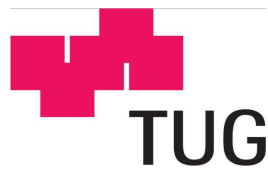


# Prozessdatenanalyse und Modellbildung für den Herstellprozess von Folien an einer Blasfolienextrusionsanlage



Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik an der Technischen Universität Graz

Masterarbeit

vorgelegt von

Peter Ebelsberger

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Hofbaur

September 2012

## Abstract

This thesis deals with strategies for determining optimal system parameters during the production process of films on a blown film extrusion line, followed by stretching. The rise in customer demands has forced the manufacturers of semi-finished products to increase the quality of their supply chain as well. A set of adjustment parameters will be determined based on statistical methods. In addition, further considerations have been made to sustainably improve the quality of the underlying data. The methods presented in this paper are not only limited to this production process, they can also, in part, be applied generally. These methods were developed according to the strategy of error minimization in the processing of individual sections. Due to the complexity of this work, it will be divided into single local subject areas and suggestions for individual solutions will be presented. Among other things the question of how to handle incomplete, poorly-scaled data will be addressed, in order to be able to reach a conclusion concerning quality parameters. Starting from theoretical possibilities one can approach conditions which enable one to achieve the objective.

The analysis of different system components leads to the creation of the input fields of polymer chemistry in the production of polymer materials, Starting from procedural peculiarities of the system itself, for example through analyses of humidity and air temperature as a parameter influencing thermodynamic properties, through to the engine cooling air through structural measures to improve the individual system components. This includes compressive loads of pressure rollers as well as air speeds and air pressures. Furthermore topics such as friction and cooling processes are considered, which examine, inter alia, the stick-slip effect.

## Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit Strategien zur Ermittlung optimaler Anlagenparameter beim Herstellungsprozess von Folien an einer Blasfolienextrusionsanlage mit anschließender Verstreckung.

Steigende Kundenansprüche zwingen die Hersteller von Halbfertigprodukten die Qualität der eigenen Prozesskette ebenfalls anzuheben. Es wird daher auf Basis statistischer Methoden ein Datensatz von möglichen Einstellparametern ermittelt. Zusätzlich werden weitere Überlegungen angestellt, die Qualität der zugrunde liegenden Daten nachhaltig zu verbessern. Die in dieser Arbeit dargestellten Methoden sind nicht allein auf diesen Produktionsprozess beschränkt, sondern können teilweise allgemein angewandt werden. Sie wurden durch die Strategie der Fehlerminimierung einzelner Prozessabschnitte erarbeitet.

Aufgrund des Komplexitätsgrades wird die Arbeit in einzelne logische Themenbereiche unterteilt und Lösungsvorschläge präsentiert. So wird unter anderem die Frage beantwortet, wie mit unvollständigen, schlecht skalierten Daten umgegangen werden kann, um letztendlich doch eine Aussage hinsichtlich Qualitätsparameter treffen zu können. Ausgehend von den theoretischen Möglichkeiten nähert man sich an die Gegebenheiten heran, um so die Zielsetzung zu erreichen.

Die ausschnittsweise Betrachtung unterschiedlicher Anlagenkomponenten führt am Produktionseingang von Bereichen der Polymerchemie bei der Herstellung von Polymerstoffen über verfahrenstechnische Eigenheiten der Anlage selbst durch Analysen wie beispielsweise Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur als Einflussgröße auf thermodynamische Eigenschaften der Kühlluft über maschinebauliche Maßnahmen zur Verbesserung einzelner Anlagenkomponenten. Darunter fallen auch Druckbelastungen von Walzen und Luftgeschwindigkeiten und Luftdrücke. Weiters werden Reibungsthemen und Abkühlvorgänge betrachtet, die unter anderem den Stick-Slip-Effekt betrachtet.

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich unterstützt und zum Gelingen dieser Arbeit maßgeblich beigetragen haben.

Ganz besonders danken möchte ich meinem Betreuer Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Hofbaur. In schwierigen Situationen hat er mich sowohl fachlich auch als menschlich besonders unterstützt und mir wertvolle Tipps und Anregungen gegeben.

Weiters gilt mein Dank dem Unternehmen Lenzing Plastics GmbH. Sie hat mir die Möglichkeit gegeben in der Industrie einen besseren Blick für die Probleme in der Praxis zu erhalten. Besonders bedanke ich mich bei Herrn DI Johannes Heitger für seine Betreuung und Auswahl der Themenbereiche innerhalb der Diplomarbeit, als auch hinsichtlich seiner koordinativen Arbeit bei der Schnittstelle zwischen Universität und Privatwirtschaft. Zusätzlich bedanke ich mich bei Mag. Alexander Grafinger, der mir als Prozesstechnologe viele Einblicke in das Innenleben des Produktionsprozesses gewährt hat und dessen Gespräche mir beim Verständnis der Anlage eine enorme Hilfe gewesen sind.

Ein riesiges Dankeschön gilt selbstverständlich meinen Eltern, die mich in allen Dingen und Phasen des Lebens vollumfänglich unterstützt und mir auch den Weg des Studiums ermöglicht haben.

Weiters bedanke ich mich bei Familie Frauenhoffer, die mich in schwierigen Zeiten motiviert und mir Kraft und Zuversicht gegeben haben. Meinen Freunden verdanke ich eine unvergessliche Studienzeit voller wertvoller Erfahrungen, die ich nicht missen möchte und mein Leben in Graz enorm bereichert haben.

Graz, 2012

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Historisches und Entwicklung . . . . .	1
1.2	Erklärung des Produktionsprozesses . . . . .	2
1.3	Spezielle Adaption der untersuchten Anlage . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Theorie und Vorgangsweise</b>	<b>6</b>
2.1	Grundlegende Begriffe . . . . .	6
2.2	Vorgangsweise zur Ermittlung von Anlagenparameter . . . . .	10
2.3	Theoretische Modellbildung (white-box) . . . . .	13
2.3.1	Massenbilanzgleichungen für Kontrollräume . . . . .	13
2.3.2	Prozess mit Energieströmen . . . . .	15
2.4	Experimentelle Modellbildung (bright grey-box) . . . . .	15
2.4.1	Frequenzgangmessung . . . . .	16
2.4.2	Fourieranalyse . . . . .	17
2.4.3	Korrelationsanalyse . . . . .	17
2.4.4	Parameterschätzung . . . . .	18
2.4.5	Kennwertermittlung . . . . .	19
2.5	Experimentelle Modellbildung (black-box) . . . . .	19
2.5.1	Künstliche Neuronale Netze . . . . .	19
2.6	Statistisches Eingangs/Ausgangs Verhalten . . . . .	21
2.6.1	Statistische Korrelationsanalyse . . . . .	21
2.6.2	Faktoren und Hauptkomponentenanalyse . . . . .	22
2.6.3	Normalverteilung . . . . .	26
2.7	Kurzzusammenfassung Theorie . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Ermittlung vorhandener Information</b>	<b>30</b>
3.1	Produktbezogene Informationen . . . . .	30

3.1.1	Produkt . . . . .	30
3.1.2	Produktparameter . . . . .	30
3.2	Rohstoffbezogene Informationen . . . . .	33
3.2.1	Rohstoff . . . . .	33
3.2.2	Polymerisation . . . . .	33
3.2.3	Rohstoffbetrachtungen hinsichtlich Verarbeitbarkeit . . . . .	35
3.2.4	Rohstoffparameter . . . . .	35
3.2.5	Rohstoffadditive . . . . .	39
3.2.6	Rohstoffverfolgbarkeit . . . . .	41
3.3	Anlagenbeschreibung . . . . .	42
3.3.1	Förderung und Dosierung . . . . .	44
3.3.2	Extrusion . . . . .	45
3.3.3	Werkzeug . . . . .	53
3.3.4	Kalibrierkorb . . . . .	55
3.3.5	Wendestangenabzug . . . . .	60
3.3.6	Reckwerk . . . . .	63
3.3.7	Nachbearbeitung . . . . .	65
3.3.8	Regranulierung . . . . .	67
3.3.9	Wicklung . . . . .	68
3.4	Umgebungsbedingungen . . . . .	69
3.4.1	Luftfeuchtigkeit und Temperatur . . . . .	69
3.4.2	Reglerinformationen . . . . .	70
3.4.3	Dokumentation . . . . .	70
3.4.4	Messsysteme . . . . .	71
3.4.5	Messdaten . . . . .	72
3.4.6	Versuche . . . . .	73
3.5	Kurzzusammenfassung und Methodenwahl . . . . .	73
<b>4</b>	<b>Modellbildung</b>	<b>75</b>
4.1	Modellbildung - Extrusion . . . . .	75
4.2	Kurzzusammenfassung Modellbildung . . . . .	77
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>79</b>
5.1	Datenstrukturanalyse . . . . .	79
5.2	Analyse auf Verteilung . . . . .	81

5.2.1	Rohstoff Typ A . . . . .	81
5.2.2	Rohstoff Typ B . . . . .	86
5.2.3	Rohstoff Typ C . . . . .	87
5.2.4	Rohstoff gesamt . . . . .	91
5.3	Analyse des Informationsgehalts . . . . .	97
5.3.1	Produkt . . . . .	97
5.3.2	Rohstoff . . . . .	99
5.4	Analyse auf Produkt-Rohstoff-Korrelationen . . . . .	100
5.5	Analyse auf Produktionsprozessauffälligkeiten . . . . .	104
5.6	Analyse der Prozesspartitionierung . . . . .	105
5.6.1	Informationsgehalt Rohstoff und Rohstoffäquivalent . . . . .	105
5.6.2	Informationsgehalt Produkt und Produktäquivalent . . . . .	107
5.7	Überprüfung weiterer Hypothesen . . . . .	108
5.7.1	Wasserdampfdurchlässigkeit . . . . .	108
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>110</b>
<b>7</b>	<b>Empfehlungen für weitere Maßnahmen</b>	<b>113</b>
7.1	Fehlerfortpflanzung . . . . .	113
7.2	Wareneingangskontrolle . . . . .	115
7.3	Datensätze je Oktabin ermitteln . . . . .	115
7.4	Aufzeichnungen der eingesetzten Oktabins . . . . .	116
7.5	Aufzeichnung Anlageneinstellungen . . . . .	117
7.6	Aufzeichnungen der Umgebungsbedingungen . . . . .	117
7.7	Online-WDD Messung . . . . .	117
7.8	Dickenmessung der Rohfolie . . . . .	119
7.9	Neuronale Netze als Datensammler . . . . .	119
7.10	Kühlluftaufbereitung . . . . .	120
7.10.1	Wärmeübertragung durch erzwungene Konvektion . . . . .	123
7.11	Walzendurchmesser erhöhen . . . . .	130
7.12	Stick-Slip Effekt . . . . .	131
7.13	Luftzufuhr in Walze N abdrehen . . . . .	132
7.14	Wärmezufuhr zwischen Abzug und Reckwerk . . . . .	135
7.15	Weitere Analysemöglichkeiten . . . . .	137
7.15.1	Prozessanalyse auf Basis dimensionslosen Kennzahlen . . . . .	137

7.15.2 CFD Berechnungen einzelner Prozessschritte . . . . .	138
7.15.3 Empfehlung für weitere Hypothesentests . . . . .	138
7.16 Zusammenfassung der Empfehlungen . . . . .	140
<b>8 Verwendete Software</b>	<b>141</b>
<b>9 Zusammenfassung</b>	<b>142</b>
<b>EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG</b>	<b>144</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>145</b>
<b>Normen und Prüfanweisungen</b>	<b>152</b>
<b>Anlagendokumentationen</b>	<b>155</b>
<b>A Anhang</b>	<b>i</b>
A.1 Kreidebeschreibung . . . . .	i
A.2 Werksprüfzeugnis . . . . .	ii
A.3 Historische Entwicklungen in der Rheologie . . . . .	iii
A.4 Fehlerkorrektur . . . . .	iv
A.5 Mathematik . . . . .	iv
A.6 Exemplarische Berechnungen des Winkels zwischen zwei Walzen . . . . .	v



# Abkürzungsverzeichnis

CFD .....	Computational Fluid Dynamics
CSV .....	Comma-Separated Values
ESS .....	Spezielle Hilfswalze bei Hauptwalze 5
FDM .....	Finite-Differenzen-Methode
FEM .....	Finite-Elemente-Methode
FVM .....	Finite-Volumen-Methode
HDPE .....	High Density Polyethylen
KNN .....	Künstliche Neuronale Netze
MFI .....	Melt Flow Index
MFR .....	Melt mass-flow Rate
NIP .....	Non Impact Printing
OSS .....	Spezielle Hilfswalze bei Hauptwalze 6
PCA .....	Principial Component Analysis
PID .....	Proportional-Integral-Differential
PPC .....	Polypropylen Compound
RFID .....	radio-frequency identification
SVM .....	Support Vector Machine
WDD .....	Wasserdampfdiffusionsfähigkeit

# Symbolverzeichnis

## Lateinische Buchstaben

$c_p$	$\left[\frac{kJ}{kgK}\right]$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
$c_v$	$\left[\frac{kJ}{kgK}\right]$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen
$T$	$[K]$	absolute Temperatur
$\vartheta$	$[^{\circ}C]$	Temperatur
$t$	$[s]$	Zeit
$u$	$[-]$	Stellsignale
$d$	$[-]$	Störsignale
$f$	$[-]$	Fehler
$y$	$[-]$	messbare Signale
$x$	$[-]$	Zustandsgrößen
$\vec{v}$	$\left[\frac{cm}{s}\right]$	Geschwindigkeitsvektor
$p^*$	$[bar]$	Kohäsionsdruck
$b^*$	$[pm^3]$	Eigenvolumen des Makromoleküls
$p$	$[bar]$	Druck
$\vec{g}$	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Gravitationsfeld
$W$	$\left[\frac{g}{mol}\right]$	Molmasse eines Monomerbausteins, Spencer-Gilmore-Gleichung
$R$	$\left[\frac{J}{molK}\right]$	universelle Gaskonstante
$I_1$	$\left[\frac{1}{s}\right]$	1. Invariante des Deformationsgeschwindigkeitssensors
$I_2$	$\left[\frac{1}{s^2}\right]$	2. Invariante des Deformationsgeschwindigkeitssensors
$I_3$	$\left[\frac{1}{s^3}\right]$	3. Invariante des Deformationsgeschwindigkeitssensors
$2\underline{D}$	$\left[\frac{1}{s}\right]$	Deformationsgeschwindigkeitssensor
$2\underline{D}^*$	$\left[\frac{1}{s}\right]$	Deviator des Deformationsgeschwindigkeitssensor
$F$	$[N]$	Kraft
$r$	$[-]$	Korrelationskoeffizient
$H_0$	$[-]$	Nullhypothese
$H_a$	$[-]$	Alternativhypothese
$A_{stat}$		statistischer Parameter
$A$	$[m^2]$	Fläche
$n$	$[-]$	Anzahl

m	[kg]	Masse
r	[-]	Korrelationskoeffizient
r <sub>s</sub>	[-]	Rangkorrelationskoeffizient
p <sub>sig</sub>	[-]	berechnete Signifikanz
z <sub>f</sub>	[mm]	Frostlinie
P <sub>t</sub>	[W]	Leistung
f(t)	[-]	Potentialdifferenzgröße
e(t)	[-]	Stromgröße
G <sub>i,ω<sub>v</sub></sub>	[-]	Übertragungsfunktion
v	[-]	diskrete Eingangsgröße
w	[-]	diskrete Ausgangsgröße
u <sub>I</sub>	[-]	kontinuierliche Koppelingangsgröße
v <sub>Q</sub>	[-]	diskrete Koppelingangsgröße
$\dot{E}$	[W]	allgemein für Energie
$\dot{Q}$	$[\frac{kJ}{s}]$	Wärmestrom
$\hat{y}$	[-]	Modellausgangsgröße
$\vec{u}$	[-]	Vektorschreibweise Eingangsgröße
$\vec{v}$	[-]	Vektorschreibweise Ausgangsgröße
$\bar{x}$	[-]	arithmetisches Mittel in der Statistik der X-Koordinate
$\bar{y}$	[-]	arithmetisches Mittel in der Statistik der Y-Koordinate
S	[-]	Hilfsvariable beim Normalverteilungstest
F <sub>n</sub>	[-]	empirische Verteilungsfunktion
F <sub>0</sub>	[-]	Verteilung der Stichprobe
d <sub>n</sub>	[-]	Prüfparameter bei K-S Normalverteilungstest
WDD	$[\frac{g}{m^2d}]$	Wasserdampfdurchlässigkeit (Produktparameter)
d <sub>P, s</sub>	[μm]	Dicke (Produktparameter)
rd <sub>P</sub>	[%]	Reißdehnung (Produktparameter)
rf <sub>P</sub>	$[\frac{N}{mm^2}]$	Reißfestigkeit (Produktparameter)
fg <sub>P</sub>	$[\frac{N}{m^2}]$	Flächengewicht (Produktparameter)
wd <sub>P</sub>	[mm]	Wasserdruck (Produktparameter)
fs <sub>P</sub>	[%]	Flächenschrumpf (Produktparameter)
fb <sub>P</sub>	[m]	Folienbreite (Produktparameter)
fl <sub>P</sub>	[lfm]	Folienlänge (Produktparameter)
mfr <sub>R</sub>	[g/10 min]	Schmelze-Massefließrate (Rohstoffparameter)
grs <sub>R</sub>	[%]	Glührückstand (Rohstoffparameter)
aerf <sub>R</sub>	[%]	äußere Restfeuchte (Rohstoffparameter)
wg <sub>R</sub>	[ppm]	Wassergehalt (Rohstoffparameter)
sd <sub>R</sub>	$[\frac{kg}{l}]$	Schüttdichte (Rohstoffparameter)
D	$[\frac{1}{s}]$	Schergradient
M	[Nm]	Moment
S1,S2	[N]	Seilreibungskräfte
R	[mm]	Außenradius

r	[mm]	Innenradius
l	[m, lfm]	Länge
L	[mH]	Induktivität
u	[V]	Spannung
i	[A]	Strom
J	[kgm <sup>2</sup> ]	Trägheitsmoment
w	[ $\frac{m}{s}$ ]	Geschwindigkeit
$p_{v,sat}$	[hPa]	Sättigungsdampfdruck
$p_v$	[hPa]	Wasserdampfpartialdruck
h	[ $\frac{kJ}{kg}$ ]	Enthalpie
E	[ $\frac{N}{mm^2}$ ]	E-Modul
$\nu$	[-]	Querkontraktionszahl
$\dot{v}$	[ $\frac{m^3}{s}$ ]	Volumenstrom
h	[m]	Höhe
$p_v$	[Pa]	Druckverlust

## Griechische Buchstaben

$\alpha_u$	[rad]	Umschlingungswinkel
$\alpha_w$	[rad]	Folienwinkel
$\alpha$	[-]	Signifikanzniveau
$\alpha$	[-]	Wärmeübergangskoeffizient
$\gamma_{ij}$	[ $\frac{1}{s}$ ]	Betrag des Deformationsgeschwindigkeitstensors, Schwergeschwindigkeit
$\eta$	[Pa · s]	dynamische Viskosität
$\nu$	[ $\frac{m^2}{s}$ ]	kinematische Viskosität
$\lambda$	[ $\frac{W}{m \cdot K}$ ]	Wärmeleitfähigkeit
$\lambda$	[-]	Rohrreibungszahl
$\rho$	[ $\frac{g}{cm^3}$ ]	Dichte
$\underline{\sigma}$	[ $\frac{N}{mm^2}$ ]	Gesamtspannungstensor
$\mu$	[-]	Reibungsbeiwert
$\underline{\tau}$	[ $\frac{N}{mm^2}$ ]	Extraspaltungstensor
$\varphi$	[%]	relative Luftfeuchte
$\omega$	[ $\frac{1}{s}$ ]	Dreh- bzw. Winkelgeschwindigkeit
$\delta_T$	[ $\mu m$ ]	Dicke der thermischen Grenzschicht
$\mu$	[%]	thermodynamischer Wassergehalt in Gewichtsprozent
$\nu$	[-]	Querkontraktionszahl
$\mu$	[%]	thermodynamischer Wassergehalt in Gewichtsprozent
$\Psi$	[%]	thermodynamischer Wassergehalt in Volumsprozent

## dimensionslose Kennzahlen

Re	Reynolds-Zahl	$Re = \frac{w \cdot l}{\nu}$	Strömungskennzahl
Pr	Prandtl-Zahl	$Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda}$	Wärme- und Stoffübertragungskennzahl
Nu	Nusselt-Zahl	$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda}$	Wärme- und Stoffübertragungskennzahl
Bi	Biot-Zahl	$Bi = \frac{\alpha \cdot s}{2\lambda_F}$	Wärme- und Stoffübertragungskennzahl

## Indizes

e	Eingang
a	Ausgang
s	Speicher
p	Druck
v	Volumen
i,j,k	Laufindex
n	Anzahl der Werte
P	Produkt
R	Rohstoff
x,y,z	kartesisches Koordinatensystem
FK	Folienkern
FW	Folienwand
F	fest
FL	flüssig
G	gasförmig
ue	Übergang
sat	Sättigung

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Symbolgrafik einer Blasfolienextrusionsanlage . . . . .	3
1.2	Symbolgrafik einer speziellen Blasfolienextrusionsanlage . . . . .	4
2.1	Dynamisches System . . . . .	8
2.2	Hybrides dynamisches System . . . . .	9
2.3	Darstellung der realen Produktionsanlage . . . . .	10
2.4	Darstellung des Modells der Produktionsanlage . . . . .	11
2.5	Systemklassifikation . . . . .	12
2.6	Massenstrombilanz . . . . .	14
2.7	Identifikation dynamischer Systeme durch Parameterschätzung (vereinfacht)	18
2.8	Prinzipbild künstlicher neuronaler Netze . . . . .	20
3.1	Prinzipbild für Wasserdampfdurchlässigkeit . . . . .	31
3.2	Diagramm Beispielscherkurven . . . . .	36
3.3	Einteilung der Additive . . . . .	40
3.4	Fluss des Masseteilchens über die Teilprozesse . . . . .	41
3.5	3D Ansicht einer Blasfolienextrusionsanlage . . . . .	42
3.6	Förderung und Dosierung . . . . .	44
3.7	Symboldarstellung Oktabin . . . . .	45
3.8	Extrusion . . . . .	47
3.9	Diagramm Viskosität newtonscher und nichtnewtonsche Fluide . . . . .	51
3.10	Werkzeug mit Kühlung . . . . .	53
3.11	Symbolbild Kühlring . . . . .	54
3.12	Kalibrierkorb . . . . .	55
3.13	Schlauchfoliendarstellung . . . . .	56
3.14	Kalibrierkorb . . . . .	57
3.15	Frostlinie . . . . .	59
3.16	Anfahrverhalten . . . . .	60

3.17	Wendestangenabzug . . . . .	61
3.18	Kolbenring . . . . .	62
3.19	Foliendrehung . . . . .	62
3.20	Reckwerk . . . . .	63
3.21	Reckwerkdarstellung . . . . .	64
3.22	Wasserdampfdurchlässigkeit . . . . .	65
3.23	Nachbearbeitung . . . . .	66
3.24	Neck-In-Korrektur . . . . .	66
3.25	Regranulierung . . . . .	67
3.26	Wicklung . . . . .	68
3.27	Diagramm Umgebungsfeuchtigkeit . . . . .	70
3.28	Diagramm Kühllufttemperatur . . . . .	71
4.1	Ersatzschaltbild Gleichstrommotor . . . . .	75
5.1	Gesamtprozess . . . . .	79
5.2	Dekomposition . . . . .	79
5.3	Datenstrukturanalyse . . . . .	80
5.4	Warscheinlichkeitsverteilung MFR Rohstoff A . . . . .	82
5.5	Warscheinlichkeitsverteilung Glührückstand Rohstoff A . . . . .	83
5.6	Warscheinlichkeitsverteilung Äußere Restfeuchte Rohstoff A . . . . .	83
5.7	Warscheinlichkeitsverteilung Wassergehalt Rohstoff A . . . . .	84
5.8	Warscheinlichkeitsverteilung Dichte Rohstoff A . . . . .	85
5.9	Warscheinlichkeitsverteilung Schüttdichte Rohstoff A . . . . .	86
5.10	Warscheinlichkeitsverteilung MFR Rohstoff C . . . . .	88
5.11	Warscheinlichkeitsverteilung Glührückstand Rohstoff C . . . . .	88
5.12	Warscheinlichkeitsverteilung Äußere Restfeuchte Rohstoff C . . . . .	89
5.13	Warscheinlichkeitsverteilung Wassergehalt Rohstoff C . . . . .	90
5.14	Warscheinlichkeitsverteilung Dichte Rohstoff C . . . . .	90
5.15	Warscheinlichkeitsverteilung Schüttdichte Rohstoff C . . . . .	91
5.16	Warscheinlichkeitsverteilung MFR Rohstoff gesamt . . . . .	93
5.17	Warscheinlichkeitsverteilung Glührückstand Rohstoff gesamt . . . . .	93
5.18	Warscheinlichkeitsverteilung Äußere Restfeuchte Rohstoff gesamt . . . . .	94
5.19	Warscheinlichkeitsverteilung Wassergehalt Rohstoff gesamt . . . . .	94
5.20	Warscheinlichkeitsverteilung Dichte Rohstoff gesamt . . . . .	95
5.21	Warscheinlichkeitsverteilung Schüttdichte Rohstoff gesamt . . . . .	96

5.22	Screenplot Produkt . . . . .	98
5.23	Loading Plot Produkt . . . . .	99
5.24	Screenplot Rohstoff . . . . .	100
5.25	Loading Plot Rohstoff . . . . .	101
5.26	Diagramm Extruder . . . . .	105
5.27	Loading Plot Rohstoff Extruder . . . . .	106
5.28	Screenplot Rohstoff Extruder . . . . .	106
5.29	Loading Plot Produkt Reckwerk . . . . .	107
5.30	Screenplot Produkt Reckwerk . . . . .	108
6.1	MFR Rohstoff gesamt . . . . .	110
6.2	Schüttdichte Rohstoff gesamt . . . . .	110
6.3	Dichte Rohstoff gesamt . . . . .	111
6.4	Äußere Restfeuchte Rohstoff gesamt . . . . .	111
6.5	Glührückstand Rohstoff gesamt . . . . .	111
6.6	Wassergehalt Rohstoff gesamt . . . . .	111
7.1	Wärmeübergang und Wärmeleitung . . . . .	122
7.2	Diagramm Enthalpie . . . . .	123
7.3	Diagramm Wärmeleitfähigkeit . . . . .	127
7.4	Diagramm dynamische Viskosität . . . . .	127
7.5	Diagramm Reynolds-Zahl . . . . .	128
7.6	Diagramm Nusselt-Zahl . . . . .	128
7.7	Diagramm Wärmeübergangszahl . . . . .	129
7.8	Diagramm Prandtl-Zahl . . . . .	129
7.9	Diagramm Hertz . . . . .	130
7.10	Diagramm Stickslipeffekt . . . . .	132
7.11	Luftzufuhr . . . . .	133
7.12	Diagramm Folienabkühlung . . . . .	137
8.1	Korrelation . . . . .	141
8.2	Rang . . . . .	141
8.3	PCA . . . . .	141
1.1	Beispiel eines Werksprüfzeugnis . . . . .	ii
1.2	Walzenabstand . . . . .	v



# Tabellenverzeichnis

2.1	Durchführungsmethoden . . . . .	28
3.1	Aufgegliederte Verfahrensschritte . . . . .	43
4.1	Prüfung der Durchführungsmethoden . . . . .	78
5.1	Rohstoff A Übersicht . . . . .	86
5.2	Rohstofftyp A Verteilungsanalyse . . . . .	87
5.3	Rohstoff B . . . . .	87
5.4	Rohstoff C Übersicht . . . . .	92
5.5	Rohstofftyp C Verteilungsanalyse . . . . .	92
5.6	Rohstoff Gesamtübersicht . . . . .	96
5.7	Rohstofftyp Gesamt Verteilungsanalyse . . . . .	97
5.8	PCA Produkt . . . . .	98
5.9	PCA Komponenten Produkt . . . . .	98
5.10	PCA Rohstoff . . . . .	100
5.11	PCA Komponenten Rohstoff . . . . .	101
5.12	Korrelationstabelle Produkt Rohstoff 1 . . . . .	101
5.13	Korrelationstabelle Produkt Rohstoff 2 . . . . .	102
5.14	Korrelationstabelle Produkt Rohstoff 3 . . . . .	102
5.15	Korrelationstabelle Produkt Rohstoff 4 . . . . .	103
5.16	Korrelationstabelle Produkt Rohstoff 5 . . . . .	103
5.17	Korrelationstabelle der größten Korrelationen . . . . .	103
5.18	Korrelationstabelle zum WDD . . . . .	103
7.1	Methoden für die Vermessung von Rohstoffe . . . . .	115
7.2	Mögliche Analysen für Online-WDD Messungen . . . . .	118
7.3	Analyse der möglichen Maßnahmen . . . . .	140

A.1	Kreidetypen 728b & 753 . . . . .	i
A.2	Literaturrecherche Rheology . . . . .	iii
A.3	Fehlertabelle in Prozessdaten . . . . .	iv
A.4	Signale von Förderung und Dosierung . . . . .	vi
A.5	Signale der Extrusion . . . . .	vi
A.6	Signale des Kalibrierkorbs . . . . .	vi
A.7	Signale des Wendestangenabzugs . . . . .	vi
A.8	Signale des Folienblaskopf . . . . .	vii
A.9	Signale des Reckwerks . . . . .	vii

# 1 Einleitung

## 1.1 Historisches und Entwicklung

Blasfolienextrusionsanlagen sind technische Einrichtungen für die Herstellung von unterschiedlichsten Folien auf granularer Basis. Die zum heutigen Zeitpunkt gängigen Herstellmethoden hinsichtlich Rohfolienproduktionsrichtung „aufwärts“ und „abwärts“ sind die üblichen Verfahren für derartige Prozesse. Die Produktionsrichtung bezeichnet den Weg des Folienschlauches in vertikaler Ebene, entweder bewegt sich die Folie von unten nach oben („aufwärts“) oder umgekehrt („abwärts“).

Blasfolienextrusionsanlagen stehen in Konkurrenz zu Anlagen in horizontaler Ebene mit sogenannten Breitschlitzdüsen. Ursprünglich hatten die letztgenannten *Breitschlitzdüsen* einen Vorteil hinsichtlich der Dickenverteilung, welche in den letzten Jahren durch Regelkonzepte aufgeholt werden konnte. Kein Konzept konnte sich bis heute deutlich durchsetzen, so dass davon auszugehen ist, dass je nach Anwendungsfall die eine oder andere Variante ihre Vorzüge hat.

In dieser Arbeit werden ausschließlich Blasfolienextrusionsanlagen betrachtet, deren Produkte ihren Weg in die Verpackungsindustrie, Bauwirtschaft als auch in die Automobilindustrie finden. Im historischen Kontext wurde die erste Anlage zur Produktion von Schlauchfolien 1947 in den USA gebaut. Als Deutschland ein paar Jahre später folgte, wurden in den USA bereits 20 % der hergestellten Gesamtmenge von 50 000 Tonnen Polyethylen durch ca. 35 Verarbeitungsbetriebe mittels Blasfolienextrusion hergestellt [Wol96], [Sch55, S. 396-400].

In vielen Zwischenschritten hat sich die Maschinenteknik fortentwickelt. So kann die Entwicklung der Blaseninnenkühlung als wesentlich für die Erhöhung der Produktionsmenge angesehen werden und wird größtenteils in der Anlagenkonzeption mitberücksichtigt [Gab98, S. 60-65]. Mittlerweile liegt der Fokus auf der Erhöhung der Folienqualität als

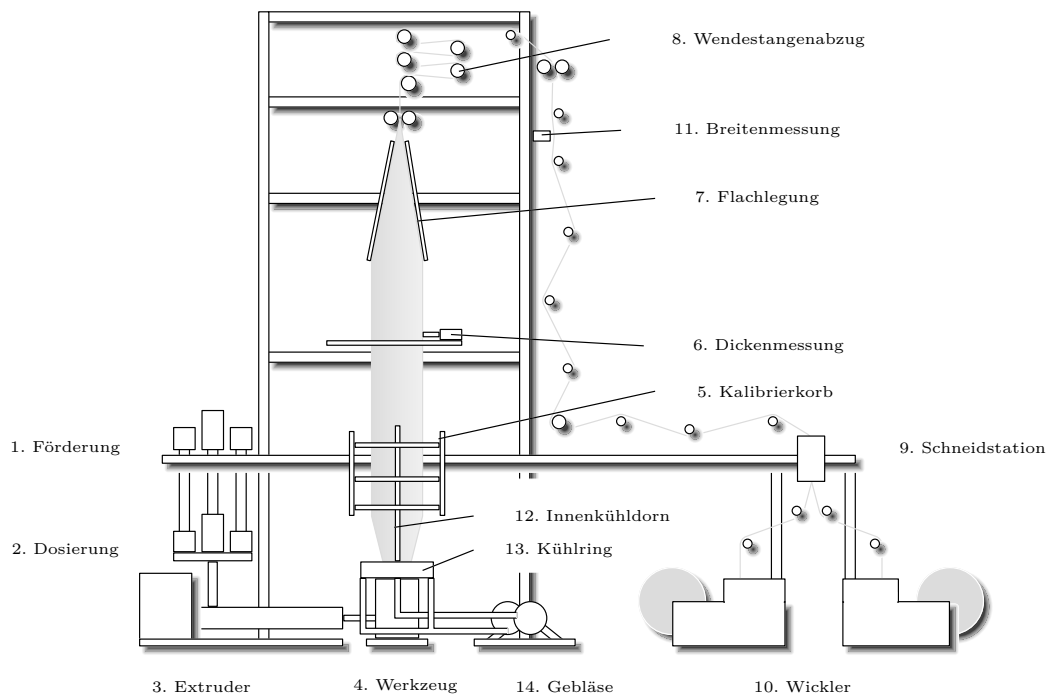
Folge der Wickelqualität, der Breiten und Dickenregelungssysteme und der Erhöhung der Homogenität von Folien bedingt durch segmentierte Kühlringe [FS87], [SC95].

Der heutige Stand der Technik beschreibt hinsichtlich des verwendeten Werkzeugs den Einsatz von Blasfolienköpfen als Kombination von Wendelverteiler, Ringdüse und Luftzufuhr, da das gleichmäßige Austreten einer homogenen Schmelze als wesentlich für die Extrusion hochwertiger Folien angesehen wird [Wol96]. Zur Blaskühlung bei Anlagen mit konstantem Blasendurchmesser haben sich Kühlsysteme mit innen- und außenseitigen Konzepten, teilweise sogar mit Wasserkühlsystemen durchgesetzt. Derartige Kühlungen werden heute aber nur noch bei Polypropylenfolien eingesetzt [Wol96], [Kre81]. Für die Verteilung von Dickstellen über die Folienbreite hat sich der sogenannte Wendestangenabzug als sinnvoll erwiesen. Die Kombination verschiedener Umlenkrollen nach dem ersten Vorabzug dient dazu das Material zum Wickler zu transportieren. Auch wenn die Hersteller derartiger Anlagen die gleiche Zielsetzung haben, so gibt es doch Unterschiede in der Umsetzung einzelner Baugruppen und oder Regelkonzepte. Ein einheitlicher Standard für den Produktionsprozess ist deswegen nicht gegeben. Damit ist die Frage nach dem besten Konzept letztendlich offen.

## 1.2 Erklärung des Produktionsprozesses

Die allgemeine Beschreibung des Prozesses laut Abbildung 1.1 erklärt sich wie folgt:

Bei der Blasfolienextrusion wird basierend auf der im Extruder (3) aufbereiteten Polymerschmelze im Folienblaskopf über eine Ringdüse das Material in Form gebracht (4), nachdem es einem Rezept entsprechend richtig dosiert (2) worden ist. Für die im Werkzeug zu verteilende Schmelze hat sich das Prinzip des Wendelverteilers durchgesetzt, wovon es axiale, radiale und konische Bauarten gibt [Mic03]. Nach dem Verlassen des Werkzeugs wird das Material über einen Kalibrierkorb geführt (5) und im Inneren des Schlauches mit Luft ein Überdruck erzeugt, wodurch der Schlauch aufgeblasen wird. In diesem Bereich findet die Dickenmessung (6) zur Ansteuerung des Wendelverteilers statt. Am oberen Ende der Schlauchfolienblase befinden sich Abzugswalzen mit einer Kombination verschieden angeordneter Führungs- und Umlenkrollen (7,8) inklusive einer Breitenmessung (11). Vor der Wicklung (10) wird der Schlauch noch zweimal aufgeschnitten und in eine Flachfolienform gebracht (9) [Ohl04, S.9f]. Das Gebläse (14) sorgt für die entsprechende Zirkulation



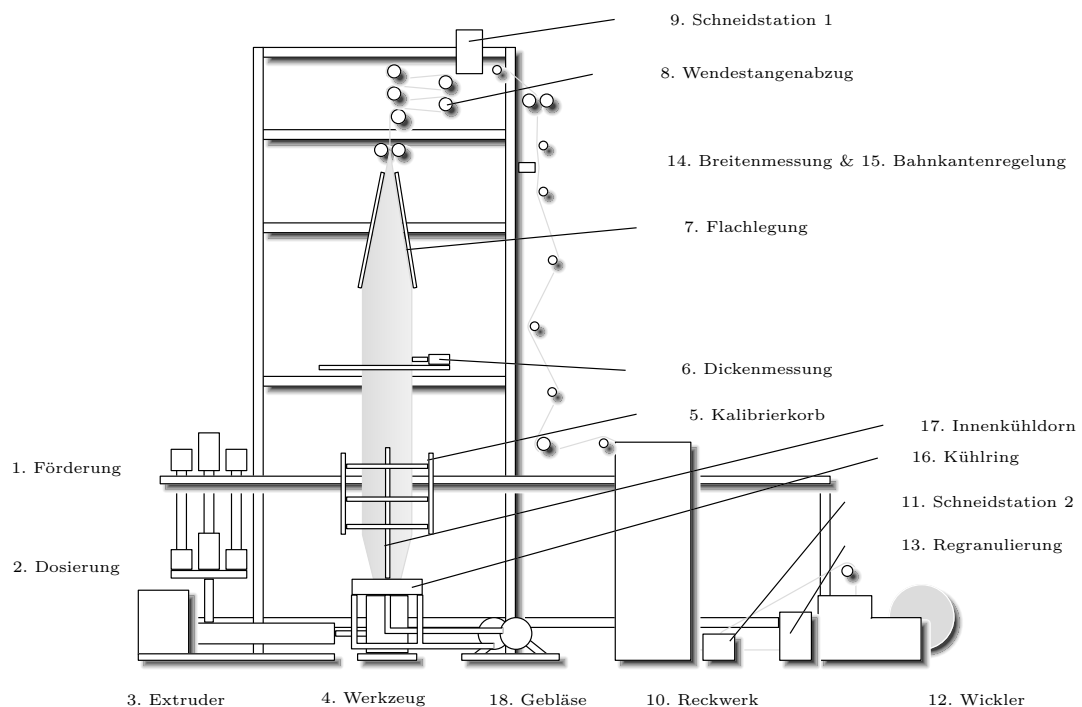
**Abbildung 1.1:** Symbolgraphik einer Blasfolienextrusionsanlage, 1. Förderung, 2. Dosierung, 3. Extruder, 4. Werkzeug mit Kühlung 5. Kalibrierkorb, 6. Dickenmessung, 7. Flachlegung, 8. Wendestangen, 9. Schneidstation, 10. Wickler, 11. Breitenmessung, 12. Innenkühldorn, 13. Kühlring, 14. Gebläse [Ohl04, S.9]

der Luft, welche aus dem Kühlring austritt (13) und über den Innenkühldorn wieder abgeführt wird (12). Der in Abbildung 1.1 dargestellte Prozess ist in der Bildunterschrift chronologisch von links nach rechts angegeben.

### 1.3 Spezielle Adaption der untersuchten Anlage

Die untersuchte Anlage unterscheidet sich wesentlich in drei Punkten von einer „normalen“ Blasfolienextrusionsanlage. Im zuvor beschriebenen allgemeinen Fall werden die gewünschten mechanischen Eigenschaften zu einem späteren Zeitpunkt verändert. Die produzierte und auf Rollen zwischengelagerte Rohfolie wird abgewickelt, weiterverarbeitet und erneut aufgewickelt. Als Rohfolie wird die Folie nach der Schneidstation 1 (9) bezeichnet. Die Aufspaltung des Prozesses in zwei Schritte hat sowohl Vor- aber auch

Nachteile. Im allgemeinen Fall ist als Vorteil die Option zu nennen, anderen Prozessen den Zugriff auf die Nachbearbeitung zu gewähren, sowie weitere Information über das Zwischenprodukt zu gewinnen. Nachteilig wirkt sich eine längere Produktionszeit, logistische Herausforderung sowie eine zusätzlich mechanische und wärmetechnische Belastung auf das Endprodukt aus. Mit der hier beschriebenen Anlage wird der Produktionsprozess in einem Schritt abgewickelt. Speziell die im Einsatz befindlichen polypropylenbasierenden Materialien reagieren empfindlicher auf mehrfaches Erwärmen. Von herstellerspezifischen Unterschieden abgesehen, unterscheidet sie sich daher von der Ursprungsanlage in wenigen dafür aber wichtigen Punkten.



**Abbildung 1.2:** Symbolgraphik einer speziellen Blasfolienextrusionsanlage, 1. Förderung, 2. Dosierung, 3. Extruder, 4. Werkzeug mit Kühlung 5. Kalibrierkorb, 6. Dickenmessung, 7. Flachlegung, 8. Wendestangen, 9. Schneidstation 1, 10. Reckwerk, 11. Schneidstation 2, 12. Wickler, 13. Regranulierung, 14. Breitenmessung, 15. Bahnkantenregelung, 16. Kühlring, 17. Innenkühldorn, 18. Gebläse

Drei Besonderheiten sind in dieser Arbeit besonders erwähnenswert. Erstens wird über die Rohfolienerzeugung hinaus eine zusätzliche Verstreckung (Punkt 10) durchgeführt. Zweitens findet die Aufwicklung der Folie nicht auf zwei Wickler sondern nur auf einem statt

(Punkt 12). Drittens erfolgt die Abfallverwertung in Form einer Regranulierungsanlage, welche den systembedingten Abfall (Randbeschnitt Punkt 11 und Punkt 13) aufschmilzt. Die danach erzeugten Kunststoffkörner werden dem Hauptrohstoff teilweise wieder beigegeben (Siehe Abbildung 1.2).

# 2 Theorie und Vorgangsweise

## 2.1 Grundlegende Begriffe

Ziel der Automatisierungstechnik ist es reale Gegebenheiten zu beeinflussen. In dieser Arbeit wird dafür eine Reihe von Begriffen verwendet, die im Folgenden definiert werden und aus [Ise08],[Lun03] entnommen sind.

**Definition 2.1 :** Prozess

*Unter Prozess versteht man einen Vorgang als jenen Teil der realen Welt, bei dem Materie, Energie oder Information transportiert, umgeformt oder gespeichert wird.*

In der realen Welt gibt es eine Vielzahl von Prozessen, welche sich auf alle Bereiche des Lebens auswirken. Dieser Vorgang ist nicht allein auf die Technik beschränkt, auch in der Ökonomie oder in der Literatur finden derartige Prozesse statt.

**Definition 2.2 :** Modell

*Ein Modell ist eine - nach dem Prinzip so einfach wie möglich und so kompliziert wie nötig - Abstrahierung der Realität.*

Ein Modell wird niemals ident sein mit der Realität. Die durch Verwendung vorhandener Information durchgeführte Ableitung des Prozesses zu einem Modell wird Modellbildung genannt. Der Detaillierungsgrad und damit die Modellgenauigkeit hängt von der zugrundeliegenden Fragestellung ab. Es ist zweckmäßig, nur jene Qualität des Modells anzustreben, die gestellte Fragen beantworten lässt. Nach Fertigstellung des Modells werden spezifische Modellparameter benötigt, die auf unterschiedliche Arten ermittelt werden können.



**Definition 2.3 :** Modellbildung

*Ist der technische Arbeitsvorgang bei der Abbildung des Prozesses zum Modell*

**Definition 2.4 :** Modellparameter

*Sind jene Größen, welche eine konkrete Ausprägung eines Modells darstellen*

Beispielsweise ist es möglich, ein allgemeines Modell einer Feder aufzustellen. Die verschiedenen Federkonstanten beschreiben unterschiedliche Ausprägungen des allgemeinen Federmodells.

**Definition 2.5 :** Modellvalidierung

*Darunter versteht man die Überprüfung und die Kontrolle, ob die Differenz zwischen Modell und Realität hinreichend klein ist*

Wenn beispielsweise ein Modell einer Feder bei einer definierten Kraft einen konkreten Federweg vorhersagt, so ist die Validierung des Modells genau dann gegeben, wenn die Differenz zwischen Federweg durch Messung und dem zuvor berechneten Federweg hinreichend klein ist.

**Definition 2.6 :** Systemgrenze

*Ist eine künstliche und willkürlich festzulegende Grenze, welche die Realität vom Modell abgrenzt*

Innerhalb der Systemgrenzen wird der Untersuchungsgegenstand analysiert. Dabei können Schnittstellen definiert werden, die Energie, Masse und Information über die Systemgrenzen hinaus austauscht.

**Definition 2.7 :** System

*Ein System ist laut DIN 66201 eine abgegrenzte Anordnung von aufeinander einwirkenden Gebilden*

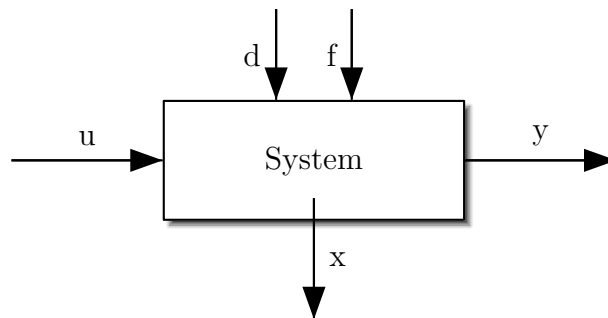
Systemtheoretisch betrachtet man es als Verknüpfung verschiedener Signale innerhalb der Systemgrenzen [DIN71].

**Definition 2.8 :** Signal

*Ein Signal beschreibt eine sich zeitlich ändernde Größe, durch die eine Information ausgedrückt wird.*

**Definition 2.9 :** Dynamisches (zeitkontinuierliches) System

*Ein dynamisches System ist ein Teil der Welt, innerhalb welcher sich Prozesse abspielen. (nur kontinuierliche Eingangssignale) Systeme werden durch eine oder mehrere Kenngrößen beschrieben, die sich während des Ablaufs der Prozesse verändern.*



**Abbildung 2.1:** Dynamisches System [Lun03, S. 22]

Die Stellsignale  $\mathbf{u}$  (Anlagenparameter) legen das Prozessverhalten des Systems fest. Kein System ist frei von Störungen  $\mathbf{d}$ , welche zwar gemessen und berücksichtigt, nicht aber beeinflusst werden können. Als Fehler  $\mathbf{f}$  werden innere Veränderungen von Prozessgrößen bezeichnet. Die inneren Prozesssignale die auch als Zustandsgrößen  $\mathbf{x}$  betrachtet werden sind die als bekannt vorausgesetzten inneren Zustände eines Systems, während mit  $\mathbf{y}$  die messbaren Ausgangssignale bezeichnet werden [Lun03, S. 40,41], [Mün06, S. 6f],[Unb07].

**Definition 2.10 :** Hybrides dynamisches System

*Ist eine Erweiterung des dynamischen Systems und hat zusätzlich auch zeitdiskrete Eingangssignale*

Beispielsweise ist im Buch Automatisierungstechnik von Jan Lunze ein derartiges System folgendermaßen dargestellt und beschrieben [Lun03, S. 503] (Abbildung 2.2).

In Abbildung 2.2 beschreiben die Variablen  $v, w$  die diskreten Ein/Ausgangsgrößen sowie  $v_Q$  die diskrete Koppelgröße. Die Variablen  $u$  und  $y$  sind die kontinuierlichen Ein/Aus-

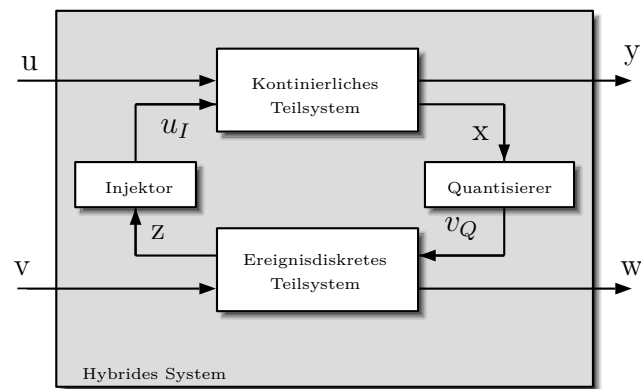


Abbildung 2.2: Hybrides dynamisches System [Lun03, S. 503]

gangparameter und  $u_I$  die kontinuierliche Koppelgröße. Derartige Systeme können laut aktuellem Forschungsstand analytisch nicht gelöst werden. Seit 1991 läuft ein Workshop mit dem Titel Hybrid Systems Computation and Control (HSCC)<sup>1</sup> welcher sich mit diesem Thema beschäftigt. Als weiteres Beispiel sei die Universität Cottbus mit einer Nachwuchsforschergruppe genannt, die sich mit dem Thema zur Gestaltung und Optimierung hybrider Systeme der Mathematik, Physik, Informatik und Wirtschaftswissenschaften auseinandersetzt.<sup>2</sup> Dies sind nur zwei Beispiele für den Versuch ein Problem zu lösen, mit welchem man sich weltweit beschäftigt.

**Definition 2.11 :** Anlagenparameter

*Darunter versteht man die Konfiguration sämtlicher Maschineneinstellung bei technischen Anlagen*

In dieser Arbeit haben die Anlagenparameter die Bedeutung der Konfiguration der Blasfolienextrusionsanlage.

<sup>1</sup><http://hsc2012.hsc-conference.org/>

<sup>2</sup><http://www.math.tu-cottbus.de/INSTITUT/HybrideSysteme/ProjektII.html>

## 2.2 Vorgangsweise zur Ermittlung von Anlagenparameter

Für die Ermittlung von Anlagenparameter sind folgende Handlungen erforderlich. Die Vorgangsweise ist in diesem Kapitel und in Abbildung 2.3 schematisch dargestellt.

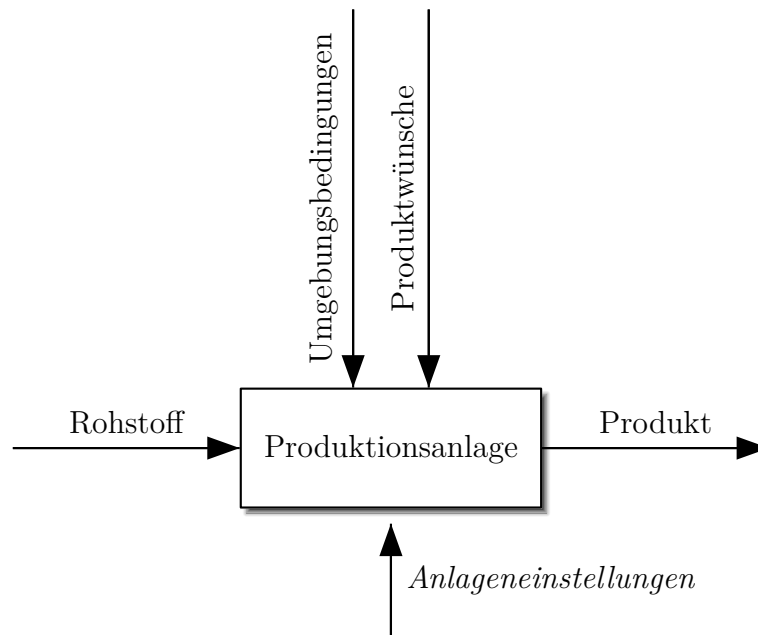
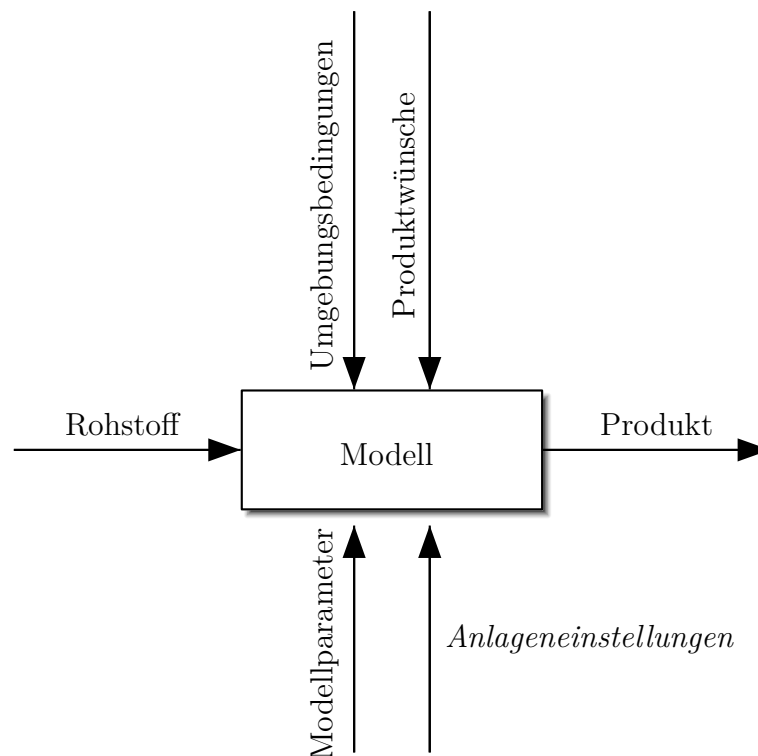


Abbildung 2.3: Darstellung der realen Produktionsanlage

1. Prozessanalyse (1)
2. Modellbildung (2)
3. Identifikation von Anlagenparameter (3)

Bei der Prozessanalyse (1) ist zunächst die Frage der Systemklassifikation zu beantworten. Dazu müssen die realen Gegebenheiten der Produktionsanlage aufgezeichnet und analysiert werden. Nach Klärung der Systemklassifikation (Abbildung 2.5) wird die Menge der Modellbildungen eingeschränkt und die Analysearbeit für diese deutlich erleichtert. Die wesentliche Arbeit der Modellbildung (2) ist die Umwandlung physikalischer Prozesse in Form der mathematischen Gleichungen. Bei diesem Vorgang werden sowohl das Modell, als auch die Ausprägung des Modells durch die dazugehörige Modellparameter ermittelt [Sch08]. Nach Fertigstellung findet die Validierung statt, um im darauf folgenden Schritt

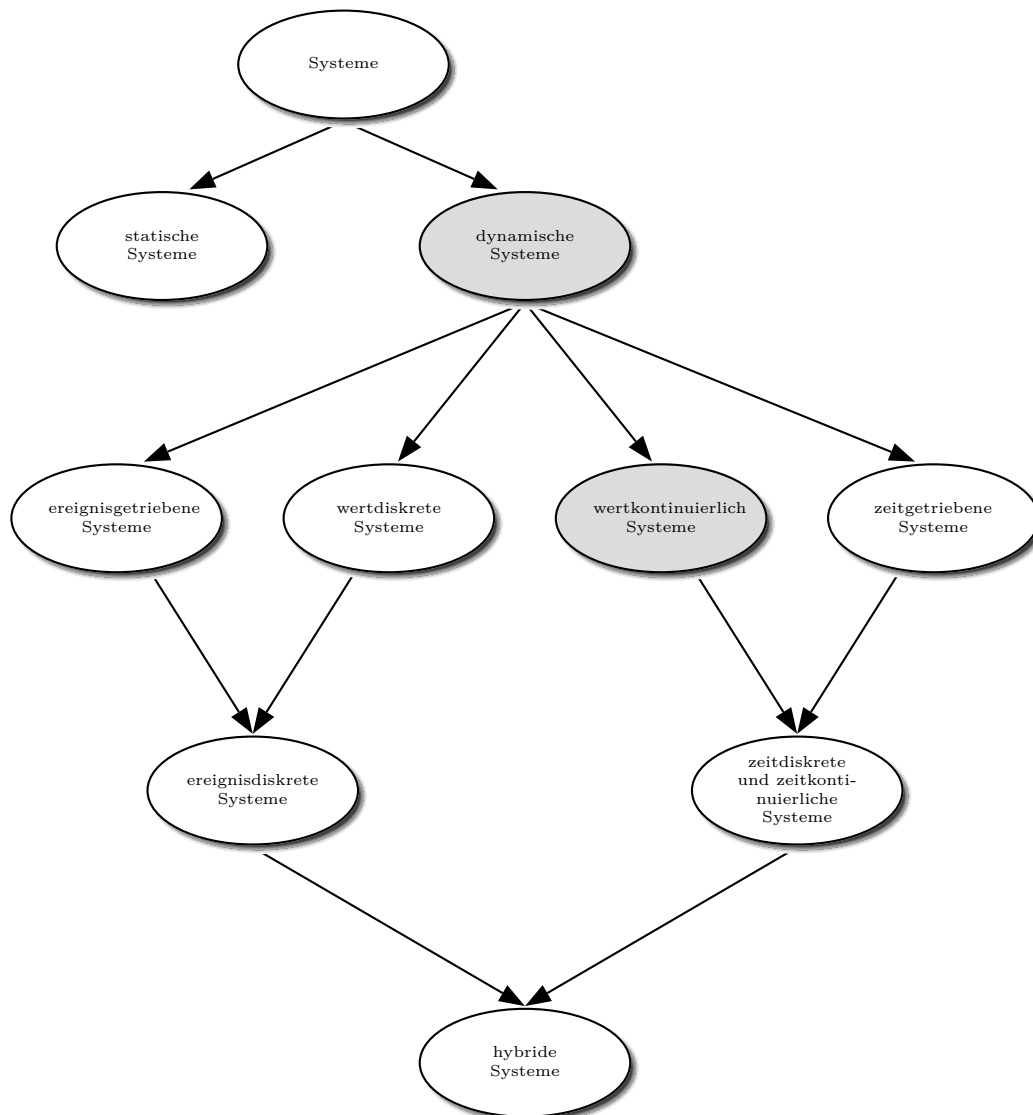
die Identifikationen der Anlagenparameter **(3)** durchführen zu können. Diese Anlagenparameter beeinflussen letztendlich die Produktparameter in gewünschter Art und Weise. Im Gegensatz zur Blockdarstellung der realen Strecke (Abbildung 2.3) werden daher diese Modellparameter in Abbildung 2.4 als zusätzlich (konstantwertige) Eingänge dargestellt.



**Abbildung 2.4:** Darstellung des Modells der Produktionsanlage

Für den Fall, dass Rohstoff, Modell und Modellparameter, Umgebungsbedingung und Produktwünsche bekannt sind, ist die letzte verbliebene Einflussgröße die Anlageneinstellung, welche die Produkteigenschaften beeinflusst.

Die Herstellung von Blasfolien entspricht einem hybriden dynamischen System. Es sind in einem derartigen System laut Definition 2.9 sowohl die kontinuierlichen als auch diskrete Parameter von Relevanz. Die Dosieranlage ist ein diskontinuierlicher Prozess mit diskreten Parametern am Eingang (Batch-Prozess), dieser spielt jedoch bei einem konkret eingestellten Produktwunsch nahezu keine Rolle, darum wird er auch innerhalb dieser Arbeit



**Abbildung 2.5:** Systemklassifikation [Mün06, S. 8]

nicht berücksichtigt. Die wesentlichen Eigenschaften des Produktes sind bei konstanten Dosierungswünschen invariant. Die Modellbildung hybrider dynamischer Systeme wird daher vereinfacht zu einem rein dynamischen (zeitkontinuierlichen) System.

Die Modellbildung kann auf verschiedene Arten erfolgen. Eine dieser Methoden ist die theoretische Modellbildung (white-box model) einerseits, die experimentelle Modellbil-

dung eine weitere. Bei der experimentellen Modellbildung unterscheidet man zwei unterschiedliche Varianten. Bei Vorkenntnissen des Modells werden nur die Modellparameter über Versuche ermittelt (bright grey-box model<sup>3</sup>), falls keine Vorkenntnisse über das Modell vorliegen, werden sowohl Modell als auch Modellparameter experimentell bestimmt (black-box model) [Ise08, S.49]. In den folgenden Kapiteln wird auf diese 3 Methoden eingegangen.

## 2.3 Theoretische Modellbildung (white-box)

Bei der theoretischen Modellbildung beginnt man stets mit vereinfachten Annahmen über den Prozess, so dass die Berechnung erleichtert oder überhaupt erst möglich wird. Durch Aufstellen der entsprechenden Gleichungen wie beispielsweise Bilanzgleichungen für Massen, Energie und Impulse, physikalisch-chemische Zustandsgleichungen, phänomenologische Gleichungen (Wärmeleitung, chemische Reaktionen), Entropiebilanzen soweit erforderlich, sowie Schaltungsgleichungen, kann ein Modell aus der Summe algebraischer Beziehungen sowie gewöhnlicher und unter Umständen partieller Differentialgleichungen aufgestellt werden. Modelle dieser Art sind häufig umfangreich und kompliziert, so dass eine Reihe von Methoden existieren um es zu vereinfachen. Eine der Möglichkeiten ist die Linearisierung nichtlinearer Funktionsgleichungen um einen vorher definierten Arbeitspunkt. Eine Weitere ist die Reduzierung des Komplexitätsgrads von verteilten auf konzentrierte Parameter. Zusätzlich wird der Versuch unternommen die Modellordnung zu reduzieren. In Summe führt dies zu einem Satz von Gleichungen, welche die Struktur des Prozesses wiedergibt [Ise08]. Bei verfahrenstechnischen Prozessen sind folgenden grundsätzlichen mathematischen Gleichungen von Bedeutung die aus [Ise08, S. 46ff] entnommen wurden.

### 2.3.1 Massenbilanzgleichungen für Kontrollräume

Als Kontrollraum oder Kontrollgebiet wird die gedachte Grenze um den Untersuchungsgegenstand bezeichnet.

$$\Delta m_e(t) - \Delta m_a(t) = \Delta m_s(t) \quad (2.1)$$

<sup>3</sup>Ist eine Sonderform des grey-box-model, welches eine nicht deutlich abgegrenzte Kombination von white-box und black-box darstellt.

Der im Kontrollraum verbleibende Anteil an Masse wird  $\Delta m_s(t)$  pro  $\Delta t$  bezeichnet.

$$\frac{\Delta m_e(t)}{\Delta t} - \frac{\Delta m_a(t)}{\Delta t} = \frac{\Delta m_s(t)}{\Delta t} \quad (2.2)$$

Mit dem Grenzübergang  $\Delta t \rightarrow 0$  folgt

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{dm}{dt} = \dot{m} \quad (2.3)$$

und somit

$$\frac{dm_e(t)}{dt} - \frac{dm_a(t)}{dt} = \frac{dm_s(t)}{dt} \quad (2.4)$$

somit für die Massenstrombilanz eines Massenspeichers gilt

$$\underbrace{\dot{m}_e(t)}_{\text{Massenzustrom}} - \underbrace{\dot{m}_a(t)}_{\text{Massenabstrom}} = \underbrace{\frac{d}{dt} m_s(t)}_{\text{gespeicherter Massenstrom}} \quad (2.5)$$

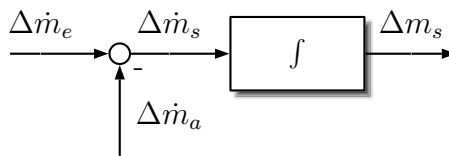
Nun werden kleine Änderungen um den Gleichgewichtszustand  $\bar{m}$  eingeführt.

$$\dot{m}(t) = \bar{m} + \Delta \dot{m}(t). \quad (2.6)$$

Es gilt die Massenstrombilanzgleichung für kleine Änderungen wie folgt:

$$\Delta \dot{m}_e(t) - \Delta \dot{m}_a(t) = \frac{d}{dt} m_s(t) \quad (2.7)$$

Das entsprechende Blockschaltbild sieht folgendermaßen aus



**Abbildung 2.6:** Massenstrombilanz



### 2.3.2 Prozess mit Energieströmen

Hinsichtlich Energieerhaltung hat die Gleichung eine idente Form, daher schreibt man für die Energie das Formelzeichen  $\dot{E}$  oder Allgemein mit  $\dot{Q}$

$$\underbrace{\dot{Q}_e(t)}_{\text{eintretender Strom}} - \underbrace{\dot{Q}_a(t)}_{\text{austretender Strom}} = \underbrace{\frac{d}{dt}Q_s(t)}_{\text{gespeicherter Strom}} \quad (2.8)$$

An den Schnittstellen wird in aller Regel Energie übertragen, daher gilt

$$P(t) = \frac{dE(t)}{dt} \quad (2.9)$$

Es kann gezeigt werden, dass die Leistung als Produkt von Potentialdifferenz mal Strom bezeichnet werden kann.

$$P(t) = f(t) \cdot e(t) \quad (2.10)$$

Weitere Gleichungen dieser Art finden sich auch im thermodynamischen und strömungstechnischen Bereich sowie Regeln für die Kopplung von Prozesselemente [Ise08, S. 46ff].

## 2.4 Experimentelle Modellbildung (bright grey-box)

Die folgenden Inhalte wurden aus [Ise08, S. 335] übernommen. Traditionell spricht man bei der experimentellen Modellbildung auch von Parameteridentifikation. Darunter versteht man die Ermittlung der Modellausprägung, nicht der Anlagenparameter. Diese Variante der experimentellen Modellbildung setzt demnach ein vorhandenes, allgemeines in mathematisch Form formuliertes Modell voraus, die genaue Festlegung eines bestimmten Modells findet unter Zuhilfenahme von Experimenten statt. Ein System, ein Modell und die Möglichkeiten des Experiments führen zu den dazugehörigen Modellparameter. Diese Methode der Parameteridentifikation kann über verschiedene Ansätze erfolgen. In der Geschichte der Regelungstechnik sind eine Reihe von Identifikationsmethoden entwickelt worden [Ey74], [Str75], [Leo73], [You84] und [LS85], die auf Grund der Fülle der Methoden eine Klassifikation notwendig machen. Falls man sich auf lineare Prozesse mit

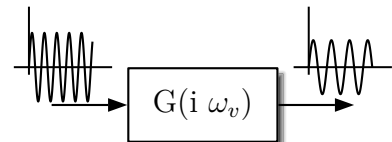
konzentrierten Parametern und Ein-Ausgangs-Parameter beschränkt, dienen nachfolgende Merkmale zur Klassifikation.

1. Typ der mathematischen Modelle (parametrische Modelle, nichtparametrische Modelle)
2. Typ der verwendeten Signale (kontinuierlich, diskret)
3. Eingangssignalart (deterministisch, stochastisch)
4. Fehler zwischen Modell und Prozess (Ausgangs-, Eingangs-Fehler, bzw. verallgemeinerter Fehler)
5. Kopplungsart von Prozess und Rechner (offline, online)
6. Signalverarbeitungsart (Block, Echtzeit)
7. Art der Verarbeitung (nicht rekursiv, rekursiv)

In den folgenden Teilabschnitten werden Methoden zur Parameteridentifikation vorgestellt.

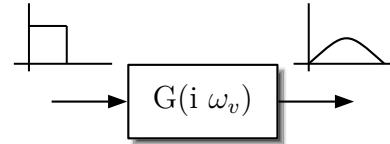
### 2.4.1 Frequenzgangmessung

Bei der Frequenzgangmessung werden periodische Testsignale zur direkten Ermittlung des Frequenzgangs verwendet. Ein stabiler linearer Prozess wird als gegeben vorausgesetzt. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangssignal ist gegeben. Benötigt wird in diesem Zusammenhang ein Datenschreiber, ein Speicher und ein Frequenzgang-Messgerät. Die Identifikation erfolgt durch Zerlegung und anschließender Kombination einzelner Standardübertragungsglieder aus dem Frequenzgang. Diese Methode gilt als nichtparametrische Methode. Der Anwendungszweck ist die Überprüfung theoretischer Modelle oder eine klassische Methode für den Reglerentwurf [Ise08, S. 337], [Ise10, S. 100], [Unb08, S. 321].



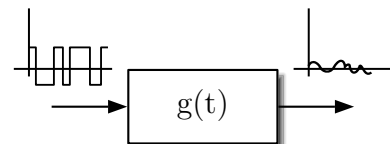
## 2.4.2 Fourieranalyse

Die Fourieranalyse wird hauptsächlich für lineare Prozesse mit kontinuierlichen Signalen zur Ermittlung des Frequenzganges aus Sprung- und Impulsantwortfunktionen angewandt. Sie ist ein einfaches Verfahren mit relativ kleinem Rechenaufwand, relativ kurzer Messzeit und empfiehlt sich nur für Prozesse mit kleinem Störsignal/Testsignal-Verhältnis. Sie basiert auf der Idee, dass sich ideal das betrachtete Eingangssignal aus einer unendlichen Anzahl an harmonischen Ausgangssignalen beschreiben lässt, welche sich nach störungsfreier Übertragung nur in Amplitude und Phasenlage unterscheiden. Die Struktur bleibt erhalten [Ise10, S. 82] [Ise08, S. 337, S. 385].



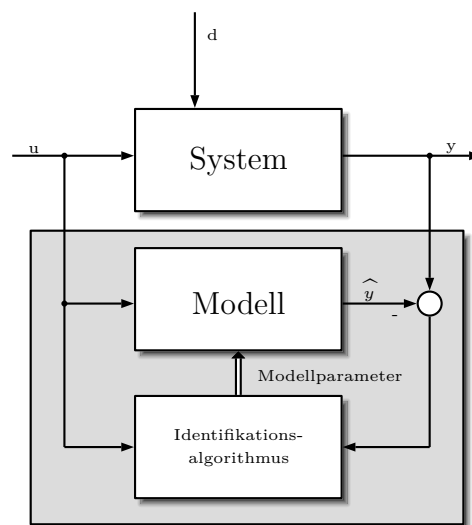
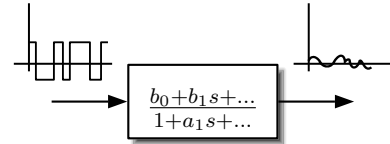
## 2.4.3 Korrelationsanalyse

Ist eine für den Zeitbereich bei linearen Prozessen sowohl im zeitkontinuierlichen als auch im zeitdiskreten Fall gedachte Identifikationsmethode im offenen Regelkreis. Die Eingangssignale dürfen dabei sowohl stochastisch als auch periodisch sein. Das Resultat ist eine Korrelationsfunktion und in Ausnahmefällen eine Gewichtsfunktion. Vielfach wird diese Methode bei großem Störsignal/Testsignal-Verhältnis angewandt und hat einen geringen Rechenaufwand. Hauptzweck ist das Erkennen von Signalzusammenhängen und die Laufzeitidentifikation [Ise08, S. 337, S. 384].



### 2.4.4 Parameterschätzung

Die Identifikation und Parameterschätzung mathematischer Modelle aufgrund gemessener Signale, und die Erfassung von Schwingungen, dienen zur Online-Informationsgewinnung über den Prozess [Ise08, S. 5]. Es wird der Fehler zwischen gemessenem Ausgangssignal und dem Ausgangssignal eines gedachten, parallel geschalteten Modells (oder Gleichungsfehler) gebildet. Die Modellparameter werden dann

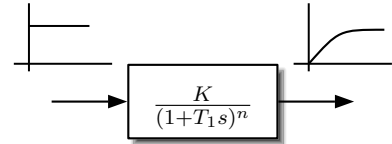


**Abbildung 2.7:** Identifikation dynamischer Systeme durch Parameterschätzung (vereinfacht) [Lun03, S. 24]

durch Minimieren der Fehlerquadratsumme über z. B. die Methode der kleinsten Quadrate gebildet. Dazu existieren erprobte Algorithmen bzw. Softwaremodulen in nichtrekursiver oder rekursiver Form für Modelle mit zeitkontinuierlichen und zeitdiskreten Signalen, auch für langsam veränderliche Parameter und bestimmte Klassen nichtlinearer Modelle. Dafür ist ein Modell in mathematischer Form erforderlich. Wie auch die Korrelationsanalyse ist diese Methode für Mehrgrößensysteme als auch für die Fehlererkennung einsetzbar [Ise08, S. 28, S.336].

### 2.4.5 Kennwertermittlung

Die Kennwertermittlung ist eine parametrische Methode zur Reglereinstellung einerseits und für ein grobes Modell andererseits. Die erreichbare Genauigkeit ist klein und Störungen wirken sich stark auf die Qualität der Kennwerte aus. Aus nichtperiodischen Testsignalen wird beispielsweise Ausgleichs- und Verzugszeit gemessen und die Kennwerte aus entsprechenden Tabellen und Diagramme entnommen [Ise08, S. 336].



## 2.5 Experimentelle Modellbildung (black-box)

### 2.5.1 Künstliche Neuronale Netze

Bei der Ermittlung von Modell und Modellparameter auf maschinellem Weg liegt über die zugrundeliegende Struktur keine Information vor. Ein Teilbereich der künstlichen Intelligenz sind künstliche neuronale Netze. Isermann beschreibt das in seinem Buch „Mechatronische Systeme“ folgendermaßen:

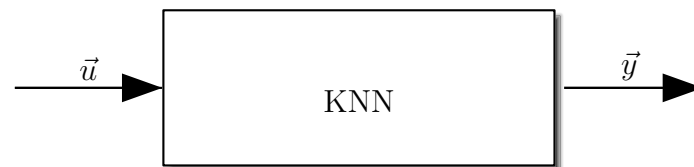
*Zur Identifikation nichtlinearer Prozesse ohne wesentliche Apriori-Kenntnisse der Modellstruktur eignen sich künstliche neuronale Netze, die aus mathematisch formulierten Neuronen als nichtlineare Modellmodule zusammengesetzt werden. Im Allgemeinen ist zu empfehlen, künstlich erzeugte Testsignale zu verwenden, da die im Betrieb auftretenden Signale die Prozesse selten genügend anregen. An diese Testsignale werden im Allgemeinen folgende Forderungen gestellt*

- *einfach und reproduzierbar zu erzeugen*
- *einfach mathematisch beschreibbar*
- *realisierbar mit den gegebenen Stellanrichtungen*
- *anwendbar auf den Prozess*

- *gute Anregung der interessierenden Prozessdynamik und des Signalamplitudenbereiches*

[Ise08, S. 338ff]

Weiters sind künstliche neuronale Netze (KNN) selbstständig lernende Netze zur Klassifikation von Problemen mit Hilfe einer Support Vector Machine (SVM) bzw. zur Erkennung von Trends. Die Testfälle werden dem System bekannt gegeben, jeder neue Parametersatz wird klassifiziert und der Datenbasis für zukünftige Entscheidungen hinzugefügt (Abbildung 2.8).



**Abbildung 2.8:** Prinzipbild künstlicher neuronaler Netze

Einerseits kann der Eingabevektor  $\vec{u}$  die Information über Rohstoffsoll und Istwert, Produktsoll-und-Istwert, Anlageneinstellungen, Anlagenmessgrößen und Information über die Umgebungsbedingungen beinhalten und der Ausgangsvektor  $\vec{y}$  identifiziert ein Modell. Andererseits kann der Vektor  $\vec{u}$  dieselben Informationen beinhalten, der Ausgabevektor versucht nur die Daten zu klassifizieren. Dies würde der Zielsetzung entsprechen. Die Umsetzung der aus dem Datenspeicher gewonnenen Information hinsichtlich der Wunschergebnisse wird oftmals mit Hilfe von Fuzzylogik realisiert, da Fuzzyregler eine gewichtete Entscheidung treffen. Der Nachteil dieses Systems liegt in der nicht mehr zurückrechenbaren Logik, welche sich das System selbst angeeignet hat [Unb08, S. 337ff], [Ise10, S. 501ff], [PHMN11, Vorlesungsunterlagen zu Computational Intelligence].

## 2.6 Statistisches Eingangs/Ausgangs Verhalten

Die folgenden Inhalte wurden von [Har89, S. 79f], [HE86, S. 143, Kapitel III] übernommen.

### 2.6.1 Statistische Korrelationsanalyse

Die erste sehr indirekte Methode der Datenanalyse ist die statistische Korrelationsanalyse. Bei dieser Betrachtung werden Zusammenhänge zwischen Eingangs- und Ausgangssignale in linearer Form vermutet.

**Definition 2.12 :** Die Korrelation

*gibt vornehmlich den Grad des linearen Zusammenhanges wieder und ist ein Maß für die Stärke des Zusammenhangs zwischen  $X$  und  $Y$ . Die Richtung der Wirkung, sofern vorhanden, wird durch Korrelationskoeffizienten nicht erfaßt [HE86, S. 147] [Fah07, S. 148].*

Als Beurteilungskriterium wird dafür das Bestimmtheitsmaß  $r^2$  herangezogen. (2.11)

$$r^2 = \left[ \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2}} \right]^2 \quad (2.11)$$

Anders als beim Korrelationskoeffizienten wird beim Spearmanschen Rangkorrelationskoeffizienten  $r_s$  keine Linearität vorausgesetzt. Er nimmt den Wert 1 bei linearem Zusammenhang genauso an, wie bei einer Folge streng monoton wachsender Werte.

Es gilt daher Gleichung (2.12)

$$r_s = \frac{\sum_{i=1}^n R(x_i) R(y_i) - n \overline{R(x)} \overline{R(y)}}{\sqrt{\left( \sum_{i=1}^n R(x_i) - n \overline{R(x)} \right)^2 \left( \sum_{i=1}^n R(y_i) - n \overline{R(y)} \right)^2}} \quad (2.12)$$

## 2.6.2 Faktoren und Hauptkomponentenanalyse

Die zweite in dieser Arbeit durchgeführte Methode zur Datenanalyse ist die der Hauptkomponentenanalyse als Teilbereich der Faktorenanalyse. Sie beurteilt ebenfalls das Verhalten zwischen Eingangs- und Ausgangssignale und zwar mit dem Ziel komplexe Sachverhalte zu vereinfachen.

Bei der Faktorenanalyse geht man davon aus, dass die Merkmale eines Datensatzes nicht voneinander unabhängig sind. Die Merkmale sind also korreliert. Die Fragestellung bei der Anwendung dieser Methode ist also, ob es indirekte nicht gemessene Größen gibt, die die Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgang mit möglichst wenig Merkmale gut beschreibt. Um eine Faktorenanalyse durchführen zu können wird eine sogenannte Datenmatrix  $y$  mit  $n$  Zeilen und  $p$  Spalten aufgestellt, dabei sind in den Spalten die Merkmale und in den Zeilen die Merkmalsausprägungen angeordnet. Zwingend gilt dabei  $n < p$ .

$$Y = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{i1} & y_{i2} & \cdots & y_{ip} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{np} \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

Wenn die Datenmatrix standardisiert wird, ist der Mittelwert jeder Spalte Null und die empirische Varianz jeder Spalte 1.

$$Y_{st} = \begin{pmatrix} y_{11}^{st} & \cdots & y_{1p}^{st} \\ \vdots & & \vdots \\ y_{n1}^{st} & \cdots & y_{np}^{st} \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

Diese Matrix wird mit Hilfe von Gleichung (2.15)

$$y_{ij}^{st} = \frac{y_{ij} - \bar{y}_{.j}}{s_j}, \quad \bar{y}_{.j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{ij} \quad \text{und} \quad s_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{.j})^2} \quad (2.15)$$

gebildet und in der Folge ergibt sich die empirische Korrelationsmatrix  $R$  (2.16) der  $p$  Merkmale.



$$R = \frac{1}{n-1} \cdot Y_{st}^T \cdot Y_{st} = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{1p} \\ r_{12} & 1 & r_{23} & \dots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{1p} & r_{2p} & r_{3p} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

Man trifft die Annahme, dass sich die  $p$  beobachteten (korrelierten) Merkmale als Linearkombination von  $q$  nicht beobachtbare und unbekannte Faktoren darstellen lassen. Jedes Element der standardisierten Datenmatrix lässt sich als Linearkombination von Realisationen  $f_{ik}$  mit  $i = 1, \dots, n$   $k = 1, \dots, q$  der unbekannt Faktoren  $F_1$  bis  $F_q$  beschreiben. Die Matrix  $y^{st}$  in Gleichung (2.17) ist darstellbar als Produkt zweier Matrizen,

$$y_{st} = \tilde{F} \cdot \tilde{L}^T = \begin{pmatrix} f_{11} & \dots & f_{1q'} \\ \vdots & & \vdots \\ f_{n1} & \dots & f_{nq'} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} l_{11} & \dots & l_{1q'} \\ \vdots & & \vdots \\ l_{q1} & \dots & f_{qq'} \end{pmatrix}^T \quad (2.17)$$

wobei  $l_{jk}$  die Ladungsfaktoren des  $k$ -ten nicht beobachteten Faktors  $F_k$  bezüglich des  $j$ -ten beobachteten Merkmals sind.  $\tilde{L}$  wird als Ladungsmatrix bezeichnet. Die Faktorwerte stehen in der Matrize  $\tilde{F}$  und wird in standardisierter Form angenommen (Mittelwerte jeder Spalte Null, empirische Varianz 1). Nach einigem Umformen und weiteren Überlegungen führen die vorangegangenen Formeln auf das Fundamentaltheorem der Faktorenanalyse welches für unkorrelierte Faktoren mit Gleichung (2.18)

$$R = \tilde{L} \cdot \tilde{L}^T \quad (2.18)$$

und für korrelierte Faktoren mit Gleichung (2.19) beschrieben wird

$$R = \frac{1}{n-1} \cdot \tilde{L} \cdot \tilde{F}^T \cdot \tilde{F} \cdot \tilde{L}^T = \tilde{L} \cdot \tilde{R}_F \cdot \tilde{L}^T \quad \text{mit} \quad \tilde{R}_F = \frac{1}{n-1} \cdot \tilde{F}^T \cdot \tilde{F} \quad (2.19)$$

Die vorerst unbekannt Matrizen  $\tilde{F}$  und  $\tilde{L}$  müssen erst ermittelt werden, zuerst wird  $\tilde{L}$  durch die Korrelationsmatrix  $R$  geschätzt. Dabei gibt es verschiedene Arten von Faktoren.

Entscheidend für die Faktorenanalyse sind nun lediglich die  $q < p$  gemeinsamen Faktoren  $F_1$  bis  $F_q$  mit  $q = q' - p$ , denn näherungsweise gilt

$$y_{st} \cong \tilde{\tilde{L}} + \tilde{\tilde{U}} = \begin{pmatrix} l_{11} & \dots & l_{1q} & 0 & \dots & 0 \\ l_{21} & \dots & l_{2q} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ l_{p1} & \dots & l_{pq} & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 & l_{1q+1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & l_{2q+2} & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & l_{pq'} \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

Für orthogonale Faktoren  $F_1$  bis  $F_q$  heißt das

$$\begin{aligned} R &= \tilde{\tilde{L}} \cdot \tilde{\tilde{L}}^T \cong (\tilde{\tilde{L}} + \tilde{\tilde{U}}) (\tilde{\tilde{L}} + \tilde{\tilde{U}})^T = (\tilde{\tilde{L}} + \tilde{\tilde{U}}) (\tilde{\tilde{L}}^T + \tilde{\tilde{U}}^T) = \\ &\tilde{\tilde{L}} \cdot \tilde{\tilde{L}}^T + \tilde{\tilde{L}} \cdot \tilde{\tilde{U}}^T + \tilde{\tilde{U}} \cdot \tilde{\tilde{L}}^T + \tilde{\tilde{U}} \cdot \tilde{\tilde{U}}^T = \tilde{\tilde{L}} \cdot \tilde{\tilde{L}}^T + \tilde{\tilde{U}} \cdot \tilde{\tilde{U}}^T = L \cdot L^T + U \cdot U^T \end{aligned} \quad (2.21)$$

mit

$$L = \begin{pmatrix} l_{11} & \dots & l_{1q'} \\ \vdots & & \vdots \\ l_{q1} & \dots & f_{qq'} \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad U = \begin{pmatrix} l_{1q+1} & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & f_{qq'} \end{pmatrix} = \text{diag}(l_{1q+1}, \dots, l_{pq'}) \quad (2.22)$$

Die Elemente der Matrix

$$U^2 = U \cdot U^T = \text{diag}(l_{1q+1}^2, \dots, l_{pq'}^2) = (\delta_1^2, \dots, \delta_p^2) \quad (2.23)$$

sind gerade jene merkmalseigene Varianzen (empirisch bzw. geschätzte Varianzen, aus einer Stichprobe bestimmt), d.h. die Anteile der Varianz, der standardisierten beobachteten Merkmale, die sich nicht durch gemeinsame Faktoren erklären lassen.

Mittels der Ladungsmatrix  $L$  lässt sich eine reduzierte Korrelationsmatrix reproduzieren. Diese ergibt sich mit  $k_j^2 = 1 - \delta_j^2 = l_{j1}^2 + \dots + l_{jq}^2$  für  $j = 1, \dots, p$  im Falle orthogonaler Faktoren zu

$$L \cdot L^T = \begin{pmatrix} k_1^2 & r_{12} & \dots & r_{1p} \\ r_{12} & k_2^2 & \dots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{1p} & r_{2p} & \dots & k_p^2 \end{pmatrix} = R - U \cdot U^T \quad (2.24)$$

Die Größen  $k_j^2$  werden auch als Kommunalitäten (empirische bzw. geschätzte Kommunalitäten, wenn  $L$  aus einer Stichprobe geschätzt wurde) bezeichnet. Die Kommunalität  $k_j^2$  gibt an, welcher Anteil der Varianz des  $j$ -ten standardisierten Merkmals durch gemeinsame Faktoren erklärt wird. Im Fall von  $q$  gemeinsam korrelierten (schiefwinkeligen) Faktoren mit der Korrelationsmatrix

$$R_F = \begin{pmatrix} 1 & r_{F_1 F_2} & \dots & r_{F_1 F_q} \\ r_{F_1 F_2} & 1 & \dots & r_{F_2 F_q} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{F_1 F_q} & r_{F_2 F_q} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

lassen sich wie im orthogonalen Fall die Kommunalitäten bestimmen. Bezeichnet  $L = (l_{jk})$   $j = 1, \dots, p, k = 1, \dots, q$  die Ladungsmatrix, so ergibt sich die Kommunalität  $k_j^2 = 1 - \delta_j^2$  des  $j$ -ten standardisierten Merkmals für  $j = 1, \dots, p$  aus

$$\tilde{R} = R - U^2 = L \cdot R_F \cdot L^T \quad (2.26)$$

zu

$$k_j^2 = \sum_{k=1}^q l_{jk}^2 + 2 \sum_{k=1}^{q-1} \sum_{k'=k+1}^q l_{jk} l_{jk'} r_{F_k F_{k'}} \quad (2.27)$$

Bei der Hauptkomponentenanalyse (principal component analysis (PCA)) geht man vom Fehlen merkmalseigener Varianzen aus und arbeitet daher mit der ursprünglichen Korrelationsmatrix  $R$ . Dabei werden die  $p$  beobachteten, abhängigen Merkmale in  $p$  unabhängige Komponenten transformiert und dabei  $q$  wesentliche Merkmale ausgewählt. Letztendlich ist die Hauptkomponentenanalyse eine Methode sowohl zum Erkennen von Strukturen, als auch zur Datenreduktion. Bei einer  $n \times 2$  Datenmatrix kommt, bezogen auf das grafische Vorstellungsvermögen, durch die Transformation und Drehung in die Hauptachsen

der Ellipsen. Falls mehr als 2 Merkmale verwendet werden, ergibt sich ein mehrdimensionales Ellipsoid. Sie ist daher eine eher formale Analyseverfahren. Sie basiert auf der Idee der Maximierung der Varianzen je Komponente, weil man sich hiervon den größten Informationsgehalt erwartet. Die Aufakkumulation der Varianzen je Faktor wird so lange durchgeführt, bis ein hinreichend großer Informationsgehalt aus den Komponenten beschrieben werden kann.

Formal entspricht die Transformation in Folge der PCA einem Eigenwertproblem. Der Ladungsvektor  $l_k$  der Komponente  $k_k$  entspricht gerade dem normierten Eigenvektor ( $l_k^T \cdot l_k = 1$ ) zum  $k$ -größten Eigenwert  $\lambda_k$  der empirischen Korrelationsmatrix  $R = \frac{1}{n-1} \cdot Y_{st}^T \cdot Y_{st}$  und die Transformation ist eindeutig, falls alle Eigenwerte  $\lambda_1 < \dots < \lambda_p$  von  $R$  verschieden ist. Da  $R$  eine empirische Korrelationsmatrix ist, ist diese Eindeutigkeit der Transformation in der Praxis wegen  $n > p$  quasi immer erfüllt. Die unkorrelierten, orthogonalen Komponenten entstammen dann einer Grundgesamtheit mit normierten Verteilungen (Erwartungswert Null und Varianz 1). Anhand der Eigenwerte  $\lambda_k$  von  $R$  kann man nun feststellen, wie groß der Anteil der Varianz der standardisierten Merkmale ist, der durch die  $k$ -te Komponente erklärt wird. Eine unverbindliche Empfehlung ist, jene Anzahl an Komponenten zu wählen die gerade 90% der Gesamtvarianz erklären [HE86, S. 529f]. Die theoretischen Grundlagen der Faktoren und der Hauptkomponentenanalyse sind aus den Büchern [Thu47], [HE86, Kapitel 8, S. 505-533], [HS03, Kapitel 9, S. 233-273], [Bil99, Kapitel 10, S.161ff, Kapitel 13, S.206ff] entnommen<sup>4</sup>.

### 2.6.3 Normalverteilung

In vielen Fällen statistischer Analysemethoden wird oftmals eine Normalverteilung angenommen. In diesem Kapitel wird daher ganz kurz auf verwendete Testverfahren der Normalverteilung eingegangen. Wenn beispielsweise keine Normalverteilung vorliegt ist der Rangkorrelationskoeffizient zu verwenden. Die Auswertung wurde mit 2 Testverfahren durchgeführt. Dabei wurde der Anderson-Darling-Test einerseits und der Kolmogorov-Smirnov-Test andererseits verwendet. Der Anderson-Darling-Test wirkt stärker bei der Ablehnung der Nullhypothese, eine Bestätigung der Nullhypothese bedeutet nicht zwingend, dass das untersuchte Merkmal normalverteilt vorliegt. Anderson-Darling wirkt bei Ablehnung daher stärker als Kolmogorow-Smirnow. Der Parameter  $A_{stat}$  führt daher unter Berechnung von (2.28)

<sup>4</sup>Die in diesem Kapitel aufgeführten Variablen werden nicht im Symbolverzeichnis aufgeführt.

$$A_{stat}^2 = -n - S \quad (2.28)$$

mit

$$S = \sum_{k=1}^n \frac{2k-1}{n} [\ln F(Y_k) + \ln(1 - F(Y_{n+1-k}))] \quad (2.29)$$

zur Alternativhypothese (nicht normalverteilt) falls  $p_{sig}$  kleiner dem Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$  vorliegt. Der Anderson-Darling-Test wird ab Stichprobenumfänge größer 8 eingesetzt.

Der Kolmogorow-Smirnow-Test basiert auf die Überprüfung hinsichtlich Ähnlichkeit zweier unterschiedlicher Verteilungen. Er vergleicht die empirische Verteilungsfunktion  $F_n$  mit  $F_0$  unter Zuhilfenahme einer Teststatistik.

$$d_n = \|F_n - F_0\| = \sup_x |F_n(x) - F_0(x)| \quad (2.30)$$

mit sup für Supremum.

Wenn die beiden Verteilungen hinreichend stark übereinstimmen, ist die Nullhypothese bestätigt [HE86, S.183ff, S520ff].

## 2.7 Kurzzusammenfassung Theorie

In den vorangegangenen Kapiteln wurden eine Reihe von Methoden dargestellt, die für die Lösung von regelungstechnischen Problemen grundsätzlich in Frage kommen. Dazu wurden anfangs ein paar wenige Begriffe definiert, die innerhalb dieser Arbeit verwendet werden. Verschiedene Systemklassen wurden logisch angeordnet in einem Baumdiagramm dargestellt. Es gibt statistische und dynamische, wertkontinuierliche und wertdiskrete sowie zeit- und ereignisgetriebene Systeme. Kombinationen aus diesen Fällen treten oft auf. Blasfolienextrusionsanlagen haben am Prozesseingang eine Dosieranlage, die diskontinuierlich mit Material gefüllt wird. Obwohl der gesamte Prozess kontinuierlich abläuft und nur am Prozesseingang und am Prozessausgang die Kontinuität nicht vorhanden ist, diese Eigenschaft aber auf die Produktqualität keinen Einfluss hat, wurden diese Anlagenteile in den Analysen nicht berücksichtigt. Nach dieser Vereinfachung handelt es sich nun um

ein dynamisches wertkontinuierliches System. Im Kapitel über die Vorgangsweise zur Ermittlung von Anlagenparameter wird nochmals deutlich, dass zwischen einem Modell und der Realität ein Unterschied besteht. Auch bei der Begriffsdefinition der Modellvalidierung wird darauf indirekt hingewiesen. Punkt 1 der Vorgehensweise, die Prozessanalyse wurde im Zuge dieser Arbeit durchgeführt, der zweite Punkt ist die Modellbildung. Auch bei der Modellbildung gibt es verschiedene Möglichkeiten. Bei der theoretischen Modellbildung (white-box model) muss umfassendes Wissen über Prozess, Chemie und Physik vorhanden sein. Die Verknüpfung verschiedener technischer Disziplinen sind eine herausfordernde, themenübergreifende Aufgabe und erfordern tiefgreifendes Prozessverständnis. Weitere Überlegungen der Modellbildung im experimentellen Bereich im Rahmen des bright grey-box model führen im Wesentlichen zu den gleichen Voraussetzungen wie bei der theoretischen Modellbildung. Die Modellparameter werden hierbei über Versuche identifiziert, ein Modell wird als bekannt vorausgesetzt oder ist vorher schon ermittelt worden [Lun03, S. 73]. Exemplarisch für diese Art der Modellbildung wurden die Verfahren der Frequenzgangmessung, der Fourieranalyse, der Korrelationsanalyse, der Parameterschätzung und der Kennwertermittlung kurz umschrieben. Jedes dieser Verfahren hat seine eigenen Durchführungsvoraussetzungen, die in Tabelle 2.1 aufgelistet sind. Die letzte in

**Tabelle 2.1:** Untersuchung der Durchführungsmethoden

Oberbegriff	Detail	Durchführungsvoraussetzung
Theoretische Modellbildung	mathematische Formulierung der Modelle	interdisziplinäres Wissen über Technik und Rohstoff
Experimentelle Modellbildung	Frequenzgangmessung (nicht parametrisch)	vorhandenes Modell, Messung erforderlich
	Fourieranalyse (nicht parametrisch)	linearität, Messen erforderlich, definierte Testsignale
	Korrelationsanalyse (nicht parametrisch)	Offener Regelkreis, vorhandenes Modell, Messen erforderlich
	Kennwertermittlung (parametrisch)	Modell voranden, kleines Störsignal, Messen erforderlich
	Parameterschätzmethode (parametrisch)	Modell erforderlich, Messen erforderlich
Statistik	künstliche neuronale Netze (parametrisch)	Spezielle Testdatensätze erforderlich, Neuronen Modell nötig
	Statistische Korrelation	Normalverteilung, Linearität
	Hauptkomponentenanalyse	Normalverteilung

dieser Arbeit beschriebene Modellbildungsart ist mithilfe von künstlichen neuronalen Net-

zen. Diese Modellbildung auf maschinellm Weg zählt ebenfalls zu den experimentellen Modellbildungsvarianten (black-box). Dem neuronalen Netz werden Testdatensätze am Eingang zur Verfügung gestellt, damit es selbstständig lernen kann. Allerdings ist ein Zugriff auf bestimmte Parameter nicht möglich, die Logik ist nicht zurückrechenbar. Über die Modellbildung hinaus ist eine statische Analyse zwischen dem Eingangs- und Ausgangsverhalten möglich. Dies zielt auf Zusammenhänge zwischen Parametern des Rohstoffes und des Produktes durch Korrelation ab. Hier beginnt der statistische Teil, der aber nur dann zielführend ist, wenn die Eingangsparameter gut verteilt und qualitativ hochwertig sind. Die Hauptkomponentenanalyse versucht diese Zusammenhänge ebenfalls zu ermitteln und es wurde hier auch beschrieben, welche Gedankengänge und Überlegungen dahinter stehen. Die Verteilungstests sind die wesentlichsten Tests, da auf diesen Tests alle Folgeüberlegungen basieren. Am Ende von Kapitel 3 wird auf die Tabelle nochmals Bezug genommen. Es wird sich zeigen, dass letztendlich nur die statistische Analyse zu Ergebnissen führt, die später in Kapitel 6 diskutiert werden. Im folgenden Kapitel werden die einzelnen Prozessabschnitte der Anlage detaillierter beschrieben.

# 3 Ermittlung vorhandener Information

Für die Identifikation des Produktionsprozesses und die Ermittlung zugehöriger Anlagenparameter ist die Darstellung vorhandener Information über Produkt, Rohstoff, Prozess und Umgebungsbedingung von großer Relevanz. In den folgenden Kapiteln werden daher die entsprechenden Informationen über diese Kernabschnitte behandelt, ohne die eine Analyse nicht möglich ist.

## 3.1 Produktbezogene Informationen

### 3.1.1 Produkt

Die produzierte Folie ist ein Zwischenprodukt. Sie wird durch den Kunden mittels themobondieren mit einem Schutzvlies versehen und in weiterer Folge als Dachunterspannbahn in der Bauindustrie eingesetzt. Diese Membran ist durchlässig für Wasserdampf, aber nicht für Wasser in flüssiger Form. Solche Funktionsfolien werden auch als "atmungsaktiv" bezeichnet (Abbildung 3.1). Die Funktionsfolie wird auf einer Hülse aufgerollt. Eine gemäß der Wunschlänge aufgerollte Folie wird auch als Rolle bezeichnet. Als Thermobondieren ist ein Verfahren zu verstehen, welches durch Heizen zweier Walzen das Schutzvlies beidseitig der Membranfolie verschweisst [AFK00], [Tec70, Seite 3].

### 3.1.2 Produktparameter

**WDD** wird als Wasserdampfdurchlässigkeit bezeichnet. Sie ist eine im Labor zu ermittelnde Messgröße und wird in  $\text{g}/\text{m}^2\text{a}$  gemessen [LP07b].

Sie gibt jene Menge Wasserdampf an, die bei definiertem Luftfeuchtegefälle und definierter Temperatur in 24 Stunden durch eine Fläche von  $1 \text{ m}^2$  hindurchtritt [DIN01].



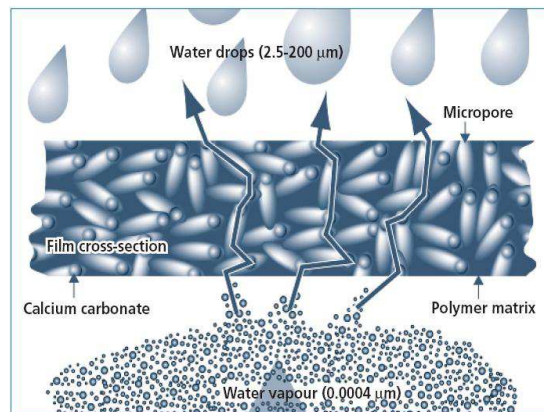


Figure 1: Schematic diagram of how a breathable film functions.

**Abbildung 3.1:** Prinzipbild für Wasserdampfdurchlässigkeit [Tec70, Seite 3]

Während niedrige Werte vor allem in der Nahrungsmittelindustrie bevorzugt werden, sind hohe Werte bei gleichzeitiger Wasserundurchlässigkeit, atmungsaktive Folien bevorzugt in der Kleidungs- (Regenmäntel) und Bauindustrie. Allgemein gibt es einen Zusammenhang zwischen Dicke der Folie und der Wasserdampfdurchlässigkeit. Darüberhinaus existiert ein positiver Zusammenhang zur Temperatur (steigende Temperatur, steigender WDD). Auch die Kristallinität des Polymers spielt eine entscheidende Rolle [Nen94, S. 85f]. Für reines Polypropylen sind übliche Werte für Wasserdampfdurchlässigkeit im Bereich bei ca.  $100 \text{ g/m}^2\text{d}$  [PE08, S. 91]. In Abbildung 3.1 ist die halbdurchlässige Folie dargestellt. Calcium carbonate ist der Kreideanteil, die Polymermatrix entspricht dem Polypropylen, Micropore sind die aufgerissenen Löcher, wo der Wasserdampf (Water vapour) aber nicht die Wassertropfen (Water drops) durchdiffundieren kann.

**Dicke** entspricht der Folienstärke des Endproduktes und wird in  $\mu\text{m}$  angegeben. Sie wird kontinuierlich beim Endprodukt gemessen [LP07e].

**Reißdehnung** wird in % angegeben, die **Reißfestigkeit** wird in  $\text{N/mm}^2$  angegeben, die entsprechenden Werte werden über Zugversuche im Labor auf einer dafür geeigneten Prüfmaschine durchgeführt. Bei der Durchführung der Messung wird die Probe zerstört. Als Messgerät wird die sogenannte Zwickprüfmaschine verwendet. Die auch als Bruchdehnung bezeichnete Eigenschaft (Reißdehnung) entspricht der Dehnung des Prüfstreifens beim Abriss. Das Ergebnis ist geschwindigkeitsabhängig, eine falsche Geschwindigkeit kann daher das Ergebnis verfälschen. Besonders wenn gereckt wird, nimmt die Reißdehnung

in Quer- und Längsrichtung unterschiedliche Werte an [Nen94, S. 70], [LP07d], [Zwi00], [EI96], [Gmb09c].

**Flächengewicht** wird aus herausgeschnittenen Probekörper mit genau  $1\text{dm}^2$  ermittelt, die je nach Prüfplan, einzeln oder gesamt auf die Analysenwaage gelegt und gewogen werden. Der abgelesene Wert in mg ist mit 100 zu multiplizieren und ergibt das Flächengewicht in  $\text{g/m}^2$ . Aus den so erhaltenen Einzelwerten ist der arithmetische Mittelwert zu berechnen, außer es müssen laut Produktspezifikation Einzelwerte angegeben werden. Das Flächengewicht ist von der Dichte des Rohstoffes und der Dicke der Folie abhängig. Dieser Parameter ist in der Praxis vor allem hinsichtlich ökonomischer Überlegungen kundenseitig von Relevanz [Nen94, S. 68f], [LP07c], [LP09].

**Wassersäule** gibt an, ab welchem Wasserstand Wasser durch die Membranfolie gedrückt wird. Sie wird in mm Wassersäule angegeben [LP07a].

**Flächenschrumpf** ist eine Eigenschaft der Folie innerhalb eines Abkühlprozesses. Dabei wird angegeben, um wieviel sich die Quer- und Längsneigungen in Abhängigkeit von der Temperatur ändern. Dieser Flächenschrumpf wird in % gemessen [LP07f]. Beim Verstrecken werden die Folien erhitzt und ziehen sich während des Abkühlvorgangs wieder zusammen (Schrumpfvorgang, Schrumpffolien). Die Orientierung der Makromoleküle wird dabei eingefroren. Der Abkühlvorgang soll daher sehr rasch erfolgen. Typische Schrumpftemperaturen liegen bei  $65\text{-}160^\circ\text{C}$ . Der Schrumpf kann durchaus zwischen  $60\text{-}80\%$  liegen. Polypropylenfolien haben eine starke Schrumpftneigung bei guten mechanischen Eigenschaften [Nen94, S. 98].

**Breite** entspricht der Folienbreite nach dem Aufrollen und wird in m angegeben.

**Folienlänge** ist die auf eine leere Hülse aufgerollte Folienbahnlänge. Sie wird in lfm gemessen und während des Produktionsprozesses automatisiert ermittelt [LP07g].

**Optik – Stippen** werden auch „Fischaugen“ oder Gelteilchen genannt und sind isolierte Verunreinigungen in der Folie mit einem erhöhten Risiko für Folienabrisse [Nen94, S. 38].

Sämtliche Prüfungen werden nach einem festgelegten Schema, dem Prüfplan durchgeführt und im Produktionsbericht vermerkt [LP09]. Wenn die entsprechenden Laufmeter der Rolle erreicht worden sind, wird ein Streifen der Folie über die Breite der Rolle entfernt und zur Vermessung ins Labor gebracht. Alle nicht direkt an der Anlage gemessenen Werte werden demnach im Labor und nach der Rollenproduktion vermessen.

## 3.2 Rohstoffbezogene Informationen

### 3.2.1 Rohstoff

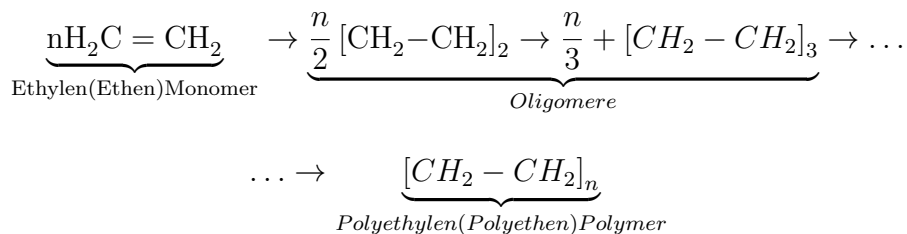
Als Rohstoff wird ein eigens für den Hersteller entwickeltes Kunststoffgranulat verwendet, dem Polypropylencompound (PPC). Es handelt sich dabei um feinkörniges Material aus Polypropylen (PP), mit einem hohen Anteil an Kreidekörner einerseits und additiven Bestandteilen andererseits. Welche additiven Bestandteile grundsätzlich in einem derartigen Rohstoff eingebracht werden wird in Kapitel 3.2.5 beschrieben. Die in dem letzten Kapitel genannten Produktparameter sind nahe an der physikalischen Grenze. Daher sind die Zielvorgaben des Produktes in den Rohstoffbetrachtungen zu berücksichtigen. Beispielsweise ist der gewünschte WDD Wert nicht mehr ohne Zusatzstoffe zu erreichen.

### 3.2.2 Polymerisation

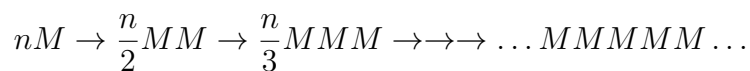
Kunststoffe sind hochmolekulare organische Verbindungen, die entweder durch Abwandeln hochmolekularer Naturstoffe oder durch chemische Aneinanderlagerungen niedermolekularer Grundbausteine, sogenannte Monomere, durch verschiedenartige chemische Reaktionen entstehen. Demgemäß unterscheidet man zwischen abgewandelten Naturstoffen und synthetischen Kunststoffen. Die synthetischen Kunststoffe sind verbreiteter und vielfältiger. Die Vielfalt erklärt sich aus der großen Zahl von Möglichkeiten bei der Auswahl monomerer Bausteine und den verschiedenen Arten ihrer Aneinanderlagerung zu hochmolekularen Ketten (linear, verzweigt, vernetzt). Forschung und Technik erschließen vereinzelt noch neue synthetische Kunststoffe, die Zahl der chemischen Modifikationen

bestehender Kunststoffe durch Copolymerisationen oder Mischen (blending) überwiegt jedoch zwischenzeitlich bei weitem. Kunststoffe (Polymere) sind Werkstoffe; die Kunststoffkunde ist somit ein Teil der Werkstoffkunde. Werkstoffe sind für die Konstruktion nützliche feste Stoffe, die sich technisch, wirtschaftlich, umweltlich und physiologisch gut verarbeiten, anwenden und zurückgewinnen lassen. Kunststoffe sind Werkstoffe »nach Maß« mit allen Chancen und Risiken aus dieser Anpassungsfähigkeit [PE08, S. 1]. Im Folgenden wird kurz der Prozess der Polymerisation beschrieben.

*Unter bestimmten Bedingungen (z. B. Hitze, Druck, Katalysator) entsteht aus dem Gas Ethylen – formal über Di-, Tri-, Tetramere, usw. – der feste Kunststoff Polyethylen:*



*Bei diesem als Polymerisation bezeichneten Vorgang verknüpft sich Ethylen mit seinesgleichen zur makromolekularen Verbindung Polyethylen. Ethylen wird als das Monomere bezeichnet, Polyethylen ist dementsprechend das Polymere. Die dazwischenliegenden Stufen, Di-, Tri-, Tetra-, Pentamere usw. werden unter dem Begriff Oligomere zusammengefasst. Monomere(M) bilden die Wiederholungseinheiten der Oligo- und Polymere, wie es die allgemeine Gleichung einer Polymerisation formuliert:*



*Neben der Polymerisation führen auch andere Reaktionstypen wie Polyadditionen und Polykondensationen zu Polymeren [BJ09, Kapitel 36 Seite 755ff].*

Diese langkettigen Verbindungen sind Grundvoraussetzung für blasfähiges Material [Mat07, S. 20].

### 3.2.3 Rohstoffbetrachtungen hinsichtlich Verarbeitbarkeit

Nicht jeder Rohstoff eignet sich für die Verarbeitung an Blasfolienextrusionsanlagen. Einen wesentlichen Anteil von Fließeigenschaften beim Schmelzen hat die Temperatur, die Gestalt von Molekülsegmenten, Verhakungs- und Verzweigungsgrad, Molmasse und Molmassenverteilung. Zentraler Gegenstand der Wissenschaft für die Deformation ist das Beschreiben, Erklären und Messen von Fließeigenschaften von Stoffen. Diese Disziplin nennt man Rheologie. Bei der Kunststoffverarbeitung müssen die verarbeiteten Werkstoffe in aller Regel im fließfähigen Zustand vorliegen, dies geschieht im thermoplastischen Bereich durch aufschmelzen. Die Viskosität ist ein Maß für den inneren Widerstand des Werkstoffes gegen eine während des Fließens stetig wirkende Kraft [DIN03a]. Während des Fließprozesses in den Verarbeitungsmaschinen wird der Werkstoff hauptsächlich geschert [PE08, S.219]. Der Rohstoff besteht zu einem wesentlichen Anteil aus Kreide. Der Grund für die Beimengung liegt in den Eigenschaften des Polypropylen. Wird ausschliesslich dieses gestreckt, wird es nur lang. Wenn Kreide Teil des Rohstoffes ist, reißt beim verstrecken das Polypropylen an den Kreidekörnern auf und es entstehen dadurch kleinste Mikrolöcher, welche für die Wasserdampfdurchlässigkeit verantwortlich sind. Zwei verschiedene Kreidetypen sind im Anhang aufgelistet (Tabelle A.1). Mit dem Hinzufügen von Kreideteilchen sinkt die Reißfestigkeit des Produktes. Weitere Eigenschaften im thermodynamischen Bereich, die für den Aufheiz- und Abkühlvorgang von Relevanz sind, sind in [Lie03, S. 702] notiert. (Dichte, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit)

### 3.2.4 Rohstoffparameter

Granulate können mit einer Vielzahl an Parameter beschrieben werden. Welche dafür am besten geeignet sind, ist eine Entscheidung des Herstellers. Aus der Summe sämtlicher Parameter wurden jene ausgewählt, die zur Beschreibung von Kunststoffgranulaten am besten geeignet schienen. Sehr viele mögliche Parameter sind im Buch *Kunststoff Folien Herstellung - Eigenschaften - Anwendung* angegeben [Nen94, Seite 20ff].

**MFR** ist die englische Bezeichnung für Schmelz-Massenfließrate und steht daher für Melt Flow Rate. Sie wird in  $\text{g}/10_{\text{min}}$  angegeben. Für PP (Polypropylen) gilt  $\text{MFR}(230^\circ\text{C}/2,16\text{kg})$  während für HDPE (High Density Polyethylen)  $\text{MFR}(190^\circ\text{C}/2,16\text{kg})$  gültig ist [DIN05], [AD70]. Das Messverfahren ist in der Norm DIN1133 - Kunststoffe - Bestimmung der

Schmelze-Massefließrate (MFR) und der Schmelze-Volumenfließrate (MVR) von Thermoplasten (ISO 1133:2005); Deutsche Fassung EN ISO 1133:2005 genau festgelegt und in einem Prüfbericht festgehalten.

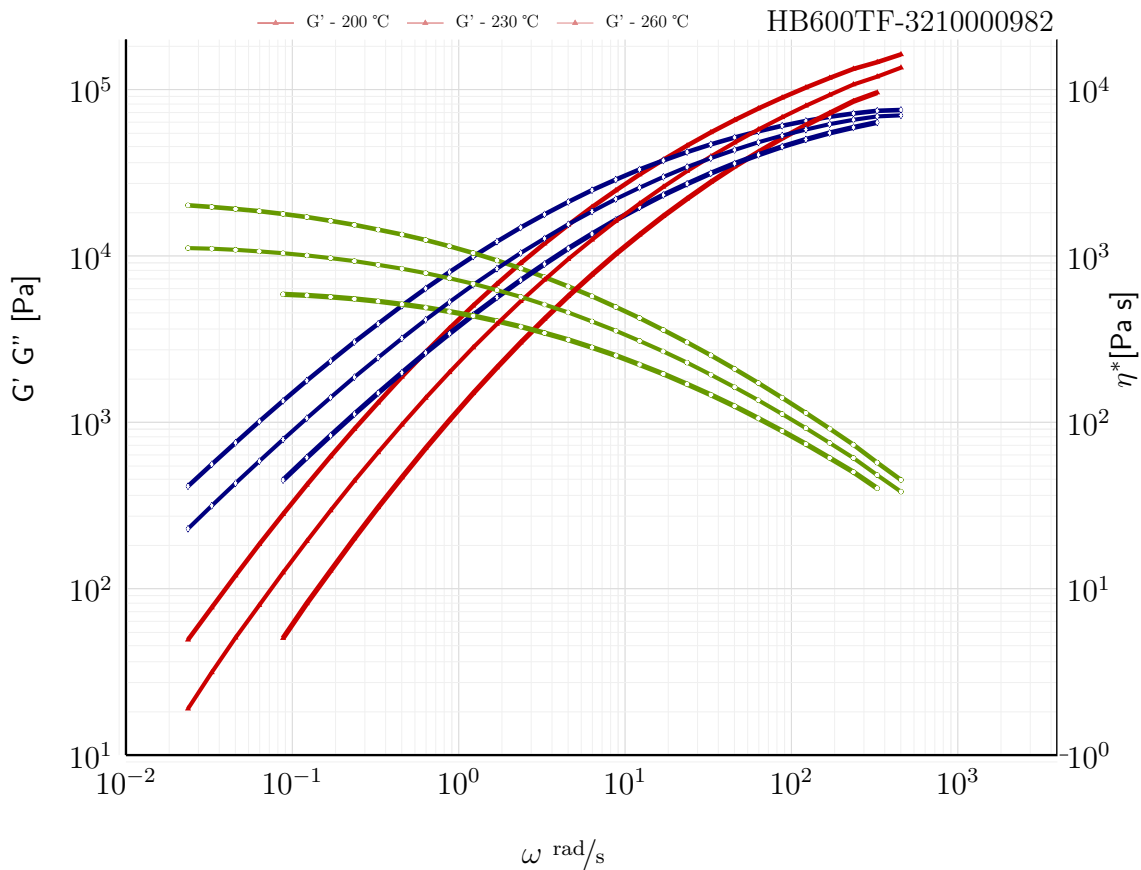


Abbildung 3.2: Beispielscherkurven<sup>5</sup>

Die Norm beschreibt den MFR folgendermaßen.

**Schmelze-Massefließrate MFR** die Geschwindigkeit der Extrusion eines geschmolzenen Kunststoffes durch ein Extrusionswerkzeug von festgelegter Länge und festgelegtem Durchmesser unter vorgeschriebenen Bedingungen hinsichtlich Temperatur, Belastung und Lage des Kolbens im Zylinder eines Extrusionsplastometers, bestimmt durch die in einer festgelegten Zeit extrudierten Masse [DIN05, Kapitel 3, Seite 5].

Der Begriff MFR ist heute auch noch unter dem Begriff MFI bekannt welcher Melt Flow Index bedeutet und eine alte Bezeichnung darstellt. Der MFR ist ein einzelner Punkt auf der sogenannten Scherkurve. Die Ermittlung des MFR entspricht der Messung der Viskosität. Da jedoch bei viskoelastischen Flüssigkeiten die Fließkurven nicht linear sind, ändert sich die Viskosität mit der Scherrate. Zusätzlich ist die gemessene Viskosität  $\eta^*$  komplex und setzt sich demnach aus einem Realteil  $\eta'$  und einem Imaginärteil  $\eta''$  zusammen.

$$\eta^* = \eta' + i \cdot \eta'' \quad (3.1)$$

Diese Größen betrachten den Stoff als Flüssigkeit. Sie stehen mit dem Schubmodul  $G^*$  in Verbindung, welcher den Stoff als Festkörper ansieht.

$$G^* = G' + i \cdot G'' \quad (3.2)$$

Der Zusammenhang ist über Gleichung (3.3)

$$G^* = i \cdot \omega \cdot \eta^* \quad (3.3)$$

gegeben.

Die Messung von Realteil und Imaginärteil ist nur mit Hilfe von Oszillations- oder Kriech-Erholungs-Versuchen durchführbar (Siehe Beispielkurven). Die genormten Messapparaturen, welche den MFR bestimmen, sind dazu nicht geeignet. Da die Messung von solchen Kurvenscharen sehr aufwendig ist, wird sie von den Lieferanten nicht zur Qualitätssicherung durchgeführt und liegt deswegen auch nicht vor. Die Messung des MFR entspricht einem einzigen Punkt einer  $\eta^*$ -Kurve. Dieses Diagramm dient als Beispiel, wie Scherkurven prinzipiell aussehen (Abbildung 3.2). Da der MFR nur ein Punkt auf der Scherkurve ist, kann auch dessen Aussagekraft nur begrenzt sein [Nen94, Grundbegriffe, Seite 22]. Die Einheit, in welcher der MFR gemessen wird, ist g/10 min. Materialien mit einem MFR  $> 5$  sind in Blasfolienextrusionsanlagen wegen der zu geringen Schmelzsteifigkeit nicht mehr verarbeitbar. Die Größe des Wertes hat Auswirkungen auf Extrusionsparameter wie beispielsweise Druck und Temperatur (siehe Tabelle A.5 im Anhang).

<sup>5</sup>Fa. Borealis Gmbh. Bernhard Knogler

**Glührückstand** ist der mineralische Anteil einer Substanz einer Probe. Organische Anteile verbrennen dabei und es bleiben allein anorganische, nichtflüchtige Oxide. Er wird mit % angegeben.

**Äußere Restfeuchte** ist jener Wert, der die Feuchtigkeit eines Granulatkorns an der Außenseite beschreibt. Die Feuchtigkeit ist im Gegensatz zum Wassergehalt - Karl Fischer außen und nicht innen. Durch Trocknen kann dieser Feuchtigkeitsanteil reduziert werden. Bei bestimmten Produktionsverfahren ist eine Vorbehandlung des Granulats zwingend. Sie wird mit % angegeben.

**Wassergehalt – Karl Fischer** wird auch als innere Feuchte bezeichnet. Damit wird die Feuchtigkeit im Inneren eines Granulatkorns beschrieben, die dafür geeignete Messmethode wurde nach Karl Fischer benannt [Fis35, Seite 48, 394]. Die innere Feuchtigkeit<sup>6</sup> kann durch keinen Prozess bezüglich Rohstoffverarbeitung vermieden werden. Sie wird mit ppm angegeben.

**Dichte** ist das Verhältnis von Masse eines Körpers zu seinem Volumen [Lid09, Definition of scientific terms, page 2-34]. Sie hat in Bezug auf das Granulat nur begrenzte Aussagekraft. Trotzdem wäre sie im Fall der korrekten Dosierung und auch bei der Kalibrierung des Dickenmessgeräts von Bedeutung. Sie wird in  $\text{g}/\text{cm}^3$  angegeben.

**Schüttdichte** ist vor allem in Bezug auf die volumetrische Dosierung interessant. Je größer die Schüttdichte ist, desto weniger Luft befindet sich zwischen den Granulatkörnern. Die Grenze liegt bei ca. 74 % des vollen Behälters. Das Problem ist in der Literatur als Keplersche Vermutung bekannt [Szp11]. Sie wird in  $\text{kg}/\text{l}$  angegeben.

Sämtliche Parameter werden vom Lieferanten im Werksprüfzeugnis angegeben. Ein Beispiel für ein Werksprüfzeugnis ist im Anhang zu finden (Abbildung 1.1)

<sup>6</sup>Während der Granulatherstellung möglich.



### 3.2.5 Rohstoffadditive

**Definition 3.1 :** Additiv

*Ist ein Zusatzstoff aus Polypropylen, das als Funktionsträger für bestimmte Eigenschaften des Endproduktes dient*

Sie werden zumeist in Anteilen  $< 5\%$  eingesetzt und verändern mechanische Eigenschaften nicht. Eine Übersicht über die Einteilung der Additive ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

**Definition 3.2 :** Masterbatch

*Masterbatch ist ein spezielles Kunststoffgranulat als Träger für Additivkomponenten, dessen Dosierung deutlich höher ist als im Endprodukt vorgesehen.*

**Definition 3.3 :** Flammschutzmittel

*Flammschutzmittel (oder Brandhemmer) sind Additive, welche die Ausbreitung von Bränden einschränken, verlangsamen oder verhindern sollen.*

In der Praxis wird dieses Additiv auch als Flammhemmer bezeichnet.

**Definition 3.4 :** Lichtschutzmittel

*Ist ein auf einem Additiv basierendes Pulver zur Erhöhung der Widerstandskraft gegen UV-Strahlung.*

In der Praxis wird dieses Additiv auch als UV-Stabilisator bezeichnet [GC03].

**Definition 3.5 :** Farbstoffe

*Farbstoffe sind Additive, zur Erzielung von Farbtönen.*

Die drei letztgenannten Additive kommen hauptsächlich in der analysierten Anlage zur Anwendung.

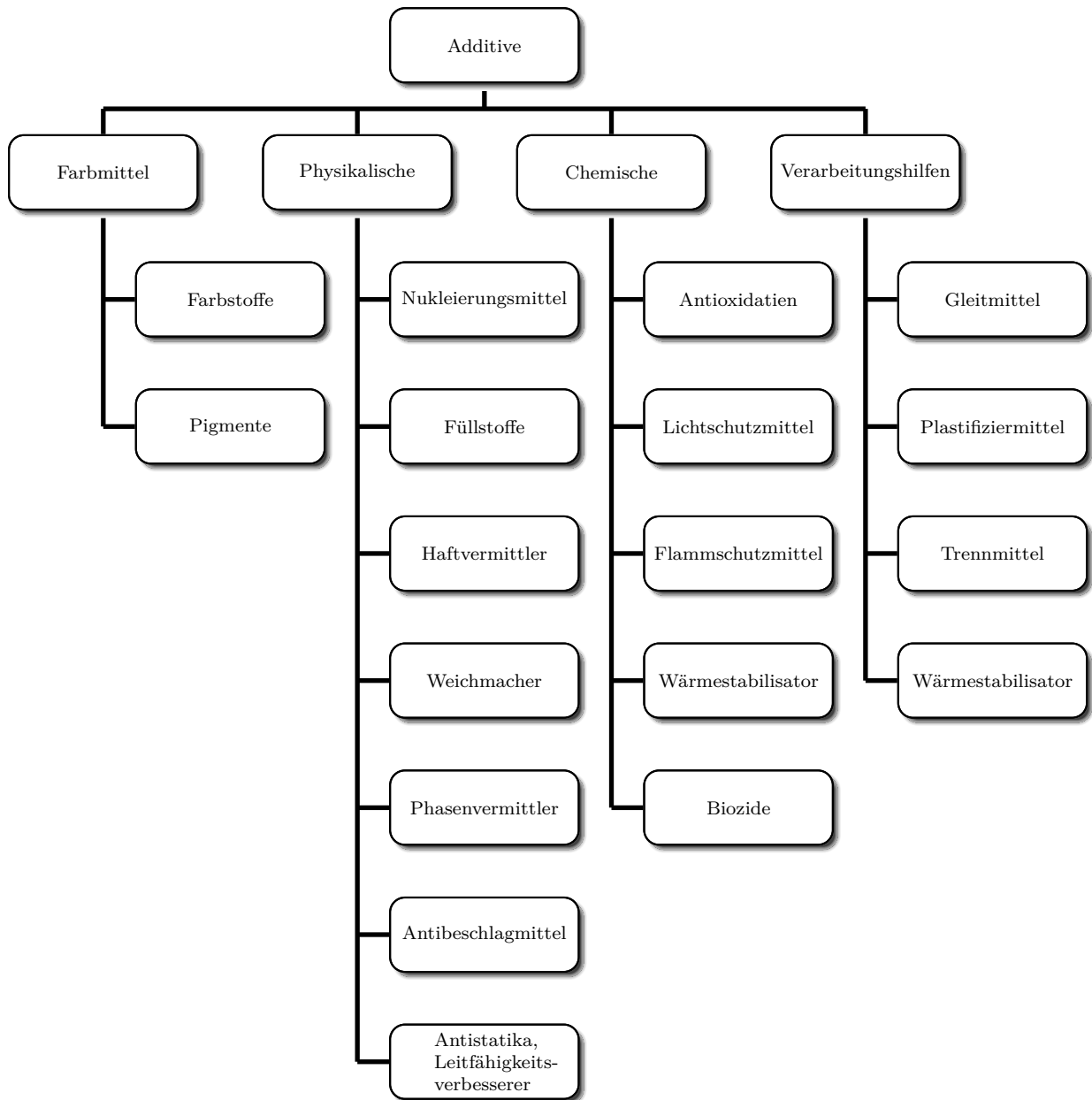


Abbildung 3.3: Einteilung der Additive [Eli03]

### 3.2.6 Rohstoffverfolgbarkeit

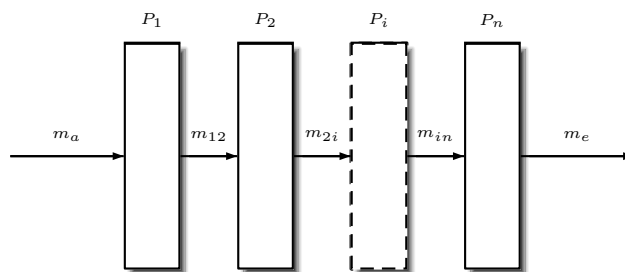
Das Verhältnis von Output zu Input beschreibt die Prozessfunktion. Es ist ein Masse-  
teilchen  $m_1$  (mass) mit bekannten Eigenschaften (properties)  $P_1$  am Prozessbeginn der  
Produktionskette bekannt. Alle ungeraden Indizes beziehen sich auf den Eingang, alle  
geraden auf den Ausgang eines Prozesses. So folgt aus dem Prozess von Input zu Output  
folgendes:

Auf das Tupel  $T_1(m_1, P_1)$  (tuple) wird ein Transformationsprozess unter Zuführung von  
Energie  $P(t)$  in endlicher Zeit durchgeführt, so dass wir  $T_2(m_2, P_2)$  erhalten, unter der  
Voraussetzung der Massenkonstanz für die gilt:

$m_1 - m_2 = 0$  (Massenkonstanz) und  $P_1 - P_2 \neq 0$  (Eigenschaften haben sich verändert).

$$T_1(m_1, P_1) \xrightarrow{P(t)} T_2(m_2, P_2) \forall T_i, T_{i+1} \dots i \in N, P(t)_i^{i+1} > 0, m_i - m_{i+1} = 0 \quad (3.4)$$

Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass die Eigenschaften untrennbar mit dem Masse-  
teilchen verknüpft sind. Weiters folgt, dass das Verhältnis von Ausgang zu Eingang der  
Transferfunktion entspricht. Diese grundlegenden Überlegungen führen dazu, dass exakt  
bekannt sein muss, welche Rohstoffeigenschaften zu welchem Endprodukt korrespondie-  
ren. Diese Überlegungen sind nichts anderes als der mathematisch formulierte Zweck der  
Anlage. Wenn allerdings dies der Zweck sei und die Prozessparameter optimiert werden  
sollen, so ist eine Aufzeichnung darüber welche Eigenschaften  $P_1$  existieren, eine not-  
wendige Voraussetzung für die Ermittlung der Prozessparameter. Diese Vorbedingungen  
wurden geprüft, entsprechen aber nicht den Gegebenheiten. Das Problem kann durch De-  
komposition und Vereinfachung aber trotzdem auf ein vertretbares Maß reduziert werden.  
In Abbildung 3.4 wird der Massefluss über mehrere Ebenen dargestellt.



**Abbildung 3.4:** Fluss des Masseteilchens über die Teilprozesse

Hier wird mit  $P_{1,2,i,n}$  der entsprechende Teilprozess bezeichnet, das Masseteilchen „fließt“ durch die Prozesse.

### 3.3 Anlagenbeschreibung

Die Anlage besteht aus einzelnen Produktionsprozessschritten die in der Tabelle 3.1 aufgelistet sind. Die Nummerierung in der Tabelle lehnt sich an die in der Einleitung verwendete Abbildung an. Diese wird in den folgenden Kapiteln verwendet und der entsprechende Prozessabschnitt farblich hervorgehoben. Für Organisation und Bau der in der Tabelle aufgelisteten Teile zeigt sich Firma Hosokawa Alpine verantwortlich. In den folgenden Kapiteln werden die entsprechenden Anlagenkomponenten in ihrer Funktionsweise und dem Zweck nach beschrieben.



**Abbildung 3.5:** 3D Ansicht einer Blasfolienextrusionsanlage [Pla11]

Zusätzlich wird dargelegt, welche allgemeinen Informationen und welche Messparameter zur Verfügung stehen. Weiters werden Ansätze der Berechnung eines Masseteilchen und deren Eigenschaften aber auch deren Einschränkungen dargestellt. Es wird festgehalten, dass dies ausschließlich Ansätze der Berechnung darstellt und die hier vorgestellten Berechnungsmöglichkeiten keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Die hier vermittelten Berechnungen sind Grundlage für die Bewertung der Analysemöglichkeiten in Kapitel

3.5. Die Dimension der Anlage wird in Abbildung 3.5 gezeichnet. Die Anlage ist ungefähr 25 Meter hoch, 4 Meter breit und 20 Meter lang und wurde für die Verarbeitung von polypropylen- und polyethylenbasierende Materialien konzipiert (PPC, HDPE). Sämtliche

**Tabelle 3.1:** Aufgegliederte Verfahrensschritte

Nummer	Anlagenbeschreibung	Kapitel
1-2	Förderung und Dosierung	Kapitel 3.3.1
3	Extrusion	Kapitel 3.3.2
4	Werkzeug	Kapitel 3.3.3
5-7	Kalibrierkorb	Kapitel 3.3.4
8-9	Wendestangenabzug	Kapitel 3.3.5
10	Reckwerk	Kapitel 3.3.6
11	Nachbearbeitung	Kapitel 3.3.7
12	Wicklung	Kapitel 3.3.9
13	Regranulierung	Kapitel 3.3.8

Abbildungen beschreiben eine Anlage im Produktionsbetrieb ohne Anfahr- und Abfahrverhalten. Eine Ausnahme bildet die Abbildung 3.16, die den Start des Produktionszyklus darstellt.

**Definition 3.6 :** Oktabin

*ist ein 8-eckiger Behälter aus verleimten Karton mit einem Fassungsvermögen von 1250 kg Kunststoffgranulat.*

**Definition 3.7 :** Alu-Inliner

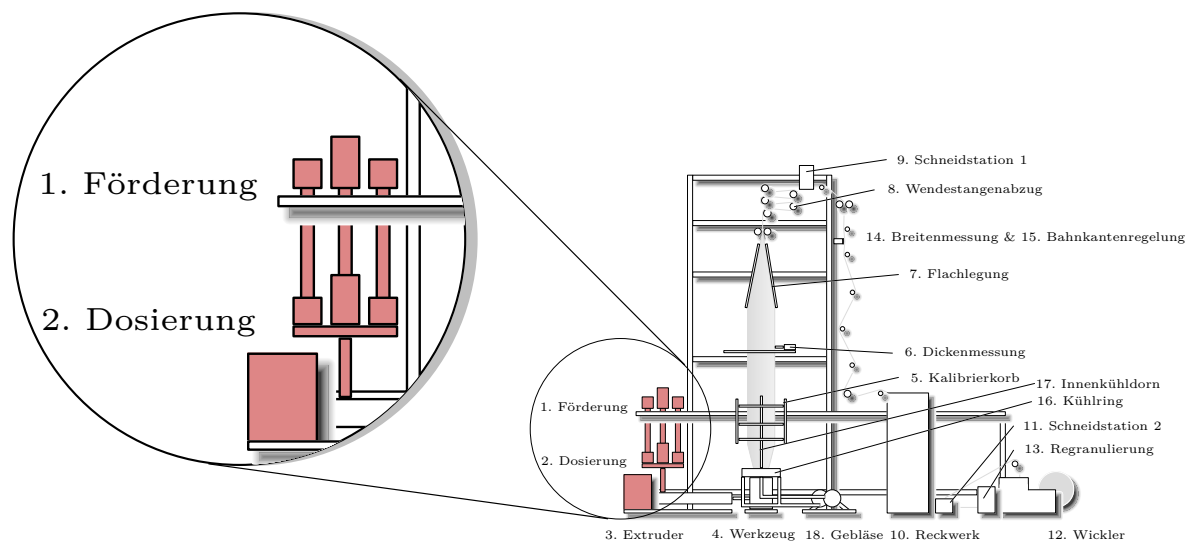
*ist eine in Oktabins enthaltene innere Beschichtung aus Aluminium, die den Zweck hat, die Wasseraufnahme durch Luftfeuchtigkeit von hygroskopischen Schüttgut zu vermeiden.*

### 3.3.1 Förderung und Dosierung

**Definition 3.8 :** Batch-Prozess

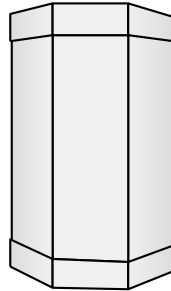
ist ein Spezialfall der diskontinuierlichen Produktion. Dabei wird eine durch das Fassungsvermögen des Produktionsgefäßes begrenzte Werkstoffmenge (Charge) als Ganzes dem Arbeitssystem zugeführt und ihm als Ganzes nach Abschluß des Produktionsprozesses entnommen [GT05].

Allgemein steht das genaue Dosieren der Ausgangsmaterialien am Beginn jedes Produktionsprozesses. Förder- und Dosieranlagen werden für hochgenaue Dosierung und Mischung von allen rieselfähigen, frei fließenden Materialien eingesetzt (z. B. Masterbatch, Additive, allgemeine Zusätze, Treibmittel). Die geregelte Materialzufuhr von Kunststoffen ist in der Folientechnologie sehr wichtig. Dabei unterscheidet man generell zwischen kontinuierlicher und diskontinuierlicher, volumetrischer und gravimetrischer Dosierung. Während bei der volumetrischen Dosierung ein konstanter Volumenstrom zugeführt wird, erfolgt dies bei der gravimetrischen Art und Weise durch einen durch Wiegezellen ermittelten Massenstrom. Dadurch werden Schwankungen im Schüttvolumen kompensiert. Auch hier hat sich die Technik weiterentwickelt, so dass die Kombination von Betriebsdatenerfassungssystemen für optimale Prozesskontrolle sorgt [Nen94, S. 32f], [PE08, S. 217].



**Abbildung 3.6:** Förderung und Dosierung, 1. Förderung, 2. Dosierung

Bei der Förderung und der Dosierung geht es um die Zufuhr des für das Produkt erforderlichen Rohstoffes. Dabei wird der Hauptbestandteil in Oktabins mit Alu-Inliner geliefert und neben der Anlage aufgestellt. Abbildung 3.7 zeigt ein derartiges Behältnis. Ein Schlauch pumpt das Granulat von diesem Behälter in die Dosieranlage. Die Befül-



**Abbildung 3.7:** Beispiel eines Oktabin

lung der Haupt- und Nebenbehälter aus den Oktabins erfolgt in einem diskontinuierlichen durch Wiegezellen gesteuerten Batch-Prozess. Der Hauptrohstoff und eventuell zum Einsatz kommende Additive werden innerhalb der Anlage vermengt. Die hier beschriebene Dosieranlage besteht aus vier Nebenbehältern und einem Hauptbehälter. Die Durchmischung erfolgt direkt unterhalb des Hauptbehälters in einem separaten Bereich. Die Inhalte der Nebenbehälter werden über Schneckenförderer dem Mischbehälter zugeführt. Im Nebenbehälter sind beispielsweise UV-Stabilisatoren, Flammschutzmittel und Farbstoffe. Die Dosierung zur nächsten Anlagenkomponente erfolgt über Wiegezellen und daher gravimetrisch.

Die **Berechnungsmöglichkeiten** sind über die Schneckendrehzahlen, die den Massestrom der Nebenbehälter repräsentieren auf Basis des Rezeptes möglich. Auch kann die in der Anlage automatisiert ermittelte Dichte laut Anlagendokumentation manuell<sup>7</sup> ermittelt werden [PC08].

Die **gemessenen Anlagenparameter** sind im Anhang in Tabelle A.4 notiert.

### 3.3.2 Extrusion

**Definition 3.9 :** Rheologie

*ist die Bezeichnung einer wissenschaftlichen Disziplin, die es sich zur Aufgabe gemacht*

<sup>7</sup> $MischDichte = \frac{KomponenteA + KomponenteB + \dots}{\frac{KomponenteA}{DichteA} + \frac{KomponenteB}{DichteB} + \dots}$

*hat Deformations und Fließeneigenschaften von Stoffen zu beschreiben, zu erklären und zu messen* [PE08, S. 219].

Sie behandelt das Thema nichtnewtonsche Fluide [DIN03c]. Der allgemeine Fall ist äußerst schwer theoretisch behandelbar. Die dabei erzielten auf Experimenten beruhenden Ergebnisse sind oft unzureichend oder unvollständig [Sig08, S. 21].

**Definition 3.10 :** hochmolekular

*bezeichnet eine Eigenschaft von Molekülen und ergibt sich aus der Summe der Atomeinzelmassen.*

Feste Polymere bestehen üblicherweise aus 10000 bis mehrere Mio. Monomeren. Flüssige Polymere können aus ein paar wenigen hundert Monomeren bestehen. Als Mindestgrenze für "hochmolekular" wird eine molare Masse von 1000 u angesehen.

**Definition 3.11 :** Viskosität

*ist ein Maß für den inneren Widerstand des Werkstoffes gegen eine während des Fließens wirkende Kraft* [PE08, S. 219], [DIN03a].

**Definition 3.12 :** strukturviskos

*ist eine Bezeichnung für Materialien, die Eigenschaften eines Nicht-Newtonschen Fluids haben und deren Viskosität mit steigenden Scherkräften sinkt (Gegenteil zu dilatant).*

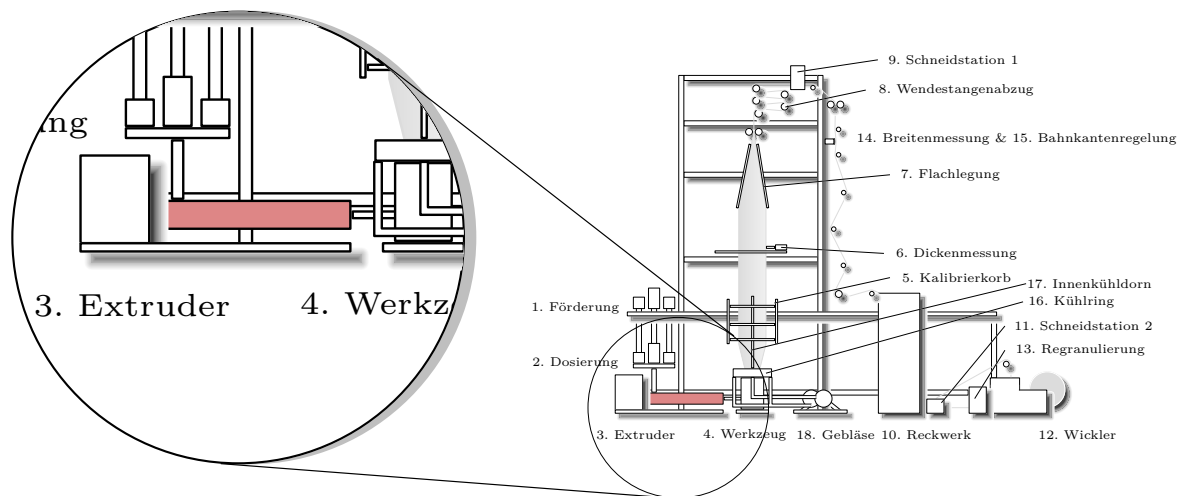
**Definition 3.13 :** tribologische Eigenschaften

*bezeichnen das Reibungsverhalten von wechselwirkenden Stoffen in relativer Bewegung zueinander.*

Der Extruder ist das Herzstück jeder Blasfolienextrusionsanlage. Das englische Wort „Extruder“ übersetzt bedeutet „Ausstoßmaschine für Werkstoffe“. Eine äquivalente und häufig verwendete Bezeichnung ist „Schneckenstrangpresse“. Dieses, in erster Linie für Füllstoffe verwendete Verarbeitungsaggregat, hat die Aufgabe polymere Formmassen kontinuierlich auszuformen. Die entsprechenden Konturen werden durch nachgeschaltete Werkzeuge erzeugt. Je nach Granulometrie, in Verbindung mit strukturviskosem Stoffverhalten der



zu verarbeitenden Polymerformmassen, kommen drehende (oder kolbenartige) Förder-systeme zum Einsatz. Entscheidend sind tribologische Eigenschaften (Wandgleiten, Haftbedingung) und bei hochmolekularen Kunststoffen die richtige Wahl der erforderlichen Temperatur für die Schmelzebildung. Auf die entsprechenden Komponenten Werkzeug und Kalibrierkorb wird in den folgenden zwei Kapiteln noch eingegangen. Die in der Theorie relevanten Meßeinrichtungen für Temperatur, Schmelzedruck, Drehmoment und Stromaufnahme, kommen in der Praxis zum Einsatz. Technisch überragende Bedeutung als Förderaggregat haben derzeit Ein- und Mehrfachschnellenpressen [MM03], [PE08, S. 250].



**Abbildung 3.8:** Extrusion, 3. Extruder, 4. Werkzeug mit Kühlung

Der vorliegenden Extruder wurde vom Hersteller als Stationär-Extruder bezeichnet. Zu den zuvor beschriebenen Aufgaben gehört im vorliegenden Fall auch die homogene Dispersion mit dem im Rohstoff enthaltenen Kreideanteil. Die Konzeption basiert auf 7 unterschiedlichen Temperaturzonen, die separat beheizt werden können. In den ersten 5 Abschnitten ist durch Gebläse eine Kühlung möglich. Das Sieb am Extrusionsende hat die Aufgabe, Rohstofffehlbildungen (bei der Polymerisation) oder Kreideklumpen herauszufiltern. In regelmäßigen Abständen wird dieses Sieb daher gereinigt. Automatische Siebwechselsysteme kommen in der vorliegenden Anlage nicht zum Einsatz [Hosf], [Hosc], [Hosb]. Das Fließverhalten von Polymerschmelzen ist wesentlich durch die Art der Ketten beeinflusst. Langkettenverbindungen machen die Verarbeitung dieses Rohstoffes durch Folienblasen erst möglich [Mat07, S. 20].

Die **Berechnungsmöglichkeiten** für die Extrusion bei polymeren Werkstoff wird in diesem Abschnitt beschrieben. Dabei werden ausgehend von der Theorie die notwendigen Berechnungsschritte dargestellt. Die Aufgabenstellung erreicht aufgrund verschiedener Umstände einen Komplexitätsgrad, der dazu führt, dass sich diese Aufgabenstellung nicht mehr geschlossen lösen lässt. Die Rheologie von reinem Polymerwerkstoffen ist gut erforscht und validiert worden. Diese Materialien sind während des Schmelzevorgangs in Bezug auf die Scherrate stark nichtlinear. Falls einzelne Partikel Teil des Werkstoffes sind, müssen diese in den grundsätzlichen Überlegungen berücksichtigt werden [Hor99, S. 159ff], [Mil59], [Pia96], [Han81]. Geeignete Messmethoden für die Charakterisierung rheologischer Eigenschaften von Polymerstoffen, sowie weitere Information und Literatur zu diesem Thema sind in [Mat07], [BC89], [BHA87] beschrieben.

### 3.3.2.1 Physikalische Grundgleichungen

Die physikalischen Grundgleichungen sind aus der Dissertation von Michael Cretu - Analyse, Auslegung und Optimierung von Wendelverteilersystemen entnommen, sowie mit der entsprechend in diesem Kapitel angeführten Fachliteratur untermauert [Cre08, S. 27ff].

Zur Beschreibung von charakteristischen Zuständen und Strömungen sind 3 stoffunabhängige Erhaltungsgleichungen für Energie, Masse und Impuls, sowie 2 stoffspezifische Gleichungen erforderlich. Die **Massenkonstanz** ist mithilfe der Kontinuitätsgleichung (3.5)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0. \quad (3.5)$$

beschrieben, wobei  $\rho$  die Dichte,  $t$  die Zeit und  $\vec{v}$  der Geschwindigkeitsvektor sind. Beim Übergang auf ein in der Strömung mitbewegtes Kontrollvolumen lässt sich die Kontinuitätsgleichung, unter Beachtung der Definition der substantiellen Ableitung der Dichte, nach Gleichung (3.6), gemäß Gleichung (3.7) ausdrücken:

$$\frac{D\rho}{Dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \rho, \quad (3.6)$$

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \vec{v} = 0. \quad (3.7)$$

Bei der **Impulserhaltung** wird ein infinitesimales in der Strömung befindliches Masselement bestehend aus Flüssigkeitsteilchen innerhalb eines abgeschlossenen Volumens betrachtet. Gemäß Newtonschem Grundgesetz der Mechanik gilt für dieses System, dass die Änderung des Impulses gleich der Summe, der auf das Kontrollelement von außen wirkenden Kräfte ist [Küm07, S. 78], [Tru09, S. 43].

$$\rho \left( \frac{D\vec{v}}{Dt} \right) = \rho \vec{g} + \nabla \cdot \underline{\sigma} \quad (3.8)$$

Der in der Gleichung (3.8) enthaltene Gesamtspannungstensor kann aufgeteilt werden, und zwar in die Spur von  $\underline{\sigma}$  und einem Extraspannungstensor  $\underline{\tau}$ .(3.9)

$$\underline{\sigma} = -p\underline{E} + \underline{\tau} \quad (3.9)$$

Während eine ruhende Flüssigkeit einen kugelsymmetrischen Spannungszustand aufweist der durch den hydrostatischen Druck  $p$  charakterisiert werden kann, treten in strömenden Fluiden weitere Spannungen auf, die durch innere Reibung hervorgerufen werden. Diese Reibungsspannungen gehen in den Extraspannungstensor  $\underline{\tau}$  ein [Böh97]. Weitere Überlegungen aus der substantiellen Ableitung der Geschwindigkeit aus lokalen und zeitlichen Geschwindigkeitsänderungen führen zu der Gleichung

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) = \rho \vec{g} - \nabla p + \nabla \cdot \underline{\tau}. \quad (3.10)$$

aus welcher ersichtlich ist, dass sich der Impuls in Abhängigkeit von Gravitation, Druck und oder Verformung verändert.

Hinsichtlich **Energieerhaltung** lautet die dazugehörige Gleichung

$$\rho c_v \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = \underline{\tau} : \nabla \vec{v} - T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_\rho \cdot \nabla \cdot \vec{v} - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (3.11)$$

wobei  $c_v$  die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen,  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit und  $T$  die Temperatur des Mediums darstellt. Die substantielle Energieänderung ergibt sich aus der lokalen zeitlichen Energieänderung und einem Term, der den konvektiven Energietransport der Strömung charakterisiert. Die Energieänderung nach Gleichung

(3.11) ist gleich der Summe aus Wärmedissipation durch viskose Reibungsarbeit<sup>8</sup>, Volumenänderungsarbeit durch äußeren Druck und durch Wärmeleitung.

Zur Beschreibung des Spannungszustands in strömenden Flüssigkeiten wird weiterhin die Deformationsgeschwindigkeit benötigt, die mit Hilfe des Deformationsgeschwindigkeitstensors  $2\underline{D}$  dargestellt werden kann. Die Gleichung welche in Analogie zu Gleichung (3.9) aufgeteilt werden kann lautet

$$2\underline{D} = \left( \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \cdot \underline{E} + 2\underline{D}^* \quad (3.12)$$

(Der erste Teil entspricht dem Volumenänderungsgeschwindigkeitstensor während der zweite Teil der Gleichung für den Formänderungsgeschwindigkeitstensor steht)

Die folgenden zwei Zustandsgleichungen sind stoffabhängig. Die **rheologische Zustandsgleichung** für strukturviskose Flüssigkeiten in allgemeiner Form lautet

$$\underline{\tau} = 2 \cdot \eta(T, I_i) \cdot \underline{D}^* \quad (3.13)$$

wobei  $I_i$  mit  $i = 1, 2, 3$  die drei Invarianten des Formänderungsgeschwindigkeitstensors  $2\underline{D}^*$  darstellen. Im Einzelnen sind die Invarianten  $I_1 = Sp(2\underline{D}^*)$ ,  $I_2 = \sum_i \sum_j \dot{\gamma}_{ij} \cdot \dot{\gamma}_{ji}$  und  $I_3 = DET(2\underline{D}^*)$  mit  $ij$  als Komponenten von  $2\underline{D}^*$ .

Bei hochpolymeren Werkstoffen hat sich die **thermische Zustandsgleichung**, die von SPENCER und GILMORE entwickelt wurde, als vorteilhaft erwiesen. Sie gibt den Zusammenhang zwischen Dichte, Druck und Temperatur kompressibler Medien wieder [IWG66].

$$(v - b^*) \cdot (p + p^*) = \frac{R \cdot T}{W} \quad (3.14)$$

hier ist  $v$  das spezifische Volumen des Mediums,  $b^*$  das Eigenvolumen des Makromoleküls,  $W$  die Molmasse des Monomerbausteins,  $p^*$  der Kohäsionsdruck und  $R$  die universelle Gaskonstante [Cre08, S. 27-31].

Diese allgemeinen Gleichungen gelten sowohl für den Extrusionsprozess, als auch für das formgebende Werkzeug im darauffolgenden Kapitel. Michel Cretu hat in seiner Arbeit vereinfachte Annahmen getroffen, um die Berechnung mit vertretbarem Aufwand unter

<sup>8</sup>Der Doppelpunkt ist eine alte Bezeichnung für die Multiplikation einer Matrize mit einem Vektor

zuhilfenahme der EDV lösen zu können (laminare Strömung wegen geringer Strömungsgeschwindigkeiten, kompressibles Fluid als inkompressible betrachtet). Sämtlichen Literaturquellen ist gemein, dass keine geschlossene Lösung existiert, in jedem Fall wird mit CFD Programmen eine Approximation durchgeführt [Wol96], [Cre08], [MAY05], [Han07a], [Han07b], [BC89], [BHA87].

### 3.3.2.2 Erklärung newtonscher und nicht-newtonscher Fluide

Newton stellte das in Bezug auf Fluide einfachste Stoffgesetz der Welt auf, welches das Fließverhalten als Reaktion des Fluids auf auftretende Schubspannungen beschreibt [Kre10, S. 13], [DIN03a], [DIN03b], [DIN94].

*Only a few years after Hooke expressed the concept that eventually led to the constitutive equation for the ideal elastic solid, Newton (Figure 2.1.1) wrote his famous Principia Mathematica. Here Newton expressed, among many other things, the basic idea for a viscous fluid. His “resistance” means local stress; “velocity by which the parts of the fluid are being separated” means velocity gradient or the change of velocity with position in the fluid. The proportionality between them is the viscosity or “lack of slipperiness.” [Mac95, S. 65], [New22]*

*[...]Gesetzmäßigkeiten idealviskosen Fließens von Newton’schen Flüssigkeiten[...]* [Pfl02, S. 28]

In Diagramm 3.9 werden die unterschiedlichen Fließverhalten verschiedener Fluide dargestellt.

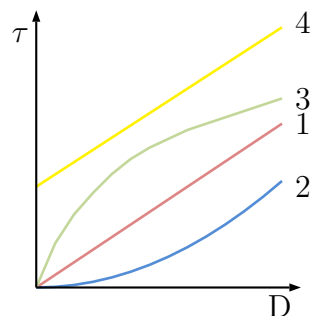


Abbildung 3.9: Viskosität

Hierbei ist  $D$  der Schergradient,  $\tau$  die Scherspannung [PE08, S. 222], [Dom07, Kapitel 1.4.2.1, S. 92ff], [Chr10, S. 191ff]. 1 stellt den linearen Zusammenhang eines newtonschen Fluids dar, 2 wird dilatant, 3 strukturviskos genannt. 4 ist ein sogenanntes Binghamfluid, welches einen linearen Zusammenhang ab einer Mindestscherspannung zeigt. Einflüsse auf die Viskosität haben beispielsweise der Verarbeitungsdruck im Extruder (proportional), die Temperatur (indirekt proportional) oder die Schwergeschwindigkeit (indirekt proportional) [Dom07, S. 97], [DIN94], [DIN76].

Für newtonsche Fluide gilt der newtonsche Reibungsansatz in Form der Gleichung (3.15)

$$F = \eta \cdot A \cdot \Delta c_x / \Delta z \quad (3.15)$$

Bei nichtlinearen Geschwindigkeitsgefällen tritt an Stelle des Differenzenquotient der Differentialquotient.

$$F = \eta \cdot A \cdot dc_x / dz \quad (3.16)$$

Wird die Gleichung (3.16) auf die Fläche bezogen, erhalten wir

$$\tau = \eta \cdot D \quad (3.17)$$

Bei nichtnewtonschen Fluiden ist  $\eta$  nicht konstant [DIN03c]. Die Scherspannung von strukturviskosem Verhalten ist degressiv. Dies trifft auf den vorhandenen Rohstoff im Speziellen und auf Kunststoffe im Allgemeinen zu [Sig08, S. 19]. Des Weiteren wird noch beschrieben, wie sich Stoffe verhalten, wenn sie mehr oder weniger große Partikel unlöslicher Art beinhalten. Der für die Verarbeitung vorgesehene Rohstoff liegt laut [Sig08, S. 10] zwischen Kolloid (Partikelgröße zwischen  $1 \mu m$  und  $1 nm$ ) und Suspension (Stoffgemische feinsten Verteilung). Auf Basis der Kreidespezifikation ist die Einteilung uneindeutig. Genauere Analysen über diesen Medien finden sich in [Tad10]. Die Universität Leoben bietet Simulationen für Extrusionen und Blasformen an.<sup>9</sup> Die **gemessenen Anlagenparameter** sind im Anhang in Tabelle A.5 notiert.

<sup>9</sup>[http://ikv.unileoben.ac.at/projekt\\_extrusion\\_berechnung\\_werkzeuge.html](http://ikv.unileoben.ac.at/projekt_extrusion_berechnung_werkzeuge.html)

### 3.3.3 Werkzeug

Zweck des Werkzeuges ist es, die vom Extruder ankommende thermisch und mischtechnisch homogene Polymermasse über ein Verteilsystem entlang des Umfangs über die darüber angeordneten Ringdüse endlos, kreisförmig und dünnwandig auszuformen. Ein generell wichtiges Qualitätsmerkmal für Halbzeuge wie Rohre und Schlauchfolien ist die Gleichmäßigkeit der Wanddickenverteilung entlang des Umfanges. Lokale Dünnstellen neigen bei hoher mechanischer Belastung zum Versagen des Produktes. Eine große Varianz der Wanddicke führt allerdings über die Mindestanforderung hinaus zu einem erhöhten Materialverbrauch. Speziell bei hochwertigen, technischen Kunststoffen ist dieser wirtschaftliche Aspekt besonders relevant.

*In tubular film blowing operations, one is always interested in controlling the ultimate film thickness. This is understandable because, for a given grade of polymer, the thinner the film, the greater the area it can cover and hence the greater the profitability will be [Han07b, S. 341].*

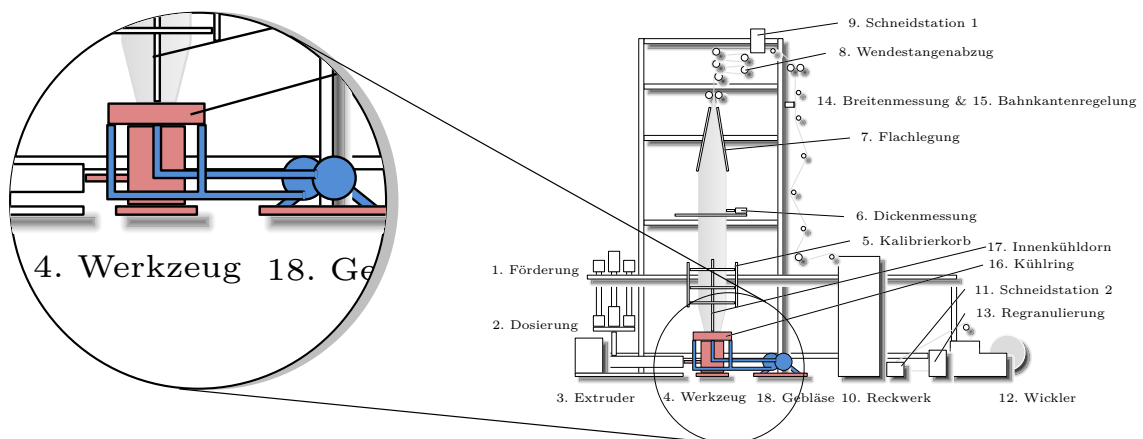
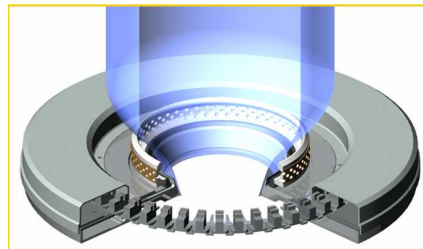


Abbildung 3.10: Werkzeug mit Kühlung, 4. Werkzeug mit Kühlung

Eine homogene Geschwindigkeitsverteilung am Düsenaustritt ist daher Folge der Forderung nach homogener Massen- und Temperaturverteilung, sowie einer homogenen Schmelzeorientierung. Des Weiteren darf eine gewisse Mindestwandgeschwindigkeit aus Selbstreinigungsründen („Putzwirkung“) nicht unterschritten werden um Ablagerungen zu vermeiden. Die tribologischen Eigenschaften des Rohstoffs geben Auskunft über die Min-

destgeschwindigkeit in den Schmelzekanälen [Pot89, 15], [Fis01b, S. 142–145], [Fis01a, S.58-60], [Cre08], [Han07a], [Han07b, Kapitel 7, S. 306-350], [BC89], [BHA87].

Beim hier vorliegenden Werkzeug sind die Kanäle des Wendelverteilers kundenspezifisch berechnet worden. Das Polymergemisch wird vom Extruder durch den Blaskopfanschluss in den Blaskopf gefördert. Im Verteilersystem wird die Schmelze auf die einzelnen Verteilerspiralen aufgeteilt mit dem Ziel, die Schmelze zu überlagern und zu vermischen, um am Ende eine homogene Schmelzeverteilung mit geringen Unterschieden der Schmelzeorientierung zu erlangen. Entsprechende Adapter sind dazu gedacht, unterschiedliche Düsendurchmesser zum Einsatz bringen zu können. Der Düsen Schlitz und damit die Sollvorgabe der Rohfoliendicke ist im Stillstand konfigurierbar. Der Folienblaskopf wird außen- und innenseitig beheizt und die Temperatur der jeweiligen Zone über Thermofühler gemessen. Die Information darüber, welche Zone wie anzusteuern ist, kommt aus dem Dickenänderungssensors im Bereich des Kalibrierkorbs. Dieser Punkt wird in Kapitel 3.3.4 genauer dargestellt. Der Temperaturregelkreis des Folienblaskopfs verhindert ein Überhitzen des Rohstoffs. Weiters ist das vorhandene Werkzeug mit Kanälen für Stützluft, Kühlluft innen und außenseitig ausgerüstet. Diese werden von Gebläsen gespeist. Ein Doppellippenkühlring an der Werkzeugoberseite führt die Luft an die Polymermasse [Hos08a], [Hos08b], [Bur06] innen und außenseitig.



**Abbildung 3.11:** Symbolbild Kühlring [Kuh06]

Die acht Heizzonen sind entlang des Umfangs an verschiedenen Stellen angeordnet und können die Temperatur erhöhen. Eine Senkung der Temperatur ist direkt nicht möglich.

Die **Berechnungsmöglichkeiten** sind mit jenen Gleichungen, welche für den Extrusionsprozess gültig sind, ident. Sie erfolgen genau wie im Extrusionsprozess über Finite-Elemente oder Finite-Volumen-Methoden. Die **gemessenen Anlagenparameter** sind im Anhang in Tabelle A.8 notiert.

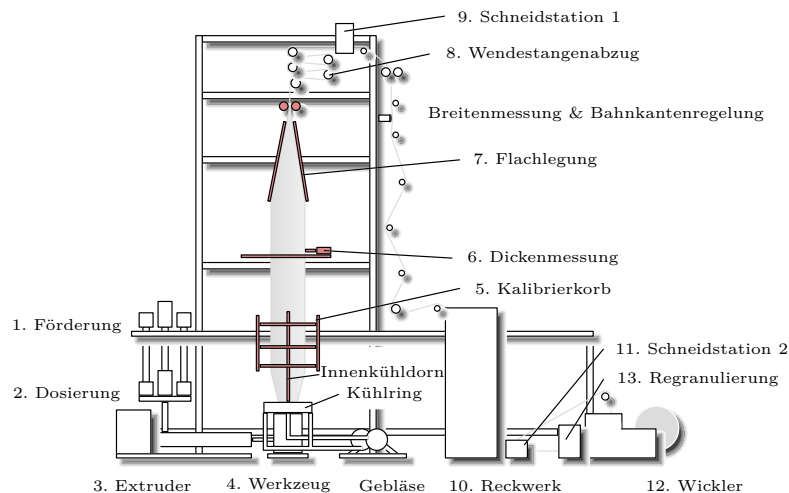


### 3.3.4 Kalibrierkorb

**Definition 3.14 :** Kurzrolle

*ist eine Rolle mit einer Mindestlänge die ansonsten der Produktspezifikation entspricht.*

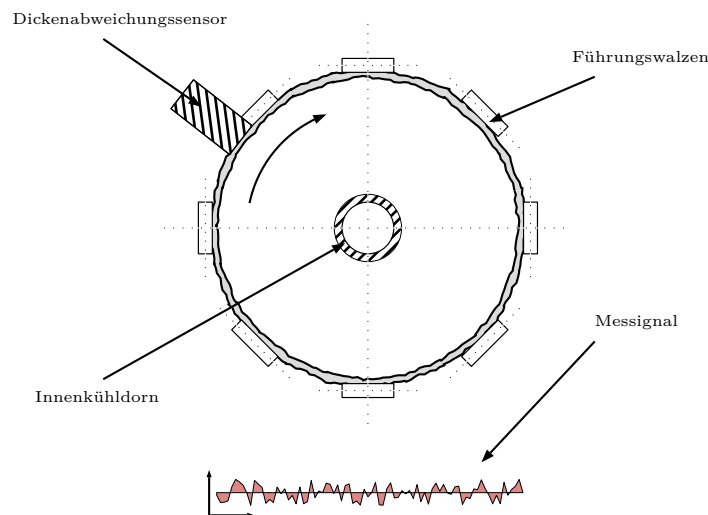
In diesem Kapitel werden die Einrichtungen des Kalibrierkorbs, der Dickenmessung, der Flachlegung und des Innenkühldorn beschrieben. Der Kalibrierkorb hat die Aufgabe die aus dem Werkzeug austretende zähflüssige Polymermasse im Umfang zu begrenzen. Die Ausbildung des Schlauches und das Anpressen der Schlauchfolie ist Folge des im Inneren aufgebauten Luftdrucks, und dieser ist Folge der aus dem Doppellippenkühlring innenseitig entnommenen Luftvolumenstrom. Die Führung des Rohfolien Schlauches erfolgt über mehrere über den Umfang verteilten und in vertikaler Richtung angeordneten Kleinrollen.



**Abbildung 3.12:** Kalibrierkorb, 1. Förderung, 2. Dosierung, 3. Extruder, 4. Werkzeug mit Kühlung 5. Kalibrierkorb, 6. Dickenmessung, 7. Flachlegung, 8. Wendestangen, 9. Schneidstation 1, 10. Reckwerk, 11. Schneidstation 2, 12. Wickler, 13. Regranulierung

Diese sind auf einem Führungsgestänge montiert, sodass sich der Umfang des Rohfolien Schlauches konfigurieren lässt. In diesem Anlagensegment findet auch die Blasenregelung und die Dickenmessung statt. Im Schlauchinneren findet je nach Einsatzgebiet ein Luftaustausch über den Innenkühldorn statt. Bedingt durch die Flachlegung die einem geführten Quetschen der Folie zwischen zwei angetriebene Rollen (dem Vorabzug) entspricht, kann

die Luft nicht nach oben sondern nur über den Innenkühldorn entweichen. Die Differenzgeschwindigkeit zwischen Ausstoßgeschwindigkeit beim Werkzeug und dem motorisierten Vorabzug entspricht einer ersten Orientierung der Rohfolie in der Abkühlphase und dient (auch) der Orientierung der Makromoleküle. Der vorliegende Kalibrierkorb (Abbildung 3.14) ist ebenfalls gelenkig gelagert und besteht aus 36 Führungsrollen. Im Einsatz befindet sich ein reversierende Dickenänderungssensor, der punktuell die Abweichung von einer voreingestellten Dicke misst.



**Abbildung 3.13:** Querschnitt der Schlauchfolienprofils und Dickenabweichungssensor

Das Signal über Lage und Abweichung wird als Eingangsgröße für die Ansteuerung der Heizungszone des Werkzeuges (Kapitel 3.3.3) verwendet und bildet einen Regelkreis. Der verwendete Dickenabweichungssensor misst keine Absolutwerte sondern ausschließlich Abweichungen vom Sollwert der Rohfolie. Die Konfiguration erfolgt über die Dichte aus der Dosierung. Der hier verwendete Sensor arbeitet durch Berührung des Schlauches auf kapazitiver Basis und misst die in einem Kondensatorfeld eingebrachte Dielektrizität, die in Form eines Messsignals ausgegeben wird. Abbildung 3.13 zeigt ein Querschnittsprofil, in dem sowohl der Innenkühldorn als innerer schraffierter Kreis dargestellt ist, als auch die Folie, die den äußeren Kreis zeigt. Links oben ist der Dickensensor dargestellt, die 8 Walzen führen den Schlauch entlang der Höhe. Die schwankende Dicke wird in einem Diagramm angedeutet [Wol96, S. 16], [Kün06]. Verschiedene Dickenprofilregelsysteme sind ebenfalls in [Wol96] untersucht worden. Der Doppellippenkühlring führt sowohl an die Außenseite als auch an die Innenseite des Rohfolien Schlauchs Luft. Während er

bei der Innenseite den Druck konstant hält, kann er bei Einsatz des Innenkühldorns auch für die Kühlung im Blaseninneren verwendet werden. Hierbei wird die Luft vom Doppellippenkühlring eingebracht und über den Innenkühldorn wieder abgeführt. Dieser Luft- und -Wärmeaustausch muss im richtigen Verhältnis stehen, da der notwendige Druck für eine stabile Blase zwingend erforderlich ist. So wird ein konstantes Aufblasverhältnis gewährleistet. Dieses auch als Internal Bubble Cooling bezeichnete Verfahren wurde zwi-



Abbildung 3.14: Kalibrierkorb

schenzeitlich bei der vorliegenden Anlage zum Einsatz gebracht [Hose], [Hosa], [Ohl04], [Gab98]. Das Aufblasverhältnis, das als Quotient von Abzugsgeschwindigkeit zu Werkzeugdurchmesser beschrieben ist, wird durch die Blasenregelung gesteuert [Wol96, S. 3], [Ohl04, S. 3], [MAY05, S. 5].

Die **Berechnungsmöglichkeiten** in diesem Anlagenbereich sind im Teilbereich der Mechanik anzusiedeln. Einerseits können die zu überwindenden Reibungskräfte der Rollen berechnet werden. Die entsprechenden Gelenke für die Konfiguration des Schlauchdurchmesser müssen ausgelegt und berechnet werden. Der entsprechende Teilbereich ist die Statik und Kinematik. Andererseits ist im strömungstechnischen Bereich der Abkühlvorgang der zähflüssigen Polymermasse mit Hilfe der Kühlluft zu berechnen. Dieses Problem der Thermodynamik und der Aerodynamik wurde u. a. in der Arbeit „Analyse von Kühlluftsystemen“ untersucht [Wol96]. In dieser Arbeit wurden unterschiedliche Kühlluftkonzepte und Dickenprofilregelsysteme analysiert und eine Berechnung mit Hilfe von Finiten Elementen (FEM) durchgeführt. Die thermodynamischen Grundgleichungen aus dem Kapitel

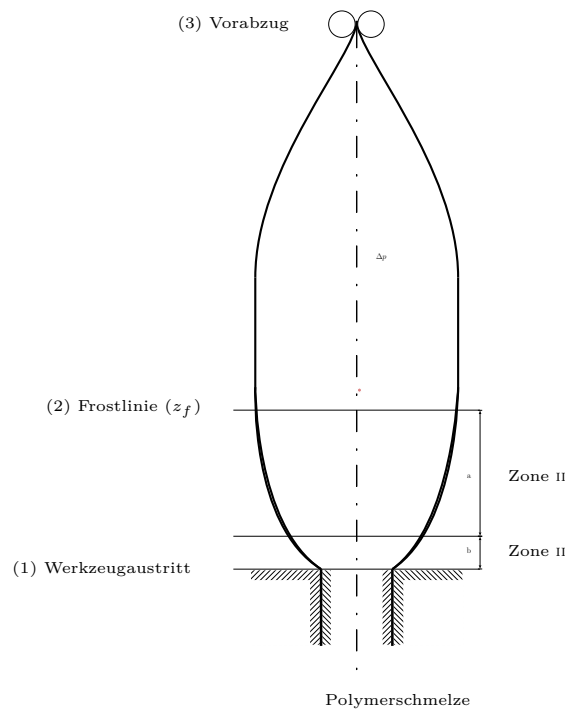
3.3.2 (Extrusion) gelten auch für den Abkühlvorgang. Darüberhinaus ist das zu lösende Problem beim Abkühlvorgang ein Problem, das als Fluid-Struktur-Wechselwirkung bekannt ist [MS00], [Oes07], [Sch09].

*Die Beeinflussung einer Struktur durch das Fluid erfolgt hierbei mittels des Wirkens von strömungsmechanischen Kräften auf die Oberfläche des Festkörpers und führt zu dessen Deformation oder Bewegung. Die Kräfte setzen sich aus Druck und Scherkräften zusammen. Im Gegenzug erfolgt eine Änderung des Strömungszustands des Fluids durch die Bewegung des Festkörpers. Die Bewegung führt zu einer neu geformten Geometrie des Strömungsgebiets und somit zu einer veränderten Strömungsführung. Bedingen sich beide Effekte gegenseitig, spricht man von einer Fluid-Struktur-Wechselwirkung. Im vorliegenden Fall kommt noch ein Phasenübergang eines Stoffes (zähflüssig Material in Feststoff) hinzu [Sie02, S. 1].*

Die benötigte Rechenkapazität für derartige Berechnungen erfordert Hochleistungsberechnungen. Eine weitere Möglichkeit die Komplexität dieses Themas auf ein erträgliches Maß zu senken ist die Untersuchung mit Hilfe der Dimensionsanalyse welche die Ähnlichkeitstheorie zur Grundlage hat und in der Verfahrenstechnik eingesetzt wird [Zlo05], [Sig08, S. 78ff], [WVS99], [Sch95].

Einer der wichtigsten, aber zugleich auch schwer zu erfassenden Parameter in diesem Anlagenbereich, ist die Höhe der sogenannten Frostlinie (3.15 ) (2). Als Frostlinie wird jener gedankliche und geometrischer Abstand bezeichnet, bei dem der Phasenübergang des Materials von zähflüssiger in fester Form stattfindet. Gleichzeitig wird in dieser Abbildung gezeigt, dass in Zone I der Effekt seitens des Extruder, die Polymerschmelze hinauszupressen und Masseansammlungen zu erzeugen, überwiegt. Ab Zone II kommt der Vorabzug überwiegend zum Tragen und eine Verkleinerung der Dicke folgt. Die Schraffur entspricht hier dem Werkzeug.

Obwohl in dieser Arbeit nur stationäre Prozesse betrachtet werden sollen, wird kurz das **Anfahrverhalten** zwecks besserem Verständnis beschrieben. Wie in Abbildung 3.16 dargestellt wird am Beginn des Produktionsprozesses die Anlage auf Betriebstemperatur gebracht und anschließend der Extrusionsprozess gestartet. Anfangs werden nur sehr geringe Extrusionsgeschwindigkeiten gefahren, um das aus dem Werkzeug herausquellende



**Abbildung 3.15:** Darstellung der Frostlinie und der Kühlluft [Han07b, S. 320]

Polymermaterial mit einem Seil einzufangen. Zusätzlich wird die Temperatur in den Temperaturzonen des Extruders etwas geringer eingestellt, um ein zähflüssigeres Material am Werkzeugaustritt zu erhalten. In der Folge wird diese sehr zähflüssige Masse über ein Seil nach oben gezogen (Bild 3.16 links). Dieses Einfädeln muss über den gesamten Anlagenstrang durchgeführt werden (Bild 3.16 mitte). Dies führt auch über den Wendestangenabzug und über die gesamten Transportwege zum Reckwerk bis hin zum Wickler. Ein derartiger Einfädelprozess ist für geübte Anlagemannschaften kein Problem, allerdings werden nicht unbedeutende Mengen an Material, die sogenannte „Anfahrproben“ als Abfall entsorgt. Eine unerwartete Störung im Produktionsprozess und ein erneut notwendiges Anfahren führt im günstigen Fall zu einer sogenannten „Kurzrolle“. Als Kurzrolle wird eine vom Kunden akzeptierte Rolle bezeichnet, die mit Ausnahme der aufgewickelten Mindestlänge der Produktspezifikation entspricht. Der ungünstigere Fall ist, dass diese Rolle als Abfall entsorgt werden muss, da die Mindestlänge unterschritten wird. Die Anlagemannschaft hat das entsprechende Know-how und damit die Erfahrung über den richtigen Zeitpunkt mit dem Folienblasvorgang zu beginnen (Bild 3.16 rechts). Speziell im Bereich des Kalibrierkorbs ist der Anfahrprozess gut darstellbar.

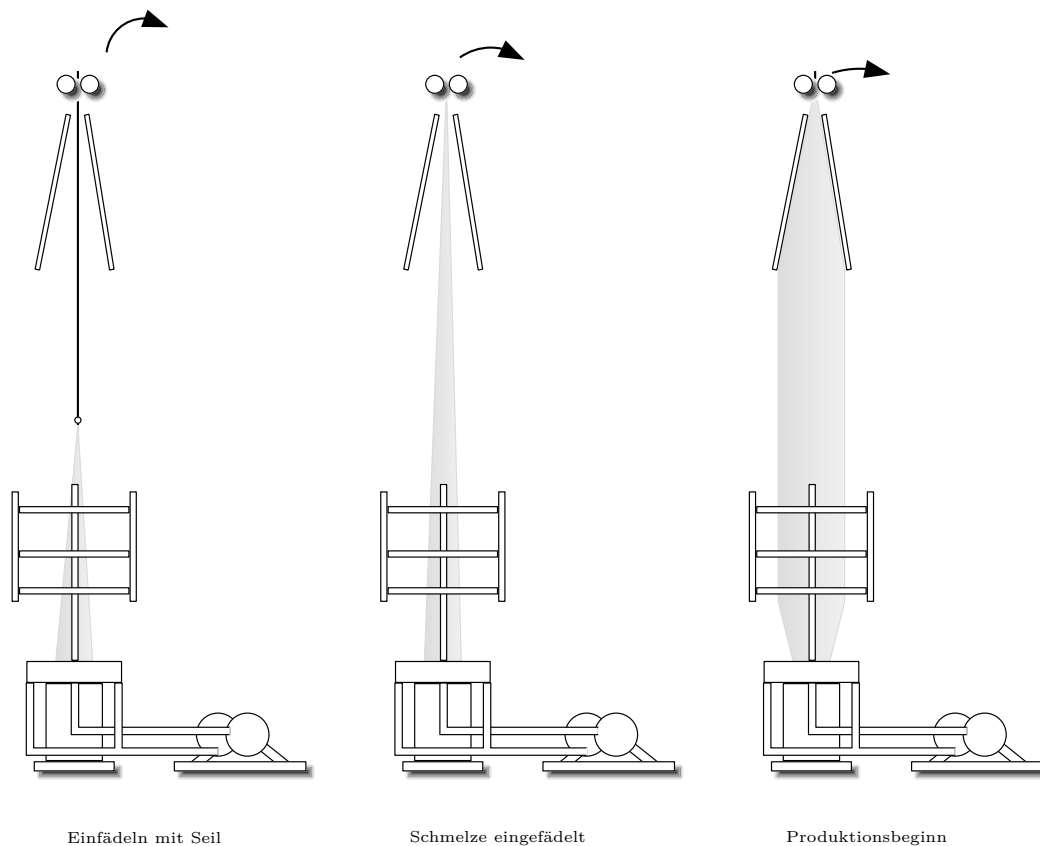
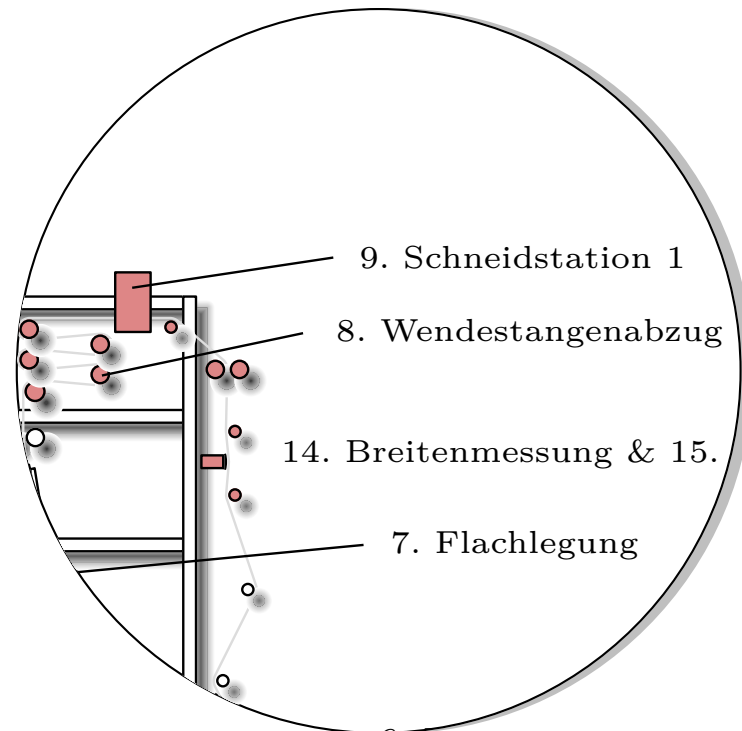


Abbildung 3.16: Anfahrverhalten, Prozessstart von links nach rechts [MAY05, S. 4]

### 3.3.5 Wendestangenabzug

Der wesentlichste Zweck eines Wendestangenabzuges ist es, den Folienschlauch vom Vorabzug aufzunehmen und diesen entlang des Umfangs zu verdrehen. Diese präventive Maßnahme hat das Ziel bei der Wicklung den sogenannten „Kolbenring“ zu vermeiden. In Abbildung 3.13 wurden Dickenunregelmäßigkeiten schon dargestellt. Ein Kolbenring ist eine Ausbuchtung von Folien, die durch eine Dickstelle entsteht, welche sich immer an der geometrisch exakten Position befindet (Abbildung 3.18). Werden viele tausend Lagen auf eine Hülse aufgewickelt, so kann ein konstanter Durchmesser über die Breite nur dann erreicht werden, wenn die produktionsbedingten und vom Werkzeug nicht korrigierbaren Dickenschwankungen zusätzlich durch den Wendestangenabzug über die Breite der Rolle verteilt werden. Diese Aufgabe wird durch eine Anordnung von mehreren angetriebenen

und dreidimensional schrägstehenden Rollen bewerkstelligt. Die dadurch entstehenden zusätzlichen Reibungsprobleme und Zugbelastungen sind gegenüber der Lösung der Kolbenringproblematik als das geringere Übel anzusehen.



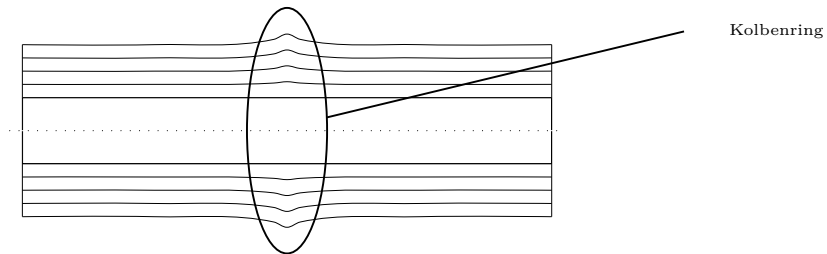
**Abbildung 3.17:** Wendestangenabzug, 7. Flachlegung, 8. Wendestangen, 9. Schneidstation 1, 14. Breitenmessung, 15. Bahnkantenregelung

Auch in diesem Bereich wird intensiv nach Lösungen gesucht, wie man beispielsweise an der Patentbeschreibung der Firma Reifenhäuser sehen kann.

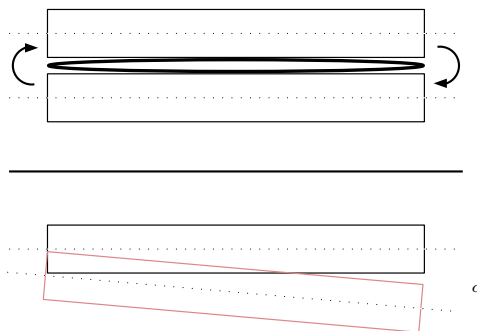
*Die Extrusion von Schlauchfolienbahnen aus Kunststoff mittels Schlauchfolienextrusionsanlagen ist vielfältig bekannt. Da bei den bekannten Verfahren unvermeidlich Dickentoleranzen der hergestellten Schlauchfolienbahn auftreten, addieren sich diese auf der zu einem Coil aufgewickelten Schlauchfolienbahn und rufen nachfolgend Probleme bei der weiteren Verarbeitung hervor, weshalb dieser Addition durch geeignete Gegenmaßnahmen entgegengewirkt wird. Eine solche und beispielsweise aus der DE 21 56 079 C2 bekannte Maßnahme besteht darin, als Abzugsvorrichtung der Schlauchfolienextrusionsanlage einen*

so genannten Wendestangenabzug vorzusehen, der über mindestens eine Wendestange verfügt, die z. B. reversierend in einer rechtwinklig zur Extrusionsrichtung liegenden Ebene geführt wird und die Lage der einzelnen Dickenfehler der extrudierten Schlauchfolienbahn über deren gesamte Breite kontinuierlich verteilt [Rei04].

Auch die untersuchte Anlage arbeitet nach diesem Prinzip. Zusätzlich wird in diesem Bereich der Folienschlauch aufgeschnitten und zu einer Flachfolie ausgeformt, weiters sorgt die Bahnkantenregelung dafür, dass die Folie exakt in Produktionsrichtung geführt wird. Die teilweise bombierten Walzen sorgen dafür, dass die Folie nicht verknittert. Weitere Walzen sorgen dafür, dass die Spannung innerhalb der Folie nicht unter einen vorgegebenen Wert sinkt [Dec].



**Abbildung 3.18:** Kolbenring



**Abbildung 3.19:** Foliendrehung, Walzenschrägstellung

Die Breitenmessung sorgt dafür, dass die Breite der gesamten Folie kontinuierlich ermittelt wird. Andererseits wird bedingt durch die Bahnkantenregelung die Folie zentrisch auf den Rollen gehalten.



Die **Berechnungsmöglichkeiten** sind aufgrund der vielen Walzen, der Berücksichtigung von tribologischen Eigenschaften der Rohfolie, sowie der Zielsetzung der Foliendrehung ebenfalls als komplex anzusehen. Im ebenen Raum ist die mehrfache Führung der Folie über Walzen ein Problem, das über klassische Mechanik nach den Prinzipien bei der Berechnung über Seilreibung lösbar wäre. Durch den Rohstoff einerseits und durch die im dreidimensionalen Raum schiefwinkelig angestellten Wellen andererseits, ist dies aber für die betrachtete Anlage nicht zielführend durchführbar. Eine Beurteilung durch eine grobe Abschätzung nach Eytelwein<sup>10</sup> wären möglich, dazu müssen aber zuerst die Winkel der zu- und abgeführten Folie ermittelt werden. Dies sollte aus der geometrischen Anordnung der Walzen aus der Anlagendokumentation abgelesen werden können. Die mit diesen Daten durchführbare Berechnung ist ebenso im Anhang zu finden, wie die **gemessenen Anlagenparameter** in Tabelle A.7 notiert sind.

### 3.3.6 Reckwerk

Wie in der Einleitung erwähnt, findet bei der vorliegende Anlage die Nachverarbeitung der Rohfolie innerhalb des eigentlichen Produktionsprozesses statt.

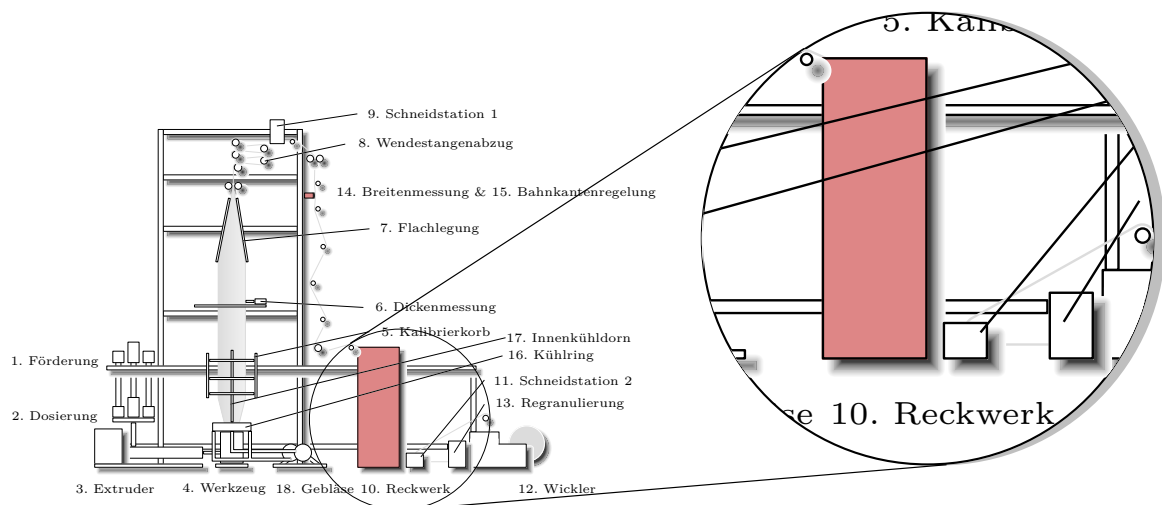


Abbildung 3.20: Reckwerk, 10. Reckwerk

<sup>10</sup> $S_1 = S_2 \cdot e^{\mu\alpha_u}$

Das Reckwerk hat die Aufgabe die mechanischen Eigenschaften des Materials in gewünschter Art und Weise zu beeinflussen. Beeinflussbare Parameter sind in erster Linie Reißfestigkeit und Reißdehnung. Verstreckungsarten existieren sowohl in biaxialer als auch in monoaxialer Art. Das hier beschriebene Reckwerk ist in monoaxialer Betriebsart in Verwendung. Monoaxial bedeutet, dass die Verstreckung der Folie nur in eine Richtung (in Produktionsrichtung) erfolgt. Dieses Reckwerk besteht aus insgesamt 11 verschiedenen angeordnet und angetriebene Führungs- und Umlenkwalzen. Jede dieser Walzen ist mit Hilfe integrierter Heizungen temperierbar. Nach erfolgter Materialbeeinflussung wird das Material gezielt gekühlt, so dass sich möglichst geringes Schrumpfen einstellt. Zur Folienansteuerung sind entsprechende NIP Rollen über parallel angeordnete Zylinder integriert. Unter NIP Rollen versteht man über Zylinder angesteuerte Hilfswalzen, die die Folie auf die Führungs- und Umlenkwalzen presst (Abbildung 3.21). Insgesamt wurden bei diesem Reckwerk 8 NIP Rollen installiert und mit der Bezeichnung der Hauptwalze versehen (beispielsweise Walze 4 - NIP 4) Die NIP Rollen bei Walze 5 und Walze 6, dort wo die Verstreckung stattfindet sind speziell benannt. Bei Walze 5 wird die NIP Rolle mit ESS bezeichnet, bei Walze 6 mit OSS. Die **gemessenen Anlagenparameter** sind im Anhang in Tabelle A.9 notiert.

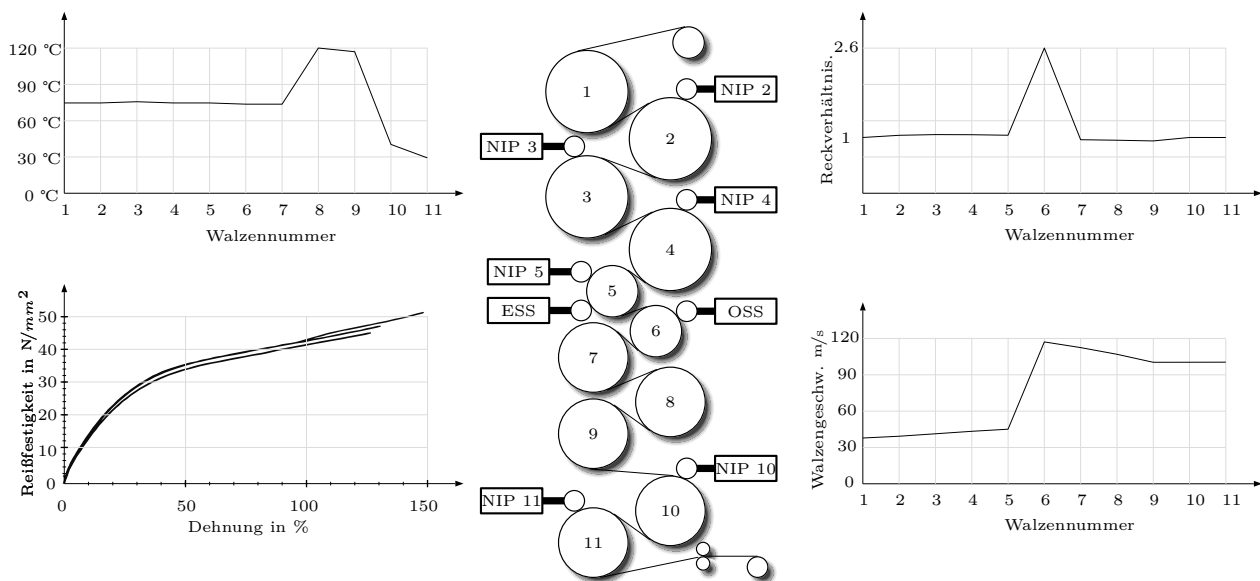
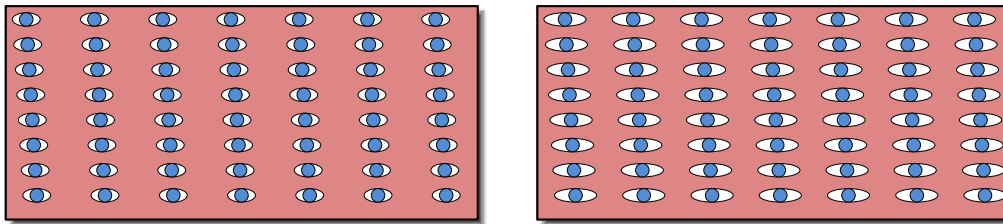


Abbildung 3.21: Reckwerkdarstellung

Eine spezielle Funktion dieses Reckwerks ist die Verstreckung innerhalb eines definierten Temperaturbereichs in einem empirisch gewonnenem Verhältnis. Die Verstreckung erfolgt

mit dem Ziel, die Folie bewusst zu „zerstören“. Damit ist das bewusste Aufreißen der Folie im Mikrometerbereich gemeint, ohne die entsprechenden im Material vorhandenen Kreidekörner würde die Folie schlicht nur länger werden. Durch Hinzufügen von Kreideteilchen, die homogen im Rohstoff enthalten sein müssen, reißt die Folie genau an den Stellen der Kreide auf. Das Loch hat demnach die Form einer Fläche, welche symbolisch der Differenz zwischen Ellipse und Kreis entspricht (Siehe Abbildung 3.22).



**Abbildung 3.22:** Wasserdampfdurchlässigkeit (links niedrigere Verstreckung als rechts)

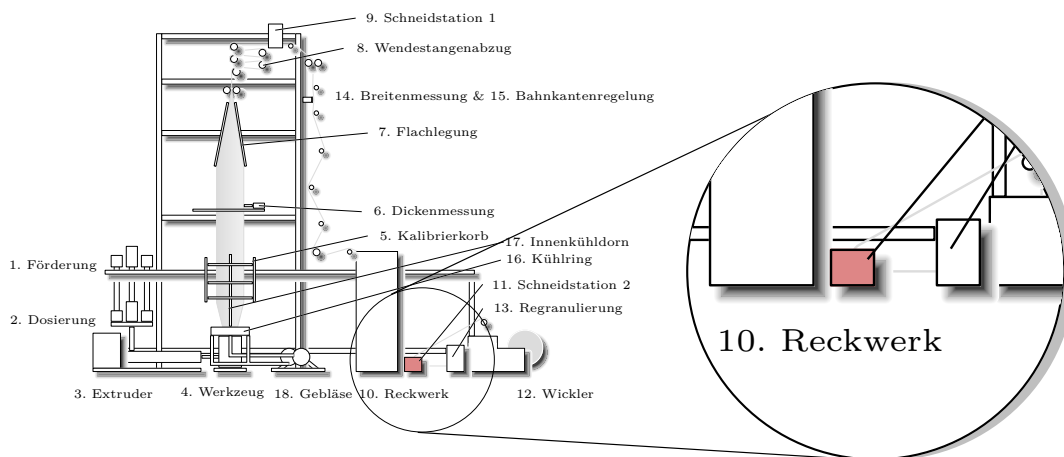
Die Folie kann bei einem zu großen Streckverhältnis abreißen, bei kleineren Werten sinkt die Lochgröße und dies hat zur Folge, dass die Anzahl an möglichen Wasserdampf-molekülen, welche durch die Folie hindurchdiffundieren können geringer werden. Jede Walze ist separat temperierbar und die Walzengeschwindigkeit beeinflusst die Verstreckung der Folie.

Zu den **Berechnungsmöglichkeiten** kann prinzipiell sehr viel beschrieben werden. Teilbereiche der Mechanik (Seilreibung, Thermodynamik, Tribologie) sind die wesentlichen Gebiete für die Auslegung eines Reckwerkes [Hosd], [Pop09]. Wie aus der Abbildung ersichtlich, erfährt die Folie eine Druckbelastung durch NIP 5 und ESS, kurz darauf nochmals eine weitere Druckbelastung durch Walze 6 und der Hilfswalze OSS. Auf diesen Umstand wird in Kapitel 7, Empfehlungen für weitere Maßnahmen, genauer eingegangen.

### 3.3.7 Nachbearbeitung

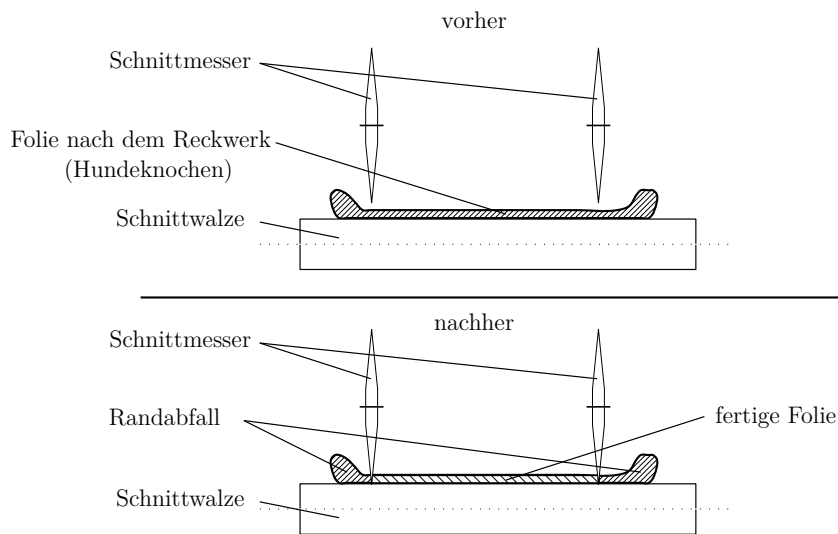
Die Nachbearbeitung ist im beschriebenen Prozess unumgänglich.

Es wird von der Folienbreite links und rechts ein Randstreifen weggeschnitten, welcher wiederverwertet wird. Der Zweck dieses Prozessschrittes ist es den Einsprung („Hundeknochen“) zu vermeiden (vgl. Neck-In). Der Hundeknochen ist eine symbolische Bezeichnung



**Abbildung 3.23:** Nachbearbeitung, 11. Schneidstation 2

für ungleichmäßige Materialansammlung am Rand der Folie. Diese Form entsteht durch den Streckprozess und ist dort nicht vermeidbar. Um nicht eine andere Form des „Kolbenringes“ zu erhalten, wird ein Randstreifen abgeschnitten und so über die Breite eine homogene Folie in Bezug auf Folienstärke und Planlage erreicht.



**Abbildung 3.24:** Neck-In Nachbearbeitung

In Abbildung 3.24 ist der Querschnitt einer Folie nach dem Reckwerk zu sehen. Am Rand der Folie hat sich Material angesammelt. Die Scheiben symbolisieren Messer, die

die ungleichmäßige Materialansammlung wegschneidet. In dem betrachteten Zeitraum wurden keine **Anlagenparameter gemessen**.

**Berechnungsmöglichkeiten** werden hier nicht aufgeführt. Einzig die erforderlichen Schnittkräfte wären berechenbar.

### 3.3.8 Regranulierung

Die Regranulierungsanlage hat den Zweck den systembedingten Abfall, der durch den Nachbearbeitungsschritt (Kapitel 3.3.7) entsteht, zu recyceln [Gmb]. Die weggeschnittenen Randsteifen werden über eine Absaugung direkt in die Regranulierungsanlage eingebracht. Dort findet ein dem Extrusionsprozess ähnlicher Aufschmelzvorgang statt. Nach einer Abkühlung wird über Schneidvorgänge Granulat erzeugt. Additive, wie sie in die Dosieranlage eingebracht werden, kommen auf diesem Weg nicht zur Anwendung.

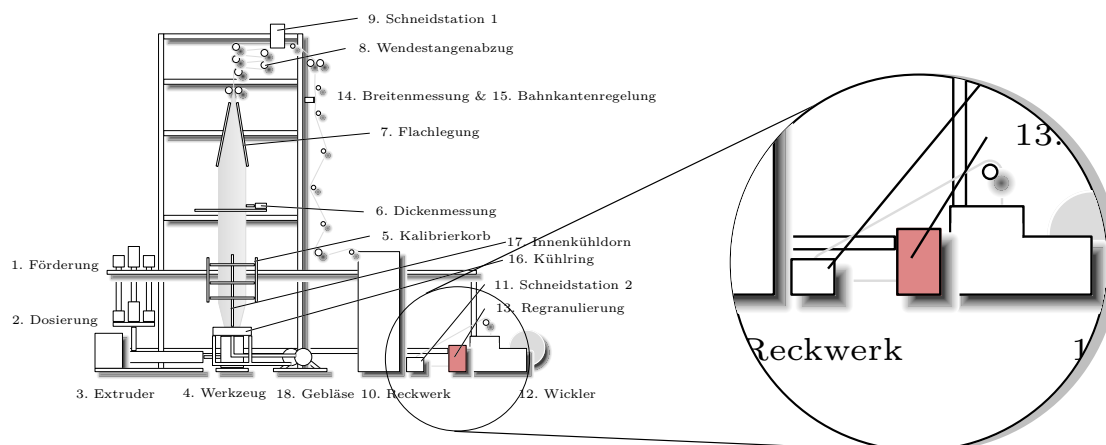


Abbildung 3.25: Regranulierung, 13. Regranulierung

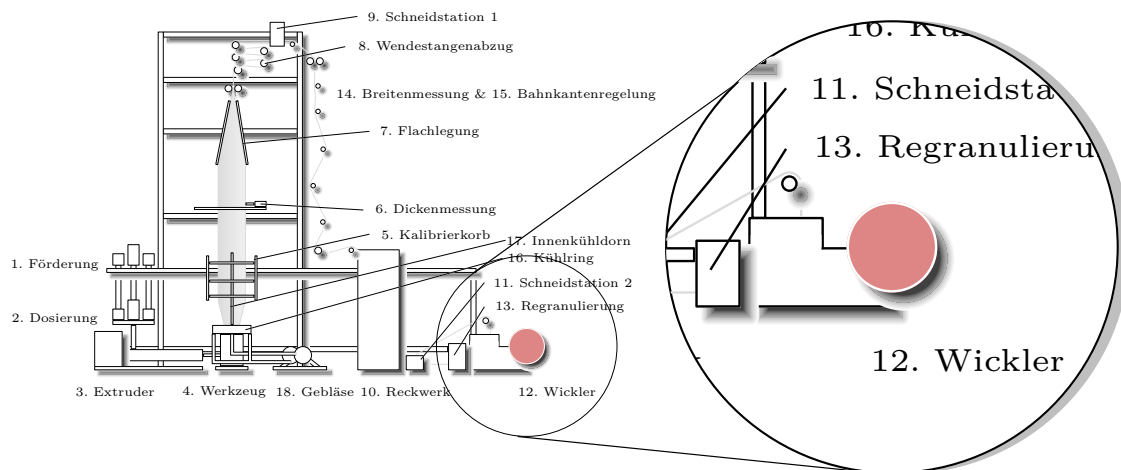
Die **Berechnungsmöglichkeiten** sind je nach Anforderung ebenfalls im Bereich der Festkörpermechanik anzusiedeln. Schnittkräfte, thermodynamische und strömungsmechanische Vorgänge machen auch diesen Prozessschritt komplex. In diesem Zusammenhang verweise ich auf Kapitel 3.3.2. **Gemessene Anlagenparameter** gibt es in dem betrachteten Zeitraum keine.

### 3.3.9 Wicklung

**Definition 3.15 :** Schrumpfvorgang

*Bezeichnet das Zusammenziehen der Folie während der Abkühlphase.*

Die Wicklung ist der letzte Verfahrensschritt im Produktionsprozess. Er dient dazu, die Funktionsfolie in eine transportable Form zu bringen. Dabei wird im Rotationsverfahren die Folie auf eine Kunststoffhülse aufgewickelt. Als Rotationsverfahren versteht man die automatische Auswechslung einer fertiggestellten Rolle durch eine leere Hülse bei voller Abzugsgeschwindigkeit. Die entsprechende mechanische Vorrichtung ermöglicht das Heraushieven der fertigen Rolle im laufenden Betrieb. Die entsprechenden Probekörper können entnommen werden, um sie anschließend im Labor vermessen zu lassen. Bei der Wicklung gibt es bei den Walzen verschiedene Möglichkeiten der Wickelarten. Einerseits gibt es die Spaltwicklung, die Kontaktwicklung und eine Kombination aus beiden Varianten. Relevant ist in jedem Fall die Wickelkraft, die weder zu hoch noch zu niedrig sein darf. Wäre sie deutlich zu hoch, würden die Folienbahnen aufgrund von Schrumpfvorgängen bei entsprechend hoher Temperatur zu einem Block verschweißt werden. In der Folge können sie dann nicht mehr von der Rolle abgewickelt werden. Ist die Wickelkraft zu niedrig, ist die Gefahr des Verrutschens der Folienbahnen gegeben und führt ebenfalls zu potentiellen Schäden oder zu Kundenreklamationen.



**Abbildung 3.26:** Wicklung, 11. Schneidstation 2, 12. Wickler, 13. Regranulierung

Die hier vorgestellten **Berechnungsmöglichkeiten** beziehen sich unter anderem auf die Lauflänge, die während der Datenerfassung ebenfalls Ausgangspunkt einiger Gespräche gewesen sind (Gleichung (3.18)).

$$l[lfm] = \frac{\pi}{s} 30 (R - r)^2 10^{-3} \quad (3.18)$$

Weitere Berechnungen des Wicklers sind auf Basis klassischer Mechanik, wo Kräfte und Momente eine wesentliche Rolle spielen, möglich. Selbst wenn es „nur“ ein Wickler ist, soll die Komplexität bei diesem Anlagenbereich nicht unterschätzt werden. Dabei müssen vor allem entsprechende Lastfälle berücksichtigt werden, wovon 3 exemplarisch angegeben sind. Lastfall 1 betrifft das Hochlaufen bei fast vollem Wickler innerhalb der erforderlichen Beschleunigungszeit, Lastfall 2 entspricht der Wicklung mit maximaler Materialgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der Betriebsmodi (kontinuierlich reduzierte Bahnspannung) und Lastfall 3 ist der Schnellstop des Wicklers bei einem Bahnriß. Diese Lastfälle decken den wesentlichen Auslegungsprozess des Motors der Wickler ab [Kol], [Bög06]. Wie schon in Kapitel 3.3.5 angeführt, ist die Dickenverteilung über die Breite wichtig, da so ein Kolbenring (Dickstelle der Folie ist immer im selben Abstand von der Hülsenkante) vermieden werden kann. In dem betrachteten Zeitraum wurden keine **Anlagenparameter gemessen**.

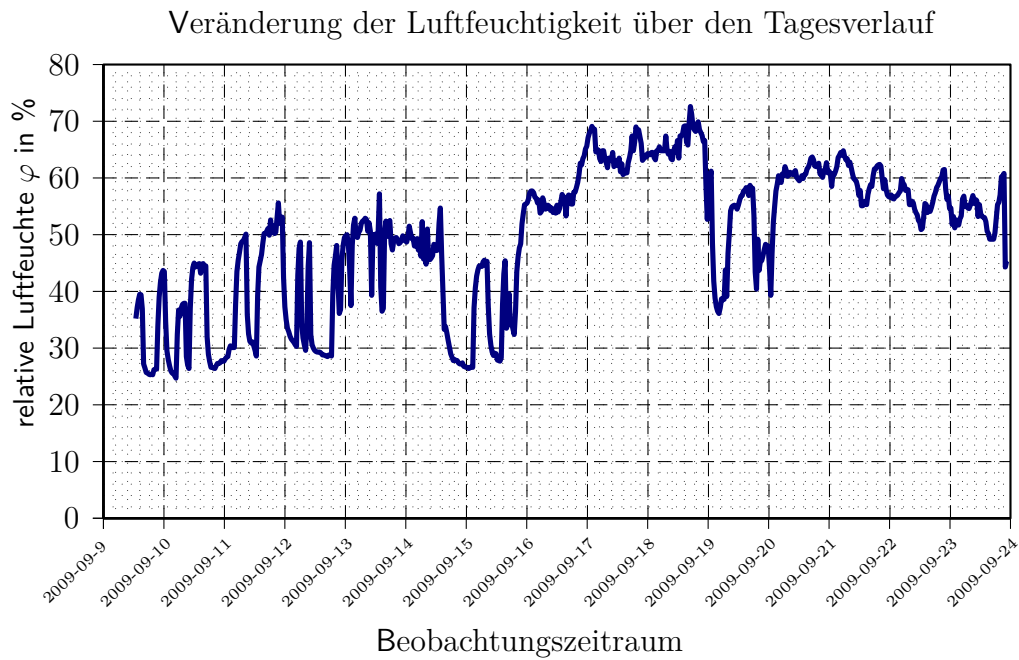
## 3.4 Umgebungsbedingungen

Die Parameter in Bezug auf Umgebungsbedingungen sind für ein System als Störgröße zu berücksichtigen und in aller Regel unbekannt, obwohl sie durchaus messbar wären. Ein System muss also über regelungstechnische Einrichtungen verfügen, um diese Einflüsse ausgleichen zu können. Zwei Einflussgrößen sind hier explizit angeführt.

### 3.4.1 Luftfeuchtigkeit und Temperatur

In thermodynamischen Prozessen spielen Luftfeuchtigkeit und Temperatur bei Abkühlvorgängen eine große Rolle.

Exemplarische Messungen der Kühlluft über einen Kontrollzeitraum von 2 Wochen, ergeben die Werte für die relative Luftfeuchtigkeit und die Temperatur. Die dabei erzielten



**Abbildung 3.27:** Relative Feuchtigkeit  $\varphi$  der Kühlluft in %

Ergebnisse sind im Diagramm 3.27 für die Luftfeuchtigkeit sowie im Diagramm 3.28 für die Temperatur dargestellt.

In Kapitel 7 wird auf diesen Punkt noch genauer eingegangen.

Im Folgenden wird die für die Aufgabe zur Verfügung stehende Information über die Anlagenbeschreibung hinaus dargestellt. Es beschreibt die Ausgangslage für die Zielerreichung.

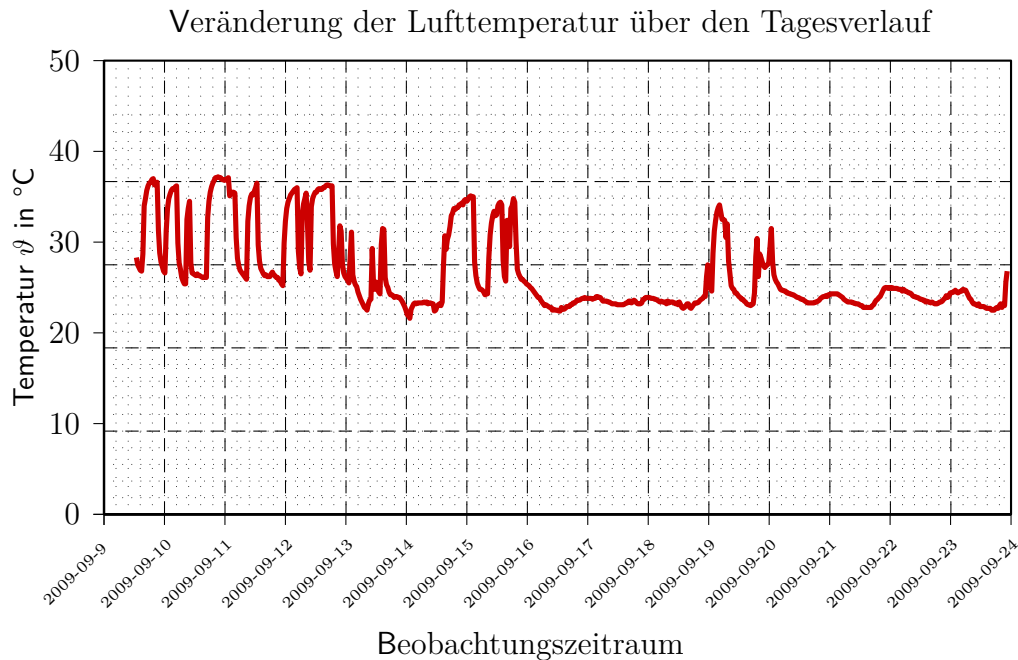
### 3.4.2 Reglerinformationen

Die Anlage wird laut Auskunft des Anlagenherstellers nahezu ausschließlich über PID Regler gesteuert. Genauere Informationen über die Regelparameter liegen nicht vor.

### 3.4.3 Dokumentation

Dokumente und Anleitungen standen von folgenden Anlagenbauteilen zur Verfügung: Systemdokumentation Dosieranlage [PC08], Extruder [Hosf], Extruderschnecke [Hosc], An-





**Abbildung 3.28:** Temperatur  $\vartheta$  der Kühlluft in °C

schluss zum Blaskopf [Hosb], Betriebsanleitung für den Hochleistungskühlring [Hos08a], Betriebsanleitung Folienblaskopf [Hos08b], Betriebsanleitung für den Kühlturm [Hosa], Installations- und Konfigurationsanleitung Dickenabweichungssensor [Kün06], Anleitung für die Ultraschallblasenregelung [Hose], Technische Dokumentation für den Wendestangenabzug [Dec], Anleitung Folienrekanlage [Hosd], Anleitung für den Wickler [Kol], Anleitung für den Massedruckaufnehmer [Dyn], Bedienungsanleitung für einen Multitemperaturregler [PMA], Spezifikation Additiv 1 [GC03], Spezifikation Polypropylen [Unv], Farbmessprotokoll [Ebe09]. Weiters standen während der Zeit in dem Unternehmen sämtliche Produktionsberichte, sonstige Dokumentationen zur Verfügung. Ebenso fanden viele Gespräche mit Herrn Mag. Alexander Grafinger statt, der als Prozesstechnologe für die Anlage verantwortlich ist. Persönliche Notizen zu aktuellen Problemen haben zum Verständnis für den Prozess Einiges beigetragen (Längendifferenzproblem).

### 3.4.4 Messsysteme

Bezüglich der Temperatur sind PT100(B) Fühler verbaut, beispielsweise im Bereich des Extruders mit einem Multitemperaturregler. Dort kommt auch ein speziell für hohe Drücke

und Temperaturen geeigneter Massedrucksensor zum Einsatz. Im Bereich des Kalibrierkorbs kommt ein Dickenabweichungssensor zum Einsatz, wie in Kapitel 3.3.4 beschrieben.

### 3.4.5 Messdaten

Die Messdaten **des Prozesses** wurden von einem separatem Prozessdatenerfassungsrechner aus der Anlage übermittelt. Sie liegen in Form einer CSV Datei vor. In der ersten Spalte ist Datum und Uhrzeit eingetragen, in den restlichen Spalten sind sowohl Soll- als auch Istwerte einzelner Maschinenparameter zeilenweise eingetragen. Der Prozessdatenerfassungsrechner ist mit dem Softwarepaket National Instruments Labview ausgestattet, welches es zulässt die Abtastzeit selbst zu wählen. Dabei wurden nicht alle von der Anlage zur Verfügung stehenden Werte zum selben Zeitpunkt verknüpft. So tritt der Fall ein, dass bestimmte Parameter erst zu einem späteren Zeitpunkt in der Datei zur Verfügung stehen. Der Beginn der Messdatenerfassung war am 30. Mai 2009 für wenige Prozesssignale. Informationen des Folienblaskopfs standen erst ab 3. Juli 2009 zur Verfügung. Stellgrößen des Folienblaskopfes wurden ebensowenig erfasst wie die Stellgrößen des Extruders. Der Bereich des größten Datenvolumens hinsichtlich der Prozessdatenerfassung liegt in der Zeit vom 24. September bis 4. November 2009.

Die Messdaten **der Produkte** werden im eigenen Warenwirtschaftssystem erfasst. Es werden dabei alle vom Labor erfassten Produktparameter eingegeben. Ebenso liegt die Information bei, welcher Rohstoff zum Einsatz kommt. Die Information, welche Rohstoffcharge in welchem Produkt enthalten ist, wird nicht aufgezeichnet. Diese Liste kann auf Wunsch in einer Excelliste exportiert werden. Der Zeitraum für die Produktdaten liegt zwischen 4. Juni 2009 und 5. August 2009.

Die Messdaten **des Rohstoffes** werden elektronisch nicht erfasst. Sie werden in Papierform vom Lieferanten übernommen und dem Lieferschein beigelegt. Sie musste manuell erfasst werden und der Datenerfassungszeitraum geht von 11. Juni 2007 bis zum 3. August 2009.

### 3.4.6 Versuche

Die Anlage wird im 4 Schichtbetrieb gefahren. Aus ökonomischen und nachvollziehbaren Gründen waren Versuche in diesem Zeitraum nicht möglich [Gmb09b].

## 3.5 Kurzzusammenfassung und Methodenwahl

Die detailliertere Darstellung des Produktionsprozesses beginnt mit der Dosierung und Förderung von Granulat, das in entsprechenden Behälter gewogen und in der Folge dem Extruder konstant zugeführt wird. Im Extruder erfolgt der Aufschmelzprozess unter hoher Temperatur und hohem Druck. Das strukturviskose Material wird in diesem Prozessabschnitt eine zähflüssige Masse. Sie wird durch den Anschluss in den Wendelverteiler gepresst indem sie in Bezug auf Temperatur und Kreidedispersion homogen über den Umfang verteilt wird. Das eigentliche Werkzeug drückt den Rohstoff von unten nach oben, von Luft außen- und innenseitig umgeben um so die Erstarrung zu erreichen. Dies alles geschieht im Kalibrierkorb, der auch einen Kühlturm beinhaltet, um das Internal Bubble Cooling bewerkstelligen zu können. Der Vorabzug, der den Blasformprozess wesentlich unterstützt ist der Startbeginn nach Erzeugung der Rohfolie und diese im Wendestangenabzug mehrfach zu drehen, um eventuelle Dickenschwankungen ausgleichen zu können. Wie beschrieben, wird die Folie mehrfach über verschiedene Umlenkrollen geführt am Umfang gedreht und danach einseitig geschnitten. Das Reckwerk als wesentlicher Prozessschritt für die Erreichung mechanischer und thermodynamischer Eigenschaften verstreckt die Folie derart, dass eine auf mikroskopische Bereiche beschränkte bewusste Zerstörung ausreichend große Werte für die Wasserdampfdurchlässigkeit zulässt, ohne zu geringe Werte für Festigkeit oder Dehnung in Kauf nehmen zu müssen. Nach dem Abkühlen der Folie am Reckwerksende wird links und rechts ein Randstreifen weggeschnitten und anschließend aufgewickelt. Im gesamten Prozess stehen Anlageninformationen zur Verfügung, welche die Soll- und Istwerte der Anlage beschreiben. Teilweise existieren auch Anlagendokumente sowie Unterlagen über Rohstoff und Produkt.

Das Ziel dieser Arbeit ist es ein Modell für die Gesamtanlage zu erstellen um damit jene Prozessgrößen identifizieren zu können, die den wesentlichen Einfluss auf die Produktqualität haben.

In Kapitel 2 wurden einige regelungstechnische Methoden vorgestellt, die für technische Problemstellungen geeignet sind. Sie kommen je nach vorhandenen Bedingungen zum Einsatz. Aufgrund der Zielsetzung ist die Methode der Modellbildung über künstliche neuronale Netze (black-box Modell) nicht geeignet. Es besteht keine Möglichkeit die Anlageneinstellung zurückrechnen und dann die Ausgangsparameter zu optimieren. Nach dem white-box Modell liegen über die gesamte Anlage zu wenig Information vor um diese Modellierungsart durchführen zu können. Beispielweise wurde über die Literaturrecherche offenbar, dass es unzählige Rohstoffmodelle gibt und dass man sich mit dem Thema nicht-newtonscher Fluiden seit über 100 Jahre beschäftigt (siehe Anhang Tabelle A.2 ab 1929). Im folgenden Kapitel wird auf Basis des bright grey-box Modells ein Modellierungsversuch unternommen.

# 4 Modellbildung

In den folgenden Kapiteln wird damit begonnen, einzelne kleine Anlageteile zu modellieren. Begonnen wird mit dem Extrusionsprozess, da die Förderung und Dosierung wie in Kapitel 2.7 beschrieben keine Berücksichtigung findet.

## 4.1 Modellbildung - Extrusion

Für den Schneckenantrieb ist laut Wartungsanlage ein Gleichstrommotor vorgesehen [Hosf]. Das Ersatzschaltbild für einen Gleichstrommotor wird folgendermaßen dargestellt. Das Beispiel wurde [Lun03, S. 75ff] entnommen.

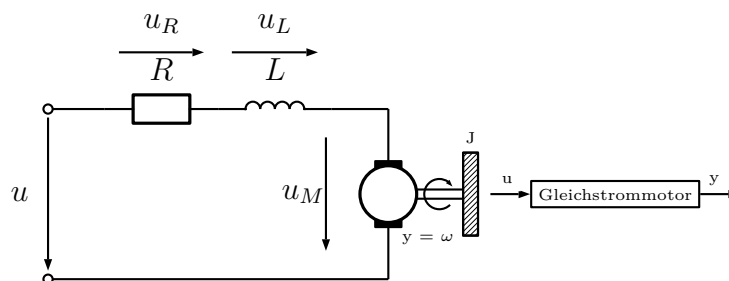


Abbildung 4.1: Ersatzschaltbild Gleichstrommotor

Auf Basis dieses Ersatzschaltbildes können die Gleichungen aufgestellt werden. Die Summe der Gesamtspannungen ist laut der Kirchhoffschen Maschenregel genauso Null, wie das Gesamtmoment im System. Die folgenden drei Spannungsgleichungen beschreiben den elektrischen Teil. Über Gleichung (4.3) findet die Verknüpfung zur Mechanik statt.

$$u_R = R \cdot i \tag{4.1}$$

$$u_L = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (4.2)$$

$$u_M = k_M \cdot \omega \quad (4.3)$$

$$M = k_T \cdot i \quad (4.4)$$

$$M_R = k_R \cdot \omega \quad (4.5)$$

$$J \cdot \dot{\omega} = M_B \quad (4.6)$$

Kopplung durch Kirchhoff und Momentengleichgewicht

$$u_R + u_L + u_M - u = 0 \quad (4.7)$$

$$M - M_R - M_B = 0 \quad (4.8)$$

Aufstellen der Differentialgleichungen

$$R \cdot i + L \frac{di}{dt} + k_M \cdot \omega = u \quad (4.9)$$

Über die Maschinenkonstante  $k_T$  sind Strom und Moment verknüpft, aus diesem Grund läßt sich der Strom  $i$  als Funktion des Moments ausdrücken (4.4)

$$\frac{R}{k_T} M + \frac{L}{k_T} \dot{M} + k_M \cdot \omega = u \quad (4.10)$$

$$M = J \cdot \dot{\omega} + k_R \cdot \omega \quad (4.11)$$

Die Ableitung daraus ergibt

$$\dot{M} = J \cdot \ddot{\omega} + k_R \cdot \dot{\omega} \quad (4.12)$$

durch Einsetzen von Gleichung (4.11) und (4.12) in Gleichung (4.10) sowie durch Umformen ergibt sich die gesuchte Differentialgleichung.

$$\ddot{\omega} + \left( \frac{R}{L} + \frac{k_R}{J} \right) \dot{\omega} + \left( \frac{R \cdot k_R}{J \cdot L} + \frac{k_M \cdot k_T}{J \cdot L} \right) \omega = \frac{k_T}{J \cdot L} u \quad (4.13)$$

Aus dieser Differentialgleichung 2. Ordnung läßt sich ein Verzögerungsglied zweiter Ordnung approximieren. Durch Vernachlässigung der elektrischen Zeitkonstante gegenüber der mechanischen erhält man

$$G(s) = \frac{K}{1 + Ts} \quad (4.14)$$

Dabei müssen die Konstanten K und T gemessen werden. T wird durch die Auswertung der Sprungantwort auf einen Spannungssprung gewonnen und K ist die Anlaufspannung die nötig ist, um die innerer Reibung zu überwinden.

**Fazit:** Die Modellierung einzelner Anlagenkomponenten ist auf Basis physikalischer Gesetzmäßigkeiten möglich. So wurde in diesem Kapitel der Motor des Extruders in allgemeiner Form modelliert. Die Physik ist bei der Modellbildung immer Ausgangspunkt für die mathematische Beschreibung technischer Systeme. Wenn allerdings keine konkreten Werte bekannt sind oder über Versuche ermittelt werden können, ist eine Analyse des Übertragungsverhaltens nicht möglich.

## 4.2 Kurzzusammenfassung Modellbildung

Auf Basis der in Kapitel 2 beschriebenen Vorgehensweise zur Ermittlung der Anlageneinstellungen, den Methoden der Modellbildung und den statistischen Analysemöglichkeiten wurde in tabellarischer Form angegeben, welche Voraussetzung für jede einzelne Variante besteht. In Tabelle 4.1 und nach Kenntnis von Kapitel 2 und Kapitel 3 wurden die Möglichkeiten für Modellbildungsvarianten ausgelotet. Für die Modellierung des Extruders wurde nach dem bright grey-box Verfahren. Da aber keine Modellparameter über Versuche identifiziert werden konnten, bleibt auf Basis der Zielsetzung die Frage, welchen Nutzen ein Teilmodell haben würde, wenn nur über ein Gesamtmodell die Prozessparameter identifiziert werden können. Die Überprüfung der möglichen Durchführungsmethoden hat die Auswahl seit dem vorletzten Kapitel schon deutlich eingeschränkt. Weder das white-box Modell noch das black-box Modell konnten nutzbringend zum Einsatz gebracht werden. Nach der Modellbildung des Antriebsmotors ist auch das bright grey-box Modell nicht mehr möglich und somit ist das Ziel einer Modellierung der gesamten Anlage nicht aufrecht zu erhalten.

Unabhängig von diesen Schwierigkeiten ist eine Lösung im Bereich der Extrusion beim Transport des Materials, im Werkzeug und im Kalibrierkorb geschlossen nicht lösbar. Man muss sich an diesem Punkt mit approximativen Lösungen beschäftigen. Auch hier bliebe die Frage offen, wie detaillierte Anlagenmodelle mit Approximativen zu kombinieren sind.

Tabelle 4.1: Prüfung der Durchführungsmethoden

Oberbegriff	Detail	Vorraussetzung	Prüfung
Theoretische Modellbildung	mathematische Formulierung der Modelle	interdisziplinäres Wissen über Technik und Rohstoff	Modellbildung nicht vollständig möglich
Experimentelle Modellbildung	Frequenzgangmessung (nicht parametrisch)	vorhandenes Modell, Messung erforderlich	Keine Messungen möglich
	Fourieranalyse (nicht parametrisch)	linearität, Messen erforderlich, definierte Testsignale	Keine Messungen möglich, Nichtlinearitäten
	Korrelationsanalyse (nicht parametrisch)	Offener Regelkreis, vorhandenes Modell, Messen erforderlich	Keine Messungen möglich, kein vollständiges Modell möglich
	Kennwertermittlung (parametrisch)	Modell vorhanden, kleines Störsignal, Messen erforderlich	Keine Messungen möglich, unbekannte Störsignale, kein vollständiges Modell möglich
	Parameterschätzmethode (parametrisch)	Modell erforderlich, Messen erforderlich	Keine Messungen möglich, kein vollständiges Modell möglich
	künstliche neuronale Netze (parametrisch)	Spezielle Testdatensätze erforderlich, neuronales Modell nötig	Keine definierten Testdatensätze, kein neuronales Modell möglich
Statistik	Statistische Korrelation	Normalverteilung, Linearität	teilweise möglich
Statistik	Hauptkomponentenanalyse	Normalverteilung	teilweise möglich

Somit zeichnet sich an diesem Punkt laut Tabelle 4.1 die statistische Lösung ab. Sie wird im folgenden diskutiert.



# 5 Ergebnisse

## 5.1 Datenstrukturanalyse

In technischen Prozessen ist es oftmals ein Problem, die für die Gewinnung neuer Erkenntnisse notwendigen Daten nicht in ausreichendem Umfang und Qualität zur Verfügung zu haben. Zudem führt eine dezentrale Datenerfassung zu einem erhöhten Synchronisationsaufwand. Starke Unterschiede in der Anzahl von Datensätzen an verschiedenen Stellen der Produktionsanlage sind hinderlich bei der Auswertung. In diesem Kapitel wird der Versuch unternommen, die Differenzen zu beseitigen ohne einen wesentlichen Anteil an Informationsverlust hinnehmen zu müssen. Das in Abbildung 5.3 dargestellte Schema verdeutlicht, dass Teile der Daten des Produktionsprozesses nicht für die Analyse zur Verfügung stehen, wenn kleine Anteile des Produktionsprozesses „abgeschnitten“ werden um die Asynchronität zu beseitigen. Unter bestimmten Voraussetzungen kann diese Methode zum Erfolg führen. Die Ergebnisse werden im folgenden Kapitel präsentiert und anschließend diskutiert. Die grundsätzliche Idee dieser Analysemethode basiert auf den in der Einleitung beschriebenen Eigenheiten der Anlage, die als Kombination beider Teilprozesse angesehen werden kann. Die Aufteilung des Prozesses von *einem* (Abbildung 5.1) in *zwei* Teilprozesse (Abbildung 5.2) führt zu den oben genannten Überlegungen. Somit wär es theoretisch möglich die Splittung vom Gesamtprozess durchzuführen.

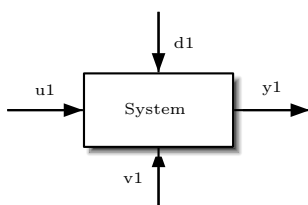


Abbildung 5.1: Gesamtprozess

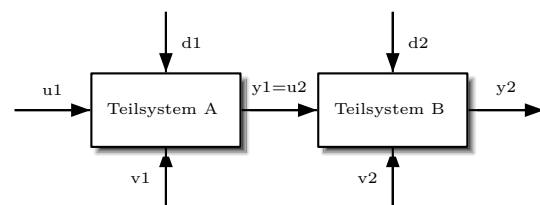
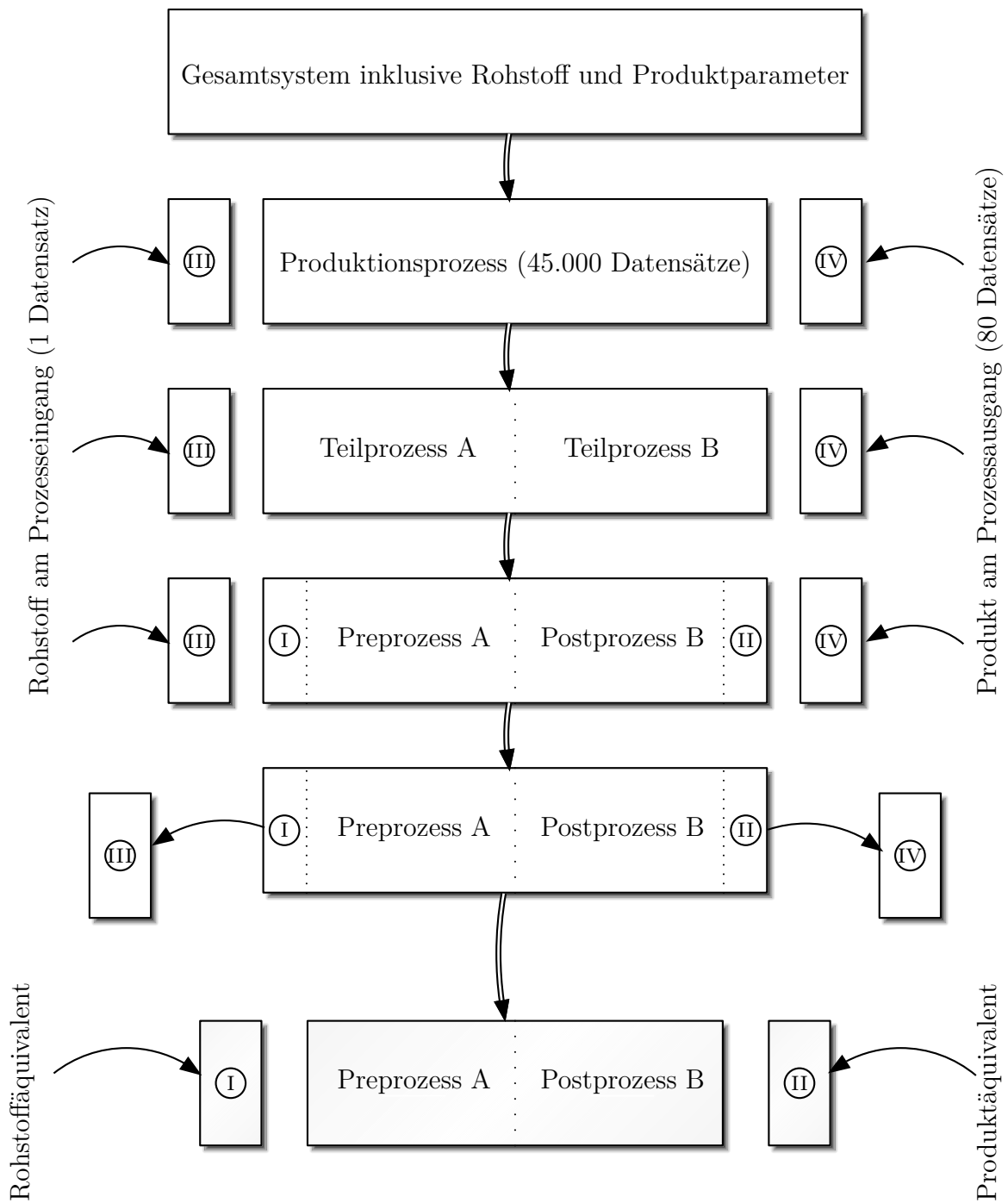


Abbildung 5.2: Dekomposition



**Abbildung 5.3:** Datenstrukturanalyse, III entspricht dem Rohstoff, IV ist das Produkt, I und II entsprechen dem abgeleiteten Produkt und Rohstoffeigenschaften (äquivalent)

Dieses Bild zeigt links bei III den Rohstoff mit nur einem Datensatz, während rechts bei IV schon 80 Datensätze für eine Auswertung zur Verfügung stehen. Über den eigentlichen

Produktionsprozess stehen 45.000 Datensätze zur Verfügung. Aussagen über den Prozess zu treffen auf Basis von 81 Parametersätzen (Rohstoff+Produkt) ist für eine klare Aussage nicht zielführend möglich. Als mögliche Lösung wurde die Idee geboren, dass kurz nach dem Prozessbeginn die Rohstoffinformationen in der Differenz von Soll zu Ist-Wert der ersten Prozessabschnitte enthalten ist. Man nimmt an, dass sich die Rohstoffeigenschaften in diesen Differenzen widerspiegeln und weiters, dass dieser Prozessschritt das Optimum ist. Dies läuft der Analyse zuwider, da ja das Ziel ist, die Prozessdaten zu analysieren, um die wesentlichen Optimierungsparameter zu finden. Durch diese Maßnahme werden aber die Chancen gewonnen, weitere Analysen durchzuführen, um Aussagen über den Prozess machen zu können. Die analoge Vorgehensweise ist auf der Produktseite vorgenommen worden. Somit kann auf Basis dieser Datenanalyse die Auswertung nach weiteren statistischen Gesichtspunkten vorgenommen werden. Dies wird in Kapitel 5.6 mit Hilfe der PCA passieren.

## 5.2 Analyse auf Verteilung

Die Voraussetzung für die Durchführung einer PCA ist im allgemeinen eine Normalverteilung der zu prüfenden Größe. Das Ziel dieser Analysen ist es, einen möglichst großen Informationsgewinn über den Prozess zu erhalten. Dies schließt auch den Rohstoff ein, da er sich wesentlich in den Prozessparametern auswirkt. Beispielsweise sind die Temperaturen im Extruder genauso anzupassen, wie im Reckwerk. Je nach MFR Größe verändert sich die Produktionsgeschwindigkeit aufgrund der veränderten Scherkräfte extruderseitig. Je besser die Verteilung ist, umso konstanter der Rohstoff, umso größer wird der Informationsgewinn über den gesamten Produktionsprozess. Es ist nicht zielführend, die Prozessparameter zu analysieren und den Rohstoff beiseite zu lassen. Aus diesem Grund wurde dem Rohstoff ein relativ großer Teil gewidmet. Es werden dabei 3 verschiedene Rohstofftypen betrachtet und deren Verteilung analysiert.

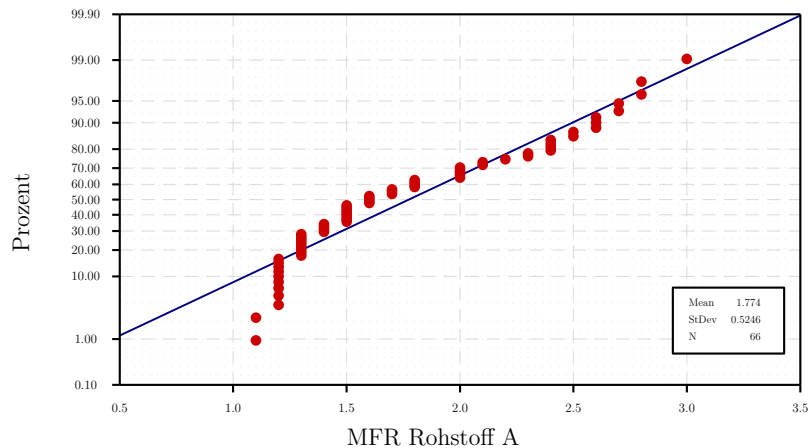
### 5.2.1 Rohstoff Typ A

Der MFR wird hier aus dem vorhandenen Datensatz aller Werksprüfzeugnisse des Rohstoffes A analysiert.

**Hypothese 1 :**

Die Nullhypothese  $H_0$ : MFR ist normalverteilt.

Die Alternativhypothese  $H_a$ : MFR ist nicht normalverteilt.



**Abbildung 5.4:** MFR Rohstoff A (AD)

**Ergebnis 1 :**

Da der berechnete  $p_{sig}$ -Wert kleiner als das Signifikanz-Niveau  $\alpha = 0,05$  ist, muss die Null-Hypothese  $H_0$  zurückgewiesen und die alternative Hypothese  $H_a$  akzeptiert werden. Das Risiko die Null-Hypothese  $H_0$  zurückzuweisen, obwohl sie wahr ist, ist geringer als 0,01 %

**Die Größe ist daher nicht als normalverteilt anzunehmen.**

**Hypothese 2 :**

Die Nullhypothese  $H_0$ : Glührückstand ist normalverteilt.

Die Alternativhypothese  $H_a$ : Glührückstand ist nicht normalverteilt.

**Ergebnis 2 :**

Da der berechnete  $p_{sig}$ -Wert kleiner als das Signifikanz-Niveau  $\alpha = 0,05$  ist, muss die Null-Hypothese  $H_0$  zurückgewiesen und die alternative Hypothese  $H_a$  akzeptiert werden. Das Risiko die Null-Hypothese  $H_0$  zurückzuweisen, obwohl sie wahr ist, ist geringer als 0,01 %

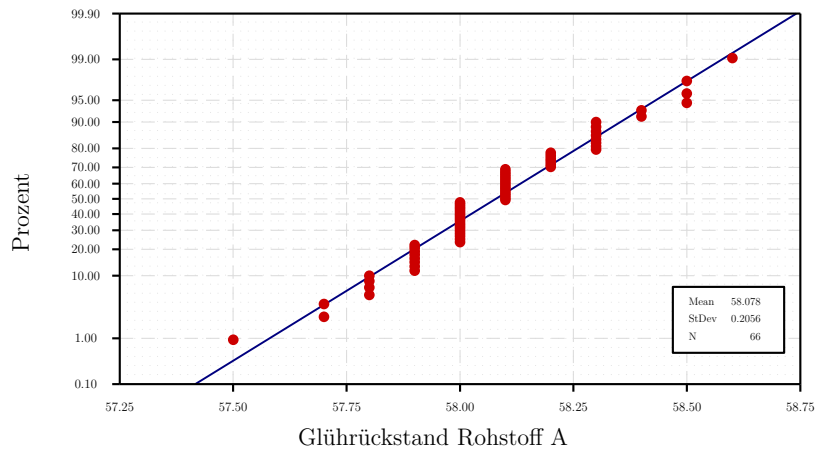


Abbildung 5.5: Glührückstand Rohstoff A (AD)

Die Größe ist daher nicht als normalverteilt anzunehmen.

Hypothese 3 :

Die Nullhypothese  $H_0$ : Äußere Restfeuchte ist normalverteilt.

Die Alternativhypothese  $H_a$ : Äußere Restfeuchte ist nicht normalverteilt.

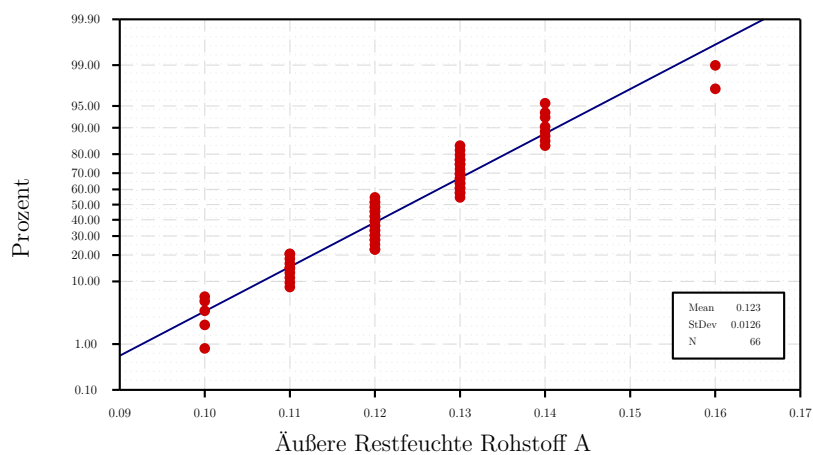


Abbildung 5.6: Äußere Restfeuchte Rohstoff A (AD)

Ergebnis 3 :

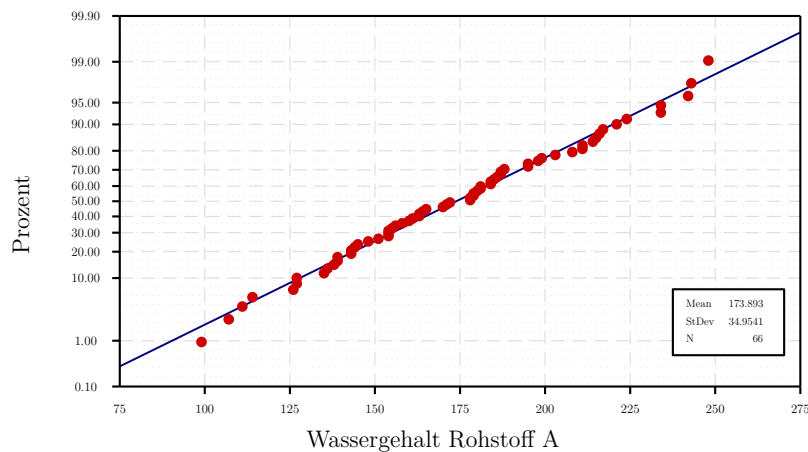
Da der berechnete  $p_{sig}$ -Wert kleiner als das Signifikanz-Niveau  $\alpha = 0,05$  ist, muss die Null-Hypothese  $H_0$  zurückgewiesen und die alternative Hypothese  $H_a$  akzeptiert werden. Das Risiko die Null-Hypothese  $H_0$  zurückzuweisen, obwohl sie wahr ist, ist geringer als 0,01 %

**Die Größe ist daher nicht als normalverteilt anzunehmen.**

**Hypothese 4 :**

**Die Nullhypothese  $H_0$ :** *Wassergehalt ist normalverteilt.*

**Die Alternativhypothese  $H_a$ :** *Wassergehalt ist nicht normalverteilt.*



**Abbildung 5.7:** Wassergehalt Rohstoff A (AD)

**Ergebnis 4 :**

Da der berechnete  $p_{sig}$ -Wert größer als das Signifikanz-Niveau  $\alpha = 0,05$  ist, kann die Null-Hypothese  $H_0$  bestätigt werden. Das Risiko die Null-Hypothese  $H_0$  zu bestätigen, obwohl sie falsch ist, ist geringer als 84,34 %

**Die Größe ist daher als normalverteilt anzunehmen.**

**Hypothese 5 :**

**Die Nullhypothese  $H_0$ :** *Dichte ist normalverteilt.*

**Die Alternativhypothese  $H_a$ :** *Dichte ist nicht normalverteilt.*

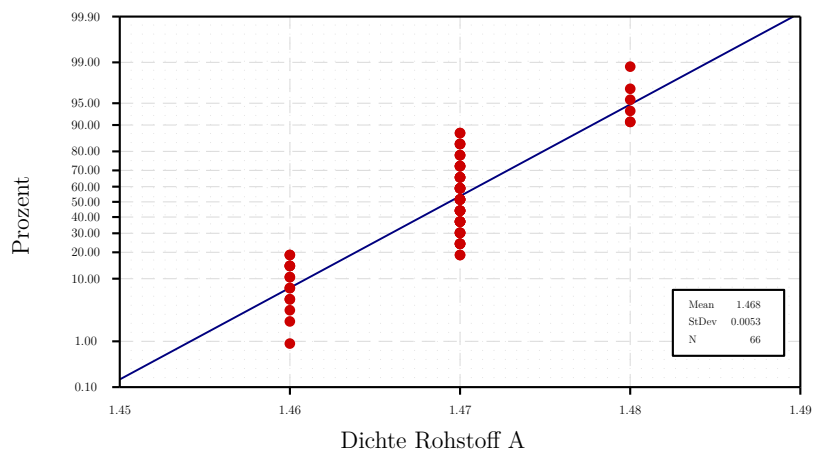


Abbildung 5.8: Dichte Rohstoff A (AD)

**Ergebnis 5 :**

Da der berechnete  $p_{sig}$ -Wert kleiner als das Signifikanz-Niveau  $\alpha = 0,05$  ist, muss die Null-Hypothese  $H_0$  zurückgewiesen und die alternative Hypothese  $H_a$  akzeptiert werden. Das Risiko die Null-Hypothese  $H_0$  zurückzuweisen, obwohl sie wahr ist, ist geringer als 0,01 %

**Die Größe ist daher nicht als normalverteilt anzunehmen.**

**Hypothese 6 :**

**Die Nullhypothese  $H_0$ :** *Schüttdichte ist normalverteilt.*

**Die Alternativhypothese  $H_a$ :** *Schüttdichte ist nicht normalverteilt.*

**Ergebnis 6 :**

Da der berechnete  $p_{sig}$ -Wert kleiner als das Signifikanz-Niveau  $\alpha = 0,05$  ist, muss die Null-Hypothese  $H_0$  zurückgewiesen und die alternative Hypothese  $H_a$  akzeptiert werden. Das Risiko die Null-Hypothese  $H_0$  zurückzuweisen, obwohl sie wahr ist, ist geringer als 0,01 %

**Die Größe ist daher nicht als normalverteilt anzunehmen.**

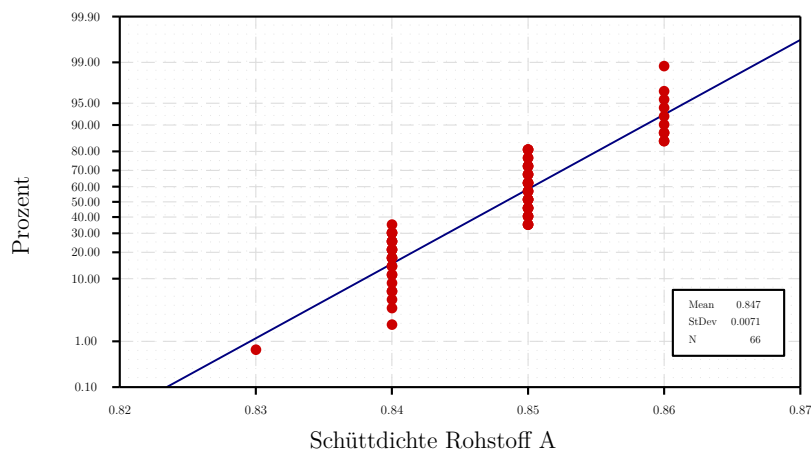


Abbildung 5.9: Schüttdichte Rohstoff A (AD)

Tabelle 5.1: Rohstoff A Übersicht

Material A	Mittelwert	Max	Min	Stabw
MFR [g/10min]	1,77	3,00	1,10	0,53
Glührückstand [%]	58,08	58,6	57,50	0,21
äußere Restfeuchte [%]	0,12	0,16	0,10	0,01
Wassergehalt (K.F) [ppm]	173,89	248,00	99,00	35,22
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	1,47	1,48	1,46	0,01
Schüttdichte [kg/l]	0,85	0,86	0,83	0,01

### 5.2.2 Rohstoff Typ B

Bei der Rohstoffanalyse von Typ B entfallen die Diagramme, die Aussagekraft ist aufgrund des geringen Datenumfangs von nur 4 Datensätzen begrenzt. Die Tabelle 5.3 wird der Vollständigkeit halber angegeben.



**Tabelle 5.2:** Rohstofftyp A Verteilungsanalyse

Typ A	Anderson-Darling	Kolmogorow-Smirnow
MFR	nicht normalverteilt	nicht normalverteilt
Glührückstand	nicht normalverteilt	normalverteilt
äußere Restfeuchte	nicht normalverteilt	nicht normalverteilt
Wassergehalt (K.F)	normalverteilt	normalverteilt
Dichte	nicht normalverteilt	nicht normalverteilt
Schüttdichte	nicht normalverteilt	nicht normalverteilt

**Tabelle 5.3:** Rohstoff B

Material B	Mittelwert	Max	Min	Stabw
MFR [g/10min]	2,20	2,40	2,10	0,14
Glührückstand [%]	58,10	58,40	58,00	0,20
äußere Restfeuchte [%]	0,12	0,13	0,12	0,01
Wassergehalt (K.F) [ppm]	173,50	227,00	123,00	42,49
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	1,47	1,47	1,47	0,00
Schüttdichte [kg/l]	0,85	0,86	0,83	0,01

### 5.2.3 Rohstoff Typ C

**Hypothese 7 :**

Die Nullhypothese  $H_0$ : MFR ist normalverteilt.

Die Alternativhypothese  $H_a$ : MFR ist nicht normalverteilt.

**Ergebnis 7 :**

Da der berechnete  $p_{sig}$ -Wert größer als das Signifikanz-Niveau  $\alpha = 0,05$  ist, kann die Null-Hypothese  $H_0$  bestätigt werden. Das Risiko die Null-Hypothese  $H_0$  zu bestätigen, obwohl sie falsch ist, ist geringer als 32,10 % .

**Die Größe ist daher als normalverteilt anzunehmen.**

**Hypothese 8 :**

Die Nullhypothese  $H_0$ : Glührückstand ist normalverteilt.

Die Alternativhypothese  $H_a$ : Glührückstand ist nicht normalverteilt.

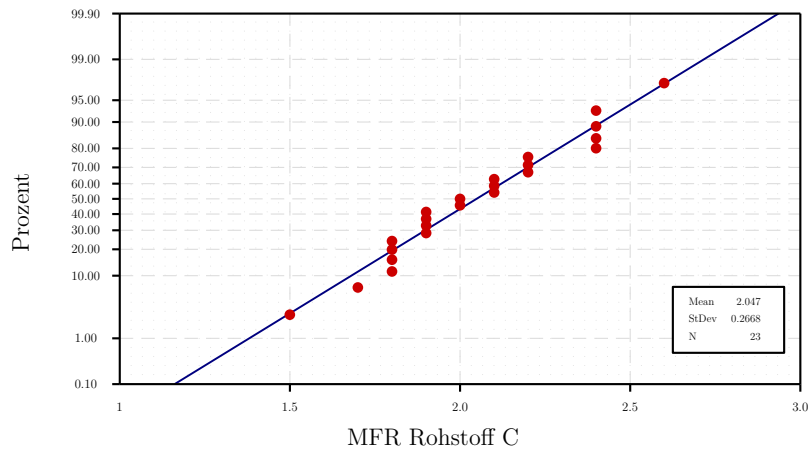


Abbildung 5.10: MFR Rohstoff C (AD)

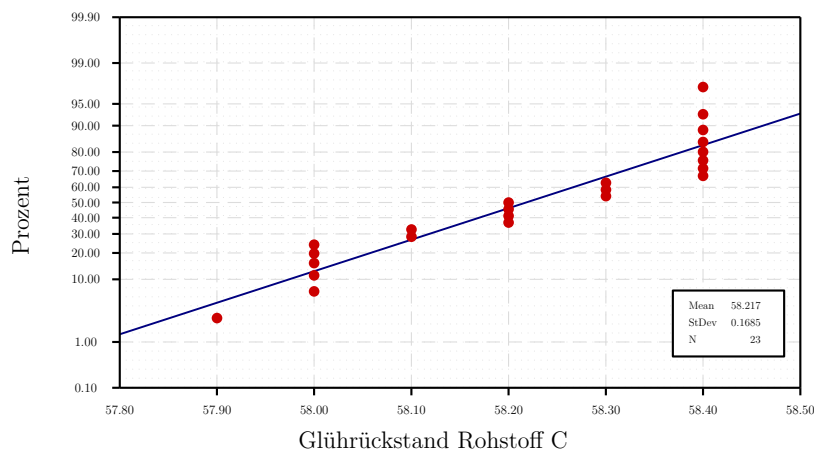


Abbildung 5.11: Glührückstand Rohstoff C (AD)

**Ergebnis 8 :**

Da der berechnete  $p_{sig}$ -Wert kleiner als das Signifikanz-Niveau  $\alpha = 0,05$  ist, muss die Null-Hypothese  $H_0$  zurückgewiesen und die alternative Hypothese  $H_a$  akzeptiert werden. Das Risiko die Null-Hypothese  $H_0$  zurückzuweisen, obwohl sie wahr ist, ist geringer als 0,01 %

**Die Größe ist daher nicht als normalverteilt anzunehmen.**

**Hypothese 9 :**

Die Nullhypothese  $H_0$ : Äußere Restfeuchte ist normalverteilt.

Die Alternativhypothese  $H_a$ : Äußere Restfeuchte ist nicht normalverteilt.

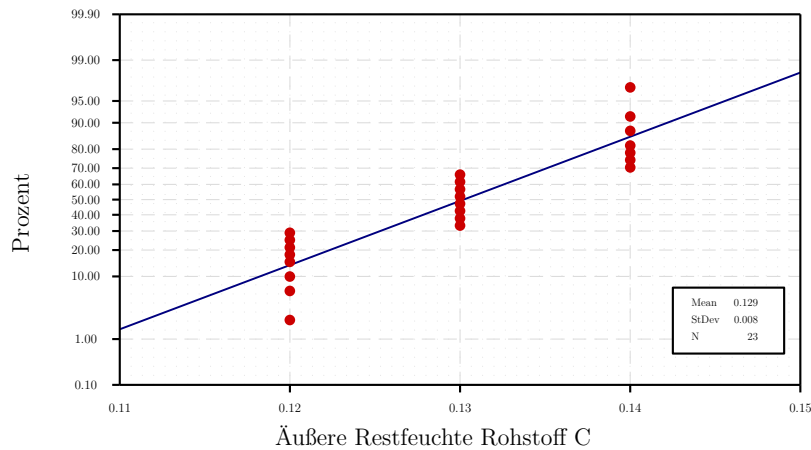


Abbildung 5.12: Äußere Restfeuchte Rohstoff C (AD)

**Ergebnis 9 :**

Da der berechnete  $p_{sig}$ -Wert kleiner als das Signifikanz-Niveau  $\alpha = 0,05$  ist, muss die Null-Hypothese  $H_0$  zurückgewiesen und die alternative Hypothese  $H_a$  akzeptiert werden. Das Risiko die Null-Hypothese  $H_0$  zurückzuweisen, obwohl sie wahr ist, ist geringer als 0,01 %

**Die Größe ist daher nicht als normalverteilt anzunehmen.**

**Hypothese 10 :**

Die Nullhypothese  $H_0$ : Wassergehalt ist normalverteilt.

Die Alternativhypothese  $H_a$ : Wassergehalt ist nicht normalverteilt.

**Ergebnis 10 :**

Da der berechnete  $p_{sig}$ -Wert größer als das Signifikanz-Niveau  $\alpha = 0,05$  ist, kann die Null-Hypothese  $H_0$  bestätigt werden. Das Risiko die Null-Hypothese  $H_0$  zu bestätigen, obwohl sie falsch ist, ist geringer als 19,00 %

**Die Größe ist daher als normalverteilt anzunehmen.**

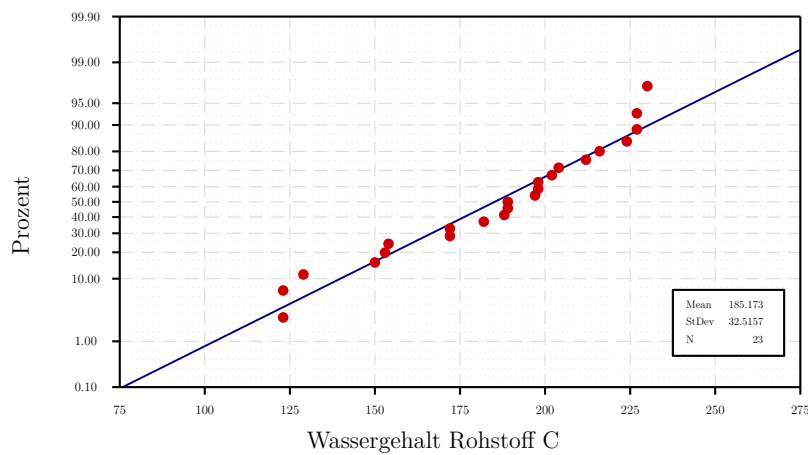


Abbildung 5.13: Wassergehalt Rohstoff C (AD)

Hypothese 11 :

Die Nullhypothese  $H_0$ : Dichte ist normalverteilt.

Die Alternativhypothese  $H_a$ : Dichte ist nicht normalverteilt.

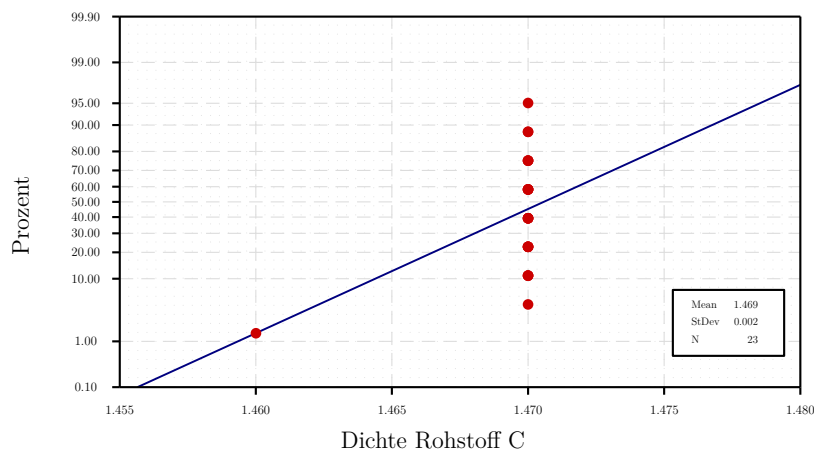


Abbildung 5.14: Dichte Rohstoff C (AD)

Ergebnis 11 :

Da der berechnete  $p_{sig}$ -Wert kleiner als das Signifikanz-Niveau  $\alpha = 0,05$  ist, muss die Null-Hypothese  $H_0$  zurückgewiesen und die alternative Hypothese  $H_a$  akzeptiert werden. Das Risiko die Null-Hypothese  $H_0$  zurückzuweisen, obwohl sie wahr ist, ist geringer als 0,01 %

Die Größe ist daher nicht als normalverteilt anzunehmen.

Hypothese 12 :

Die Nullhypothese  $H_0$ : Schüttdichte ist normalverteilt.

Die Alternativhypothese  $H_a$ : Schüttdichte ist nicht normalverteilt.

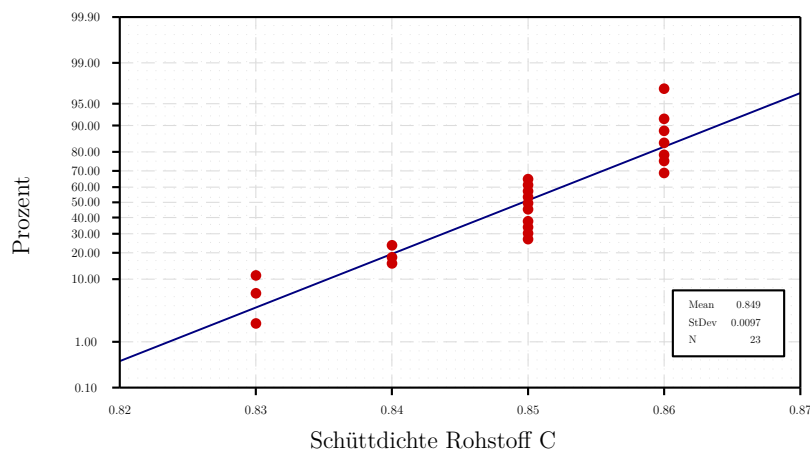


Abbildung 5.15: Schüttdichte Rohstoff C (AD)

Ergebnis 12 :

Da der berechnete  $p_{sig}$ -Wert kleiner als das Signifikanz-Niveau  $\alpha = 0,05$  ist, muss die Null-Hypothese  $H_0$  zurückgewiesen und die alternative Hypothese  $H_a$  akzeptiert werden. Das Risiko die Null-Hypothese  $H_0$  zurückzuweisen, obwohl sie wahr ist, ist geringer als 0,01 %

Die Größe ist daher nicht als normalverteilt anzunehmen.

## 5.2.4 Rohstoff gesamt

Hypothese 13 :

Die Nullhypothese  $H_0$ : MFR ist normalverteilt.

Die Alternativhypothese  $H_a$ : MFR ist nicht normalverteilt.

**Tabelle 5.4:** Rohstoff C Übersicht

Material C	Mittelwert	Max	Min	Stabw
MFR [g/10min]	1,95	2,6	1,5	0,29
Glührückstand [%]	58,43	59,2	57,9	0,39
äußere Restfeuchte [%]	0,13	0,14	0,12	0,01
Wassergehalt (K.F) [ppm]	199,57	242	123	31,32
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	1,47	1,5	1,46	0,01
Schüttdichte [kg/l]	0,85	0,87	0,83	0,01

**Tabelle 5.5:** Rohstofftyp C Verteilungsanalyse

Typ C	Anderson-Darling	Kolmogorow-Smirnow
MFR	nicht normalverteilt	nicht normalverteilt
Glührückstand	nicht normalverteilt	normalverteilt
äußere Restfeuchte	nicht normalverteilt	nicht normalverteilt
Wassergehalt (K.F)	normalverteilt	normalverteilt
Dichte	nicht normalverteilt	nicht normalverteilt
Schüttdichte	nicht normalverteilt	nicht normalverteilt

**Ergebnis 13 :**

Da der berechnete  $p_{sig}$ -Wert kleiner als das Signifikanz-Niveau  $\alpha = 0,05$  ist, muss die Null-Hypothese  $H_0$  zurückgewiesen und die alternative Hypothese  $H_a$  akzeptiert werden. Das Risiko die Null-Hypothese  $H_0$  zurückzuweisen, obwohl sie wahr ist, ist geringer als 0,02 %

**Die Größe ist daher nicht als normalverteilt anzunehmen.**

**Hypothese 14 :**

**Die Nullhypothese  $H_0$ :** *Glührückstand ist normalverteilt.*

**Die Alternativhypothese  $H_a$ :** *Glührückstand ist nicht normalverteilt.*

**Ergebnis 14 :**

Da der berechnete  $p_{sig}$ -Wert kleiner als das Signifikanz-Niveau  $\alpha = 0,05$  ist, muss die Null-Hypothese  $H_0$  zurückgewiesen und die alternative Hypothese  $H_a$  akzeptiert werden. Das Risiko die Null-Hypothese  $H_0$  zurückzuweisen, obwohl sie wahr ist, ist geringer als 0,01 %

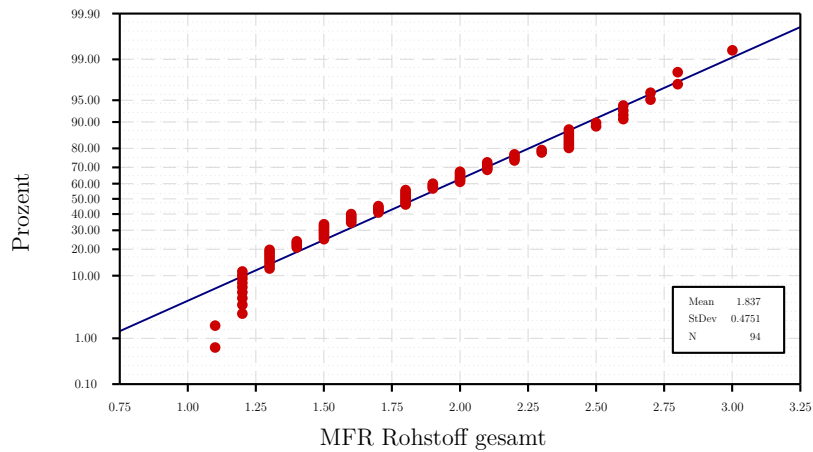


Abbildung 5.16: MFR Rohstoff gesamt (AD)

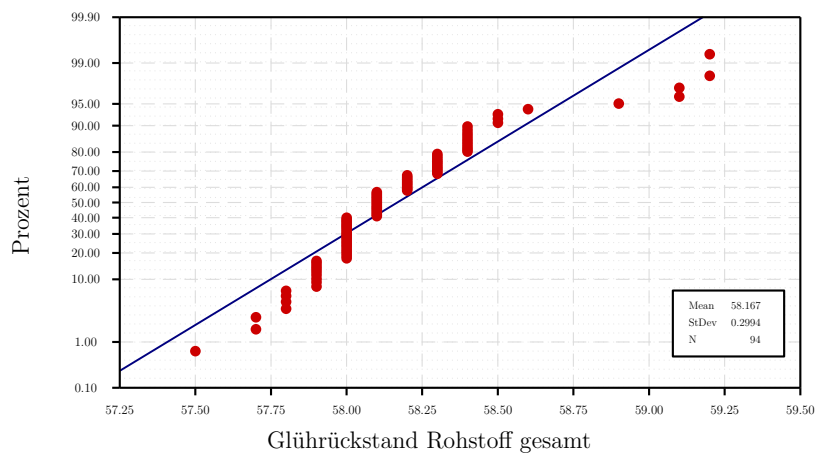


Abbildung 5.17: Glührückstand Rohstoff gesamt (AD)

Die Größe ist daher nicht als normalverteilt anzunehmen.

Hypothese 15 :

Die Nullhypothese  $H_0$ : Äußere Restfeuchte ist normalverteilt.

Die Alternativhypothese  $H_a$ : Äußere Restfeuchte ist nicht normalverteilt.

Ergebnis 15 :

Da der berechnete  $p_{sig}$ -Wert kleiner als das Signifikanz-Niveau  $\alpha = 0,05$  ist, muss die Null-

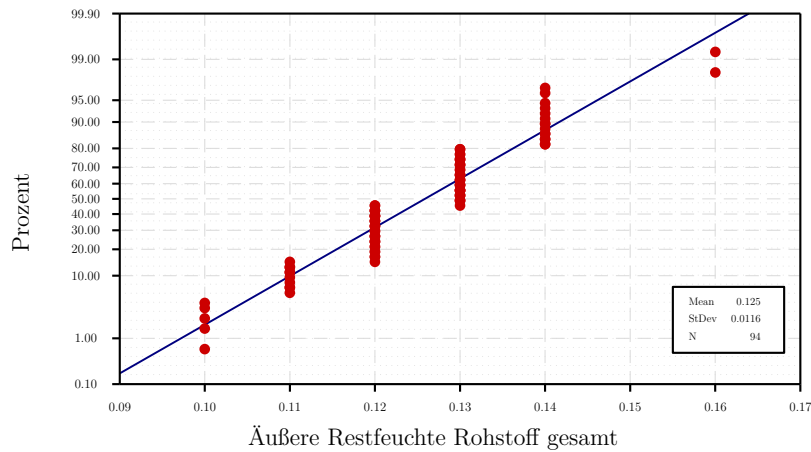


Abbildung 5.18: Äußere Restfeuchte Rohstoff gesamt (AD)

Hypothese  $H_0$  zurückgewiesen und die alternative Hypothese  $H_a$  akzeptiert werden. Das Risiko die Null-Hypothese  $H_0$  zurückzuweisen, obwohl sie wahr ist, ist geringer als 0,01 %

Die Größe ist daher nicht als normalverteilt anzunehmen.

Hypothese 16 :

Die Nullhypothese  $H_0$ : Wassergehalt ist normalverteilt.

Die Alternativhypothese  $H_a$ : Wassergehalt ist nicht normalverteilt.

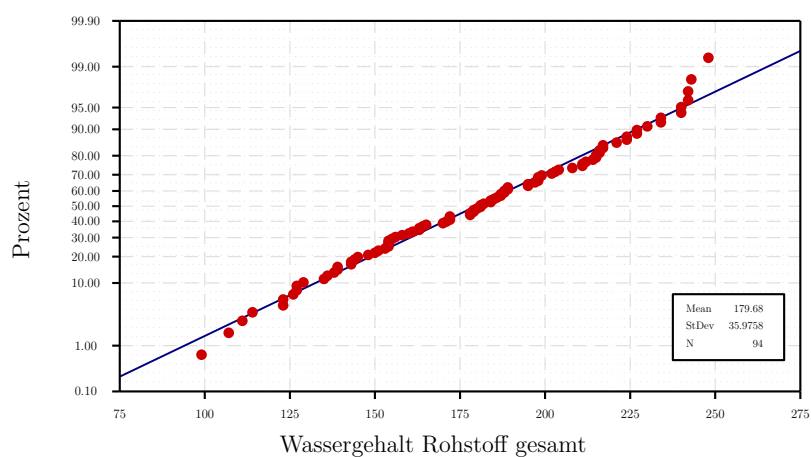


Abbildung 5.19: Wassergehalt Rohstoff gesamt (AD)



**Ergebnis 16 :**

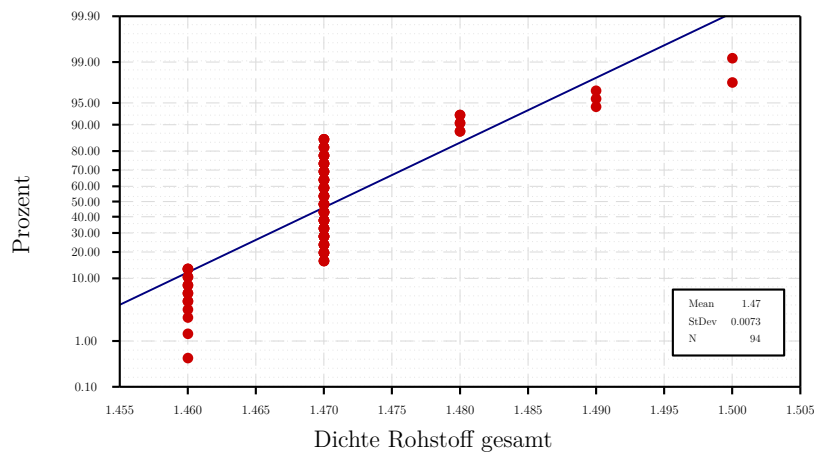
Da der berechnete  $p_{sig}$ -Wert größer als das Signifikanz-Niveau  $\alpha = 0,05$  ist, kann die Null-Hypothese  $H_0$  bestätigt werden. Das Risiko die Null-Hypothese  $H_0$  zu bestätigen, obwohl sie falsch ist, ist geringer als 44,4 % .

**Die Größe ist daher als normalverteilt anzunehmen.**

**Hypothese 17 :**

**Die Nullhypothese  $H_0$ : Dichte ist normalverteilt.**

**Die Alternativhypothese  $H_a$ : Dichte ist nicht normalverteilt.**



**Abbildung 5.20:** Dichte Rohstoff gesamt (AD)

**Ergebnis 17 :**

Da der berechnete  $p_{sig}$ -Wert kleiner als das Signifikanz-Niveau  $\alpha = 0,05$  ist, muss die Null-Hypothese  $H_0$  zurückgewiesen und die alternative Hypothese  $H_a$  akzeptiert werden. Das Risiko die Null-Hypothese  $H_0$  zurückzuweisen, obwohl sie wahr ist, ist geringer als 0,01 % .

**Die Größe ist daher nicht als normalverteilt anzunehmen.**

**Hypothese 18 :**

Die Nullhypothese  $H_0$ : Schüttdichte ist normalverteilt.

Die Alternativhypothese  $H_a$ : Schüttdichte ist nicht normalverteilt.

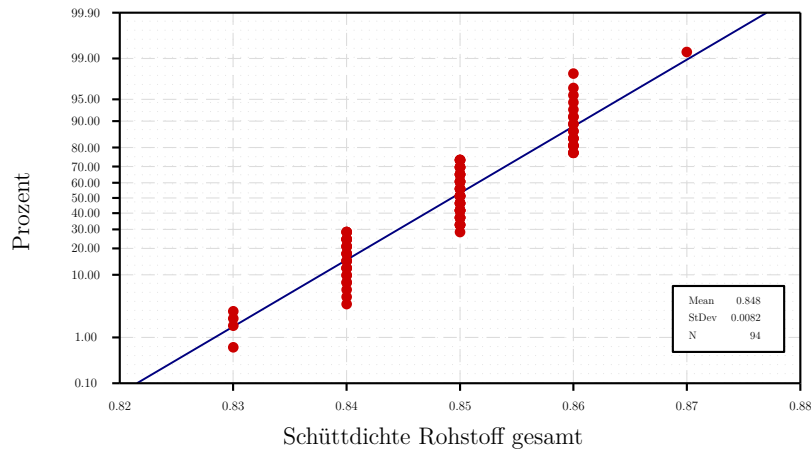


Abbildung 5.21: Schüttdichte Rohstoff gesamt (AD)

**Ergebnis 18 :**

Da der berechnete  $p_{sig}$ -Wert kleiner als das Signifikanz-Niveau  $\alpha = 0,05$  ist, muss die Null-Hypothese  $H_0$  zurückgewiesen und die alternative Hypothese  $H_a$  akzeptiert werden. Das Risiko die Null-Hypothese  $H_0$  zurückzuweisen, obwohl sie wahr ist, ist geringer als 0,01 %

Die Größe ist daher nicht als normalverteilt anzunehmen.

Tabelle 5.6: Rohstoff Gesamtübersicht

Material Gesamt	Mittelwert	Max	Min	Stabw
MFR [g/10min]	1,84	3,00	1,10	0,48
Glührückstand [%]	58,17	59,20	57,50	0,30
äußere Restfeuchte [%]	0,13	0,16	0,10	0,01
Wassergehalt (K.F) [ppm]	179,68	248,00	99,00	36,17
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	1,47	1,50	1,46	0,01
Schüttdichte [kg/l]	0,85	0,87	0,83	0,01

Tabelle 5.7: Rohstofftyp Gesamt Verteilungsanalyse

Typ A	Anderson-Darling	Kolmogorow-Smirnow
MFR	nicht normalverteilt	nicht normalverteilt
Glührückstand	nicht normalverteilt	normalverteilt
äußere Restfeuchte	nicht normalverteilt	nicht normalverteilt
Wassergehalt (K.F)	normalverteilt	normalverteilt
Dichte	nicht normalverteilt	nicht normalverteilt
Schüttdichte	nicht normalverteilt	nicht normalverteilt

## 5.3 Analyse des Informationsgehalts

### 5.3.1 Produkt

Die Produktspezifikation ist der Träger jener Information, welche die Eigenschaften des Produktes abbilden sollen. Jede Ausprägung einer Messgröße trägt in unterschiedlichem Umfang zum Informationsgehalt bei. Bei der durchgeführten Hauptkomponentenanalyse traten erstaunliche Ergebnisse auf. Abbildung 5.22 zeigt, dass mit einer Komponente schon wesentliche Teile des Informationsgehaltes getragen werden.

#### Hypothese 19 :

**Die Nullhypothese  $H_0$ :** *Der Informationsgehalt des Produktes kann durch weniger als 4 Komponenten beschrieben werden.*

**Die Alternativhypothese  $H_a$ :** *Der Informationsgehalt des Produktes kann nicht durch weniger als 4 Komponenten beschrieben werden.*

Wie in Tabelle 5.8 ersichtlich, lässt sich mit 2 Komponenten ein Informationsgehalt von 78% des Produktes abbilden. Die erste Komponente bildet 64,2% des kompletten Informationsgehaltes ab. Komponente Nummer 2 erhöht ihn auf 78,8%. Die Komponenten 3 und 4 sind für weitere 14,8% Punkte verantwortlich. Komponenten 5 bis 7 tragen nahezu nichts mehr zum Informationsgehalt bei. Am Loading Plot in Abbildung 5.23 ist nicht eindeutig ersichtlich, wie die Parameter zu interpretieren sind. Ein Parameter scheint die Wasserdampfdurchlässigkeit zu sein, ein weiterer der Schrumpf.

Die genaue Zusammensetzung der Anteile unterschiedlicher Produkteigenschaften ist in Tabelle 5.9 aufgelistet. Die Wasserdampfdurchlässigkeit gibt einen wesentlichen Anteil

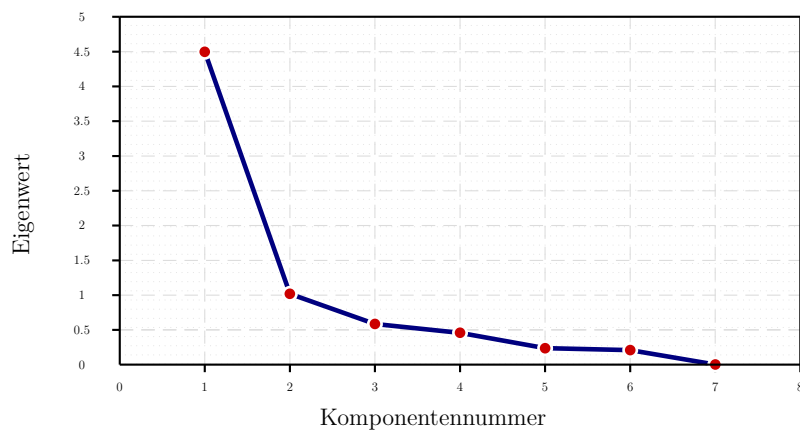


Abbildung 5.22: Screenplot Produkt

Tabelle 5.8: PCA Produkt

Kovarianzmatrix	1	2	3	4	5	6	7
Eigenvalue	4,496	1,0172	0,5842	0,4565	0,2367	0,2084	0,0011
Proportion	0,642	0,145	0,083	0,065	0,034	0,03	0
Cumulative	0,642	0,788	0,871	0,936	0,97	1	1

zum Informationsgehalt her, genauso wie der Schrumpf. Sie ist bei Komponente 1 bei -0,352 bzw. 0,416.

Tabelle 5.9: PCA Komponenten Produkt

Variable	PC1	PC1
Wasserdampfdurchlässigkeit [G/M2.D]	-0,352	-0,352
Festigkeit [N/MM2]	0,387	0,387
Dehnung [%]	0,416	0,416
Schrumpf [%]	0,001	0,001
Weiterreißkraft[N]	0,412	0,412
Flächengewicht [G/M2]	0,437	0,437
Dicke [UM]	0,438	0,438

### Ergebnis 19 :

Die PCA belegt, dass mit 2 Komponenten 78,8 % der Gesamtvarianz beschrieben werden kann. Die Ergebnisse sind als nicht eindeutig zu bezeichnen. Die Nullhypothese  $H_0$  muß daher zurückgewiesen werden.

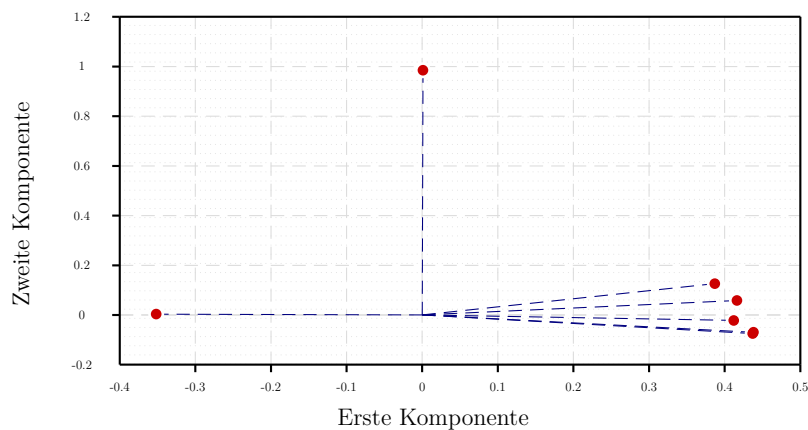


Abbildung 5.23: Loading Plot Produkt

### 5.3.2 Rohstoff

In Analogie zur Produktuntersuchung kann auch der Rohstoff nach den selben Kriterien analysiert werden. Die Rohstoffspezifikation ist der Träger jener Information, welche die Eigenschaften des Rohstoffes vollständig beschreibt. Jede Ausprägung einer Messgröße trägt in unterschiedlichem Umfang zum Informationsgehalt bei. Bei der durchgeführten Hauptkomponentenanalyse traten ebenfalls erstaunliche Ergebnisse auf. Abbildung 5.24 zeigt, dass mit einer Komponente schon wesentliche Teile des Informationsgehaltes getragen werden, wie beim Produkt auch.

#### Hypothese 20 :

**Die Nullhypothese  $H_0$ :** *Der Informationsgehalt des Rohstoffes kann durch weniger als 4 Komponenten beschrieben werden.*

**Die Alternativhypothese  $H_a$ :** *Der Informationsgehalt des Rohstoffes kann nicht durch weniger als 4 Komponenten beschrieben werden.*

Wie in Tabelle 5.10 ersichtlich, lässt sich mit 2 Komponenten ein Informationsgehalt des Rohstoffes von 62,9 % abbilden. Die erste Komponente bildet 34,5% des Informationsgehalt ab. Komponente Nummer 2 ist mit weiteren 28,5% Punkten ebenfalls noch stark relevant. Komponenten 3 und 4 tragen weiter zum Informationsgehalt bei, nämlich im Umfang von insgesamt 87,1 %.

#### Ergebnis 20 :

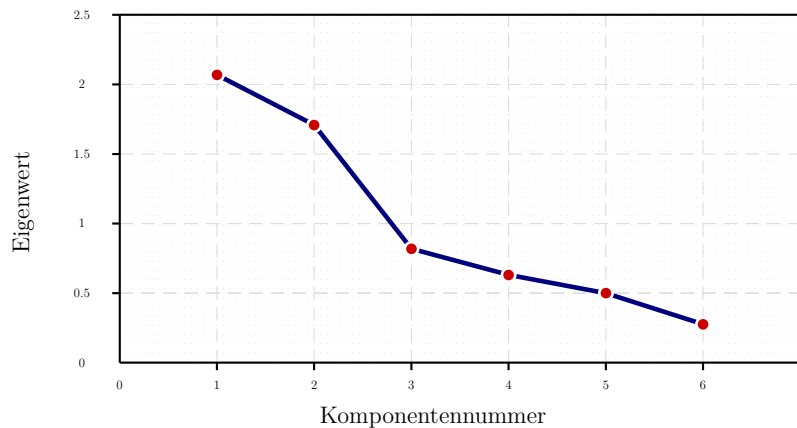


Abbildung 5.24: Screenplot Rohstoff

Tabelle 5.10: PCA Rohstoff

Kovarianzmatrix	1	2	3	4	5	6
Eigenvalue	2,068	1,7081	0,8182	0,6306	0,4992	0,2759
Proportion	0,345	0,285	0,136	0,105	0,083	0,046
Cumulative	0,345	0,629	0,766	0,871	0,954	1

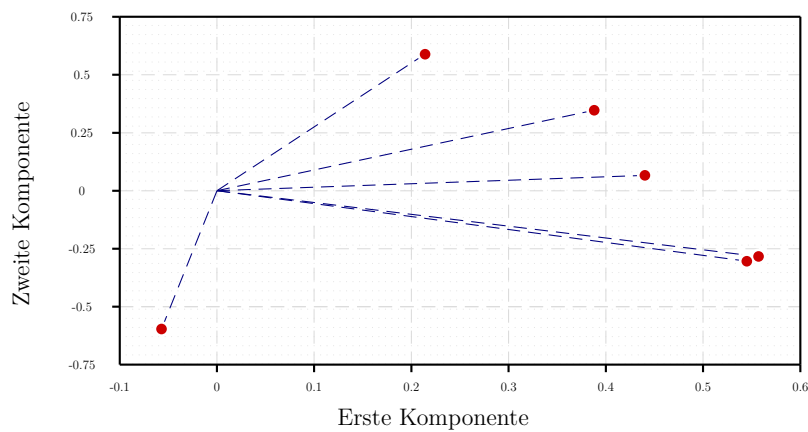
Die PCA belegt, dass mit 2 Komponenten 62,9% der Gesamtvarianz beschrieben werden kann. Die Ergebnisse sind als nicht eindeutig zu bezeichnen. Die Nullhypothese  $H_0$  muß daher zurückgewiesen werden.

## 5.4 Analyse auf Produkt-Rohstoff-Korrelationen

Die Auswertung der Produkt-Rohstoff-Korrelation hat zum Ergebnis, dass Dichte und Glührückstand stark korreliert sind. Auch bei den Zusammenhängen innerhalb der Produkteigenschaften treten keine Überraschungen auf. Zusammenhänge konnten zwischen den für die Blasfähigkeit des Rohstoffes so wichtige Parameter MFR und dem Produktparameter WDD nicht gefunden werden. Ebenso wenig ist ein Zusammenhang zwischen WDD und Glührückstand bzw. Restfeuchte erkennbar (Tabelle 5.12).

In Tabelle 5.13 ist kein Zusammenhang zwischen den Parametern Wassergehalt, Dichte, Schüttdichte zum WDD und in den anderen Parametern ersichtlich.

Mechanisch zusammenhängende Parameterpaare wie Dicke zu Festigkeit, Dehnung zu Dicke, Dehnung zu Festigkeit, Weiterreißkraft zu Dicke sowie Weiterreißkraft zu Festigkeit



**Abbildung 5.25:** Loading Plot Rohstoff

**Tabelle 5.11:** PCA Komponenten Rohstoff

Variable	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
MFR	0,214	0,589	0,246	0,232	-0,647	-0,273
Glührückstand	0,557	-0,284	0,024	0,293	0,315	-0,651
äußere Restfeuchte	0,388	0,347	0,517	-0,539	0,387	0,144
Wassergehalt (K.F.)	-0,057	-0,596	0,392	-0,454	-0,485	-0,214
Dichte	0,545	-0,304	0,123	0,345	-0,204	0,66
Schüttdichte	0,44	0,066	-0,709	-0,494	-0,236	-0,015

**Tabelle 5.12:** Korrelationstabelle Produkt Rohstoff 1

	MFR	Glührückstand	äußere Restfeuchte
Glührückstand	-0,047		
äußere Restfeuchte	0,336	0,147	
Wassergehalt (K.F.)	-0,133	-0,015	-0,003
Dichte	-0,148	0,801	0,034
Schüttdichte	-0,267	0,311	-0,250
Dicke	0,102	0,340	0,420
Festigkeit	-0,045	0,264	0,516
Dehnung	-0,011	0,220	0,494
Schrumpf	-0,043	-0,060	0,202
Weiterreißkraft	0,049	0,286	0,388
Wasserdruck	0,089	0,276	0,122
Wasserdampfdurchlässigkeit	0,065	-0,008	-0,282
Flächengewicht	0,102	0,343	0,421
Breite	-0,026	0,336	-0,002

**Tabelle 5.13:** Korrelationstabelle Produkt Rohstoff 2

	Wassergehalt (K.F.)	Dichte	Schüttdichte
Dichte	0,274		
Schüttdichte	0,000	0,337	
Dicke	-0,139	0,227	0,089
Festigkeit	-0,010	0,078	-0,149
Dehnung	-0,145	0,199	-0,111
Schrumpf	-0,084	0,149	-0,123
Weiterreißkraft	-0,249	0,195	-0,035
Wasserdruck	0,126	0,224	-0,024
Wasserdampfdurchlässigkeit	0,342	0,107	0,081
Flächengewicht	-0,139	0,229	0,090
Breite	0,312	0,400	0,021

sind hoch korreliert. Da aus dem Flächengewicht mithilfe des Messgeräts die Dicke ermittelt wird, ist die Korrelation von 1 eine logische Folge der Messmethode. Flächengewicht zu Festigkeit, Flächengewicht zu Dehnung, Flächengewicht zu Weiterreißkraft und Dehnung zu Weiterreißkraft weisen ebenfalls hohe Werte beim Korrelationskoeffizienten aus (Tabelle 5.14 und 5.15).

**Tabelle 5.14:** Korrelationstabelle Produkt Rohstoff 3

	Dicke	Festigkeit	Dehnung
Festigkeit	0,791		
Dehnung	0,822	0,859	
Schrumpf	0,250	0,092	0,297
Weiterreißkraft	0,845	0,813	0,900
Wasserdruck	0,298	0,416	0,391
Wasserdampfdurchlässigkeit	-0,625	-0,745	-0,760
Flächengewicht	1,000	0,791	0,821
Breite	0,165	0,215	0,267

Der Zusammenhang von Wasserdampfdurchlässigkeit und Flächengewicht ist die einzige Kombination, die in Tabelle 5.16 ins Auge sticht.

In Tabelle 5.17 sind die größten Korrelationen nochmals aufgelistet. Die kleinsten betreffen alle den WDD, er wird noch gesondert betrachtet.

Einer der wesentlichen Parameter des Produktes ist die Wasserdampfdurchlässigkeit. Es zeigt sich, dass ein großer Zusammenhang zwischen mechanischen Parametern und der



**Tabelle 5.15:** Korrelationstabelle Produkt Rohstoff 4

	Schrumpf	Weiterreißkraft	Wasserdruck
Weiterreißkraft	0,033		
Wasserdruck	-0,153	0,330	
Wasserdampfdurchlässigkeit	-0,044	-0,785	-0,209
Flächengewicht	0,251	0,844	0,297
Breite	-0,279	0,190	0,573

**Tabelle 5.16:** Korrelationstabelle Produkt Rohstoff 5

	Wasserdampfdurchlässigkeit	Flächengewicht	
Flächengewicht	-0,623		
Breite	0,125	0,163	

**Tabelle 5.17:** Korrelationstabelle der größten Korrelationen

Komponente 1	Komponente 2	Wert
Flächengewicht	Dicke	1,000
Flächengewicht	Weiterreißkraft	0,844
Dehnung	Dicke	0,822
Flächengewicht	Festigkeit	0,821
Weiterreißkraft	Dicke	0,815
Weiterreißkraft	Festigkeit	0,813
Dichte	Glührückstand	0,801
Festigkeit	Dicke	0,791

**Tabelle 5.18:** Korrelationstabelle zum WDD

Komponente	Wert
Dicke	-0,625
Weiterreißkraft	-0,785
Dehnung	-0,760
Flächengewicht	-0,623
Festigkeit	-0,745

Wasserdampfdurchlässigkeit vorliegt. Wie an Tabelle 5.18 ersichtlich, sinkt die Wasserdampfdurchlässigkeit, wenn sich mechanische Parameter erhöhen. Der Wertebereich des Zusammenhangs liegt eng beinander (-0,623 bis -0,785). Die Werte sagen aus, dass hohe Wasserdampfdurchlässigkeit und hohe Werte bei den mechanischen Eigenschaften u.U. nicht in gewünschtem Ausmaß möglich ist.

## 5.5 Analyse auf Produktionsprozessauffälligkeiten

### Hypothese 21 :

Die Nullhypothese  $H_0$ : *Spannkraft und Foliendicke korrelieren.*

Die Alternativhypothese  $H_a$ : *Spannkraft und Foliendicke korrelieren nicht.*

### Ergebnis 21 :

Der Korrelationskoeffizient nach Spearman Rank beträgt  $r=67,6$ . Da der berechnete p-Wert (0,00) kleiner als das Signifikanz-Niveau  $\alpha = 0,05$  ist, kann die Nullhypothese  $H_0$  bestätigt werden.

### Hypothese 22 :

Die Nullhypothese  $H_0$ : *Extruderdrehzahl und Extrudermassetemperatur korrelieren.*

Die Alternativhypothese  $H_a$ : *Extruderdrehzahl und Extrudermassetemperatur korrelieren nicht.*

### Ergebnis 22 :

Der Korrelationskoeffizient nach Spearman Rank beträgt  $r=48,70$ . Da der berechnete p-Wert (0,00) kleiner als das Signifikanz-Niveau  $\alpha = 0,05$  ist, kann die Nullhypothese  $H_0$  bestätigt werden.

### Hypothese 23 :

Die Nullhypothese  $H_0$ : *Extrudermassedruck und Extrudermassetemperatur korrelieren.*

Die Alternativhypothese  $H_a$ : *Extrudermassedruck und Extrudermassetemperatur korrelieren nicht.*

Man möchte in einer Anlage dieser Dimension im Extruder erwarten, dass sobald der Massedruck sinkt, auch die Temperatur sinken muss. In dem hier gezeigten Diagramm 5.26 tritt aber öfteren das Gegenteil auf. Zwischen ersten und zweiten September sehen wir, dass der Extrudermassedruck fällt und die Temperatur steigt. Das passiert zwei mal. Einmal zwischen 2.9.2009 und 3.9.2009, ein weiteres mal wieder in dem selben Zeitraum. Zwischen 4. und 5. September ist es sogar einmal eine längere Zeitspanne, wo Druck und Temperatur gegenläufig sind. Heftige Auf-und-ab-Bewegungen sind zwischen

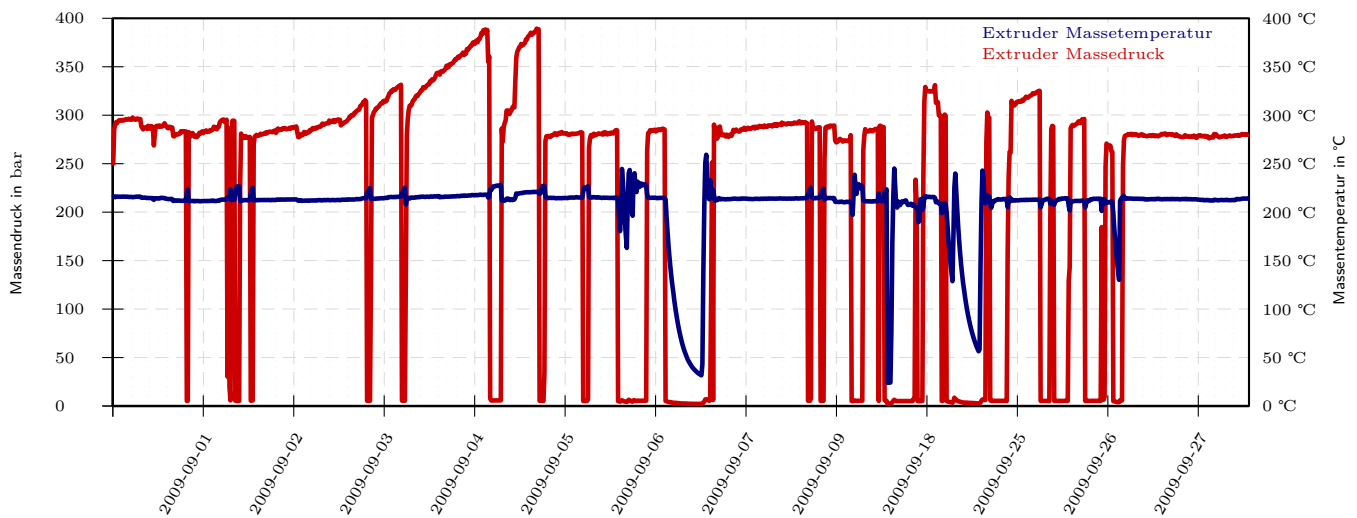


Abbildung 5.26: Extrusion

5. und 6. September zu sehen, während zwischen 6. und 7. September die Anlage für mehrere Stunden still gestanden sein muss. Es ist letztendlich unklar, wodurch dieser Effekt entstanden ist. Da die Anlage eventuelle Störungen ausregelt, besteht die Möglichkeit, dass die Anlagensteuerung in diesem Punkt nicht erwartungsgemäß reagiert.

### Ergebnis 23 :

Der Korrelationskoeffizient nach Spearman Rank beträgt  $r=65,10$ . Da der berechnete p-Wert (0,00) kleiner als das Signifikanz-Niveau  $\alpha=0,05$  ist, kann die Nullhypothese  $H_0$  bestätigt werden.

## 5.6 Analyse der Prozesspartitionierung

### 5.6.1 Informationsgehalt Rohstoff und Rohstoffäquivalent

Wie in Kapitel 5.1 prinzipiell dargestellt, wird die Annahme getroffen, dass die Temperaturdifferenzen des Extruders in den unterschiedlichen Zonen (1-5, Sieb, Anschluss) eine Abbildung der Rohstoffeigenschaften darstellen. Dazu wird einerseits der gesamte Rohstoffdatensatz nach Datum sortiert und den andererseits entsprechend gemittelten

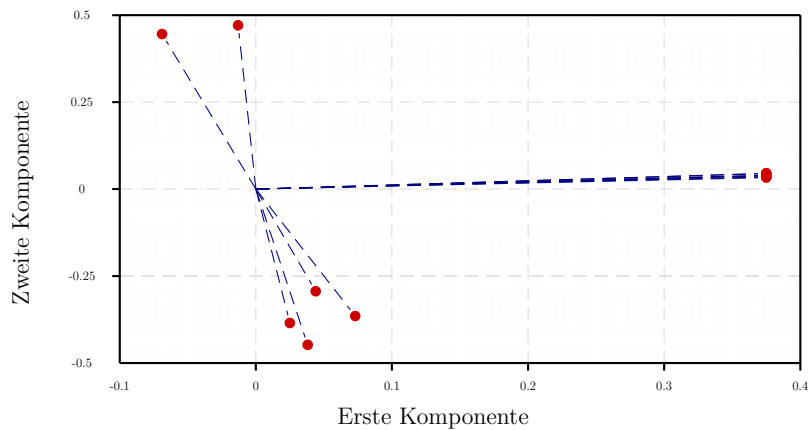
Tagestemperaturdifferenzen gegenüber gestellt. Mit diesem generierten Datensatz wird die PCA durchgeführt.

**Hypothese 24 :**

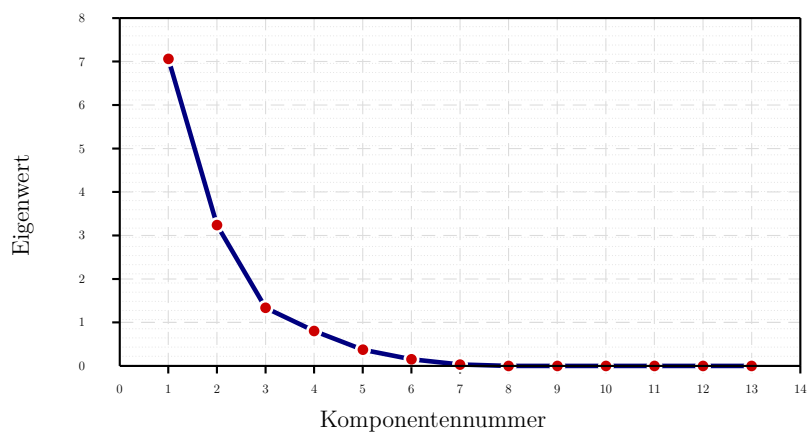
**Die Nullhypothese  $H_0$ :** *Korrelation zwischen Rohstoffinformation und Extruder Soll/Istwertdifferenzen der Temperaturen.*

**Die Alternativhypothese  $H_a$ :** *Keine Korrelation zwischen Rohstoffinformation und Extruder Soll/Istwertdifferenzen der Temperaturen.*

Wie auf Abbildung 5.28 zu sehen ist, kann mit 4 Komponenten nahezu der ganze Informationsgehalt abgebildet werden.



**Abbildung 5.27:** Loading Plot Rohstoff Extruder



**Abbildung 5.28:** Screenplot Rohstoff Extruder

**Ergebnis 24 :**

Die PCA belegt, dass mit 4 Komponenten 95,7 % der Gesamtvarianz beschrieben werden kann. Die Ergebnisse sind als nicht eindeutig zu bezeichnen. Die Nullhypothese  $H_0$  muß daher zurückgewiesen werden.

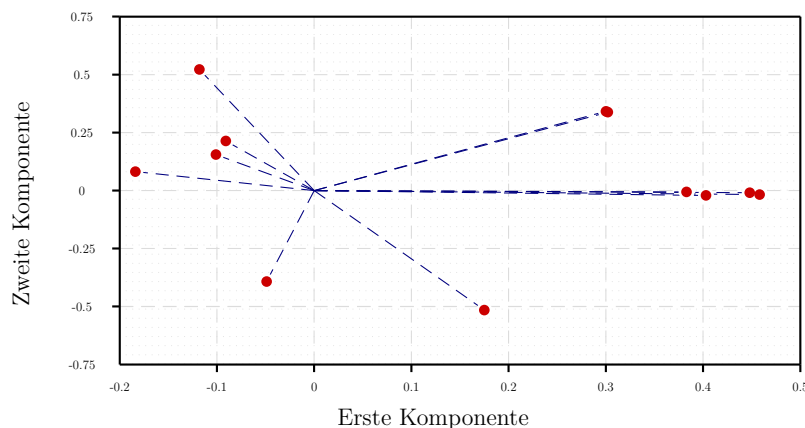
Durch dieses Ergebnis ist bestätigt, dass die Annahme zwischen Rohstoff und Rohstoff-äquivalent in Bezug auf die durchgeführten Analysen von Kapitel 5.3 fehlgeschlagen ist, da auch bei diesem Resultat 4 Komponenten benötigt werden.

### 5.6.2 Informationsgehalt Produkt und Produktäquivalent

**Hypothese 25 :**

**Die Nullhypothese  $H_0$ :** *Korrelation zwischen Produktinformation und Reckwerkausgang Soll/Istwertdifferenzen.*

**Die Alternativhypothese  $H_a$ :** *Keine Korrelation zwischen Produktinformation und Reckwerkausgang Soll/Istwertdifferenzen.*



**Abbildung 5.29:** Loading Plot Produkt Reckwerk

**Ergebnis 25 :**

Die PCA belegt, dass mit 7 Komponenten 93,5 % der Gesamtvarianz beschrieben werden kann. Die Ergebnisse sind als nicht eindeutig zu bezeichnen. Die Nullhypothese  $H_0$  muß daher zurückgewiesen werden.

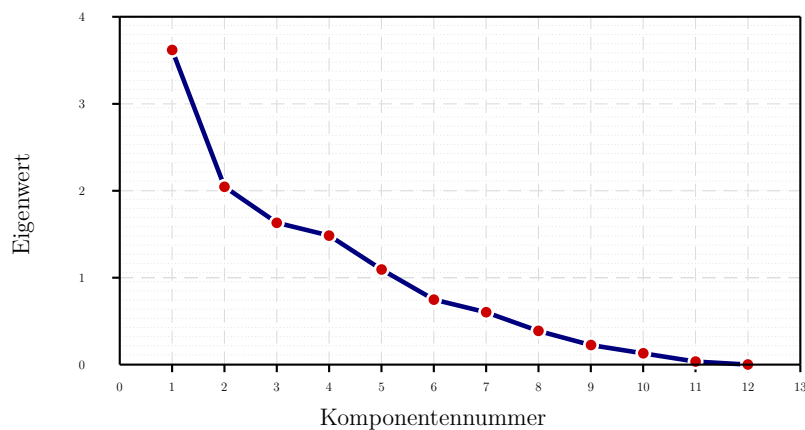


Abbildung 5.30: Screenplot Produkt Reckwerk

Durch dieses Ergebnis ist bestätigt, dass die Annahme zwischen Produkt und Produktäquivalent in Bezug auf die durchgeführten Analysen von Kapitel 5.3 fehlgeschlagen ist, da beim vorliegenden Ergebnis deutlich mehr Komponenten benötigt werden. Dies lässt den Schluss zu, dass die Produktäquivalentdaten noch für die Eigenschaften des Produktes verantwortlich sind. Eine Vermutung wäre, dass es sich dabei um den Schrumpfung handelt, da dieser bedingt durch die Abkühlung der verwendeten Walzen 10 und 11 beeinflussbar ist.

## 5.7 Überprüfung weiterer Hypothesen

### 5.7.1 Wasserdampfdurchlässigkeit

Die folgende Annahme ist, dass das Reckverhältnis mit der Wasserdampfdurchlässigkeit korreliert. Dies wurde im folgenden geprüft.

**Hypothese 26 :**

**Die Nullhypothese  $H_0$ :** *Reckwerkverhältnis Walze 6 und Walze 5 und Wasserdampfdurchlässigkeit korrelieren.*

**Die Alternativhypothese  $H_a$ :** *Reckwerkverhältnis Walze 6 und Walze 5 und Wasserdampfdurchlässigkeit korrelieren nicht.*

**Ergebnis 26 :**

Der Korrelationskoeffizient nach Spearman Rank beträgt  $r=0,052$ . Da der berechnete p-Wert (0,819) größer ist als das Signifikanz-Niveau  $\alpha=0,05$  ist, muss die Nullhypothese  $H_0$  zurückgewiesen und die Alternativhypothese  $H_a$  akzeptiert werden.

Die nächste zu prüfende Hypothese ist, dass mit steigender Temperatur die Wasserdampfdurchlässigkeit steigt. Dies wurde im folgenden geprüft.

**Hypothese 27 :**

**Die Nullhypothese  $H_0$ :** *Temperatur auf Walze 5 und WDD korrelieren.*

**Die Alternativhypothese  $H_a$ :** *Temperatur auf Walze 5 und WDD korrelieren nicht.*

**Ergebnis 27 :**

Der Korrelationskoeffizient nach Spearman Rank beträgt  $r=0,124$ . Da der berechnete p-Wert (0,751) größer ist als das Signifikanz-Niveau  $\alpha=0,05$  ist, muss die Nullhypothese  $H_0$  zurückgewiesen und die Alternativhypothese  $H_a$  akzeptiert werden.

## 6 Diskussion

Erster Anknüpfungspunkt bei der Auswertung der gesamten Prozessparameter war die **Aufnahme des Rohstoffes und der Produktdaten**. Die Daten der Rohstoffe und der Produkte sind die wesentlichen Informationsträger mit dem sich diese Arbeit befasst. Dies passierte vor allem im Hinblick auf den Umstand, dass keine der üblichen Methoden der Automatisierungstechnik zum Ziel geführt haben. Ursache dafür ist, dass kein direkter Zusammenhang zwischen Rohstoff und Produkt möglich war. Die Produktionsaufzeichnungen geben nur Auskunft über die Art des Rohstoffes, jedoch nicht, welcher Rohstoff konkret zum Einsatz kommt. Zwar wäre es prinzipiell möglich, in verschiedenen Einheiten eine Verknüpfung herzustellen, dies ist aber wegen der teilweise geringen Datenbasis rohstoffseitig nicht möglich.

Die Analyse, ob eine **Normalverteilung** vorliegt wurde als erster ausgewertet. In den allermeisten Fällen liegt keine Normalverteilung vor, sie wird aber für weitere Tests angenommen. Sie kann vor allem deswegen angenommen werden, da mit fortlaufender Zeit immer größere Datenmengen zur Auswertung herangezogen werden können und darüberhinaus ist es in der Statistik üblich, auch die Histogramme zu betrachten. Für Rohstoff A und Rohstoff C ergibt sich daher ein dem Gesamtrohstoff ähnliches Bild. Mit Ausnahme des Wassergehalts ist kein Rohstoffparameter als normalverteilt anzusehen.

Die Analyse des Gesamtrohstoffes wird in den Bildern 6.1 bis 6.6 dargestellt.

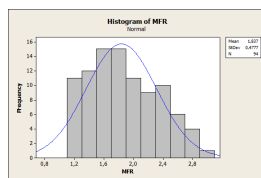


Abbildung 6.1: MFR Rohstoff gesamt

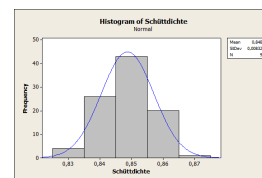
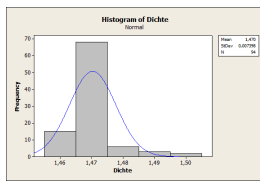
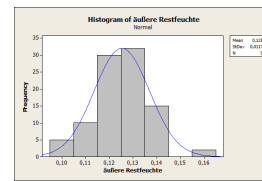


Abbildung 6.2: Schüttdichte Rohstoff gesamt

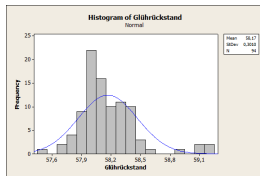




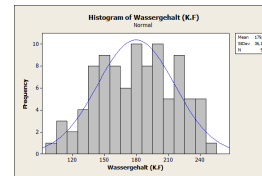
**Abbildung 6.3:** Dichte Rohstoff gesamt



**Abbildung 6.4:** Äußere Restfeuchte Rohstoff gesamt



**Abbildung 6.5:** Glührückstand Rohstoff gesamt



**Abbildung 6.6:** Wassergehalt Rohstoff gesamt

Da die Rohstoffe ähnlich sind, kann davon ausgegangen werden, dass mit einer größeren Anzahl an Datensätzen eine Normalverteilung tatsächlich auch aus den Normalverteilungstests ersichtlich wird. Im weiteren wird auch für die PCA die Normalverteilung angenommen.

Die **PCA** des Rohstoffes beschreibt mit 4 Komponenten 87,1 % der Gesamtvarianz. Beim Produkt sind es mit 4 Komponenten 93,6% der Gesamtvarianz. Einschränkend sei nochmals auf die fehlende Normalverteilung hingewiesen, womit sich kein eindeutiges Bild ergibt. Für eindeutigere Ergebnisse sind ein Vielfaches der Daten über den Rohstoff erforderlichlich.

Im Fall der Überprüfung von **Korrelationen** wurde auf die Rangkorrelation ausgewichen, da ein nichtlinearer Zusammenhang unterstellt wird und die Rangkorrelation robuster gegenüber Ausreißern reagiert. Die Ergebnisse hinsichtlich Korrelationen überraschen nicht. Sie beschreiben im Bereich der mechanischen Eigenschaften den Zusammenhang zwischen beispielsweise Festigkeit und Dehnung relativ gut. Festigkeit und Dehnung korreliert mit 85,9% relativ hoch, ebenso Dicke und Festigkeit mit 79,1 % wie in Tabelle 5.15 abzulesen ist. Ein Zusammenhang zwischen der Wasserdampfdurchlässigkeit und mechanischen Parameter konnte eindeutig gefunden werden. Negative Korrelationskoeffizienten mit einem Wert von -78,5% bis -62,3 deutet auf einen indirekt proportionalen Zusammenhang hin. Der Parameter der Weiterreißkraft wird im Unternehmen nicht mehr regelmäßig gemessen.

Während bei den Daten über die Rohstoffe nur laufend von 25 Tonnen ein Wert ermittelt wird, tritt das bei den Produktdaten schon öfter auf. Trotzdem ergibt sich die Problematik wie diese **Asynchronität** zu behandeln sei. Eine Annahme war, dass bestimmte Anlagenteile wie beispielsweise der Extruder als „Messgerät“ zweckentfremdet werden kann. Dazu wurde eine PCA über den Rohstoff durchgeführt, sowie eine PCA über Rohstoff und Extruderdaten. Während beim Rohstoff eine Gesamtvarianz von von 87,1 % bei 4 Komponenten ermittelt werden konnte, fiel die PCA beim zweiten Versuch bei ebenfalls 4 Komponenten mit 95,7 % deutlich höher aus. Eine Interpretation ist, dass der Extruder noch maßgebliche Anteile in sich birgt und daher ist die Annahme, dass der Extruder als Messgerät zweckentfremdet werden kann, zurückzuweisen.

Die entsprechenden Modelle in Kapitel 4 basieren auf den Überlegungen, Einzelbereiche so weit als möglich herunterzubrechen und sind ein Versuch einer systemtheoretischen Beschreibung. Im Zuge dieser Analysen sind eine Reihe von Erkenntnis zu Tage gefördert worden, die im folgenden Kapitel aufgelistet werden sollen. Sie passen jedoch inhaltlich weder in das Kapitel der Modellbildung, noch in das Kapitel der statistischen Auswertung von Prozessdaten. Aus diesem Grund werden im Kapitel Empfehlung die gesammelten Erkenntnisse über den gesamten Prozess aufgelistet.

# 7 Empfehlungen für weitere Maßnahmen

Die intensive Beschäftigung mit dem Produktionsprozess und die nicht eindeutig klare Aussage, welche als Folge der Analyse gemacht werden konnte, führen in diesem Kapitel zu einer Reihe von Vorschlägen und Empfehlungen für die weiteren Maßnahmen zur Zielerreichung. Der grundlegende Gedankengang fußt auf den Prinzipien der Fehlerfortpflanzung, die im Folgenden noch beschrieben werden. Die einzelnen Prozessschritte sind fehlerbehaftet. Es liegt daher nahe, diese separat zu betrachten und nach potentiellen Schwachstellen zu suchen. Eines der Ergebnisse aus den Analysen ist, dass der Prozess sehr träge ist und große Latenzzeiten auftreten. Daher führt das Korrigieren von Stellgrößen nur in sehr später Folge zu einem messbaren Resultat auf der Produktseite. Wenn demnach möglichst keine Fehler am Prozesseingang auftreten, dann ist das Produkt aus Sicht der Fehlerfortpflanzung das mathematische Produkt der Fehler der Prozesseinzelschritte. Mögliche Maßnahmen in den Einzelprozessschritten sind entweder Fehlervermeidung, Informationsgewinn oder das Konstanthalten von Einflussgrößen auf den Prozessschritt. Auf dieser Basis würde die Fehlererkennungsrates steigen, da das Ausschalten von negativen Einflussfaktoren als Fehlerursache ausgeschlossen werden kann.

## 7.1 Fehlerfortpflanzung

Die Inhalte in diesem Kapitel sind aus [Bar04, Kapitel 13.2 Seite 680] entnommen.

Fehlerfortpflanzung sind Fehler der Ausgabedaten, die durch Fehler an den Eingabedaten erzeugt werden.

$$\Delta y = f(X) - f(x) = Y - y = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(\bar{x})}{\partial x_i} \Delta x_i \quad (7.1)$$

Wahre Eingabefunktion:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) =: f(x) \text{ mit } x = (x_1, \dots, x_n)^T \quad (7.2)$$

Näherungsfunktion:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) =: f(X) \text{ mit } x = (X_1, \dots, X_n)^T \quad (7.3)$$

$$|\Delta x_i| = |X_i - x_i| \leq \epsilon_{x_i}, \quad i=1,2,\dots,n, \text{ Fehler der Eingabedaten } x_i \quad (7.4)$$

$\bar{x}$  Vektor der Mittelwerte mehrerer Messungen

Relativer Fortpflanzungsfehler ( $y \neq 0, x_i \neq 0$ )

$$\delta_y = \frac{\Delta y}{y} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{f(x)} \frac{\partial f(\bar{x})}{\partial x_i} \delta x_i = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{f(x)} \frac{\partial f(\bar{x})}{\partial x_i} \delta x_i = \sum_{i=1}^n K_i \delta x_i \quad (7.5)$$

$$K_i = \frac{x_i}{f(x)} \frac{\partial f(\bar{x})}{\partial x_i} \quad (7.6)$$

$K_i \dots$  Konditionszahlen

Konditionszahlen geben die Veränderung der Eingabefehler bei der Funktionsberechnung an, gute Konditionen bei  $|K_i| \leq 1$  (möglichst klein).

Maximaler Fortpflanzungsfehler (lineare Fehlerfortpflanzung)

$$\epsilon_y = \Delta y_{max} = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f(\bar{x})}{\partial x_i} \Delta x_i \right| = \left| \frac{\partial y}{\partial x_1} \Delta x_1 \right| + \dots + \left| \frac{\partial y}{\partial x_n} \Delta x_n \right| \quad (7.7)$$

Bei nur einer Variable ( $n = 1$ )  $y = f(x)$ :

$$\Delta y_{max} = |f'(x) \Delta x| \quad (7.8)$$

Bei zwei Variablen ( $n = 2$ )  $z = f(x,y)$ :

$$\Delta z_{max} = \left| \frac{\partial z}{\partial x} \Delta x \right| + \left| \frac{\partial z}{\partial y} \Delta y \right| \quad (7.9)$$

## 7.2 Wareneingangskontrolle

Eine Information über die Daten des Rohstoffes liegen nicht vor. Der Vorlieferant gibt Hinweise darauf, dass eine Entbindung von der Prüfpflicht nicht entfällt. Auf dem entsprechenden Zertifikaten findet sich der Aufdruck

*Vorstehende Angaben sind Ergebnisse unserer Qualitätsprüfung und entbinden den Käufer nicht von einer Eingangsprüfung. Für Schäden durch kundenseitige Veränderung der Materialzusammensetzung (z. B. Abmischungen) ohne vorherige Rücksprache übernehmen wir keine Haftung. Dieses Zertifikat wurde durch die EDV erstellt und trägt keine Unterschrift (Siehe exemplarisches Werksprüfzeugnis Abbildung 1.1 im Anhang).*

Unabhängig von einem kooperativen Verhalten zwischen Lieferant und Kunde ist eine Wareneingangskontrolle offenbar auch aus Sicht des Lieferanten empfehlenswert. Die genauen Prüfmethode sind auf dem Zertifikat angegeben. (Tabelle 7.1)

**Tabelle 7.1:** Methoden für die Vermessung von Rohstoffe

Rohstoffparameter		
Parameter	Messmethode	Prüfung
MFR	DIN 1133	Optional
Glührückstand	EN 60	Nein
Restfeuchte	angelehnt an DIN EN ISO 585	Optional
Wassergehalt (Karl-Fischer)	DIN EN ISO 15 515	Nein
Dichte	DIN EN ISO 1183	Nein
Schüttdichte	EN ISO 60	Nein

**Empfehlung 1:** Es wird empfohlen eine Wareneingangskontrolle durchzuführen.

## 7.3 Datensätze je Oktabin ermitteln

In Anlehnung an die Methode zur Informationsgewinnung ist eine Datenaufzeichnung je Oktabin eine Möglichkeit die Datengranularität zu erhöhen. Dadurch würden die Zusammenhänge zwischen Rohstoff und Produkt besser darstellbar. Eine methodische und

statistische Auswertung kann dann bei weiteren Untersuchungen deutlich eindeutiger interpretierbare Resultate erzielen, da die Datenqualität zunimmt. Konkrete Daten über den Rohstoff können die Anlage besser ansteuern, beispielsweise konstantere Rohfolienherzeugung durch Anpassung der Temperatur im Extruder für eine geometrisch konstantere Frostlinie. Dies wirkt sich auf die runability aus. Darunter versteht man den unterbrechungsfreien Betrieb der Anlage mit erfolgreicher Produktion laut Produktspezifikation.

**Empfehlung 2: Es wird empfohlen diese Parametrisierung des Rohstoffes je Oktabin anzudenken, um eine bessere Ausgangsbasis für nachfolgende Untersuchungen zu haben.**

## 7.4 Aufzeichnungen der eingesetzten Oktabins

In vielen Bereichen der Industrie hat sich das Prinzip der Rückverfolgbarkeit durchgesetzt. Somit lässt sich ein Produkt in jedem Prozessschritt und den dabei verwendeten Rohstoffen betrachten. Im Untersuchungszeitraum wurden Rohstoffmaterialien unterschiedlicher Chargen, die bis zu 5 Monate alt waren im Produktionsprozess eingesetzt. Um eine mögliche Korrelation zwischen Rohstoff und Produkt herstellen zu können, ist die Kenntnis über Rollenummer und Chargennummer des Oktabins (bzw. Rollenummer und Oktabinnummer bei vorhandenen Rohstoffdaten des Oktabins) eine Bedingung. Erreichbar ist das beispielsweise über die Ettikettierung von Oktabins über die Barcode oder RFID Technik bei der Warenannahme. Die Ettiketten müsste dann bei der Maschine erneut ausgelesen und den Endprodukten ebenfalls zugeordnet werden. Die Rückverfolgbarkeit von Rohstoff und oder Produkt ist auch unter dem Begriff traceability bekannt. Nur dann kann aus prinzipiellen Überlegungen ein, wenn auch sehr indirekter Zusammenhang hergestellt werden.

**Empfehlung 3: Es wird empfohlen, über die Rückverfolgbarkeit eingesetzter Rohstoffe nachzudenken.**

## 7.5 Aufzeichnung Anlageneinstellungen

Das Verfahren für die Herstellung von Blasfolien ist hochkomplex. Die Literatur beschreibt, dass in vielen Fällen die Konfiguration der Anlage auf Basis von Erfahrungswerten durchgeführt wird. Diese Erfahrungswerte werden aber nur durch Trial and Error gewonnen. Jede Veränderung der Anlageneinstellung ist ein weiterer Versuch des Erkenntnisgewinns. Dies ist die teuerste Form des Lernens. Dieses Lernen sollte jedoch schriftlich dokumentiert werden. Jede Änderung der Anlagenkonfiguration sollte mit Vorher/Nachherwerten erfasst und der Grund für die Änderung mitangegeben werden. Ein sogenanntes Anlageneinstellblatt macht dann die Erfahrungen und Erkenntnisse transparent und die Daten können zu einem späteren Zeitpunkt ausgewertet werden.

**Empfehlung 4:** Es wird empfohlen, die Anlageneinstellungen bei Veränderungen eines Parameters komplett und in geeigneter Form zu dokumentieren und die Gründe dafür mitaufzuzeichnen.

## 7.6 Aufzeichnungen der Umgebungsbedingungen

Für weiterführende Analysen ist der Einfluss der Umgebungsbedingungen nur dann überprüfbar, wenn Daten darüber aufgezeichnet werden. Für Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit wurde dies im Kontrollzeitraum von ca. 2 Wochen (Diagramm 3.27 und 3.28) durchgeführt. Falls diese Daten kontinuierlich aufgezeichnet werden, würde man zusätzliche Informationen haben, die Auskunft über das Anlagenverhalten geben kann.

**Empfehlung 5:** Es wird empfohlen die Umgebungsbedingungen der Anlage aufzuzeichnen.

## 7.7 Online-WDD Messung

Eine der wesentlichen Produkteigenschaften ist wie in Kapitel 3.1.2 und Kapitel 3.3.6 beschrieben und in Abbildung 3.1 und Abbildung 3.22 dargestellt, die Wasserdampfdurchlässigkeit. Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Experiment, wurde der Versuch

unternommen, die Wasserdampfdurchlässigkeit durch eine alternative und schnellere Methode zu ermitteln. Dabei wurde die Annahme getroffen, dass eine Korrelation zwischen WDD und dem Lab-Farbraum existiert. Der Lab-Farbraum ist ein Messraum, in dem alle wahrnehmbaren Farben enthalten sind und der in EN ISO 16644-4 genormt ist [EI12]. Dazu wurden Proben von fertiggestellten Rollen entnommen, die Rollenummer auf der Probe notiert und dann im Labor der Farbraum mehrfach an verschiedenen Messpunkten der Probe vermessen. Es konnte allerdings kein statistischer Zusammenhang festgestellt werden [Ebe09]. Im Rahmen dieser Arbeit wurden 4 Möglichkeiten zur schnelleren Ermittlung aufgezeigt. Diese 4 Methoden sind:

**Lichtmengenmessung der Folie, statistischen Auswertung** Annahme: Die Summe der Lichtteilchen, die auf der gegenüberliegenden Seite der Folie aufgefangen werden, sind ein Indikator für den WDD-Wert.

**Lab-Farbraummessung der Folie, statistischen Auswertung** Annahme: Der Helligkeitswert auf der Folie gegenüber schwarzem oder weißem Hintergrund ist ein Indikator für den WDD-Wert

**Luftfeuchtigkeitsdifferenzmessung** Es wird auf die Folie Dampf gesprüht, wegen der Breite kann sich die Luftfeuchtigkeit nur dann ändern, wenn der Wasserdampf durch die Folie durchtritt. Die vorhandene Luftfeuchtigkeit der Umgebung wird gemessen, die Differenz ergibt einen direkten Zusammenhang zwischen WDD und entsprechender Luftfeuchtigkeitsdifferenz.

**Schalldämpfung der Folie, statistischen Auswertung** Eine Schallquelle sendet einen Ton aus, der auf der gegenüberliegenden Seite aufgefangen wird.

**Tabelle 7.2:** Mögliche Analysen für Online-WDD Messungen

Nummer	Maßnahme	Prüfung	Status
1	Lichtmengenmessung	offen	unbekannt
2	Farbraummessung	durchgeführt	fehlgeschlagen
3	Luftfeuchtigkeitsdifferenzmessung	offen	unbekannt
4	Schalldämpfung	offen	unbekannt

Der WDD Produktparameter ist einer der wesentlichsten in Bezug auf die Produkteigenschaften. Genauso wie die Reißfestigkeit durch die Einstellung am Reckwerk beeinflusst wird, gilt das ebenso für den thermodynamischen Produktparameter WDD. Die Variation der Verstreckung erlaubt eine feinere Steuerung des Produktionsprozesses. Dies inkludiert



unter anderem die Möglichkeit bei Verfehlung der Produktspezifikation den Produktionsprozess zu unterbrechen und keinen weiteren Rohstoff in ein nicht mehr ökonomische verwertbares Produkt einzusetzen. Wenn noch deutlich mehr Daten über die Produkteigenschaften gewonnen werden könnten, wäre es möglich über die Messung des WDDs auch mechanische Eigenschaften zu erfassen, falls sich die Korrelationen von Tabelle 5.18 in Kapitel 5.4 noch verbessern.

**Empfehlung 6: Es wird empfohlen, die derzeit unbekannt Maßnahmen zu prüfen oder die Hersteller von Laborgeräten mit der Online-WDD Ermittlung zu betrauen.**

## 7.8 Dickenmessung der Rohfolie

Die Ermittlung der Dicke im Bereich des Kalibrierkorbs erfolgt wie in Kapitel 3.3.4 beschrieben mit Hilfe eines reversierenden Dickensensor. Dieser hat eine entsprechende Umlaufdauer und misst die Dicke nicht flächendeckend. Bei Montage von einer größeren Anzahl an Dickensensoren könnten die im Werkzeug integrierten Heizungen spezifischer angesteuert werden. Konstante Dicke im Rohprodukt hat zweierlei Vorteile. Einerseits ist eine geringe Abweichung der Dicke ein ökonomischer Faktor wie in [Nen94, S. 68f] beschrieben ist. Andererseits ist sie ein Gradmesser für Produktqualität und runability.

**Empfehlung 7: Es wird empfohlen, darüber nachzudenken den Hersteller der Anlage mit dieser Aufgabe zu betrauen.**

## 7.9 Neuronale Netze als Datensammler

Detlef Wolf sieht auch im Rahmen seiner Dissertation eine Chance die Folienqualität durch neuronale Netze positiv zu beeinflussen [Wol96, Seite 158 Absatz 3],[Pae06, Seite 19ff, 277ff]. Die Lernphase kann über einen längeren Zeitraum durch die Anlagenfahrer erfolgen. Das System kann auch ohne Rückkoppelung die Sollanlagenparameter liefern, dazu wird dann in der Folge kein Fuzzyregler benötigt. Geschichtlich wurde mit neuronalen Netzen der Versuch unternommen, menschliche Denkweisen abzubilden. Keller beschreibt maschinelles Lernen folgendermaßen:

*„Mit Lernen bezeichnet man adaptive Veränderungen der Fähigkeiten eines Systems, um die gleichen oder ähnliche Aufgaben, die aus der gleichen Population hervorgehen, beim nächsten Mal effizienter und effektiver behandeln zu können (Verbesserung der Performanz)“ [Kel00, Seite 17].*

Es gibt demnach 2 Einsatzgebiete für neuronale Netze, einerseits die Identifikation von Prozessmodellen und andererseits die Klassifikation vorhandener Information. Um über diesen hochkomplexen Prozess exaktere Daten zu erhalten, ist die Klassifikation von vorhandener Information als auch die Onlineverarbeitung die bessere Variante, solange die Erkenntnisse über Rohstoff und Maschineneinstellparameter noch immer ein aktives Forschungsgebiet sind. Eine konsistente Datensammlung ist Ausgangsbasis für die Prozesssteuerung eines komplexen Produktionsprozesses.

**Empfehlung 8: Es wird empfohlen, eine automatisierte Datenerfassung mit Hilfe neuronaler Netze anzudenken.**

## 7.10 Kühlluftaufbereitung

Der zu verarbeitende Rohstoff ist stark hygroscopisch. Er zieht Wasser aus der Umgebung und wird daher in speziellen Containern, den Oktabins angeliefert. Da keine Feuchtigkeit im Material erwünscht ist, gilt es, die Feuchtigkeit möglichst überall vom Rohstoff fernzuhalten. Die Literatur beschreibt, dass Polypropylen strukturell keine Wasseranteile aufnehmen kann (nur  $0,01 \text{ mg}/4 \text{ Tage}$  [Dom07, Anhang, Tabelle 5-28]). Die Ursache für die Hygroscopie liegt am Kreideanteil. Für eine konstante Dickenverteilung soll eine möglichst geometrisch konstante Frostlinie  $z_f$  erreicht werden. Eine gleichmäßige Abkühlung erhöht die Chancen diesbezüglich beim Phasenübergang fluidisch-fest. Dieser den Wärmeinhalt der Folie reduzierende Abkühlvorgang hängt von den Stoffeigenschaften der beteiligten Medien (Kühlluft, Folie) ab. Einer der wesentlichen Parameter ist die Enthalpie. Die gemessenen Werte der Luft aus dem Beobachtungszeitraum laut Kapitel 3.4 werden im Diagramm in Form der Enthalpie 7.2 dargestellt. Die Eigenschaft der Kühlluft ist ein wesentlicher Faktor für die Qualität des Endproduktes.

*Entscheidenden Einfluß auf die Qualität - mechanische, optische und geometrische Eigenschaften - von hochwertigen Blasfolien haben bei der Herstellung:*

- *das verwendete Werkzeug (Geometrie, Temperierung, drallfreier Schmelzeaustritt, ...),*
- *eine konstante Schmelzeaustrittsgeschwindigkeit (pulsationsfreier, konstanter Massestrom),*
- *die erreichte thermische und mechanische Schmelzeshomogenität (Extruderschneckenengeometrie, Zylinder- und Werkzeugtemperierung, ...),*
- *das radiale und axiale Verstreckverhältnis ( $A$ ,  $B$  und  $B/A$ ),*
- *das installierte Kühlsystem (Gleichmäßigkeit des Kühlmediums) hinsichtlich*
  - *Austrittsgeschwindigkeit,*
  - *Austrittsmassestrom,*
  - *Austrittstemperatur,*
  - *Anströmwinkel zur Blase,*
  - *Zustand des Kühlmediums - in der Regel Luft - (Turbulenzgrad, Feuchtigkeit ...)*
- *und nicht zuletzt die Umgebungsbedingungen.*

*Bei der Betrachtung der teilweise schwer überwachbaren Einflußfaktoren wie z. B. die Schmelzeshomogenität und die Umgebungseinflüsse wird deutlich, daß nur ein die Störgrößen ausregelndes System zu einer konstanten Folienqualität führen kann. Als das den Weiterverarbeitungsprozeß und den Rohstoffeinsatz zentral beeinflussende Folienqualitätskriterium wird an heute eingesetzten Anlagen ausschließlich die Foliendicke in Längs- und Querrichtung mit Hilfe unterschiedlicher Systeme geregelt [Wol96, Seite 4].*

[PE08, Seite 58],[PE08, Seite 67], [Kan06, S. 74f]

Grundsätzlich ist das Kühlen eines Mediums ein thermodynamischer Austauschprozess von Wärme. Aus diesem Grund spielen Größen, die am Austauschprozess beteiligt sind eine wesentliche Rolle. Derzeit reagiert der Dicken-Temperatur-Regelmechanismus bei Dickenungleichheiten in Folge der schwankenden Kühlluftigenschaften durch Veränderung der Temperaturzonen im Werkzeug. Dieser Mechanismus gleicht demnach schwankende thermodynamische Eigenschaften der Folieschmelze, der Kühlluft bzw. eine Kombination beider veränderlichen Eigenschaften aus. Durch konstant halten eines Faktors wird die



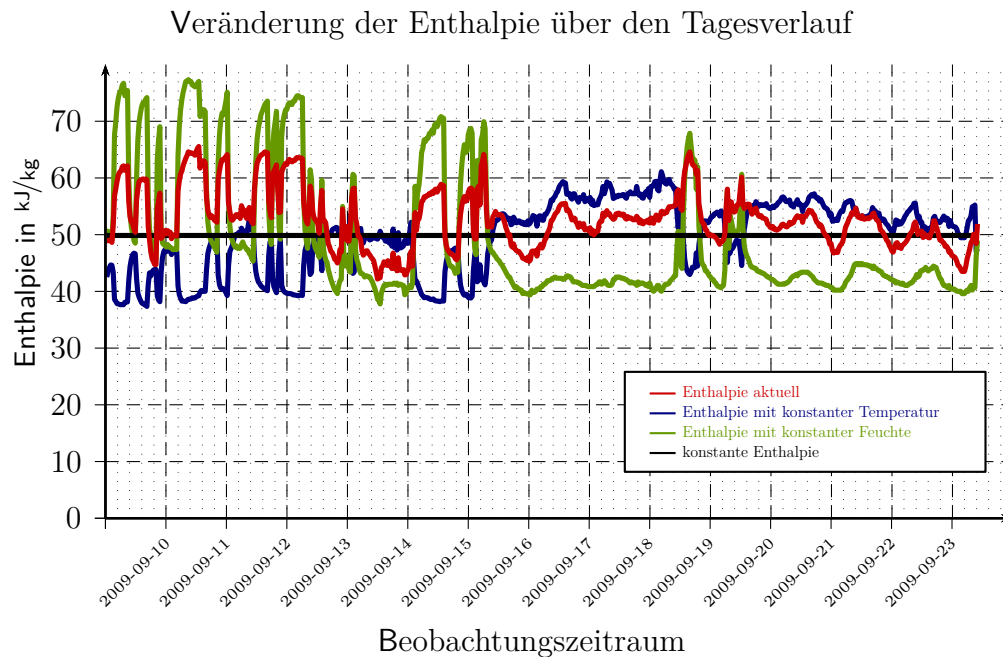


Abbildung 7.2: Enthalpie der Kühlluft

### 7.10.1 Wärmeübertragung durch erzwungene Konvektion

Es erfolgt ein Wärmeaustausch zwischen der Kühlluft und der im Phasenübergang befindlichen Polymerschmelze. Während die Kühlluft sich erhitzt, kühlt die Polymerschmelze ab und erstarrt in Höhe der Frostlinie. Es werden keine Partikel ausgetauscht. Erzwungene Konvektion herrscht wegen der Zwangsführung der Kühlluft zur Folie [Böc06, Kapitel 3, S. 73 - 90], [VDI06], [Chr10, S. 229ff].

$$Q = \alpha \cdot A \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) \quad (7.11)$$

Der lokale Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha(x)$  ergibt sich aus der Wärmeleitfähigkeit des Fluids  $\lambda$  bei der mittleren Temperatur  $(T_F + T_S)/2$  und der Dicke  $\delta_T$  der thermischen Grenzschicht [HS06].

$$\alpha(x) = \frac{\lambda}{\delta_T} \quad (7.12)$$

Der Wärmeübergang erfolgt durch erzwungenen Kühlvorgang mit Hilfe eines Gebläses. Die Wärmeübergangszahl  $\alpha$  wird durch die dimensionslose Nusselt-Zahl  $Nu^{11}$  ausgedrückt, welche die Reynoldszahl und die Prandtlzahl als Argument haben.

$$\alpha = \frac{\lambda}{L} \cdot Nu(Re, Pr) \quad (7.13)$$

Der Wärmeübergang der durch die Nusselt-Zahl ausgedrückt wird basiert auf der Ähnlichkeitstheorie. Die Nusselt-Zahl wird formal gleich Biot-Zahl gebildet. Da sich die Größe  $\alpha$  in der Ausgangsgleichung wiederfindet, die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  aber auch die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  als Argument in die Nusselt-Zahl eingeht, sind die beiden Stoffgrößen relevant für den Abkühlvorgang. Die spezifische Wärmekapazität von feuchter Luft können aus den gemessenen Größen ermittelt werden. Die normale Umgebungsluft ist ein ideales Dampf-Gas Gemisch aus feuchter und trockener Luft. Dieses Gemisch kann wegen dem Gasgesetzes nach thermodynamischen Überlegungen zerlegt, die entsprechenden Parameter ermittelt und wieder zusammengeführt werden.

*Feuchte Luft ist ein Gemisch aus trockener Luft und Wasser. Bei Temperaturen über  $-50\text{ °C}$  und bei niedrigen Drücken ( $p \approx 1\text{ bar}$ ) kann man feuchte Luft thermodynamisch als ein Gas-Dampf-Gemisch behandeln. In einem Gas-Dampf-Gemisch liegt die Temperatur des einen Mischungsteilnehmers, des „Gases“, so hoch, sein Partialdruck jedoch so niedrig, dass er als ideales Gas angesehen werden kann. Temperatur und Partialdruck des anderen Mischungsteilnehmers, des „Dampfes“, variieren dagegen in der Nähe des Zweiphasen-(Naßdampf-) Gebietes, so dass Kondensation eintreten kann, sobald bei einer bestimmten Temperatur der Partialdruck den zu dieser Temperatur gehörigen Sättigungsdruck erreicht. Nehmen außerdem die Sättigungsdrücke im betrachteten Temperaturbereich nur sehr kleine Werte an, so befolgt auch der Dampf noch genügend genau die Zustandsgleichung idealer Gase [Bae61, Seite 7-8].*

Die aufgezeichneten Daten wurden im 30 Minuten Abstand direkt beim Anlaufstutzen genommen, die Temperaturen und die relative Luftfeuchtigkeiten wurden aufgezeichnet. Der Luftdruck steht als Parameter nicht zur Verfügung. Vereinfacht wird ein Druck von konstant 1013 mbar angenommen. Folgende Schritte werden durchgeführt:

1. Berechnung des Sättigungsdampfdruckes

<sup>11</sup>In der Nusselt-Zahl bedeutet  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit des Fluids, bei der Biot-Zahl die des Festkörpers

2. Berechnung des Wasserdampfpartialdruckes
3. Berechnung des Taupunktes
4. Berechnung der Dichte
5. Berechnung des Wassergehalts in Volumsprozent
6. Berechnung des Wassergehalts in Gewichtsprozent
7. Berechnung der Enthalpie

**Schritt 1** Für die Berechnung des Sättigungsdampfdruckes kommt die Magnusformel zur Anwendung. (Korrekturfaktor für feuchte Luft, betrachtetes Temperaturintervall -50 bis +90 °C)

$$p_{v,sat} = p_{v,sat}(t = 0^\circ C) \cdot e^{\frac{C_1 t}{C_2 + t}} = 610,78 hPa \cdot e^{\frac{17,08085 \cdot t}{234,175^\circ C + t}} \quad (7.14)$$

**Schritt 2** Berechnung des Wasserdampfpartialdruckes

$$p_v = \varphi \cdot p_{v,sat} \quad (7.15)$$

**Schritt 3** Für die Berechnung des Taupunktes [Son81].

$$\vartheta(\varphi, \vartheta) = \frac{241,2 \cdot \ln\left(\frac{\varphi}{100}\right) + \frac{4222,03716 \cdot \vartheta}{241,2 + \vartheta}}{17,5043 - \ln\left(\frac{\varphi}{100}\right) - \frac{17,5043 \cdot \vartheta}{241,2 + \vartheta}} \quad (7.16)$$

**Schritt 4** Berechnung der Dichte erfolgt laut [Bae61, S. 12, Formel 12]<sup>12</sup>.

$$\rho(p_{v,sat}, \vartheta) = \frac{0,3483 \cdot 1013(mbar)}{273,15 + \vartheta} - \frac{0,1316 \cdot p_{v,sat}}{273,15 + \vartheta} \quad (7.17)$$

**Schritt 5** Berechnung des Wassergehalts in Volumsprozent.

$$\Psi = \frac{p_{v,sat}}{1013} \cdot 100 \quad (7.18)$$

<sup>12</sup>1 bar = 10<sup>5</sup> Pascal

**Schritt 6** Berechnung des Wassergehalts in Gewichtsprozent.

$$\mu = \Psi \cdot \frac{18,02}{(\Psi \cdot 18,02 + (100 - \Psi) \cdot 28,96) \cdot 100} \quad (7.19)$$

**Schritt 7** Berechnung der Enthalpie <sup>13</sup>[Bae61, Seite 16].

$$h = \frac{\mu}{100} \cdot (2500 + 1,86 \cdot \vartheta) + \frac{100 - \mu}{100} \cdot \underbrace{1,006}_{c_{p,tl}} \cdot \vartheta \quad (7.20)$$

Die Temperaturabhängigkeit spezifischen Wärmekapazität trockner Luft  $c_{p,tl}$  wurde über den VDI Wärmeatlas geprüft und deren Einfluss im Temperaturbereich von 0-50°C ist vernachlässigbar [VDI06]. Mit diesem Formelwerk kann die spezifische Wärmekapazität feuchter Luft in Abhängigkeit der Temperatur und Wassergehalt in Nähe des Umgebungsdruckes (1013mbar) ermittelt werden, welche im Tagesverlauf schwankt. Der Abkühlvorgang der Folie bei schwankender Wärmekapazität der Luft hat eine Veränderung der Frostlinie  $z_f$  (Erstarrungslinie der Rohfolie) zur Folge und damit eine nicht konstante Folieneigenschaft der Rohfolie. Die Ermittlung dieser Parameter sind mit Hilfe von [Son81], [HS06], [VDI06], [Chr10, S. 229ff], [Böc06, Kapitel 3, S. 73 - 90], [BS10, Kapitel 2, S. 131] durchgeführt worden.<sup>14</sup> Falls die Qualität der Rohfolie auch von der Höhe der Frostlinie abhängt, so kann das unberücksichtigt lassen dieses Umstands zu einer erhöhten Rissgefahr im Reckwerk führen. Abrisse über eventuell in diese Richtung erfolgte Maßnahmen hinaus sind dann nicht mehr kausal mit der Kühlluft in Zusammenhang zu bringen, so diese spezifiziert wird. Abgesehen davon, dass es schwierig ist auf Kühlluftänderungen zu reagieren, entfällt - falls überhaupt möglich - die Notwendigkeit des Anlagenfahrers die Kühlluftigenschaften zu verändern. Auch eine Veränderung der Rohstoffquellen würde an diesem Umstand nichts ändern, in jedem Fall würde die Eingangsgröße für den zweiten Teil des Prozesses (System 2) verbessert werden. Eine nicht unerhebliche Anzahl an Größen darüberhinaus sind ebenfalls durch die Temperatur und Luftfeuchtigkeit beeinflusst. Das wären beispielsweise die Dichte  $\rho$ , die dynamische Viskosität  $\eta$  oder die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ . In unterschiedlicher Ausprägung wirkt sich das dann auf die Reynolds-Zahl, die Prandtl-Zahl und die Nusselt-Zahl aus, in der Folge auf die  $\alpha$  Werte und damit auf

<sup>13</sup>Normierung Enthalpie bei  $h = 0$ , bei 298,15K,  $p = 1013,25$  mbar

<sup>14</sup>Realgaskorrekturfaktoren bleiben unberücksichtigt, da das Ergebnis an sich schon aussagekräftig genug ist.



den für Wärmetauschprozesse so wichtigen U-Wert<sup>15</sup> aus [ISO96a]. Die Diagramme 7.3

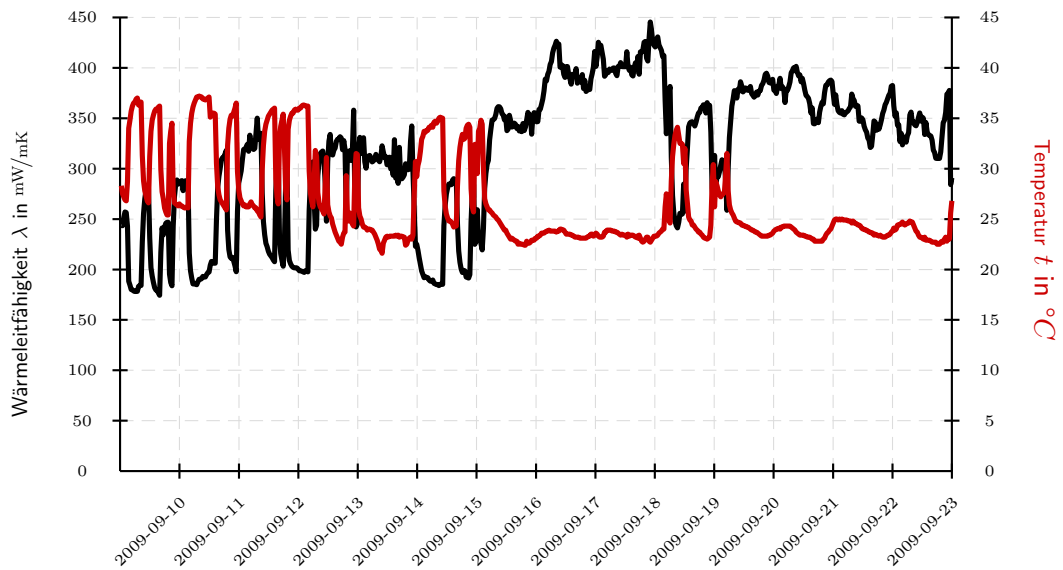


Abbildung 7.3: Verlauf  $\lambda$  feuchter Luft

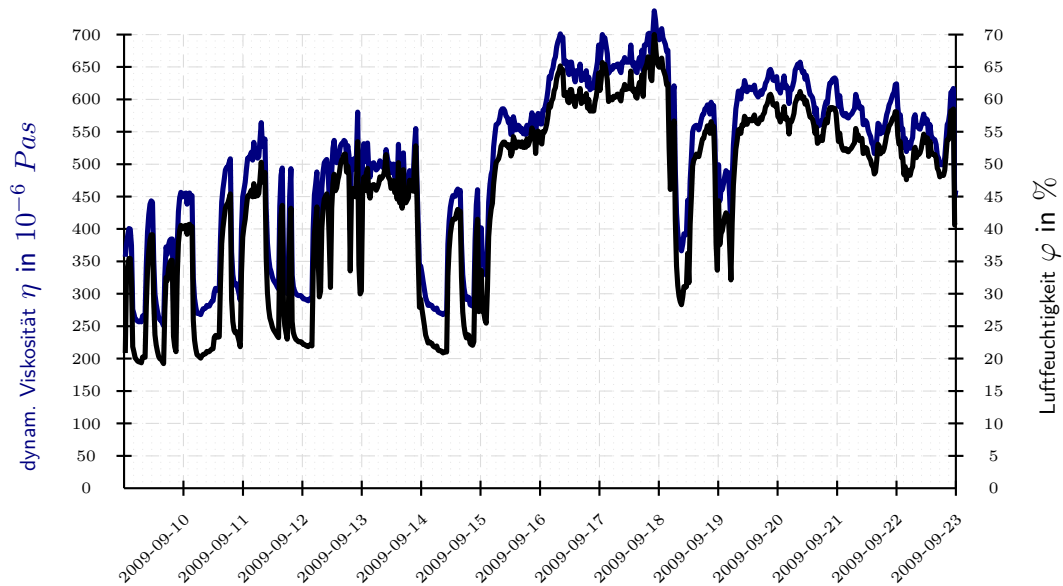


Abbildung 7.4: Verlauf  $\eta$  feuchter Luft

<sup>15</sup>früher wurde der U-Wert als k-Wert bezeichnet.

bis 7.8 wurden mit Hilfe von Interpolation aus dem VDI Wärmeatlas ermittelt und zeigen die Temperatur und Luftfeuchteabhängige Schwankung an.

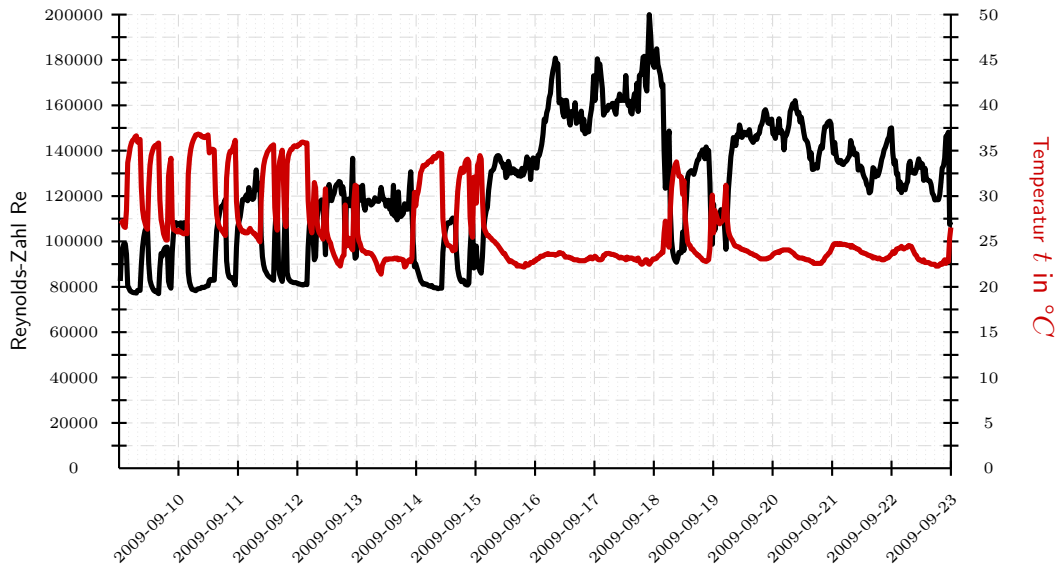


Abbildung 7.5: Verlauf Reynolds-Zahl der über den Beobachtungszeitraum<sup>16</sup>

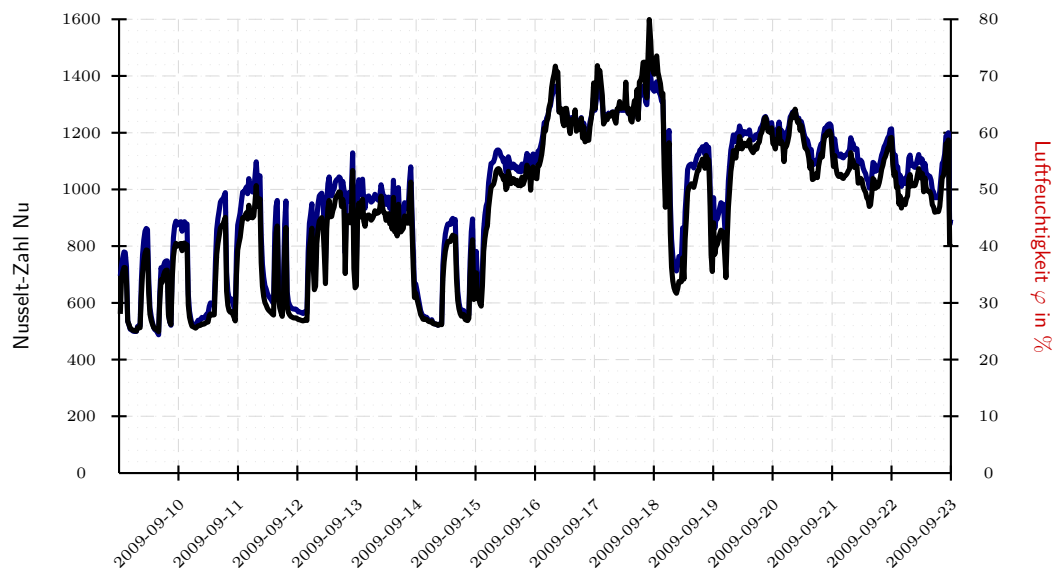


Abbildung 7.6: Verlauf Nusselt-Zahl der über den Beobachtungszeitraum<sup>17</sup>

<sup>16</sup>[VDI06, Nu berechnet mit VDI Wärmeatlas, GA5, Formel 26,27 ]

<sup>17</sup>[VDI06, Nu berechnet mit VDI Wärmeatlas, GA5, Formel 26,27 ]

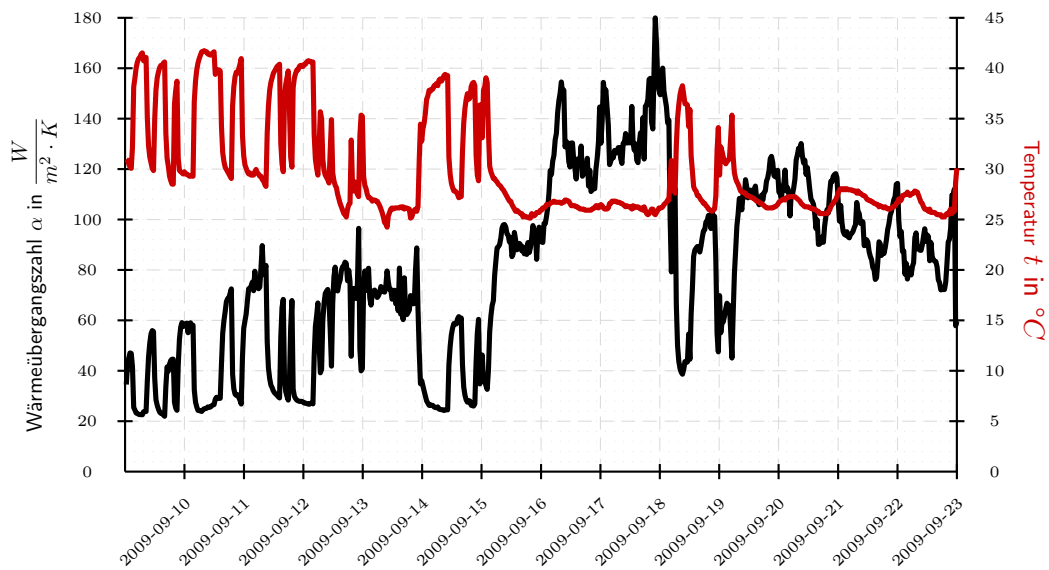


Abbildung 7.7: Verlauf der Wärmeübergangszahl  $\alpha$  feuchter Luft

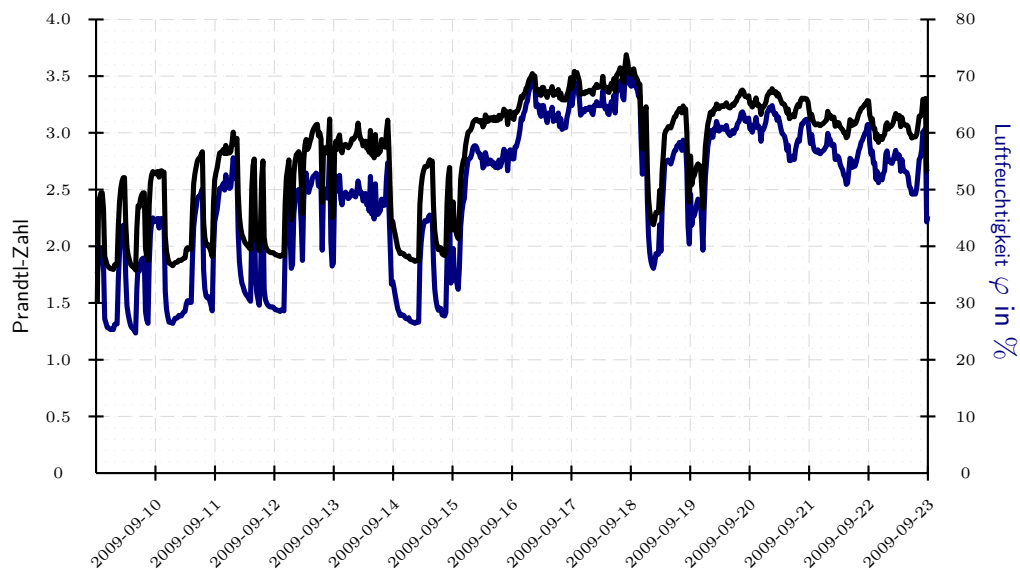


Abbildung 7.8: Verlauf der Prandtl-Zahl feuchter Luft

Die Kennzahlen für die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , die dynamische Viskosität  $\eta$ , der Reynolds- und der Nusselt-Zahl, der Wärmeübergangszahl  $\alpha$  sowie der Prandtl-Zahl wurden im Temperaturzwischenbereich linear interpoliert. Die Interpolationsvorschriften wurden aus dem VDI-Wärmeatlas entnommen [VDI06, DCB1]

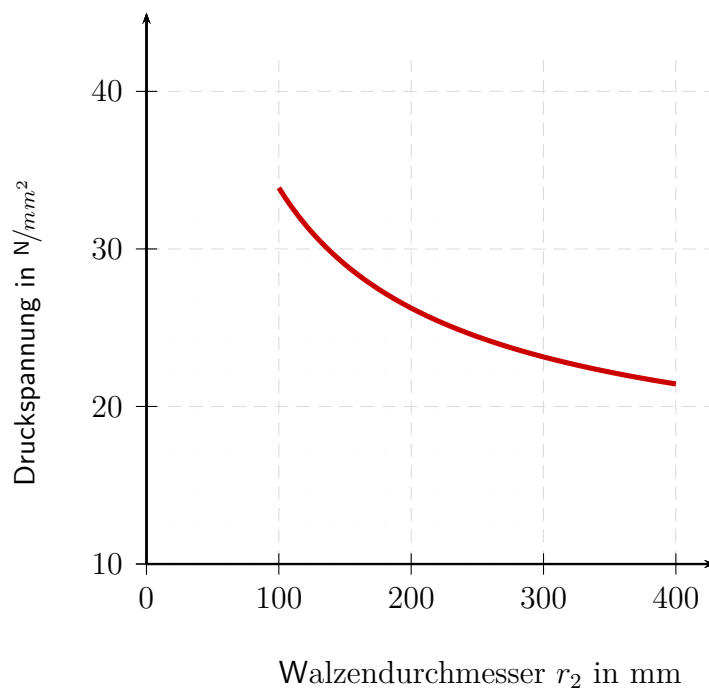
**Empfehlung 9:** Es wird empfohlen, die Kühlluft zu spezifizieren und über eine Aufbereitung der Kühlluft nachzudenken.

## 7.11 Walzendurchmesser erhöhen

Wie in Kapitel 3.3.6 angeführt, reißt eine Folie bei Schwächung im Reckwerk durch Überschreiten von möglichen maximalen Spannungen in der Folie. Dies tritt durch die Hertzsche Flächenpressung auf. Die Formel für die maximale Spannung ist bei zwei Zylinder für unterschiedlichen Materialien durch den E-modul (Gleichung (7.21))

$$E = \frac{2E_1E_2}{(E_1 + E_2)} \quad (7.21)$$

sowie dem Radius (Gleichung (7.22))



**Abbildung 7.9:** Walzendurchmesser und Hertzsche Flächenpressung

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \quad (7.22)$$

mit Gleichung (7.23)

$$\max \sigma_z = \sigma_0 = \sqrt{\frac{FE}{2\pi r l (1 - \nu^2)}} \quad (7.23)$$

zu berechnen. Die Projektion ist ein Rechteck der Breite  $2a$ , sie ist mit Gleichung (7.24)

$$2a = 2\sqrt{\frac{8Fr(1 - \nu^2)}{\pi El}} \quad (7.24)$$

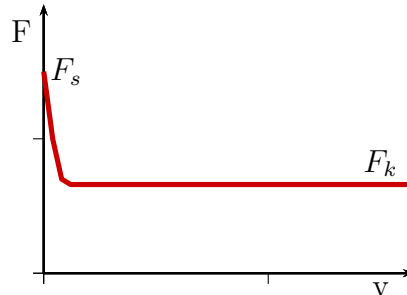
zu ermitteln [Dub99, Kapitel 3, Festigkeitslehre ], [CH10, S. 35ff, S.43ff]. Die Querkontraktionszahl  $\nu$  ist einheitlich 0,3. Falls ein kleinerer Radius angenommen wird, wie er im Reckwerk mit den OSS und ESS Walzen durchaus der Fall ist, sieht der Verlauf der Spannung in Abhängigkeit des größer werdenden Radius  $r_2$  wie in Abbildung 7.9 aus. Durch den Tausch der OSS und ESS Walzen kann eine Reduktion der notwendigen Kraft im Umfang von 36% erzielt werden. Dies schon die Folie und Abrisse treten weniger oft auf.

**Empfehlung 10:** Es wird empfohlen, darüber nachzudenken, ob eine Erhöhung des Walzendurchmesser durch Tausch der Walze im Rahmen von Wartungsmaßnahmen das Reißrisiko senkt.

## 7.12 Stick-Slip Effekt

Der Stick-Slip Effekt tritt aufgrund des Übergangs von Haft- zur Gleitreibung auf. Er spielt dann eine Rolle, wenn die beiden anzusteuern den Zylinder, welche die ESS und OSS Walzen an die Produktionswalzen pressen einen ungleichmäßigen Liniendruck erzeugen. Durch entsprechende mechanische Vorrichtungen tritt keine ungleiche Linienbelastung auf, wenn nur ein Zylinder mit dem richtig positionierten Druckmesser angesteuert wird. Gerade bei dünnwandigen Produkten ist die Fehlertoleranz bei zu hoher Druckbelastung in absoluten Größen sehr gering. Mit einer entsprechenden Führungsvorrichtung wird der

Stick-Slip-Effekt zwar nicht vermieden, er tritt aber nicht mehr zu unterschiedlichen Zeitpunkten auf. Wenn zwei angesteuerte Zylinder den Übergang von Haft- zu Gleitreibung zu unterschiedlichen Zeitpunkten  $t$  erfahren, dann ist die Gefahr des ungleichmäßigen Quetschens der Folie groß [Pop09, Kapitel 12, S. 173ff]. In Abbildung 7.10 wird der Übergang dargestellt.



**Abbildung 7.10:** Stick-Slip-Effekt mit schneller Abnahme der Reibungskraft

Dabei ist die Kraft  $F_s$  die Kraft zum Haftzeitpunkt, die Kraft  $F_k$ , welche sich im Gleitreibungsbereich einstellt.

**Empfehlung 11:** Es wird empfohlen, die ESS und OSS Walzen über ein Führungsgestänge anzusteuern, um einen konstanten Liniendruck aufzubauen.

## 7.13 Luftzufuhr in Walze N abdrehen

Die Luftzufuhr in der Walze N der Anlage besteht aus einer feststehenden Walze mit innerer Luftzufuhr und am Umfang angeordneter kreisförmiger Löcher (Abbildung 7.11). Da die Strömungsgeschwindigkeit äußerst niedrig ist, hat diese Luftzufuhr auf die Folie nahezu keinen Einfluss. Der in Folge geringer Strömungsgeschwindigkeit auftretender Staudruck ist gegenüber dem E-Modul vernachlässigbar, daher darf die Luft als inkompressibles Fluid betrachtet werden [Sig08, S. 8]. Die Strömungsgeschwindigkeit gibt Auskunft über die vorhandenen Druckverluste, die daher gering sind, da die Luft bei den nicht von der Folie bedeckten Öffnungen entweicht (40 Löcher auf 12 und 6 Uhr, die restlichen 20 Löcher in Drittelabschnitten).

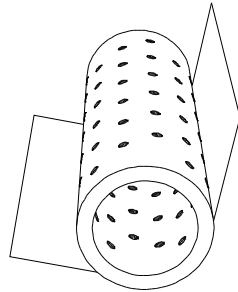


Abbildung 7.11: Luftzufuhr

**Ausgangsdaten für die exemplarische Modellrechnung:** Außendurchmesser  $dw_a$  160 mm, Innendurchmesser  $dw_i$  60 mm, Anzahl der Löcher gesamt  $n_{ges}$  400 , Offene Löcher  $n_{offen}$  120 Lochdurchmesser  $d_l$ : 15 mm, Lochlänge  $s$ : 50 mm, Luftaustrittsgeschwindigkeit  $v_i$  200 mm/s<sup>18</sup>

**Vorabbetrachtung** Es muss der selbe Volumenstrom reinströmen, der rausströmt. (0 für den Eingang, 1 für den Ausgang)

$$\dot{v}_0 = n_{offen} \cdot \frac{(d_l \cdot 0,001)^2 \cdot \pi}{4} \cdot v_i = 120 \cdot \frac{0,015^2 \cdot 3,14}{4} \cdot 0,2 = 0,004 \text{ m}^3/\text{s} \quad (7.25)$$

Die Druckdifferenz zwischen der Umgebung und dem inneren Zustand der Rolle multipliziert mit der Fläche, wo sich die Folie befindet ergibt eine kleine Kraft, die die Folie versucht anzuheben. Dazu muss der Innendruck ermittelt werden.

$$p_0 + \rho \cdot g \cdot h_0 + \rho \cdot \frac{w_0^2}{2} = p_v + p_1 + \rho \cdot g \cdot h_1 + \rho \cdot \frac{w_1^2}{2} \quad (7.26)$$

Aufgrund der fehlenden Höhendifferenz vereinfacht sich die Gleichung zu

<sup>18</sup>Basis der Angabe sind die Informationen des Unternehmens, wo keine Informationen vorhanden waren, wurden Modellannahmen getroffen.

$$p_0 + \rho \cdot \frac{w_0^2}{2} = p_v + p_1 + \rho \cdot \frac{w_1^2}{2} \quad (7.27)$$

mit

$$p_v = \left( \lambda \cdot \frac{l}{d} + \sum_i^n \xi_i \right) \rho \cdot \frac{w^2}{2} \quad (7.28)$$

### Ermittlung der Reynoldszahl

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} = \frac{0,2 \text{ m/s} \cdot 0,015 \text{ m}}{162,6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}} = 184,5 \quad (7.29)$$

### Ermittlung der Rohrreibungszahl Ermittlung von $\lambda$ (Laminare Strömung)

$$\lambda = \frac{64}{Re} = \frac{64}{184,5} = 0,34688 \quad (7.30)$$

### Ermittlung des Druckverlustes

$$p_v = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} = 0,34688 \cdot \frac{0,05 \text{ m}}{0,015 \text{ m}} \cdot 1,1492 \text{ kg/m}^3 \cdot \frac{(0,2 \text{ m/s})^2}{2} = 0,0266 \text{ kg/m} \cdot \text{s}^2 = 0,0266 \text{ Pa} \quad (7.31)$$

$$p_{innen} = p_v + p_{außen} \quad (7.32)$$

Außen ist der normale Umgebungsdruck (1013 mbar oder 101300 Pascal)

$$P_{innen} = 0,0266 \text{ Pa} + 101300 \text{ Pa} = 101300,0266 \text{ Pa} \quad (7.33)$$

**Ermittlung der Kraft** Diese Differenz zwischen Innen- und Außendruck ist Auslöser für die Kraft, die auf die Folie auf den anderen 180° drückt.

$$F = p \cdot A = 0,0266 \text{ N/m}^2 \cdot \frac{(0,015 \text{ m})^2 \cdot \pi}{4} = 4,7 \cdot 10^{-6} \text{ N} \quad (7.34)$$



Nach einer Größenabschätzung hat diese Kraft keine Auswirkung auf reibverminderndes Verhalten der Folie. Die Luftzufuhr spielt in diesem Fall keine Rolle. Formeln und Berechnungsgrundlagen wurden aus dem VDI Wärmeatlas und dem Dubbel entnommen [VDI06, Abschnitt Lab 1], [Dub99].

**Empfehlung 12:** Es wird empfohlen die Modellrechnung genau zu prüfen und bei geringen Abweichungen vom Modellergebnis über das Abdrehen der Luftzufuhr nachzudenken.

## 7.14 Wärmezufuhr zwischen Abzug und Reckwerk

Wie in der Literatur beschrieben, sollen Polypropylenfolien keinen Temperaturschocks ausgesetzt werden. Nach Abkühlung der Folien nach dem Produktionsprozesses wird über den Wendestangenabzug, den Schneidevorgang die Folie zur ersten Walze des Reckwerks transportiert. Die spezifische Wärmekapazität von reinem Polypropylen ist bei ca.  $1,8 \text{ kJ/kgK}$  [Dom07, Anhang, Tabelle 5-28], einer Dicke von  $113,02 \mu\text{m}$  [Gmb09a], Breite  $3,5 \text{ m}$ , die Schmelztemperatur beträgt ca.  $165 \text{ °C}$  [She96, Kapitel 1, S. 12], [Dom07, Kapitel 2.1.1.2.2.1, S. 262 Tabelle 2-14]. Die Distanz vom Vorabzug zum Eintritt des Reckwerks beträgt ca.  $15 \text{ m}$ , die Temperatur der Umgebung in dieser Höhe ist minimal  $25 \text{ °C}$ . Die Abzugsgeschwindigkeit beträgt  $34 \text{ m/min}$ . Die dauernde Gebrauchstemperatur ohne mechanische Belastung liegt bei  $100 \text{ °C}$  [Dom07, Anhang, Tabelle 5-28]. Die Berechnung der Temperatur am Walzeneingang ist der Abkühlvorgang über eine bestimmte Zeit. Folgende Modellrechnung wird daher angestellt<sup>19</sup>.

**Zeitdauer des Abkühlvorgangs:**

$$t = \frac{s}{v} = \frac{19\text{m}}{0,57\frac{\text{m}}{\text{s}}} = 33,52 \text{ s} \quad (7.35)$$

Für einen Meter benötigt die Folie den Kehrwert der Geschwindigkeit

$$t = \frac{1}{v} = \frac{1}{0,57} = 1,76 \text{ s/m} \quad (7.36)$$

<sup>19</sup>Basis der Angabe sind die Informationen des Unternehmens, wo keine Informationen vorhanden waren, wurden Modellannahmen getroffen.

**Berechnung der Masse von einem Meter:**

$$m_{1m} = 113,02 \mu\text{m} \cdot \underbrace{1000 \text{ mm/m}}_{\text{Bezugsgrösse}} \cdot 0,01 \text{ dm} \cdot 35 \text{ dm} \cdot 0,9 \text{ kg/dm}^3 = 0,356 \text{ kg} \quad (7.37)$$

**Wahl der Bezugstemperatur**  $t_{\text{Bezug}}$  ist  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$Q_1 = m \cdot c_p \cdot \vartheta = 0,356 \text{ kg} \cdot 1,8 \text{ kJ/kgK} \cdot 70 \text{ }^\circ\text{C} = 44,858 \text{ kJ} \quad (7.38)$$

**Berechnung der Wärmeübergangsmenge** Da die Schmelzetemperatur bei  $165 \text{ }^\circ\text{C}$  liegt, gehe ich in diesem Modell von einer Feststofftemperatur von  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  aus.  $\alpha$  ist  $6,72 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ <sup>20</sup>. Die Wärmemenge die übergeht  $Q_{ue}$  wird berechnet aus

$$Q_{ue} = \alpha \cdot A \cdot (T_M - T_L) =$$

$$\overbrace{6,72 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}}^{4,8+3,4-0,57} \cdot 4,187 \text{ kJ/kcal} \cdot \frac{1 \text{ h}}{0,57 \text{ m/s} \cdot 3600 \text{ s}} \cdot (70 \text{ }^\circ\text{C} - 25 \text{ }^\circ\text{C}) \cdot 1 \text{ m} \cdot 3,5 \text{ m} = 2,172 \text{ kJ} \quad (7.39)$$

**Ermittlung der Temperatur** Dieser Wert wird mit zwei multipliziert für die Folie oben und unten und von  $Q_1$  abgezogen<sup>21</sup>. Diese neue Wärmemenge wird dann hergenommen um die Temperatur zurückzurechnen. Dieser Vorgang muß in diesem Fall 19 mal wiederholt werden.

Diagramm 7.12 stellt dar, wie schnell die Folie je Meters abkühlt. Sie muss dann am Anfang des Reckwerks von  $26,72 \text{ }^\circ\text{C}$  wieder auf eine erhöhte Temperatur von ca.  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  gebracht werden. Dies belastet die Folie thermisch. Eventuelle Abkühlungen durch Walzen wurden in dieser Modellrechnung nicht berücksichtigt. Ebenso wurde nicht berücksichtigt, dass die Luft nicht frei strömen kann und sich über die Folienbreite ungleichmäßig verteilt. Die Messung der Folientemperatur vor dem Reckwerkseingang gibt Auskunft über die genauen Werte.

<sup>20</sup>In diesem Kapitel soll die Temperaturabhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  unberücksichtigt bleiben.

<sup>21</sup>Diese Annahme ist grob vereinfacht,  $\alpha$  Werte sind oben und unten unterschiedlich, unten im Schnitt um 50% kleiner

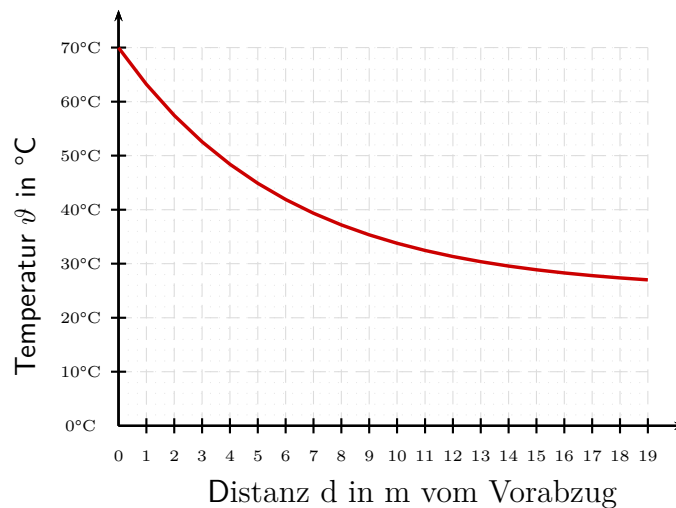


Abbildung 7.12: Temperaturverlauf  $\vartheta$  der Folientemperatur über die Distanz

**Empfehlung 13:** Es wird empfohlen, Überlegungen anzustellen, den Wärmeverlust vom Vorabzug bis zum Reckwerkseingang Walze Nummer zu reduzieren und die Folientemperatur vor dem Reckwerkseingang empirisch zu prüfen.

## 7.15 Weitere Analysemöglichkeiten

### 7.15.1 Prozessanalyse auf Basis dimensionslosen Kennzahlen

Die Prozessanalyse mit Hilfe dimensionsloser Kennzahlen wurde 2004 mit der Zielsetzung durchgeführt, verschiedener Blasfolienextrusionsanlagen zu vergleichen. Sie setzte dabei verschiedene Prozessparameter in Zusammenhang, meistens jedoch durch logische Zusammenhänge, nicht durch mathematische [Ohl04]. In dieser Arbeit wird dabei die vollständige Wirkungskette berücksichtigt, optische Eigenschaften werden allerdings nicht betrachtet. Da in dieser Arbeit nur polyethylenbasierende Werkstoffe verwendet worden sind, ist eine weitere Untersuchung mit polypropylenbasierenden Materialien wie es in der vorgestellten Anlage im wesentlichen zum Einsatz kommt zu wiederholen.

**Empfehlung 14:** Es wird empfohlen, eine auf die vorhandene Anlage durchzuführende Analyse nach Ohlendorf durchzuführen.

### 7.15.2 CFD Berechnungen einzelner Prozessschritte

CFD steht für Computational Fluid Dynamics und ist die englische Bezeichnung für numerische Strömungsmechanik. Mit Hilfe von Digitalcomputer können so strömungstechnische Probleme simuliert werden. In vielfältiger Weise kommen Anwendungen innerhalb des Ingenieurwesens (z. B. als technische Analyse- oder Optimierungsmethoden), der Verfahrenstechnik (Apparate- und Prozessoptimierung) aber auch andere wissenschaftliche Disziplinen zum Einsatz. Die dahinterliegende Idee ist ein Problem nicht exakt, sondern approximativ zu lösen. Die möglichen Lösungsmethoden Finite-Differenzen-Methode (FDM), Finite-Volumen-Methode (FVM), Finite-Elemente-Methode (FEM) unterscheiden sich in Aufwand/Flexibilität und Genauigkeit. Strömungssimulationen werden heutzutage auf Basis von Programmen wie beispielsweise Fluent oder Ansys-CFX durchgeführt. Diese Programmpakete bieten umfangreiche Möglichkeiten, strömungstechnische Probleme zu erfassen und zu modellieren. Die damit erzielbaren Optimierungseffekte hängen vom Anwendungsfall ab [Lj11, Kapitel 1].

### 7.15.3 Empfehlung für weitere Hypothesentests

Eine Reihe von Hypothesen sind im Rahmen diese Arbeit nicht mehr betrachtet worden. Der Grund ist, dass die Daten für die Prüfung zum Zeitpunkt der Arbeit noch nicht zur Verfügung standen.

So wäre es zu überprüfen, ob es einen Bereich des Reckverhältnisses gibt (Kapitel 3.3.6 und 3.3.7), bei dem sowohl die mechanischen Eigenschaften des Produktes als auch die Wasserdampfdurchlässigkeit erreicht wird. Unter der Voraussetzung, dass ein größeres Reckverhältnis zu einem ausgeprägteren Hundeknochen, einem größeren Einsprung und damit zu mehr Abfall führt, wäre es gewinnbringend, das Reckverhältnis entsprechend der Rahmenbedingung auf ein Minimum zu reduzieren (möglicher Zusammenhang **Reckverhältnis - Einsprung**).

Während des Abkühlvorgangs im Bereich des Korbes (Kapitel 3.3.4) ist sowohl an der Außenseite der Folie als auch innseitig kühle Luft, die dort zum Einsatz kommt. Unabhängig von der Empfehlung für die Kühlluftaufbereitung sollte untersucht werden, ob kühle Luft in der Tat für die Bildung von sogenannten Parafintropfen verantwortlich ist. Parafintropfen haben die unangenehme Nebenwirkung, dass sie, sobald sie auf die Folie

treffen dort ein Loch „brennen“. Vorgeschwächt reißt die Folie im Reckwerk. Ob dabei tatsächlich die Temperatur der Luft relevant ist, wäre zu prüfen (möglicher Zusammenhang **Kühllufttemperatur - Parafintropfenausscheidung**).

Die Annahme dass die Höhe der Frostlinie mit den Kühlluftigenschaften in Zusammenhang stehen, wurde in den Empfehlungen (7.10) schon gut begründet (möglicher Zusammenhang **Frostliniendistanz - Kühlluft Eigenschaft**).

Die Folie steht entlang der Bahn unter einer konstanten Spannung, die mit einer Spannkraft aufgebracht wird. Da die Folie nach dem ersten Vorabzug noch einigermaßen „warm“ ist, kann die Annahme getroffen werden, dass die Folie in der Dicke gleichmäßiger ist (möglicher Zusammenhang Spannkraft - Dickengleichmäßigkeit). Als letzte Annahme für eine Überprüfung betrifft Temperaturdifferenzen. Die Folie kühlt sich nach dem Abzug kontinuierlich ab, bis sie im Reckwerk auf Walze 1 trifft und rasch die Temperatur erhöhen soll (Kapitel 3.3.6). Dieser Temperaturschock bekommt der Folie womöglich nicht gut. So kann die Annahme getroffen werden, dass ein Zusammenhang zwischen der Temperaturdifferenz der Folie zu Walze 1 im Reckwerk zur Laufsicherheit existiert (möglicher Zusammenhang **Temperaturdifferenz - runability**).

## 7.16 Zusammenfassung der Empfehlungen

Die Bewertung nach Aussagekraft sind auf Basis der während der Diplomarbeit gemachten Erfahrungen wie folgt beurteilt. Die folgende Tabelle gibt die Empfehlung ab, in welcher Reihenfolge der nach Ansicht des Autors größte Nutzen zu erwarten ist. Die Einteilung ist bei der Machbarkeit in einfach, mittel und schwer unterteilt. Bei der Priorität ist die Einteilung hoch, mittel und niedrig.

**Tabelle 7.3:** Analyse der möglichen Maßnahmen

Kapitel	Maßnahme	Machbarkeit	Priorität <sup>22</sup>
7.2	Wareneingangskontrolle	schwierig	hoch
7.3	Datensätze je Oktabin ermitteln	schwierig	hoch
7.4	Aufzeichnungen der eingesetzten Oktabins	einfach	hoch
7.5	Aufzeichnung Anlageneinstellungen	einfach	hoch
7.6	Aufzeichnungen der Umgebungsbedingungen	einfach	hoch
7.7	Online-WDD Messung	schwierig	mittel
7.8	Dickenmessung der Rohfolie	mittel	mittel
7.9	Neuronale Netze als Datensammler	schwierig	mittel
7.10	Kühlluftaufbereitung	schwierig	hoch
7.11	Walzendurchmesser erhöhen	mittel	niedrig
7.12	Stick-Slip Effekt	mittel	niedrig
7.13	Luftzufuhr in Walze N abdrehen	einfach	niedrig
7.14	Wärmezufuhr zwischen Abzug und Reckwerk	mittel	niedrig

Empfehlenswert sind alle Maßnahmen, die eine relative einfache Umsetzung ermöglichen und dabei aber hohe Priorität haben. Daher sind die Aufzeichnungen der betrieblichen Daten ein relativ effektives Instrument um Fehler zu vermeiden und Informationsgewinnung betreiben zu können. Es sind dabei die Kapitel 7.4, 7.5 und 7.6 erwähnt. Gleichzeitig darf man sich von der Umsetzung von Kapitel 7.10 einen sehr großen Nutzen erwarten. In der Literatur werden Anlagen beschrieben, die den Abkühlvorgang mit einem Wasserbad durchführen, womit die Frostlinie eindeutig definiert wird und bekannt ist. Die gleichmäßige Höhe der Frostlinie scheint ein sehr bestimmendes Thema zu sein. Es mag Gründe geben, warum keine Abkühlung mit Wasser erfolgt. Die Schwankungen der thermodynamischen Eigenschaften der Kühlluft sind aber ein Thema das in der Literatur bekannt ist.

<sup>22</sup>Informationsgewinn bzw. Nutzen

# 8 Verwendete Software

Für die statistischen Auswertungen wurde das Softwarepaket Minitab von Minitab Solutions in der Version 16.0.1 in der englischen Fassung verwendet. Die Korrelation wurde mit der Menüfolge *Stat - Basic Statistics - Correlation* (Abbildung 8.1) aufgerufen und in der Folge die Werte den Variablen zugeordnet.

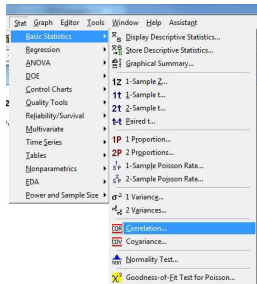


Abbildung 8.1: Korrelation

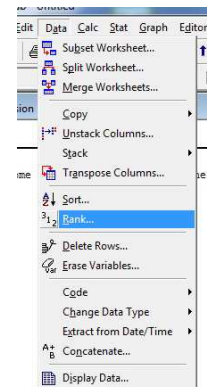


Abbildung 8.2: Rang

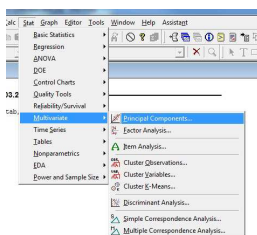


Abbildung 8.3: PCA

Bezüglich der Rangkorrelation wurden die Daten vorab mit der Menüfolge *Data - Rank* (Abbildung 8.2) in den entsprechenden Rang gebracht und dann die Korrelation darauf angewandt. Die PCA wurde mit der Menüfolge *Stat - Multivariate - Principal Components* (Abbildung 8.3) durchgeführt. Die statischen Ergebnisse in Bildform wurden über die integrierte Exportfunktion erzeugt. Die Anlagendarstellung wurde durch das  $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  Packet *pstricks* generiert. Einfachere Berechnungen wurden in *Microsoft Excel 2010* gelöst.

## 9 Zusammenfassung

Blasfolienextrusionsanlagen sind in der Industrie heute nicht mehr wegzudenken. Sie werden für die Verarbeitung von polymerer Rohstoffe gebaut und zum Einsatz gebracht. Man ist stets bestrebt, Anlagenteile oder Komponenten zu verbessern und damit den Ausstoß zu erhöhen oder den Ausschuss zu minimieren. Da die Entwicklung mitte der 40er Jahre des letzten Jahrhunderts begann und auch die EDV wesentliche Beiträge dazu geliefert hat die Anlagenkomponenten zu optimieren, ist man mittlerweile auf einem relativ hohem Level angelagt. Es ist nicht mehr nur ein bestimmender Faktor, der einen großen Sprung erlaubt. Viele kleine Schritte müssen gegangen werden um sich weiter verbessern zu können.

Die Zielsetzung bei dieser Arbeit war, ein Gesamtmodell der Anlage zu erstellen und durch dieses Modell jene Anlagenparameter zu identifizieren, die den größten Einfluss auf die Produktqualität haben. Dazu wurden verschiedene Modellarten kurz vorgestellt, die bei bei Automatisierungsaufgaben zur Anwendung kommen. So wurde dargelegt, auf welchem Weg die theoretische Modellbildung funktioniert und was es mit dem black-box Modell und dem bright grey-box Modell auf sich hat. Das letztgenannte kommt im Modellbildungsabschnitt zur Anwendung. Aufgrund der zur Verfügung stehenden Information und der Komplexität des Gesamtprozesses war es nicht zielführend möglich, ein Gesamtmodell zu erstellen.

Die statistische Auswertung von Daten über Korrelations- und der Hauptkomponentenanalyse ist letztendlich der Teil, dem bezogen auf den Rohstoffe wesentliche Aufmerksamkeit zuteil wurde. Verteilungsanalysen sind elementar für die darauf aufbauenden Erkenntnisse. Weiters wurde versucht über eine Hauptkomponentenanalyse den Informationsgehalt von Rohstoff und Produkt zu beschreiben. Der Versuch Rohstoff- und Produktäquivalentdaten zu ermitteln führt leider nicht zum gewünschten Erfolg. Eventuelle Prozessauffälligkeiten konnten nur Ausschnittsweise betrachtet werden.



Aufgrund der Prozessanalyse und der vorläufigen Ergebnisse im Bereich der Modellbildung und der Statistik wurde eine Reihe von Vorschlägen gemacht, wie eine Chance besteht, die Datenqualität für weitere Analysen zu erhöhen. Die Überlegungen basieren auf den Gesetzen der Fehlerfortpflanzung. Die entsprechenden Verbesserungspunkte beziehen sich sowohl auf die direkte Beeinflussung des Herstellungsprozesses der Folie als auch auf die Erhöhung der Datenqualität und Datenkonsistenz.

Dies umfasst den maschinenbaulichen Aspekt ebenso, wie verfahrenstechnische Überlegungen. Trotz der empfohlenen Punkte bleibt es nach individuelle Kriterien festgelegte Beurteilung des Nutzens. In einem technischen Prozess dieser Art ist aufgrund des (teilweise) stochastischen Verhaltens der Beweis der Wirksamkeit einer durchgeführten Maßnahme schwer oder unmöglich zu führen. Es läuft in so einem Fall darauf hinaus, sich auf die bisherigen und zukünftigen Erkenntnisse von Wissenschaft und Forschung zu verlassen.

# EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzen Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

.....  
(Unterschrift)

# Literaturverzeichnis

- [AFK00] Albrecht, W., Fuchs, H. und Kittelmann, W. *Vliesstoffe - Rohstoffe, Herstellung, Anwendung, Eigenschaften, Prüfung*. WILEY-VCH Verlag GmbH, 2000.
- [Bae61] Baehr, D.-I. D. *Mollier-i,x-Diagramme für feuchte Luft in den Einheiten des Internationalen Einheitensystems*, Band 1. Springer Verlag, 1961.
- [Bar89] Barnes, H. A. *An Introduction to Rheology (Annals of Discrete Mathematics)*. Elsevier Science Ltd, 1989.
- [Bar04] Bartsch, H.-J. *Taschenbuch mathematischer Formeln*. Hanser Fachbuchverlag, 20 Auflage, 2004.
- [BC89] Bird, R. B. und Curtiss, C. F. *Dynamics of Polymeric Liquids, Kinetic Theory: 2*. John Wiley & Sons, 1989.
- [Böc06] von Böckh, P. *Wärmeübertragung - Grundlagen und Praxis*. Springer Verlag, 2 Auflage, 2006.
- [Bög06] Böge, A. *Technische Mechanik*. Vieweg, 27 Auflage, 2006.
- [Böh97] Böhme, G. *Strömungsmechanik nicht-newtonscher Fluide*. Teubner Verlag, 1997.
- [BHA87] Bird, R. B., Hassager, O. und Armstrong, R. *Dynamics of Polymeric Liquids, Fluid Mechanics: 1*. John Wiley & Sons, 1987.
- [Bil99] Bilodeau, M. *Theory of Multivariate Statistics*. Springer Verlag, 1999.
- [BJ09] Breitmaier, E. und Jung, G. *Organische Chemie*. Georg Thieme Verlag, 6 Auflage, 2009.

- [BS10] Baehr, H. D. und Stephan, K. *Wärme- und Stoffübertragung*. Springer Verlag, 7 Auflage, 2010.
- [Bur06] Burmann, G. *Extrusionswerkzeuge für die Schlauchextrusion*, 02 2006. ETA Kunststofftechnologie GmbH.
- [CH10] Czichos, H. und Habig, K.-H. *Tribologie Handbuch*. Vieweg-Teubner Verlag, 3 Auflage, 2010.
- [Chr10] Christen, D. S. *Praxiswissen der chemischen Verfahrenstechnik - Handbuch für Chemiker und Verfahrenstechniker*. Springer, 2 Auflage, 2010.
- [Cre08] Cretu, M. *Analyse, Auslegung und Optimierung von Wendelverteilersystemen*. Doktorarbeit, Institut für Kunststofftechnik der Universität Stuttgart, 2008.
- [DL06] Dealy, J. M. und Larson, R. G. *Structure and Rheology of Molten Polymers: From Structure to Flow Behavior and Back Again*. Hanser Gardner Publ, 2006.
- [Dom07] Domininghaus, H. *Kunststoffe - Eigenschaften und Anwendungen*. Springer Verlag, 7 Auflage, 2007.
- [Dub99] Dubbel, H. *Dubbel*. Springer, 22 Auflage, 1999.
- [Eli03] Elias, H.-G. *Makromoleküle - Anwendungen*. 4. WILEY-VCH Verlag GmbH, 6 Auflage, 2003.
- [Eyk74] Eykhoff, P. *System Identification: Parameter and State Estimation*. John Wiley & Sons Ltd, 1974.
- [Fah07] Fahrmeir, L. *Statistik*. Springer Verlag, 6 Auflage, 2007.
- [Fis35] Fischer, K. *Angewandte Chemie*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1935.
- [Fis01a] Fischer, P. *Modernisierung von Extruder und Blasfolienanlagen Chancen für einen Technologiesprung*. *Plastverarbeiter*, 5:58–60, 2001.
- [Fis01b] Fischer, P. *Werkzeuge für Mehrschichtrohre*. *Kunststoffe* 91, 8:142–145, 2001.
- [FS87] Feistkorn, W. und Sensen, K. *Automatik-Schlauchfolienwerkzeug insbesondere für Fein- und Kaschierfolien*. *Kunststoffe* 77, 5:472–474, 1987.

- [Gab98] Gabriele, M. *Internal Bubble Cooling boosts Film Productivity. Modern Plastics International*, 28:65, 1998.
- [GT05] Günther, H.-O. und Tempelmeier, H. *Produktion und Logistik*. Springer Verlag, 2005.
- [Han81] Han, C. D. *Multiphase Flow in Polymer Processing*. Academic Press Inc, 1981.
- [Han07a] Han, C. D. *Rheology and Processing of Polymeric Materials*, Band 1. Oxford University Press, 1 Auflage, 2007.
- [Han07b] Han, C. D. *Rheology and Processing of Polymeric Materials*, Band 2. Oxford University Press, 2007.
- [Har89] Hartung, J. *Statistik*. Oldenbourg, 7 Auflage, 1989.
- [HE86] Hartung, J. und Elpelt, B. *Multivariate Statistik*. Oldenbourg, 2 Auflage, 1986.
- [Hor99] Hornsby, P. R. *Rheology, Compounding and Processing of Filled Thermoplastics*. Brunel University, Uxbridge, UB8 3PH, UK - Department of Materials Engineering, 1999.
- [HS03] Härdle, W. K. und Simar, L. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Springer Verlag, 2003.
- [HS06] Hermann Schlichting, K. G. *Grenzschicht-Theorie*. Springer Berlin Heidelberg, 10 Auflage, 2006.
- [Ise08] Isermann, R. *Mechatronische Systeme*. Springer, 2 Auflage, 2008.
- [Ise10] Isermann, R. *Identification of Dynamic Systems*. Springer Verlag, 2010.
- [IWG66] III, G. N. F., Waldman, N. und Griskey, R. G. *Pressure-volume-temperature behavior of polypropylene. Polymer Engineering & Science*, 6:131–134, 1966.
- [Kan06] Kantor, K. *Blown Film Extrusion - An Introduction*. Hanser Verlag, 2006.
- [Kel00] Keller, H. *Maschinelle Intelligenz*. Vieweg-Verlag, 2000.
- [Küm07] Kümmel, P. D.-I. W. *Technische Strömungsmechanik - Theorie und Praxis*. B.V. Teubner Verlag, 3 Auflage, 2007.

- [Kre81] Kress, G. *Einfluß von Kühlbedingungen und anorganischen Zusätzen auf die mechanischen Eigenschaften von Polypropylen- Schlauchfolien*. Doktorarbeit, Ruhr-Universität Bochum, 1981.
- [Kre10] Krebs, M. *Rheologische Untersuchungen zur Temperatur- und Druckabhängigkeit von ein- und zweiphasigen Thermoplasten*. Doktorarbeit, Universität Kassel, 2010.
- [Kuh06] Kuhne. *Präsentation Kuhne Maximizer LN Lang-Hals Fahrweise bei LD / LL Folien Long Neck for LD / LL Films*, 01 2006.
- [Leo73] Leonhard, W. *Statistische Analyse linearer Regelsysteme*. Teubner-Verlag, 1973.
- [Lid09] Lide, D. R. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. David R. Lide, 90 Auflage, 2009.
- [Lie03] Lienhard, J. H. *A Heat Transfer Textbook*. Plogiston Press, 3 Auflage, 2003.
- [Lj11] Laurien, E. und jr., H. O. *Numerische Strömungsmechanik*. Vieweg-Teubner Verlag, 4 Auflage, 2011.
- [LS85] Ljung, L. und Soderstrom, T. *Theory and Practice of Recursive Identification (Signal Processing, Optimization, and Control)*. The MIT Press, 1985.
- [Lun03] Lunze, J. *Automatisierungstechnik*. Oldenbourg Wissensch, 2 Auflage, 2003.
- [Mac95] Macosko, C. W. *RHEOLOGY Principles Measurements and Applications*. WILEY-VCH Verlag GmbH, 1995.
- [Mat07] Mattes, K. *Methoden zur Charakterisierung des nichtlinear viskoelastischen Verhaltens von Polymerschmelzen*. Doktorarbeit, Universität Freiburg, 2007.
- [MAY05] MAYAVARAM, R. S. *Modeling and Simulation of Film Blowing Process*. Doktorarbeit, Indian Institute of Technology, Bharathiar University, 2005.
- [MCSB03] Muke, S., Connell, H., Sbarski, I. und Bhattacharya, S. *Numerical modeling and experimental verification of blown film processing*. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 116(1):113 – 138, 2003. ISSN 0377-0257.
- [Mic03] Michaeli, W. *Extrusionwerkzeuge*. Carl Hanser Verlag München Wien, 2003.

- [Mil59] Mill, C. *Rheology of disperse systems. Journal of Polymer Science*, 47:537–538, 1959.
- [MM03] Massey, L. und Massey, B. *Permeability Properties of Plastics and Elastomers*. William Andrew Inc, 2 Auflage, 2003.
- [Mün06] Münz, E. *Identifikation und Diagnose hybrider dynamischer Systeme*. KIT Scientific Publishing (19. Juni 2006), 2006.
- [MS00] M. Schäfer, R. S. I. T., S. Meynen. *Efficiency of multigrid methods for the numerical simulation of coupled fluid-solid problems. International Workshop on Scientific Computing and Applications*, 2000.
- [Nen94] Nentwig, J. *Kunststoff Folien Herstellung - Eigenschaften - Anwendung*. Carl Hanser Verlag München Wien, 1 Auflage, 1994.
- [New22] Newton, I. *Principia Mathematica Philosophiae Naturalis*. The MIT Press, 1822.
- [Oes07] Oestreich, R. *Gekoppelte numerische Simulationen fluid-, thermo- und elektrodynamischer Prozesse*. Doktorarbeit, Technischen Universität Darmstadt, 2007.
- [Ohl04] Ohlendorf, F. *Vorhersage der mechanischen Folieneigenschaften bei der Schlauchfolienextrusion*. Doktorarbeit, Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Hochschule Aachen, 2004.
- [Pae06] Paetz, J. *Soft Computing in der Bioinformatik Eine grundlegende Einführung und Übersicht*. Springer Verlag, 2006.
- [PE08] Peter Eyerer, P. E., Thomas Hirth. *Polymer Engineering Technologien und Praxis*. Springer, 2008.
- [Pfl02] Pflaumbaum, M. *Rheologische Untersuchungen an viskoelastischen Tensid-systemen*. Doktorarbeit, Universität Essen, 2002.
- [PHMN11] Pernkopf, F., Häusler, S., Meissner, P. und Neumann, G. *Computational Intelligence*. Digital, Oktober 2011.
- [Pia96] Piau, J.-M. *Rheology for Polymer Melt Processing*. Elsevier Science Ltd, 1996.
- [Pla11] Plasticker. *Animation über Blasfolienextrusion*. Digital, 11 2011.

- [Pop09] Popov, V. *Kontaktmechanik und Reibung*. Springer Verlag, 2009.
- [Pot89] Potente, F. H. W. K. H., Herausgeber. *Handbuch der Kunststoff-Extrusionstechnik*. Hanser Fachbuch, 1989.
- [RC03] Rubinstein, M. und Colby, R. H. *Polymer Physics*. Oxford University Press, 2003.
- [Rei04] Reifenhäuser. *Abzugsvorrichtung einer Schlauchfolienextrusionsanlage und Verfahren zur Herstellung einer Schlauchfolienbahn aus Kunststoff*, 2004.
- [SC95] Schroeter, B. und Caspar, G. *Querprofilverbesserungen bei Schlauchfolien*. *Kunststoffe* 85, 3:359–362, 1995.
- [Sch55] Schenkel, G. *Entwicklung und Erfahrungen in der Herstellung von Blasfolien*. *Plastica* 8(8), 1955.
- [Sch95] Schmitz, G. J. *Experimentelle Analyse und numerische Modellierung der Deformationsvorgänge bei der Schlauchfolienextrusion*. Doktorarbeit, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1995.
- [Sch08] Schneider, W. *Praktische Regelungstechnik*. Vieweg-Teubner Verlag, 3 Auflage, 2008.
- [Sch09] von Scheven, M. *Effiziente Algorithmen für die Fluid-Struktur-Wechselwirkung*. Doktorarbeit, Malte von Scheven, 2009.
- [She96] Shenoy, A. V. *Thermoplastic Melt Rheology And Processing*. Marcel Dekker Inc, 1 Auflage, 1996.
- [Sie02] Sieber, R. *Numerische Simulation technischer Strömungen mit Fluid-Struktur-Kopplung*. Doktorarbeit, Technischen Universität Darmstadt, Oktober 2002.
- [Sig08] Sigloch, H. *Technische Fluidmechanik*. Springer, 6 Auflage, 2008.
- [Son81] Sonntag, D. *Sättigungsdampfdruck- und Sättigungsdampfdichtetafeln für Wasser und Eis : mit 21 Tab.* Leipzig : Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1981.
- [Str75] Strobel, H. *Experimentelle Systemanalyse*. Akademie-Verlag, 1975.



- [Szp11] Szpiro, G. G. *Die Keplersche Vermutung: Wie Mathematiker ein 400 Jahre altes Rätsel lösten*. Springer Verlag, 2011.
- [Tad10] Tadros, T. F. *Rheology of Dispersions: Principles and Applications*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010.
- [Thu47] Thurstone, L. L. *Multiple-factor Analysis*. University of Chicago Press, 1947.
- [Tru09] Truckenbrodt, E. *Fluidmechanik - Band 2: Elementare Strömungsvorgänge dichteänderlicher Fluide sowie Potential und Grenzschichtströmungen*. Springer, 4 Auflage, 2009.
- [TW98] Tanner, R. I. und Walters, K. *Rheology: An Historical Perspective (Studies in Physical and Theoretical Chemistry)*. Elsevier Science Ltd, 1998.
- [Unb07] Unbehauen, H. *Regelungstechnik II - Zustandsregelungen, digitale und nicht-lineare Regelsysteme*. Vieweg Verlag, 9 Auflage, 2007.
- [Unb08] Unbehauen, H. *Regelungstechnik I Klassische Verfahren zur Analyse und Synthese linearer kontinuierlicher Regelsysteme, Fuzzy-Regelsysteme*. Vieweg-Teubner Verlag, 15 Auflage, 2008.
- [VDI06] VDI. *VDI Wärmeatlas*. Springer Verlag, 10 Auflage, 2006.
- [Wol96] Wolf, D. *Analyse von Kühlluftsystemen zur Kühlleistungssteigerung und Verbesserung der Folienqualität bei der Herstellung von Blasfolien*. Doktorarbeit, Maschinentchnik der Universität - Gesamthochschule Essen, 1996.
- [WVS99] Wood, P. E., Vlachopoulos, J. und Sidiropoulos, V. *The Aerodynamics of Cooling of Blown Film Bubbles*. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 18:529–538, April 1999.
- [You84] Young, P. C. *Recursive estimation and time-series analysis*. Springer Verlag, 2 Auflage, 1984.
- [Zlo05] Zlokarnik, M. *Scale-Up Modellübertragung in der Verfahrenstechnik - Modellübertragung in der Verfahrenstechnik*. WILEY-VCH Verlag GmbH, 2005.

# Normen und Prüfanweisungen

- [AD70] ASTM-D1238. *ASTM D1238 - 04c Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer*, 1970.
- [DIN71] DIN-66201. *Prozeßrechensysteme Begriffe*, 1971.
- [DIN76] DIN-51563. *Bestimmung des Viskosität-Temperatur-Verhalten*, 1976.
- [DIN88] DIN-53163. *Prüfung von Pigmenten und Füllstoffen; Bestimmung der Helligkeit von Füllstoff- und Weißpigment-Pulvern*, 1988.
- [DIN94] DIN-13343. *Linear-viskoelastische Stoffe*, 1994.
- [DIN01] DIN-53122-1. *Prüfung von Kunststoff-Folien, Elastomerfolien, Papier, Pappe und anderen Flächengebilden - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit - Teil 1: Gravimetrisches Verfahren*, 2001.
- [DIN03a] DIN-1342-1. *Viskosität Teil 1: Rheologische Begriffe*, 2003.
- [DIN03b] DIN-1342-2. *Viskosität Teil 2: Newtonsche Flüssigkeiten*, 2003.
- [DIN03c] DIN-1342-3. *Viskosität Teil 3: Nicht-newtonsche Flüssigkeiten*, 2003.
- [DIN05] DIN-1133. *Kunststoffe - Bestimmung der Schmelze-Massefließrate (MFR) und der Schmelze-Volumenfließrate (MVR) von Thermoplasten (ISO 1133:2005); Deutsche Fassung EN ISO 1133:2005*, 2005.
- [DIN07] DIN-6174. *Farbmetrische Bestimmung von Farbmaßzahlen und Farbabständen im angenähert gleichförmigen CIELAB-Farbenraum*, 2007.
- [EI95] EN-ISO-787-2. *Allgemeine Prüfverfahren für Pigmente und Füllstoffe - Teil 2: Bestimmung der bei 105 °C flüchtigen Anteile (ISO 787-2:1981); Deutsche Fassung EN ISO 787-2:1995*, 1995.

- [EI96] EN-ISO-527-1. *Bestimmung der Zugeigenschaften Teil 1: Allgemeine Grundsätze ISO 527-1 : 1993 einschließlich Corr 1: 1994*, 1996.
- [EI12] EN-ISO-11664-4. *Colorimetry – Part 4: CIE 1976 L\*a\*b\* Colour space*, 2012.
- [ENI98] ENISO60. *Bestimmung der scheinbare Dichte von Formmassen, die durch einen genormten Trichter abfließen können (Schüttdichte)*, 1998.
- [ISO] ISO-15512. *Kunststoffe - Bestimmung des Wassergehaltes*.
- [ISO81] ISO-787-11. *Allgemeine Prüfverfahren für Pigmente und Füllstoffe - Teil 11: Bestimmung des Stampfvolumens und der Stampfdichte (ISO 787-11:1981)*, 1981.
- [ISO95] ISO-787-5. *Allgemeine Prüfverfahren für Pigmente und Füllstoffe - Teil 5: Bestimmung der Ölzahl (ISO 787-5:1980); Deutsche Fassung EN ISO 787-5:1995*, 1995.
- [ISO96a] ISO-6946. *Wärmedurchlaßwiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient Berechnungsverfahren*, 1996.
- [ISO96b] ISO-9346. *Stofftransport - Physikalische Größen und Definitionen*, 1996.
- [ISO07] ISO-2469. *Papier, Pappe und Faserstoff - Bestimmung des Reflexionsfaktors*, 2007.
- [ISO08] ISO-787-7. *Allgemeine Prüfverfahren für Pigmente und Füllstoffe - Teil 7: Bestimmung des Siebrückstandes - Wasserverfahren - Handspülverfahren (ISO/DIS 787-7:2008); Deutsche Fassung EN ISO 787-7:2008*, 2008.
- [LP07a] Lenzing-Plastics, Herausgeber. *Prüfanweisung PA0296 Wasserdruckprüfung*. 2007.
- [LP07b] Lenzing-Plastics, Herausgeber. *Prüfanweisung PA0495 Wasserdampfdurchlässigkeit*. 2007.
- [LP07c] Lenzing-Plastics, Herausgeber. *Prüfanweisung PA0594 Flächengewicht, Ronde*. 2007.
- [LP07d] Lenzing-Plastics, Herausgeber. *Prüfanweisung PA1994 Reißfestigkeit, Reißdehnung*. 2007.
- [LP07e] Lenzing-Plastics, Herausgeber. *Prüfanweisung PA3694 Dicke*. 2007.

- [LP07f] Lenzing-Plastics, Herausgeber. *Prüfanweisung PA4094 Flächenschrumpf*. 2007.
- [LP07g] Lenzing-Plastics, Herausgeber. *Prüfanweisung PA6094 Breite*. 2007.
- [LP09] Lenzing-Plastics, Herausgeber. *Prüfplan Membran PP Micro (DO atmungsaktiv)*. 2009.

# Anlagendokumentationen

- [Dec] Decatex. *Wendestangenabzug Technische Dokumentation ADR.*
- [Dyn] Dynisco. *Dynisco Process Improvement for the plastic industry Dyna 4 OEM Massedruckaufnehmer.*
- [Ebe09] Ebelsberger, P. *Farbmessprotokoll - Besteht ein Zusammenhang von Wasserdampfdurchlässigkeit und Lichtdurchlässigkeit?*, Juni 2009. Beschreibt im Protokoll die Versuchsanordnung und Durchführung bei der Messung von Folienabschnitte des Endproduktes hinsichtlich des Farbraums mit der Zusammenführung der Wasserdampfdurchlässigkeit. (unveröffentlicht).
- [GC03] Gabriel-Chemie. *MAXITHEN PP 79021/20UV*, 04 2003. Technisches Datenblatt - Lichtschutz-Masterbatch für Polypropylen (unveröffentlicht).
- [Gmb] GmbH, L. P. *Einsatz der Rohstoffmenge.* Differenz zwischen gelieferte Rohstoffmenge und eingesetzter Rohstoffmenge.
- [Gmb09a] GmbH, B. L. P. *Dickenmessung Rohfolie*, 08 2009. Verlauf der Dicke über die Breite.
- [Gmb09b] GmbH, F. L. P. *2009*, 08 2009. Besprechungsnotiz über die Durchführung von Versuchung an der Produktionsanlage.
- [Gmb09c] GmbH, K. L. P. *Laborprüfung Spannungsverlauf*, 10 2009. Prüfung über die Zugfestigkeit einer Produktionsprobe.
- [Hosa] Hosokawa. *Betriebsanleitung Kühlturm IBC WZ 250 -> 300.*
- [Hosb] Hosokawa. *Extruder-Blaskopf-Anschluss HX 90 / 0° mit Xaloy Siebwechsler.*
- [Hosc] Hosokawa. *Extruderschnecke komplett HS 90-30D LD.*
- [Hosd] Hosokawa. *Manual Folienrekanlage MDO 20-03/11.*

- [Hose] Hosokawa. *Manual Ultraschall-Blasendurchmesser-Regelung/ 3-Sensor*.
- [Hosf] Hosokawa. *Stationär-Extruder HX 90S-30D direkt-U*.
- [Hos08a] Hosokawa. *Betriebsanleitung BA 367257 D Hochleistungskühlring CRP 50*, 2008.
- [Hos08b] Hosokawa, A. A. *Betriebsanleitung BA 305600D Folienblaskopf BF 10-25 K2*, 2008.
- [Kün06] Kündig. *Installations-und Konfigurationsanleitung ECOprofilger "Variospeed"Kündig Control Systems*. Joweid Zentrum 11, CH-8630 Rüti ZH, Schweiz, 2006.
- [Kol] Kolb. *Bedienungsanleitung Wickler*.
- [PC08] Plast-Controll. *PLASTCONTROL System Dokumentation Prozessmodul LIO*, 2008.
- [PMA] PMA. *Bedienungsanleitung PMA Prozeß- und Maschinen-Automation GmbH Multi-Temperaturregler KS800*.
- [Tec70] TechReport, O. *Technical Information Plastics R4-02*, 1970. (unveröffentlicht).
- [Unv] Unveröffentlicht. *Polypropylenspezifikation 1*. Polypropylenspezifikation eines Rohstoffbestandteils.
- [Zwi00] Zwick. *Zwick Betriebsanleitung, Technisches Handbuch für die Material-Prüfmaschine*. Zwick GmbH & Co Technische Dokumentation August-Nagel-Straße 11 D-89079 Ulm, 2000.

# A Anhang

## A.1 Kreidebeschreibung

Die verschiedenen Kreidetypen kommen im compoundierten Rohstoff zum Einsatz. Hier werden zwei Kreidetypen herausgestellt.

**Tabelle A.1:** Kreidetypen 728b & 753

Gegenüberstellung der Kreidetypen		
	OMYAFILM 753	OMYAFILM 728b
<b>Chemische Eigenschaften:</b>		
CaCO <sub>3</sub>	98%	97.5%
MgCO <sub>3</sub>	1.5%	2.0 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03%	0.03 %
HCl-unlöslich	0.3%	0.3 %
<b>Feinheit:</b>		
Siebrückstand 45 µm (ISO 787/7)	0.002%	0.01 %
Siebrückstand 20 µm (ISO 787/7)	0.006%	-
Oberer Schnitt (d98%)	5 µm	8 µm
Mittlerer Teilchendurchmesser (d50%)	1.7 µm	1.7 µm
Teilchenanteil < 2 µm	-	57%
<b>Weissgrad:</b>		
Helligkeit (Ry, C/2°, DIN 53163)	94%	95 %
Tappi-Weissgrad (R457, ISO 2469)	-	94.5%
Helligkeit CIE L*, a*, b* (DIN 6174)	97.5/0.18/1.35	-
Feuchtigkeit ab Werk (ISO 787/2)	0.1%	0.3 %
Stampfdichte (ISO 787/11)	1.1 g/ml	1.1 g/ml
DOP Zahl (ISO 787/5)	-	20 g/100g

## A.2 Werkprüfzeugnis



18. Juni 2009

### WERKSPRÜFZEUGNIS

nach EN 10204 3.1 B

Produktbezeichnung: - Filmcompound PPC  
Artikelnummer: 22030130-MIC  
Ihre Bestellnummer: 900126 - 3. Abruf RV003/0051/46004648  
Ch.-Nr.: 2009030030 / 0128

#### Physikalisch-mechanische Prüfung:

Prüfung	Prüfmethode	Einheit	Wert
MFR (230°C/2,16kg)	ISO 1133	g/10 min	1,7
Glührückstand (650°C)	EN 60	%	58,5
Restfeuchte, äußere (110°C, IR Trockner)	angelehnt an DIN EN ISO 585	%	0,14
Wassergehalt (Karl-Fischer)	DIN EN ISO 15 512	ppm	136
Dichte	DIN EN ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	1,47
Schüttdichte	EN ISO 60	kg/l	0,84

Vorstehende Angaben sind Ergebnisse unserer Qualitätsprüfung und entbinden den Käufer nicht von einer Eingangsprüfung. Für Schäden durch kundenseitige Veränderung der Materialzusammensetzung (z.B. Abmischungen) ohne vorherige Rücksprache übernehmen wir keine Haftung. Dieses Zertifikat wurde durch EDV erstellt und trägt keine Unterschrift.

Abbildung 1.1: Beispiel eines Werkprüfzeugnis



## A.3 Historische Entwicklungen in der Rheologie

Dieser historische Abriss beschreibt die Entwicklungsgeschichte im Bereich der Rohstoffanalyse von polymeren Werkstoffen und die verschiedenen Lösungsansätze [TW98]. Aufgrund

**Tabelle A.2:** Literatur Rheology nach 1929

#	Area oft activity	representative works
1	Constitutive-equations	a) Differential models Oldroyd(1950), Truesdell (1952), Rivlin and Ericksen (1955), Giesekus (1962), White-Metzner (1963)
		b)Integral models Green & Rivlin (1975), Coleman & Noll (1961)
		c)Network models Green & Tobolsky (1946), Lodge (1956), Yamamoto (1956), Kaye (1962) - Bernstein et al. (1963)
		d)Reptationmodels Edwards (1967), De Gennes (1971), Doi & Edwards (1978, 1986)
		e)Molecularmodels Kuhn (1934), Rouse (1963), Zimm (1956), Kirkwood (1967), Bird et al. (1987)
2	Experimental advances and rheological descriptions	a) Shear flows and the no-slip boundary condition Eisenschitz et al. (1929), Mooney (1931,1936), Schofield & Blair (1930), Pearson & Petrie (1968), Graessley (1977), Ramamurthy (1986)
		b) Normal stress and rod-climbing effects Lander (1945), Weissenbeg (1947), Markowitz (1957), Philippoff (1957), Ginn & Metzner (1969), Binnigton & Boger (1985)
		c) Dynamic studies Eisenschitz & Philippoff (1933), Schofield & Scott Blair (1932), Leaderman (1943), Cox-Merz (1958), Doariswamy et al. (1991)
		d) Thixotropy Freundlich & Bircumshaw (1926), Cheng & Evans (1965), Mewis (1979), Barnes (1997)
		e) Flow Instabilities Nason (1945), Tordella (1958), Petie & Denn (1976), Bousfield et al. (1986)
		f) Turbulent drag reduction Toms (1949), A goston et al. (1954), Hershey & Zakin (1967), Seyer & Metzner (1967)
		g) Optical studies/birefringence Adams et al. (1965), Carothers & Hill (1932), Hermans & Platzek (1939), Janeschitz-Kriegl (1983), Fuller (1985)
		h) Time-temp. superposition Williams et al. (1955), Ferry (1970)
		i) Extensional behavior Merrington (1943), Treolar (1944), Ballman (1965), Cogswell (1969), Metzner (1968), Meissner (1969), Dealy et al. (1976), Spearot & Metzner (1972), Laun & Munstedt (1978), Sridhar & Gupta (1985)
3	Advanced materials	a) LCPs Leslie (1968)-Ericksen (1961), Doi (1981), Wissbrun (1985), Doraiswamy & Metzner (1986), Marrucci & Greco (1992)
		b) Composites and tho-phase systems Taylor (1934), Krieger-Dougherty (1959), Rumscheidt & Mason (1961), Leal (1975), Batchelor (1977), Folgar & Tucker (1984), Heller & Kuntamukkula (1987), Khan & Armstrong (1986), Acrivos & Shapfeh (1988), Mewis et al. (1989), Dennis et al. (2001)
		c) ER/MR fluids Winslow (1949), Parthasarty & Klingenberg (1996)
4	Computational rheology	a) Continuum simulations Turner at al. (1956), Gottlieb & Orzag )(1977), Cruse & Risso (1968), Yoo & Joseph (1985), Beris et al. (1987), Walters & Tanner (1992), Crochet & Walters (1993)
		b) Molecular dynamic simulations Adler & Wainright (1957), Ashurst & Hoover (1975), Evans & Morriss (1988), Davis & Todd (1998)

dieser Übersicht wird klar, dass es sich um ein äußerst schwieriges Feld der Technik handelt. Die Übersicht ist in 4 Abschnitte unterteilt, 1 Konstitutivgleichungen verschiedener Art, experimentelle Rohstoffbeschreibungen, weiterentwickelte Rohstoffmaterialien und EDV gestützte Rohstoffanalyse. Die Arbeiten von Barnes (2d), Bird et al (1e) werden

aber auch im Rahmen der Arbeit zitiert. Es sind die aktuelleren Arbeiten und die entsprechenden Grundgleichungen der Strömungen sind letztendlich in allen Arbeiten elementare Grundlage weiterer Überlegungen.

## A.4 Fehlerkorrektur

Die entsprechenden Rohdaten in der Datei 2905-04111.csv werden gemäß der nachfolgenden Tabelle A.3 korrigiert und in der Datei 2905-04111.xls zur Auswertung abgelegt.

**Tabelle A.3:** Fehlertabelle in Prozessdaten

Nummer	Fehlerursache	korrigiert
1	M3_Durchsatz_gesamt_SOLL und M3_Durchsatz_gesamt_IST vertauscht	ja
2	M3_Abzugsgeschwindigkeit_SOLL und M3_Abzugsgeschwindigkeit_IST vertauscht	ja
3	M3_Dos_Hauptkomponente_Anteil_SOLL und M3_Dos_Hauptkomponente_Anteil vertauscht	ja

## A.5 Mathematik

Nablaoperator

$$\vec{\nabla} = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) = \vec{e}_1 \frac{\partial}{\partial x} + \vec{e}_2 \frac{\partial}{\partial y} + \vec{e}_3 \frac{\partial}{\partial z} \quad (\text{A.1})$$

$\vec{e}_1, \vec{e}_2$  und  $\vec{e}_3$  sind dabei die Einheitsvektoren.

## A.6 Exemplarische Berechnungen des Winkels zwischen zwei Walzen

Gegeben sei der Abstand zweier Rollen in  $X_{ist}$  und  $Y_{ist}$  Koordinaten sowie die beiden Radien. Gesucht ist der Winkel der Folie zwischen den Rollen  $\alpha_w$ . Für die Berechnung verwenden wir den Satz von Thales. Gesucht sei die innere Tangente von links unten nach rechts oben. Der Satz von Thales wird auf zwei Kreise mit Differenzkoordinate in  $Y=0$  angewandt. Daher wird die gesamte Konstruktion um den Tangens gedreht und der Mittelpunktabstand berechnet.

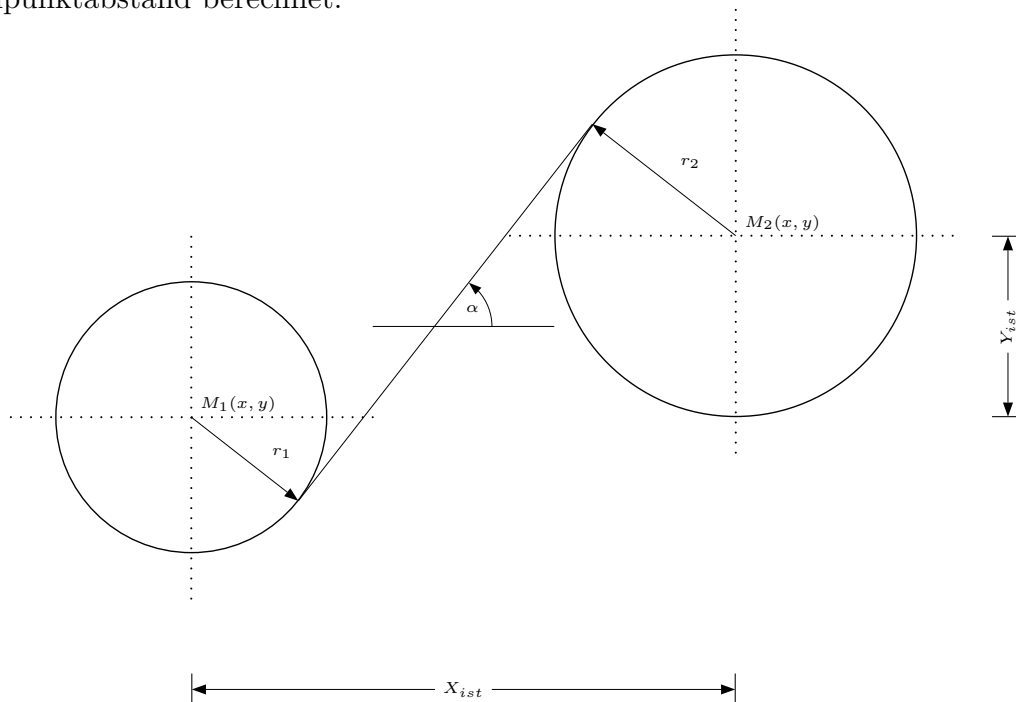


Abbildung 1.2: Walzenabstand

$$d_{M_1M_2} = \sqrt{X_{ist}^2 + Y_{ist}^2} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (\text{A.2})$$

$$\alpha = \arccos \frac{(r_1 + r_2)}{d_{M_1M_2}} + \arctan \frac{Y_{ist}}{X_{ist}} \quad (\text{A.3})$$

**Tabelle A.4:** Signale von Förderung und Dosierung

Variable	Bedeutung	Auswertung
Hauptkomponente	Anteil Hauptrohstoff	x
4 Nebenkomponten	Additive	x
Hauptkomponentendurchsatz	Massestrom	x
4 Nebenkompontendurchsätze	Massestrom	x

**Tabelle A.5:** Signale der Extrusion

Variable	Bedeutung	Auswertung
Durchsatz	Masse	o
Heizstrom Anschluss	Energie	x
Heizstrom Sieb	Energie	x
Heizstrom Zone 1	Energie	x
Heizstrom Zone 2	Energie	x
Heizstrom Zone 3	Energie	x
Heizstrom Zone 4	Energie	x
Heizstrom Zone 5	Energie	x
Massedruck	Information	o
Massetemperatur	Information	o
Motorlast	Information	x
Temperatur Anschluss	Information	o
Temperatur Sieb	Information	o
Temperaturzone 1	Information	o
Temperaturzone 2	Information	o
Temperaturzone 3	Information	o
Temperaturzone 4	Information	o
Temperaturzone 5	Information	o

**Tabelle A.6:** Signale des Kalibrierkorbs

Variable	Bedeutung	Auswertung
Foliendicke	Information	o
Kalibrierkorb Höhe	Information	-
Kalibrierkorb Öffnung	Information	-

**Tabelle A.7:** Signale des Wendestangenabzugs

Variable	Bedeutung	Auswertung
Abzugsgeschwindigkeit	Information	o

**Tabelle A.8:** Signale des Folienblaskopf

<b>Variable</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Auswertung</b>
Temperaturzone 8	Information	o
Temperaturzone 9	Information	o
Temperaturzone 10	Information	o
Temperaturzone 11	Information	o
Heizstrom Zone 8	Energie	x
Heizstrom Zone 9	Energie	x
Heizstrom Zone 10	Energie	x
Heizstrom Zone 11	Energie	x
Kuehling	Information	x
Zuluft	Energie	o
Abluft	Energie	o

**Tabelle A.9:** Signale des Reckwerks

<b>Variable</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Auswertung</b>
Walzentemperatur 1	Information	o
Walzentemperatur 2	Information	o
Walzentemperatur 3	Information	o
Walzentemperatur 4	Information	o
Walzentemperatur 5	Information	o
Walzentemperatur 6	Information	o
Walzentemperatur 7	Information	o
Walzentemperatur 8	Information	o
Walzentemperatur 9	Information	o
Walzentemperatur 10	Information	o
Walzentemperatur 11	Information	o
Walzengeschwindigkeit 2	Information	o
Walzengeschwindigkeit 3	Information	o
Walzengeschwindigkeit 4	Information	o
Walzengeschwindigkeit 5	Information	o
Walzengeschwindigkeit 6	Information	o
Walzengeschwindigkeit 7	Information	o
Walzengeschwindigkeit 8	Information	o
Walzengeschwindigkeit 9	Information	o
Walzengeschwindigkeit 10	Information	o
Walzengeschwindigkeit 11	Information	o