese Kenngröße erlaubt es, die Homogenität am Umfang des Bechers zu beschreiben.

$$I_d = \frac{d_{\max}(z = 52 \text{ mm}) - d_{\min}(z = 52 \text{ mm})}{d_{\min}(z = 52 \text{ mm})} \quad 8-2$$

Alternativ kann aus den Messwerten eine Standardabweichung berechnet werden, die ebenso ein Maß für die Inhomogenität der Wanddickenverteilung darstellt (Gleichung 8-3). Diese Kenngröße gibt eine Aussage zur allgemeinen Homogenität der Wanddickenverteilung. Dabei sind Umfangs- und Höheneffekte beinhaltet.

$$s_d = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} \quad 8-3$$

In der Wanddickenverteilung der Becherseitenwand zeigten alle Materialien eine Dickstelle der Wanddicke in Richtung Becherboden (Höhenkoordinate 92 mm), die schon in anderen Veröffentlichungen festgestellt wurde [Lar01]. Ursächlich hierfür ist das Zusammenwirken von Vorstrecken und pneumatischem Ausformen. Der Vorstrecker bewirkt vereinfacht ein Verstrecken der den Vorstrecker nicht berührenden Folie. Diese stellt im Formteil die Becherwand dar. Der Bereich des Halbzeugs der den Vorstrecker berührt wird weniger verstreckt. Beim pneumatischen Ausformen werden nun die Becherwand und der Becherboden zuerst an den Formeinsatz angelegt. Dadurch entsteht in der Kante von Wandung zu Boden eine Dünnstelle, die eine Dickstelle in der Becherseitenwand zur Folge hat. Zudem zeigten alle Becher zwei Dünnstellen an der Bechermantelfläche (Tabelle 16). Diese Dünnstellen waren zueinander um 180° versetzt. Die E-Moduln des PPH 4022 wurden in Extrusionsrichtung und quer dazu bestimmt. Dabei wurde eine Differenz von ca. 200 MPa festgestellt. Dies deutet darauf hin, dass die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften des Halbzeugs in Extrusionsrichtung und quer dazu einen sichtbaren Einfluss auf die Verformungshomogenität in Umfangsrichtung haben.

$$E_{\text{längs}} = 2140 \pm 122 \text{ N/mm}^2 \quad 8-4$$

$$E_{\text{quer}} = 1943 \pm 43 \text{ N/mm}^2 \quad 8-5$$

Über den Versuchsablauf zeigte sich bei fast allen Materialien eine Änderung der Standardabweichung (Bild 73) und der vertikalen Homogenität (Bild 74) der Wanddickenverteilung der Produkte (Bild 73). Auffällig ist, dass das hochnukleierte PPH 4026 im Mittel eine kleinere Standardabweichung und Inhomogenität aufweist. Dies deutet darauf hin, dass hochnukleiertes Polypropylen tendenziell homogener verstreckt werden. Auffällig ist zudem ein Ausrei-

ber der Standardabweichung der Wanddicke des PPH 4026 bei Zyklus Nr. 185, der nicht durch die Prozesskennwerte erklärt werden kann.

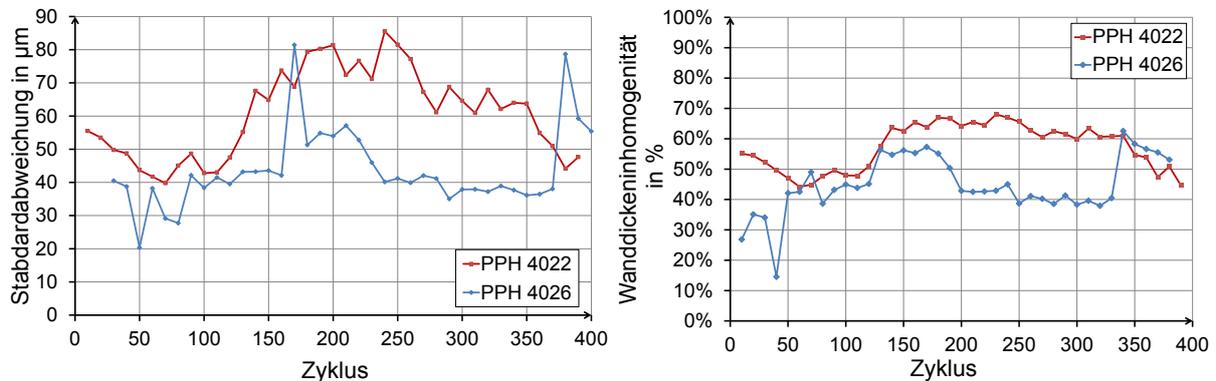


Bild 73: Standardabweichung der Wanddickenverteilung (links) und Inhomogenität der Wanddickenverteilung über die Ziehtiefe. Vergleich zwischen niedrig- (PPH 4022) und hochnukleiertem (PPH 4026) Halbzeug

Betrachtet man die Homogenität der Wanddickenverteilung über den Umfang (Bild 74), so kann eine Änderung nach ca. 100 Zyklen nachgewiesen werden. Da alle Verfahrensparameter zu diesem Zeitpunkt konstant waren, kann die Änderung nur durch das Einschwingverhalten der Anlage begründet werden. Im weiteren Verlauf zeigte sich jedoch trotz Änderung der Umformtemperatur und damit des Umformverhaltens des Polypropylens keine Änderung der Inhomogenität der Wanddickenverteilung um den Umfang. Dies deutet wiederum darauf hin, dass die Anisotropie des Werkstoffs diese Inhomogenitäten verursacht. Da das Polypropylen im Solid-Phase-Verfahren verarbeitet wird, können keine Orientierungen abgebaut werden und die Anisotropie kann durch Änderung der Temperatur nicht beeinflusst werden.

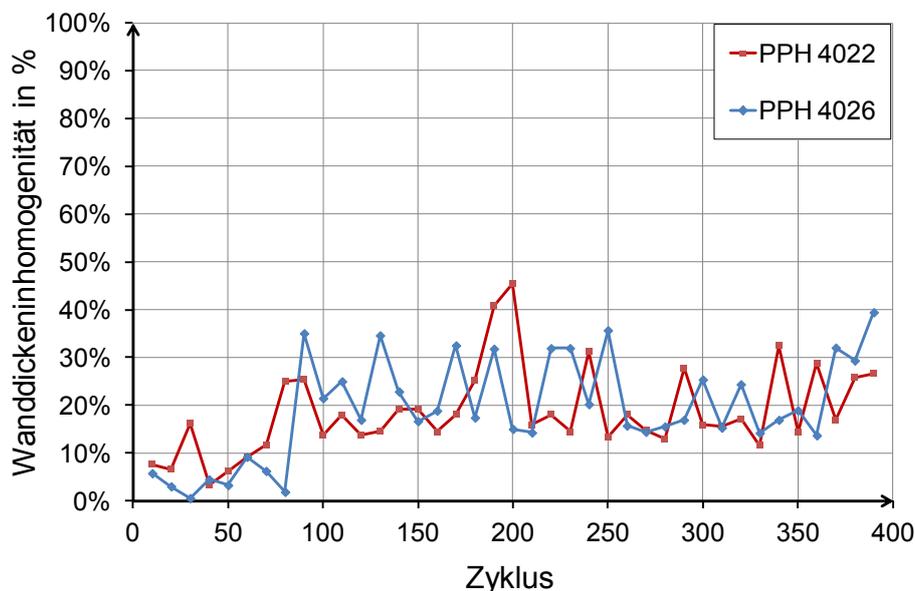


Bild 74: Inhomogenität der Wanddickenverteilung über den Umfang. Vergleich zwischen niedrig- (PPH 4022) und hochnukleiertem (PPH 4026) Halbzeug

Betrachtet man die Qualitätskennwerte der transparenten Typen in Abhängigkeit der Verformungsenergie, so kann erkannt werden, dass beide Materialtypen ein ähnliches Verhalten zeigen. Die Inhomogenität über die Ziehtiefe und die Standardabweichung der Wanddickenverteilung sinken bis zu einer Energie von ca. 40 J. Bei höheren Energien zeigen sich große

Streuungen der Messwerte. Diese sind dadurch begründet, dass Energien über 40 J in den Anfahrtakten auftreten, in denen die Maschine noch nicht thermisch stabil arbeitet. Zudem ist der Ausreißer in der Standardabweichung der Wanddicke des Materials PPH 4026 sichtbar.

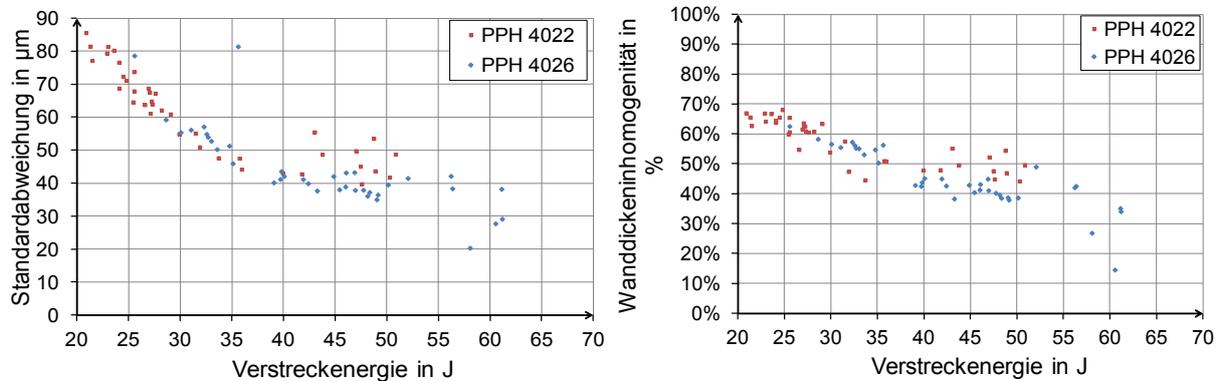


Bild 75: Einfluss des Umformverhaltens, abgebildet durch die Verstreckenergie, auf die Standardabweichung der Wanddickenverteilung (links) und die Wanddickeninhomogenität über die Ziehtiefe (rechts). Vergleich zwischen niedrig- (PPH 4022) und hochnukleiertem (PPH 4026) Halbzeug

Vergleicht man die beiden weiß eingefärbten Typen mit den transparenten Typen, so konnte auch hier ein ähnliches Umformverhalten festgestellt werden (Bild 76). Die Standardabweichung der Wanddicke liegt bei allen Typen zwischen 40 und 50 J bei ca. 40 μm . Der Typ PPH 4022 + TiO_2 konnte im Versuchsablauf weniger erwärmt werden (vgl. Bild 70), dadurch ergaben sich keine Formteile, bei denen eine Energie zwischen 20 und 35 J gemessen wurde.

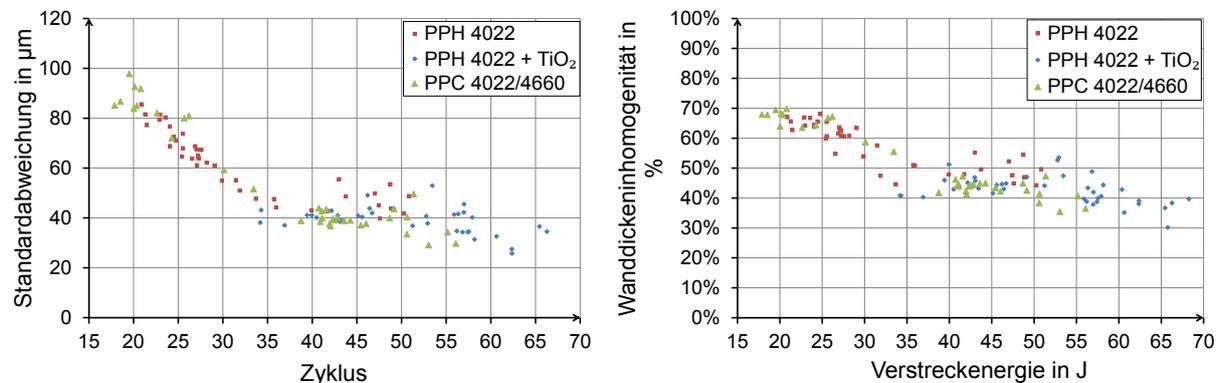


Bild 76: Standardabweichung (links) und Inhomogenität (rechts) der Wanddickenverteilung von transparentem und eingefärbtem PP. Vergleich zwischen transparentem PP (PPH 4022), weiß eingefärbtem (PPH 4022 + TiO_2) und weiß eingefärbtem PP/PP+PE-Blend (PPC 4022/4660)

Es konnte somit gezeigt werden, dass sich zwei ähnliche Materialien, die sich im Rohstoff durch Zusätze wie Nukleierungsmitteln oder Titandioxid unterscheiden, bei der Thermoformung ähnlich verhalten. Es entstehen bei gleicher Verstreckenergie gleiche Wanddickenverteilungen.

Die Korrelation zwischen Becherwandstärke und Verstreckenergie wurde für alle Materialien nachgewiesen. Dies ist auf die Temperaturabhängigkeit der Folie-Vorstrecker-Interaktion zurückzuführen. Diese führt bei höherer Umformtemperatur zu dickeren Bodenwandstärken. Bei der vertikalen Inhomogenität stellt sich eine negative Korrelation heraus (Bild 75). Aufgrund der Kennwertbildung ergeben sich allerdings große Streubreiten. Betrachtet man die Standardabweichung, stellt man fest, dass der Streubereich geringer ausfällt. Dies ist auf die

höhere Anzahl von Messpunkten bei der Kennwertermittlung zurückzuführen. Die Standardabweichung steigt wie die vertikale Inhomogenität bei geringen Verstreckenergien an und ist über 40 J Verstreckenergie annähernd konstant. Erkennbar ist, dass die Inhomogenitäten zu niedrigen Vorstrecktemperaturen deutlich zunehmen. Zu höheren Vorstreckenergien nehmen die Inhomogenitäten bis ca. 40 J Verstreckenergie ab. Dies ist auf die Verdünnung des Bodenbereichs zurückzuführen. Ab 40 J tritt keine Änderung der Inhomogenität mehr auf.

Bei dem untersuchten 1,6 mm dicken PP-Homopolymer konnte ein anderes Verhalten nachgewiesen werden (Bild 77). Beim Betrachten der Standardabweichung der Wanddickenverteilung erkennt man ein Minimum bei einer Energie von ca. 50 J. Zu größeren Verstreckenergien wird die randnahe Wanddicke größer, während die Bodenwanddicke abnimmt. Hin zu kleineren Verstreckenergien verhalten sich die Wanddicken genau entgegengesetzt. Beide Fälle führen zu einer Zunahme der Inhomogenität. Das zu den beiden vorigen Halbzeugen abweichende Verhalten ist allerdings nicht durch den Rohstoff begründet, sondern durch die Geometrie und den Werkstoff des Vorstreckers.

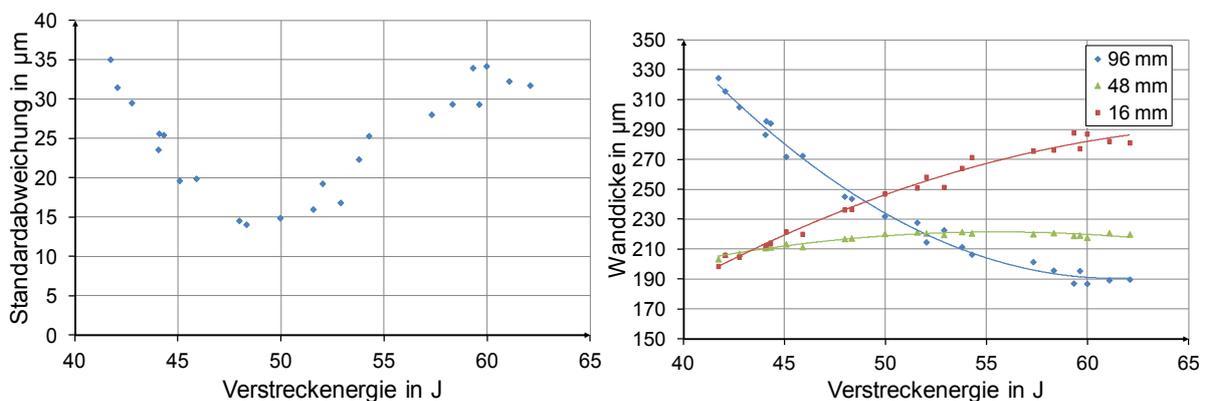


Bild 77: Einfluss des Umformverhaltens, abgebildet durch die Verstreckenergie, auf die Standardabweichung der Wanddickenverteilung (links) und die Wanddickenwerte an zwei Höhenkoordinaten des Formteils über die Ziehtiefe (rechts)

8.2.2 Stauchdruck

Bei der Auswertung des Stauchdrucks (Bild 78) konnte festgestellt werden, dass beim Polypropylyentyp PPH 4022 ein Stauchdruckniveau von 70 – 100 N erreicht wurde. Zudem ergibt sich ein ideales Prozessfenster, in dem der Stauchdruck ein Maximum aufweist. Das Polypropylen Typ PPH 4026, welches einen höheren E-Modul aufweist als die restlichen Typen, weißt ebenfalls einen höheren Stauchdruck auf. Er erreicht Werte von 90 – 120 N. Der E-Modul des Rohstoffs beeinflusst somit direkt den erreichbaren Stauchdruck. Es könnte somit bei einer Reduktion der Halbzeugdicke und damit geringerem Rohstoffverbrauch die gleiche Steifigkeit des Formteils erreicht werden, wenn hochnukleierter Rohstoff eingesetzt wird.

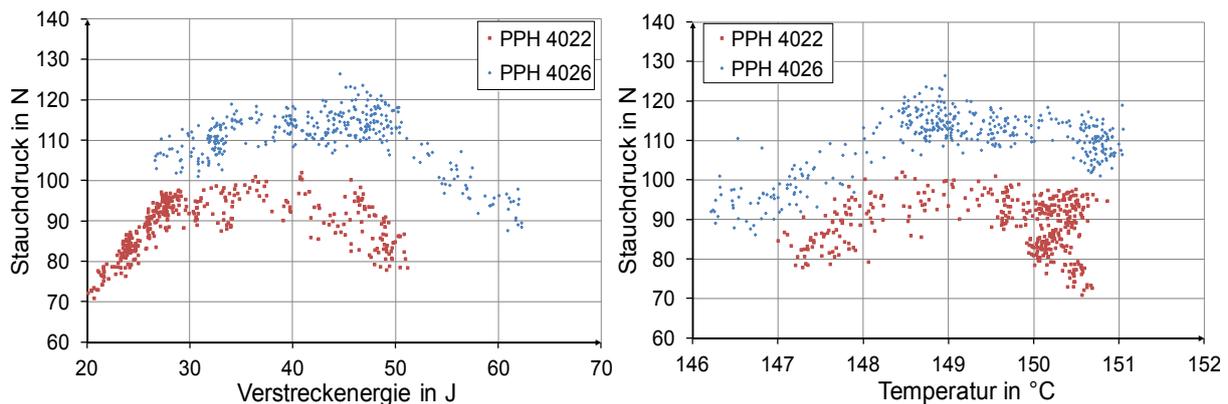


Bild 78: Ermittelter Stauchdruck in Abhängigkeit der Verstreckenergie und der Halbzeugtemperatur vor dem Umformen (transparente PP-Typen).

Im direkten Vergleich ähnlicher Materialien, in transparenter und weiß eingefärbter Ausführung, konnte festgestellt werden, dass der Stauchdruck nicht direkt verglichen werden kann (Bild 79). Dies liegt zu einem daran, dass keine Formteile hergestellt wurden, die bei hoher Temperatur umgeformt worden sind. Betrachtet man nur die Schnittmenge so ergeben sich im gleichen Umformfenster gleiche Stauchdrücke. Das Polymerblend aus Homo- und Copolymer hat sich im Thermoformfenster ähnlich dem transparenten Typ verhalten. Es konnte bei beiden Typen ein Abfall des Stauchdrucks unter 30 J Verstreckenergie festgestellt werden. Das um ca. 10 – 20 N geringere Niveau kann durch die E-Moduln der verwendeten Halbzeuge erklärt werden, durch die PE-Anteile wird dieser verringert. Bei der Analyse des Stauchdrucks ist zudem ersichtlich, dass die Verstreckenergiemessung, im Gegensatz zur Infrarottemperaturmessung, unabhängig von optischen Materialeigenschaften ist. Dadurch können zusätzliche Informationen zum Werkstoffverhalten gewonnen werden. So kann aus der Temperaturabhängigkeit des Stauchdrucks, ohne aufwendige Bestimmung des Emissionsgrads, kein ähnliches Verhalten der verschiedenen Halbzeuge nachgewiesen werden.

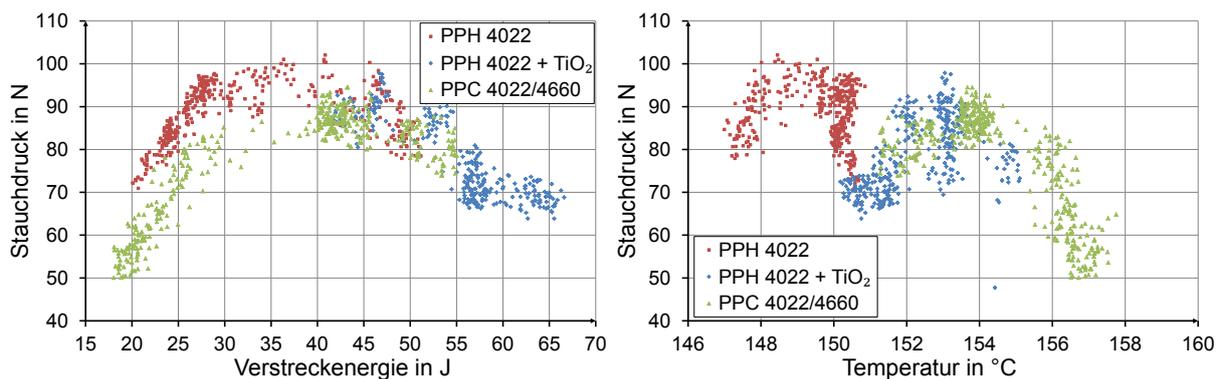


Bild 79: Ermittelter Stauchdruck in Abhängigkeit der Verstreckenergie und der Halbzeugtemperatur vor dem Umformen (transparente PP-Typen).

Auffallend ist zudem, dass der Stauchdruck eine sehr große Streubreite von ca. $\pm 25\%$ aufweist. Dies kann mehrere Ursachen besitzen, z. B. nicht parallel ausgerichtete Druckplatten der Druckprüfvorrichtung. Es wurde nachgewiesen, dass eine verschlechterte Parallelität der Druckplatten die Streubreite vergrößert. Zudem spielen beim Stauchdruck die in Kapitel 6.2.3 beschriebenen Einflussparameter, insbesondere die Wanddicke, eine Rolle.

Betrachtet man den Stauchdruck der Formteile aus dem dickeren Halbzeug, so ist auffällig, dass die absolute Streubreite des Stauchdrucks konstant bleibt. Aufgrund des höheren Niveaus, verursacht durch größere Wandstärken, beträgt die relative Streuung nur noch 10 %, dadurch ergibt sich ein deutliches Bild über den Stauchdruckverlauf im Thermoformfenster. Dabei kann festgestellt werden, dass der Stauchdruck an dem Betriebspunkt mit ca. 45 J ein Maximum aufweist. Dies ist genau der Punkt, an dem Formteile mit der homogensten Wanddickenverteilung entstehen.

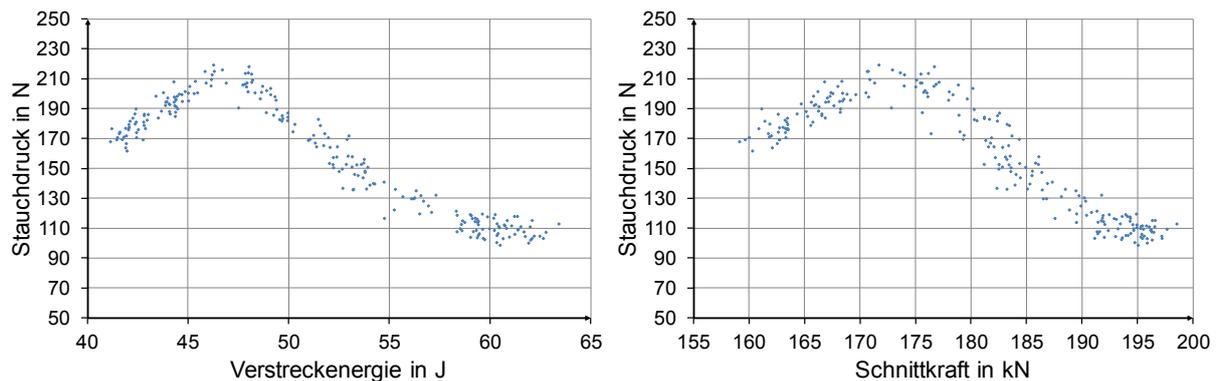


Bild 80: Stauchdruck in Abhängigkeit der Verstreckenergie des Vorstreckers und Schnittkraft des Werkzeugs (Polypropylenhomopolymer; 1,6 mm)

8.2.3 Formteilhöhe

Die Formteilhöhe wird durch die Dicke des Siegelrandes und dem Schwindungsverhalten der Folie bestimmt. Bei den transparenten Typen PPH 4022 und PPH 4026 konnte festgestellt werden, dass das Verhalten der Formteilhöhe über der Temperatur oder Verstreckenergie ähnlich ist, allerdings sind die Verläufe parallel verschoben (Bild 81).

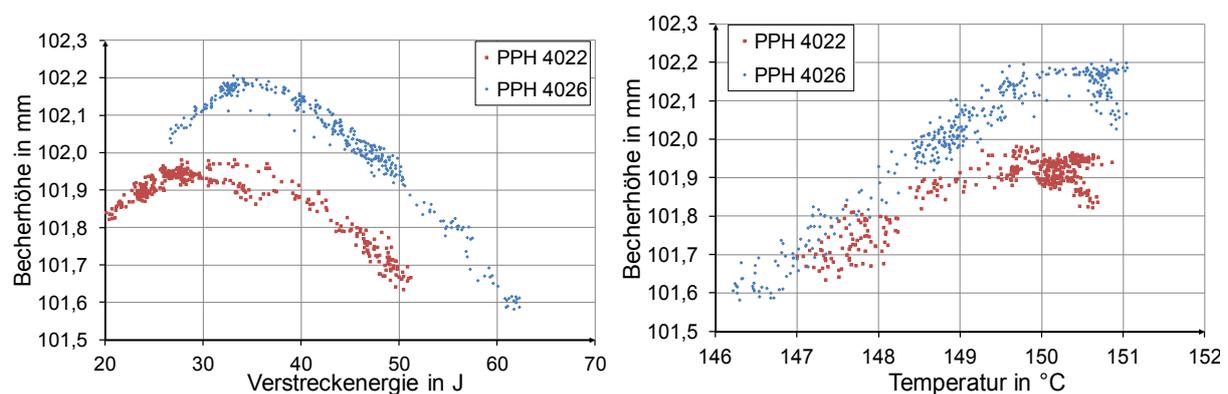


Bild 81: Ermittelte Formteilhöhe in Abhängigkeit der Verstreckenergie und der Halbzeugtemperatur vor dem Umformen.

Da die Becherhöhe taktil, mittels einer definierten Messkraft ermittelt wird und der Siegelrand weniger geprägt wird, ergeben sich für das Material mit höherem Elastizitätsmodul tendenziell größere Becherhöhen. Über der Verstreckenergie zeigt sich ein parabolähnlicher Verlauf, dies kann darauf zurückgeführt werden, dass bei hohen Temperaturen und damit niedrigen Energien die Siegelranddicke abnimmt. Bei hohen Verstreckenergien nimmt die Becherhöhe ab, dies ist auf die Reduzierung der Bechersteifigkeit, sowie einem größeren Schrumpf auf-

grund höherer Eigenspannungen zurückzuführen. Die maximale Becherhöhe wird wiederum im Bereich des maximalen Stauchdrucks und minimaler Wanddicke erreicht.

Analog zum Stauchdruck ergeben sich bei der Analyse der ermittelten Formteilhöhen von transparenten und weißen Formteilen ähnliche Zusammenhänge (Bild 82, links). Das Polymerblend ergibt im Thermoformfenster nahezu gleiche Becherhöhen bei gleicher Verstreckenergie. Das weiß eingefärbte Homopolymer verhält sich abweichend dazu. Hier sind die Becherhöhen bei gleicher Verstreckenergie deutlich höher. Dies lässt sich auf eine schlechtere Durchwärmung, durch geringere Eindringtiefe der IR-Strahlung, und dadurch geringerem Prägen des Siegelrandes zurückführen. Der Polymerblend kann diesem Effekt entgegensteuern, da der PE-Anteil für eine geringere Festigkeit im Umformfenster sorgt.

Betrachtet man andere Foliendicken und unterschiedliche Taktleistungen (Bild 82, rechts), so konnte festgestellt werden, dass auch hier die Formteileigenschaften und deren Abhängigkeit im Thermoformfenster deutlich unterschiedlich sein können. Bei dickeren Halbzeugen zeigte sich kein Maxima in der Formteilhöhe. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch die schlechtere Durchwärmung von dicken Halbzeugen der Siegelrand deutliche weniger geprägt werden kann und die Stärke der Prägung deutlich weniger von der Umformtemperatur beeinflusst werden kann. Zudem erkennt man, dass die Formteilhöhe durch die Taktleistung beeinflusst werden kann. Dabei ändert sich die Stärke der Abhängigkeit von der Verstreckenergie. Dies ist wiederum auf geänderte Temperaturführungen zurückzuführen. Diese sorgen dafür, dass bei gleicher Verstreckenergie und höherer Taktleistung ein inhomogeneres Temperaturprofil über die Halbzeugdicke erzeugt wird. Dadurch, dass die heißen oberflächennahen Schichten durch den Niederhalter schnell abgekühlt werden, ist eine geringere Prägung möglich, als bei durchwärmtem Halbzeug.

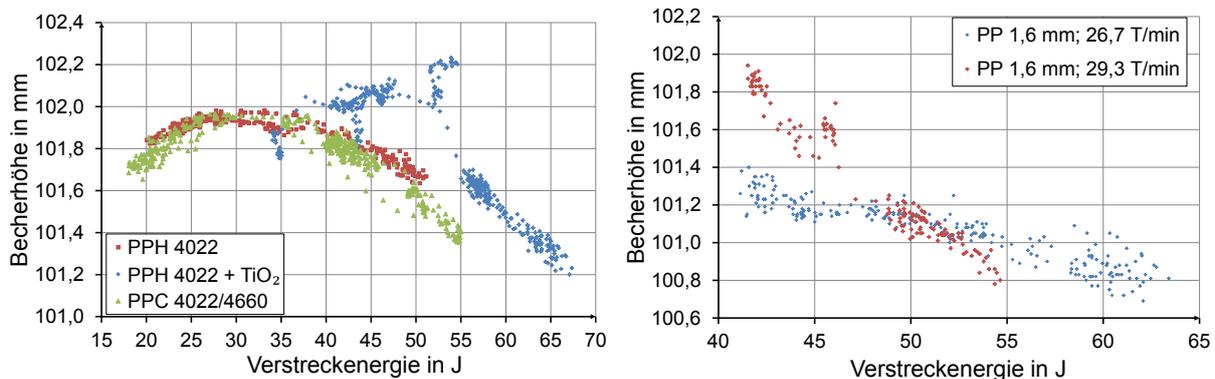


Bild 82: Ermittelte Formteilhöhe in Abhängigkeit der Verstreckenergie und der Halbzeugtemperatur vor dem Umformen.

8.2.4 Masse

Bei der Betrachtung der Masse spielt die Temperatur beziehungsweise die daraus resultierende Verstreckenergie keine Rolle. Es besteht zwar eine Abhängigkeit zwischen der Masse und der Umformtemperatur beziehungsweise der Energie, allerdings sind die absoluten Änderungen der Masse relativ gering (Bild 83, links). Die Masse erreicht im Mittel ca. 4,75 g beziehungsweise 4,73 g mit einer Streubreite von $\pm 0,02$ g. Dies entspricht einer relativen Streubreite von ca. $\pm 0,4$ %. Die Masse bildet indirekt die Wanddicke des Halbzeugs und der verstreckten Ronde ab. Schwankungen in der Masse sind damit ein Indiz für Schwankungen an ande-

ren Formteilmerkmalen. Betrachtet man eine gleitende Standardabweichung über 10 Zyklen, so kann festgestellt werden, dass eine Schwebung auf den Messsignalen liegt. Die Periodendauer beträgt ca. 50 Zyklen oder umgerechnet 14 m oder zwei Minuten und könnte auf die Reglerkonstanten des Heizungsreglers zurückzuführen sein.

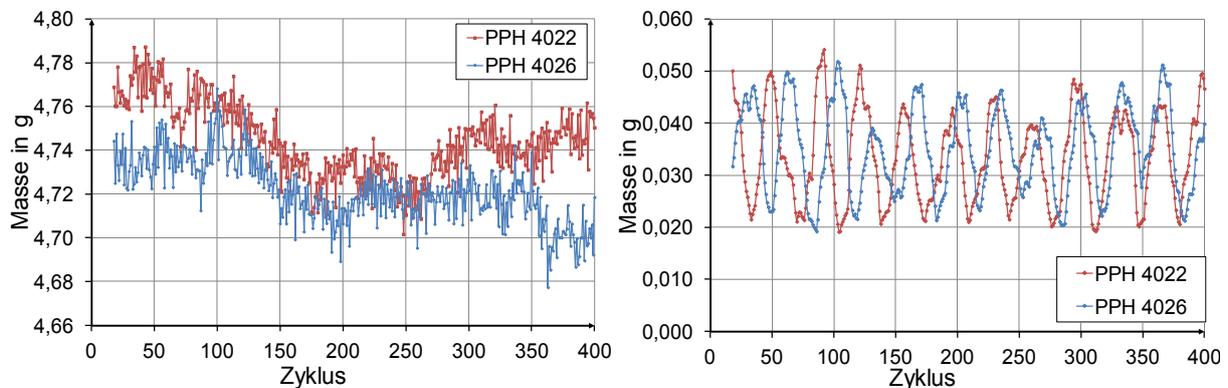


Bild 83: Ermittelte Formteilmasse während der Versuchsdurchführung und Standardabweichungen der Masse über die Zyklen

Ähnlich der Wanddicke und des Stauchdrucks kann die Formteilmasse mit der Verstreckenergie oder Temperatur korreliert werden (Bild 84). Tendenziell kann erkannt werden, dass die Gewichte mit zunehmender Temperatur abnehmen. Dies ist durch die Wärmeausdehnung und Zunahme des spezifischen Volumens des Rohstoffs erklärbar.

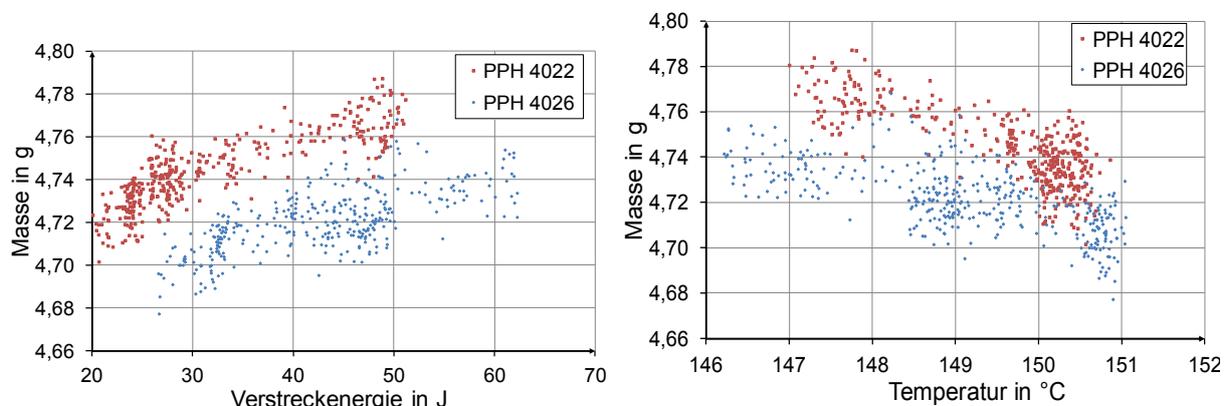


Bild 84: Ermittelte Formteilmasse in Abhängigkeit der Verstreckenergie und der Halbzeugtemperatur vor dem Umformen.

8.3 Zusammenfassung der Korrelationsanalyse

In den Kapiteln 8.1 und 8.2 wurde gezeigt, dass Prozessbeobachtungen Rückschlüsse auf einen stabilen Prozess und die Formteilmerkmale erlauben. Insbesondere die Verstreckenergie eignet sich, zusätzlich zur Messung der oberflächennahen Temperatur, zur Beobachtung des Betriebszustands. Die Verstreckenergie erlaubt Rückschlüsse auf die Erwärmung des Halbzeugs über seine Dicke. Dadurch können Schwankungen im Vorheizprozess identifiziert werden, die durch eine Temperaturmessung nicht erkannt werden können. Die Information der Schnittkraft erlaubt ähnliche Korrelationen wie die Verstreckenergie. Vorteilhaft ist zudem die Unabhängigkeit von optischen Materialeigenschaften.

Für einige Formteilmerkmale wie Stauchdruck, Waddickenverteilung und Formteilhöhe konnte eine Korrelation zwischen den Prozessgrößen Verstreckenergie und Schließkraft nachgewiesen werden. Die Art dieser Korrelation ist material- und betriebspunktabhängig.

Eine rein lineare Abhängigkeit der Formteilmerkmale von den Prozesskennwerten konnte nicht nachgewiesen werden. In den untersuchten Betriebsbereichen konnten gute Übereinstimmungen bei quadratischen Ansätzen der Regressionsrechnungen gefunden werden. Alternativ könnten für zukünftige Arbeiten neuronale Netze mit in die Modellbildung aufgenommen werden.

Zentrales Ergebnis der Analyse ist, dass Betriebspunkte mit gleicher Vorstreckenergie bei ähnlichen Materialien zu gleichen Waddickenverteilungen führen. Dadurch ist es möglich auf Chargenschwankungen zu reagieren, indem die Verstreckenergie als Regelgröße konstant gehalten wird. Als Stellgröße dienen die Heizungstemperaturen. Diese Strategie wird in den Kapiteln 9 und 10 weiter verfolgt.

9 Implementierung eines Prozessüberwachungs- und Regelungssystems

Auf Basis der Erkenntnisse der vorhergehenden Kapitel wurde ein Prozessüberwachungs- und Regelungssystem erarbeitet. Dieses System soll die Bedienung von Thermoformanlagen vereinfachen und den Prozessablauf transparenter gestalten. Ziel ist es, die gewünschte Formteilqualität schnell und reproduzierbar herstellen zu können und Störungen die auf den Prozess wirken zu erkennen.

9.1 Grundeinstellungsberechnung

Zur Vereinfachung der Maschinenbedienung wurden von den Maschinenbauern Strategien entwickelt, die es erlauben, die Maschineneinstelldaten aus der Eingabe von Produktgeometrie und Werkstoff zu berechnen. Diese Berechnungsvorschriften greifen auf Erfahrungswissen der Maschinenbauer zurück.

Auf einer Datenbasis von 29 Maschinen mit servomotorischen Antrieben wurden die wesentlichen Maschineneinstellungen analysiert. Für Formteile mit Bördelrand konnte gezeigt werden, dass die Formzeit von der Foliendicke abhängt (Bild 85). Für Formteile mit Siegelrand konnte der Zusammenhang nicht gefunden werden, da die Datenbasis und der Dickenbereich der Halbzeuge geringer sind. Werden alle Formteile gemeinsam betrachtet, kann gezeigt werden, dass die Formzeiten sich auf ähnlichen Niveaus bewegen. Dies deutet darauf hin, dass bei der Einstellung der Anlagen die Kühlzeit und nicht die Heizzeit der taktzeitbestimmende Faktor ist.

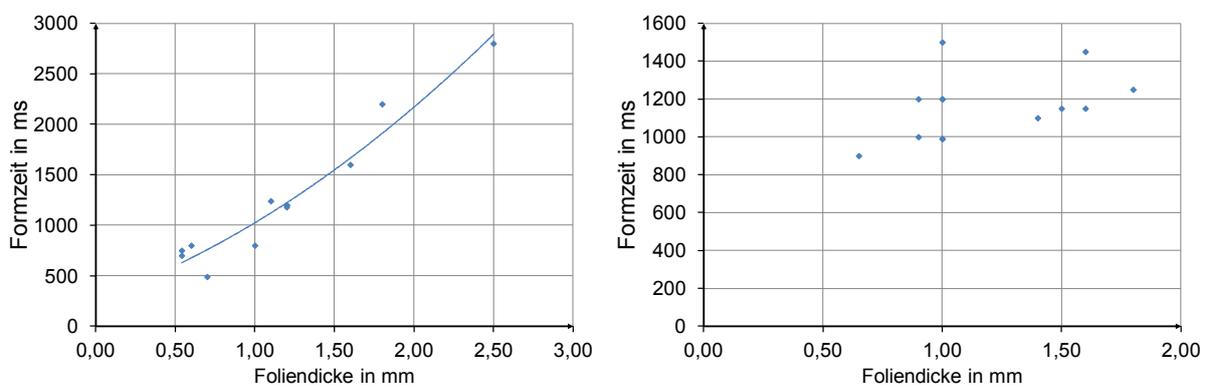


Bild 85: Formzeit in Abhängigkeit der Foliendicke. Formteile mit Bördelrand (links) und Formteile mit Siegelrand (rechts)

Die Einstelldaten für Niederhalter, Vorstrecker und Formdruck sind unabhängig von der Halbzeugdicke. Der Niederhalterhauptdruck beträgt im Mittel 5 bar, mit einem Einstellbereich in Einzelfällen von 3 bar bis 8 bar (Bild 86). Der Einschaltzeitpunkt des Hauptdrucks ist, bis auf 7 Fälle vor oder zeitgleich mit dem Schließen des Werkzeugs (Bild 86). Eine Korrelation konnte auch hier nicht festgestellt werden.

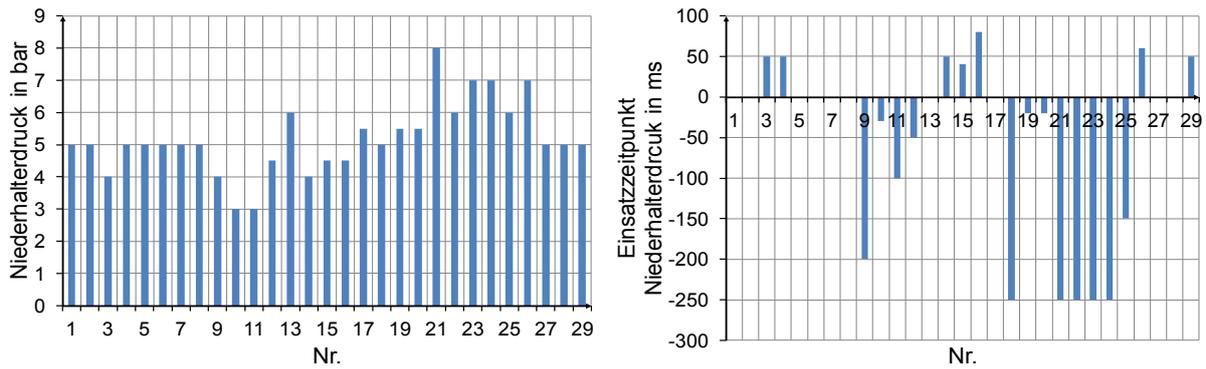


Bild 86: Niederhalterdruck und Einsatzzeitpunkt bezogen auf den Zeitpunkt Werkzeug geschlossen

Der Formdruck ist bei fast allen Maschinen auf den Maximalwert eingestellt. Dies deutet darauf hin, dass das Druckniveau benötigt wird. Aus verfahrenstechnischer Sicht wäre es sinnvoll, eine Anhebung des Maximaldrucks zu untersuchen.

Auch bei der Einstellung des Vorstreckers zeigte sich, dass der Vorstreckler bei fast allen Maschinen vor geschlossenem Werkzeug startet. Dies kann dazu führen, dass, wie in Kapitel 6.2.1 beschrieben, die Formteileigenschaften beeinflusst werden. Allerdings können die genauen Prozessabläufe nicht überprüft werden, da in den Maschinen keine Datenerfassung integriert war und daher die genauen Bewegungsabläufe nicht vorliegen.

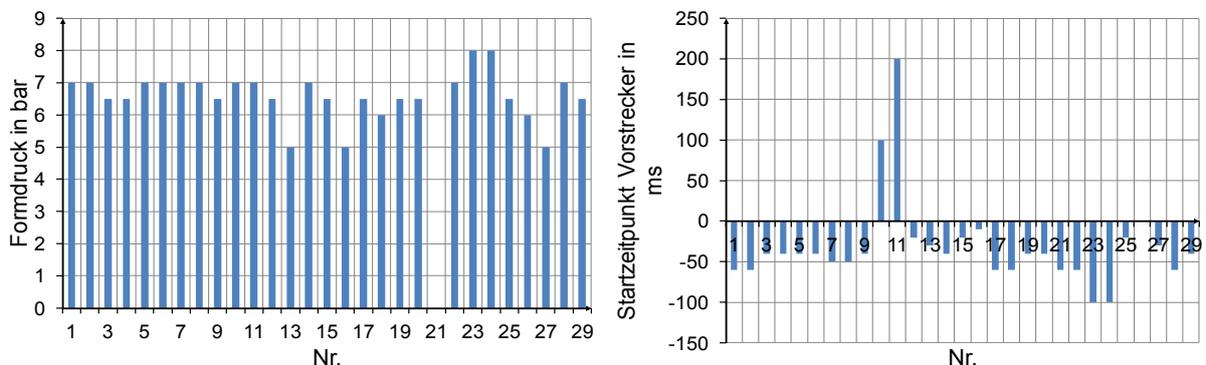


Bild 87: Formdruck und Vorstrecklerstartzeitpunkt bezogen auf den Zeitpunkt Werkzeug geschlossen.

Es kann somit gezeigt werden, dass grundlegende Zusammenhänge von Formzeit und Folienstärke im Thermoformen identifizierbar sind. Zudem können für Grundeinstellungsberechnungen die Maxima der Prozessdrücke sowie ein bei geschlossenem Werkzeug die Folienhöhe durchfahrender Vorstreckler genutzt werden. Diese Einstellungen führen in der Regel zu stabilen Prozessen. Zudem bestätigen die Erkenntnisse, dass durch Änderung der Einstellparameter des Formprozesses nur geringe Änderungen der Formteileigenschaften erreicht werden können. Eine Prozessoptimierung bei nicht eingehaltenen Formteilmerkmalen umfasst in der Regel die Variation der Halbzeugtemperaturen, der Vorstreckergeometrien sowie vorgeschalteter Prozesse wie Extrusion oder Vorheizungen.

9.2 Schaltzeitenkompensation der pneumatischen Aktoren

In Kapitel 6 wurde gezeigt, dass die Druckaufbauzeitpunkte von Niederhalter und Formdruck mitbestimmend sind für eine konstante Qualität. Aus diesem Grunde wurde auf Basis der in Kapitel 4 beschriebenen Messtechnik ein System entwickelt, welches die Totzeiten von eklektischem Schaltsignal an die Ventile, bis zum Druckaufbau erfasst und kompensiert. Dazu werden jeweils die Schaltsignale und Druckverläufe gemessen. Der Maschinenbediener gibt einen Zeitpunkt vor, an dem der Druckaufbau erfolgen soll. Im ersten Zyklus erfolgt zu diesem Zeitpunkt das Schaltsignal an das Ventil. Im zweiten Zyklus wird das Schaltsignal um die gemessene Totzeit verschoben, sodass sich ein reproduzierbarer Ablauf ergibt.

Um einen Druckanstieg zu detektieren, muss eine Schalthysterese gewählt werden, die von Zyklus zu Zyklus stabil detektiert wird, und die robust gegenüber Störungen reagiert. Eine Schalthysterese zwischen 0,05 – 0,10 bar erwies sich dabei als ideal (Bild 88). Bei dieser kann die Schaltzeit unabhängig von der Druckdifferenz ermittelt werden.

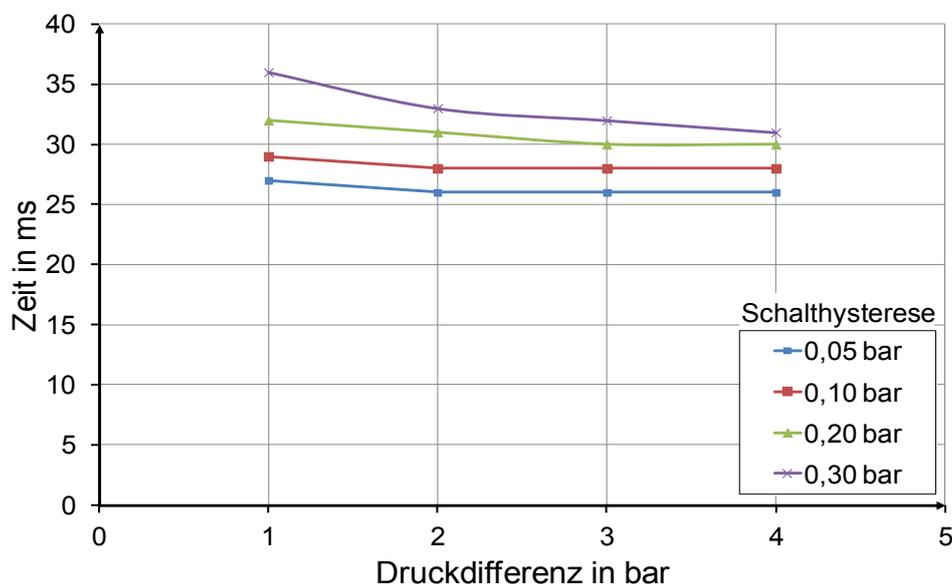


Bild 88: ermittelte Schaltzeiten eines pneumatischen Ventils in Abhängigkeit der definierten Schalthysterese

In Bild 89 sind die Druckverläufe des Niederhalters und dessen Position beim Schließen des Werkzeugs dargestellt. Durch die Schaltzeitenermittlung werden die Druckanstiege an den projektierten Zeitpunkt verschoben. Dadurch sind Maschineneinstellungen unabhängig von verwendeten Werkzeugen, die unterschiedlich schnelle Ventile besitzen. Zudem besteht die Möglichkeit, Verschleißzustände zu überwachen und Unregelmäßigkeiten in der Druckluftversorgung zu detektieren. Ein häufig auftretendes Problem sind lange Entlüftungszeiten der Niederhalter oder der Formluft durch verschmutzte Schalldämpfer der Ventile. Diese verschmutzen durch Ausdünstungen des Halbzeugs und können durch eine Überwachung der Prozessdrücke erkannt werden.

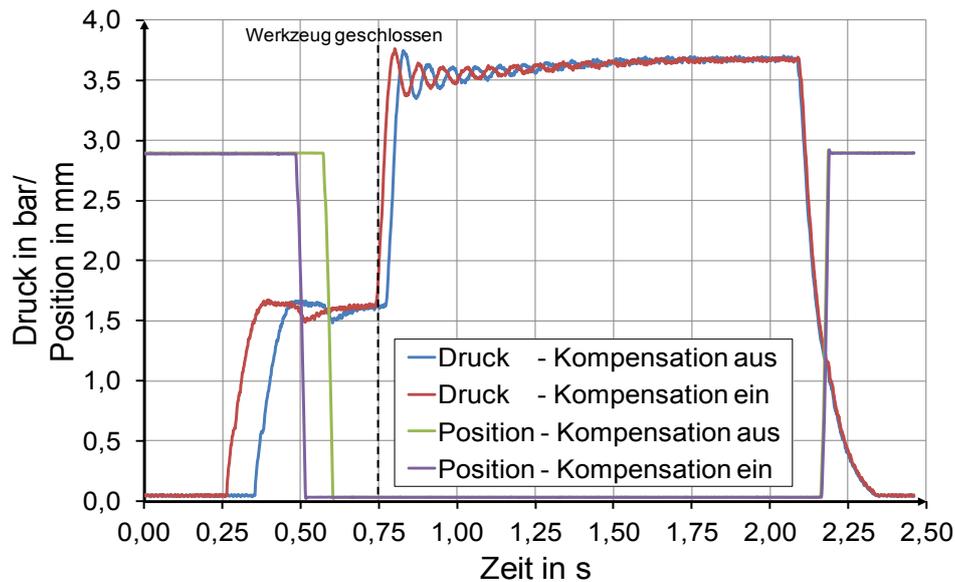


Bild 89: Niederhalterdruck und -position mit und ohne Schaltzeitenkompensation (mit Vor-druck)

Neben der konstanten Qualität kann dieses System dazu beitragen, automatisch die kürzeste Zykluszeit einzustellen. Der Bediener muss nicht mehr manuell die Schaltzeitpunkte ermitteln, ab denen die Qualität negativ beeinflusst wird. Der Einsatzzeitpunkt des Formdrucks kann somit automatisiert direkt an die Vorstreckerbewegung angeschlossen werden (Bild 90). Dieser Zeitpunkt muss heute iterativ vom Maschinenbediener gefunden werden.

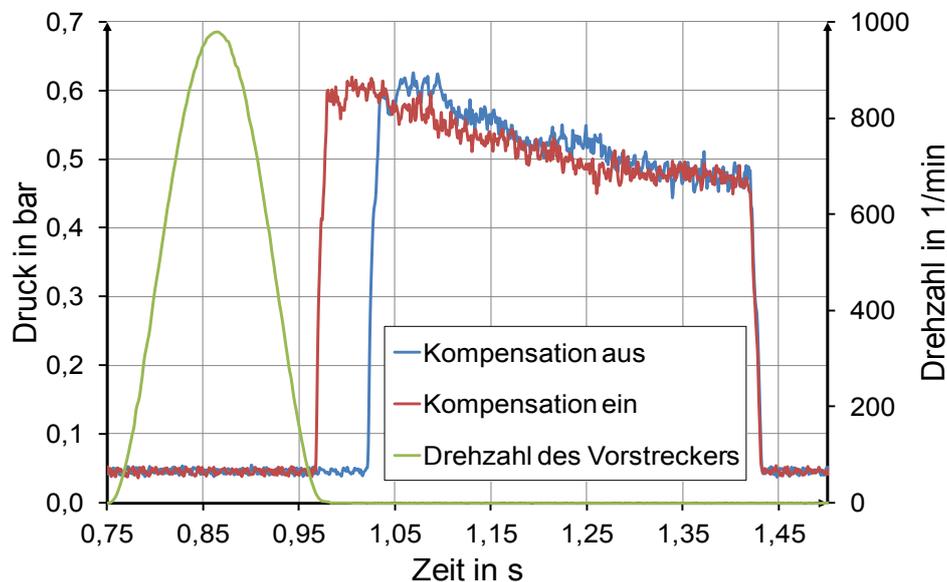


Bild 90: Formdruck mit und ohne Schaltzeitenkompensation, Schaltzeitpunkt 0 ms nach Vor-strecker unten

9.3 Automatische Schnitthöheneinstellung

Im Rahmen der Versuche wurde vielfach festgestellt, dass die korrekte Schnitthöheneinstellung sehr feinfühlig ist. Zudem ändert sich bei verschiedenen Materialfestigkeiten oder Änderung der Halbzeugtemperatur die Verformung des Aggregats, sodass eine erneute Einstellung des Schnitts erfolgen muss. Durch eine falsche Einstellung des Schnitts kann, zum einen die

Maschine überlastet werden, zum anderen das Werkzeug die Kavität nicht mehr abdichten oder die Schnittqualität deutlich abnehmen. Daher kann in Abhängigkeit der Schließkraft und der Werkzeugdichtigkeit eine ideale Schnitteinstellung des Werkzeugs erreicht werden.

9.4 Regelung der Halbzeugtemperatur und Verstreckenergie

Im Rahmen verschiedener Arbeiten wurden Halbzeugtemperaturregler entwickelt ([Dua04], [Gau08], [Gir03], [Pol93], [Runa03], [Sch06], [Wei87], [Küp91]), die zum Ziel haben die Produktqualität, insbesondere die Wanddickenverteilung konstant zu halten. Auf Grund der großen Temperaturfenster der Umformung bei den dort untersuchten Materialien war diese Strategie erfolgreich.

Polypropylen besitzt durch seinen teilkristallinen Aufbau eine hohe Temperaturabhängigkeit der Materialeigenschaften. Dadurch eignen sich Temperaturregelungen nur bedingt zur Regelung der Formteileigenschaften. Beim Solid-Phase-Formen schmelzen erste kristalline Bereiche auf, dabei wird Energie benötigt und die Temperatur des Halbzeugs steigt nicht, obwohl sich die Gefügestruktur und damit die mechanischen und rheologischen Eigenschaften stark ändern.

Aus diesem Grund wurde die in Kapitel 7 und 8 beschriebene Prozessgröße Verstreckenergie zur Regelung der Verformungseigenschaften eingesetzt [Sau11b]. Dazu wurde eine Sollenergie vorgegeben, die einem Regler als Eingangsgröße dient (Bild 91). Zudem wurde pro Zyklus eine Verstreckenergie aus dem Kraftverlauf der Kraftmessdose und dem Moment des Vorstreckermotors berechnet. Durch Anpassung der Heizungstemperaturen wurde die Istenergie der Sollenergie angepasst. Der Reglerbaustein übernimmt hierbei die Umrechnung der Energie in einen Korrekturwert der Heizungstemperatur. Durch Anpassung des Proportionalbeiwerts und der Integrationskonstante wurde der Regler an das Halbzeug angepasst.

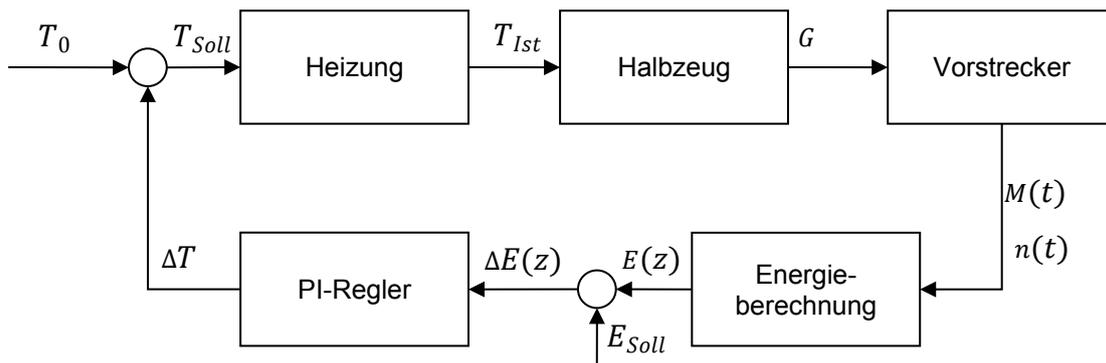


Bild 91: Blockschaltbild des Regelkreises zur Energieregung

Um die Unterschiede zur normalen Betriebsweise der Thermoformanlage aufzuzeigen, wurde das gleiche Material einmal mit und einmal ohne Regelung der Energie verarbeitet. In Bild 92 sind die in den Versuchen ermittelten Temperaturen am Einlauf und Auslauf der Infrartheizung dargestellt. Bei der Fahrweise ohne Regelung ist deutlich der Zusammenhang zwischen Ein- und Auslauftemperatur zu erkennen. Bei einer Temperaturdifferenz von $\Delta T = 10$ K am Einlauf ergab sich in diesem Betriebspunkt am Auslauf eine Temperaturdifferenz von

$\Delta T \approx 4$ K. Eine konstante Temperatur wurde nach ca. 120 Zyklen erreicht. Bei eingeschalteter Regelung ist der Zusammenhang von Einlauf- und Auslaufemperatur nicht mehr zu erkennen, dies deutet auf eine effektive Regelung der Auslaufemperatur hin. Die Auslaufemperatur besitzt eine Reststreuung von ± 1 K, bei einer Temperaturdifferenz von $\Delta T = 10$ K am Einlauf. Eine konstante Einlaufemperatur wurde nach ca. 140 Zyklen erreicht, wobei die Auslaufemperatur nach ca. 30 Zyklen als konstant angesehen werden kann. Dieses Verhalten deutet darauf hin, dass eine konstante Verstreckenergie bei konstantem Prozessablauf und konstantem Material zu konstanter Umformtemperatur und konstanten Formteileigenschaften führt.

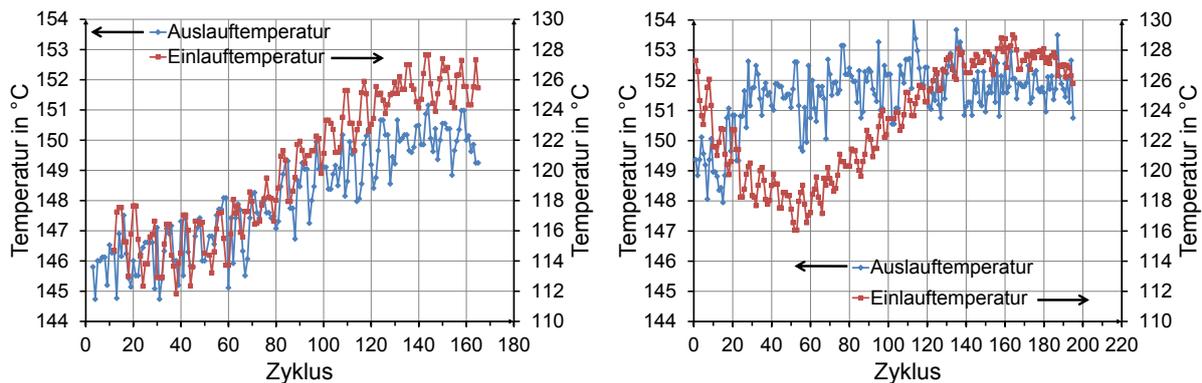


Bild 92: Ein- und Auslaufemperatur an der Infrarotheizung ohne (links) und mit (rechts) Regelung der Verstreckenergie

Als Formteileigenschaften wurden beispielhaft Stauchdruck (Bild 93) und Formteilhöhe (Bild 94) bestimmt und verglichen.

Die Formteileigenschaften verhalten sich analog zu den ermittelten Temperaturverläufen. Sowohl der Stauchdruck als auch die Formteilhöhe besitzen nach ca. 120 Zyklen bei Produktion mit deaktiviertem Regler einen konstanten Wert. Mit Regelung der Verstreckenergie konnte der stabile Prozess bereits nach 30-40 Zyklen erreicht werden. Damit konnte bestätigt werden, dass die Verstreckenergie geeignet ist, den Thermoformprozess zu überwachen und Störeinflüsse zu minimieren.

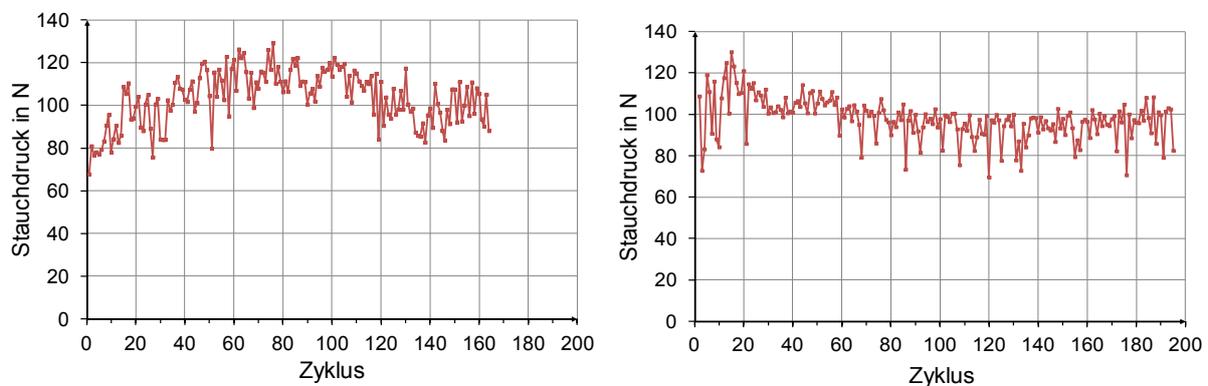


Bild 93: Stauchdruckverlauf während der Starttakte ohne Regelung (links) und mit Regelung der Verstreckenergie (rechts)

Betrachtet man den Stauchdruck bei aktivierter Regelung (Bild 93, rechts), so zeigt sich, dass die Ausreißer bei der Ermittlung des Stauchdrucks alle unterhalb des Mittelwerts liegen. Dies

deutet darauf hin, dass nicht eine statistische Streuung für die Ausreißer verantwortlich ist, sondern Fehlstellen in den Formteilen, die den Stauchdruck herabsetzen.

Bei der Becherhöhe zeigt sich dieses Verhalten nicht. Diese kann zuverlässig mit einer Streuung kleiner 0,1 mm eingestellt werden. Es zeigt sich auch hier ein schnelleres Einschwingverhalten und eine nach 20 Zyklen gleichbleibende Formteilhöhe. Dies zeigt wie der Stauchdruck, dass der Prozess mit Regelung der Verstreckenergie sehr wiederholgenau arbeitet.

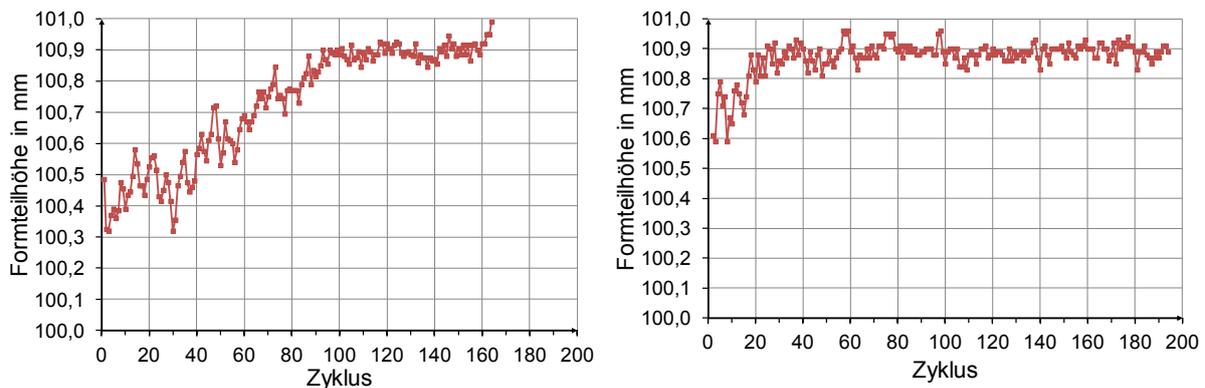


Bild 94: Verlauf der Becherhöhe während der Starttakte ohne Regelung (links) und mit Regelung der Verstreckenergie (rechts)

Da im Betrieb einer Thermoformanlage neben Temperaturschwankungen auch Störungen, die zu einer Fehlinterpretation führen, durch Halbzeug verursacht werden können, müssen bei der Umsetzung der Regelung folgende Szenarien berücksichtigt werden:

- Foliendicke ändert sich: Dies führt bei aktivierter Regelung zu Überheizen des Materials. Abgefangen werden kann dies durch eine Überprüfung der zugeführten Wärmemenge in der Vorheizung. Ein neuer idealer Betriebspunkt muss vorgegeben werden.
- Durchsatz verändert sich bei gleichbleibendem Material: Regelung kann wie bei Temperaturschwankungen reagieren.
- Halbzeugeinlauf-temperatur an der Thermoformmaschine ändert sich: Regelung kann wie bei Temperaturschwankungen reagieren.
- Materialverhalten ändert sich grundlegend (PET statt PP): neuer Betriebspunkt erforderlich. Erkannt werden kann dies durch Messung der Temperatur und die Leistungsaufnahme der Heizungen.

Zu beachten ist, dass die Regelung nur in begrenzter Weise Änderungen der Einlauf-temperatur korrigieren kann. Ist die Absenkung der Einlauf-temperatur zu groß, wird zwar die Verstreckenergie konstant gehalten, allerdings ändert sich dann das Temperaturprofil über die Foliendicke. Dies führt zu geändertem Verstreckverhalten. Aus diesem Grund muss die Einlauf-temperatur überwacht und signifikante Änderungen in der laufenden Produktion gemeldet werden.

10 Prozessüberwachung eines Inlineproduktionsprozesses

10.1 Das Produkt und die installierte Qualitätssicherung

Untersucht wurde die Produktion von Pflanztöpfen aus Polypropylen. Bei diesem Produkt werden Anforderungen an die Stabilität der Formteile und deren Ausformschärfe gestellt. Das Halbzeug besteht hierbei aus einem ca. 1,2 mm dicken Vierschichtverbund. Die zwei Deckschichten sind aus optischen Gründen notwendig. Zum Einsatz kommt bei den Deckschichten überwiegend Neuware. Die zweite Schicht besteht aus Regranulat des Restgitters und Ausschusses der Anlage. Die dritte Schicht besteht aus Recyclingware, die extern bezogen wird. Der Anlagenbetreiber hat als ideale Prozessparameter eine Halbzeugtemperatur von ca. 110 °C am Maschineneinlauf und eine Umformtemperatur zwischen 150 °C und 152 °C identifiziert. Unter 150 °C verschlechtert sich die Ausformschärfe, was zu klemmenden Stapeln führt. Gleiches gilt bei Abfall der Halbzeugtemperatur am Maschineneinlauf. Über 152 °C neigen die Formteile zum Einknicken beim Entformen. Die Extrusion übernehmen High-Speed-Extruder der Fa. Kuhne mit einem Schneckendurchmesser von 72 mm. Der Masse-durchsatz der Gesamtanlage liegt bei ca. 800 kg/h. Der Extrusion ist ein Dreiwalzenglätzwirk mit zwei Nachkühlwalzen nachgeschaltet. Die Abzugsgeschwindigkeit des Glätzwirkes wird dabei an die Geschwindigkeit der Thermoformanlage angepasst. Der Thermoformer arbeitet mit einer Leistung von ca. 31 Zyklen/min und besitzt damit einen Ausstoß von ca. 41.000 Teilen/h.

Durch die Versuche in der Produktion soll überprüft werden, ob aus den Schwankungen der Prozessparameter im laufenden Prozess auf eine sich ändernde Produktqualität oder sich ändernde Materialeigenschaften geschlossen werden kann. Zudem soll ermittelt werden, ob es möglich ist, den Prozess durch Regelung der Verstreckenergie konstant zu halten.

10.2 Identifikation von Störgrößen beim Inlinethermoformen

Die im Inlineprozess auf die Anlage wirkenden Störungen werden in der Regel durch das Rohmaterial oder die Extrusion eingebracht. Aufgrund des eingesetzten Recyclingmaterials ist der beschriebene Prozess als besonders kritisch anzusehen. Diese Annahme konnte während des Versuchszeitraums nachgewiesen werden. Es konnte beobachtet werden, dass nach einer Produktionspause die Temperatur des Halbzeugs am Maschineneinlauf um 4 K niedriger war als vor der Produktionspause (Bild 95). Die Auswertung zeigte eine geänderte Einstellung der Extrusionsanlage.

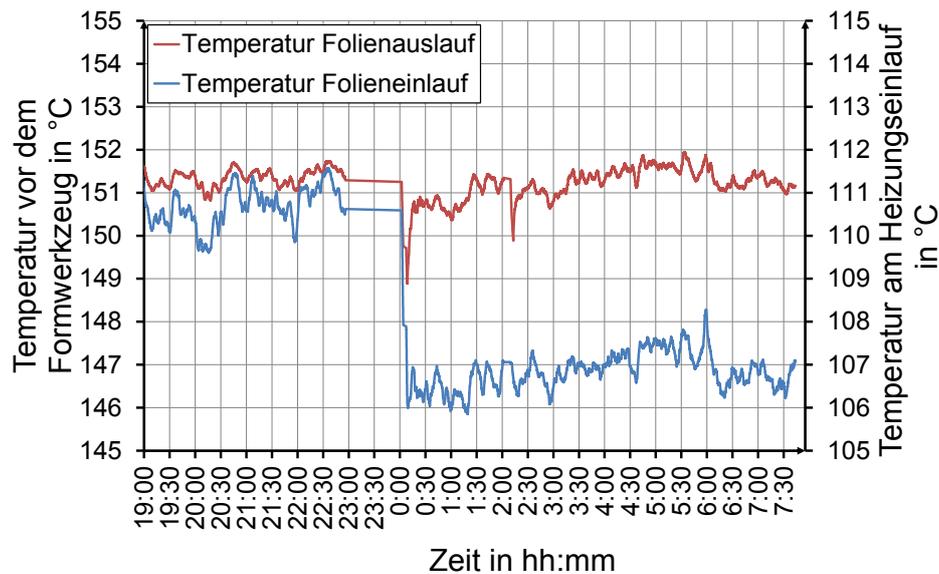


Bild 95: Temperatur am Maschineneinlauf und vor dem Formwerkzeug; Folieneinlaufftemperatur nach Produktionspause um 4 K abgefallen

Bedingt durch die niedrigere Einlaufftemperatur sanken nach Wiederanfahren der Anlage auch die Temperatur des Halbzeugs vor dem Werkzeug und die Verstreckenergie (Bild 96) stieg an. Der Maschinenbediener reagierte mit einer Anhebung der Heizungstemperatur (Bild 96), nach der Anhebung stellte sich ein gleiches Niveau der Auslaufftemperatur und Verstreckenergie ein. Diese Störung im Prozess ist somit real und kann nur durch die Extrusion oder die Einstellungen am Glättwerk begründet werden. Damit konnte die These bestätigt werden, dass eine Regelung der Verstreckenergie eine konstante Produktqualität unterstützt.

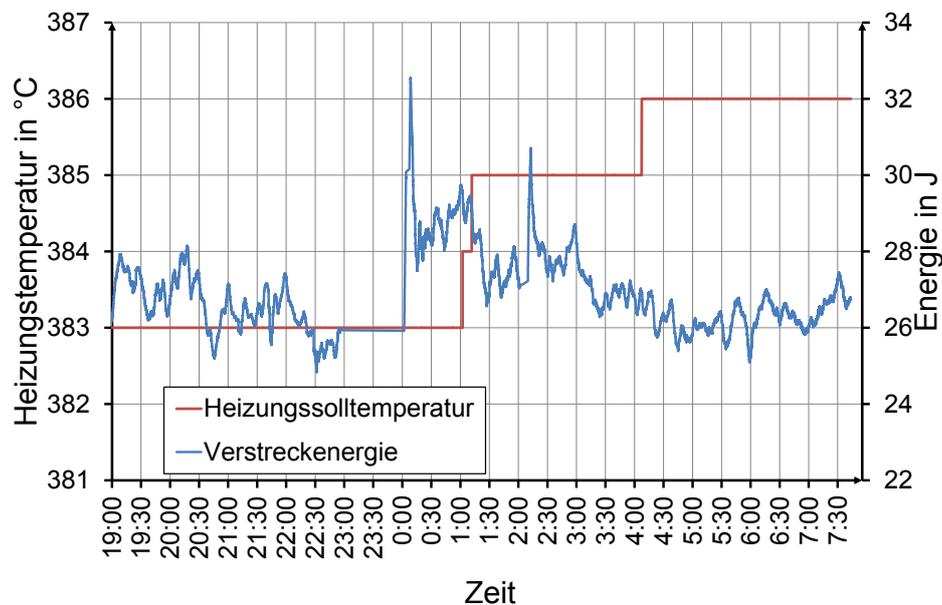


Bild 96: Heizungstemperatur und Verstreckenergie; Folieneinlaufftemperatur nach Produktionspause um 4 K abgefallen

Eine weitere (geplante) Störgröße war ein Farbwechsel in der unteren Deckschicht der Folie von Weiß auf Schwarz und eine damit verbundene Umstellung von einem Vierschicht- auf einen Dreischichtverbund. Die Reaktionen der Prozessgrößen auf diesen Materialwechsel sind in Bild 97 dargestellt. Es zeigte sich, dass die Einlaufftemperatur nach dem Farbwechsel wie-

der auf 112 °C gestiegen ist. Die Auslauftemperatur blieb, trotz der Reduzierung der Heizungstemperatur um 1 K, nahezu konstant.

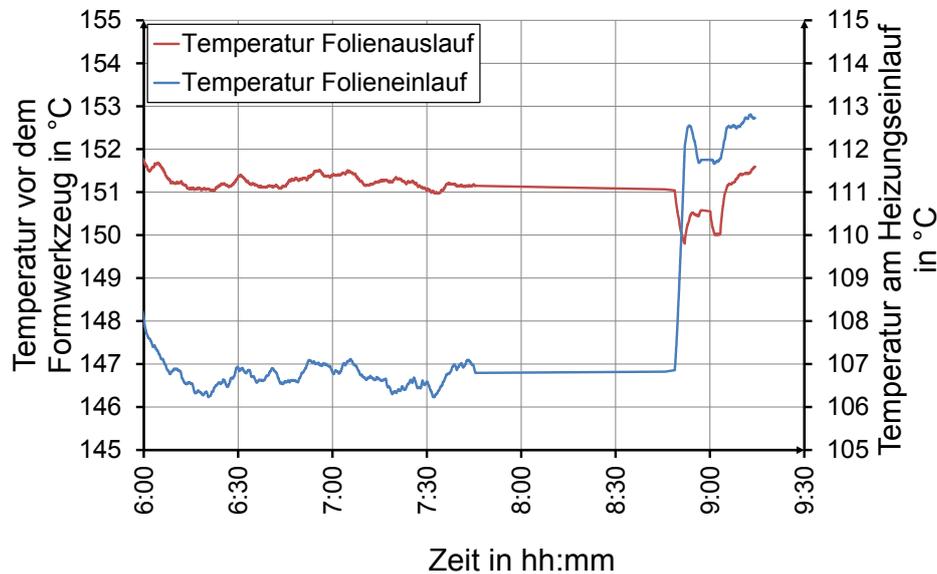


Bild 97: Temperatur am Maschineneinlauf und vor dem Formwerkzeug; Farbwechsel der unteren Deckschicht von Weiß auf Schwarz nach der Produktionspause

Das Energieniveau sank von 27 J auf 25 J ab. Nach der Umstellung bildete sich ein unsauberer Schnitt aus, der auf zwei Ursachen zurückgeführt wird. Große Schnittspalte an einzelnen Kavitäten und geänderte Mischung des Recyclingmaterials der mittleren Folienschicht sind die Ursachen für die Verschlechterung der Schnittqualität.

Diese sich ändernden Materialeigenschaften konnten in den Prozessdaten nachgewiesen werden. In Bild 98 ist die Abhängigkeit der Verstreckenergie und der Umformtemperatur dargestellt. Es zeigt sich, dass sich bei dem Mitschrieb über die Nacht ein Parallelversatz der Abhängigkeit der Verstreckenergie gegenüber den Mitschrieben am Tag zuvor einstellten (Bild 98, links). Dies ist ein Hinweis auf geringere Festigkeiten des Materials, das in diesem Fall dazu führt, dass Material in den Schnittspalt des Werkzeugs fließen kann und dadurch einen unsaubereren Schnitt ausbildet. Betrachtet man die drei Phasen des Nachtlaufs und vergleicht diese mit den Mitschrieben aus den Tagen davor, so zeigt sich dieses Verhalten ebenfalls (Bild 98, rechts, rote Datenreihe). Zudem kann gezeigt werden, dass der Farbwechsel keinen signifikanten Einfluss auf das Verarbeitungsverhalten hatte, außer einer weiteren Verschlechterung der Schnittqualität. Dieser wurde durch eine Absenkung der Heizungstemperaturen verbessert, dies deutet wiederum darauf hin, dass eine Regelung der Verstreckenergie sinnvoll wäre.

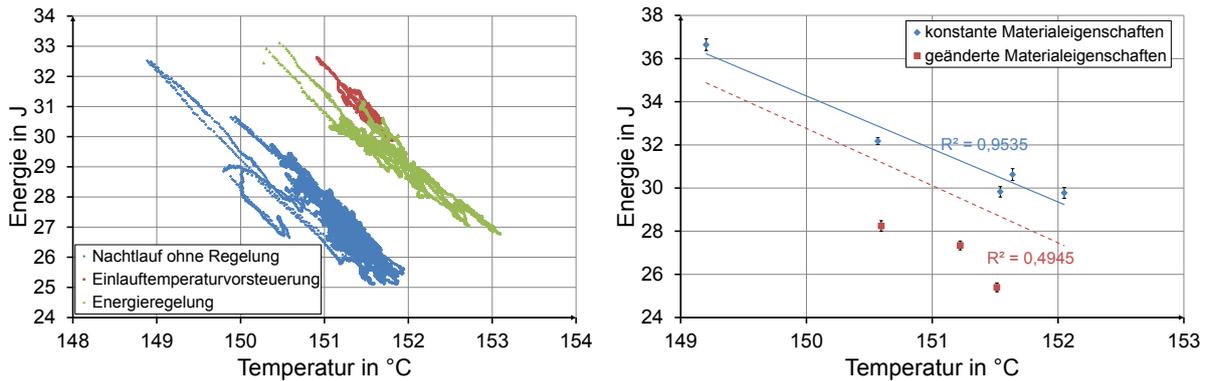


Bild 98: Korrelation zwischen Umformtemperatur und Verstreckenergie für verschiedene Messreihen (rechts: gleitender Mittelwert über 2 min. links: Mittelwert der Daten für die Zeiträume, in denen Produkte entnommen wurden).

Damit konnte nachgewiesen werden, dass es möglich ist, Eigenschaftsänderungen des Halbzeugs durch Beobachtung von Prozessgrößen zu identifizieren.

10.3 Korrelation der Qualität mit den Prozessgrößen

Neben der Identifikation von Störgrößen war es das Ziel, Korrelationen zwischen den Prozessgrößen in der Produktion und der Qualität der Formteile herzustellen. Da eine direkte Zuordnung zu einzelnen Zyklen nicht möglich war, wurden die Prozessgrößen über den Entnahmezeitraum der Produkte gemittelt, mit den gemessenen Formteilmerkmalen wurde ebenso verfahren.

Zur Ermittlung der Korrelationen wurde eine schrittweise Regression durchgeführt. Dabei konnten Korrelationen zwischen Stauchdruck und den Halbzeugtemperaturen und zwischen der Schwindung, den Halbzeugtemperaturen und der Verstreckenergie nachgewiesen werden. In den partiellen Regressionsdiagrammen ist ein stark linearer Zusammenhang zwischen der unabhängigen Variablen und dem Stauchdruck zu erkennen (Bild 99). Mit zunehmender Einlaufemperatur sinkt der Stauchdruck, dies kann auf geänderte kristalline Strukturen des extrudierten Halbzeugs zurückgeführt werden. Gleichzeitig steigt der Stauchdruck mit zunehmender Umformtemperatur an, was auf eine Variation der Wanddicke zurückzuführen ist. Diese Formteilmerkmale sind für den Verarbeiter allerdings nicht von zentraler Bedeutung.

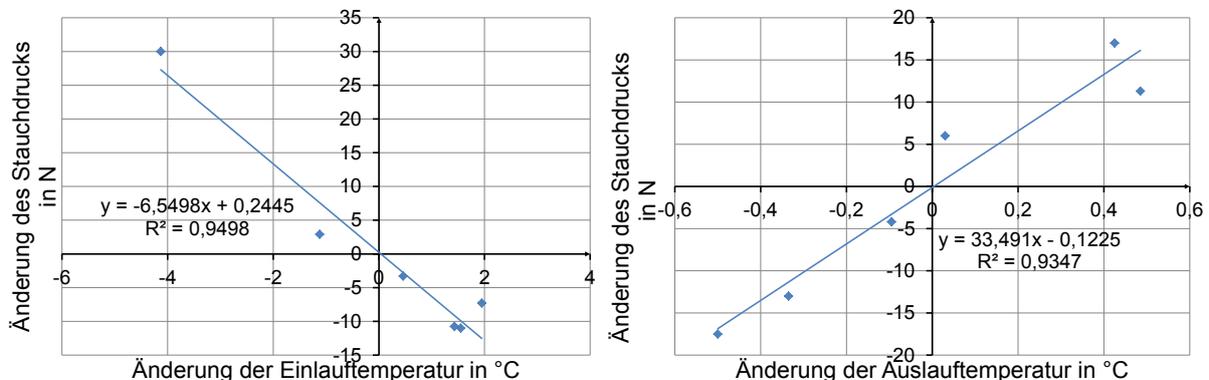


Bild 99: Partielle Regressionsdiagramme, abhängige Variable: Stauchdruck, unabhängige Variablen: Einlauf- und Auslaufemperatur

Dieser stellt Anforderungen an die Ausformschärfe, diese kann direkt mit der ermittelten Umformtemperatur oder, bei konstanten Materialeigenschaften, der ermittelten Energie korreliert werden. Messtechnisch wurde sie nicht erfasst.

10.4 Regelung der Umformtemperatur und Verstreckenergie

Um den Einfluss und das Potenzial der Regelung der Verstreckenergie nachzuweisen, wurden im Rahmen der Messungen diese Regelungsstrategien getestet. Es wurde eine reine Vorsteuerung der Heizung und eine Regelung der Umformtemperatur getestet, darüber hinaus wurde eine Regelung der Umformeigenschaften über die Verstreckenergie implementiert und beurteilt.

Die Vorsteuerung basiert auf einem Modell des Heizprozesses, anhand der Abweichungen der Einlauftemperatur von einem Betriebspunkt werden Korrekturwerte für die Heizung berechnet. Durch diesen modellbasierten Ansatz kann eine gewisse Dynamik bei Schwankungen an der Einlauftemperatur erreicht werden, da diese sonst erst bei der daraus resultierenden Umformtemperaturänderung identifiziert werden können. Die Vorsteuerung muss so gewählt werden, dass ein stabiler Prozess entsteht. Dadurch entsteht zwangsläufig eine bleibende Regeldifferenz bei der Umformtemperatur (Bild 100).

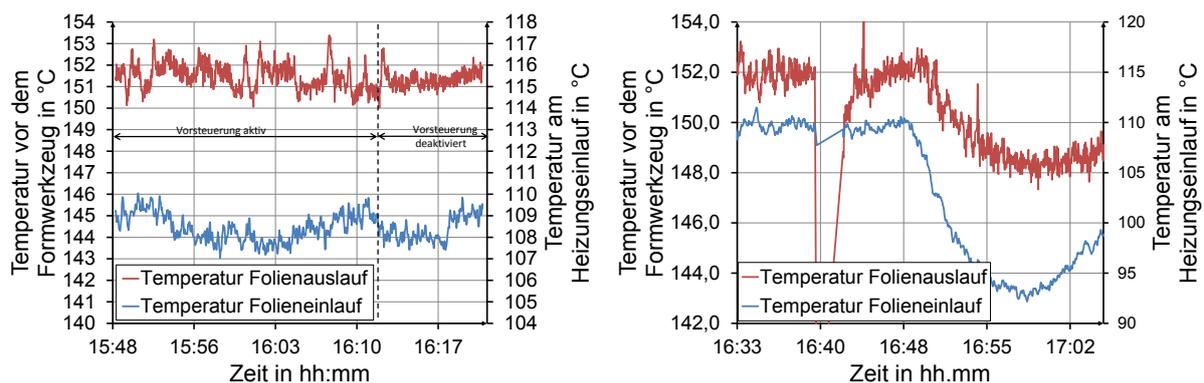


Bild 100: Verhalten der Vorsteuerung bei zu großer Verstärkung (links) und stabiler Einstellung (rechts).

Diese Regeldifferenz kann durch einen relativ trägen Regler, der als Messgröße die Umformtemperatur oder die Verstreckenergie nutzt, ausgeregelt werden. Dabei ist zu beachten, dass zyklische Störungen oder Schwankungen, die eine Periodendauer kleiner als zwei Heizungs-längen (ca. 1 min bei der eingestellten Taktleistung) aufweisen, nicht ausgeregelt werden können. Um die minimalen Änderungen in Energie und Temperatur aufzulösen, wurde ein zurückgreifender gleitender Durchschnitt über die letzten drei Minuten gebildet. In den Versuchen wurde eine Integrationskonstante von ca. 2 min eingestellt. Dadurch erreicht man ein träges aber stabiles Ausregeln der Verstreckenergie (Bild 101). Zudem erkennt man, dass mit aktivierter Regelung die Energie innerhalb einer Spannbreite von 1 J gehalten werden kann. Wird die Regelung deaktiviert, so ist ein Drift zu niedrigeren Verstreckenergien zu erkennen. Auch hier konnte die Energieänderung direkt mit einer Temperaturänderung korreliert werden. Die Umformtemperatur steigt nach Deaktivieren der Regelung um 0,5 K an, während die Verstreckenergie um ca. zwei Joule abfiel.

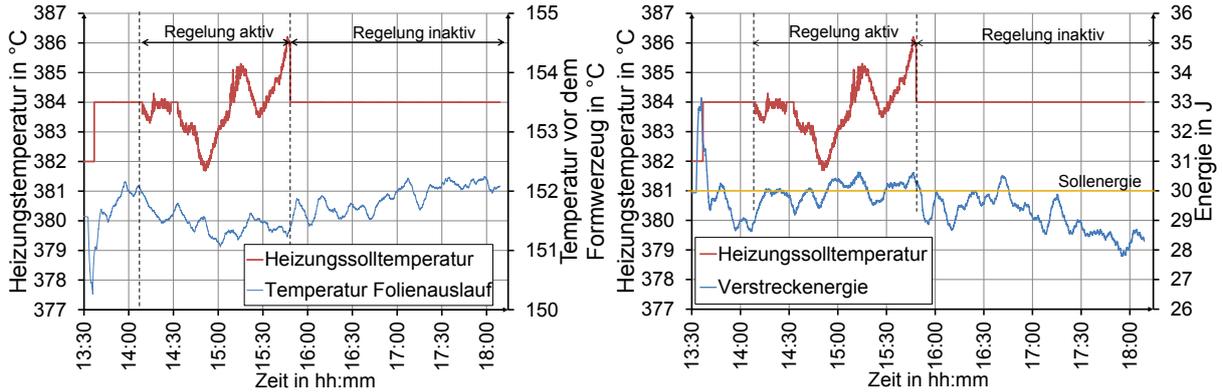


Bild 101: Verstreckenergie des Vorstreckers und Heizungstemperaturen mit und ohne aktivierter Verstreckenergieregulung

Um den Einfluss der Regelung zu beurteilen, wurden aus beiden Bereichen 100 Formteile entnommen. In Bild 102 sind der Mittelwert und die Standardabweichung des Stauchdrucks und der Formteilhöhe dargestellt. Man erkennt, dass die Streuung des Stauchdrucks bei aktivierter Regelung um ca. 10 % geringer ist. Der Mittelwert des Stauchdrucks ändert sich nicht signifikant. Die Standardabweichung der Formteilhöhe reduziert sich um 40 %. Es konnte somit gezeigt werden, dass die Regelung der Verstreckenergie dazu beitragen kann, den Prozessablauf zu stabilisieren. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass bei geändertem Materialverhalten die Qualität geprüft werden muss, da Formteilmerkmale, wie die Schnittqualität nicht identifiziert werden können.

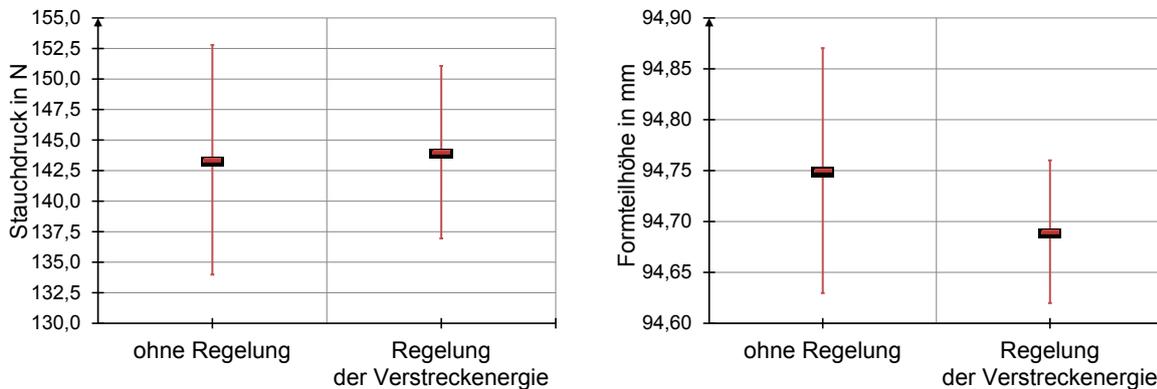


Bild 102: Mittelwert des Stauchdrucks und der Formteilhöhe und ermittelte Standardabweichung.

11 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit untersucht das Herstellen von Kunststoffverpackungen im Thermoformverfahren. Im Rahmen der Arbeit konnte gezeigt werden, dass durch die Überwachung von Prozessgrößen nützliche Informationen beim Thermoformen gewonnen werden können.

Der Schwerpunkt lag dabei auf der Verarbeitung von Polypropylen, welches aufgrund seiner Eigenschaften und seines Preises einen Anteil von ca. 20 % an allen Verpackungen besitzt. Zur Überprüfung der Ansätze auf andere Thermoformwerkstoffe wurde amorphes Polyethylenterephthalat in die Untersuchung mit aufgenommen.

Die Arbeit ist in zwei Kernthemen untergliedert. Im Ersten werden die Einflüsse der Einstellparameter und der Anlage auf die Produktmerkmale untersucht. Dazu wurde eine Einflussparameteranalyse durchgeführt, die Anlagensteuerung überarbeitet und Peripheriegeräte wie die Vorheizung optimiert. Im Zweiten wird gezeigt, wie mit Hilfe von Prozessgrößen Betriebszustände der Anlage überwacht und Qualitätsmerkmale der Formteile prognostiziert werden können.

Die Einflussparameteranalyse wurde anhand der Formteilmerkmale Wanddickenverteilung, Stauchdruck, Masse, Siegelrandgeometrie und geometrischer Größen des Formteils durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die Umformtemperatur und die Geometrie des Vorsteckers die größten Einflussfaktoren bei der Wanddickenverteilung sind. Die Einstellungen von Niederhalter und Formdruck, sowie Verstreckgeschwindigkeit des Vorstreckers haben einen um circa Faktor vier geringeren Einfluss auf die Wanddickenverteilung bei Ausnutzung des maximalen Variationsbereichs. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass für das Thermoformen optimierte Halbzeuge verwendet wurden. Diese sind in der Regel nukleiert und besitzen eine geringe Abhängigkeit des Dehnverhaltens von der Dehngeschwindigkeit. Nicht betrachtet wurden bei dieser Untersuchung die Stempeltemperatur und deren Einfluss auf die Reibpaarung Halbzeug Vorstreckler.

Es konnte zudem gezeigt werden, dass ein definierter Prozessablauf mit Klemmen, mechanischem Verstrecken und anschließendem Ausformen notwendig ist, um die Fertigungstoleranzen der Formteile möglichst gering zu halten. Wird dieser sequenzielle Ablauf parallelisiert, so sind Schwankungen in der Formteilmasse und der Wanddickenverteilung nachgewiesen worden. Durch die Überwachung der pneumatischen Aktoren und Prozessdrücke mittels Sensorik wurde der Prozessablauf automatisiert mit Zwangsbedingungen verknüpft. Daraus resultiert ein auf die Zykluszeit optimierter Prozessablauf, der als Grundeinstellung der Maschine dienen kann. Zudem konnte gezeigt werden, dass die Formteilmerkmale, werden definierte Grenzen der Einstellparameter eingehalten, nicht signifikant von den Toleranzen des Prozessablaufs beeinflusst werden. Dadurch konnte bewiesen werden, dass die wesentlichen Störungen, die die Formteilmerkmale in einer laufenden Produktion beeinflussen, entweder durch die Temperaturführung des Halbzeugs oder die Halbzeugeigenschaften verursacht werden. Aus diesem Grund werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie die Temperaturführung optimiert, überwacht und geregelt werden kann.

Um Störungen in der Temperaturführung zu identifizieren und darauf zu reagieren wurde in Erweiterung zum Stand der Technik neben der Temperatursensorik ein Verfahren zur Identi-

fizierung des Materialverhaltens erarbeitet. Dieses Verfahren basiert auf der Messung der Umformkraft des Vorstreckers, die in einigen Veröffentlichungen zur Identifizierung der Thermoformbarkeit oder zur Beschreibung des Arbeitspunkts der Thermoformanlage herangezogen wurde. In diesen Forschungsarbeiten wurde gezeigt, dass die Verstreckkraft und deren Verlauf ein Indiz für die Verarbeitbarkeit eines Halbzeugs ist oder dazu genutzt werden kann einen Betriebspunkt zu beschreiben. Auf dieser Grundlage wurden zykluszugeordnete Kennwerte aus den Kraftverläufen generiert. Als geeignete Kennwerte stellten sich die Verstreckenergie des Vorstreckers und die Schließkraft des Werkzeugs heraus. Es konnte nachgewiesen werden, dass diese Größen von den temperaturabhängigen mechanischen und rheologischen Eigenschaften der Polymere abhängig sind. Es konnte gezeigt werden, dass sowohl Temperaturänderungen als auch Änderungen in den Materialeigenschaften (Nukleierung) identifiziert werden können. Dadurch können Veränderungen im Materialverhalten festgestellt werden, die durch Veränderungen des Heizprozesses, der Umgebungsbedingungen oder des Halbzeugs selbst verursacht werden.

Insbesondere bei teilkristallinen Polymeren, wie Polypropylen und Polyethylenterephthalat bietet sich die Messung der Verstreckkraft, des Moments des Vorstreckermotors oder der Schließkraft des Werkzeugs eine Alternative zur Temperaturmessung durch optische Sensoren. Vorteile dieser Messung ist die Unempfindlichkeit gegenüber optischen Eigenschaften des Halbzeugs und Strahlungsquellen in der Umgebung. Zudem ist das Signal-Rausch-Verhältnis der Kraftmessung bei Polypropylen in Bezug auf das Thermoformfenster größer als das der Temperaturmessung. Dies ist dadurch begründet, dass die Umformung in einem Bereich stattfindet, in dem erste kristalline Strukturen aufgeschmolzen werden. Dadurch ändern sich die Materialeigenschaften bei geringen Temperaturänderungen signifikant.

Durch eine zyklusweise Kennwertbildung aus den Prozessgrößen ergeben sich Prozesswerte, die sich gut zur Identifikation und zur Regelung des Prozesspunktes eignen. Dies ist im Speziellen die Verstreckenergie, die während des Vorstreckens aufgewendet wird. Eine Regelung der Formteilmerkmale durch die Verstreckenergie ist nur sinnvoll, wenn bei der Inbetriebnahme nachgewiesen ist, dass mit dem verwendeten Halbzeug und Vorstreckere die geforderte Formteilqualität erreicht werden kann. Zudem muss das qualitätsbestimmende Formteilmerkmal von den temperaturabhängigen Materialeigenschaften abhängig sein. Im Rahmen der Arbeit konnte gezeigt werden, dass eine Regelung der Verstreckenergie das Einschwingen der Thermoformanlage verkürzen kann. Ausblickend muss eine Prüfung der Regelung im Produktionsumfeld erfolgen, um das Langzeitverhalten zu identifizieren. Zudem ergänzt die Verstreckenergieregulation die Temperaturregelung dahin gehend, dass ein absoluter Kennwert für ein Material unabhängig von Farbe, Umgebungstemperatur oder Emissionsgrad besteht.

Zudem kann der Betriebszustand der Anlage durch die Erfassung von Prozessgrößen geprüft und somit kritische Betriebspunkte vermieden werden. Als Beispiel kann hier die Schließkraftmessung, sowie die daraus resultierende automatisierte Schritthöheneinstellung genannt werden, die eine Überlastung der Maschine vermeiden kann und ein undichtes Werkzeug durch Formdrucküberwachung erkennt. Auch die Heizungen, insbesondere die Vorheizung können überwacht werden.

Abschließend konnten die im Labor aufgestellten Hypothesen überprüft und Regelungsstrategien getestet werden. Es konnte nachgewiesen werden, dass es möglich ist, durch die Überwachung des mechanischen Versteckvorgangs, Änderungen in den Materialeigenschaften zu identifizieren. Im Labor wurde dies bei verwandten Einschichtpolypropylenfolien nachgewiesen, bei einem Verarbeiter konnte es für einen unbekanntem coextrudierten Mehrschichtverbund aus Recyclingmaterialien ebenfalls bestätigt werden.

Zudem wurde erfolgreich nachgewiesen, dass in der laufenden Produktion die Formteileigenschaften in erster Linie mit den Temperaturen am Einlauf der Thermoformmaschine, der Umformtemperatur und der Verstreckenergie korrelieren. Dies ist die Voraussetzung für die Regelung der Verstreckenergie durch Anpassung des Heizprozesses zur Optimierung der Konstanz der Formteileigenschaften. Im Inlinethermoformprozess mit konnte nachgewiesen werden, dass es durch eine Energieregulierung möglich ist, die Prozesskonstanz zu verbessern. Die Regelung ist in der Lage auftretende langsame und stetige Störungen zu regeln. Sprunghafte Störungen durch Änderungen der Extrusionsparameter können nicht vollständig ausgegletzt werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Prozesskennwerte des Thermoformprozesses genutzt werden können, Betriebspunkte der Anlage zu prüfen und gegebenenfalls Einstellungen zu regeln, um die erzielte Formteilqualität konstant zu halten. Gleichzeitig wurden durch die Formprozesseinstellungen Parameter ermittelt, die zur Korrektur von Abweichungen der Formteilqualität geeignet sind. Die Prozesseinstellungen besitzen allerdings einen deutlich geringeren Einfluss auf die Eigenschaften des Formteils als die temperaturabhängigen Materialeigenschaften und der verwendete Vorstrecker.

Um vor dem eigentlichen Formprozess Änderungen am Halbzeug zu identifizieren, sollte geprüft werden, ob sich durch die Leistungsaufnahme der Heizungen, insbesondere der Vorheizung, Rückschlüsse auf sich ändernde Halbzeugeigenschaften schließen lassen (z. B. sich ändernde Foliendicke oder Wärmekapazität).

Als weitere Schritte sind zu prüfen, ob sich bei weiteren Thermoformmaterialien Korrelationen zwischen den Prozessgrößen Verstreckenergie und Schnittkraft und den Formteileigenschaften nachweisen lassen. Dabei sollten insbesondere Biopolymere und Polyethylene in den Fokus der Forschung gestellt werden. Diese Materialien werden durch steigende Rohstoffpreise zunehmend attraktiver. Dadurch kann die Zukunftsfähigkeit dieser Strategie nachgewiesen werden. Als weiterer Punkt sollte eine intensivere Untersuchung von Mehrschichtfolien in zukünftige Arbeiten mit aufgenommen werden.

12 Conclusion and Forecast

The study investigated the production of packaging in thermoforming. As part of the study, it can be shown that the monitoring of process variables can obtain useful information in the thermoforming process. The focus was on the processing of polypropylene materials, which due to its characteristics and price has a share of about 20% of all packaging. To compare to other thermoforming materials, amorphous PET was included in the study.

The paper is divided into two main subjects. First, the influence of the setting parameters of the system at the product features is examined. The control of the system was revised and peripheral systems such as preheating were optimized. The second part shows how to use process variables to monitor operating conditions of the system and predict quality characteristics of the molded parts.

The analysis of influencing factors on the molded part was performed based on the characteristics of the molded part such as wall thickness distribution, compression strength, mass, sealed-edge geometry and geometrical parameters of the part. It could be shown that the deformation temperature and the geometry of the plug are the biggest influencing factors on the wall thickness distribution. The influences of the settings of the blank holder, molding pressure, as well as the speed of the plug on the wall thickness distribution are smaller by about a factor of four at using the maximum utilization of variation range. This is also due to the fact that for the thermoforming, optimized materials were being used. These are nucleated and the stretch behavior generally has a low dependence of the strain rate. Not considered in this study were the plug temperature and its influence on the friction coefficient.

It could be shown that a defined process flow: clamps, mechanical stretching, and then molding is necessary to keep the tolerances of the molded parts to a minimum. If this sequential function is done in parallel, variations in the molding mass, and the wall thickness distribution could be shown. By monitoring the pneumatic actuators and process pressure using sensor an automated process flow has been generated linked with constraints. This results in a cycle-time optimized process flow, which can serve as the basic setting of the machine. The study was also able to show that the molding characteristics cannot be significantly affected by the tolerances of the process flow if the limits of the setting parameters are defined. Thus, it could be shown that variations of the properties of the molded part in a current production are either caused by the temperature control or sheet properties. For this reason, opportunities are identified related to how to optimize, to monitor, and to control temperature setting.

To identify faults in the temperature control, as an extension to the prior method in addition to the temperature sensor, a method for the identification of the material behavior was developed. This method is based on measuring the deformation force of the pre-stretcher, which was used in some publications to identify the thermoforming or description of the operating point of the thermoforming machine. In this research it was shown that the Verstrechkraft and its course is an indication of the ability to process a semi-finished product or can be used to describe a point of operation. On this basis, cycle-associated values are generated which are based on the force course. Suitable characteristics that were carried out are the energy of the plug and the clamping force of the tool. It has been shown that these values depend on the

temperature-dependent mechanical and rheological properties of the polymers. It could be shown that changes in temperature and changes in the material properties (nucleation) can be identified. This allows the detection of changes in the material properties, which are caused by changes in the heating process, the environmental conditions or the semi-finished product itself.

In particular in semi-crystalline polymers such as polypropylene and polyethylene terephthalate the measurement of the plug force, the torque of the motor and the tool clamping force are an alternative to the temperature measured by optical sensors. An advantage of this measure is its insensitivity to optical properties of the material and radiation sources in the environment. Moreover, the signal / noise ratio of the force measurement with polypropylene in relation to the thermoforming window is larger than that of the temperature measurement. This is motivated by the fact that the deformation takes place in a region where the first crystalline structures are melted. Thus, the material properties significantly change at low temperature changes.

By calculation of the cycle based parameters, values are derived from the process variables, which are well suited for the identification and control of the process point. This is in particular the energy of the plug being spent during the pre-stretching. A control of the molding characteristics by the energy of the plug is only useful if it is proven that with the used semi-finished product, pre-stretch quality can be achieved, and the corresponding molding feature is dependent on the temperature-dependent material properties. As part of the study showed, a control of energy of the plug can shorten the oscillation of the thermoforming machine. Looking ahead, a review of the control in a production environment in order to identify long-term behavior is necessary. The temperature control also complements the energy of the plug so that an absolute value for a characteristic material regardless of color, ambient temperature or emissivity consists.

Moreover, the operating conditions can be checked by the detection of process parameters, and critical operating points can be avoided. An example is the closing force measurement resulting in automatic cutting height adjustment, which prevents overloading the machine and detects a leaking tool by pressure monitoring. Also the heating and in particular the pre-heating can be monitored.

Finally, the laboratory hypotheses and control strategies can be tested. It has been proven that it is possible to identify by monitoring the pre-stretching changes in material properties. In the laboratory, this has been demonstrated in related single-layer films; the hypotheses could also be confirmed for unknown coextruded multilayer composite made from recycled materials.

It has also been shown that in the current production the part properties primarily can be correlated with the temperature at the inlet of the thermoforming machine, the forming temperature and the energy of the plug. This is the prerequisite for the regulation of *Verstreckenergie* by adjusting the heating process to optimize the stability of the part properties. In the inline thermoforming process with extruder, it could be proven that it is possible to improve the process stability by an energy control. The scheme is able to regulate slow and steady occurring disturbances. Sudden disturbances cannot be completely corrected by changing the extrusion parameters.

In summary it can be stated that the specific values of the thermoforming process can be used to verify the operation points and optionally to control settings to keep the obtained molding quality constant. Simultaneously, settings for the molding process parameters were determined that are suitable for the correction of deviations of the molding quality. However the process settings have a distinctly minor influence on the properties of the molded part compared to the temperature-dependent material properties and the used plug.

To identify changes on semi-finished product before the molding process, it should be checked whether you can derive conclusions related to changes of material characteristics (eg changing film thickness and heat capacity) based on the power consumption of the heaters, in particular the pre-heating.

Further steps are necessary to examine whether it is possible to demonstrate correlations between process variables energy of plug, cutting force and the part properties with other thermoforming materials. Particularly biopolymers and polyethylene should be placed in the focus of research. These materials are becoming increasingly attractive due to rising commodity prices. This allows detecting the sustainability of this strategy. Another point should be a more intensive research of multilayer films in future work.

13 Literatur

- [Bei10] Beilharz, F.: Einfluss der Herstellungsbedingungen von PP-Halbzeugen auf die Thermoformigenschaften, Dissertation, Universität Stuttgart, 2010.
- [Bei11] Beilharz, F.; Neubig, B.; Bonten, C.: Wareneingangskontrolle für Halbzeuge, *Kunststoffe*, 10/2011; S. 184–187.
- [Bri79] Brinken, F.: Untersuchungen zur Wärmeübertragung beim Thermoformen von Thermoplasten, Dissertation, RWTH Aachen, 1979.
- [Col02] Collins, P.; Harkin-Jones, E.; Martin, P.: The Role of Tool/Sheet Contact in Plug-assist Thermoforming, *International Polymer Processing*, Vol. 17, 2002/4; S. 361–369.
- [Dua04] Duarte, F. M.; Covas, J. A.: On the Use of the Heating Stage to Control the Thickness Distribution in Thermoformed Parts, *International Polymer Processing*, Vol. 19, 2004/2; S. 186–198.
- [Fer07a] Fertschej, A.; Langecker, G.: Simulation of the Heating Step within the Thermoforming Process Using the Finite Difference Method, (Polymer Processing Society Hrsg.), *Proceedings of the Polymer Processing Society 23th Annual Meeting*, Salvador (Brasilien), 2007.
- [Fer07b] Fertschej, A.; Langecker, G.; Kertz, J.: Simulation des Aufheizvorgangs beim Thermoformen, *Kunststoffe*, 1/2007; S. 62–65.
- [Gau05] Gauthier, G.: A New Absorption Based Model for Sheet Reheat in Thermoforming, (Society of Plastics Engineers Hrsg.), *Proceedings of the 63th SPE Annual Technical Conference*, 2005; S. 353–357.
- [Gau06] Gauthier, G.; Boulet, B.: Terminal Iterative Learning Control Applied to Thermoforming Machine Reheat Phase, *IEEE ISIE Montreal*, 2006.
- [Gau08] Gauthier, G.; Boulet, B.: Robust Design of Terminal ILC with H_∞ Mixed Sensitivity Approach for a Thermoforming Oven, *Journal of Control Science and Engineering*, 2008, January.
- [Gau09] Gauthier, G.; Boulet, B.: Terminal Iterative Learning Control design with Singular Value Decomposition Decoupling for Thermoforming Ovens, (American Automatic Control Council Hrsg.), *Proceedings of the American Control Conference*, 2009; S. 1640–1645.
- [Gir03] Girard, P. et al.: On-line Hybrid Model-Based Tuning of Simulation Provides Soft Sensors for the Estimation of Sheet Temperature Distributions in Thermoforming; Industrial Materials Institute, NRC, Boucherville, Quebec, Canada; 2McGill University, Montreal, Quebec, Canada, (Society of Plastics Engineers Hrsg.), *Proceedings of the 61th SPE Annual Technical Conference*, 2003.
- [Har99] Harkin-Jones, E.; Macauley, N.; Murphy, W. R.: Influence of Extrusion Parameters on Polypropylene Sheet for Use in Thermoforming, (Society of Plastics Engineers Hrsg.), *Proceedings of the 57th SPE Annual Technical Conference*, 1999.
- [Har01] Harron, G. W.; Harkin-Jones, E.; Martin, P.: An Experimental Investigation of the Plug Assist Thermoforming Process, (Society of Plastics Engineers Hrsg.), *Proceedings of the 59th SPE Annual Technical Conference*, 2001.

- [Har03] Harron, G. W.; Martin, P. J.; Harkin-Jones, E.: Plug Force Monitoring for the Control and Optimization of the Thermoforming Process, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2003.
- [Har98] Harron, G.; Harkin-Jones, E.; Martin, P.: The Influence of Extrusion Parameters on the Morphology and Mechanical Properties of Polypropylene Sheet, (Society of Plastics Engineers Hrsg.), Proceedings of the 57th SPE Annual Technical Conference, 1999.
- [Heg04] Hegemann, B.: Deformationsverhalten von Kunststoffen beim Thermoformen, - experimentelle und virtuelle Bestimmung -, Dissertation, Universität Stuttgart, 2004.
- [Hoc12] Hochrein, T.: Reale Aufgaben für virtuelle Sensoren, Kunststoffe, 2/2012; S. 20–23.
- [Hos06] Hosseini, H.; Berdyshev, B.: Modeling of Deformation Processes in Vacuum Thermoforming of a Pre-stretched Sheet, (Society of Plastics Engineers Hrsg.), Proceedings of the 64th SPE Annual Technical Conference, 2006.
- [Kho06] Khongkruaphan, S. et al.: Effect of Plug Design on Thermoformed Polypropylene Parts, (Society of Plastics Engineers Hrsg.), Proceedings of the 64th SPE Annual Technical Conference, 2006.
- [Kou92] Kouba, K.; Bartos, O.; Vlachopoulos, J.: Computer Simulation of Thermoforming in Complex Shapes, Polymer Engineering and Science, Volume 32, Issue 10, 1992; S. 699–704.
- [Küp91] Küppers, M.: Anwendung numerischer Methoden beim Thermoformen, Dissertation, RWTH Aachen, 1991.
- [Lar01] Laroche, D.; Collins, P.; Martin, P.: Modeling of the Effect of Slip in Plug-Assisted Thermoforming, (Society of Plastics Engineers Hrsg.), Proceedings of the 59th SPE Annual Technical Conference, 2001.
- [Leo11] Leopold, T.: Rechnergestützte Auslegung streckblasgeformter Hohlkörper, Dissertation, RWTH Aachen, 2011.
- [Lie08] Liebing, D.: Einfluss der Verarbeitungsparameter beim Thermoformen auf Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften von Polyethylenterephthalat, Dissertation, Universität Stuttgart, 2008.
- [Lie10] Liedl, P.: Spitzenqualität mit kurzen Zyklen, Kunststoffe, 2/2010; S. 38–40.
- [Lim06] Limper, A.: Glättband - Abkühlprozess ist Qualitätsbestimmend, Kunststoffe, 6/2006; S. 96–101.
- [Mac98a] Macauley, N.; Harkin-Jones, E.; Murphy, W. R.: The Influence of Extrusion Parameters on the Mechanical Properties of Polypropylene Sheet, Polymer Engineering and Science, Volume 38, Issue 4, 1998; S. 662–673.
- [Mac98b] Macauley, N.; Harkin-Jones, E.; Murphy, W. R.: The Effect of nucleating Agents on the Morphology and crystallization Behavior of Polypropylene, (Society of Plastics Engineers Hrsg.), Proceedings of the 56th SPE Annual Technical Conference, 1998; S. 3482.

- [Mar03] Marks, A. F. et al.: The Effect of Pigment Type and Concentration on the Rheological Properties of Polypropylene, *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, Volume 11, Issue 1-2; 2003, S. 127–136.
- [Mar10] Martin, P.; O'Connor, C. P.: Development of a realistic finite element thermoforming Simulation, (Polymer Processing Society Hrsg.), Proceedings of the Polymer Processing Society, 2010.
- [Mar01] Martin, P.: Plug Materials For Thermoforming: The Effects of Non-Isothermal Plug Contact, (Society of Plastics Engineers Hrsg.), Proceedings of the 59th SPE Annual Technical Conference, 2001.
- [Mar96] Marwick, J. van: Wanddickenmessung und -regelung beim Thermoformen, Dissertation, RWTH Aachen, 1996.
- [McC08] McConville, E.; Martin, P.: Effect of extrusion and thermoforming Parameters on the Properties of Polypropylene, (Polymer Processing Society Hrsg.), Proceedings of the Polymer Processing Society 24th Annual Meeting, Salerno (Italy), 2008.
- [McC08a] McCool, R.; Choo, H.; Martin, P.: Selecting Plug Materials for Thermoforming, (Polymer Processing Society Hrsg.), Proceedings of the Polymer Processing Society 24th Annual Meeting, Salerno (Italy), 2008.
- [McC08b] McCool, R.; Keaney, T.; Martin, P.: Thermal Investigations during the plug assisted Thermoforming of homopolymer Polypropylene Sheet, (Polymer Processing Society Hrsg.), Proceedings of the Polymer Processing Society 24th Annual Meeting, Salerno (Italy), 2008.
- [McC11] McCool, R.; Martin, P. J.: Thermoforming process simulation for the manufacture of deep-draw plastic food packaging, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 225, 4; S. 269–279.
- [McC07] McCool, R.; Martin, P.; Harkin-Jones, E.: Development of a plug assisted thermoforming Simulation, Proceedings of the Third International DCDIS Conference.
- [Mic95] Michaeli, W.; Hartwig, K.: Rechnergestützte Prozessoptimierung beim Thermoformen, *Plastverarbeiter*, 6/1995; S. 86–90.
- [Mic96] Michaeli, W.; Hartwig, K.: Simulation der Verformung beim Thermoformen, DFG-Abschlussbericht Nr. Mi 192/30-2, RWTH Aachen, 1996.
- [Mic99] Michaeli, W. et al.: Prozeßübergreifende Qualitätssicherung, Die Herstellung von Kunststoffsaugrohren ganzheitlich betrachtet, *Kunststoffe*, 7/1999; S. 40–42.
- [Moo03] Moore, B.: Multivariable H_∞ Control of the Thermoforming Reheat Process, (Waterloo Press Hrsg.), Proceedings of the Third International DCDIS Conference Ontario, Canada, May 15-18, 2003.
- [Mor06] Morales, R.; Candal, M.: Thermoforming Process Optimization by using the Experiment Design Technique, (Society of Plastics Engineers Hrsg.), Proceedings of the 64th SPE Annual Technical Conference, 2006.
- [Mus99] Mustafa, M. A.-H.: Modellbasierte Ansätze zur Qualitätsregelung beim Kunststoffspritzgießen, Dissertation, Universität Essen, 1999.
- [Nor11] Northington, M.; Theilacker, A.: Wärmebildkamera reduziert Fehlmengenproduktion, *Kunststoffe*, 3/2011; S. 118–120.

- [Nov99] Novotny, P.; Saha, P.; Kouba, K.: Fitting of K-BKZ Model Parameters for the Simulation of Thermoforming, *International Polymer Processing*, Vol. 14, 1999/03; S. 291–295.
- [O’C08] O’Connor, C. P. et al.: Finite element analysis of the thermoforming of Polypropylene, *International Journal of Material Forming*, Volume 1, Issue 1; S. 779–782.
- [O’C10] O’Connor, C. P.; Martin, P. J.; Menary, G.: Viscoelastic Material Models of Polypropylene for Thermoforming Applications, *International Journal of Material Forming*, Volume 3, Issue 1; S. 599–602.
- [Per07] Pereira, D. C.; Duarte, F. M.; Covas, J. A.: Using differential heating to improve the Thickness Distribution of Parts produced by plug assisted Thermoforming.
- [Pla11] PlasticsEurope: *Plastics - the Facts 2011*, An analysis of European plastics production, demand and recovery for 2010, 2011.
- [Pol93] Poller, S.: *Verbesserte Prozeßführung von Thermoformmaschinen, - Analyse und Optimierung* -, Dissertation, RWTH Aachen, 1993.
- [Ros06] Rosa Morales, M. C.: *Thermoforming Process Optimization by using the Experiment Design Technique*, (Society of Plastics Engineers Hrsg.), Proceedings of the 64th SPE Annual Technical Conference, 2006.
- [Run03] Rungroungdouyboon, B.; Coulter, J. P.: *The Science Based Optimization of Material Heating during Thermoforming Processes*, (Society of Plastics Engineers Hrsg.), Proceedings of the 61th SPE Annual Technical Conference, 2003.
- [Sch09] Schiffers, R.: *Verbesserung der Prozessfähigkeit beim Spritzgießen durch Nutzung von Prozessdaten und eine neuartige Schneckenhubführung*, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, 2009.
- [Sch93] Scholz, S.-P.: *Simulation von Tiefziehprozessen*, (Gesamtverbandes Kunststoffverarbeitende Industrie e. V. Hrsg.), Tagungsumdruck der GKV-Fachtagung Thermoformung, 1993.
- [Sch97] Schwarzmann, P.: *Thermoformen in der Praxis*, Hanser, 1997.
- [Sch06] Schwarzmann, P.: *Vorrichtung und Verfahren zum Aufheizen einer thermoplastischen Kunststofffolienbahn oder Platte*, DE102006045027B4, 2006.
- [Spi04] Spigatis, J.: *Untersuchung des Einflusses des instationären konvektiven Wärmeübergangs bei der Folienherstellung auf die Produktqualität*, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, 2004.
- [Sto11] Stock, S.: *Verpackung im Spagat*, *Kunststoffe*, 5/2011; S. 20–28.
- [Swe02] Sweeney, J.; Caton-Rose, P.; Coats, P.: *The Modeling of Large Deformations of Pre-Oriented Polyethylene*, (Society of Plastics Engineers Hrsg.), Proceedings of the 60th SPE Annual Technical Conference, 2002.
- [Tsh03] Tshai, K. Y. et al.: *Modeling of the Behavior of Semi-Crystalline Polypropylene at Elevated Strain Rate and Temperature*, (Society of Plastics Engineers Hrsg.), Proceedings of the 61th SPE Annual Technical Conference, 2003.
- [Wal99] Walter, A.: *Methoden des prozeßnahen Qualitätsmanagements in der Kunststoffverarbeitung*, Dissertation, Universität Essen, 1999.
- [Wei87] Weinand, D.: *Modellbildung zum Aufheizen und Verstrecken beim Thermoformen*, Dissertation, RWTH Aachen, 1987.

- [Win82] Winkel, E.: Einfluss der Verarbeitung auf Struktur und Eigenschaften von extrudiertem Polypropylen, Dissertation, RWTH Aachen, 1982.
- [You01] Yousefi, A.; Bendada, A.; DiRaddo, R.: Robust Simulation for the heating Stage in Thermoforming, (Society of Plastics Engineers Hrsg.), Proceedings of the 59th SPE Annual Technical Conference, 2001.

13.1 Unveröffentlichte studentische Arbeiten

- [Mai06] Maier, M.: Ermittlung der Einflussfaktoren beim Tiefziehen von Behältern aus thermoplastischer Kunststoffolie, Diplomarbeit, DHBW Mosbach, 2006.
- [Cla08] Clauss, W.: Ermittlung der Einflussfaktoren beim Tiefziehen von Behältern aus thermoplastischer Kunststoffolie bei kurzen Taktzeiten, Diplomarbeit, DHBW Mosbach, 2008.

13.2 Betreute studentische und eigene Arbeiten

- [Mos08] Moser, A.: Untersuchungen zur Machbarkeit einer prozessgeregelten Thermoformmaschine, Diplomarbeit, Fachhochschule Heilbronn, 2008.
- [Fis09] Fischer, J.: Verbesserung der Maschinenfähigkeit einer Walzenvorheizung von Thermoformautomaten, Diplomarbeit, Fachhochschule Heilbronn, 2009.
- [Klo09] Klock, R.: Analyse des Formvorgangs beim Thermoformen mit Rollenautomaten, Bachelorarbeit, DHBW Mosbach, 2009.
- [Wes09] Westenhöfer, F.: Umsetzung einer Halbzeugtemperaturmessung mittels IR-Messtechnik, Projektarbeit, DHBW Mosbach, 2009.
- [Loh10] Lohrey, M.: Modellierung der Einflüsse von Prozessparametern auf die Produkteigenschaften beim Thermoformen, Projektarbeit, DHBW Mosbach, 2010.
- [Sau11a] Sauer, L.: Verifizierung eines Modells zur Beschreibung der Einflüsse von Prozessparametern auf die Produkteigenschaften beim Thermoformen, Projektarbeit, DHBW Mosbach, 2011.
- [Sau11b] Sauer, L.: Entwicklung und Inbetriebnahme einer Temperaturregelung für Thermoformanlagen, Bachelorthesis, DHBW Mosbach, 2011.
- [Rai11] Raisch, A.: Prozessüberwachung einer Thermoformmaschine, Bachelorthesis, Fachhochschule Heilbronn, 2011.
- [Srd12] Schrade, P.: Untersuchung von voreilenden Vorstrecken auf die Eigenschaften thermogeformter Produkte, Projektarbeit, DHBW Mosbach, 2012.

14 Anhang

14.1 Aufbau einer Vorheizung und Modellbildung

Der Aufbau der verwendeten Vorheizung ist in Bild 103 dargestellt. Diese besitzt zwei Heizwalzen (2) und eine Konvektionsheizung (5). Die Folie wird mittels Umlenk- und Heizwalzen durch die Vorheizung geführt und erwärmt. Das Halbzeug wird primär von den Heizwalzen beheizt, die Konvektionsheizung stellt nur eine Temperierung der Luft dar, sodass ein Auskühlen der Folie nach dem Aufheizen vermieden wird.

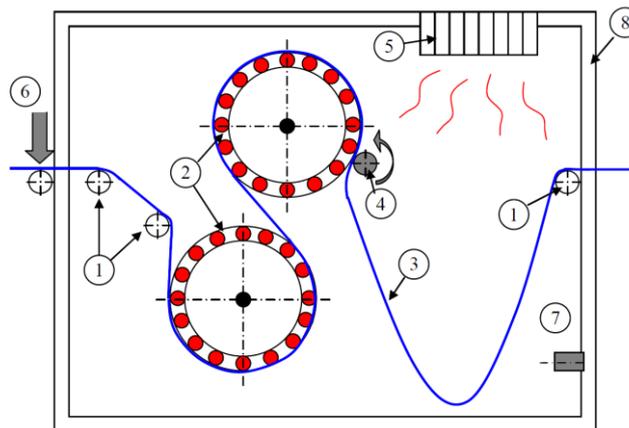


Bild 103: Aufbau der verwendeten Vorheizung, mit Umlenkrollen (1), elektrisch beheizten Heizwalzen (2), Folienbahn (3), Antriebswalze (4), Konvektionsheizung (5), Bremseinrichtung (6), Sensorik zur Regelung des Durchsatzes (7) und einem isolierten Gehäuse (8)

Die Vorheizung wird zwischen Folienabwicklung und Thermoformanlage positioniert. Dadurch, dass die Folie sich während des Aufheizens frei ausdehnen kann, wird ein zu großer Durchhang in der Formmaschine vermieden. Vor allem bei Polypropylen mit geringer Wärmeleitung, großer Wärmeausdehnung und großer Wärmekapazität werden Walzenvorheizungen eingesetzt. Dadurch sind kürzere Heizzeiten der Strahlerheizung möglich, bei einer gleichzeitigen homogeneren Erwärmung der Folie über die Foliendicke.

Um den Aufheizprozess berechnen zu können und damit die Effekte durch Simulation abbilden zu können, wird ein Wärmeübertragungsmodell erstellt. Bei der Erwärmung in der Vorheizung wurden Wärmeleitung, Wärmeübergang und Konvektion berücksichtigt. Abgebildet wurde dabei die Wärmeübertragung auf das Halbzeug durch Walzenkontakt und Konvektion sowie die Wärmeleitung im Inneren des Halbzeugs.

Die Differenzialgleichung der Wärmeleitung beschreibt den Transport der Wärmeenergie auf Basis der Temperaturgradienten in die drei Raumrichtungen. Über die thermische Kapazität wird dabei eine Temperaturänderung hervorgerufen. Da die Abmessungen des Halbzeugs in Dickenrichtung sehr viel kleiner sind als in Extrusionsrichtung oder quer dazu, kann ein eindimensionaler Wärmetransport in Dickenrichtung angenommen werden. Für ein finites Volumen $\Delta x \Delta y \Delta z$ ergibt sich nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik folgender Zusammenhang.

$$m \cdot c_P \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial \dot{q}}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (14-1)$$

Durch das fouriersche Gesetz ist der Zusammenhang zwischen Wärmestrom und Temperaturgradient beschrieben. Als Proportionalitätskonstante tritt die Wärmeleitfähigkeit λ des Materials auf.

$$\dot{q} = \lambda \cdot \nabla T \quad (14-2)$$

In Kombination mit dem ersten Hauptsatz ergibt sich die Differenzialgleichung für einen ein-dimensionalen Wärmetransport in x-Richtung.

$$\rho \cdot c_P \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\Delta x} \cdot \nabla T \quad (14-3)$$

Die Materialeigenschaften Wärmeleitfähigkeit, Dichte und Wärmekapazität lassen sich in einer Kenngröße der Temperaturleitfähigkeit a zusammenfassen.

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_P} \quad (14-4)$$

Um den Wärmeübergang berechnen zu können, sind Anfangs und Randbedingungen zu definieren. Als Anfangsbedingungen des Aufheizprozesses ist die Temperatur des Halbzeugs am Einlauf der Vorheizung definiert. Diese wird als konstant über die Halbzeugdicke angenommen. Als Randbedingungen werden konstante Temperaturen der Walzen und der umgebenden Luft angenommen, die über einen Wärmeübergang mit dem Halbzeug interagieren. Die Wärmestromdichte an den Randbedingungen ist durch das newtonsche Gesetz beschrieben.

$$\dot{q}_{kon} = \alpha \cdot (T_H - T_\infty) \quad (14-5)$$

Dabei sind T_H die Wandtemperatur des Halbzeugs und T_∞ die Temperatur des umgebenden Mediums. Die Höhe des Wärmestroms wird durch den Wärmeübergangskoeffizient α verknüpft.

Durch Überführung der Differenzialgleichung in Differenzengleichungen und Diskretisierung der Halbzeugdicken in n Schichten ergibt sich ein Gleichungssystem aus n Gleichungen.

$$\frac{T_{m,j} - T_{m,j-1}}{\Delta t} = a \cdot \frac{T_{m-1,j-1} - 2T_{m,j-1} + T_{m+1,j-1}}{\Delta x^2} \quad (14-6)$$

Für die Randschichten muss zusätzlich der Wärmeübergang berücksichtigt werden:

$$\frac{T_{m,j} - T_{m,j-1}}{\Delta t} = a \cdot \frac{T_{m-1,j-1} - T_{m,j-1}}{\Delta x^2} + \alpha \frac{T_\infty - T_{m,j-1}}{\Delta x} \quad (14-7)$$

Aus Literaturwerten wurden die spezifische Enthalpie, die Wärmeleitfähigkeit und das spezifische Volumen gewonnen. Kalibriert werden die Wärmeübergangskoeffizienten von den Walzen auf die Folie und von der Umgebungsluft auf die Folie.

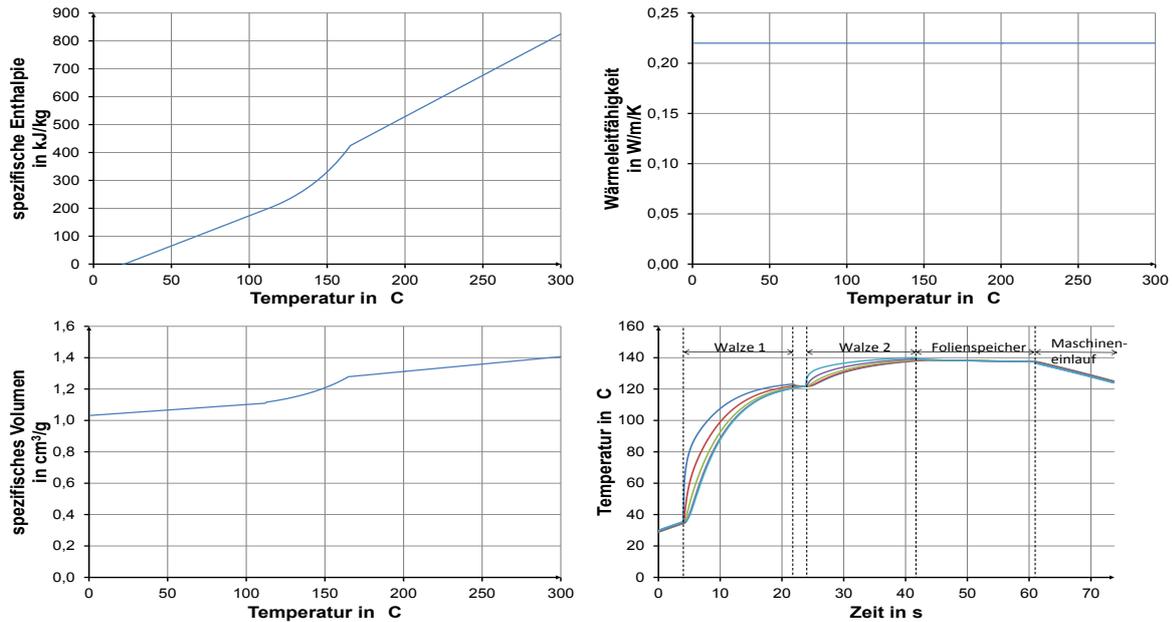


Bild 104: Materialkennwerte von Polypropylen und resultierendes Aufheizverhalten in einer Vorheizung

Zur Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten wurde eine Voruntersuchung durchgeführt. Dabei wurde ein Wärmeübergangskoeffizient von $\alpha = 13 \text{ W/m}^2\text{K}$ ermittelt. Dieser wird näherungsweise als konstant angenommen. Für den Wärmeübergangskoeffizienten von den Walzen auf die Folie wurden für einen Wert von $\alpha = 500 \text{ W/m}^2\text{K}$ gute Übereinstimmungen für verschiedene Halbzeuge und Betriebspunkte festgestellt (Bild 105).

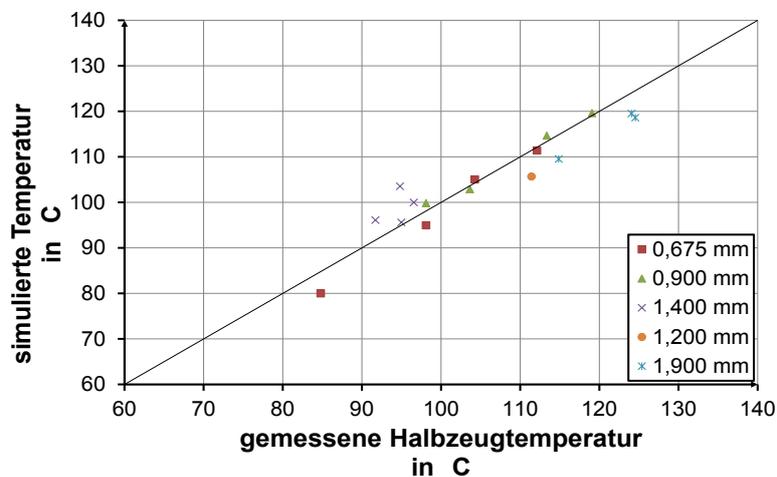


Bild 105: Vergleich zwischen simulierter und gemessener Temperatur am Maschineneinlauf der Formmaschine nach beheizen durch die Vorheizung.

Die Überprüfung der Materialparameter kann durch Betrachtung der benötigten Leistungen in Messung und Simulation erfolgen.

Tabelle 17: Vergleich der simulierten und gemessenen Leistungsdaten einer Vorheizung bei der Verarbeitung von PP der Dicke 1,9 mm

	Einlauf-temperatur in °C	Leistung W1 in kW	Leistung W2 in kW
Messung	118	14,0	6,5
Simulation	118	13,5	6,7

Neben den Temperaturen kann bei der dynamischen Betrachtung des Systems die übertragene Enthalpie oder der Leistungsbedarf der Walzen ermittelt werden. Dadurch ergeben sich klare Spezifikationsgrenzen für die maximale Dicke der Halbzeuge und die zugehörige Liniengeschwindigkeit (Bild 106).

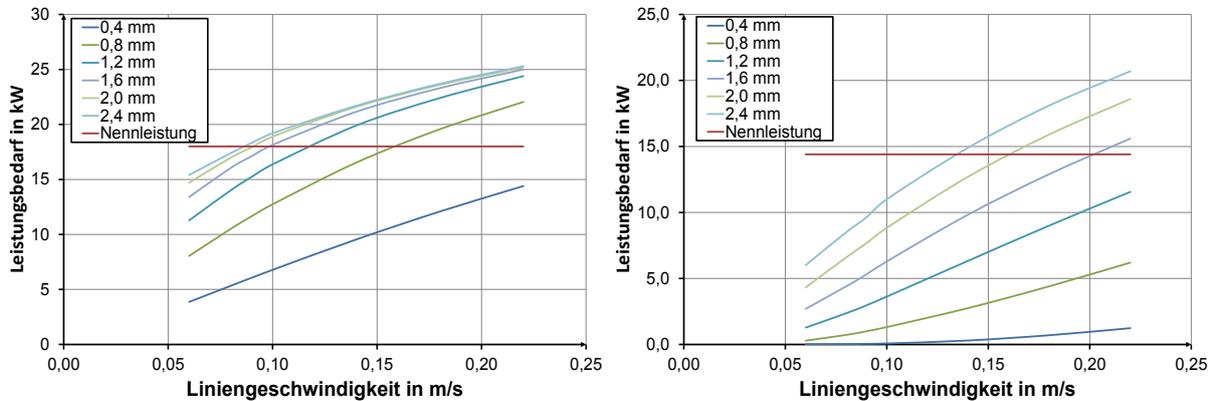


Bild 106: Leistungsbedarf der Vorheizwalzen 1 und 2; Nenntemperatur der Walzen $T = 140\text{ °C}$; Halbzeugbreite $b = 700\text{ mm}$; Halbzeug: Polypropylen

In den Diagrammen erkennt man deutlich, dass die Leistungsgrenzen der einzelnen Walzen bei unterschiedlichen Liniengeschwindigkeiten erreicht werden. Dies wird auch in der Praxis bestätigt, da zunächst die Temperatur der ersten Heizwalze einbricht. Durch optimierte Aufteilung der Heizleistungen könnten die Spezifikationsgrenzen erhöht werden. Dadurch kann eine höhere und homogenere Temperaturverteilung erreicht werden. Zudem kann die maximal erreichbare Temperatur des Halbzeugs am Auslauf der Vorheizung bestimmt werden (Bild 107).

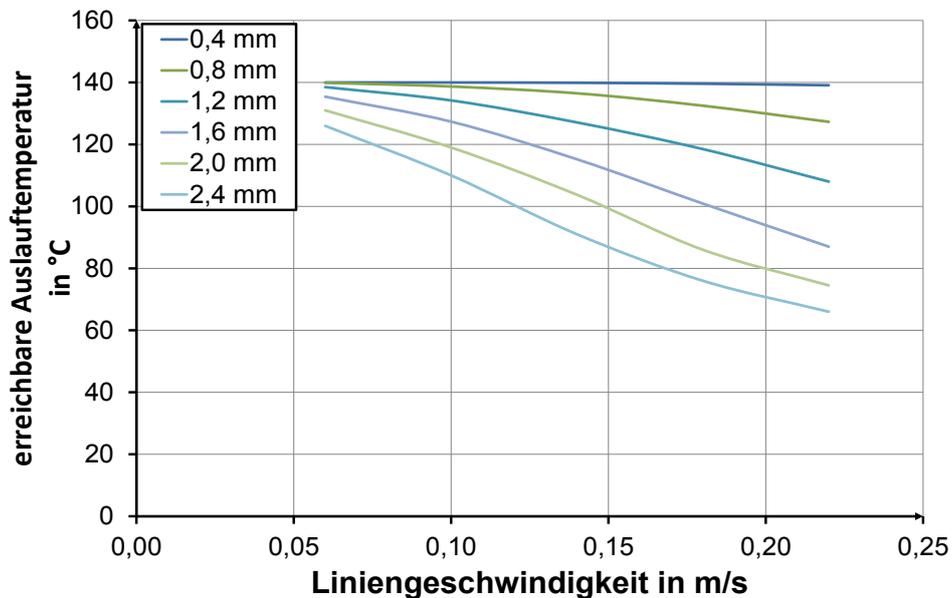


Bild 107: erreichbare Temperatur am Auslauf der Vorheizung bei vorgegebenem Halbzeug und gegebener Liniengeschwindigkeit (Polypropylen $b = 730\text{ mm}$)

14.2 Bewegungsablaufs von Unterwerkzeug und Vorstrecker

Die Referenzposition (Nullpunkt) des Hauptantriebs liegt in der Mitte des Übergabebereichs. Eine 360° Durchlauf der Kurve entspricht einem Zyklus. Die Kurve besitzt im Formbereich von $142,4^\circ$ bis $192,5^\circ$ und im Übergabebereich von 0 bis $64,5^\circ$ und $297,5^\circ$ bis 360° konstante Radien. Diese konstanten Radien lassen es zu, durch Variation der Geschwindigkeit in diesen Bereichen, die Formzeit und Übergabezeit zu variieren, ohne den Hauptantrieb stoppen zu müssen.

Jedem Bereich der mechanischen Kurvenscheibe wird eine konstante Geschwindigkeit vorgegeben, dadurch ergibt sich die Trajektorie für die Hauptantriebsposition wie in Bild 108 gezeigt. Die Berechnung der Geschwindigkeiten wird in der Steuerung übernommen. Die Trajektorie wird dem Umrichter übertragen. Die Position φ_F , an der das Werkzeug geschlossen ist, entspricht dabei dem Zeitpunkt t_F . Auf diesen Zeitpunkt werden alle Bewegungsabläufe während des Formprozesses referenziert.

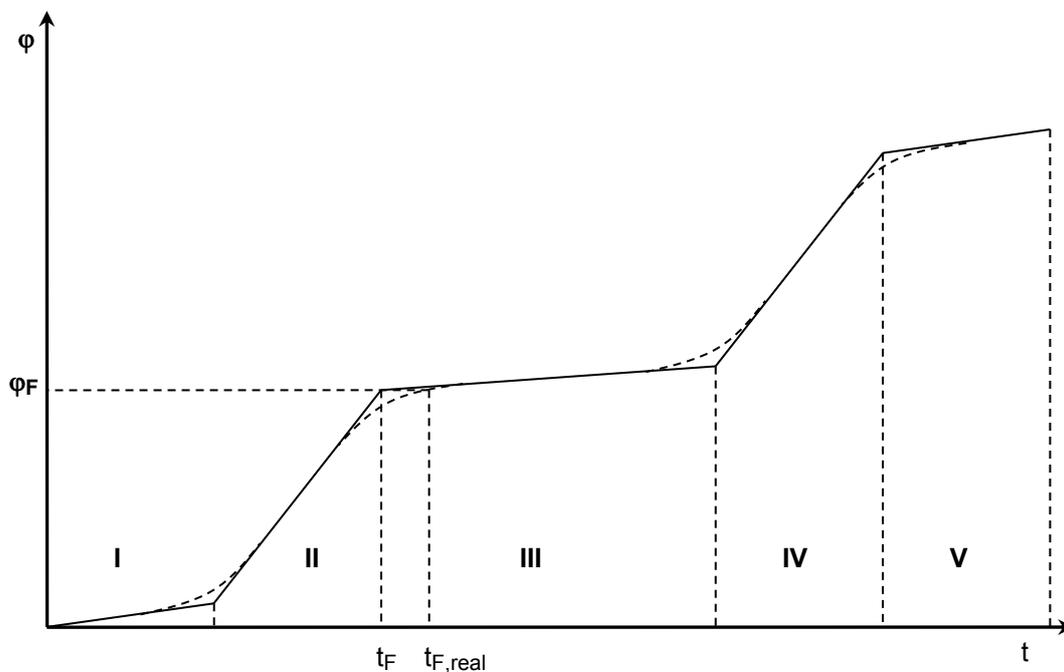


Bild 108: Sollwertvorgabe des Hauptantriebs in den verschiedenen Prozessabschnitten

Da sich in der Geschwindigkeitstrajektorie, an den Übergängen der Bereiche, Unstetigkeiten befinden, interpoliert hier der Umrichter, sodass ein stetiges Geschwindigkeitsprofil entsteht (Bild 108; gestrichelt). Dadurch verschiebt sich der Zeitpunkt, an dem das Werkzeug geschlossen ist um einen Zeitraum $\Delta t = t_{F,real} - t_F$. Die Referenz t_F bleibt allerdings erhalten. Dadurch stimmt der tatsächliche Prozessablauf nicht mit dem Projektierten überein. Die Zeitpunkte der Schritte des Formprozesses erfolgen dadurch zu früh. Die Abweichung kann einen Bereich von $0^\circ < \Delta t < 10^\circ$ umfassen. Sie ist abhängig von der eingestellten Formzeit und nimmt bei kürzeren Formzeiten ab.

Um diese Abweichung zu beheben, wurde die Geschwindigkeitsvorgabe dahin gehend geändert, dass die Interpolation erst ab dem Zeitpunkt t_F einsetzt. Dadurch entspricht die Schließ-

bewegung der Projektierung und die Verzögerung des Hauptantriebs liegt im Bereich konstantem Radius, sodass keine Bewegung stattfindet (Bild 19).

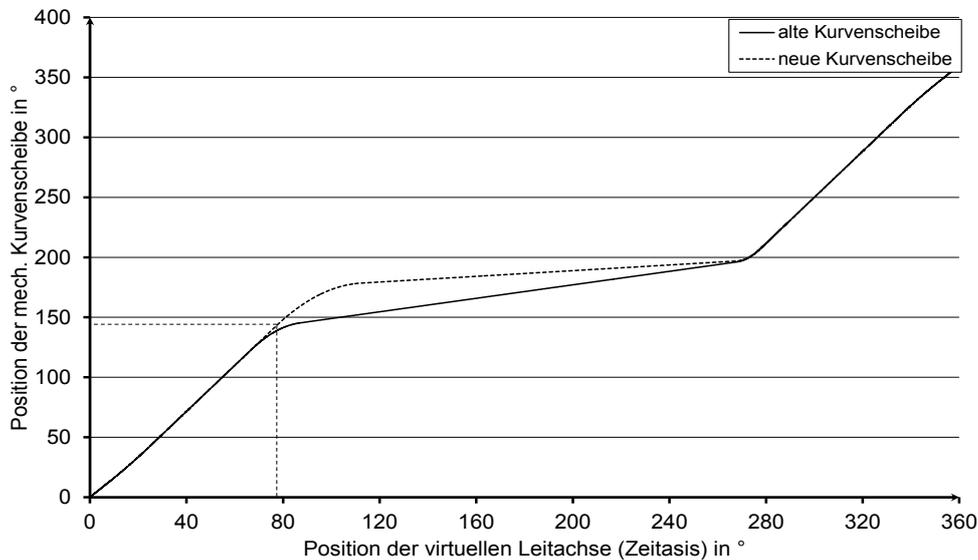


Bild 109: Neue und alte Sollpositionsvorgabe für den Hauptantrieb (el. Kurvenscheibe)

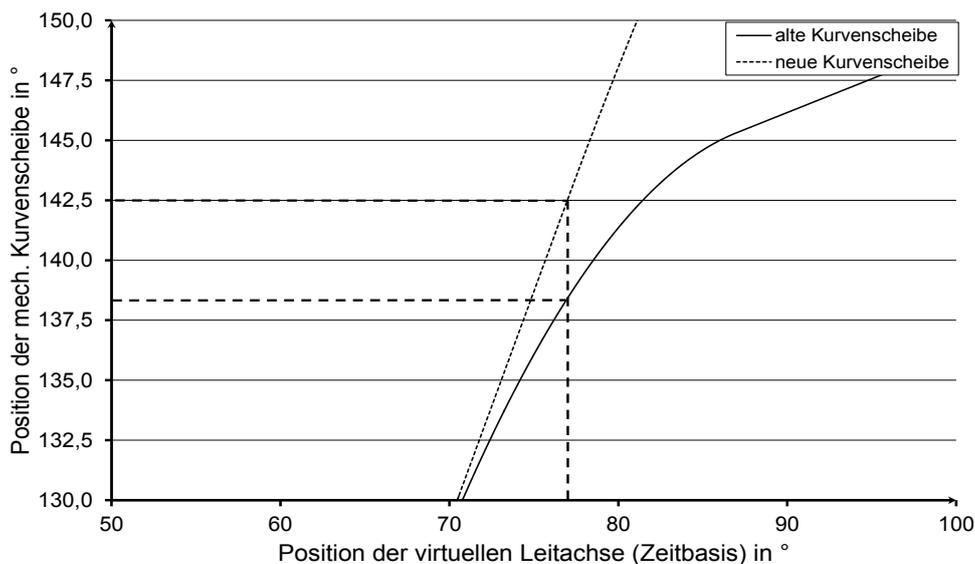


Bild 110: Neue und alte Sollpositionsvorgabe für den Hauptantrieb (el. Kurvenscheibe)

Neben der fehlerhaften Sollwertvorgabe wurde festgestellt, dass der Schleppabstand des Hauptantriebs sehr groß wird. In Bild 111 ist die Soll- und Istposition sowie der Schleppabstand der mechanischen Kurvenscheibe dargestellt. Der Zeitpunkt Start Formen wurde als Trigger der Messung verwendet und liegt bei 0 ms. Die Zykluszeit der Messung betrug 2 s. Man erkennt, dass der Hauptantrieb bei der Schließ- und Öffnungsbewegung einen Schleppabstand von 14° besitzt. Dieser wird durch die kleinere Sollzahl im Formbereich (ca. 0 ms – 1250 ms) auf ca. 2° reduziert. Zu beachten ist hierbei, dass der Schleppabstand im Formbereich mit Reduzierung der Zykluszeit zunimmt.

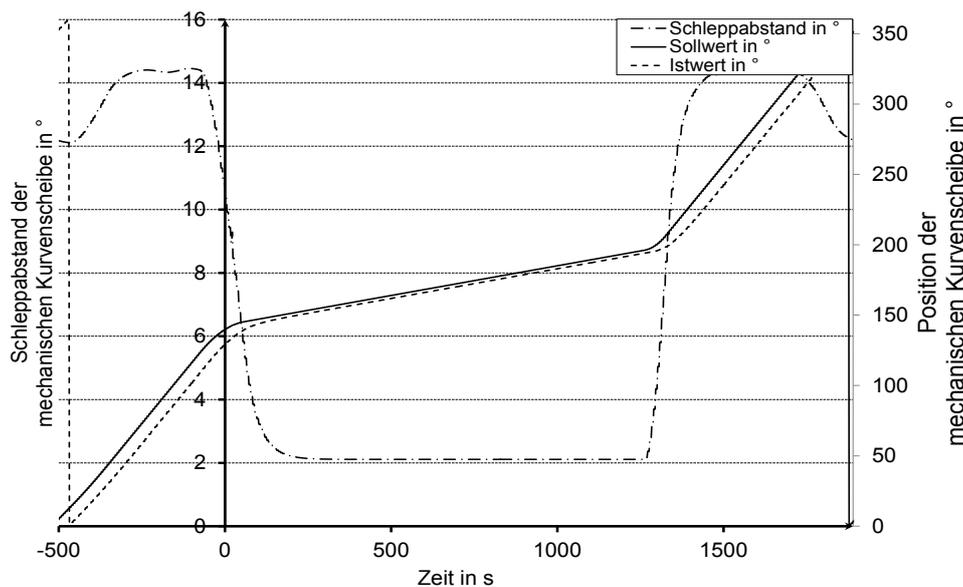


Bild 111: Schleppabstand des Hauptantriebs über einen Zyklus

Da die Mechanik darauf ausgelegt ist, die projektierte Kurvenscheibe abzufahren und der Servomotor noch Reserven aufweist, ist es möglich, die Regelparameter des Servomotors des Werkzeugantriebs zu optimieren. Durch Erhöhung der Vorsteuerung von 20 % auf 100 % kann der Schleppabstand um 83 % oder $6,5^\circ$ reduziert werden. Dadurch wird der Resthub des Unterwerkzeugs zum Zeitpunkt Start Formen von 1,3 mm auf unter 0,01 mm gesenkt.

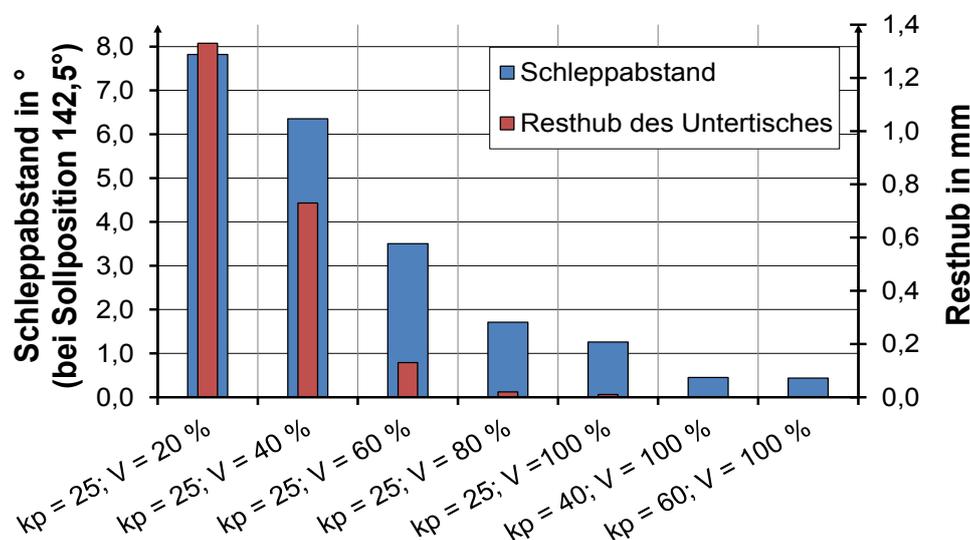


Bild 112: Abhängigkeit des Schleppabstands und des Resthubs bei Sollposition Werkzeug geschlossen

Neben dem Hauptantrieb, der die Bewegung des Werkzeugs definiert, ist bei Thermoformen der Vorstrecker von zentraler Bedeutung. Da die Eigenschaften der Halbzeuge sowohl Temperatur als auch zeitabhängig sind, ist es für einen robusten Prozess notwendig, dass der Vorstrecker einen von der Belastung unabhängigen reproduzierbaren Ablauf besitzt. Die Ansteuerung wurde ebenfalls überarbeitet, da die Visualisierung dem Bediener falsche Informationen über das Bewegungsprofil lieferte. Zudem sind die Reglerparameter optimiert worden, um den Schleppabstand zu minimieren.

14.3 Ermittelte Ventilschaltzeiten

Neben den servomotorischen Achsen in der Maschine werden pneumatische Aktoren und Prozessdrücke in der Werkzeugtechnik eingesetzt. Diese Aktoren besitzen eine Totzeit zwischen dem Schaltsignal der Maschinensteuerung und dem erwünschten Druckaufbau. Der Niederhalter ist ein pneumatisch angetriebenes Klemmsystem, das für die feste Einspannung des zu verformenden Halbzeugausschnitts sorgt. Durch das Verklemmen erfolgt zudem die Kalibrierung des Randbereichs auf ein bestimmtes Maß. Der Niederhalter stellt auch die Kühlung des Randbereichs des Formteils sicher. Das zweite pneumatische System des Werkzeugs ist der Formdruck zur Ausformung der Formteile. Dieser erfüllt wie der Niederhalter mehrere Funktionen. Der vorverstreckte Ausschnitt der Folie wird an die Negativform angelegt, sodass das Formteil seine projektierte Kontur erhält. Des Weiteren gewährleistet der Formdruck einen guten Wärmeübergang zwischen Formteil und Formeinsatz. Die genaue Kenntnis des Druckaufbaus und der Ventilschaltzeiten ist notwendig um die Einflussparameteranalyse physikalisch korrekt durchzuführen. Dies ist darin begründet, dass Klemmung des Halbzeugs und Ausformung im Zusammenspiel mit dem mechanischen Verstrecken direkt die Wanddickenverteilung des Formteils mitbestimmen (siehe Kapitel 6.2). Thermoformwerkzeuge können je nach Kundenanforderung unterschiedliche Formluftversorgungen und die Niederhalterausführungen besitzen. Der Niederhalter kann einstufig oder zweistufig und mit oder ohne mechanische Vorspannung ausgeführt werden. In Bild 113 (links) ist ein Werkzeug mit zweistufiger Niederhalterausführung dargestellt. Die erste Druckstufe ist bis 0,4 s und ab 1,8 s wirksam, dazwischen wird auf die zweite Druckstufe geschaltet. In Bild 113 (re.) ist ein Werkzeug mit einstufiger Niederhalterausführung und Formluftventilen an der Maschine dargestellt. Zudem besitzt das links dargestellte Werkzeug formluftreduzierte Kavitäten, im rechten erreicht die Formluft durch das große Füllvolumen keinen stationären Endwert.

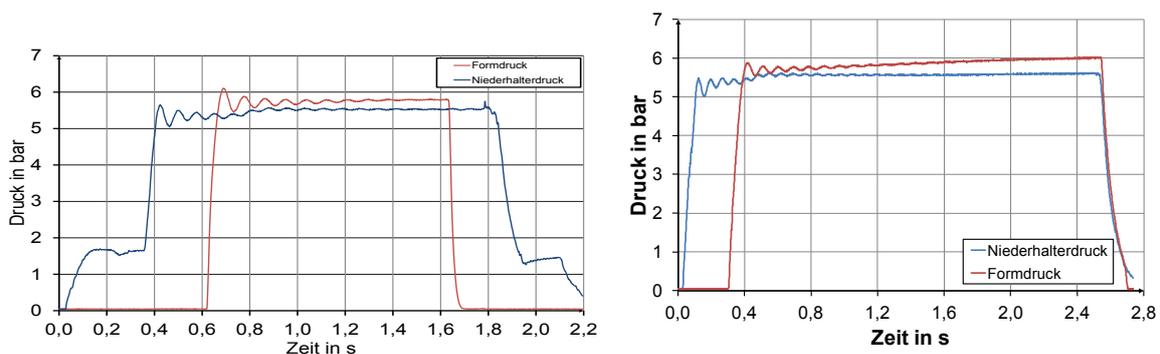


Bild 113: Druckverläufe von Form- und Niederhalterdruck über einen Zyklus. Zweistufiger Niederhalter (li.) und einstufiger Niederhalter (re.). Formluftventile am Werkzeug (links) und maschinenseitige Formluftventile (rechts)

Die Formluftversorgung ist immer einstufig aufgebaut, allerdings können die Formluftventile unterschiedlich ausgeführt sein. Die Formluftventile können maschinen- oder werkzeugseitig und in einer High End Variante direkt in den Vorstreckerstangen des Werkzeugs implementiert sein. Die Ausführungen unterscheiden sich dabei primär in zu füllenden Werkzeugvolumen und Versorgungswegen, nach dem Ventil und damit in den Schalt- und Druckaufbauzeiten.

In Tabelle 18 sind ermittelte Ventilschaltzeiten und Druck Auf- und Abbauzeiten eines Werkzeugs mit Formluftventilen seitlich am Werkzeug und einer zweistufigen Niederhalterausführung gelistet. Das Formdruckventil besitzt eine Reaktionszeit von 53 ms beziehungsweise 45 ms. Diese Schaltzeit deckt sich mit Erfahrungen von Maschinenbedienern, die das Schaltsignal des Formdruckeinsatzzeitpunkts in die Verstreckbewegung des Vorstreckers legen. Dadurch wird erreicht, dass die Ausformung des Produktes nahtlos an das mechanische Verstrecken anschließt. Die Druckaufbauzeit ist, mit 67 ms, 15 ms schneller als die Abbauzeit des Formdrucks.

Tabelle 18: Ermittelte Ventilschaltzeiten

Prozessgröße		Schaltzeit des Ventils in ms	Druckaufbauzeit in ms
Formdruck	ein	53	67
	aus	45	82
Niederhalterhauptdruck	ein	27	61
	aus	35 - 50	118 - 143

Jedes Werkzeug je nach Ausführung der pneumatischen Verschaltung und Füllvolumina besitzt ein anderes pneumatisches Verhalten. Durch Wahl einer komplexeren Formluftansteuerung kann die Schaltzeit um 50 ms und die Druckaufbauzeit um 40 ms reduziert werden (Tabelle 19). Die Verkürzung der Druckaufbauzeit führt direkt zu einer Verkürzung der Taktzeit. Die Schaltzeit kann bei Einstellung des Prozessablaufs berücksichtigt werden, falls Sie reproduzierbar ist.

Tabelle 19: Druckaufbauzeiten abhängig von der Formluftversorgungstechnik

Werkzeug	Formluftventil	Schaltzeit	Druckaufbauzeit
18fach Becher	maschinenseitig	80	108
24fach Becher	Ventile seitlich am Werkzeug	57	64
8fach Becher	Ventile in Vorstreckerstange	27	65

Die Reproduzierbarkeit ist insbesondere bei Werkzeugen mit Ventilen an der Maschine nicht gegeben, da dieses System große Streuungen im Bereich des Druckaufbaus besitzt (Bild 114). Dies kann bei entsprechender Maschineneinstellung dazu führen, dass der Druckaufbauzeitpunkt, in das mechanische Verstrecken fällt und dadurch im Formteil Abweichungen in der Formteilqualität entstehen.

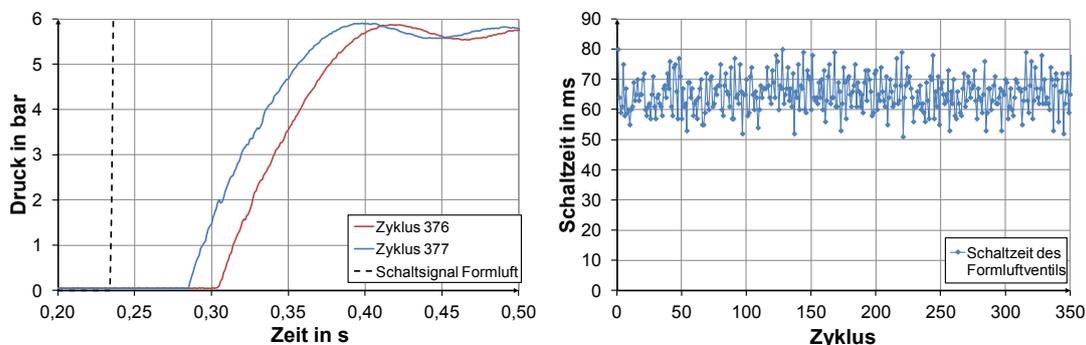


Bild 114: Streuungen der Schaltzeiten eines Formluftventils in einer Formmaschine

14.4 Versuchsplan zur Bestimmung von Beschleunigungs- und Reibungseinflüssen

Tabelle 20: Versuchsplan zur Bestimmung von Beschleunigungs- und Reibungseinflüssen

Nr.	max. Geschwindigkeit in m/s	Ziehtiefe in mm
1	1,15	96,00
2	1,00	96,00
3	0,85	96,00
4	0,70	96,00
5	0,55	96,00
6	0,40	96,00
7	1,15	80,00
8	1,00	80,00
9	0,85	80,00
10	0,70	80,00
11	0,55	80,00
12	0,40	80,00
13	1,15	60,00
14	1,00	60,00
15	0,85	60,00
16	0,70	60,00
17	0,55	60,00
18	0,40	60,00

14.5 Lineare Regressionskoeffizienten zwischen Temperaturen und Formteileigenschaften

Tabelle 21: Lineare Regressionskoeffizienten zwischen Temperaturen und Formteileigenschaften

	Einlauf in °C	Auslauf in °C	Stauchdruck in N	Steifigkeit in N/mm	Becherhöhe in mm	Masse in g
Einlauf in °C	1,00					
Auslauf in °C	0,98	1,00				
Stauchdruck in N	-0,18	-0,13	1,00			
Steifigkeit in N/mm	0,97	0,96	-0,19	1,00		
Becherhöhe in mm	0,92	0,93	0,16	0,90	1,00	
Gewicht in g	-0,89	-0,90	0,17	-0,86	-0,83	1,00

14.6 Daten der verwendeten Polypropylene

Tabelle 22: Daten der verwendeten Polypropylene

Rohstoffbezeichnung			PPH 4022	PPH 4026	PPC 4660
Rheological properties					
Melt Flow Index 230°C/2.16 kg	ISO 1133	g/10 min	3	3	3,5
Mechanical properties					
Tensile Strength at Yield	ISO 527-2	MPa	37	39	25
Elongation at Yield	ISO 527-2	%	9	9	7
Tensile modulus	ISO 527-2	MPa	1800	2050	1300
Flexural modulus	ISO 178	MPa	1700	2000	1200
Izod Impact Strength (notched) at 23°C	ISO 180	kJ/m ²	5	5	18
Charpy Impact Strength (notched) at 23°C	ISO 179	kJ/m ²	6	6	20
Hardness Rockwell - R-scale	ISO 2039-2		95	95	82
Thermal properties					
Melting Point	ISO 3146	°C	165	165	165
Vicat Softening Point	ISO 306				
50N-50°C per hour		°C	93	97	70
10N-50°C per hour		°C	153	153	147
Heat Deflection Temperature	ISO 752				
1.80 MPa - 120°C per hour		°C	57	60	50
0.45 MPa - 120°C per hour		°C	105	110	92
Other physical properties					
Density	ISO 1183	g/cm ³	0.905	0.905	0.905
Bulk Density	ISO 1183	g/cm ³	0.525	0.525	0.525

15 Lebenslauf

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.