Thermo-rheologische Optimierung additiv gefertigter Extrusionswerkzeuge

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften,
Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik der

Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades

eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Bastian Neubrech
aus
Wesel

Gutachter:
Prof. Dr.-Ing. Reinhard Schiffers
Prof. Dr.-Ing. Volker Schöppner

Tag der mündlichen Prüfung:
16.07.2021

Vorwort / Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktion und Kunststoffmaschinen der Universität Duisburg-Essen im Zeitraum von 2015 bis 2020.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Reinhard Schiffers. Sowohl die fachliche Unterstützung, als auch das Interesse an der Thematik und das entgegengebrachte Vertrauen haben entschieden zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Außerdem danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Schöppner für die Übernahme des Koreferates und die kritische Durchsicht meiner Arbeit, sowie der Vorsitzenden der Prüfungskommission Frau Prof. Dr.-Ing. Jutta Geldermann und dem Mitprüfer Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerd Witt. Schließlich möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Johannes Wortberg bedanken, der mich als Ansprechpartner in meinen ersten Jahren am Lehrstuhl stets fachlich und persönlich unterstützt hat.

Herzlich möchte ich meinen Arbeitskollegen am Lehrstuhl danken. Die unterstützende und freundschaftliche Arbeitsatmosphäre, sowie die fachlichen und fachübergreifenden Diskussionen waren stets ein wichtiger Beitrag zu dieser Arbeit. Hierbei gilt mein besonderer Dank Dr. Jens Siepmann und Dr. Benedikt Neubert, die mir von Beginn an wertvolle Ansprechpartner in allen Belangen waren. Zudem möchte ich meinen ehemaligen Bürokollegen Dr. Michael Burgfeld und Jan Kummerow für die angenehme und witzige Zeit und die wertvollen Anregungen danken. Letzterem und Mirco Janßen gilt zudem mein Dankeschön für die kritische und selbstverständliche Durchsicht dieser Arbeit.

Darüber hinaus möchte ich die Studenten, die innerhalb ihrer Abschlussarbeiten und Tätigkeit am Lehrstuhl wichtige Beiträge zu dieser Arbeit geleistet haben, erwähnen. Besonders hervorheben möchte ich an dieser Stelle Chris Eber, Lucas Schulz und Thilo Wiechmann, aufgrund ihrer besonderen Eigeninitiative und ihres großen Engagements.

Ein Großteil dieser Arbeit entstand im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Kooperationsprojekt mit der Arbeitsgruppe von Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerd Witt. Hier möchte ich den hervorragenden Austausch, die Bereitstellung von Ressourcen und die fachliche Unterstützung seitens Dr. Stefan Kleszczynski und Arno Elspaß erwähnen.

Zuletzt gilt mein größter Dank meiner Frau Vanessa und meinen Kindern Paula und Oskar. Ohne die uneingeschränkte Unterstützung und den Rückhalt wäre die Erstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen. Für den selbstverständlichen Zuspruch und das Verständnis für die zeitliche Entbehrung – gerade in der finalen Phase – bedanke ich mich sehr.

Wesel, Juli 2021

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung ..... **VIII**

Summary ..... **X**

1 Einleitung **1**

1.1 Motivation 1

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise 2

2 Grundlagen und Stand der Technik **3**

2.1 Blasfolienextrusionsprozess 3

2.2 Extrusionswerkzeuge für Produkte mit kreisringspaltförmigem Querschnitt 4

2.2.1 Konzepte der Primärverteilung 7

2.2.2 Konzepte der Sekundärverteilung 8

2.3 Anforderungen an Extrusionswerkzeuge für kreisringspaltförmige Querschnitte 10

2.4 Auslegung von Extrusionswerkzeugen 12

2.4.1 Beschreibung und Annahmen der Strömungsvorgänge von Kunststoffschmelzen 12

2.4.2 Analytische Auslegungsansätze 14

2.4.3 Numerische Berechnungsmethoden zur Werkzeugauslegung 16

2.5 Grundlagen der additiven Fertigung 17

2.5.1 Verfahrensprinzip des Laser-Strahlschmelzens 19

2.5.2 Geometrische Restriktionen und Einflussgrößen 21

2.5.3 Materialien und -eigenschaften 23

2.6 Aktuelle Ansätze der Werkzeugauslegung und Zwischenfazit 24

3 Charakterisierung eines Wendelverteiler-Referenzwerkzeuges **29**

3.1 Definition des Referenzprozesses 29

3.1.1 Aufbau der Werkzeugbaugruppe 30

3.1.2 Modellbildung und Randbedingungen 35

3.2 Auswertung der numerischen Strömungsberechnung 38

3.2.1 Einführung qualitätsbeschreibender Größen 38

3.2.2 Beschreibung der Strömungssituation 42

3.2.3 Einflussfaktoren auf die Verweilzeitverteilung 46

3.2.4 Bewertungsansatz zur Verteilwirkung 50

3.3 Einfluss temperaturabhängiger Effekte 52

3.3.1 Identifikation von Wärmestaubereichen und thermischer Inhomogenität 53

3.3.2 Beeinflussung des Temperaturhaushalts durch Werkzeuginnenkühlung 56

3.4 Zwischenfazit und Überlegungen zur verbesserten Schmelzeführung 58

4 Entwicklung eines additiv gefertigten Werkzeugkonzepts zur Blasfolienextrusion 60

4.1 Konzeptentwicklung einer Primärverteilung unter Berücksichtigung freier Kanalführung 60

4.1.1 Fertigungsgerechte Querschnittsauslegung 60

4.1.2 Gestaltung der Schmelzeaufteilung 63

4.1.3 Optimierungsstudie zur Kanalführung 64

4.2 Konzeptentwicklung einer Sekundärverteilung mit radialer Mischwirkung 67

4.2.1 Steggeometrien zur radialen Mischung 67

4.2.2 Fertigungsgerechte Detailoptimierung 69

4.3 Validierung mittels numerischer Strömungssimulation 71

4.3.1 Analyse der qualitätsbeschreibenden Größen 72

4.3.2 Charakterisierung der Verweilzeitverteilung des Demonstratorwerkzeuges 74

4.3.3 Validierung der Optimierungsmethode der Kanalführung 76

4.3.4 Beeinflussung der thermischen Homogenität durch die Sekundärverteilung 78

4.3.5 Abschätzung der Verteilwirkung 80

4.4 Zwischenfazit zur Entwicklung additiv gefertigter Extrusionswerkzeuge 83

5 Gestaltung fertigungsgerechter Gehäusekonstruktionen 85

5.1 Voruntersuchungen zur Herstellbarkeit 85

5.2 Identifikation und Anpassung fertigungskritischer Gehäusebereiche 86

5.3 Integration in eine Technikumsanlage 89

5.4 Zwischenfazit und Potenziale neuer Gehäusekonzepte 90

6 Experimentelle Erprobung der Werkzeuggeometrie 93

6.1 Gegenüberstellung der Druckverbräuche zur Validierung der Simulationsergebnisse 93

6.2 Einfluss der Werkzeuggeometrie auf Wechselprozessen 94

6.3 Gegenüberstellung der mechanischen Folieneigenschaften 98

7 Fazit und Ausblick 102

8 Literaturverzeichnis 105

9 Anhang 115

9.1 Simulationsrelevante Materialdaten 115

9.2 Verwendete Soft- und Hardware 116

9.3 Einstellungen der numerischen Strömungssimulationen 117

9.4 Verwendete Anlagentechnik 120

Lebenslauf 121

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
3D	dreidimensional
ABV	Aufblasverhältnis
AE	Auswerteebene
AK	Auswertekurve
AM	Additive Manufacturing
AZV	Abzugsverhältnis
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer-aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
FCE	Fluid change effectiveness
FDM	Finite-Differenzen-Methode
FEM	Finite-Elemente-Methode
FP	Folienprobe
FVM	Finite-Volumen-Methode
KE	Konstruktionselement
KKM	Lehrstuhl für Konstruktion und Kunststoffmaschinen
PE-LD	Polyethylen niedriger Dichte
PE-HD	Polyethylen hoher Dichte
PG	Periodische Grenze
UDF	User-defined Function
WLF	Williams, Landel und Ferry
WV	Wendelverteiler

Formelverzeichnis

Lateinische Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
A	$[Pa \cdot s]$	Nullviskosität
a_T	[-]	Temperaturverschiebungsfaktor
B	$[s]$	reziproke Übergangsgeschwindigkeit
b	[mm]	Spaltmaß
b	[mm]	Fräserdurchmesser
C	$[-]$	Steigung der Viskositätskurve für $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$
D_ϕ	$[-]$	Diffusiver Fluss
$D_{Gehäuse}$	$[mm]$	Gehäusedurchmesser der Werkzeugbaugruppe
DP	$[bar]$	Restriktion für den Druckverbrauch
E_0	$[J/mol\ K]$	Aktivierungsenergie
F_ϕ	$[-]$	Konvektiver Fluss
H	$[mm]$	Höhe
h	$[\mu m]$	Schichtdicke
h_w	$[mm]$	Ganghöhe
i	$[-]$	Anzahl Speisebohrungen
K	$[-]$	Kontrollfläche
L	$[mm]$	Länge
l	$[mm]$	Maximale Überhänge
$\dot{m}$	$[kg/h]$	Massestrom
n	$[-]$	Kanalanzahl
$\vec{n}$	$[-]$	Normalvektor
$P_i x$	$[-]$	X - Koordinate der Stützstellen der Leitkurven
$P_i y$	$[-]$	Y - Koordinate der Stützstellen der Leitkurven

$P_i z$	$[-]$	Z - Koordinate der Stützstellen der Leitkurven
Q_ϕ	$[-]$	Sonstige Quellen in der Erhaltungsgleichung
QL	[%]	Qualitätskriterium Leckstromkurve
QM	[%]	Qualitätskriterium Massestromverteilung am Austritt
QW	[%]	Qualitätskriterium Wandschubspannungsverhältnis
R	$[J/mol\,K]$	Universelle Gaskonstante
r	$[mm]$	Radius
s	[mm]	Minimale Wandstärke
s	[mm]	Spaltweite
$\underline{u}$	$[m/s]$	Strömungsgeschwindigkeit
$\dot{V}$	$[m^3/s]$	Volumenstrom
WS	$[MPa]$	Restriktion für die maximale Wandschubspannung im Spalt
WW	$[MPa]$	Restriktion für die minimale Wandschubspannung im Wendelgrund

Griechische Formelzeichen

Formelzeichen	**Einheit**	**Bedeutung**
α	[-]	Faktor für Viskosität und Relaxationszeit in Dickenrichtung
α_w	[°]	Steigungswinkel Wendel
β	[°]	Aufbauwinkel
β	[°]	Umschlingungswinkel
Γ	$[m^2 s^{-1}]$	Diffusionskoeffizient
$\dot{\gamma}$	$[s^{-1}]$	Schergeschwindigkeit
δ	[°]	Winkel Speisebohrungen
$\delta_{effektiv}$	[°]	Effektiver Überlappungswinkel

δ_{Gesamt}	[°]	Gesamtüberlappungswinkel
Δp	$[Pa]$	Druckverlust
η	$[Pa \cdot s]$	Dynamische Viskosität
θ	$[-]$	Überlappungsanzahl
κ	$[1/r]$	Krümmungsmaß
ρ	$[kg/m^3]$	Dichte
τ	$[Pa]$	Schubspannung
φ	[°]	Fräserwinkel
$\varphi_{1/2}$	[°]	Lokaler Überhangswinkel
ϕ	$[-]$	Strömungsgröße

Indizes

Index	**Bedeutung**
a	Auswertekurve im Fließkanal nahe der äußeren Wand
i	Auswertekurve im Fließkanal nahe der inneren Wand
Ein	Einspeisung
$konv.$	konventionell (gefertigte Werkzeuggeometrie)
m	Auswertekurve im Fließkanal in der Mittenströmung
max	Maximalwert
min	Minimalwert
$newt.$	Newtonsches Fluid
Vzw	Verzweigung
WV	Wendelverteiler

Operatoren und Substitutionen

Operator / Substitution	**Bedeutung**
$\lvert\blacksquare\rvert$	Betrag von ■
$\underline{\blacksquare}$	Vektor
$\dot{\blacksquare}$	zeitlich Ableitung von ■
∇	Nabla-Operator

Zusammenfassung

Dem Extrusionswerkzeug kommt bei der Ausformung der Produktgestalt und der Einhaltung der Produktanforderungen eine entscheidende Aufgabe zu. Die Kunststoffschmelze durchströmt die Werkzeugfließkanäle und wird in den finalen Produktquerschnitt überführt. Dabei beeinflusst die Auslegung der Fließkanäle unmittelbar die Strömungsvorgänge und letztendlich die Qualität des Endproduktes. Gleichzeitig ist die Gestaltung von einer Vielzahl an Anforderungen abhängig, welche neben den materialspezifischen und rheologischen Eigenschaften der Kunststoffschmelze auch fertigungstechnische Randbedingungen enthalten. Der Ansatz der vorliegenden Arbeit sieht die Integration additiver Fertigungsverfahren in der Werkzeugauslegung vor. Durch die Vernachlässigung der Restriktionen konventioneller Fertigungsverfahren besteht die Möglichkeit „nicht montierbare“ Werkzeuggeometrien zu entwickeln und so die Fließkanäle bestmöglich an die komplexen thermo-rheologischen Anforderung schmelzeführender Kanäle anzupassen. Im Rahmen der Untersuchungen wird ein neuartiges Demonstratorwerkzeug entwickelt und für die Verwendung in einem Blasfolienextrusionsprozess erprobt.

Die Grundlage der Entwicklung bildet die Untersuchung einer gängigen Werkzeuglösung für die Herstellung von Folien. Anhand eines Wendelverteilerwerkzeuges werden mittels numerischer Strömungssimulationen Phänomene identifiziert, welche sich negativ auf die Prozess- und Produktqualität auswirken. Auf Basis quantifizierbarer Bewertungskriterien wird die Strömungssituation in Hinblick auf eine homogene Wandschubspannung, Massestrom- und Verweilzeitverteilung, sowie die charakteristische Verteilwirkung untersucht und dargestellt, inwiefern die Ergebnisse mit den fertigungsspezifischen Gestaltungsanforderungen korrelieren. Für den Bereich der Primärverteilung ist eine inhomogene Massestromverteilung am Austritt der Speisebohrungen festzustellen, welche unmittelbar auf die Gestaltung zurückzuführen ist. Die Sekundärverteilung zeichnet sich durch die Überlagerung von Umfangs- und Spaltströmung durch ein breites Verweilzeitspektrum am Werkzeuaustritt aus. Des Weiteren wird mittels temperaturabhängigen Strömungsberechnungen der Einfluss der dissipativen Erwärmung der Kunststoffschmelze und der Wärmeleitung der Werkzeugkomponenten auf den Temperaturhaushalt der Werkzeugbaugruppe analysiert. Ausgehend von diesen Ergebnissen werden Empfehlungen für die Gestaltung von Extrusionswerkzeugen getroffen.

Die Auslegung des Demonstratorwerkzeuges greift diese Empfehlungen auf. Durch die Möglichkeit der freien Kanalführung wird eine Primärverteilung entwickelt, welche eine identische Fließhistorie für die einzelnen Teilkanäle gewährleistet. Dabei wird der Punkt der Aufteilung in Teilströme bereits vor der Umlenkung realisiert, um inhomogene Strömungsgeschwindigkeiten entlang des Querschnittes zu vermeiden. Durch die fertigungstechnischen Gestaltungsfreiheiten kann eine sanftere Umlenkung und Verteilung der Schmelze realisiert werden. Diese Ergebnisse lassen sich anhand des Vergleiches der Wandschubspannungen, sowie der Massestromverteilung quantifizieren. Der Auslegungsansatz der Kanalführung beruht auf der Optimierung anhand geometrischer Größen. Es wird nachgewiesen, dass dies im Vergleich zu numerischen Auslegungsansätzen eine signifikante Reduzierung der Berechnungszeit bei vergleichbaren Ergebnissen verspricht.

Bei der Gestaltung der Sekundärverteilung steht die radiale Mischung der Schmelzeströmung im Fokus, um die negativen Effekte der wandnahen Strömungsschichten zu reduzieren. Diese können auf Basis der Untersuchungen des Referenzwerkzeuges als verweilzeitbestimmend charakterisiert werden. Gleichzeitig verursacht die dissipative Erwärmung einen Wärmestau im Bereich des Düsendorns, da die Wärme nicht ausreichend abgeführt werden kann. Es wird ein Konzept entwickelt, welches durch die Umlagerung der

Schmelzeschichten ein homogenes Temperaturprofil am Austritt gewährleistet. Dies wird durch Steggeometrien gewährleistet, welche in dieser Form konventionell nicht herstellbar wären. Gleichzeitig ist die Anordnung der Stege für die spätere Ausprägung von Bindenähten verantwortlich. Zur Gewährleistung der mechanischen Festigkeit wird die Verteilwirkung abgeschätzt und durch eine Umfangsmischung die Entstehung radialer Fließfronten vermieden.

Um die Herstellbarkeit der Werkzeuggeometrie sicherzustellen, wird sich bei der Auslegung an den Konstruktionsrichtlinien für additiv gefertigte Bauteile orientiert. Dennoch wird anhand einer Voruntersuchung auf Basis von Probenkörpern die Herstellbarkeit validiert. Zudem wird eine fertigungsgerechte Gehäusekonstruktion entwickelt, welche die spezifischen Prozessanforderungen der additiven Fertigung berücksichtigt. Aufgrund von hohen möglichen Eigenspannungen, wird eine Reduzierung der zu belichtenden Fläche pro Schicht angestrebt. Nach einer mechanischen Nachbearbeitung der äußeren Funktions- und Anschlussflächen ist die Integration in eine Technikumsanlage möglich.

Die experimentelle Erprobung sieht zunächst die Validierung der Simulationsergebnisse anhand des ermittelten Druckverbrauchs vor. Hier zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment. Anhand von Farb- und Materialwechselversuchen kann zudem das simulativ berechnete, kürzere Verweilzeitspektrum bestätigt werden. Abschließend werden die mechanischen Folieneigenschaften mittels produzierter Folienproben untersucht. Durch die Auswertung der Zugspannungen und Bruchdehnungen kann ein direkter Vergleich der Produkteigenschaften gezogen werden, gleichzeitig äußern sich ungünstige Bindenahtausprägungen in reduzierten Festigkeitswerten. Die Ergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung der Folieneigenschaften und belegen somit die Prozessfähigkeit der Werkzeuggeometrie.

Es kann die erfolgreiche Integration von additiven Fertigungsverfahren in den Herstellungsprozess von Extrusionswerkzeugen nachgewiesen werden. Durch die bestehenden Freiheitsgrade ergeben sich neue Potenziale bei der Gestaltung von Werkzeugkomponenten, wodurch eine positive Beeinflussung des Verarbeitungsprozesses ermöglicht wird. Durch numerische Strömungssimulationen kann die Fließkanalauslegung unmittelbar an die komplexen Anforderungen von Kunststoffschmelzen angepasst werden. Die experimentelle Erprobung validiert diese Ergebnisse.

Summary

The extrusion die has a decisive role to play in shaping the product shape and complying with product requirements. The polymer melt flows through the flow channels and is transferred into the final product cross-section. The design of the flow channels directly influences the flow processes and ultimately the quality of the end product. At the same time, the design is dependent on a large number of requirements which, in addition to the material-specific and rheological properties of the polymer melt, also include manufacturing-related boundary conditions. The approach of the present work envisages the integration of additive manufacturing processes in the die design process. By neglecting the restrictions of conventional manufacturing processes, there is the possibility of developing "non-mountable" die geometries and thus adapting the flow channels as best as possible to the complex thermo-rheological requirements of melt-conveying channels. As part of the investigations, a new type of demonstrator die is being developed and tested for use in a blown film extrusion process.

The basis of the development is the investigation of a common die solution for the production of films. Based on a spiral mandrel die, numerical flow simulations are used to identify phenomena that have a negative effect on process and product quality. On the basis of quantifiable evaluation criteria, the flow situation with regard to homogeneous wall shear stresses, mass flow and residence time distribution, as well as the characteristic distribution effect is examined and shown to what extent the results correlate with the production-specific design requirements. For the area of the primary distribution, an inhomogeneous mass flow distribution can be determined at the outlet of the feed bores, which is directly attributable to the design. The secondary distribution is characterized through a wide range of residence time at the die outlet because of the superimposition of circumferential and gap flow. Furthermore, the influence of the dissipative heating of the polymer melt and the heat conduction of the die components on the temperature balance of the assembly is analyzed by means of temperature-dependent flow simulations. Based on these results, recommendations for the design of extrusion dies are made.

The design of the demonstrator die takes these recommendations into account. Due to the possibility of a free flow channel design, a primary distribution is developed which guarantees an identical flow history for the individual sub-channels. The point of division into partial flows is realized before the deflection in order to avoid inhomogeneous flow velocities along the cross section. Due to the manufacturing-related design freedom, a gentler deflection and distribution of the melt can be realized. These results can be quantified by comparing the wall shear stresses and the mass flow distribution. The design approach for the flow channel design is based on an optimization based on geometric parameters. It is proven that this promises a significant reduction in the calculation time with comparable results to numerical design approaches.

When designing the secondary distribution, the focus is on the radial mixing of the melt flow in order to reduce the negative effects of the flow layers near the wall. These can be characterized as determining the residence time based on the examinations of the reference die. At the same time, the dissipative heating causes a build-up of heat in the area of the mandrel's nozzle, as the heat cannot be sufficiently dissipated. A concept is being developed which ensures a homogeneous temperature profile at the outlet through the relocation of the melt layers. This is ensured by bridge geometries which could not be produced conventionally in this form. At the same time, the arrangement of the bridges is responsible for the later development of weld lines. To ensure mechanical strength, the distribution effect is estimated and the shaping of radial flow fronts is avoided by mixing around the circumference.

In order to ensure the manufacturability of the die geometry, the design is based on the design guidelines for additively manufactured components. Nevertheless, the manufacturability is validated on the basis of test specimens on the basis of a preliminary investigation. In addition, the design of the assembly suitable for production is developed, which considers the specific process requirements of additive manufacturing. Due to the high possible internal stresses, the aim is to reduce the area to be exposed per layer. After mechanical reworking of the external functional and connection surfaces, integration into a pilot plant is possible.

The experimental testing initially validates the simulation results on the basis of the determined pressure consumption. This shows a good correspondence between simulation and experiment. With the help of color and material change processes, the calculated, shorter residence time spectrum can also be confirmed. Finally, the mechanical film properties are examined using produced film samples. By evaluating the tensile stresses and elongations at break, a direct comparison of the product properties can be drawn; at the same time, unfavorable weld line characteristics are expressed in reduced values. The results show a very good match of the film properties for both die designs and thus confirm the process capability of the demonstrator die geometry.

The successful integration of additive manufacturing processes into the manufacturing process of extrusion dies can be proven. The existing degrees of freedom result in new potential in the doolesign of diet components, which enables a positive influence on the manufacturing process. By means of numerical flow simulations, the flow channel design can be adapted directly to the complex requirements of polymer melts. The experimental testing validates these results.

1 Einleitung

Bestehend aus Rohstofferzeugern, Verarbeitern und Maschinenbauern kann die Kunststoffindustrie als einer der wichtigsten deutschen Wirtschaftszweige bezeichnet werden. Im Jahr 2018 waren allein in der Kunststoffverarbeitung in Deutschland mehr als 330.000 Mitarbeiter in über 3.000 Unternehmen beschäftigt. Dabei macht der Herstellungszweig von Platten, Folien, Schläuche und Profilen mit 25,9% den zweitgrößten Beschäftigungsanteil aus. Bezogen auf den Branchenumsatz von 66 Mrd. Euro wird somit ein Großteil durch die Herstellung von ein- und mehrschichtigen Halbzeugen für die Bau- und Verpackungsindustrie erwirtschaftet. Die Verarbeitung dieser thermoplastischen Kunststoffe geschieht durch das urformende Verarbeitungsverfahren der *Extrusion* [DiM20].

Am Beispiel der Blasfolienextrusion wird das granulat- oder pulverförmige Ausgangsmaterial in einem kontinuierlichen Prozess durch die Umwandlung mechanischer Energie in Wärme zunächst plastifiziert, homogenisiert und durch ein formgebendes Werkzeug gefördert. Anschließend wird der Folienschlauch verstreckt und muss bis zur Erstarrung durch Luft oder Wasser gekühlt und konfektioniert werden. Das Extrusionswerkzeug gilt als unmittelbarer Einflussfaktor auf die Produktgestalt und -qualität. Daher ist dessen verfahrenstechnische Weiterentwicklung für Industrie und Forschung von Interesse. Es werden durch Verarbeiter und Endkunden hohe Anforderungen an die Eigenschaften und Qualität des Endproduktes gestellt. Neben der Einhaltung geometrischer Vorgaben unterliegen mechanische und optische Eigenschaften spezifizierten Forderungen, welche maßgeblich durch das Extrusionswerkzeug beeinflusst werden. Ergänzt werden diese durch produktionstechnische und wirtschaftliche Anforderungen an gesteigerte Massedurchsätze, Betriebspunktunabhängigkeiten und kurze Wechselprozesse. Demnach bündelt sich der Entwicklungsdruck in der Werkzeugdimensionierung und Gestaltung der Fließkanäle und steigt in der Komplexität mit den Anforderungen an das Produkt.

1.1 Motivation

Kunststofffolien - und Kunststoffprodukte im Allgemeinen - sind in Ihrem Aufbau über die Jahre zunehmend komplexer geworden. Damit einhergehend steigt auch die Komplexität der Werkzeuggestaltung, um die geforderten Produktqualitäten zu gewährleisten. Immer häufiger findet dabei auch die computergestützte Dimensionierung Anwendung im Auslegungssprozess dieser Werkzeuge. Dennoch ist dieser zumeist durch den Einsatz von Erfahrungswissen und einer Vielzahl iterativer Prozessschritte geprägt und demnach entsprechend zeit- und kostenintensiv. Zusätzlich wird die Auslegung durch die grundsätzlichen Möglichkeiten der spanenden Fertigung und der damit verbundenen fertigungsgerechten Gestaltung limitiert. Alle nennenswerten verfahrenstechnischen Defizite sind letztendlich auf charakteristische Werkzeugmerkmale zurückzuführen. Diese gehen mit ersten Patenten auf die 1960er Jahre zurück und bis heute hat sich das Erscheinungsbild in seiner grundlegenden Ausprägung nicht geändert.

Gerade aufgrund der fertigungstechnischen Entwicklungen der letzten Jahre besteht jedoch Bedarf, die Fließkanalführung besser an die strömungsmechanischen Gegebenheiten anzupassen. Vor diesem Hintergrund ergeben sich Synergieeffekte mit den Möglichkeiten der additiven Fertigung. Diese beschreibt das schichtweise Aneinanderfügen von Werkstoff auf Basis von 3D CAD Daten (engl. *Computer-aided Design*) in einem automatisierten Prozess. Der schichtweise Aufbau des Werkstücks ermöglicht hierbei die Umsetzung

neuartiger und komplexer Bauteilgeometrien, welche mit konventionellen Fertigungsverfahren nicht herstellbar sind. Die Restriktionen konventioneller Fertigung sind zu vernachlässigen, indem „nicht montierbare“ Werkzeuge auf Basis des CAD-Modells gefertigt werden. Es besteht Bedarf, diesen Einsatz zur thermo-rheologischen Optimierung von Extrusionswerkzeugen zu untersuchen, um somit die Effizienz und Funktionalität des Gesamtprozesses weiter zu steigern.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Aus der zuvor erläuterten Motivation leitet sich die konkrete Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ab. Während im Bereich der Fertigungstechnik durch neue Verfahren die Komplexität von Bauteilen und somit deren Anpassung an den Einsatzzweck deutlich gesteigert werden konnte, werden in der Werkzeugauslegung hauptsächlich etablierter Lösungen entsprechend der Prozessanforderungen dimensioniert. Aus wissenschaftlicher Sicht erscheint somit die Untersuchung zur Integration neuer Fertigungsverfahren, wie der additiven Fertigung, in den Auslegungsprozess von Extrusionswerkzeugen sinnvoll, um die Gestaltung von Fließkanälen besser an die komplexen strömungsmechanischen Phänomene anzupassen. Das Ziel dieser Arbeit ist die Erarbeitung und Validierung eines additiv gefertigten Demonstratorwerkzeuges, welches diese Möglichkeiten aufgreift und einen Beitrag zum weiteren Ausbau des Wissensstandes zur Werkzeuggestaltung leistet.

Zur Erreichung der gesetzten Ziele steht zunächst die Betrachtung einer gängigen Werkzeuglösung für den Blasfolienextrusionsprozess im Fokus. Das Ziel dieser Untersuchung ist neben der Beschreibung der Strömungssituation eine Bewertung der Verteilwirkung und der Verweilzeitverteilung mit Hilfe von numerischen Strömungssimulationen. Dabei gilt es, die zugrundeliegende Auslegung vor dem Hintergrund der fertigungstechnischen Prozesse zu betrachten und zu bewerten. Anhand der Ergebnisse werden Defizite identifiziert, welche unmittelbar mit den Herstellungsprozessen oder dem Funktionsprinzip korrelieren. In Erweiterung dazu wird, basierend auf den Ergebnissen von te Heesen [Hee15], der Einfluss temperaturabhängiger Effekte untersucht, um eine Grundlage zur Verbesserung des Wärmehaushaltes zu schaffen.

Ausgehend von diesen Ergebnissen liegt der Schwerpunkt der Arbeit auf der Entwicklung eines additiv gefertigten Blasfolienextrusionswerkzeuges. Unter Berücksichtigung der prozesstechnischen Anforderungen greift die Konzeptentwicklung der Primärverteilung die eruierten Defizite auf und stellt einen alternativen Gestaltungsansatz vor. Die Vorgehensweise zielt auf eine möglichst homogene Fließhistorie zwischen einzelnen Teilkanälen ab. Es wird ein Auslegungsansatz erarbeitet und validiert, welcher die Kanalführung über geometrische Kenngrößen optimiert. Mit der Konzeptionierung der Sekundärverteilung werden im Stand der Technik erfasste Anforderungen an die Schmelzeführung aufgegriffen, um das Verweilzeitspektrum positiv zu beeinflussen, während mit der Verteilwirkung die Vermeidung von Bindenähten gewährleistet wird. Für die Validierung werden die Fertigung eines Demonstratorwerkzeuges und die Integration in eine Technikumsanlage notwendig. Zur abschließenden Bewertung der Ergebnisse müssen anhand des Produktionsprozesses und der mechanischen Folieneigenschaften Rückschlüsse auf die Prozess- und Produktqualität diskutiert werden.

2 Grundlagen und Stand der Technik

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Technik mit Bezug zu dem in der Arbeit behandelten Forschungsschwerpunkt vorgestellt. Zunächst wird anhand der Blasfolienextrusion der Extrusionsprozess beschrieben und gängige Bauformen von Extrusionswerkzeugen zur Herstellung von Kunststoffhalbzeugen zusammengefasst. Anschließend liegt der Fokus auf den analytischen und numerischen Auslegungsmethoden unter Berücksichtigung der komplexen Strömungsvorgänge in Extrusionswerkzeugen. Abschließend wird ein kurzer Einblick in die additive Fertigung durch das Laser-Strahlschmelzen gegeben, da dieses Verfahren im weiteren Verlauf zur Herstellung des Demonstratorwerkzeuges erneut aufgegriffen wird. Die Kombination der präsentierten Werkzeuge, deren Auslegungsansätze und die Potenziale der additiven Fertigungstechnik führen abschließend zu dem Bedarf den aktuellen Stand der Technik dahingehend zu erweitern.

2.1 Blasfolienextrusionsprozess

Unter Extrusion wird ein kontinuierliches Herstellungsverfahren zur wirtschaftlichen Herstellung von Halbzeugen wie Profilen, Platten, Rohren oder Schläuchen aus thermoplastischem Kunststoff verstanden. Das Verfahrensprinzip und die Anlagentechnik wird nachfolgend am Beispiel der Blasfolienextrusion erläutert. Diese dient der Herstellung dünnwandiger Folienprodukte, welche je nach Quelle, mit einer Dicke zwischen 2 – 500 µm definiert werden [Nen06, Lim13, Rau14]. Der schematische Aufbau einer Blasfolienanlage ist in Abbildung 2.1 exemplarisch dargestellt.

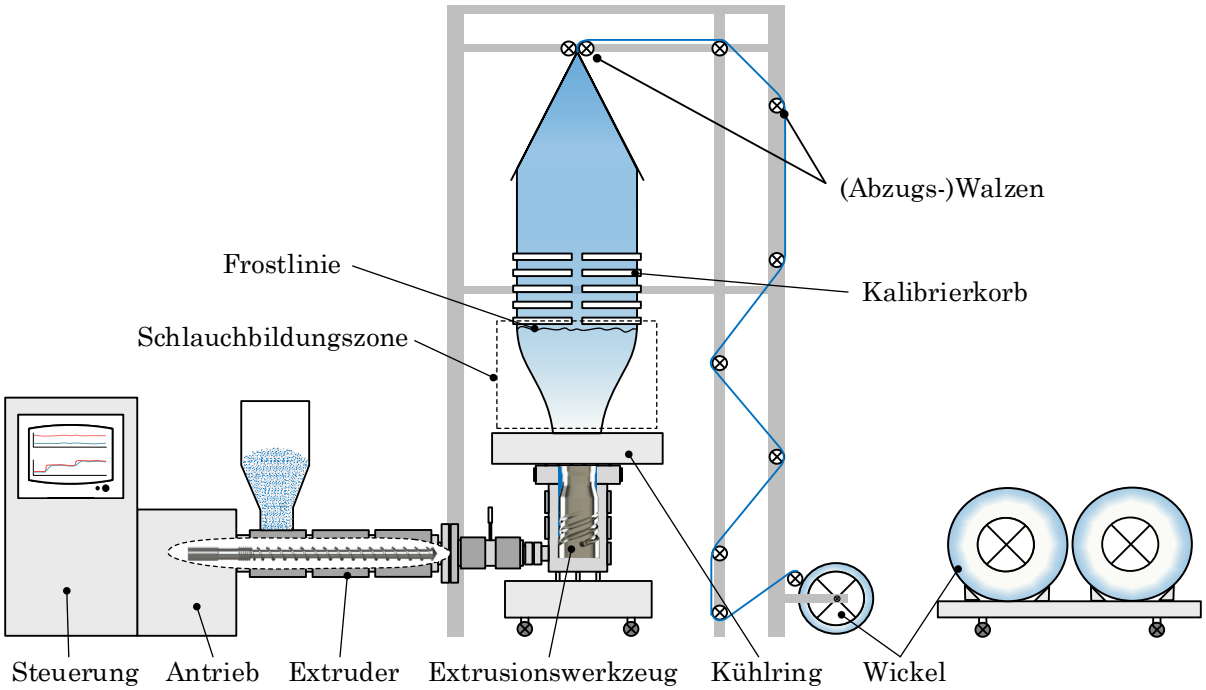


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung einer Blasfolienextrusionsanlage

Im ersten Schritt muss der zumeist granulatförmig vorliegende Rohstoff zu einer thermisch und stofflich homogenen Schmelze aufbereitet werden. Durch die Extruderschnecke

wird das Granulat eingezogen, komprimiert und durch die in Wärme umgewandelte Antriebsenergie plastifiziert (*Dissipation*). Zwar besteht eine elektrische Temperierung des Extruderzylinders oberhalb der Schmelztemperatur des Materials, jedoch entfällt ein Großteil der eingebrachten Leistung auf die beschriebene Dissipation. Neben der Homogenisierung wird im Extruder der erforderliche Druck aufgebaut, um die Fließwiderstände der nachfolgenden Werkzeugkanäle zu überwinden. Im Rahmen dieser Arbeit wird nicht weiter auf den Aufschmelzprozess, sowie Besonderheiten unterschiedlicher Schneckengeometrien eingegangen und auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen [TaG06, Lim13, Rau14, Bon16, HoM17, Chu19].

Das ebenfalls elektrisch temperierte Extrusionswerkzeug gilt als formgebende Komponente des Prozesses und beeinflusst maßgeblich die spätere Produktqualität. Im vorliegenden Anwendungsbeispiel wird vom Werkzeug der kreisrunde Schmelzestrang in eine Ringspaltströmung überführt und durch den Düsenspalt ausgetragen. Der entstandene Folienschlauch wird anschließend durch eingebrachte Stützluft aufgeblasen und auf den gewünschten Durchmesser verstreckt. Gleichzeitig findet eine Verstreckung der Folie in vertikaler Richtung statt, da die Blase von den angetriebenen Abzugswalzen schneller abgezogen wird, als sie aus dem Werkzeug austritt. Die Abzugswalzen quetschen die bis dahin flachgelegte Folienblase zudem ab und gewährleisten so ein konstantes Luftvolumen innerhalb dieser. Bei der Blasfolienextrusion wird folglich von einer biaxialen Verstreckung gesprochen. Anhand dieser Phänomene lassen sich zwei prozessspezifische Kennzahlen definieren. Das Verhältnis des finalen Foliendurchmessers zum Austrittsdurchmesser ergibt das Aufblasverhältnis (Abk.: *ABV*), das Verhältnis von Abzugsgeschwindigkeit zu Austrittsgeschwindigkeit wird Abzugsverhältnis (Abk.: *AZV*) genannt. Die genannten Verstreckprozesse beeinflussen den Kristallisationsprozess, sowie die Orientierung der Kunststoffmoleküle und sind damit für die späteren mechanischen Folieneigenschaften verantwortlich. Gleichzeitig wird die endgültige Foliendicke während der Verstreckung eingestellt. Somit wird die Gestalt der Folienblase durch die Verstreckung in der Schlauchbildungszone, zwischen dem Werkzeugaustritt und der Frostlinie, definiert. Als Frostlinie wird gemeinhin der Bereich bezeichnet, an welchem der Übergang der Schmelze vom amorphen in den teilkristallinen Zustand stattfindet [Ast79, Wag79]. Um diesen Prozess zu beschleunigen, werden Kunststofffolien üblicherweise unmittelbar nach dem Austritt aus dem Werkzeug durch Kühlluftströme gekühlt. Diese werden über einen Kühlring tangential an die Folienblase herangeführt und führen so zu einem Wärmeaustrag aus der Folie. Im industriellen Maßstab werden diese Systeme zusätzlich durch eine innere Blasenkühlung erweitert.

Der erstarrte Folienschlauch wird anschließend durch einen Kalibrierkorb zwangsgeführt und zumeist bereits messtechnisch hinsichtlich des Foliendickenprofiles um den Umfang überwacht. Hinter den Abzugswalzen befinden sich weitere Umlenkrollen, die den Schlauch an ein Wickelsystem weiterleiten. In diesem Bereich wird zusätzlich die Liegebreite der Folie aufgenommen.

2.2 Extrusionswerkzeuge für Produkte mit kreisringspaltförmigem Querschnitt

Die Hauptaufgabe des Extrusionswerkzeuges besteht darin, den vom Extruder bereitgestellten Schmelzestrang unter Gewährleistung der geforderten Produktqualität in den jeweiligen Endquerschnitt zu überführen. Im betrachteten Fall von Werkzeugen für Produkte mit kreisringförmigem Querschnitt sind übliche Anwendungsbeispiele die Herstellung von Rohren, Folien oder Schläuchen, aber auch Ummantelungsprozesse, wie bei der Herstellung von Kabeln, sowie Vorformlinge für Blasformprozesse. An dieser Stelle sei

erwähnt, dass Werkzeuge mit schlitz- und profilförmigem Austrittsquerschnitt nicht näher betrachtet werden. Hierfür wird auf [Rau14, MiH16, Kai18, Chu19] verwiesen.

Zunächst wird eine Übersicht bestehender Bauformen gegeben. In Abbildung 2.2 sind die vier grundsätzlichen Varianten solcher Werkzeuge aufgeführt. Das generelle Funktionsprinzip besteht entweder aus einer Aufweitung des Schmelzestrangs durch einen Verdrängungskörper (*a, b*), oder das Umströmen einer Pinole (*c*), bzw. eines Dorns (*d*). Dieses wesentliche Unterscheidungsmerkmal hat einen signifikanten Einfluss auf die Qualität des Endproduktes, da es sich in der Ausprägung von Fließmarkierungen, genannt Bindenähte, wiederfindet. Bindenähte sind auf die unterschiedliche Orientierung der Makromoleküle nach dem Umströmen einer Werkzeugstruktur und anschließendem Zusammenführen der Teilströme zurückzuführen.

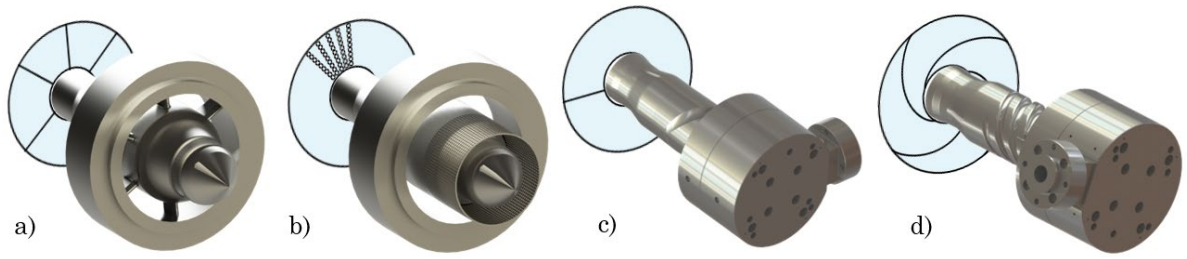


Abbildung 2.2: Bauformen von Extrusionswerkzeugen mit kreisringspaltförmigem Austrittsquerschnitt: Dornhalter- (a), Siebkorb- (b), Pinolen- (c), Wendelverteilerwerkzeug (d) und schematisch Darstellung der Fließmarkierungen

In Abbildung 2.2 a) ist ein Dornhalterwerkzeug, als eine verhältnismäßig einfache Bauform, zu erkennen. Der eintretende Schmelzestrang wird von dem in der Mitte befindlichen Dorn in eine Kreisringströmung überführt. Durch die zentrale Anströmung wird dem Dornhalterwerkzeuge eine sehr gute Verteilwirkung attestiert, jedoch bedarf der Dorn einer Aufhängung durch den namensgebenden Dornhalter. Dieser verbindet den Dorn mit dem Gehäuse durch Steggeometrien. In den stegnahen Schmelzeschichten kommt es lokal zu einer Molekülorientierung durch Wandhaftungseffekte und Dehnung der Schmelzepartikel. Die stegfernen Schichten erfahren diese Ausrichtung nicht. Es entsteht eine radial ausgerichtete Bindenaht, die sowohl optische als auch mechanische Einflüsse auf das Endprodukt hat.

Ähnlich ist die Strömungssituation in einem Siebkorbwerkzeug (Abbildung 2.2 b)) zu bewerten, obgleich die Anzahl der entstehenden Bindenähte signifikant ansteigt. Im Gegensatz zu einem Dornhalterwerkzeug wird der Schmelzestrom durch viele einzelne Bohrungen in einem Siebkorb (3) aufgeteilt. Somit bildet sich in jeder Bohrung ein Geschwindigkeitsgradient durch die Wandhaftungseffekte aus. Der Anstieg der Bindenahtanzahl ist nicht zwangsläufig negativ zu bewerten, da sich diese nicht in wenigen, vollständig radial ausgerichteten Bereichen konzentrieren. Durch die Vielzahl an Bohrungen und die damit verbundene Durchtrittsfläche sind äußerst geringe Druckverluste realisierbar, jedoch muss die Schmelze zweimalig um 90° umgelenkt werden. Die Auswirkungen auf die Produktqualität sind ebenfalls optischer und mechanischer Art.

Eine Variante ohne befestigende Elemente, wie Stege oder einen Siebkorb, stellt das Pinolenwerkzeug (Abbildung 2.2 c)) dar. Die grundsätzliche Kanalgeometrie kann von einem aufgewickelten Fischschwanzverteiler aus der Flachfolienextrusion abgeleitet werden. Die Anströmung geschieht hier seitlich und wird von einer vornehmlich tangentialen in eine axiale Strömung überführt. Aufgrund der fehlenden Befestigungselemente kommt es zunächst zu keinen Bindenähten, jedoch wird ein ähnlicher Effekt an den sich treffenden

Schmelzefronten gegenüber der Einspeisung beschrieben. Die Modellvorstellung beschreibt hier eine mangelnde Verknäulung der Moleküle des Kunststoffes in den aufeinandertreffenden Fließfronten. Abgesehen davon finden Pinolenwerkzeuge vor allem für Ummantelungsanwendungen Einsatz, da die Pinole eine Zuführung im Zentrum zulässt. Auf Kosten des Bauraums kann ein Pinolenwerkzeug mit einem Verwischgewinde kombiniert werden und der Einfluss der sich treffenden Schmelzefronten effektiv abgeschwächt werden.

Abweichend zu den vorherigen Konzepten wird der Schmelzestrom in Wendelverteilerwerkzeugen in mehrere Teilströme aufgeteilt und durch Wendelkanäle in einer Helix um einen Wendeldorn herumgeführt. Hierbei kommt es zu einer Überlagerung aus tangentialer und axialer Strömung, da die Kanaltiefe der Wendeln in Strömungsrichtung stetig abnimmt. Dieses Konzept beruht auf Patenten aus den späten 1960er Jahren [Alb66, Upm69, Ast76]. Vergleichbar mit Pinolenwerkzeugen zeichnet sich diese Bauform durch den Verzicht auf zu umströmende Strukturen aus, bietet aber durch die Überlagerung der Schmelzeströme einen entscheidenden Vorteil auf die Bindenahtausprägung. Es kommt zu keinen radial ausgerichteten Fließmarkierungen, sondern lediglich um den Umfang sichelförmig verlaufenden Grenzschichten. Mittels dieser Bauform sind hohe mechanische und optische Produkteigenschaften realisierbar und es ist speziell bei der Herstellung mehrschichtiger Produkte das am häufigsten eingesetzte Werkzeugkonzept. Eine umfangreichere Gegenüberstellung der Werkzeugbauformen sowie spezifische Vor- und Nachteile sind der Fachliteratur zu entnehmen [Joh04, BuW04, Mic09, Rau14, Bon16].

Nachfolgend wird eine Grundlage zum Aufbau und der Benennung eines Wendelverteilerwerkzeuges geschaffen, um das Verständnis im weiteren Verlauf der Arbeit zu sichern. Am Beispiel von Abbildung 2.3 werden die gängigen Komponenten einer Baugruppe zur Monoextrusion von Kunststofffolien aufgeführt.

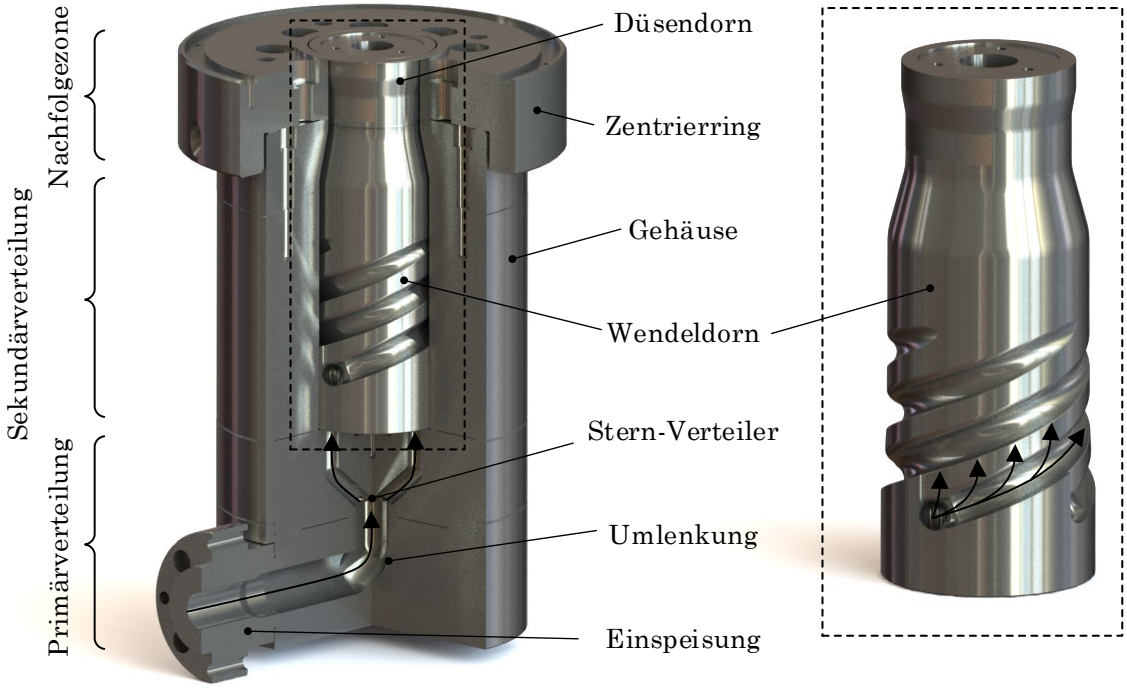


Abbildung 2.3: Aufbau einer Wendelverteilerbaugruppe für den Einschichtbetrieb

Eine generelle Einteilung kann in die Primärverteilung, Sekundärverteilung und Nachfolgezone getroffen werden. Für die dargestellte Abbildung setzt sich die Primärverteilung

aus Adapterflansch, Umlenkung und Stern-Verteiler zusammen. Die Sekundärverteilung besteht aus einem Gehäuse und dem eigentlichen Wendeldorn. Schließlich ist die Nachfolgezone in Zentrierring und Düsendorn unterteilt.

Die Schmelze wird in der Primärverteilung durch die Einspeisung in das Werkzeug geleitet und im vorliegenden Fall um 90° aus der horizontalen in eine vertikale Strömungsrichtung überführt. Dies ist bei der Herstellung von Folien durch die Bauart und das Verfahrensprinzip der Anlagentechnik begründet und bspw. bei Rohranlagen nicht der Fall. Anschließend wird die Schmelze durch eine geeignete Aufteilung in Teilströme aufgeteilt. Konzepte hierzu werden in Kapitel 2.2.1 thematisiert. Die Anzahl der Teilströme entspricht der Wendelanzahl. In der Sekundärverteilung (hier: Axialwendelverteiler) wird das Extrudat in die eigentliche Kreisringströmung überführt. Hier finden die Überlagerung der Wendelströmungen und der Spaltströmung statt. Im oberen Bereich des Wendeldorns ist ggf. eine Relaxationszone durch entsprechende Spaltaufweitung vorgesehen. Die Nachfolgezone, bestehend aus Zentrierring und einem Düsendorn, definiert den finalen Austrittsquerschnitt. In der Nachfolgezone wird die Strömungsgeschwindigkeit durch eine Reduktion des Spaltdurchmessers bewusst angehoben und homogenisiert um Unterschiede durch den Wendelauslauf zu minimieren. Te Heesen konnte den Ausgleich der Unterschiede des Wendelauslaufs im Rahmen seiner Untersuchungen durch Auswertung der Strömungsgeschwindigkeit an Stützstellen entlang der Nachfolgezone belegen [Hee15]. Über den Zentrierring wird die Konzentrizität zum Düsendorn eingestellt um eine konstante Wanddicke zu gewährleisten. Nachfolgend wird kurz auf gängige Bauformen von Primär- und Sekundärverteilungen bei Wendelverteilerwerkzeugen eingegangen.

2.2.1 Konzepte der Primärverteilung

Die Hauptaufgabe der Primärverteilung besteht in einer möglichst homogenen Aufteilung der Schmelze für die nachfolgende Sekundärverteilung. Ein identischer Massestrom muss in einem identischen Zustand mit möglichst identischer Fließhistorie bereitgestellt werden. Dies geschieht bestmöglich bei möglichst kurzen Fließwegen um zum einen die Verweilzeit und zum anderen den Druckbedarf möglichst gering zu halten. Bezogen auf die Sekundärverteilung wird ein Verhältnis von 40 % zu 60 % in [Ast79, Sti01, Sei06] genannt. Neben der thermodynamisch und strömungsmechanisch vergleichbaren Schmelzebelastung sind prozesstechnisch konstruktive Anforderungen zu berücksichtigen. Je nach Verarbeitungsverfahren besteht der Bedarf eines freien Innendurchmessers zur Durchführung von Medien zur Produktkühlung oder eines Trägermaterials bei Ummantelungsprozessen. Die Befestigung weiterer Werkzeugkomponenten muss ebenfalls bei der Konstruktion berücksichtigt werden. Weitere Anforderungen entstehen speziell bei Co-Extrusionsanwendungen, wenn eine Kreuzung unterschiedlicher Materialströme notwendig wird. In Abhängigkeit von dem jeweiligen Einsatz haben sich speziell der längenbalancierte-, 2^n-, und Stern-Primärverteiler durchgesetzt und sind in Abbildung 2.4 schematisch dargestellt [BuS10].

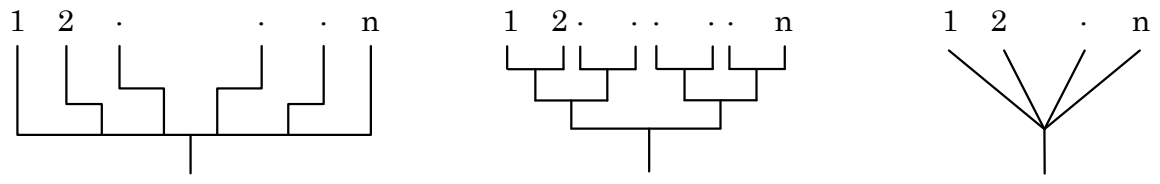


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung von längenbalancierten-, 2^n- und Stern-Primärverteilungen (v.l.n.r.)

Der längenbalancierte Verteiler erreicht die gleichmäßige Aufteilung der Schmelzeströme durch eine geometrische Dimensionierung der Kanäle über Fließkanallänge und -querschnitt. So kann zwischen Kanaleintritt und Kanalaustritt der jeweilige Volumenstrom bzw. Druckverlust identisch angepasst werden. Dies findet vor allem Anwendung, wenn unterschiedlich lange Wege zwischen der Einspeisung und der jeweiligen Speisebohrung zum Sekundärverteiler zurückgelegt werden müssen. Hierbei gilt der Kanal mit dem größten Abstand zu Einspeisung als ausschlaggebend für die Dimensionierung. Grundsätzlich ist eine Anpassung des Druckverlusts bei unterschiedlichen Fließweglängen durch eine Anpassung des Querschnitts möglich, jedoch führt dies unweigerlich zu einer Änderung der strömungsmechanischen Zustände dieses Kanals und ist mit einer starken Betriebspunktabhängigkeit verknüpft. Entsprechend gängiger sind ein identischer Querschnitt und eine Verlängerung der übrigen Verteilerkanäle.

Das Konzept von 2^n-Primärverteilungen beruht auf einer mehrfachen Halbierung von Schmelzeströmen in 2^n Teilströme und wird vielfach eingesetzt, wenn Teilströme um den Umfang außerhalb der Werkzeugmitte verteilt werden müssen. Durch die Anpassung des Kanalquerschnitts auf Basis des halbierten Massestroms und der Wandschubspannung können so mit jeder Aufteilung vergleichbare Strömungszustände geschaffen werden.

Schließlich wird bei Stern-Primärverteilungen die Schmelze an einem zentralen Punkt in n Teilströme aufgeteilt. Diese werden mit identischen Querschnitten und Längen in die Speisebohrungen geführt und erfüllen so die thermodynamischen und strömungsmechanischen Anforderungen der identischen Strömungshistorie. Stern-Primärverteilungen zeichnen sich vor allem durch die geringen Fließweglängen und die einfache Fertigung aus und finden dementsprechend häufig Anwendung. Weiterführende Informationen zu den Vor- und Nachteilen der genannten Konzepte sind [BuS10, Sau11] zu entnehmen.

2.2.2 Konzepte der Sekundärverteilung

Die Sekundärverteilung bei Wendelverteilerwerkzeugen kann prinzipiell in drei Kategorien eingeteilt werden, die sich an der jeweiligen Ausprägung des Wendelverteilers orientieren. Hierbei ist die Bezugsachse bzw. -ebene entscheidend für die Namensgebung. Es kann grundsätzlich in Axialwendelverteiler, Radialwendelverteiler (auch Circularverteiler genannt) und konische Wendelverteiler unterschieden werden. Abbildung 2.5 zeigt die ersten beiden Bauformen, konische Wendelverteiler sind als Kompromiss dieser zu verstehen.

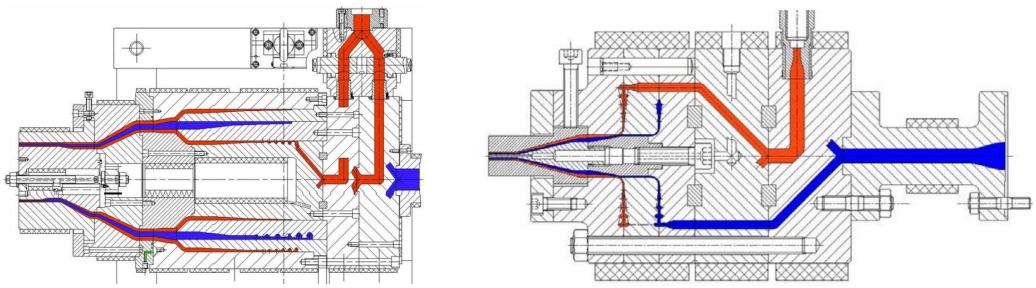


Abbildung 2.5: Industrielle Wendelverteilerwerkzeuge für Co-Extrusionsanwendungen, links: Axialwendelverteiler, rechts: Radialwendelverteiler [BuW04]

Lange wurde Axialwendelverteilern eine zunehmende Verbreitung in der Rohr- und Folienextrusion zugeschrieben [KCC11, Rau14]. In industriellen Co-Extrusionsanwendungen werden einzelnen Wendeldorne konzentrisch angeordnet und die Schmelzeschichten anschließend zusammengeführt. Diese Konzepte bieten identische Fließwiderstände nach

dem Zusammenführen bei individuell gut auszulegenden Kanälen der Einzelschichten und sind meist für breite Betriebspunktspektren geeignet. Seit den 1990er Jahren werden zudem Werkzeuge angeboten, bei denen die Wendelkanäle in einer Ebene und nicht konzentrisch ausgeführt sind [PeP91, Bod95, Fis96, WoF96]. Diese Radialwendelverteiler bieten den Vorteil kurzer Verweilzeiten und geringer Wandschergeschwindigkeiten bei gleichzeitiger Flexibilität durch den modularen Aufbau. Die jeweilige Wahl ist jedoch vom Anwendungsfall und der damit verknüpften Gewichtung der Anforderungen abhängig. Eine Entscheidung muss demnach produktspezifisch getroffen werden. Eine detaillierte Gegenüberstellung von Vor- und Nachteilen sowie möglichen Anwendungsfeldern können [WoF96, Fis06, Mic09] entnommen werden. Es lässt sich zudem festhalten, dass die grundlegende Strömungssituation der beiden Konzepte vergleich ist.

Im weiteren Verlauf werden die maßgeblichen Gestaltungsparameter von Wendelverteilerwerkzeugen aufgeführt und deren Einfluss auf die Strömungszustände kurz erläutert. Dies geschieht in Tabelle 2.1 am Beispiel eines Axialwendelverteilers für die Herstellung einschichtiger Folien. Die Bauhöhe und der Durchmesser werden dabei zumeist durch das Endprodukt vorgeschrieben und sind zu Beginn der Auslegung fix definiert (vgl. Kapitel 3.1.1).

Tabelle 2.1: Gestaltungsparameter und Einflussgrößen bei der Wendelverteilerkonstruktion

Gestaltungsparameter	**Einflussgröße**	**Tendenz bei steigendem Gestaltungsparameter**
Durchmesser	Endprodukt	**o**
Bauhöhe	Endprodukt	**o**
Wendellänge / Wendelbreite / Wendelanzahl / Wendelanfangstiefe /Wendelsteigungswinkel / Anfangsspaltweite	Druckverlust	↘
Wendellänge / Wendelanzahl / Wendelanfangstiefe / Spaltweitenverlauf	Verteilwirkung	↗
Wendelsteigungswinkel / Anfangsspaltweite / Spaltweitenverlauf	Verteilwirkung	↘
Wendelanfangstiefe / Wendellänge / Wendelanzahl	Verweilzeit	↗
Wendelsteigungswinkel	Verweilzeit	↘

Die jeweilige Tendenz bezieht sich auf eine Zunahme des Gestaltungsparameters [Rau87, Sti01, MGF08, Cre08]. Für eine detaillierter Aufschlüsselung der geometriebeschreibenden Parameter sei zudem auf [Sau11, Hee15] verwiesen. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Auslegung von Wendelverteilerwerkzeugen auf einer Vielzahl geometrischer Freiheitsgrade beruht, welche sich gegenseitig, und die Qualität der Werkzeugauslegung zudem gegensätzlich, beeinflussen können. Als Beispiel sei hier die Wendellänge aufgeführt. Eine Steigerung dieses Gestaltungsparameter geht bei gleicher Bauhöhe direkt mit einer Reduzierung des Steigungswinkels und einer Steigerung des Umschlingungswinkels einher. Während an dieser Stelle der Druckverlust zwar positiv – also mit einer Reduzierung dessen – beeinflusst wird, ist zwangsläufig auch eine Steigerung der Verweilzeit und

somit auch der Spülzeit der Werkzeugbaugruppe zu verzeichnen, obgleich die Verteilwirkung verbessert wird. Bei Größen, wie dem Spaltweitenverlauf ist zusätzlich die Existenz eines Optimums wahrscheinlich, da hier die Vergrößerung zunächst einen positiven Einfluss auf die Verteilwirkung aufweist, dieser aber bei weiterer Steigerung wieder abnimmt. Es lässt sich somit festhalten, dass die „optimale" Werkzeugauslegung stets einem Kompromiss entspricht und an den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden muss.

2.3 Anforderungen an Extrusionswerkzeuge für kreisringspaltförmige Querschnitte

Aus den zuvor beschriebenen Anwendungsfeldern und den dargestellten Bauformen von Extrusionswerkzeugen für kreisringspaltförmige Querschnitte lassen sich Anforderungen für die Auslegung ableiten. Wie bereits eingangs erwähnt, wird durch das Werkzeug die Produktqualität entscheidend beeinflusst. Dementsprechend lassen sich die Anforderungen an Extrusionswerkzeuge unmittelbar aus den Anforderungen an die spätere Produktqualität ermitteln und müssen durch die Auslegung der Geometrie der Fließkanäle gewährleistet werden.

Zu den offensichtlichen Qualitätsanforderungen an ein Folienprodukt gehört eine um den Umfang einheitliche Wanddickenverteilung. Die Wanddicken werden durch eine homogene Verteilung des Volumenstroms beeinflusst, welcher sich unmittelbar berechnen lässt und über möglichst identische Strömungswiderstände auf allen Fließwegen einzustellen ist. Vor dem Hintergrund der Wanddickenverteilung ergeben sich zusätzliche Effekte für eine nachhaltige Produktion. Je genauer einer geforderte (Mindest-)Wanddicke in einem laufenden Prozess eingestellt werden kann und je geringer die Streuung um diese Zielgröße ist, desto näher kann die tatsächliche Wanddicke an den Sollwert herangeführt werden. Dementsprechend sinkt unmittelbar der Rohstoffbedarf bei der Herstellung.

Weitere Anforderungen werden durch die Produktoberfläche definiert und können bei der Gestaltung durch die strömungsmechanischen Größen der Wandschergeschwindigkeiten bzw. Wandschubspannungen ausgedrückt werden. Bei der Überschreitung kritischer Wandschubspannungen werden Fließanomalien in der Randschicht der Strömungskanäle festgestellt. Diese äußern sich als Oberflächendefekte im Endprodukt und können von der sog. Haifischhaut (engl. shark skin) bis hin zu Schmelzebruch (engl. melt fracture) reichen. Es ergibt sich ein sinnvoller Verarbeitungsbereich durch die Festlegung entsprechender Grenzwerte. Bereits in [Uhl79, KDM17] wurden in Abhängigkeit von der Oberfläche der Fließkanäle und der Materialtemperatur Empfehlungswerte für unterschiedliche Kunststoffe zusammengefasst. Fischer [Fis01] definiert für die maximale Wandschergeschwindigkeit einen materialunabhängigen Wert von $50\ s^{-1}$. Im Gegensatz dazu wird von Vlachopoulus oder Osswald [VlA72, Vla01, OsM12] in Abhängigkeit des Materials und dem Grad der auftretenden Effekte eine obere Grenze der Wandschubspannung von $100\ kPa$ postuliert und später von Niemeier [Nie06] aufgegriffen. Auch bei gängigen Ansätzen zur Optimierung von Wendelverteilerwerkzeugen wird beispielsweise von Cretu [Cre08] eine maximale Wandschergeschwindigkeit vorgegeben. Saul [Sau11] bildet das Verhältnis von maximaler zu minimaler Wandschubspannung und dieser Ansatz wird schließlich von te Heesen [Hee15] in Form eines allgemeingültigen Qualitätskriterium definiert. Im Rahmen der genannten Arbeiten hat sich eine maximale Wandschubspannung von $100\ kPa$ etabliert.

Hinsichtlich der unteren Grenzen wird gemeinhin ein Wert der Wandschergeschwindigkeit zwischen $5 - 15\ s^{-1}$ genannt [Vla01, Fis01, Sei06, Nie06, Szö14]. Prozesstechnisch ist die untere Grenze mit der Vermeidung von Stagnationszonen verknüpft und speziell bei

der Verarbeitung thermisch sensibler Materialien und Materialwechselprozessen, also der Verdrängung eines Ausgangsmaterials im Fließkanal durch ein Zielmaterial, relevant. Jedoch ist die Verwendung der Wandschergeschwindigkeit an dieser Stelle kritisch zu hinterfragen. Um dies zu erläutern sei bei einem gegebenen Prozess das Material geändert, ohne weitere Parameter anzupassen. Es kann eine andere Spülbarkeit festgestellt werden, da mit dem angepassten Material zwar die Wandschergeschwindigkeiten gleichbleiben, sich allerdings die Wandschubspannungen ändern. Somit ist die Verwendung einer unteren Wandschubspannungsgrenze sinnvoll und wurde von te Heesen auf $10\ kPa$ definiert [Hee15].

Aus der Kanalgeometrie ergibt sich außerdem der Druckverlust, der über den Fließweg abfällt. Dieser kann grundsätzlich mit Verweis auf Kapitel 2.4.2 berechnet werden. Der maximale Druck ergibt sich hierbei aus der Druck Durchsatz Beziehung des Extruders und wird durch den aus der dissipativen Erwärmung des Materials resultierenden Temperaturanstieg begrenzt. Der minimale Druckverlust kann vernachlässigt werden, da hier die minimalen Wandschubspannungen zu betrachten sind. Im Kontext der Temperatur sei neben der Einhaltung zulässiger Temperaturen zudem die Anforderung einer homogene Temperaturverteilung über den Querschnitt genannt. Untersuchungen hierzu werden in Kapitel 3.3 aufgeführt.

An dieser Stelle kann festgehalten werden, dass zur Einhaltung von bestehenden Qualitätsanforderungen an ein Produkt, spezifische, material- und betriebspunktabhängige Anforderungen an die sich einstellenden strömungsmechanischen Größen bestehen. Im Stand der Forschung werden vor allem die Volumenstromverteilung in Bezug auf die Wanddickenverteilung, die Wandschubspannung bzw. Wandschergeschwindigkeit als Einflussgröße auf Stagnationszonen und Oberflächendefekte und der Druckverlust genannt. Diese lassen sich in eine daraus folgende Gestaltung der Strömungskanäle ableiten und sind unter Berücksichtigung der vorherrschenden Randbedingungen in konkrete Grenzwerte zu überführen.

Weiterführend gibt es Prozessanforderungen, die sich zwar aus den aufgeführten Erkenntnissen ableiten lassen, teilweise jedoch zu einem Zielgrößenkonflikt führen. Die Bewertung ist hier teils subjektiver und kompromissbehafteter und soll nachfolgend erläutert werden. Zunächst sei die Vermeidung sogenannter Fließmarkierungen aufgrund der Beeinflussung der mechanischen Festigkeit des Endprodukts genannt. Durch unterschiedliche Orientierung der Makromoleküle durch die jeweilige Strömungsführung treten diese Effekte auf und sind in einem Werkzeug – wie in Kapitel 2.2 aufgeführt – schwer zu vermeiden. Ein gangbarer Ansatz ist demnach das bestmögliche Verwischen und Überlagern von Schmelzeströmen, um deren Einfluss auf das Endprodukt zu egalisieren.

Komplexer gestaltet sich die Einordnung einer geeigneten Verweilzeit und damit verbunden einer angemessenen Spülzeit. Zur Definition wird nachfolgend Spülzeit als die Zeitspanne definiert, die benötigt wird, bis nach einem Farb- oder Materialwechselprozess kein praxisrelevanter Einfluss auf das Ausgangsmaterials festzustellen ist. Demgegenüber stehen Reinigungsprozesse, die das vollständige Entfernen eines Ausgangsmaterials, auch aus der Randschicht, zum Ziel haben. Wie erwähnt, ist die Verweilzeit von der minimalen Wanschubspannung abhängig und prinzipiell durch Verengen der Kanalquerschnitte reduzierbar. Dies steht im Umkehrschluss allerdings im Konflikt mit dem Druckverlust und daraus resultierend auch mit zulässigen Materialtemperaturen. Des Weiteren können steigende Verweilzeiten eine Degradation oder ein Aufbauen des Materials zur Folge haben. Es muss also ein Kompromiss aus einer vertretbaren Verweilzeit bei zulässigen strömungsmechanischen Randbedingen gefunden werden.

Schlussendlich bestehen produktionstechnische und konstruktiv-fertigungstechnische Anforderungen, die es zu berücksichtigen gilt. Zu den naheliegenden gehört dabei der verfügbare Bauraum innerhalb der Anlage. Speziell in modernen Co-Extrusionsanlagen zur Herstellung mehrschichtiger Folienverbunde ist der äußere Bauraum zu beachten. Hier finden Anordnungen mit sieben bis neun Extrudern Anwendung. Gleichzeitig sollte eine schnelle (De-)Montage gewährleistet werden, um Rüstzeiten oder manuelle Reinigung der Fließkanäle effizient durchzuführen. Diese Punkte sind eng mit der Komplexität der Werkzeugbaugruppe verknüpft. Durch Detaillösungen für etwaige Werkzeugkühlungen oder Beschichtungsprozesse skaliert die Komplexität entsprechend. Dementsprechend müssen bei der Gestaltung von Extrusionswerkzeugen stets die verwendeten Herstellverfahren und deren fertigungstechnischen Restriktionen berücksichtigt werden. Die Integration dieser Anforderungen gelang Humpa und Köhler [HuK14a, HuK14b] bei der Umsetzung einer Konstruktionsmethode, welche eine Übereinstimmung von CAD-Modell und gefertigter Geometrie bis auf die Fertigungstoleranzen ergab. Ein erfolgreicher Ansatz zur Berücksichtigung der Fertigbarkeit wurde anschließend im Rahmen eines ganzheitlichen Optimierungsansatzes von Wendelverteilerwerkzeugen angewendet [HH+13, Hee15].

Zusammenfassend lassen sich die Anforderungen an Extrusionswerkzeuge für kreisringspaltförmige Querschnitte in folgenden Punkten – mit den zuvor aufgeführten Wechselwirkungen und Konflikten – ausdrücken:

- Realisierung möglichst identischer Fließhistorien entlang der Fließwege durch vergleichbare Fließweglängen, Fließkanalquerschnitte und dementsprechend vergleichbare Strömungswiderstände.
- Berücksichtigung der minimalen und maximalen Grenzwerte der strömungsmechanischen Größen Wandschubspannung bzw. -schergeschwindigkeit und Druckverlust.
- Homogene Temperaturverteilung.
- Ausreichende Umlagerung der Schmelzeströme zur Vermeidung von Fließmarkierungen.
- Möglichst geringe Verweilzeit bei engem Verweilzeitspektrum und Vermeidung von Stagnationszonen.
- Berücksichtigung von konstruktiven und fertigungstechnischen Randbedingungen.

2.4 Auslegung von Extrusionswerkzeugen

In Kapitel 2.4 werden mögliche Auslegungsverfahren von Extrusionswerkzeugen vorgestellt. Hierbei werden zunächst grundlegende Annahmen und Vereinfachungen zur Beschreibung von Kunststoffschmelzen aufgeführt. Anschließend werden sowohl analytische, als auch numerische Berechnungsansätze zur Auslegung vorgestellt. Anhand dieses Kapitels werden die im weiteren Verlauf der Arbeit notwendigen Werkzeuge zur Umsetzung der Zielsetzung zusammengefasst.

2.4.1 Beschreibung und Annahmen der Strömungsvorgänge von Kunststoffschmelzen

Unter Fluiden werden alle gasförmigen und flüssigen Substanzen zusammengefasst, die sich unter Einfluss von Scherkräften verformen. Diese können prinzipiell in newtonsche

und nicht-newtonsche Fluide eingeteilt werden. Eine allgemeine mathematische Beschreibung der Strömung stellen die *Navier-Stokes-Gleichungen* dar, welche über nichtlineare gekoppelte Differentialgleichungen die Massen-, Energie- und Impulserhaltung von laminaren und turbulenten Strömungsphänomenen abbilden [Mül57, Soh01, OBD09]. Zustandsdefinierende Größen bilden hierbei der Druck, die Dichte und die Geschwindigkeit [SpA10].

Kunststoffe verhalten sich als nicht-newtonsche Fluide nicht ausschließlich viskos, sondern weisen auch ein elastisches Materialverhalten auf. Diese Eigenschaft wird als viskoelastisches Verhalten, oder Viskoelastizität bezeichnet. In der Rheologie wird dieses komplexe Materialverhalten behandelt und kann über die Viskosität beschrieben werden. Während der Verarbeitung von Kunststoffen tritt sowohl eine Scher- als auch eine Dehndeformation auf, weswegen der Begriff der Viskosität hier weiter untergliedert wird. Für den Extrusionsprozess überwiegt jedoch aufgrund der Schlepp- und Druckströmung die Scherdeformation und somit wird nachfolgend die Scherviskosität betrachtet [Bon16]. Diese entspricht dem Quotienten aus Schubspannung und Schergeschwindigkeit (Gl. 2.1).

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \qquad \text{Gl. 2.1}$$

$\eta\ [Pa \cdot s]$: *dynamische Viskosität* $\tau\ [Pa]$: *Schubspannung* $\dot{\gamma}\ [s^{-1}]$: *Schergeschwindigkeit*

Während newtonsche Fluide eine von der Schergeschwindigkeit invariante Viskosität aufweisen, werden Kunststoffe als strukturviskos oder scherverdünnend charakterisiert [MH+14]. Aufgrund des makromolekularen Aufbaus ist eine Abnahme der Viskosität unter steigender Scherbelastung durch die Orientierungsänderung der Makromoleküle zu verzeichnen. Neben der Schergeschwindigkeit zeigen Kunststoffe zudem eine Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur. Gemäß des Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip ist aufgrund einer Temperaturerhöhung eine Verschiebung der Relaxations- bzw. Kriechprozesse zu kürzeren Zeiten zu verzeichnen. Dies wurde von *Williams, Landel und Ferry* (kurz: WLF) durch einen Koeffizienten beschrieben, der die Temperaturabhängigkeit von Relaxationsspektren in der Beschreibung der Viskosität berücksichtigt [WLF55].

Um die Viskosität eines strukturviskosen Materials mathematisch zu beschreiben, existieren verschiedene Formulierungen. Neben dem *Potenzansatz* nach Ostwald und de Waele [Wae23, Ost25, Wae26] stellt der drei-parametrige *Carreau-Ansatz* [Car68] eines der gängigsten Stoffmodelle dar, was primär mit der besseren Abbildegenauigkeit bei niedrigen Schergeschwindigkeiten begründet werden kann. Eine Betrachtung im relevanten Schergeschwindigkeitsbereich von $10^0 - 10^4\ s^{-1}$ ist mit ausreichender Genauigkeit möglich [MH+14].

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = \frac{A \cdot a_T(T)}{\left(1 + B\dot{\gamma} \cdot a_T(T)\right)^C} \text{ mit } a_T = \exp\left[\frac{E_0}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \qquad \text{Gl. 2.2}$$

$\eta\ [Pa\ s]$: *dynamische Viskosität*
$\dot{\gamma}\ [s^{-1}]$: *Schergeschwindigkeit*
$A\ [Pa\ s]$: *Nullviskosität*
$a_T\ [-]$: *Temperaturverschiebungsfaktor*
$B\ [s]$: *reziproke Übergangsgeschwindigkeit*
$C\ [-]$: *Steigung für* $\dot{\gamma} \to \infty$
$E_0\ [J/mol\ K]$: *Aktivierungsenergie*
$R\ [J/mol\ K]$: *universelle Gaskonstante*

Die Temperaturabhängigkeit kann mittels des Temperaturverschiebungsansatzes nach WLF sowie der Arrhenius-Gleichung berücksichtigt werden. So stellt das *Carreau-Arrhenius-Modell* eine Berechnung der Viskosität als Funktion von Schergeschwindigkeit und Temperatur dar. Die in dieser Arbeit verwendeten Materialdaten sind dem Anhang 9.1 zu entnehmen. Allen angewandten Berechnungsansätzen liegen, sofern nicht explizit angemerkt, die hier beschriebenen Annahmen zugrunde.

Neben den rheologischen Grundlagen, haben sich bei der Auslegung und Berechnung von Extrusionswerkzeugen weitere einschränkende Annahmen und Randbedingungen etabliert [Mic09]. Die für diese Arbeit Relevanten sind hierbei:

- Annahme einer vollständig ausgebildeten, stationären, laminaren Strömung.
- Annahme von Wandhaftung.
- Annahme von Inkompressibilität (sowie konstanter Dichte) und konstanter Wärmeleitfähigkeit.
- Trägheits- und Gravitationskräfte sind gegenüber Reibungs- und Druckkräften zu vernachlässigen.

2.4.2 Analytische Auslegungsansätze

Um die Berechnung von Strömungsvorgängen mittels der Navier-Stokes-Gleichungen für eine analytische Auslegung handhabbar zu gestalten, werden die zuvor präsentierten Annahmen zugrunde gelegt. Unter der Voraussetzung, dass sich weder der Betrag und die Richtung der Geschwindigkeit, noch die Dichte des Mediums (Inkompressibilität) ändert, kann die Impulsgleichung auf eine einfache Kräftebilanz der Druck- und Scherkräfte reduziert werden. Dieses strömungsmechanische Problem ist bei einem definierten Querschnitt lediglich von der Länge des Fließkanals abhängig.

Die Herleitung des Zusammenhangs zwischen Druck und Volumenstrom wird nachfolgend am Beispiel einer einfachen Rohrströmung erläutert. Die Kanalgeometrie ergibt sich aus dem Radius R und der Länge L. Aus der Kräftebilanz an einem Volumenelement ergibt sich unter Berücksichtigung der Annahmen für die Schubspannung:

$$\tau = \frac{\Delta p r}{2L} \qquad \text{Gl. 2.3}$$

$\tau\ [Pa]: Schubspannung$ $\Delta p\ [Pa]: Druckverlust$
$r\ [mm]: Kanalradius$ $L\ [mm]: Kanallänge$

Nach Gl. 2.3 ist die Schubspannung nicht von der Stoffgröße der Viskosität, sondern lediglich vom Querschnitt des Fließkanals und der Druckdifferenz abhängig. Durch die Verwendung der repräsentativen Viskosität ermöglicht das *Hagen-Poiseuillesche-Gesetz* nach Gl. 2.4 die Abbildung des strukturviskoses Materialverhalten.

$$\dot{V} = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8 \eta L} \qquad \text{Gl. 2.4}$$

$\dot{V}\ [m^3/s]: Volumenstrom$

Über diesen Zusammenhang ist die Berechnung von Volumenstrom (oder der sich daraus ergebende Massestrom) oder Druckverlust bei Bekanntheit der jeweiligen anderen Größe möglich.

Das Konzept der repräsentativen Viskosität geht auf Untersuchungen von Chmiel und Schümmer [ChS71] zurück. Unter der Annahme eines identischen Volumenstroms gibt es stets eine Stelle im Fließkanal, an der die Schergeschwindigkeit des strukturviskosen Fluids gleich der eines newtonschen ist. Wird an dieser Stelle die vom Fließverhalten unabhängige Schubspannung sowie die Schergeschwindigkeit eines newtonschen Fluids berechnet, kann die Viskosität für die vorliegende repräsentative Schergeschwindigkeit ermittelt werden [ChS71, Wor78]. Dieses Konzept wird in Abbildung 2.6 veranschaulicht.

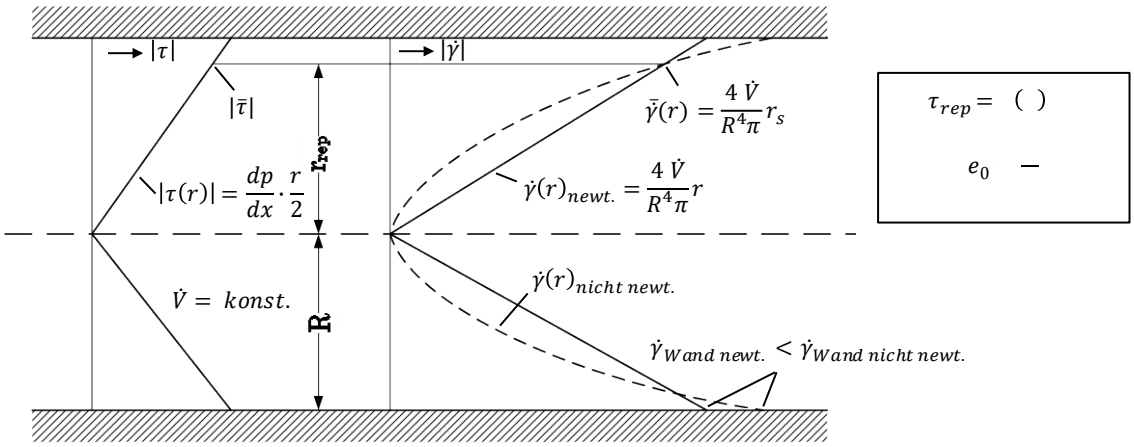


Abbildung 2.6: Bestimmung der repräsentativen Schergeschwindigkeit nach [Wor78, Sch18b]

Nach Wortberg [Wor78] ist die Lage des Schnittpunktes zwar grundsätzlich vom Fließverhalten des Mediums abhängig, kann aber für Kunststoffschmelzen in ausreichender Genauigkeit als konstant angenommen werden. Mit den aufgeführten Herleitungen ist es nunmehr möglich das Verhältnis von Druck und Durchsatz mit einfachen mathematischen Zusammenhängen zu beschreiben. In Tabelle 2.2 sind diese exemplarisch für einige Querschnitte zusammengefasst.

Tabelle 2.2: Gleichungen für die repräsentativen Schergeschwindigkeit und den Druckverlust für einfache Kanalquerschnitte [Mic09]

Geometrie	Druckverlust	Repräsentative Schergeschwindigkeit
kreisförmiger Querschnitt	$\Delta p = \frac{8\bar{\eta}\dot{V}}{\pi R^4} \cdot L$	$\bar{\dot{\gamma}} = \frac{4\dot{V}}{\pi R^3} \cdot \bar{e}_{\circ}; mit\ \bar{e}_{\circ} = 0{,}815$
kreisringförmiger Querschnitt	$\Delta p = \frac{8\bar{\eta}\dot{V}}{\pi R_a^2 (1-k^2)\bar{R}} \cdot L$	$\bar{\dot{\gamma}} = \frac{\dot{V}}{R_a^2(1-k^2)\bar{R}}$ $mit\ \bar{R} = R_a \sqrt{1 + k^2 - \frac{1-k^2}{\ln\left(\frac{1}{k}\right)}}\ und\ k = \frac{R_i}{R_a}$
schlitzförmiger Querschnitt	$\Delta p = \frac{12\bar{\eta}\dot{V}}{BH^3} \cdot L$	$\bar{\dot{\gamma}} = \frac{6\dot{V}}{BH^2} \cdot \bar{e}_{\square}; mit\ \bar{e}_{\square} = 0{,}772$

Die vollständige Herleitung dieser Zusammenhänge kann [Mic09, OsM12, MH+14, Sch18b] entnommen werden. Eine ausreichend genaue Dimensionierung einfacher Kanalquerschnitte, wie bspw. in der Primärverteilung eines Wendelverteilerwerkzeuges, ist über die Berechnung dieser Strömungsgrößen gegeben. Ferner sei an dieser Stelle angemerkt, dass sich die analytische Berechnung von Strömungsvorgängen in der Sekundärverteilung nicht vergleichbar trivial gestaltet. Ein gangbarer Ansatz stellt hierzu die Netzwerktheorie dar, welche in einem diskreten Wendelelement die Volumenstrombilanz berechnet. Über geeignete Ersatzgeometrien können auf Basis der zuvor genannten Zusammenhänge der Volumenstrom und der Druckverlust über den Fließwiderstand abgebildet, und ähnlich der *Kirchhoffschen Gesetze* der Elektrotechnik zu einem Netzwerk verknüpft, werden. Weiterführende Fachliteratur und Stand der Forschung zu diesem Ansatz ist mit [Pro72, Sti01, Rot01, Sei06, Blö06, Mic09, KCC11, Rau14, Hee15] gegeben.

2.4.3 Numerische Berechnungsmethoden zur Werkzeugauslegung

In Kapitel 2.4.2 wurden analytische Berechnungsansätze auf Basis der Navier-Stokes-Gleichungen vorgestellt, welche durch geeignete Annahmen und Vereinfachungen eine Lösung der Erhaltungsgleichungen erlauben. In diesem Differentialgleichungssystem können Druck und Strömungsgeschwindigkeit als Zustandsgrößen in zeitlicher und örtlicher Abhängigkeit ermittelt werden. Bei der mehrdimensionalen, numerischen Berechnung, auch *numerische Strömungsmechanik* (engl. Computational Fluid Dynamics, CFD) genannt, wird keine geschlossene Lösung mehr gesucht, sondern der Verlauf für diskrete Lösungsbereiche approximiert. Grundsätzlich wird ein dreidimensionales Strömungsproblem durch fünf Erhaltungsgleichungen beschrieben. Für weiterführende Grundlagen zur Herleitung der partiellen, nichtlinearen Differentialgleichungen wird auf [FeP99, Pas05, VeM07, Lec14] verwiesen. Diese können jedoch auch durch die folgende Modellgleichung ähnlicher Struktur ausgedrückt werden [Sch13].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \underbrace{\nabla \cdot \left(\rho \underline{u} \phi\right)}_{F_\phi} = \underbrace{\nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi)}_{D_\phi} + Q_\phi \qquad \text{Gl. 2.5}$$

$\rho\ [kg/m^3]$: *Dichte*
F_ϕ: *konvektiver Fluss*
D_ϕ: *diffusiver Fluss*
Q_ϕ: *sonstige Quellen*
ϕ: *Strömungsgröße*
$\underline{u}[m/s]$: *Strömungsgeschwindikeit*
$\Gamma\ [m^2 s^{-1}]$: *Diffusionskoeffizient*

Neben der Dichte und einer Strömungsgröße, bspw. Strömungsgeschwindigkeit oder Temperatur, wird der konvektive Fluss der Strömungsgröße, also der Transport von ϕ durch die Strömung, beschrieben. Der diffusive Fluss berücksichtigt Unterschiede in der räumlichen Verteilung der Strömungsgröße.

Durch die in Tabelle 2.3 aufgeführten Spezifizierungen, können anschließend die Erhaltungsgleichungen zur mathematischen Beschreibung der Strömung aufgestellt werden. Um ein lösbares Gleichungssystem zu bilden, müssen diese zudem durch thermodynamische Zustandsgleichungen und stoffspezifische Materialgesetze ergänzt werden, die die Eigenschaften des Fluids möglichst korrekt beschreiben [Sch13].

Tabelle 2.3: Spezifizierung in der allgemeinen Modellgleichung [Sch13]

	ϕ	D_ϕ	Q_ϕ
Kontinuitätsgleichung	1	**0**	**0**
Impulsgleichung	$\underline{u}$	$\nabla \cdot \tilde{\tau}$	$-\nabla p + \rho \underline{g}$
Energiegleichung	h	$-\nabla \cdot \underline{q}''$	$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\tilde{\tau} \cdot \underline{u})$

Die numerische Lösung setzt eine vorherige Diskretisierung des Fluidvolumens in finite, d.h. endliche, Abschnitte voraus. Die Genauigkeit der Annäherung ist dann direkt von der Dimension und der Diskretisierungsfeinheit abhängig. Bei den angewandten Methoden kann zwischen der *Finite-Differenzen-Methode* (kurz: FDM), *Finite-Elemente-Methode* (kurz: FEM) und *Finite-Volumen-Methode* (kurz: FVM) unterschieden werden. Gängige kommerzielle Simulationsprogramme, wie die verwendeten Systeme ANSYS fluent und SOLIDWORKS Flow Simulation, stellen FVM-basierte Solver bereit, weswegen weiterführend auf dieses Verfahren eingegangen wird. Die Diskretisierung erfolgt in ein Netz

aus polyederförmigen Elementen, die das Fluidvolumen vollständig abbilden. Hierbei werden üblicherweise strukturierte und unstrukturierte Netze verwendet, die aus Hexaeder- und Tetraederzellen bestehen. Die Softwarealgorithmen erstellen für die vorliegende Geometrie gemäß bestimmter Einstellungen die Netze nahezu automatisch. Im Mittelpunkt jeder Zelle werden bei der Berechnung die Strömungsgrößen ermittelt und gespeichert.

Im Gegensatz zu FDM- und FEM-Verfahren werden bei FVM-Verfahren die konvektiven und diffusiven Flüsse auf den Begrenzungsflächen einer Zelle ausgewertet. Somit kann sichergestellt werden, dass der Erhalt der Flüsse sowohl lokal (direkte Zellgrenzen) als auch global (gesamtes Strömungsgebiet) eingehalten wird [Sch13, Lec14]. Mathematisch bedeutet dies, dass die lokale Bilanz als Integral der Modellgleichung Gl. 2.5 über ein Kontrollvolumen (*KV*) gelöst wird.

$$\int_{KV} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi)\, dV = \int_{KV} \left[\nabla \cdot (\Gamma \nabla\phi) - \nabla \cdot \left(\rho \underline{u}\phi\right) + Q_\phi\right] dV \qquad \text{Gl. 2.6}$$

Die konvektiven und diffusiven Beiträge werden in Volumen- und Oberflächenintegrale (*OF*) umgewandelt. Term 1 beschreibt die zeitliche Änderung von $\rho\phi$ im Kontrollvolumen, während Term 2 und 3 jeweils den Konvektions- und Diffusionsstrom durch die Begrenzung des Kontrollvolumens angeben. Sonstige Quellen von ϕ werden in Term 4 berücksichtigt [Sch13].

$$\underbrace{\int_{KV} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi)\, dV}_{1} = \underbrace{\oint_{OF} (\Gamma\nabla\phi) \cdot \hat{n} dA}_{2} - \underbrace{\oint_{OF} \left(\rho \underline{u}\phi\right) \cdot \hat{n} dA}_{3} + \underbrace{\oint_{KV} Q_\phi dV}_{4} \qquad \text{Gl. 2.7}$$

Weiterführende Informationen zu gängigen Algorithmen für die Lösung der Differentialgleichungen sind der Fachliteratur zu entnehmen [FeP99, Pas05, VeM07, OBD09, SpA10, Sch13, Lec14, MMD16].

Ausgangspunkt für die konkrete Simulation stellen Benutzereingaben in Form von Randbedingungen dar, die das Strömungsproblem charakterisieren. Bei der Abbildung von Kunststoffströmungen durch Extrusionswerkzeuge lassen sich diese auf Folgende reduzieren:

- Definition der Eintrittsflächen (Massen- oder Volumenströme)
- Definition der Austrittsflächen (Umgebungsdruck am Austritt)
- Thermische Randbedingungen (sofern nicht isotherm)
- Berandungen (Wandhaftung)
- Symmetriebedingungen
- Schnittstellen zwischen Domänen

Die Funktionen von kommerziellen Simulationsprogrammen lassen sich zudem über anwendungsspezifische, durch den Benutzer definierte, Funktionen (engl. user-defined function, UDF) erweitern, um bspw. ein spezielles Materialverhalten, oder konkrete Temperaturprofile exakt zu definieren.

2.5 Grundlagen der additiven Fertigung

Die vorliegende Arbeit verknüpft die Werkzeugauslegung für die Kunststoffextrusion mit den Fertigungsmethoden der additiven Fertigung. Dementsprechend wird eine kurze Einführung zur Einordnung und dem Ablauf des angewandten Fertigungsverfahrens gege-

ben. Grundsätzlich werden Fertigungsverfahren in der DIN 8580 [DINa] nach der Schaffung einer Ausgangsform, Veränderung einer Form oder der Veränderung von Stoffeigenschaften eingeteilt. Additive Fertigungsprozesse (engl. Additive Manufacturing, AM) erlauben diese strikte Einteilung nicht, da charakterisierende Eigenschaften der genannten Gruppen zeitgleich vorliegen [Kum18]. Mittlerweile wird die additive Fertigung jedoch als urformendes Verfahren in der Din 8580 aufgeführt. DIN EN ISO ASTM 52900 [DINb] lässt diesbezüglich aufgrund der Einteilung in umformende, subtraktive und additive Formgebung eine eindeutigere Einteilung zu. Letztere unterteilt die AM-Prozesse in sieben ein- oder mehrstufige Prozesse, basierend auf dem Ausgangsmaterial. Mit der VDI Richtlinie 3405 [VDIa] sollen die additiven Fertigungsverfahren nunmehr von den Konventionellen abgegrenzt werden und speziell in Hinblick auf anbieterspezifische Begrifflichkeiten oder Marketingbezeichnungen eine einheitliche Nomenklatur hergestellt werden. Die Richtlinie gliedert die Verfahren in elf kommerziell etablierte Prozesse, bei denen ein Bauteil durch Hinzufügen eines Ausgangsmaterials oder einen Phasenübergang vom flüssigen oder pulverförmigen Material in einen massiven Körper entsteht. Detailliert wird im Rahmen dieser Arbeit lediglich das Laser-Strahlschmelzen betrachtet, da es während der Umsetzung als Verfahren angewendet wird. Von den etablierten additiven Fertigungsverfahren zeigt es die beste Eignung zur Optimierung von schmelzeführenden Kanälen und wird bereits im Kunststoffspritzguss erfolgreich zur konturnahen Kühlung von Formteilen eingesetzt. Grundlagen zu den weiteren Verfahren, sowohl kunststoff- als auch metallpulverbasiert, sind entsprechender Literatur zu entnehmen [ZiA12, GRS10, Geb13, Zäh13, VDIa, GKT16, KKK16, ChL17, Kum18].

Eine grundsätzliche Charakterisierung der Prozesskette nach VDI Richlinie 3405 geschieht für AM-Prozesse in drei Schritten nach Abbildung 2.7. Der *Pre-Prozess* umfasst alle vorgelagerten Arbeiten, wie die Aufbereitung der Geometriedaten, die Überführung in ein Austauschformat, die Triangulierung der Kontur und die Schichtdatengenerierung (engl. slicing). Der *In-Prozess* beschreibt den tatsächlichen Bauprozess und der *Post-Prozess* alle nachgelagerten Arbeiten. Hierzu gehören die Entfernung von Pulverrückständen, das Auslösen etwaiger Stützkonstruktionen, aber auch mögliche Nachbehandlungsprozesse.

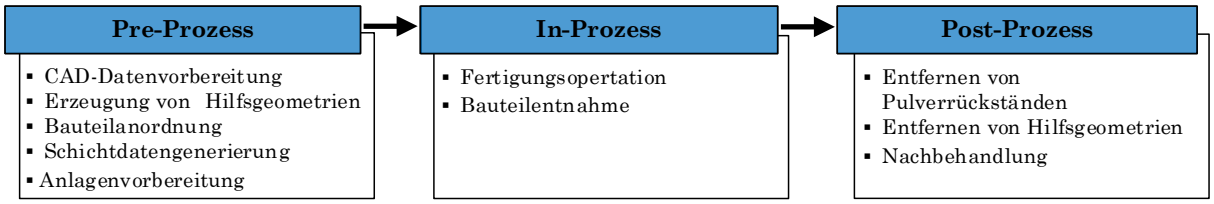


Abbildung 2.7: Einteilung der Prozesskette bei AM-Prozessen nach [VDIa]

Es ist festzuhalten, dass sich durch den schichtweisen Aufbau mechanisch-technologische Bauteileigenschaften einstellen, die zudem eine Richtungsabhängigkeit aufweisen [Seh10, Geb13, RSZ17]. Diese Eigenschaften werden unmittelbar bei der Schichterstellung definiert und somit haben die konkreten Maschinen-, Werkstoff- und Prozessparameter direkten Einfluss auf die Bauteilqualität [VDIa]. Bauteileigenschaften und -qualitäten sind somit stets unter Berücksichtigung dieser Parameter zu betrachten.

Die Anwendungsgebiete von AM-Bauteilen waren bisher vermehrt im Bereich der Produktentwicklung und des Prototypenbaus angesiedelt. Hohe Flexibilität bei der Herstellung in Kombination mit den kurzen Zeitspannen vom Entwurf zum fertigen Produkt bieten die Möglichkeit der endproduktnahen Mustererstellung [Zäh13]. Dennoch bietet gerade das Laser-Strahlschmelzen aufgrund der mit konventionellen Verfahren vergleich-

baren Materialeigenschaften und -spektren das Potenzial zur Herstellung von Endprodukten. Durch den konstruktiven Mehrwert aufgrund neuer Freiheitsgrade verschiebt sich daher der Einsatzbereich in den letzten Jahren vermehrt auf Kleinserienfertigungen.

2.5.1 Verfahrensprinzip des Laser-Strahlschmelzens

Aufbauend auf dem grundlegenden Verfahrensablauf von AM-Prozessen wird nachfolgend spezifisch die Prozesskette des Laser-Strahlschmelzens, sowie die zugrundeliegenden Wirkprinzipien veranschaulicht. Das Verfahren wird nach VDI Richtlinie 3405 als schichtweiser Bauprozess charakterisiert, bei dem ein metallisches, pulverförmiges Ausgangsmaterial durch einen Laser lokal aufgeschmolzen wird und anschließend beim Erstarren verschweißt.

Der grundsätzliche Aufbau kommerzieller Laser-Strahlschmelzanlagen ist in Abbildung 2.8 skizziert. Neben der von der Umgebung abgeschlossenen *Prozesskammer,* bestehen diese aus einem *Laser* und dem *Scannersystem*, der *Steuerung* mit dem Steuerungsrechner, sowie einem *Filtersystem* zur Einstellung inerter Bedingungen innerhalb der Prozesskammer und Absaugung von Metallkondensat (nicht in der Abbildung berücksichtigt). Dieses entsteht, da bei dem lokalen Phasenübergang das Ausgangsmaterial teilweise verdampft.

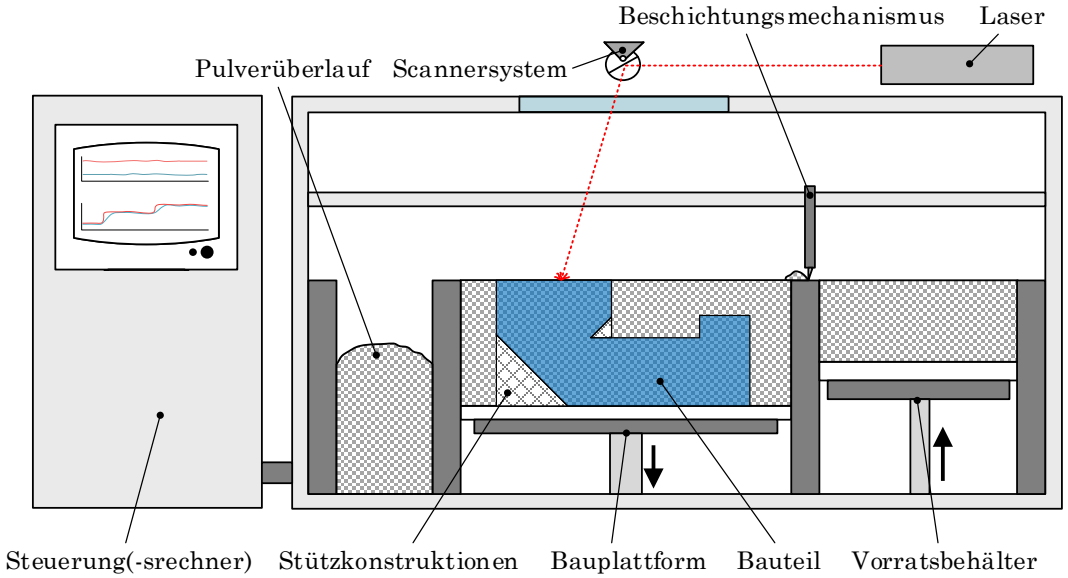


Abbildung 2.8: Schematischer Aufbau einer Laser-Strahlschmelzanlage nach [ChL17]

Auf dem Steuerungsrechner laufen alle Prozessschritte ab, welche nach Abbildung 2.7 in den Pre-Prozess eingegliedert werden. Die Modelldaten werden aufbereitet und die Prozessparameter entsprechend eingestellt. Über die Steuerung resultieren diese Informationen schließlich in Aktionen in der Prozesskammer. Gleichzeitig werden Sensordaten zurück an den Steuerungsrechner übermittelt. Zentrales Element der Prozesskammer ist die höhenverstellbare Bauplattform, auf der die Geometrie auf einer befestigten Substratplatte aufgebaut wird. Das Ausgangmaterial wird über einen ebenfalls höhenverstellbaren Vorratsbehälter bereitgestellt und durch einen Beschichtungsmechanismus für jede Bauschicht aufgetragen. Die zum Aufschmelzen notwendige Temperaturerhöhung wird durch einen Faserlaser eingebracht, wobei der Laserstrahl definiert aufgeweitet, fokussiert und durch ein Scannersystem umgelenkt wird.

Der eigentliche Verfahrensablauf (Abbildung 2.9) kann durch sich wiederholende Zyklen beschrieben werden. Zunächst wird durch den Beschichtungsmechanismus eine definierte Schicht des Metallpulvers aufgebracht. Im ersten Schritt geschieht dies auf der Substratplatte, in allen weiteren Schritten auf der bis dahin erstellten Geometrie. Überschüssiges Material wird im Pulverüberlauf gesammelt und kann aufbereitet werden. Anschließend wird der fokusierte Laserstrahl durch das Scannersystem abgelenkt und die Pulverschicht belichtet. Dies führt zu einer rapiden lokalen Zufuhr von Wärmeenergie und resultiert in einem Phasenwechsel des Metallpulvers. Durch anschließende Abkühlung bei Kühlraten von 10^3 -10^6 K/s kommt es zu einem Verschweißen des Materials [Wag02]. Die Führung des Lasers folgt dabei den zuvor definierten Spuren des Belichtungsmusters und beschreibt letztendlich die Bauteilkontur. Nachdem die gesamte Bauteiloberfläche der Schicht belichtet wurde, wird die Bauplattform erneut um die definierte Schichtdicke abgesenkt und der Ablauf wiederholt sich, bis das Bauteil fertiggestellt ist.

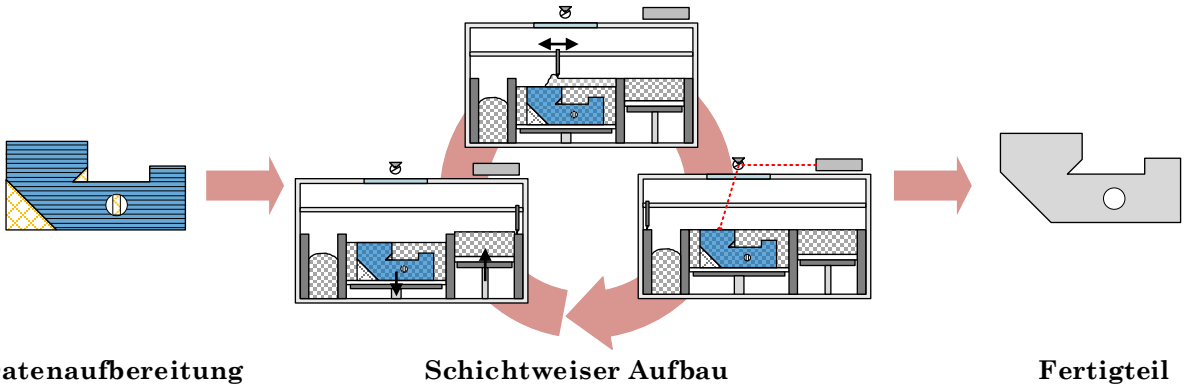


Abbildung 2.9: Prinzipieller Verfahrensablauf des Laser-Strahlschmelzens

Übliche minimale Schichtdicken dieses Verfahrens liegen bei $20 - 60\ \mu m$, je nach Oberflächenanforderungen und Material [Geb13]. Nachdem der Bauprozess abgeschlossen ist, kann die Substratplatte aus der Prozesskammer entnommen und das Bauteil von der Substratplatte entfernt werden. Die geschieht zumeist durch trennende Nacharbeit in Form von Sägen oder Erodieren. Anschließend wird überschüssiges Pulver aus dem Bauteil entfernt. Pulverreste setzten sich z.B. in Bohrungen, Hinterschnitten und Hohlräumen ab. Nicht aufgeschmolzenes Pulver kann gesiebt und dem Verfahren erneut zugeführt werden. Anhaftende Pulverreste werden üblicherweise durch mechanisch-abrasive Strahlprozesse entfernt. Dies führt auch zu einer Einebnung der Oberflächentopologie.

Verfahrensbedingt sind bei gewissen geometrischen Ausprägungen Stützkonstruktionen (engl. support) notwendig um eine ausreichende Wärmeabfuhr und die Reduzierung von Eigenspannungen zu gewährleisten. Diese sind in Abbildung 2.9 schematisch in Gelb dargestellt und müssen im Post-Prozess entfernt werden. In Kapitel 2.5.2 wird dies erneut aufgegriffen. Sofern spezifische Anforderungen an die Oberflächenrauheit bestehen, werden weitere Nachbehandlungsprozesse nachgeschaltet. Funktionsflächen können üblicherweise durch konventionelle Verfahren (Bohren, Drehen, Fräsen) nachbearbeitet werden. Außerdem werden Wärmebehandlungen durchgeführt, wenn eine Erhöhung der mechanischen Widerstandsfähigkeit oder der Abbau thermisch-induzierter Eigenspannungen erforderlich ist.

2.5.2 Geometrische Restriktionen und Einflussgrößen

Während für konventionelle spanabhebende Fertigungsverfahren detaillierte Gestaltungs- und Konstruktionsrichtlinien bestehen, sind diese Ansätze nicht ohne weiteres auf additive Fertigungsverfahren anwendbar. Obgleich die „unbegrenzte Konstruktionsfreiheit“ [BeK13], die der additiven Fertigung teilweise zugesprochen wird, verfahrenstechnisch nicht ohne weiteres umsetzbar ist, bieten diese Fertigungsverfahren dennoch Potentiale bei der Gestaltung. Im Rahmen dieses Kapitels wird auf geometrische Restriktionen der additiven Fertigung, speziell dem Laser-Strahlschmelzen, eingegangen, insofern diese Relevanz für den vorliegenden Anwendungsfall aufweisen. Grundsätzlich wird hierzu z.B. auf [GRS10, BeK13, Geb13, GKT16, LaL17, RSZ17, Kum18] verwiesen. Neben den aufgeführten Konstruktionsrichtlinien und den sich daraus ergebenden geometrischen und verfahrenstechnischen Restriktionen für die Bauteilgestaltung ist die Definition von Konstruktionsregeln zudem Inhalt vieler Forschungsvorhaben [HoW13, Seh10, WeW12, LL+12, Zäh13].

Innerhalb der VDI-Richtlinie 3405 Blatt 3 [VDIb] werden Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung von AM-Bauteilen ausgesprochen, diese werden an geeigneten und ungeeigneten Gestaltungsmöglichkeiten aufgezeigt. Expliziter wird von [LaL17] auf Emmelmann [KHE15] und Zimmer [ZiA12] verwiesen, die Strukturen anhand konkreter Grenzwerte charakterisieren. Abbildung 2.10 zeigt diese am Beispiel relevanter Gestaltungsausprägungen für innere Strukturen.

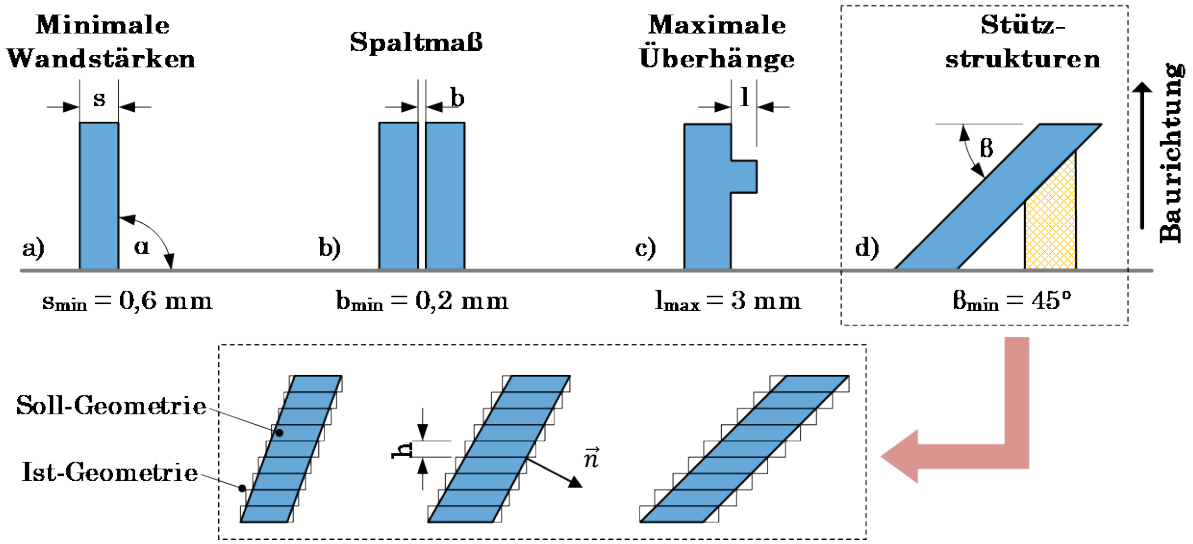


Abbildung 2.10: Gestaltungsrichtlinien für innere Strukturen nach [LaL17] und Einfluss des Treppenstufeneffekts

Für die vorliegende Arbeit lassen sich die vier gezeigten Kategorien ableiten. Zu nennen sind minimale Wandstärken, die einen Wert von $s_{min} = 0{,}6\ mm$ nicht unterschreiten sollten, sowie Spaltmaße mit einem Wert von mindestens $b_{min} = 0{,}2\ mm$. Überhänge ohne den Bedarf von Stützkonstruktionen sollten nicht länger als $l_{max} = 3\ mm$ ausgeführt werden. Die Notwendigkeit von Stützkonstruktionen stellt die kritischste Gestaltungsrichtlinie, speziell für medienführende innere Kanäle, dar. Sofern innere Stützkonstruktionen nach der Fertigung nicht ausgelöst werden können, aber gleichzeitig den Medienfluss beeinflussen, sollte es Ziel der Gestaltung werden, auf diese Strukturen zu verzichten. Geometrieabhängig kann dies jedoch zu Fehlstellen aufgrund der reduzierten Dichte des aufgeschmolzenen Materials führen. Als Grenzwert für den Einsatz von Stützkonstruktionen

hat sich ein Aufbauwinkel von $\beta = 45°$ etabliert. Weitere geometrische Restriktionen lassen sich aus überhängenden Flächen ableiten. Prinzipbedingt haben alle schichtbasierten Fertigungsverfahren den sogenannten Treppenstufeneffekt gemein, welcher aus der Bauteilapproximation bei der Schichtdatengenerierung resultiert. Die Detailansicht in Abbildung 2.10 d) zeigt die Abweichung der Soll- und der Ist-Geometrie durch diese Annäherung. Grundsätzlich lässt sich ein Zusammenhang von Schichtdicke, Oberflächenqualität und Fertigungszeit festhalten [BB+11]. Zudem beeinflussen überhängende Strukturen diese Abweichung negativ. Um dies zu erläutern wird zunächst die Definition von *Upskin-* und *Downskin-Flächen* angeführt. Diese unterscheiden sich in der Ausrichtung des Normalvektors $\vec{n}$ in Bezug auf die Baurichtung (Abbildung 2.10). Überhängende Flächen, mit Normalvektor in Richtung Bauplattform, werden hier als Downskin-Flächen bezeichnet. Der jeweilige *Upskin-* bzw. *Downskin-Winkel* beschreibt den Grad des Überhangs, zwischen der Fläche und der Bauplattform [VDIb].

Mit dieser Ausprägung sind weiterführend zwei Effekte verknüpft, die die geometrische Gestaltung restringieren. Zunächst führen überhängende Flächen zu höheren Oberflächenrauheiten. Dieses Phänomen lässt sich auf den erläuterten Treppenstufeneffekt zurückführen. Wie in Abbildung 2.10 erkenntlich, tritt dieser verstärkt an Flächen mit kleinen Downskin-Winkeln auf und steigt mit zunehmender Schichtdicke. Analog nimmt die Oberflächenrauheit in diesen Bereichen zu. Des Weiteren beeinflusst die Bauteilgeometrie, speziell in Überhangsbereichen, die Wärmeleitungsbedingungen. Das Metallpulver weist eine um drei Größenordnungen geringere Wärmeleitfähigkeit als verfestigtes Material auf [Mei99]. Somit wird der Großteil der eingebrachten Wärmeenergie durch das bereits verfestigte Bauteil abgeführt. Bei überhängenden Geometrien lässt sich jedoch eine vergrößerte Kontaktfläche zum Pulverbett feststellen, wodurch die Wärmeabfuhr reduziert wird und sich das Schmelzebad im Umkehrschluss ausdehnt. Es bilden sich sphärische Strukturen, Pulveranhaftungen oder Schmelzeausläufer, welche in der Literatur als *Balling-Effekt* bezeichnet werden. Neben Fehlstellen im Bauteil kann dies zu gesteigerten Oberflächenrauheiten und lokalen Bauteilüberhöhungen führen, die Prozessabbrüche durch das Blockieren des Beschichtermechanismus nach sich ziehen können. Weiterführende Informationen zu den physikalischen Grundlagen und dem Aufschmelzverhalten in Laser-Strahlschmelzprozessen fasst Kleszczynski in [Kle18] zusammen. Ferner werden Maßnahmen zur Vermeidung von Balling-Effekten postuliert.

Es gilt zudem zu beachten, dass der prozessseitigen Beeinflussung der Oberflächentopologien von AM-Bauteilen, allein schon durch die üblichen Partikelgrößen gängiger Pulvermaterialien, Restriktionen gesetzt sind. Außerdem besteht keine definierte Trennung zwischen aufgeschmolzenem und losem Pulvermaterial und es kommt zu Pulveranhaftungen, die die Oberflächenrauheit beeinflussen. Hinzu kommen die vorab beschriebenen Treppenstufeneffekte und die Ausrichtungsabhängigkeit der sich einstellenden Oberflächenrauheiten zur Aufbaurichtung bzw. zum Aufbauwinkel [Geb13]. Während konventionelle Fertigungsverfahren für Fließkanaloberflächen Oberflächenrauheiten von $R_z < 2\ \mu m$ erreichen, sind je nach Ausrichtung bei AM-Prozessen Werte von $R_z = 20 - 50\ \mu m$ möglich [EOS20]. Somit werden neben entsprechenden Belichtungsstrategien [YaK11, Lip18] zumeist Nachbehandlungsprozesse notwendig, welche sich den mechanisch-abrasiven (z.B. Strahlen, Druckfließläppen) oder elektrochemischen Verfahren (z.B. Plasmapolieren, galvanische Verfahren) zuordnen lassen. Zu den gängigsten Nachbehandlungsverfahren zählt das Strahlen, welches allerdings auf eine direkte Zugänglichkeit der zu bearbeitenden Oberfläche angewiesen ist. Bei einfachen Probenkörpern, die eine gute Strahlbarkeit erlauben, war im Rahmen des DFG-Vorhabens (WO-302/61-1 bzw. WI 2118/11-1), in welches die Entstehung dieser Arbeit eingegliedert ist, eine Reduktion der Oberflächenrauheit um bis zu *75 %* möglich. Bei innenliegenden Kanälen zeigen mechanisch-abrasive

Verfahren wie das Druckfließläppen oder elektrochemische Verfahren wie das Elektropolieren bzw. galvanisch beschichtende Verfahren vielversprechende Ergebnisse. Kleszczynski führt hierzu Untersuchungen von Löber et al. an [LF+13], bei denen für den Werkstoff 316L (1.4404) durch die Kombination von Sandstrahlen und Elektropolieren Oberflächenrauheiten von $R_a = 3{,}6\ \mu m$ erreicht werden konnten.

Verglichen mit konventionellen Fertigungsverfahren muss bei der additiven Fertigung das hohe Maß an Wechselwirkungen von Prozessparametern als Einflussgröße berücksichtigt werden. Hierbei werden Anlagen-, Werkstoff- und Kernprozessparameter betrachtet. Letztere lassen sich über die *Laserleistung*, den *Bahnabstand*, die *Scangeschwindigkeit* und die *Schichtdicke* ausdrücken und können durch die Kenngröße der *Volumenenergiedichte* miteinander verknüpft werden. In [Kle18] ist ein Überblick über das Zusammenspiel dieser Parameter und deren Einfluss auf den Prozess, sowie der Verweis auf aktuelle Forschungen zu dieser Thematik gegeben. Auch auf den Einfluss von Scanstrategien und die Pulvermorphologie wird verwiesen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bei der Gestaltung und Fertigung von AM-Bauteilen ein nennenswertes Potenzial in der Bauteilgestaltung besteht und übliche Fertigungsrestriktionen nicht zwingend gelten. Dennoch gelten auch für diese Fertigungsprozesse zu beachtende geometrische und verfahrenstechnische Randbedingungen, sowie eine Vielzahl qualitätsentscheidender Einflussgrößen. Aufgrund der komplexen Wechselwirkungen dieser, ist zudem die ganzheitliche Prozesskette inklusive anwendungsabhängiger Nachbearbeitungen zu betrachten. An dieser Stelle wurde speziell auf die geometrischen Restriktionen eingegangen, sowie ein kurzer Überblick über die anlagenseitigen Einflussgrößen gegeben. Kumke [Kum18] fasst die Restriktionen von additiven Fertigungsverfahren allgemeiner in folgenden Kategorien zusammen:

- Fertigungstechnologie und Werkstoffe (Kapitel 2.5.3)
- Wirtschaftlichkeit
- Konstruktion
- Standardisierung

2.5.3 Materialien und -eigenschaften

Für die Verwendung in Laser-Strahlschmelzprozessen eignet sich grundsätzlich jede Metalllegierung, die auch schweißbar ist. Es kann in für den Prozess optimierte Pulver von Maschinenherstellern, sogenannte proprietäre Pulver, und handelsübliche Pulver unterschieden werden. Eine Meinung zu den jeweiligen Vor- und Nachteilen ist in [Geb13] zusammengefasst.

Aus metallurgischer Sicht lässt sich eine Mikrostruktur von AM-Bauteilen feststellen, welche nicht mit konventionell verarbeiteten Metallen vergleichbar ist. Begründet wird dies im Verfahrensablauf. Die kleinen Laserstrahldurchmesser von $30 - 500\ \mu m$ führen lokal in sehr kleinen Flächenbereichen Energie zu und schmelzen das Material in sehr kleinen Zeitgradienten auf. Durch die Scangeschwindigkeit wird ein kontinuierliches Fortschreiten des sich ausbildenden Schmelzebades beobachtet. In Kombination mit den hohen Abkühlgradienten bildet sich so für AM-Bauteile eine charakteristische Mikrostruktur aus [KB+10, Thi14]. Zusätzlich lässt sich hieraus das Auftreten von Eigenspannungen im Material erklären, was auch zu Bauteilverzug und Rissbildungen führen kann. Weiterführende Literatur zu diesem Thema wurde bspw. von Kleszczynski [Kle18] zusammengefasst. Es wird auch das Auftreten von Restporosität durch Bindefehler diskutiert.

Für den industriellen Einsatz additiv gefertigter Bauteile ist zudem ein Nachweis über die statische und dynamische Festigkeit und die damit verknüpften Materialeigenschaften interessant. Ein konventioneller Festigkeitsnachweis gestaltet sich bei additiv gefertigten Produkten schwierig, da einerseits Materialdaten fehlen und andererseits die gefertigten Produkte ein anisotropes Verhalten in Abhängigkeit der Bauausrichtung aufweisen. Dies konnte Sehrt bereits anhand von Untersuchungen zur statischen Festigkeit nachweisen [Seh10]. Zudem ist eine starke Streuung der ermittelten Festigkeitskennwerte festzustellen. Zu dynamischen Festigkeitseigenschaften gibt es weniger Erkenntnisse, allerdings wurde in der zuvor genannten Quelle für den hier verwendeten Werkstoff eine vergleichbare Dauerfestigkeit zu konventionellen Fertigungsrouten nachgewiesen. Zu berücksichtigen ist jedoch die Mikrostruktur laser-strahlgeschmolzener Bauteile, da die Restporosität sowie Fehlstellen eventuelle Risseinleitungen begünstigen können.

Die genannte Streuung der Festigkeitskennwerte, sowie das richtungsabhängige Materialverhalten lässt sich auch in den Materialdatenblättern der Pulvermaterialien wiederfinden. Ein Auszug aus dem Datenblatt des in der vorliegenden Arbeit verwendeten Pulvers ist in Tabelle 2.4 dargestellt.

Tabelle 2.4: Auszug der mechanischen Eigenschaften des Edelstahlpulvers EOS GP1 [EOS20]

	wie gebaut (min / typisch)	**nach Tempern bei 650 °C für 1 Stunde (typisch)**
Zugfestigkeit nach MPIF 10 (MPa)		
- in horizontaler Richtung (XY)	$850 / 930 \pm 50\ MPa$	$1100\ MPa$
- in vertikaler Richtung (Z)	$850 / 960 \pm 50\ MPa$	$980\ MPa$
Streckgrenze (R_{el}, untere Streckgrenze)		
- in horizontaler Richtung (XY)	$530 / 586 \pm 50\ MPa$	$590\ MPa$
- in vertikaler Richtung (Z)	$530 / 570 \pm 50\ MPa$	$550\ MPa$
E-Modul	$170 \pm 30\ GPa$	$180\ GPa$

Es wird deutlich, dass übliche Materialkennwerte jeweils ohne thermische Nachbehandlung und nach einer Wärmebehandlungsroutine angegeben sind. Zudem wird eine Unterscheidung in Abhängigkeit der Baurichtung gegeben, die in minimale und typische Daten innerhalb eines Toleranzfeldes angegeben sind. Dies zeigt erneut, dass die Vergleichbarkeit der mechanisch-technologischen Eigenschaften nur unter Berücksichtigung komplexer Wirkzusammenhänge aus Material und Prozess möglich ist.

2.6 Aktuelle Ansätze der Werkzeugauslegung und Zwischenfazit

Die Ausführungen zum Stand der Technik geben einen Einblick in die Werkzeugauslegung von Blasfolienextrusionswerkzeugen. Komplexe Strömungsvorgänge lassen sich sowohl über analytische Berechnungsansätze annähern oder aber – wie es heutzutage zunehmend Stand der Technik ist – durch numerische Strömungssimulationen abbilden. Nach wie vor ist der Auslegungsprozess jedoch stark durch das Wissen des Konstrukteurs geprägt, der als Bindeglied zwischen strömungsmechanisch sinnvoller Gestaltung und fertigungstechnisch umsetzbarer Konstruktion fungiert. In einem manuell-iterativen Prozess wird die für den Anwendungsfall optimale Werkzeuggestalt als CAD-Modell ausgelegt und durch CFD-Simulationen verifiziert. Im Kern basiert diese Gestalt jedoch immer

noch auf einem Konzept der 1960er Jahre und dem damaligen Stand der Technik der Fertigungsverfahren. Aus diesen resultiert auch der für Wendelkanäle typische Wappenquerschnitt. In diesem Kapitel werden zunächst einige aktuelle Ansätze der Forschung zur Werkzeugauslegung vorgestellt und anhand der Potenziale der additiven Fertigung der Bedarf nach einer Erweiterung dieser Auslegungsansätze begründet.

Aktuelle Ansätze der Forschung zeigen vermehrt die Potenziale der automatisierten Werkzeugdimensionierung sowohl für Profilwerkzeuge [Kau04, MiK04, CS+04, HW+13] als auch für Wendelverteilerwerkzeuge [Cre08, MeL12, HoE12]. Dieser Ansatz wird auch im Rahmen der Arbeit von Saul [Sau11] aufgegriffen und erfolgreich am Beispiel eines Wendelverteilwerkzeuges automatisiert umgesetzt. Ausgangspunkt stellt ein parametrisches, bereits fertigungsgerecht gestaltetes 3D-CAD-Modell dar, welches auf Basis eines genetischen Optimierungsverfahrens mittels FVM-Simulationen untersucht wird. Zur Bewertung des Optimierungsproblems wird eine Summenfunktion aus sechs spezifisch gewichteten Kriterien aufgestellt. Als Optimierungsparameter werden der Spaltweiten- und Wendeltiefenverlauf unter Berücksichtigung unterschiedlicher Kunststoffmaterialien zur Gewährleistung der Betriebspunktunabhängigkeit genutzt. Unabhängig von der konkreten Herangehensweise zur Lösung des Optimierungsproblems haben diese Ansätze gemein, dass die optimierte Geometrie nachgeschaltet in eine fertigungsgerechte Form überführt werden muss. Te Heesen [Hee15] entwickelt aufbauend auf den Ergebnissen von Saul einen ganzheitlichen Ansatz zur Dimensionierung und Optimierung von Extrusionswerkzeugen. Er erweitert die von Saul entwickelte Methodik und bildet die gesamte Prozesskette zur Werkzeugentwicklung durch entsprechende Berechnungsansätze ab. Auf Basis einer initialen, analytisch vorausgelegten Geometrie und unter Berücksichtigung konstruktiver und fertigungstechnischer Restriktionen im parametrisierten CAD-Modell, ist die vollautomatisierte Optimierung innerhalb einer Variationsbandbreite der Gestaltungsparameter möglich. Der Ansatz umfasst Randbedingungen für die Vorauslegung und führt Qualitäts- und Ausschlusskriterien für die Bewertung der automatisierten Optimierung ein. Durch den Verzicht auf die Minimierung des Druckverlusts als Qualitätskriterium wird der Zielgrößenkonflikt mit der minimalen Wandschubspannung in diesem Ansatz vermieden (siehe Kapitel 3.2.1). Anhand zweier Grundgeometrien konnte te Heesen die Allgemeingültigkeit seines Ansatzes nachweisen und die numerischen Ergebnisse durch experimentelle Erprobungen validieren. Weiterführende Informationen zu Ansätzen zur automatisierten Werkzeugauslegung werden in [Hee15] übersichtlich zusammengefasst und an dieser Stelle nicht erneut aufgegriffen.

Gleichzeitig bieten additive Fertigungsverfahren Potenziale, deren Erschließung Kumke [Kum18] durch die Verknüpfung von *Eigenschaften*, *Hebeln* und *Nutzerversprechen* charakterisiert. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2.11 dargestellt, wobei in der vorliegenden Arbeit aufgegriffene Aspekte blau hinterlegt sind. Relevante Eigenschaften gliedern sich in *Additiv*, also die Freiheitsgrade des Verfahrensprinzips, *Digital*, wobei das CAD-Model die direkte Eingangsgröße für die Anlage darstellt, und *Direkt*, d.h. dass alle Arbeitsschritte auf derselben Maschine durchgeführt werden können (Nachbehandlungen ausgenommen). Damit verknüpft sind die sich ergebenden *konstruktiven Freiheiten*, eine *Reduktion des Rohstoffmaterials*, *Entfall produktspezifischer Werkzeug*e und eine *Prozessintegration*. Neben den genannten Möglichkeiten der Herstellung „nicht montierbarer" Geometrien, kann durch den additiven Aufbau Rohstoff eingespart werden. Die Bauteilgestalt muss nicht durch abtragende Verfahren sukzessive angenähert werden, da nur benötigtes Material aufgeschmolzen wird. Während sich bei konventionellen Herstellungsverfahren die Investition in spezielle Werkzeuge und Hilfsmittel erst bei gewissen Stückzahlen rentiert, sind die Herstellkosten additiv gefertigter Bauteile nahezu stückzahlunabhängig und skalieren sich nur mit dem Bauteilgewicht / -volumen. Schließlich

ermöglichen additive Verfahren eine Prozessintegration, da Arbeitsschritte bzw. Geometrien, die konventionell einen Maschinenwechsel benötigen würden innerhalb einer Anlage umgesetzt werden können.

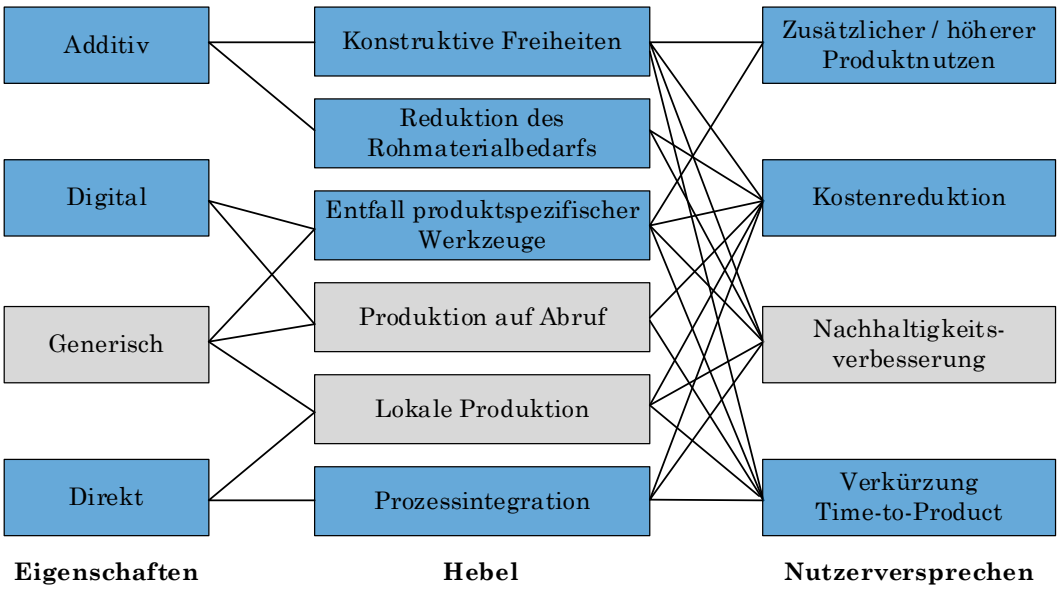


Abbildung 2.11: Ableitung von Potenzialen aus den Eigenschaften additiver Fertigung (nach [Kum18] auf Grundlage von [BLR13])

Die Kombination dieser Eigenschaften und Hebel birgt gewisse Nutzerversprechen, die möglichen Anwendern einen konkreten Mehrwert, und dementsprechend auch Potenziale, bieten können. Hierzu zählen zusätzlicher bzw. *höherer Produktnutzen*, *Kostenreduktion* und Verkürzung der *Time-to-Product*. Neben prozessspezifischen Funktionsintegrationen, Leichtbauweisen oder weiteren Steigerungen des Produktnutzens ist das Fertigungsverfahren durch die stückzahlunabhängigen Kosten für Anwendungen mit geringer Losgröße interessant. In diesem Kontext wir häufig auch der Begriff der Individualisierung oder *Mass Customization* eingebracht. Schließlich ergibt sich eine Reduzierung der Herstellungszeit durch die zuvor genannte Prozessintegration. Ziel der Anwendung additiver Fertigungsverfahren sollte es also sein, die spezifischen Eigenschaften dieser Verfahren und ihrer Hebel für den Herstellungsprozess zu bedienen, um durch Nutzerversprechen einen Mehrwert gegenüber konventionellen Herstellungsverfahren zu generieren.

Werden die beiden beschriebenen Forschungsfelder aufgegriffen, ergibt sich der Bedarf den Stand der Technik um neue Werkzeugansätze zur effizienten Auslegung von Blasfolienextrusionswerkzeugen auf Basis aktueller fertigungstechnischer Möglichkeiten zu erweitern. Vor diesem Hintergrund ergeben sich offensichtliche Synergieeffekte zwischen der additiven Fertigung und dem Dimensionierungsprozess von Extrusionswerkzeugen. Die Restriktionen konventioneller Fertigung entfallen, indem „nicht montierbare“ Werkzeuge auf Basis des CAD-Modells gefertigt werden. Es erschließt sich die Möglichkeit die Auslegung der schmelzeführenden Bereiche eines Extrusionswerkzeuges thermo-rheologisch bestmöglich innerhalb definierter geometrischer Randbedingungen auszulegen.

Die Recherche zeigt, dass die additive Fertigung von Extrusionswerkzeugen und somit die Integration der fertigungstechnischen Vorteile dieses Verfahrens in den Werkzeugbau zum aktuellen Zeitpunkt noch wenig Beachtung findet. Zur Begründung ist sicherlich auch die erreichbare Oberflächenqualität von AM-Bauteilen aufzuführen. Kunststoffpro-

dukte unterliegen hohen optischen und haptischen Anforderungen und ein entscheidender Einflussfaktor auf diese ergibt sich aus der Werkzeugoberfläche und der Schmelze Wand-Interaktion. Dementsprechend ergibt sich die Forderung der Oberflächennachbehandlung der schmelzeführenden Bereiche, was sich bei innenliegenden Kanälen mitunter anspruchsvoll gestaltet. Untersuchungen des Einflusses der Oberflächenqualität bei SLM-gefertigten Extrusionswerkzeugen wurden von Hopmann, Yesildag et al. [HY+15] durchgeführt. Im Rahmen der Untersuchungen wurde ein numerisch optimiertes Werkzeug zur Herstellung von L-Profilen sowohl konventionell als auch additiv gefertigt. Als Optimierungsziel galt eine homogene Geschwindigkeitsverteilung der Schmelze am Werkzeugaustritt. Zur Gegenüberstellung der Extrudatqualität wurde die Oberflächenrauheit der extrudierten Profile miteinander verglichen. Das konventionelle Werkzeug weist einen vollständig polierten Fließkanal auf, während das additiv gefertigte Demonstatorwerkzeug lediglich im Lippenbereich auf einer Länge von *15 mm* (bei einer Gesamtlänge von *145 mm*) nachträglich poliert wurde. Erste Ergebnisse im Labormaßstab mit Massedurchsätzen von bis zu *2 kg/h* zeigten, dass der Einsatz von additiv gefertigten Werkzeugen mit polierter Düsenlippe zu Produktoberflächenqualitäten führen, die mit kommerziellen Profilen vergleichbar sind. Es bestätigte sich, dass speziell die Werkzeugoberfläche im Lippenbereich die Oberflächenqualität des Extrudats bestimmt. Darauf aufbauend wurden von Schön [Sch17] Farbwechselversuche im Laborversuch durchgeführt, die dem Demonstratorwerkzeug eine Reduktion der Spülzeit um *25 %* attestieren.

Auch Groß zeigt in [Gro15b, Gro15a, Gro17, Gro19] welche Möglichkeiten sich durch den Fertigungsprozess für die Werkzeugauslegung ergeben. Es werden drei neuartige Konzepte aufgeführt, welche in dieser Form nur mittels additiver Fertigungsverfahren herzustellen sind. Zunächst wird eine statische Mischdüse zur Integration in den Speicherkopf einer Extrusionsblasformmaschine vorgestellt. Diese ermöglicht bei einem einfachen Pinolenverteiler die Verwischung von Fließmarkierungen bei einem homogenen Schmelzeaustrag. Erprobt wurde die Geometrie in Versuchen unter üblichen Produktionsbedingungen bei einem Systemdruck von 300 bar vor der Schneckenspitze. Durch die einfache Verteilergeometrie konnte zusätzlich der generelle Betriebsdruck reduziert werden. Jedoch zeigten Farbwechselversuche, dass das Spülverhalten Optimierungsbedarf aufweist. Zur weiteren Optimierung wurde weiterführend die Geometrie des Stegdornhalters aufgegriffen. Diese zeichnet sich zwar durch kurze Verweilzeiten aus, ist aber konventionell gefertigt durch starke Bindenahtausbildung geprägt (siehe Kapitel 2.2.2). In [Gro15b] wird aufgrund der Fertigungsmöglichkeiten die innere Pinole über eine Vielzahl an Stegen im Werkzeug aufgehängt, welche die Aufgabe eines statischen Mischers übernehmen und die Bindenahtausbildung reduzieren. Die Schmelzequalität und die Spülzeit wurden bei Farbwechselversuchen mit einem eingefärbten PE-HD untersucht und für gut befunden. Da jedoch die Randbedingungen zur Durchführung und vergleichende Versuche nicht aufgeführt sind, ist diese Einschätzung schwer in Kontext zu setzen. Schließlich wurde ein Werkzeug zur Herstellung von PA-Rohren vorgestellt, welches sich durch eine Kompaktbauweise auszeichnet. Während ein vergleichbares konventionelles Werkzeug ca. *50 kg* wiegen würde, ist das additiv gefertigte Werkzeug mit einem Gewicht von *1,8 kg* umsetzbar. Zwangsläufig bietet dies Vorzüge in Aufheizphasen und ist entsprechend ressourcenschonend. Durch in den Wänden integrierte Kühlkanäle ist zudem die Abkühlung des Werkzeuges innerhalb von 5 Minuten möglich und beugt so dem Zersetzen der Schmelze im Werkzeug vor.

Anhand der aufgezeigten Forschungen wird zwar das Potenzial neuartiger Werkzeugkonzepte für die Kunststoffextrusion deutlich, jedoch auch der Mangel an Ergebnissen hierzu. Zum heutigen Stand sind nur wenige Untersuchungen zu additiv gefertigten Extrusionswerkzeugen durchgeführt worden und bestehende Ergebnisse beschränken sich auf die Profilextrusion oder zeichnen sich durch eine rein qualitative Ergebnispräsentation aus.

Die vorliegende Arbeit soll dahingehend den Stand der Technik um Untersuchungen zur thermo-rheologischen Optimierung von Extrusionswerkzeugen für die Blasfolienextrusion bei Durchsätzen vergleichbar mit kleineren Produktionsanlagen erweitern. Anhand eines neuartigen Werkzeugkonzeptes soll zum einen die Umsetzbarkeit für den Verarbeitungsprozess validiert werden und bei der Auslegung zudem der Fokus auf einen verbesserten Temperaturhaushalt des Werkzeuges gelegt werden. Die Umsetzung und generierten Ergebnisse werden nachfolgend dokumentiert.

3 Charakterisierung eines Wendelverteiler-Referenzwerkzeuges

Zunächst wird in diesem Kapitel eine dem Stand der Technik entsprechende Referenz für ein Wendelverteilerwerkzeug zur Herstellung von einschichtigen Kunststofffolienprodukten charakterisiert. Im Verlauf von Kapitel 3.1 wird der zugrundeliegende Referenzprozess, der Aufbau der betrachteten Werkzeuggeometrie, sowie alle simulationsrelevanten Randbedingungen definiert. Kapitel 3.2 dokumentiert die Auswertung der numerischen Strömungsberechnung für den Referenzprozess. Hierzu werden qualitätsbeschreibende Größen eingeführt, die Strömungssimulationen ausgewertet und darauf aufbauend Einflussfaktoren auf die Verweilzeitverteilung untersucht, sowie eine Korrelation zwischen der geometrischen Ausprägung und der Verteilwirkung hergestellt. Kapitel 3.3 berücksichtigt weiterführend prozessbeeinflussende temperaturabhängige Effekte, die bei der thermo-rheologischen Optimierung erneut aufgegriffen werden. Insgesamt werden Werkzeugbereiche abgeleitet, die im Kontext der additiven Fertigung Potenzial zur Optimierung bieten und die Grundlage für die entwickelte Werkzeuggeometrie des Demonstratorwerkzeuges in Kapitel 4 darstellen.

3.1 Definition des Referenzprozesses

Im Verlauf der Arbeit wird ein definierter, vergleichbarer Betriebspunkt für die numerischen Strömungssimulationen des Wendelverteilerwerkzeuges und des additiv gefertigten Werkzeuges herangezogen. Dieser wird im weiteren Verlauf der Arbeit experimentell erprobt und dient der Validierung der Ergebnisse aus den Strömungssimulationen. Somit muss die Übertragbarkeit der in den Simulationen gewählten Randbedingungen auf die experimentelle Erprobung gewährleistet werden.

Grundsätzlich ist das Betriebspunktspektrum eines Werkzeuges an die Dimension, die Gestaltung der Fließkanalgeometrien und die verfahrenstechnischen Möglichkeiten der gesamten Folienanlage und Peripherie gekoppelt. Für die nachfolgenden Untersuchungen wird ein vorhandenes Wendelverteilerwerkzeug als Referenz herangezogen und eine Betriebspunktkombination gewählt, die exemplarisch den mittleren Bereich des Betriebspunktspektrums abdeckt und robust gefahren werden kann. In Kombination mit der bestehenden Anlagentechnik ist somit zum einen das Prozessfenster definiert, zum anderen leiten sich hieraus die geometrischen Randbedingungen für das spätere Demonstratorwerkzeug ab. Auf Letztere wird im Rahmen des Aufbaus der Werkzeuggruppe in Kapitel 3.1.1 eingegangen und für die Konzeptionierung des Demonstratorwerkzeuges in Kapitel 4 berücksichtigt. Für die vorgelagerten Untersuchungen sind zunächst nur die simulationsrelevanten Randbedingungen interessant. Diese lassen sich auf den Durchsatz, thermische Randbedingungen und das zu verarbeitende Material reduzieren.

Im vorliegenden Fall werden zwei Standardpolyolefine (PE-LD und PE-HD) aus der Gruppe der teilkristallinen Thermoplaste verwendet, welche industriell eingesetzte Materialen der Blasfolienextrusion repräsentieren. Die Materialcharakterisierung zur Erfassung der simulationsrelevanten Materialdaten ist im Anhang 9.1 aufgeführt. Alle nachfolgend durchgeführten Simulationen wurden jeweils für einen Durchsatz von $30\,kg/h$ bzw. $50\,kg/h$ durchgeführt und an geeigneter Stelle gegenübergestellt.

3.1.1 Aufbau der Werkzeugbaugruppe

Das verwendete Referenzwerkzeug besteht aus einer 90°-Umlenkung und Stern-Verteilung als Primärverteilung mit einem nachfolgenden 4-fach Wendelverteiler als Sekundärverteilung und befindet sich im Bestand des Lehrstuhls für Konstruktion und Kunststoffmaschinen am Institut für Produkt Engineering der Universität Duisburg-Essen. Im Rahmen dieses Kapitels wird die betrachtete Werkzeuggeometrie und damit verknüpfte übliche Auslegungsansätze kurz zusammengefasst. Bei der Beschreibung der Geometrie wird zudem auf Bereiche eingegangen, welche verfahrenstechnisch bestmöglich ausgelegt sind, prozesstechnisch jedoch Defizite aufweisen.

Die Geometrie der Primärverteilung besteht aus zwei Komponenten und wird nachfolgend durch die in Abbildung 3.1 aufgeführte Darstellungen beschrieben. Die vom Extruder bereitgestellte Schmelze tritt durch den Adapterflansch mit einem Eintrittsdurchmesser von *Ø55 mm* in das Umlenkstück des Werkzeuges ein und wird anschließend in eine vertikale Strömungsrichtung umgelenkt. Nach der Umlenkung teilt sich die Strömung innerhalb der Sternverteilung in einem Winkel von 50° in die vier Teilströmungen der Speisebohrungen mit einem Kanaldurchmesser von jeweils *Ø15 mm* auf. Der Sternpunkt gewährleistete durch die Gestaltung eine flächengleiche Aufteilung des Schmelzestromes auf die Teilkanäle. Die wesentlichen Gestaltungsvariablen stellen die Durchmesser der Einspeisebohrung und der Teilkanäle, sowie die Anzahl der Speisebohrungen dar. Aus fertigungstechnischer Sicht ist sind zudem die Längen der Einspeisung und der Teilkanäle der Sternverteilung, sowie der Bohrerwinkel relevant.

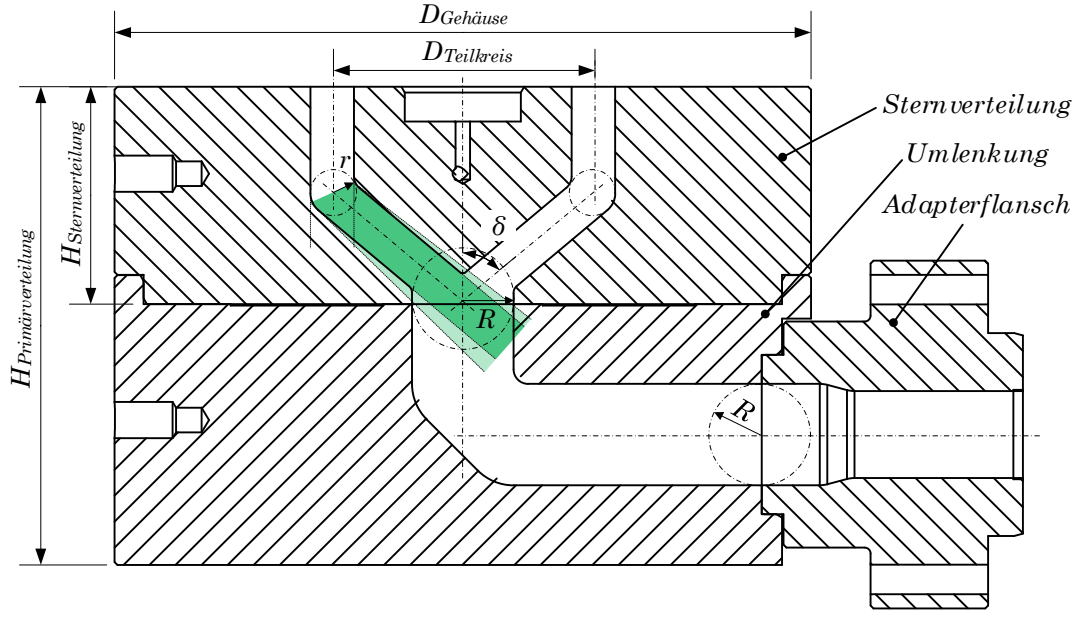


Abbildung 3.1: Aufbau der Primärverteilung und Definition charakteristischer Parameter

Anhand der Schnittdarstellung der Umlenkung und der Sternverteilung lässt sich der Fertigungsablauf ableiten und auch die Notwendigkeit zweier separater Bauteile wird deutlich. An beiden Teilkomponenten ist eine beidseitige spanende Bearbeitung erforderlich. Die Umlenkung ist nur durch zwei zueinander senkrechte Bohrungen realisierbar, die sich am Schnittpunkt beider Mittelachsen treffen. Die Sternverteilung ist durch die abgewinkelte Kanalführung nochmals aufwendiger in der Herstellung. Fertigungskritisch ist vor allem das Zusammenspiel aus dem Einspeisungsradius R und dem Radius r und dem Winkel δ der Speisebohrungen. Die Gestaltung der Speisebohrungen ist stark durch

die Einspeisung und die Lage des Sternpunktes restringiert. Für den gegebenen Teilkreisdurchmesser der Speisebohrungen ergibt sich der in Abbildung 3.1 hellgrün dargestellte mögliche Winkelbereich. Anschließend werden die Speisebohrungen über eine zweite Umlenkung in vertikale Richtung umgelenkt. Da gleichermaßen hohe Ansprüche an die Oberflächengüte der metallischen Dichtflächen und die Vermeidung von Fluchtungsfehlern der Teilkomponenten bestehen, ist die Komplexität der Fertigung der Teilkomponenten durchaus als kostenbeeinflussender Faktor von Blasfolienextrusionswerkzeugen zu nennen. Alle relevanten Geometrieparameter sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Parameter zur geometrischen Beschreibung der Primärverteilung

Parameter	Wert
Höhe Primärverteilung	$H_{Primärverteilung} = 165\ mm$
- Höhe Umlenkung	$H_{Umlenkung} = 90\ mm$
- Höhe Sternverteilung	$H_{Sternverteilung} = 75\ mm$
Durchmesser Gehäuse	$D_{Gehäuse} = 240\ mm$
Durchmesser Lochkreis	$D_{Lochkreis} = 90\ mm$
Anzahl Speisebohrungen	$i = 4$
Winkel Speisebohrungen	$\delta = 50°$
Radius Einspeisung	$R = 27{,}5\ mm$
Radius Speisebohrung	$r = 15\ mm$

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass Umlenkungen von Kunststoffschmelzen auf Grund der strukturviskosen Eigenschaften des Materials bei der Auslegung besonders betrachtet werden müssen. Dies lässt sich durch folgende Phänomene bezüglich des Zusammenspiels aus Krümmungsradius und Kanalradius, bzw. deren Verhältnis, beschreiben. Nach Stieglitz [Sti01] entspricht der Druckverbrauch über die Umlenkung annähernd dem über einen geraden Kanal, wodurch maßgeblich die Wandschubspannung zu betrachten ist. Diese nimmt im Verhältnis von Kanalinnenseite zu Kanalaußenseite bei abnehmenden Umlenkungsradien zu, während sich weiterhin das Geschwindigkeitsmaximum aus der Kanalmitte zur Kanalinnenseite verschiebt. Dieses Phänomen wurde ebenfalls von Niemeier untersucht und von te Heesen bei der automatisierten Werkzeugauslegung berücksichtigt [Nie06, Hee15].

Üblicherweise werden die Bauhöhe der Primärverteilung und der Bohrerwinkel innerhalb der fertigungstechnischen Möglichkeiten immer in Hinblick auf möglichst kurze Fließwege und damit kurze Verweilzeiten und geringe Druckverluste ausgeführt. Aus verfahrenstechnischer Sicht ergeben sich dann der Durchmesser der Einspeisung, sowie der Durchmesser und die Anzahl der Speisebohrungen entsprechend der Forderung möglichst identischer Wandschergeschwindigkeiten entlang der Fließkanäle und lassen sich auf Basis der Zusammenhänge in Kapitel 2.4.2 mathematisch beschreiben. Dabei wird der Radius der Speisebohrungen r in Abhängigkeit vom Radius der Einspeisung R und der Anzahl der Speisebohrungen i angegeben. Das strukturviskose Verhalten kann über das Potenzgesetz berücksichtigt werden, wobei der Fließexponent m die doppeltlogarithmische Steigung der Fließkurve beschreibt. Für diesen Zusammenhang ergibt sich auf Basis der repräsentativen Größen:

$$\dot{\gamma} = \frac{4\dot{V}}{R^3\pi} \text{ mit } \dot{\gamma}_{WEinspeisung} = \dot{\gamma}_{WSpeisebohrung} \quad \text{Gl. 3.1}$$

$$R = \sqrt[3]{\frac{(m+3)\dot{V}}{\pi\dot{\gamma}_W}} \text{ und } r = \sqrt[3]{\frac{1}{i}R} \quad \text{Gl. 3.2}$$

Das Verhältnis der Volumenströme ergibt sich über die Anzahl der Aufteilungen:

$$\dot{V}_{Speisebohrung} = \frac{\dot{V}_{Einspeisung}}{i} \quad \text{Gl. 3.3}$$

Wenn anschließend der Druckverbrauch von Einspeisung und Speisebohrung konstant gehalten werden soll, kann auf Grundlage des Gesetzes von Hagen-Poiseuille (Gl. 2.4) und der jeweiligen Fließweglängen $L_{Einspeisung}$ und $L_{Speisebohrung}$ der folgende Zusammenhang aufgestellt werden.

$$\Delta p = 2\tau_W \left(\frac{L_{Einspeisung}}{R^4} + \frac{L_{Speisebohrung}}{r^4}\right) \text{ mit } \tau_W = \frac{\eta_{rep}}{\dot{\gamma}_{rep}} \quad \text{Gl. 3.4}$$

Eine alternative, iterative Auslegungsroutine ergibt sich durch die Vorgabe eines definierten Druckverbrauchs. Über ein iteratives Lösungsverfahren können anschließend die zuvor aufgeführten Gleichungen gelöst und der Radius der Speisebohrung ermittelt werden. Unabhängig der verwendeten Methode ermöglicht es die Auslegung gemäß homogener Strömungszustände entlang der Primärverteilung. Im Rahmen seiner Arbeit untersuchte te Heesen [Hee15] mittels einer Parameterstudie den Einfluss des Radius der Einspeisung bzw. der Anzahl der Speisebohrungen in Kombination mit dem Radius der Speisebohrungen auf den Druckverbrauch und die Wandschergeschwindigkeit. Es konnten bei einem definierten Prozessfenster anhand maximal zu erwartenden Druckverlusten und minimal zulässigen Wandschergeschwindigkeiten die optimalen Geometriekombinationen bestimmt und der Einfluss von unterschiedlichen Materialeigenschaften berücksichtig werden. Mittels dieser Untersuchungen konnten sinnvolle Freiheitsgrade für ausgewählte Geometrieparameter der automatisierten Optimierung definiert werden.

Die verwendete Sekundärverteilung nach Abbildung 3.2 besteht aus einem Axialwendelverteiler, welcher ausgehend von der Anzahl der Speisebohrungen der Primärverteilung, vier Wendeln besitzt. Durch die Speisebohrungen tritt die Schmelze in die Wendelkanäle ein und wird gemäß des Funktionsprinzips als sich überlagernde Spalt- und Wendelströmung in Richtung des Düsendorns ausgetragen. Die wesentlichen Gestaltungsparameter ergeben sich aus der Dimension des Grundkörpers und der Wendelquerschnittsgeometrie und deren Verlauf in Extrusionsrichtung. Definiert werden diese über den Wendeltiefen- und den Spaltweitenverlauf, welche die Abnahme der Wendeltiefe entlang ihrer Länge und die Zunahme des Spaltes zwischen Wendelverteiler und Gehäuse beschreiben. Die Wendelbreite b wird durch das Bearbeitungswerkzeug im Fräszentrum definiert und nimmt üblicherweise erst im Wendelauslauf ab. Mathematisch lässt sich der Kurvenverlauf der Wendelkanäle über die nachfolgende Gleichung berechnen. Die aufgeführten Größen werden für den vorliegenden Fall in Abbildung 3.2 dargestellt.

$$\vec{x}(t) = \begin{pmatrix} \frac{D_{WV_Dorn}}{2}\cos\left(2\pi\frac{\alpha_w}{360°}t\right) \\ \frac{D_{WV_Dorn}}{2}\sin\left(2\pi\frac{\alpha_w}{360°}t\right) \\ H_{WV_Wendel}\,t \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad t \in \mathbb{R}[0;1] \quad \text{Gl. 3.5}$$

Übertragen auf die abgewickelte Wendelverteilergeometrie ergibt sich hieraus eine Wendel mit einer Steigung unter dem Winkel α_w. Aus der Definition des Wendelverlaufs ergeben sich weitere abgeleitete Größen wie die Stegbreite b_s, der Umschlingungswinkel β oder die Anzahl der Überlappungen θ.

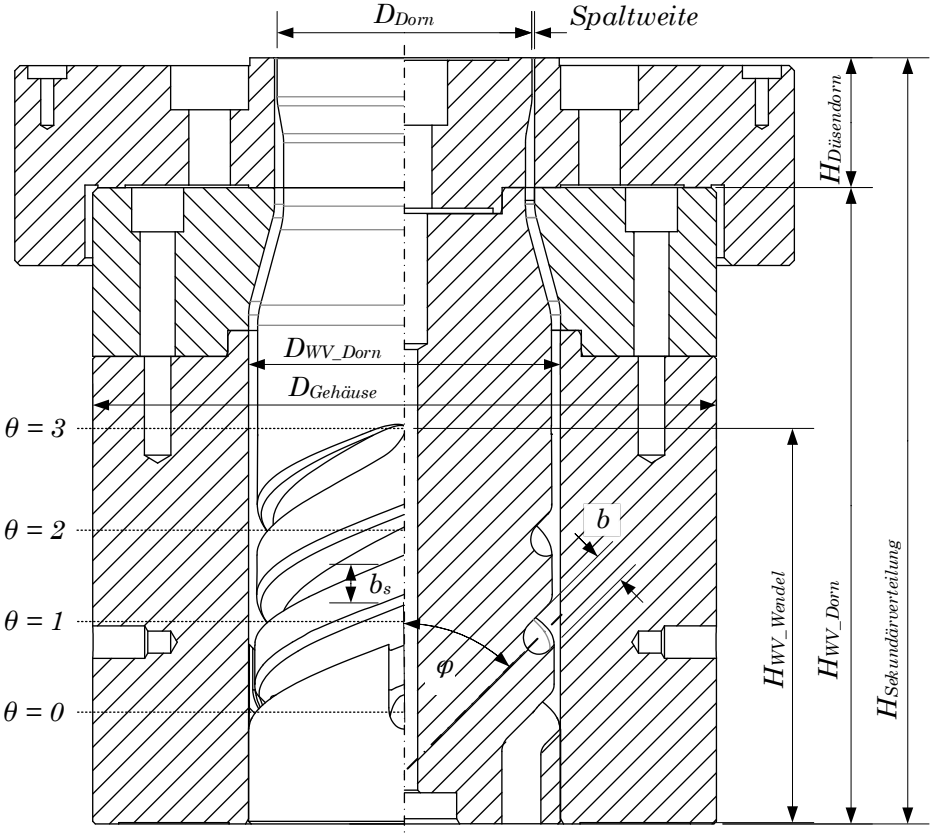


Abbildung 3.2: Aufbau der Sekundärverteilung und Definition charakteristischer Parameter

Es ergeben sich zudem die folgenden Bereiche, welche in Ihrer Ausprägung direkt auf das Herstellungsverfahren zurückzuführen sind:

- Spaltweitenverlauf
- Wendelkanalquerschnitt
- Einspeisungsbereich

Der Spaltweitenverlauf wird an die Randbedingungen des Fertigungsverfahrens (Drehen) angepasst und je nach Auslegungsansatz nachträglich geglättet oder entsprechend vorgegeben. Des Weiteren ist der Querschnitt des Wendelkanals in seiner Gestaltung eingeschränkt, da er unmittelbar vom Fräserwerkzeug vorgegeben wird. Genauer betrachtet wird zudem der Einspeisungsbereich, welcher fertigungstechnisch nicht über ein Drehverfahren realisiert werden kann. Der Bereich zwischen der Speisebohrung und der ersten Überlappung zur benachbarten Bohrung ergibt eine Dreiecksfläche, welche nur fräsend hergestellt werden kann. Die Anfangsspaltweite und deren Verlauf ist in diesem Bereich konstant. Hintergrund dieser Ausführung ist zum einen die metallische Abdichtung zwischen Wendeldorn und Gehäuse, wichtiger jedoch die Vermeidung von Stagnationszonen. Aus der Speisebohrung austretende Schmelze folgt entweder dem Wendelkanal oder überströmt diesen bereits, somit wäre die Spülbarkeit aufgrund der geometrischen Ausführung und der Wendelsteigung in diesem Bereich nur unzureichend gegeben. Neben dem Wechsel des Herstellungsverfahrens und dem damit verbundenen Aufwand und Kosten

sind zudem Effekte auf die Verweilzeit zu beobachten, welche in Kapitel 3.2.3 näher untersucht werden. Es lässt sich demnach festhalten, dass bei der Auslegung eine Vielzahl von Freiheitsgraden berücksichtigt und bewertet werden müssen. Initial können auf Basis des zur Verfügung stehenden Bauraumes nur der Durchmesser und die Höhe als definiert angesehen werden. Tabelle 3.2 fasst die wesentlichen geometrischen Größen zur Beschreibung der vorliegenden Sekundärverteilung zusammen.

Tabelle 3.2: Parameter zur geometrischen Beschreibung der Sekundärverteilung

Parameter	Wert
Höhe Sekundärverteilung inkl. Nachfolgezone	$H_{Sekundärverteilung} = 295\ mm$
- Höhe Wendel	$H_{WV_Wendel} = 105\ mm$
- Höhe Wendelverteiler	$H_{WV_Dorn} = 245\ mm$
- Höhe Düsendorn	$H_{Düsendorn} = 50\ mm$
Durchmesser Gehäuse	$D_{Gehäuse} = 240\ mm$
Durchmesser Wendelverteiler	$D_{WV_Dorn} = 120\ mm$
Steigungswinkel Wendel	$\alpha_w = 20{,}4°$
Umschlingungswinkel	$\beta = 270°$
Ganghöhe	$h_w = 140\ mm$
Überlappungsanzahl	$\theta = 3$
Fräserwinkel	$\varphi = 45°$
Fräserdurchmesser	$b = 12\ mm$
Durchmesser Düsendorn	$D_{Dorn} = 98\ mm$
Austrittsspaltweite	$s = 1\ mm$

Heutzutage gängige Auslegungsroutinen von Wendelverteilerwerkzeugen bedienen sich sowohl analytischer als auch numerischer Methoden zur Definition der für das vorliegende Prozessfenster geeigneten Werkzeuggeometrie. Wie bereits in Kapitel 2.4.2 angesprochen, kann eine Vorauslegung mit Hilfe der Netzwerktheorie durchgeführt werden. Hier wird die Geometrie des Strömungskanals, ggf. unter Ausnutzung der Periodizität des Werkzeuges, in die Wendel- und Spaltströmung aufgeteilt und für diesen Zusammenhang eine Volumenstrombilanz aufgestellt. Dabei entspricht die Differenz des ein- und austretenden Wendelvolumenstroms der Differenz des ein- und austretenden Spaltvolumenstroms und wird als Leckvolumenstrom bezeichnet. Um die vorherrschenden Strömungsbedingungen analytisch auszudrücken werden die Wendel- und Spaltströmungen durch ein Netzwerk aus Strömungswiderständen abgebildet, wodurch iterativ der Druckverbrauch sowie die Volumenströme berechnet werden können. Die Beschreibung des Netzwerkes der Strömungswiderstände und die Erstellung der dafür notwendigen Matrizen kann beispielsweise nach dem Ansatz von Michaeli und Pöhler [MiP93] durchgeführt werden und war Gegenstand der Forschung zur Werkzeugauslegung [Sti01, Rot01]. Für diesen iterativen Auslegungsprozess sind einige eingrenzende Annahmen festzulegen, da der Auslegungsprozess, wie bereits angesprochen, eine Vielzahl an Freiheitsgraden beinhaltet. Zum einen muss der Betriebspunkt in Form von Material, Durchsatz und Massetemperatur definiert werden. Gleichzeitig sind Annahmen zur Dimension des Wendelverteilers in Hinblick auf Bauhöhe und Durchmesser, sowie Wendelanzahl, -geometrie und Steigungswinkel zu treffen. Innerhalb eines Iterationsschrittes wird, ausgehend von einer initialen Volumenstromverteilung, auf Basis der jeweiligen Strömungswiderstände die sich ergebende Volumenstromverteilung berechnet und deren Abweichung zu dem vorherigen Iterationsschritt ermittelt, bis diese unterhalb eines definierten Grenzwertes liegen.

In Abgrenzung zu diesem Vorgehen, wobei die Geometrie auf Grundlage von zu erfüllenden Vorgaben berechnet wird, stellt te Heesen [Hee15] einen Ansatz vor, bei dem der Wendeltiefen- und Spaltweitenverlauf eindeutig und ohne eine mehrstufige Optimierung berechnet werden kann. Zielführend ist dabei die Vorgabe spezifischer Randbedingungen um anschließend die einzelnen Einträge in der Widerstandsmatrix, welche den Strömungswiderständen entsprechen, zu berechnen. Genauer wird eine Funktion für den Verlauf der Leckstromkurve der Wendelkanäle gesucht, welche in Summe einen konstanten Austrittvolumenstrom ergibt und über die Wendellänge konstant ist, ohne Unstetigkeiten aufzuweisen. Dies wird zudem verknüpft mit dem linearen Abfall des Wendelvolumenstroms im Verlauf der Wendel. Zudem führt te Hessen in Anlehnung an [Pro72, Ast76] die Vorgabe eines kontanten Druckgradienten über die Bauhöhe ein um das Gleichungssystem vollständig zu bestimmen. Dies ist speziell durch die sich damit ergebende Tatsache konstanter Wandschubspannungen entlang der Bauhöhe und entsprechende Betriebspunktunabhängigkeit legitim. Über die nunmehr definierten Größen Druckverbrauch und Volumenstrom können die Strömungswiderstände innerhalb der Widerstandsmatrix bestimmt und die Spaltweite berechnet werden. Schlussendlich kann über die Ergebnisse der Wendeltiefenverlauf, und somit alle geometriebeschreibenden Größen, ermittelt werden. Aufgrund der geometrischen Zusammenhänge und den Vorgaben aus Druckverbrauch und Wendelströmung ergibt sich letztendlich ein treppenstufiger Verlauf der Spaltweite, welcher zwar verfahrenstechnisch günstig, allerding fertigungstechnisch nicht ohne Weiteres umsetzbar ist, da der Spaltweitenverlauf üblicherweise als rotationssymmetrische Drehkontur auf einem Grundkörper abgetragen wird. Dementsprechend führt te Heesen als finalen Schritt eine Glättung des Spaltweitenverlaufs ein, um die Herstellbarkeit sicherzustellen.

Abschließend lässt sich festhalten, dass sich der in Kapitel 2.3 angesprochene Kompromiss zwischen bestmöglicher verfahrenstechnischer Auslegung und Herstellbarkeit auch in dem zu betrachtenden Referenzwerkzeug wiederfinden lässt. In der späteren Auswertung liegt der Fokus auf der Bewertung der Strömungssituation innerhalb des Werkzeuges und der Identifikation von Bereichen, welche den Prozess oder das Produkt negativ beeinflussen. Hierbei wird die Korrelation zu Bereichen untersucht, deren Ausprägung durch die Fertigung begründet ist. Zu dieser Bewertung werden hierfür relevante Strömungsgrößen herangezogen, welche im Vorfeld in Kapitel 3.2.1 definiert und beschrieben sind. Insgesamt bildet die nachfolgende Untersuchung die Grundlage für die in Kapitel 4 umgesetzte Werkzeuggeometrie, welche eben diese verfahrenstechnisch ungünstigen, aber fertigungstechnisch notwendigen Ausführungen aufgreift und ein dazu alternatives Konzept präsentiert.

3.1.2 Modellbildung und Randbedingungen

Für die nachfolgenden Untersuchungen wird ausgehend vom CAD-Modell der Werkzeugbaugruppe zur Erstellung des Rechennetzes zunächst das freie Volumen der Schmelze, das sogenannte Fluidvolumen, benötigt. Mittels der verwendeten Software *ANSYS Workbench (DesignModeler)* kann dieses über diverse boolesche Operationen zwischen Ausganggeometrie und einfachen Grundelementen abgeleitet werden und basiert somit direkt auf den Geometrieparametern des CAD-Modells. Einfache Kanalbereiche der Primärverteilung werden durch Schnittfunktionen in simple Rohr- bzw. Zylindergeometrien überführt. Auf der Grundlage der in Kapitel 3.1.1 vorgestellten Referenzwerkzeuggeometrie entsteht das in Abbildung 3.3 links dargestellte Fluidvolumen. An dieser Stelle wird auf keine weiteren Vereinfachungen des Modells, wie beispielsweise die Reduktion auf Wendelverteilsegmente oder Teilschnitte, zurückgegriffen, da die globale Strömungssituation und deren Einflussfaktoren entlang der Werkzeuggeometrie auf die austretende Schmelze

ganzheitlich erfasst werden sollen. Für die automatisierte Diskretisierung wird auf eine robuste Vernetzungsstrategie mit einer der Dimension der Wendelverteilgeometrie angemessenen Elementgröße zurückgegriffen. Das Rechennetz besteht aus strukturiert angeordneten Prismenschichten in Wandnähe und unstrukturiert angeordneten Tetraederelementen in den mittleren Schichten. Dies erlaubt eine hohe Auflösung der wandnahen Strömungseffekte bei gleichzeitig moderaten Berechnungszeiten.

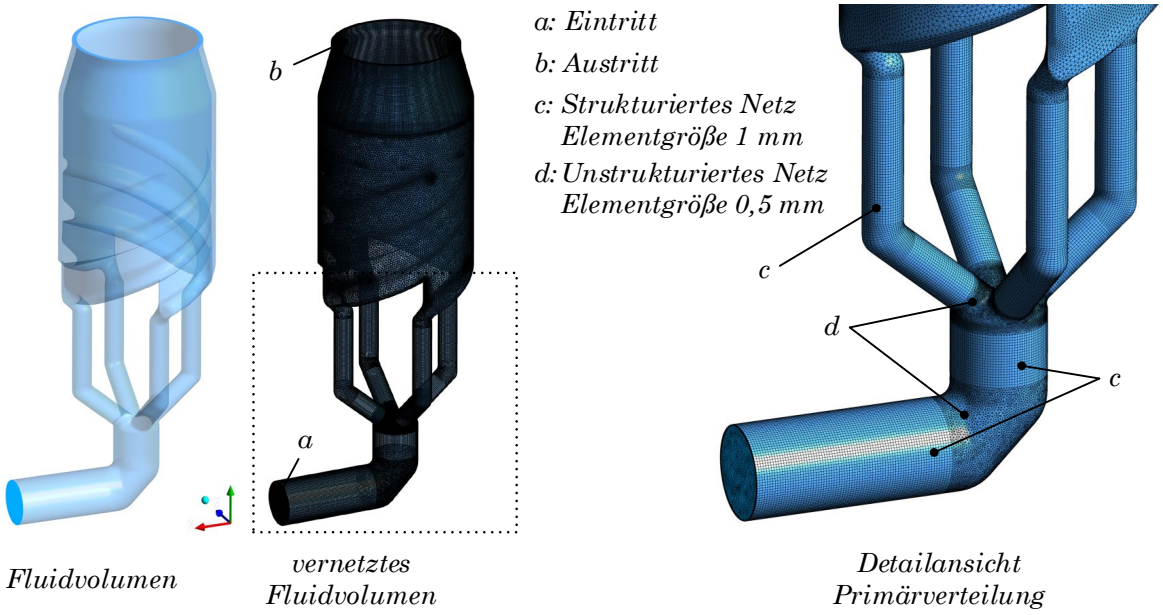
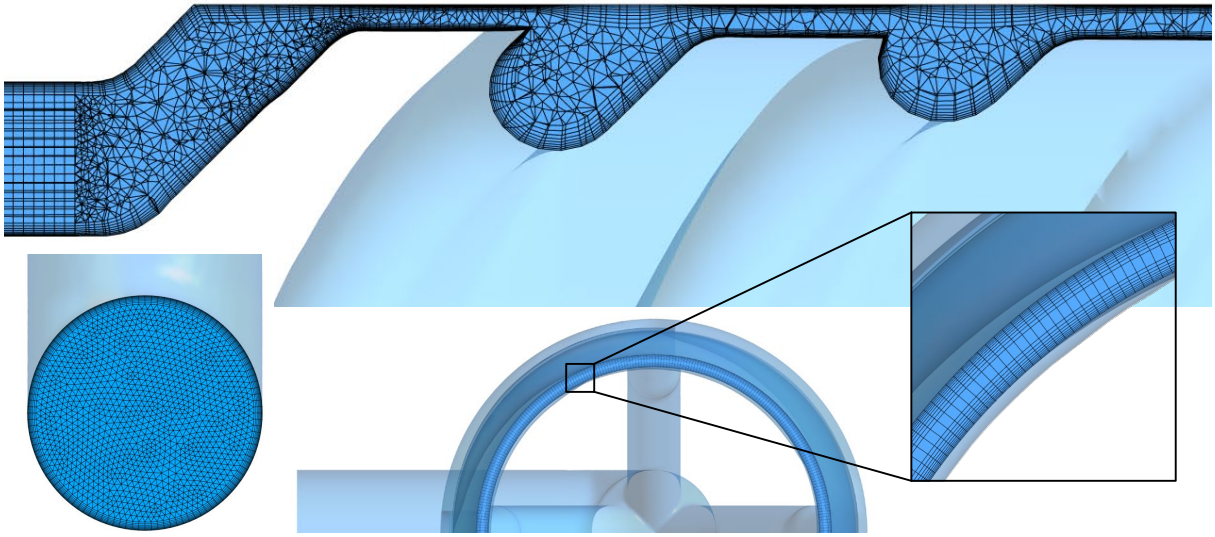


Abbildung 3.3: Ableitung des Fluidvolumens und Rechennetzgenerierung

Die Berandungsflächen werden in Form von Komponenten definiert, um im weiteren Verlauf die vorherrschenden Randbedingungen aufzuprägen. Da weder Symmetrieeffekte noch Interaktionen zwischen verschiedenen Fluiddomänen stattfinden, beschränkten sich die Komponenten auf die Eintrittsfläche *a*, die Austrittsfläche *b* und die sich ergebenden Wandflächen, welche Kontakt zur Werkzeugwand haben. Die globalen maximalen Flächen- sowie Tetraederkanten werden auf *2 mm* definiert. Die Detailansicht in Abbildung 3.3 zeigt zudem die Wahl unterschiedlicher Vernetzungsansätze und Netzverfeinerungen für die Primärverteilung. Während einfache Kanalgeometrien (Bereiche c) mit strukturiert angeordneten Hexaederelementen und einer Elementgröße von *1 mm* eine ausreichende Abbildegenauigkeit bieten, werden komplexere Bereiche, wie die 90°-Umlenkung und der Sternverteiler (Bereiche d) über unstrukturiert angeordnete Tetraederelemente mit einer Elementgröße von *0,5 mm* vernetzt. Mit diesem Vorgehen wird die Erfassung kunststoffspezifischer Strömungsphänomene in kritischen Geometriebereichen für die weitere Auswertung gewährleistet.

Für die Vernetzung von kunststoffschmelzeführenden Kanälen ist eine Randschichtverfeinerung des Rechennetzes unerlässlich, um die wandnahen Strömungseffekte, resultierend aus Wandhaftung und Scherung, realitätsnah abzubilden. Ausgehend von den Wandflächen wird dieser Bereich über acht Prismenelementschichten diskretisiert. Die Elementgröße steigt zur Kanalmitte mit einer Wachstumsrate von *1,2* an und resultiert entsprechend der vorab genannten globalen Netzeinstellungen in einer maximalen Elementgröße von *2 mm*. Für einen beliebigen Querschnitt durch das Fluidvolumen ergibt sich qualitativ das in Abbildung 3.4 dargestellte Bild. Für die kreisförmige Eintritts- und die kreisringförmige Austrittsfläche ergeben sich ebenfalls die nachfolgend dargestellten

Flächennetze unter Berücksichtigung der Randschichtverfeinerung. Ein Teilsegment der Austrittsfläche ist in der Detailansicht vergrößert dargestellt.



Flächennetz Eintritt

Flächennetz Austritt

Abbildung 3.4: Randschichtverfeinerung mittels Prismenschichten

Hinsichtlich der Elementanzahl ergibt sich für die vollständige Werkzeugbaugruppe eine Gesamtanzahl von 3 524 706 Volumenelementen und 1 709 537 Knoten. Die Netzqualität wird anhand der Elementschiefe bewertet, welche die Abweichung der einzelnen Elemente zu ihrem idealen Polyeder beschreibt. Elemente mit einem hohen Schiefewert sind aufgrund der starken Verzerrung für Lösungsungenauigkeiten oder Konvergenzprobleme verantwortlich. Für das vorliegende Modell beträgt die maximale Netzschiefe *0,95,* die mittlere Netzschiefe liegt bei *0,19* mit einer Standardabweichung von *0,15*.

Zur vollständigen Definition des Strömungszustandes ist die Vorgabe von weiteren Randbedingungen, welche den Betriebspunkt wiederspiegeln, notwendig. Diese werden auf die jeweiligen Flächen des Netzmodells aufgeprägt. Wie bereits in Kapitel 2.4.3 bzw. 3.1 erwähnt, wurden die virtuell und experimentell verwendeten Materialien charakterisiert und können dem Programm in Form einer UDF zur Verfügung gestellt werden. Auf der Eintrittsfläche wird der Eingangsmassestrom, respektive Durchsatz, definiert und an der Austrittsfläche wird Umgebungsdruck angenommen. Der Druckverlust kann anschließend über den berechneten Eintrittsdruck berechnet werden. Für alle weiteren Wandflächen werden zunächst adiabate Bedingungen und Wandhaftung angenommen. Tabelle 3.3 fasst die angenommen Randbedingungen aller vorgestellten Simulationen zusammen. Weiterführende Solver-Einstellungen der CFD-Simulationen sind zudem im Anhang 9.3 aufgeführt.

Tabelle 3.3: Randbedingungen der numerischen Strömungssimulation

Parameter	Wert
Durchsatz / Massestrom Eintritt	$\dot{m} = 30\ bzw.\ 50 \frac{kg}{h}$
Materialien	*PE-LD / PE-HD*
Gegendruck Austritt	$p_{Austritt} = 1\ bar$
Thermische Randbedingungen	*Wandflächen: adiabat*
	isotherm
Annahmen	*Wandhaftung*

Neben den aufgeführten Randbedingungen wird während der Modellbildung eine weitere Größe, das sogenannte mittlere Alter, als benutzerdefiniertes Skalar definiert, um eine Aussage über die mittlere Verweilzeit der Schmelze am Austritt und mögliche Stagnationszonen innerhalb der Werkzeuggeometrie treffen zu können. Hierauf wird in Kapitel 3.2.1 detailliert eingegangen. Für die Modellbildung sei an dieser Stelle vorweggenommen, dass dem Skalarfeld am Eintritt der spezifische Wert Null (entspricht einem Alter von null Sekunden bei Eintritt in das Kontrollvolumen) zugewiesen wird und die Größe analog zu den üblichen Zustandsgrößen ausgewertet werden kann.

3.2 Auswertung der numerischen Strömungsberechnung

Der Strömungszustand der bestehenden Werkzeuggeometrie wird mit Hilfe von CFD-Simulationen nachvollzogen. Die Modellbildung und Randbedingungen folgen hierbei dem zuvor beschriebenen Schema. Nachfolgend wird die Auswertung der Strömungssimulation aufgezeigt und das Werkzeug bewertet. Auf Basis der Auswertung wird ein Zwischenfazit zu konventionellen Wendelverteilerwerkzeuggeometrien gezogen und Effekte aufgezeigt, welche die Produktqualität ungünstig beeinflussen können. Hierzu werden in Kapitel 3.2.1 einige qualitätsbeschreibende Größen und deren örtliche Auswertung eingeführt. Anschließend wird ausgehend von der Beschreibung der grundsätzlichen Strömungssituation die detaillierte Identifikation von Einflussfaktoren auf die Verweilzeitverteilung aufgezeigt und die Verteilwirkung bewertet. Abschließend zeigt die Berücksichtigung thermischer Effekte deren Einfluss auf den Temperaturhaushalt innerhalb der Werkzeugbaugruppe.

3.2.1 Einführung qualitätsbeschreibender Größen

Die Auslegung von Extrusionswerkzeugen sowie Auswertung der Strömungssituation ist mithilfe numerischer Strömungssimulationen durch die globale und lokale Auswertung berechneter Strömungsgrößen möglich. Dabei erfolgt die Bewertung auf Basis verfahrenstechnischer Grundlagen und Grenzwerte, anwenderspezifischer Kenntnisse und von analytischen Auslegungsansätzen übertragbaren Größen. Zumeist wird die Auswertung nutzergesteuert über die manuelle Definition von Auswertungsebenen, Falschfarbenbildern und Stromlinien bzw. Vektordarstellungen durchgeführt. Die betrachteten Größen beruhen auf den zuvor angestellten Grundüberlegungen in Kapitel 2.3. Demnach sind vor allem die produktqualitätsbeeinflussenden Größen und die begrenzenden Größen der Verfahrenstechnik relevant. Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass es Ziel dieser Untersu-

chungen ist, die geltenden Anforderungen an ein Extrusionswerkzeug durch quantifizierbare Größen auszudrücken. Darauf aufbauend wurden in der Literatur mit der Zeit verschiedene Qualitätskriterien eingeführt und angewandt.

Anfänglich ermöglichten bereits erste eindimensionale Berechnungsansätze die Ableitung von Funktionsverläufen bestimmter Zustandsgrößen (z.B. [Pro72, Rau87]). Somit war bereits früh der Einfluss gewisser Parametervariationen einschätzbar. Folgend wurden durch verschiedene Geometrieparametervariationen deren Auswirkung untersucht und der Einfluss auf die Schmelzequalität, z. B. die Volumenstromverteilung am Austritt, bewertet. In Kapitel 2.4.2 vorgestellte Zusammenhänge zwischen Wendelanzahl oder -steigung und der Volumenstromverteilung am Austritt konnten so nachgewiesen werden. Während die reine Bewertung einer bestehenden Werkzeuggeometrie, oder die Investigation zu ungünstig ausgelegten Bereichen bei einem bestehenden Qualitätsproblem durchaus mit einfachen Auswerteroutinen über die oben genannten Werkzeuge möglich ist, bedarf es bei komplexeren Anwendungen wie der automatisierten Optimierung bestehender Geometrien, oder der CFD-basierten Werkzeugauslegung, reproduzierbare Größen zur Bewertung. In verschiedenen Forschungsarbeiten haben sich diesbezüglich Ansätze mit der Definition unterschiedlicher Qualitätskriterien etabliert [Cre08, Sau11, HoE12, Hee15]. Ohne diese detailliert vorzustellen, lässt sich zusammenfassen, dass bei allen Ansätzen die Volumenstromverteilung am Austritt und die Wandschubspannungen bzw. Wandschergeschwindigkeiten als Qualitätskriterium betrachtet werden. Letztere werden abhängig vom Vorgehen als maximaler Grenzwert oder als Verhältnis der Differenz maximaler und minimaler Wandschubspannungen zu einer Differenz von kritischen Grenzwerten definiert. Zudem wurde von Cretu [Cre08] die Fläche unterhalb einer berechneten Leckstromkurve im Verhältnis zu einer idealen Fläche als Kriterium eingeführt und von te Heesen [Hee15] um die Berücksichtigung der Steigung der Kurve erweitert um abrupte Änderungen in dieser abzubilden. Abweichende Herangehensweisen zeigen sich in Bezug auf den Druckverbrauch als Qualitätskriterium. Während dieser bei den meisten der hier zitierten Arbeiten in Betracht gezogen wird, nimmt te Heesen in seinen Untersuchungen hiervon Abstand und führt lediglich einen nicht zu überschreitenden Maximaldruck als Ausschlusskriterium der Geometrievariationen ein. Begründet wird dieses Vorgehen mit der frühen Beeinflussung des Druckverbrauchs durch die Berechnung von Anfangsspalt, Anfangswendeltiefe oder des Endspalts unter Vorgabe einer minimalen Wandschergeschwindigkeit im Rahmen der Vordimensionierung. Somit kann bereits hier ein Kompromiss zwischen minimaler Wandschubspannung und Druckverbrauch getroffen werden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die von te Heesen eingeführten Kriterien an geeigneter Stelle angewendet. Somit wird eine quantitative Vergleichbarkeit und Bewertung der untersuchten Baugruppen möglich. Der Ansatz zur automatisierten Optimierung von Wendelverteilerwerkzeugen beruht im Optimierungsablauf auf drei Qualitäts- und drei Ausschlusskriterien. Da die Kriterien von te Heesen jedoch stark auf die geometrische Ausprägung und damit strömungstechnischen Phänomene innerhalb von Wendelverteilern zugeschnitten sind, ist eine direkte Übertragbarkeit auf eine vollständige Werkzeuggeometrie oder alternative Bauformen teilweise nicht möglich. Es wird erneut deutlich, dass sich die maßgeblichen Bewertungsgrößen in Hinblick auf eine angemessene Produktqualität aus der Massestromverteilung am Austritt sowie der Wandschubspannung zusammensetzen. Eine Übertragung dieser Auswertung auf die neu entwickelte Werkzeuggeometrie erscheint daher notwendig. Die Auswertung der Leckstromkurve und die getrennte Auswertung von Wendel- und Spaltströmungen treten jedoch speziell bei der Auslegung von Wendelverteilerwerkzeugen auf und werden als Qualitätskriterium nicht weiter berücksichtig, da sie nicht auf die entwickelte Geometrie des Demonstratorwerkzeuges übertragbar sind. Bezüglich des Druckverbrauchs definiert te Heesen, wie vorab begründet, lediglich ein Ausschlusskriterium. Diese Grundüberlegung wird fortgeführt und bei der

späteren Auslegung des additiv gefertigten Extrusionswerkzeuges nicht explizit auf einen möglichst minimalen Druckverbrauch eingegangen. Wichtiger aus verfahrenstechnischer Sicht ist vielmehr die bereits erläuterte Volumenstromverteilung am Austritt und die Beurteilung der Wandschubspannung. Der Druckverbrauch wird lediglich als vergleichende Größe zwischen dem konventionell gefertigten Referenzwerkzeug und der additiv gefertigten Werkzeuggeometrie herangezogen. Tabelle 3.4 fasst die Qualitätskriterien von te Heesen und die jeweils damit verknüpften Ziele für die Auslegung kurz zusammen. Die verwendeten Kriterien für die vorliegende Arbeit sind blau hervorgehoben.

Tabelle 3.4: Qualitäts- und Ausschlusskriterien zur automatisierten Werkzeugoptimierung nach te Heesen [Hee15]

	Kriterium	Definition	Ziel
Qualitätskriterien	**QM**	Massestromverteilung am Austritt	Maximale prozentuale Abweichung von minimalem zu maximalem Massestrom am Austritt
	QW	Wandschubspannungsverhältnis	Verhältnis von minimaler und maximaler Wandschubspannung in Wendel und Spalt als prozentuale Abweichung
	QL	Massestrom in der Wendel	Abweichung des Intergrals unter der Leckstromkurve zu einer idealen Fläche, sowie Abweichung zur idealen Steigung
Ausschlusskriterien	**DP**	Max. zulässiger Druckverbrauch	Berücksichtigung des max. Gegendrucks des Extruders und der dissipativen Erwärmung
	WW	Min. Wandschubspannung in der Wendel	Vermeidung von Stagnationszonen im Wendelgrund
	WS	Max- Wandschubspannung im Spalt	Vermeidung von Fließinstabilitäten und Schmelzebruchphänomenen im Spalt

Neben den beschriebenen unmittelbaren Strömungsgrößen ist, in Korrelation zu mechanischen Festigkeitskennwerten des Produktes, die Verteilwirkung und damit verknüpft die Ausprägung von Fließmarkierungen bzw. Bindenähten von Relevanz. Gemäß den Anforderungen an Extrusionswerkzeuge ist anzustreben, dass die Entstehung radialer Fließmarkierungen im Produkt vermieden wird. Wendelverteilerwerkzeuge erreichen dies durch die Überlagerung von Wendel- und Spaltströmungen und die sich damit ausprägenden im Querschnitt sichelförmigen Fließmarkierungen. Während der experimentelle Nachweis dieser Ausprägung durch Farbwechselversuche verhältnismäßig einfach durchzuführen ist, gestaltet sich die Berechnung durch numerische Strömungssimulationen deutlich komplexer. In realen Prozessen bilden sich scharfe Grenzschichten zwischen zusammengeführten Teilströmen aus, deren Verlauf entsprechend der genannten Anforderungen an Bindenähte durch die Strömungsführung entschärft werden muss. In numerischen Strömungssimulationen wird jedoch eine gewisse Netzdiffusion vorausgesetzt, welche eine Mischung in den jeweiligen Netzelementen unterstellt und mit entsprechender Unschärfe der Grenzschicht einhergeht. Als Möglichkeit zur Bewertung hat sich die Stromlinienanalyse etabliert [WiL03, Sau11, Hee15]. Über diese Analyse ist eine Korrelation zur Verteilwirkung von Wendelverteilerwerkzeugen möglich und es kann der Überlappungswinkel – also der Winkelbereich in welchem sich Schmelzeströme zweier benachbarter Speisebohrungen überlappen – berechnet werden. Es wird demnach nicht direkt

eine Bindenaht berechnet, jedoch ist es möglich, den Verlauf abzuleiten. Im Rahmen der Strömungsanalyse des Wendelverteilerwerkzeuges wird diese Auswertungsroutine vorgestellt und anschließend zur Bewertung der Verteilwirkung der additiv gefertigten Werkzeuggeometrie herangezogen.

Während der Prozessführung sind in einem eigentlich stationären Extrusionsprozess vor llem die instationären Zustände bei Material- oder Farbwechseln entscheidend. Bereits bei der Definition der grundlegenden Anforderungen an Extrusionswerkzeuge wurde die Verweilzeit der Schmelze als Kriterium für die Wirtschaftlichkeit eines solchen Werkzeuges herangezogen. Je schneller ein Ausgangsmaterial durch ein Zielmaterial verdrängt wird, desto weniger Ausschuss wird bei diesen notwendigen Wechselprozessen produziert. Um die mittlere Verweilzeit am Austritt zu berechnen, kann das sogenannte mittlere Alter (engl. *mean age*) des Fluides herangezogen werden. Es handelt sich dabei um die räumlich lokale Verweilzeit, also die im Mittel verstrichene Zeit, die ein Schmelzepartikel benötigt, um von einem Eintritt in einen definierten Kontrollraum zu einem beliebigen betrachteten Punkt zu gelangen [Dan53]. Als Funktion wird das mittlere Alter über ein User Defined Scalar (UDS) eingebunden und als zusätzliche Transportgleichung gelöst:

$$\nabla \cdot \left(\underline{u}\theta\right) - \nabla \cdot (\Gamma \nabla \theta) = 1 \qquad \text{Gl. 3.6}$$

In eine für die Software lösbare Form gebracht ergibt sich in Anlehnung an Kapitel 2.4.3 die nachfolgende Gleichung mit Q_θ für den stationären Fall:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\theta) + \nabla \cdot \left(\rho\underline{u}\theta\right) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \theta) + Q_\theta \quad \text{mit} \quad Q_\theta = 1 \cdot \rho \qquad \text{Gl. 3.7}$$

und somit die vollständige Transportgleichung für das mittlere Alter zu

$$\nabla \cdot \left(\underline{u}\theta\right) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \theta) + \rho \qquad \text{Gl. 3.8}$$

Für die betrachtete Anwendung wird zudem angenommen, dass der diffuse Anteil dieser Transportgleichung zu vernachlässigen ist, weshalb er zugunsten der numerischen Stabilität als sehr kleiner Wert angenommen wird. Für die Simulationen hat sich ein Wert von $10^{-15}\ m^2 s^{-1}$ als geeignet erwiesen. Numerisch ergibt sich durch diese Modellbildung ein physikalisch nicht auftretendes mittleres Alter in wandnahen Strömungsschichten. Aufgrund der Annahme der Wandhaftung und der damit verknüpften strömungsmechanischen Verzerrung des Zustands in diesen Bereichen, ist die Übertragbarkeit wandnaher Strömungen jedoch grundsätzlich nur mit Einschränkungen möglich. Gute Übereinstimmung ergibt sich für den verwendeten Ansatz jedoch als Größe zur Bewertung der mittleren Verweilzeit an einer Austrittsfläche. Dies konnte Kummerow [Kum19] anhand einer Parameterstudie für eine einfache Rohrgeometrie validieren. Bei einem definierten Durchmesser wurde sowohl die Länge, als auch die Eintrittsgeschwindigkeit variiert. In der Gegenüberstellung konnten anschließend die mittlere Verweilzeit über die Auswertung des mittleren Alters, die Verweilzeit auf definierten Stromlinien zwischen Eintritt und Austritt, sowie die analytisch berechnete Zeit, die zur Durchströmung benötigt wird, verglichen werden. Die Ergebnisse zeigten eine gute Übereinstimmung mit Abweichungen zwischen 3-5 %. Zudem ist die Verwendung des mittleren Alters zur Definition eines weiteren Qualitätskriteriums möglich. Über die fluid change effectiveness (kurz: FCE) beschreibt Kummerow [KuW18] in Anlehnung an Spalding [Spa58] wie oft ein lokales Volumen gespült wird, während eine Blockströmung das Werkzeug mit mittlerer Verweilzeit durchströmt.

3.2.2 Beschreibung der Strömungssituation

Zur Identifikation strömungsmechanisch ungünstiger Werkzeugbereiche, welche mitunter auf die Herstellung durch das jeweilige Fertigungsverfahren zurückzuführen sind, wird für die bestehende Werkzeuggeometrie die sich einstellende Strömungssituation mittels CFD-Simulation ausgewertet und nachvollzogen. Anhand des CAD-Modells wird das Fluidvolumen abgeleitet, wie vorab beschrieben diskretisiert und die Strömung unter Berücksichtigung der genannten Randbedingungen berechnet. Bevor in den nachfolgenden Kapiteln eine Detailuntersuchung relevanter Werkzeugbereiche erfolgt, wird die globale Strömungssituation erfasst um die Simulationsergebnisse anhand der experimentellen Untersuchungen zu validieren. Alle nachfolgenden Ergebnisse sind für die beiden beschriebenen Materialien und Durchsätze ausgewertet worden. Dies wird in den jeweiligen Gegenüberstellungen berücksichtigt. Zwecks besserer Übersichtlichkeit werden die gezeigten Falschfarbenbilder nur für den Betriebspunkt mit einem Durchsatz von *50 kg/h* und dem Material PE-LD zusammengestellt. Relevante Erkenntnisse für die übrigen Betriebspunktkombinationen werden entsprechend diskutiert.

In Abbildung 3.5 sind zunächst die Strömungsgrößen *Strömungsgeschwindigkeit* und *Druck* entlang der gesamten Werkzeuggeometrie gegenübergestellt. Auf der linken Seite wird die Strömungssituation über Stromlinien visualisiert, welche das Fluidvolumen ausgehend von der Eintrittsfläche durchströmen. Anhand dieser wird bereits das Wirkprinzip des Wendelverteilerwerkzeuges deutlich. Einzelne Stromlinien folgen zunächst dem Verlauf einer Wendel und überströmen diese anschließend. Die mittlere Darstellung zeigt die Strömungsgeschwindigkeit als Falschfarbenbild auf der Mittelebene. An dieser Stelle fällt bereits der inhomogene Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit im Bereich der Primärverteilung bis zu den Speisebohrungen auf.

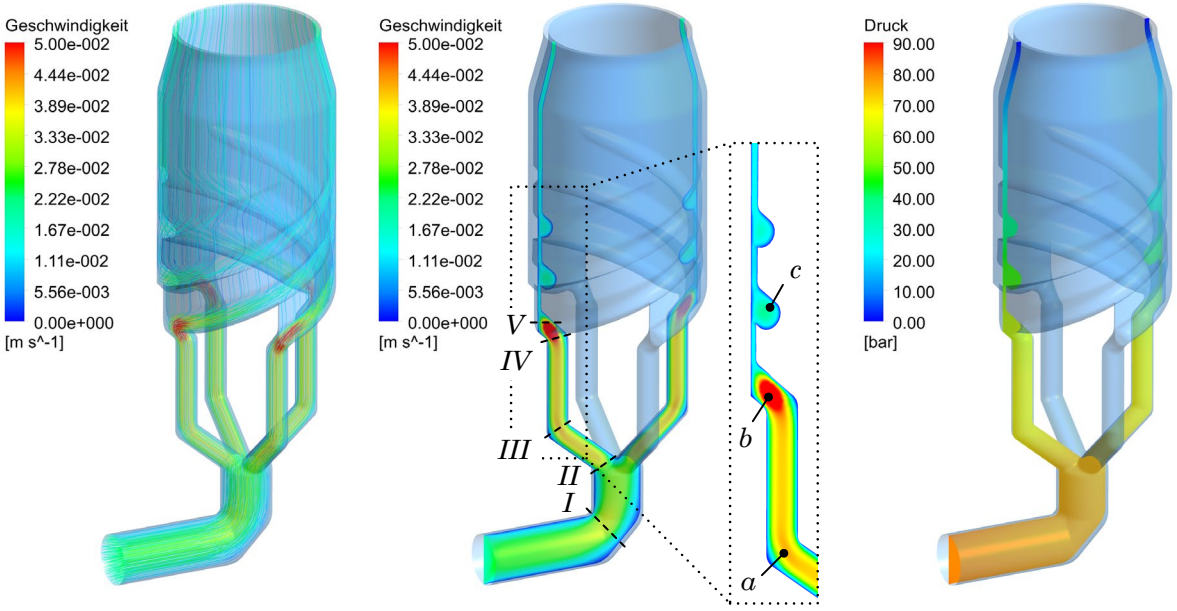


Abbildung 3.5: v.l.n.r.: Stromlinien mit überlagerter Strömungsgeschwindigkeit, Strömungsgeschwindigkeit und Druck in der Schnittebene

Zunächst wird das Geschwindigkeitsprofil durch die 90°-Umlenkung (Umlenkung *I*) in Richtung des geringeren, inneren Radius verschoben, sodass nach der Umlenkung bereits normal zum Strömungskanal kein homogenes Geschwindigkeitsprofil mehr existiert. An-

schließend wird der Gesamtstrom durch die Sternverteilung in die vier Teilströme aufgeteilt und diese erfahren jeweils fertigungsbedingt vier weitere Umlenkungen (Umlenkungen *II – V*). Qualitativ treten in diesen Bereichen die gleichen Phänomene auf, wie im Bereich der 90°-Umlenkung. Das verschobene Maximum der Strömungsgeschwindigkeit ist in Detail a) erneut deutlich zu erkennen. Zudem zeigt Detail b) eine signifikante Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit beim Durchströmen der Speisebohrung, dieser Bereich wird im weiteren Verlauf noch eingehender untersucht. Detail c) zeigt das zu erwartende Bild der Strömung im Wendelbereich mit wandhaftungsbedingt geringen Strömungsgeschwindigkeiten im Wendelgrund und an der Gehäusewand. In Bezug auf den Druckverbrauch (Abbildung 3.5 rechts) wird dieser lediglich als Vergleichswert zwischen Referenz und additiv gefertigter Werkzeugbaugruppe und zum Abgleich mit der experimentellen Erprobung aufgenommen. Hier zeigt sich ein Druckabfall entlang der Werkzeugbaugruppe bei einem mittleren Gegendruck von *81,24 bar* auf der Eintrittsfläche.

Obgleich die Simulationsergebnisse im Bereich der Primärverteilung in Bezug auf die Strömungsgeschwindigkeit einige Unstetigkeiten aufweisen, ist für die spätere Produktqualität in Form einer gleichmäßigen Wanddickenverteilung vor allem eine um den Umfang gleichmäßige Strömungsgeschwindigkeit am Austritt relevant. Daher wird nachfolgend die Strömungsgeschwindigkeit sowohl nach dem Wendelauslauf, als auch unmittelbar am Austritt, ausgewertet und gegenübergestellt. Abbildung 3.6 zeigt hierzu auf der linken Seite die Lage der jeweiligen Auswertekurven.

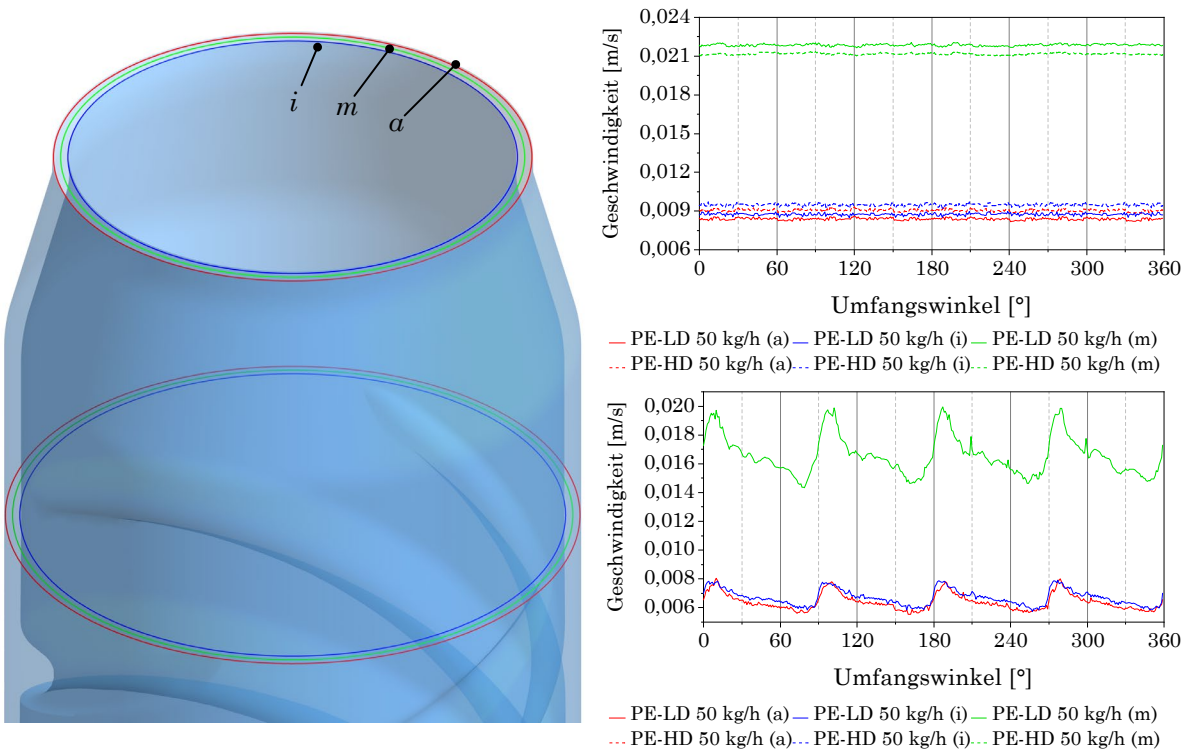


Abbildung 3.6: links: Definition der Auswertekurven; rechts: Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten

Es werden jeweils drei Kurven zur Auswertung der Strömung Außen (*a*), Innen (*i*) und in der Mitte (*m*) des Strömungskanals definiert. Diese liegen in der Nähe der Gehäusewand (rot), Dornwand (blau) und in der Kanalmitte (grün). In der Gegenüberstellung wird zudem der Einfluss des Materials deutlich. Die Auswertung zeigt ein für Wendelverteiler übliches Geschwindigkeitsprofil, wobei der Einfluss der Wendelausläufe erkenntlich ist. Im unteren Diagramm zeigen sich vier Bereiche mit Geschwindigkeitsspitzen, da das bis

zuletzt in der Wendel verbliebene Material in den Ringspalt überführt wird. Zudem wird ein deutlicher Abfall des Geschwindigkeitsniveaus zwischen wandnahen Strömungen und der Mittenströmung deutlich, was jedoch zugleich die Amplitude der Strömungsgeschwindigkeit dämpft. Während die jeweiligen Geschwindigkeitsspitzen durch die Relaxationszone ausreichend egalisiert werden, sodass an dieser Stelle von einer um den Umfang gleichmäßigen Strömung gesprochen werden kann, bleibt dieser Niveauunterschied zwischen den Geschwindigkeiten der Mittenströmung und den Randschichtströmungen bestehen. Die Korrelation zwischen der Wendelströmung und der Verweilzeit am Austritt wird im späteren Verlauf untersucht. Anhand der Auswertung zeigt sich, dass der Materialeinfluss auf diese Effekte vernachlässigt werden kann. Eine vergleichbare Auswertung bei einem Durchsatz von $30\ kg/h$ ergibt qualitativ lediglich zu niedrigeren Geschwindigkeitswerten verschobene Kurvenverläufe.

Schließlich wird in Anlehnung an die genannten Qualitätskriterien die Wandschubspannung entlang der Werkzeuggeometrie ausgewertet. Diese ist in Abbildung 3.7 mit einer Skalierung gemäß den Empfehlungen hinsichtlich minimaler und maximaler Wandschubspannungen aus Kapitel 2.3 abgebildet.

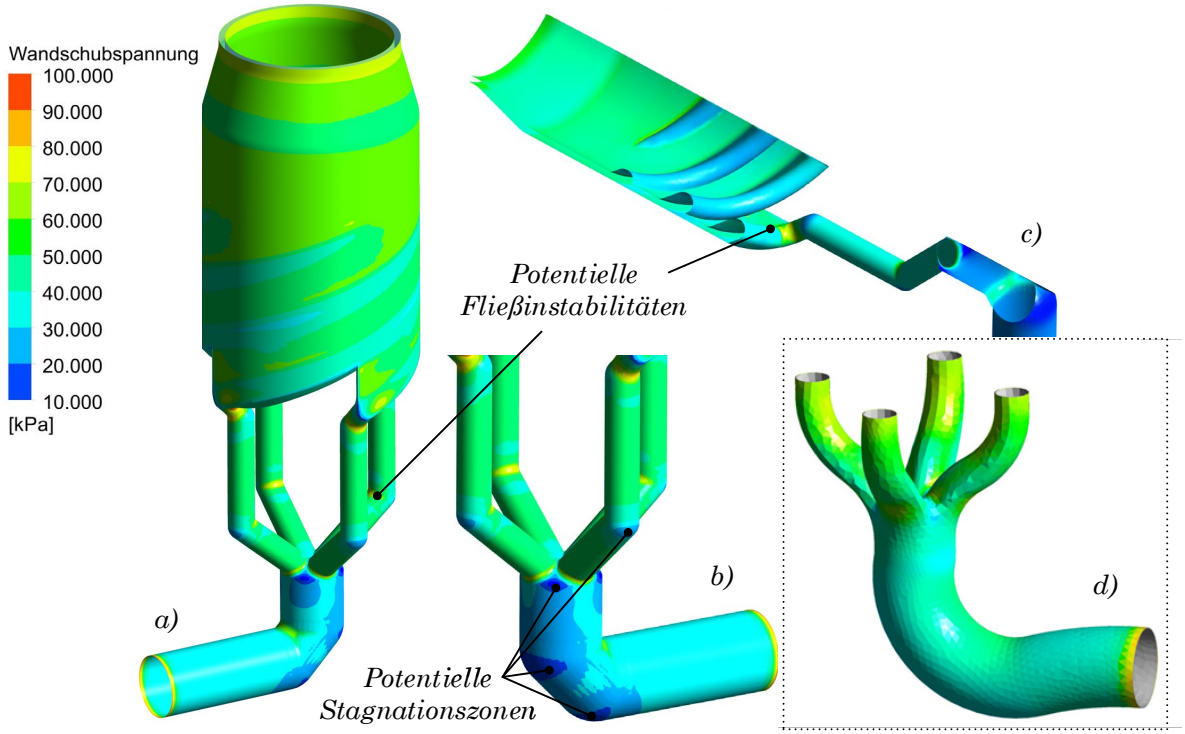


Abbildung 3.7: a), c): Auswertung der Wandschubspannung entlang der Werkzeuggeometrie; b): konventionell gefertigte Primärverteilung; d): Effekt möglicher Strömungsführung durch additive Fertigungstechnik

Während vor allem im Bereich der Sekundärverteilung (*c*)) ein homogener Verlauf der Wandschubspannung beobachtet werden kann, zeigen sich in der Primärverteilung (*b*)) Defizite. Sämtliche Umlenkungen gehen mit Bereichen kritischer maximaler und minimaler Wandschubspannung einher. An diesen Bereichen ist demnach mit Fließinstabilitäten oder Stagnationszonen zu rechnen. Der gewählte Betriebspunkt liegt mittig im ausgelegten Prozessfenster, demnach kann bei einer Verschiebung zu den jeweiligen Betriebspunktgrenzen von einer entsprechenden Skalierung der dargestellten Zustände ausgegangen werden.

In Anlehnung an das Ziel dieser Arbeit, wird in Abbildung 3.7 ein erster möglicher Effekt durch die Integration additiver Fertigungstechniken in die Werkzeugauslegung präsentiert. Die eigentliche Entwicklung der Werkzeuggeometrie folgt im kommenden Kapitel, jedoch galt es zu untersuchen, welcher Mehrwert sich für die Primärverteilung durch eine freie Kanalführung generieren lässt. Während sämtliche Querschnitte und die äußeren Abmaße identisch gehalten wurden, zeigt Darstellung *d)* eine sanfte Umlenkung der Schmelze. Unter Berücksichtigung identischer Randbedingungen zeigen die Simulationsergebnisse bereits hier signifikante Verbesserungen durch die nahezu vollständige Eliminierung der kritischen Strömungsbereiche. Das nachfolgende Diagramm quantifiziert diesen Eindruck durch die Berechnung des Qualitätskriteriums *QW* und die Auswertung der mittleren Wandschubspannung über die Wandflächen sowie deren Standardabweichung. Hintergrund dieses Vorgehens ist auf die Definition des Qualitätskriteriums mit der ausschließlichen Betrachtung von Extremwerten zurückzuführen. Während dieser Ansatz für die Bewertung von Sekundärverteilungen robust eingesetzt werden kann, da durch die erwartungsgemäße Strömungssituation die Lage der Extremwerte bekannt ist, zeigen sich für die Primärverteilung deutliche Schwächen. Bereits einzelne Zellen geringer Wandschubspannung, führen zu unbrauchbaren Bewertungskriterien und treten aufgrund der Sternverteilung zwangläufig auf. Dies zeigt auch die nachfolgende Auswertung in Abbildung 3.8. Mit Durchsätzen zwischen $15 - 100\ kg/h$ wird exemplarisch mit dem Material PE-LD das gesamte Betriebspunktspektrum abgedeckt. Im direkten Vergleich zeigt sich ein vergleichbarer, jedoch für die additiv zu fertigende Primärverteilung marginal höherer Wert für *QW*. Per Definition wäre diese Alternative somit als schlechter zu bewerten. Gleichzeitig zeichnet sich die Variante jedoch mit einer über alle Betriebspunkte geringen mittleren Wandschubspannung und zudem einer geringeren Standardabweichung aus. Verfahrenstechnisch ist die Wandschubspannung über die gesamte Primärverteilung als homogener zu bewerten.

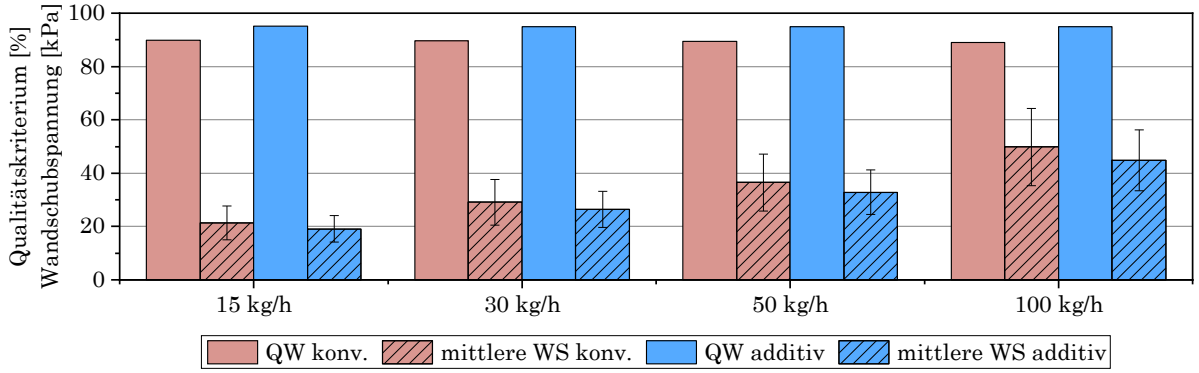


Abbildung 3.8: Vergleich der Qualitätskriterien für unterschiedliche Betriebspunkte anhand der Primärverteilung

Die Auswertung zeigt den Einfluss der Kanalführung auf die Wandschubspannung, speziell im Bereich von Umlenkungen. Anhand der Ergebnisse lassen sich bereits erste Synergieeffekte durch die Integration neuartiger Fertigungsverfahren in die Gestaltung von schmelzeführenden Kanälen ableiten. An dieser Stelle sei lediglich kurz auf die verfahrenstechnischen Potenziale eingegangen. Weitere betrachtete Aspekte werden in Kapitel 4 untersucht. Gleichzeitig wird der Bedarf eines alternativen Bewertungskriterium deutlich, sobald keine unmittelbar miteinander vergleichbaren Geometrievarianten vorliegen und der Einfluss der Extremwertbetrachtung das Ergebnis verfälscht. Hier zeigt sich die Betrachtung der Wandschubspannungsverteilung als vielversprechender Ansatz.

3.2.3 Einflussfaktoren auf die Verweilzeitverteilung

Der Einfluss der Bauart der Primärverteilung auf die Strömung in der Sekundärverteilung wurde thematisch bereits in den Arbeiten von Rotter [Rot01] und später Blömer [Blö06] untersucht. Im Rahmen dieser Arbeit soll der Kenntnisstand zum Einfluss der Primärverteilung auf die mittlere Verweilzeit am Austritt weiter ausgebaut werden und anschließend durch ein neuartiges Vorverteilerkonzept ein Ansatz zu einer homogeneren Massestromverteilung am Ende der Primärverteilung vorgestellt werden. Bevor dieses erläutert wird, analysiert Kapitel 3.2.3 zunächst den Stand der Technik und leitet Konstruktionsempfehlungen aus den Ergebnissen ab.

Wendelverteilerwerkzeuge weisen grundsätzlich ein spezifisches Verweilzeitspektrum auf [Hua98]. Um dies zu quantifizieren, wurde in Kapitel 3.1.2 bereits der Ansatz des mittleren Alters als Bewertungskriterium vorgestellt. Diese skalare Größe wird im Folgenden auf der Austrittsfläche, sowie auf definierten Kurven für einen Durchsatz von *50 kg/h* des PE-LD ausgewertet. Über das massestromgewichtete mittlere Alter am Austritt kann somit ein Rückschluss auf die mittlere Verweilzeit gezogen werden. Dementsprechend ist die Verweilzeit am Austritt über den Umfang in Abbildung 3.9 (links) aufgetragen. Der Graph zeigt die mittlere Verweilzeit entlang des Umfangs erneut für die in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Auswertkurven. Erwartungsgemäß weisen die wandnahen Strömungen, in blau und rot dargestellt, ein höheres Verweilzeitniveau auf und erstrecken sich über einen Bereich von *41 s – 48 s*. Die vier lokalen Maxima der einzelnen Verläufe lassen bereits einen Einfluss der Primärverteilung vermuten. Interessanter ist für die Auswertung jedoch der leichte Anstieg dieses Niveaus für den Winkelbereich unter *200°*. Am deutlichsten ist dies für die Mittenströmung, grün dargestellt, erkenntlich. In schwarz gestrichelt ist zur Veranschaulichung der massestromgewichtete Mittelwert des mittleren Alters für die Auswertekurve aufgetragen. Während der Winkelbereich über *150°* unterhalb dieser Geraden liegt, ist der Bereich bis 150° deutlich darüber lokalisiert.

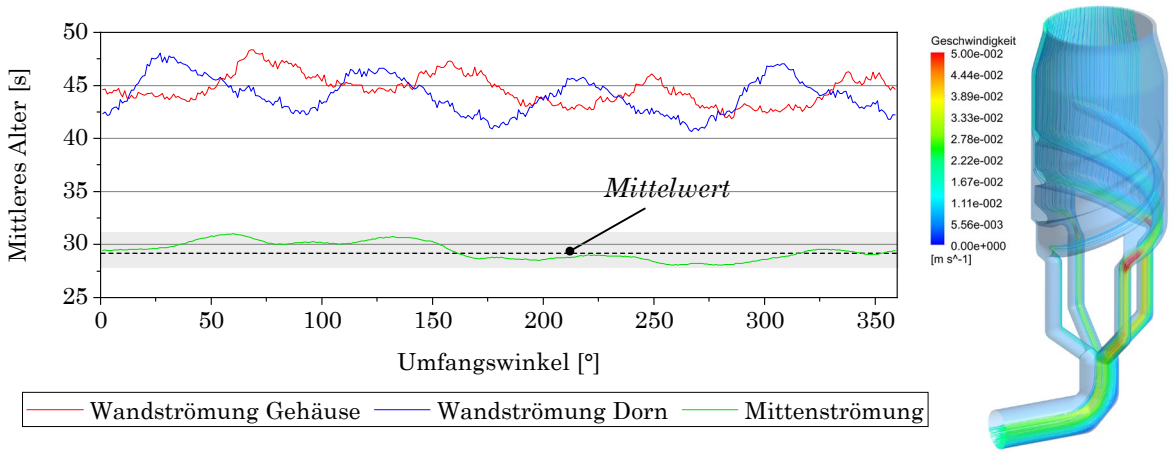


Abbildung 3.9: links: Verteilung der mittleren Verweilzeit am Austritt, rechts: Identifikation verweilzeitbeeinflussender Bereiche

Zur detaillierten Untersuchung der beeinflussenden Werkzeugbereiche ist die Untersuchung auf die gesamte Werkzeuggeometrie auszuweiten. Vergleichbar mit der Wandschubspannung und deren globalen Auswertung, kann eine verlässlichere Aussage durch gezielte Stromlinienanalysen getroffen werden. Gerade bei ungünstigen Fließwegen summieren sich moderate Stagnationszonen zu höherer Verweilzeit am Austritt auf, und beeinflussen die Verweilzeitverteilung signifikanter als Stromlinien, welche einmalig den

Bereich der globalen minimalen Wandschubspannung durchströmen. Daher wird auf Basis der Erkenntnisse aus der Auswertung des Graphen in Abbildung 3.9 eine Stromlinienanalyse durchgeführt. Für die betrachtete Simulation ergibt sich bei genanntem Massestrom eine mittlere Verweilzeit von 33,92 s. In der Auswertung werden nun gezielt die Zellen isoliert, deren Verweilzeit über diesem Mittelwert liegen. Ausgehend von diesen Zellen können Stromlinien rückwärts durch das Fluidvolumen gelegt werden, dies ist in Abbildung 3.9 (rechts) erkenntlich. In der Ansicht wird deutlich, dass diese Stromlinien nahezu vollständig der unteren Querschnittshälfte der Eintrittsfläche entspringen und somit, wie erwähnt, ungünstige Strömungsbedingungen in der Umlenkung erfahren. Durch die Sternverteilung werden diese Teilströme entsprechend gebündelt und verstärkt in einer Werkzeughälfte durch die Speisebohrungen in die Wendel geführt. Der Einfluss von Umlenkungsradien wurde bereits von Niemeier untersucht [Nie06].

Um den Einfluss der Primärverteilung auf die Verweilzeitverteilung besser zu bewerten, wird nachfolgend exemplarisch für das Referenzwerkzeug untersucht, wie ausgeprägt die Abweichung der mittleren Verweilzeit der vier Teilkanäle zueinander am Ende der Primärverteilung ist. Hierzu werden auf Höhe der Trennfuge zwischen Primär- und Sekundärverteilung vier Auswerteflächen definiert und massestromgewichtet das mittlere Alter ausgewertet. Abbildung 3.10 (links) stellt die kanalspezifische mittlere Verweilzeit der Idealverteilung (schwarz gestrichelt) gegenüber. Die Ergebnisse dieser Auswertung bestätigen die Ergebnisse der Stromlinienanalyse und zeigen eine Verschiebung der Verweilzeit in Richtung höherer Werte für Kanal 3 und entsprechend geringerer Werte für Kanal 1. Kanal 2 und Kanal 4 zeigen aufgrund der Symmetrie keine nennenswerten Abweichungen.

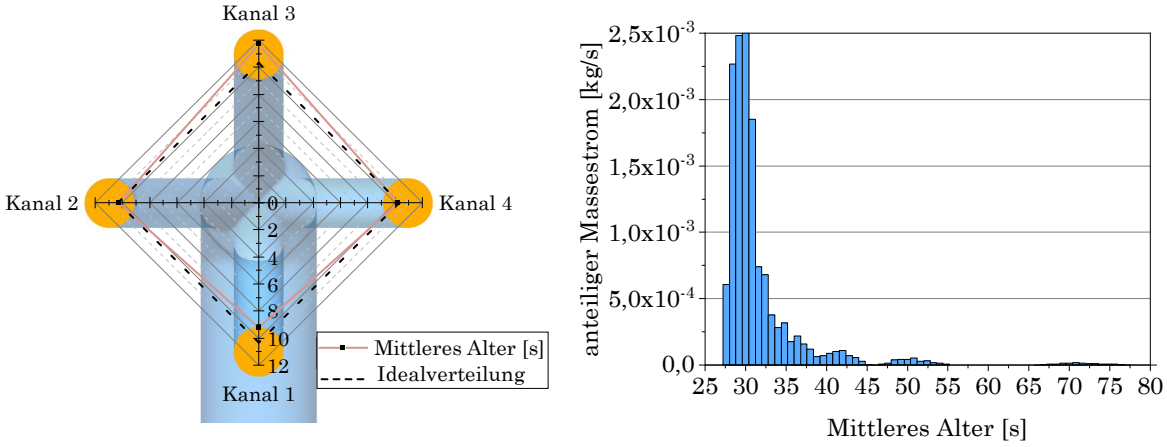


Abbildung 3.10: links: mittlere Verweilzeit am Ende der Speisebohrungen, rechts: anteilige Masseströme des Verweilzeitspektrums am Werkzeugaustritt

Jedoch ist nicht nur die mittlere Verweilzeit verfahrenstechnisch interessant, da auch das Verweilzeitspektrum die Prozessqualität beeinflusst. Speziell bei Wechselprozessen dominieren die Bereiche mit der maximalen Verweilzeit die Wechselzeit. Grundsätzlich ist demnach ein möglichst schmales Verweilzeitspektrum wünschenswert. Auf der rechten Seite von Abbildung 3.10 ist der anteilige Massestrom über das mittlere Alter am Werkzeugaustritt aufgetragen und bildet somit das Verweilzeitspektrum der gesamten Werkzeuggeometrie ab. Es zeichnet sich eine charakteristische Verteilung ab, die durch eine weite Fächerung geprägt ist. Ein Großteil des Massestroms wird mit einem mittleren Alter zwischen *27 – 33 s* ausgetragen, dennoch benötigen anteilige Schmelzepartikel mehr als *75 s* um die Werkzeugbaugruppe zu durchströmen.

Die Strömungssituation in der Primärverteilung konnte als ein Einflussfaktor für die Verweilzeitverteilung identifiziert werden. Das berechnete Spektrum beruht jedoch auf weiteren Faktoren, wobei es den Einfluss wandnaher Strömungen und deren Verlauf im Werkzeug zu untersuchen gilt. Prinzipbedingt zeichnen sich Wendelverteilerwerkzeuge durch keine ausgeprägte radiale Mischung der Strömung aus. Der Massestrom im Spalt steigt durch die auslaufenden Wendel in Extrusionsrichtung an, wobei durch Überströmeffekte tendenziell lediglich die inneren Schichten anteilig zunehmen. Im Umkehrschluss lässt sich hieraus jedoch ableiten, dass Fluidelemente, die bei Eintritt in die Sekundärverteilung bereits der Randschicht zuzuordnen sind, in der Randschicht verweilen. Ein Austausch mit der schneller strömenden Mittenschicht findet nur im geringen Maße statt. Demzufolge müsste diese Vermutung in der Auswertung der Fließhistorie der Randschicht am Austritt erkennbar sein. Zur Visualisierung wird auf dem Austritt eine benutzerdefinierte Fläche definiert, welche nur Netzelemente mit einer Verweilzeit über *50 s* berücksichtigt. Dies entspricht Zellen auf der Austrittsfläche mit einem maximalen Wandabstand von bis zu *0,223 mm*. Ausgehend von dieser Fläche, werden erneut Stromlinien entgegen der Strömungsrichtung durch die Fluiddomäne gelegt. Es ergibt sich das in Abbildung 3.11 links dargestellte Bild. Bereits hier wird ersichtlich, dass der globale maximale Wandabstand aller visualisierten Stromlinien geringer als *2 mm* berechnet wird. Einzige Ausnahme stellt hier der Aufteilungspunkt der Primärverteilung dar. Dieser liegt im Zentrum des vorgeschalteten Kreisquerschnitts, somit entspricht der Wandabstand der Stromlinien bis zu diesem Punkt dem Radius der Speisebohrung. Ab diesem Punkt fließen die vier aufgeteilten Ströme ebenfalls wandnah (Detail A). Das Strömungsbild in Detail B im Bereich der Speisebohrungen kann als verfahrenstechnisch ungünstig hervorgehoben werden. Genau die Teilströme, die bereits in der Primärverteilung in der Randschicht lokalisiert waren, werden mehrheitlich in den Wendelgrund geführt und verlassen diesen erst spät. Demgegenüber stehen Stromlinien, die nah an der metallisch dichtenden Dreiecksfläche (vgl. Kapitel 3.1.1) verlaufen und durch geringe Wandschubspannungen einen Stagnationsbereich andeuten.

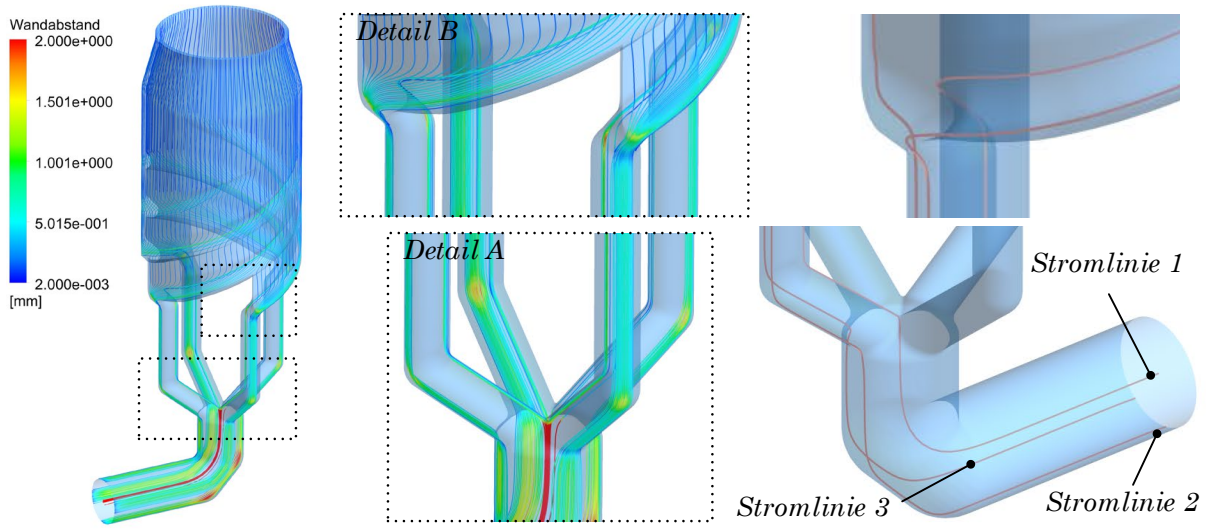
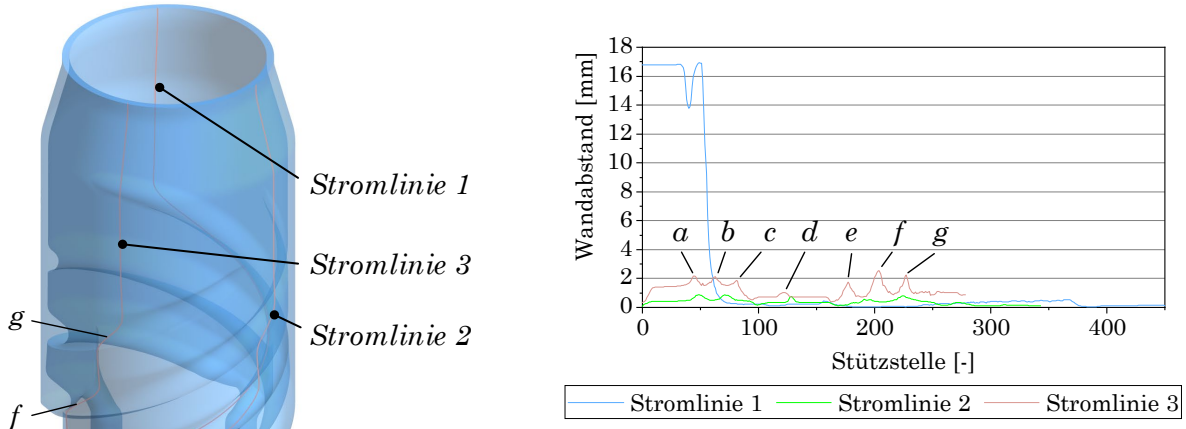


Abbildung 3.11: Zusammenhangs zwischen Wandabstand und überdurchschnittlicher Verweilzeit am Austritt; rechts: Definition exemplarischer Stromlinien

Die Korrelation zwischen geringen Wandabständen und hoher Verweilzeit am Austritt wird am Beispiel von drei exemplarischen Stromlinien verifiziert (siehe Abbildung 3.11 rechts), welche jeweils einen der identifizierten Problembereiche durchströmen. Dabei

startet Stromlinie 1 (*SL1*) im Zentrum der Einspeisung und verläuft nach dem Aufteilungspunkt durch Kanal 3, welcher bereits zuvor in Verbindung mit höheren Verweilzeiten untersucht wurde. Stromlinie 2 (SL2) folgt dem äußeren Radius der Umlenkung und folgt Stromlinie 1 auf der gegenüberliegenden Seite der Speisebohrung. Stromlinie 3 (*SL3)* wurde so definiert, dass sie möglichst nah an der zuvor genannten Dreiecksfläche entlangläuft. Dementsprechend verweilt *SL1* nahezu bis zum Wendelauslauf im Wendelgrund, *SL2* strömt an der Grenze zwischen Wendel und Spalt, jedoch bezogen auf die Extrusionsrichtung im unteren Bereich und wird erst durch die benachbarte Speisebohrung in die Spaltströmung gezwungen. *SL3* weist einen optisch kurzen Fließweg auf, jedoch durchweg wand- bzw. gehäusenah und durchströmt die Stagnationszone im Einströmbereich.

In Abbildung 3.12 ist auf der linken Seite der gesamte Verlauf der Stromlinien durch die Werkzeugbaugruppe dargestellt und beruht auf den zuvor genannten Auswahlkriterien. Auf der rechten Seite ist grafisch der Verlauf des Wandabstandes der jeweiligen Stromlinie über ihre Stützstellen aufgetragen. Diese werden bei der Stromlinienerstellung automatisch netzbasiert erstellt und unterscheiden sich dementsprechend in ihrer Anzahl.



Stromlinie	Verweilzeit am Austritt
1	66,02 s
2	72,87 s
3	59,41 s

Abbildung 3.12: Verlauf des Wandabstands für drei exemplarische Stromlinien

Der Verlauf von *SL1* zeichnet sich durch den Startpunkt im Zentrum der Einspeisung zunächst durch einen Wandabstand von *17 mm* aus, fällt jedoch ab dem Aufteilungspunkt konstant auf einen Wandabstand unter *1 mm*. *SL2* startet bereits in der Randschicht und ist durch einen gleichmäßigen Verlauf mit ebenfalls weniger als *1 mm* Abstand zur Wand zu beschreiben. Für *SL3* ist ein ungleichmäßigerer Verlauf zu erkennen, wobei der Wandabstand an sieben Stellen sprunghaft zunimmt (*a* – *g*). In der Gegenüberstellung mit dem Stromlinienverlauf sind *a* – *e* jeweils auf eine Richtungsänderung durch die Umlenkung zurückzuführen. Anschließend werden zwei Überlappungen der Wendelkanäle überströmt, wodurch der Wandabstand erneut zunimmt, durch die Spaltströmung jedoch un-

mittelbar wieder abfällt ($f - g$). Durch den anfänglich geringen Wandabstand findet in diesen Bereichen nahezu keine Umfangsverteilung statt. Die jeweilige Auswertung der Verweilzeit für die exemplarischen Stromlinien belegt den Einfluss der durchströmten Bereiche, da mindestens eine Verdopplung der mittleren Verweilzeit festzustellen ist.

Grundsätzlich lässt sich somit festhalten, dass neben der charakteristischen Verweilzeitverteilung am Austritt von Wendelverteilerwerkzeugen auch Strömungsphänomene aus der Primärverteilung sowie Randschichtphänomene als Einflussfaktoren identifiziert werden können. Auf Basis dieser Erkenntnisse lassen sich Anforderungen an die Auslegung und Gestaltung ableiten, die jedoch den Restriktionen der spanabtragenden Fertigung unterliegen. Im folgenden Kapitel wird zunächst die Verteilwirkung der Werkzeuggeometrie bewertet, bevor auf den Einfluss temperaturabhängiger Effekte eingegangen wird. Anschließend werden im Zwischenfazit konkrete Forderungen für eine erfolgreiche Integration additiver Fertigungstechniken formuliert.

3.2.4 Bewertungsansatz zur Verteilwirkung

Die Bewertung der Verteilwirkung ist aus verfahrenstechnischer Sicht relevant, da sie maßgeblich die Ausprägungen von Fließmarkierungen und somit auch die mechanische Festigkeit der Folie beeinflusst. Die unweigerliche Aufteilung des Schmelzestroms zur Ausformung des Ringspaltes erzeugt dabei Teilströme, die anschließend erneut zusammengeführt werden müssen. Wie bereits in Kapitel 2.2.2 angesprochen, wird dieser Vorgang von Wendelverteilerwerkzeugen positiv umgesetzt. Durch die spezifische Art der Umfangsverteilung bildet sich eine im Extrudatquerschnitt sichelförmige Überlagerung der Teilströme aus und steigert mögliche mechanische Festigkeiten des Produktes im Vergleich zu alternativen Verteilerlösungen.

Wie bereits in Kapitel 3.2.1 eingeführt, eignet sich zur Bewertung der Verteilwirkung die Stromlinienanalyse im Umfeld der numerischen Strömungssimulation. Hierbei werden in zwei benachbarten Speisebohrungen eine definierte Anzahl an Startpunkten vorgegeben und durch die Sekundärverteilung geführt. Anschließend kann die Umfangsverteilung qualitativ und quantitativ bewertet werden. Diese Art der Auswertung gibt jedoch keinen Aufschluss über die quantitative Verteilung der Bindenähte. Für Wendelverteiler konnte te Heesen [Hee15] zudem eine Korrelation zum Qualitätskriterium QL feststellen. Diese wird im weiteren Verlauf der Arbeit jedoch nicht berücksichtigt, da das benötigte Qualitätskriterium QL nicht für beide Bauformen ausgewertet werden kann. Somit wird nachfolgend die sich ausbildende Bindenaht im späteren Produkt ausschließlich qualitativ über Stromlinien prognostiziert, um die entworfene Werkzeuggeometrie hinsichtlich der mechanischen Produkteigenschaften zu bewerten.

Für die Auswertung wird zum einen der Gesamtüberlappungswinkel δ_{Gesamt} und der effektive Überlappungswinkel $\delta_{effektiv}$ betrachtet. Während Ersterer den Winkelbereich beschreibt, über den die Stromlinien einer Speisebohrung verteilt werden, berücksichtigt. Letzterer lediglich den sich überschneidenden Bereich mit der benachbarten Bohrung. Dieser Zusammenhang wird anhand von Abbildung 3.13 deutlich. Für Speisebohrung 1 und Speisebohrung 2 wurden auf der Querschnittsfläche von Speisebohrung 1 und Speisebohrung 2 jeweils 200 zufällig verteilte Startpunkte für Stromlinien definiert. Die Stromlinien sind zur verbesserten Erkenntlichkeit rot, respektive blau eingefärbt.

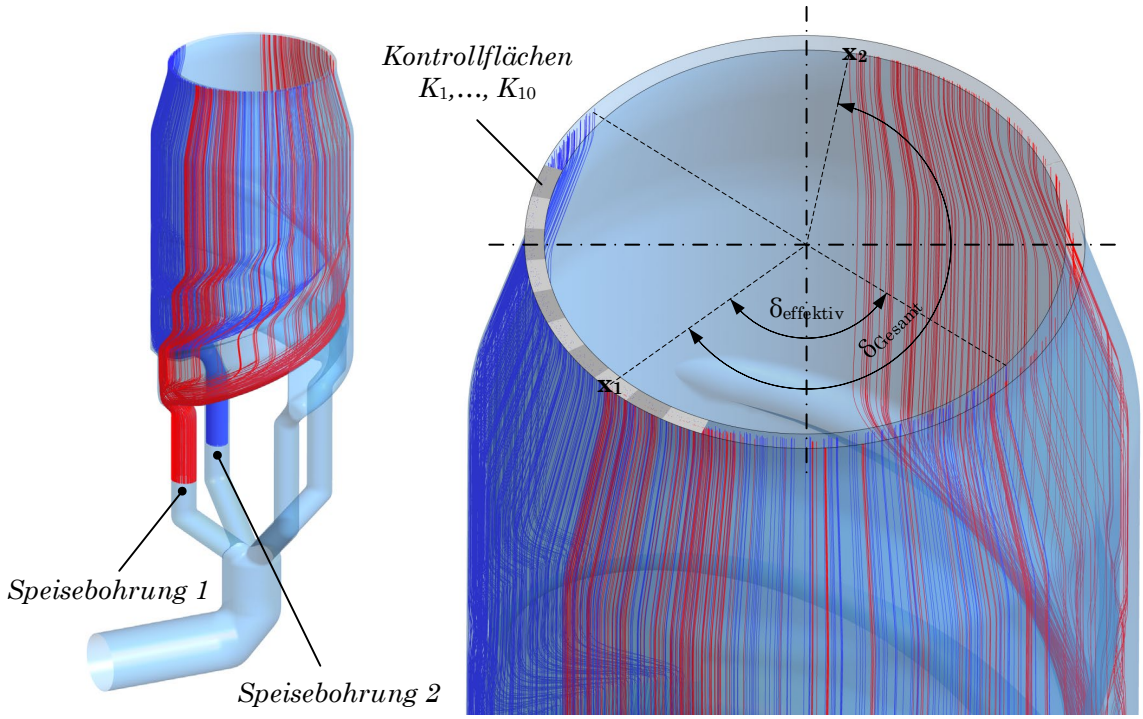


Abbildung 3.13: Gesamtüberlappungswinkel und effektiver Überlappungswinkel als Bewertungskriterium der Verteilwirkung

Anhand der Stromlinienanalyse kann deutlich der Verlauf des Fluids durch die Werkzeugbaugruppe nachvollzogen werden, signifikant ist auch hier der treppenförmige Verlauf der Stromlinien durch die Aufteilung in Wendel- bzw. Spaltströmung. Der Verlauf der charakteristischen, sichelförmigen Bindenaht kann anhand der Position der jeweilig letzten Stromlinie abgeleitet werden. Für die rot eingefärbten Stromlinien markiert x_1 die erste Stromlinie, welche am äußeren Durchmesser des Düsendorns austritt und x_2 die letzte Stromline die am inneren Durchmesser austritt. Mit erneutem Blick auf die Stromlinien in Abbildung 3.13 ist zudem das Durchströmen jeder Wendelüberlappung in Extrusionsrichtung, ohne vorherige Überführung in eine vollständige Spaltströmung positiv zu bewerten. Demnach ist eine um den Umfang gleichmäßige Verteilwirkung und dementsprechend gleichmäßig Volumenstromverteilung am Austritt anzunehmen. Um hierzu jedoch valide Aussagen zu treffen, bietet sich an dieser Stelle die Betrachtung der maximalen prozentualen Abweichung des Massestroms zum mittleren Massestrom am Austritt über definierte Kontrollflächen an. Hierfür werden die in Abbildung 3.13 erkenntlichen Kontrollflächen $K_1, \ldots, K_{10}$ über einen repräsentativen Winkelbereich gebildet. Für die vollständige Erfassung der Periodizität ist ein Winkelbereich von $90°$ mit zehn Auswerteflächen zu je $9°$ notwendig.

Der Einfluss von Massedurchsatz und Material auf den Überlappungswinkel wird anhand von Abbildung 3.14 (links) deutlich. Die Auswertung der numerischen Strömungssimulation mit zwei Materialien bei je zwei Massedurchsätzen zeigt, dass für den betrachteten Verteiler kein material- oder durchsatzinduzierter Einfluss auf den Überlappungswinkel festgestellt werden kann. Dies gilt für das untersuchte Spektrum und eine Änderung ist nur zu erwarten, wenn deutliche Abweichungen des strukturviskosen Verhaltens der Schmelzen vorliegen, was sich in abweichenden Werten für den Carreau-Parameter C zeigt. Die Untersuchungen für PE-LD und PE-HD bei je $30\ kg/h$ bzw. $50\ kg/h$ lassen sowohl für den Gesamtüberlappungswinkel, als auch den effektiven Überlappungswinkel als äußerst konstantes Verhalten beschreiben. Für den Gesamtüberlappungswinkel ergibt sich ein Winkelbereich von ca. $215°$, der effektive Überlappungswinkel liegt jeweils bei ca.

95° und umspannt somit für den vorliegenden 4-fach Wendelverteiler einen Bereich über die benachbarte Speisebohrung hinaus. Dies wird sich zum einen positiv auf die mechanischen Folieneigenschaften auswirken, da die Bindenähte zwischen zwei Teilströmen über einen weiten Winkelbereich gezogen werden, jedoch auch die mittlere Verweilzeit beeinflussen. Eine Untersuchung hierzu wurde in Kapitel 3.2.3 gegeben.

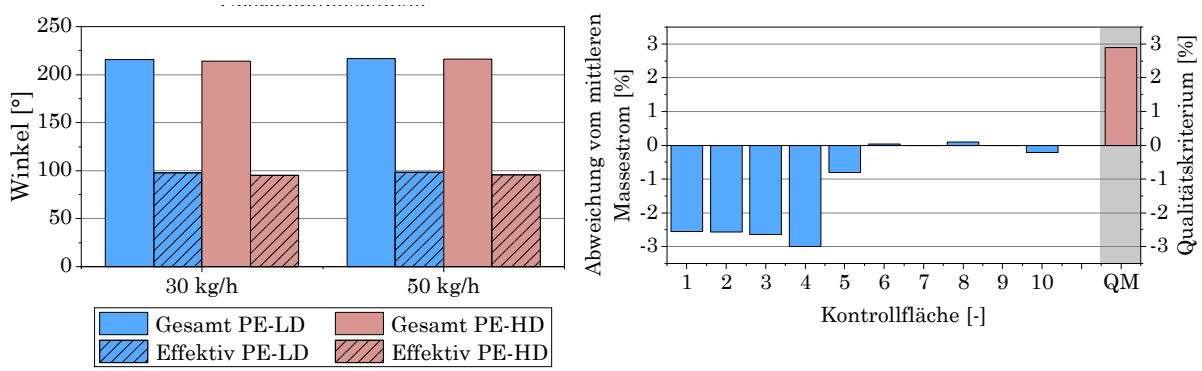


Abbildung 3.14: links: Einfluss von Durchsatz und Material auf den Überlappungswinkel, rechts: Massestromverteilung am Austritt

In Abbildung 3.14 (rechts) sind die Ergebnisse der Massestromverteilung aufgeführt. Hierbei liegt die Abweichung der jeweiligen Masseströme auf den definierten Kontrollflächen zum mittleren Massestrom zwischen *-3* bis *+0,2 %*. Diese grundsätzlich geringe prozentuale Abweichung schlägt sich in einem entsprechend guten Ergebnis bei der Berechnung des Qualitätskriteriums *QM* nieder. Für die betrachtete Berechnung liegt es bei einem Wert von *2,9 %*. Jedoch lässt sich bei der näheren Betrachtung des Graphen ein Ungleichgewicht in der Verteilung der Abweichung feststellen. Für die Kontrollflächen $K_6 - K_{10}$ ist eine sichtbar geringere Abweichung zu detektieren, als für die Kontrollflächen $K_1 - K_5$. Dies ist erneut auf die Primärverteilung und die beschriebene ungleichmäßige Aufteilung zurückzuführen. Während $K_1 - K_5$ hauptsächlich der Speisebohrung 1 entspringen, sind $K_6 - K_{10}$ auf Speisebohrung 2 zurückzuführen. Die in Kapitel 3.2.2 detektierten Effekte der Strömungsgeschwindigkeit spiegeln sich somit auch in der Massestromverteilung wieder.

Es lässt sich an dieser Stelle festhalten, dass aufbauend auf der grundsätzlichen Beschreibung der Strömungssituation eine Charakterisierung spezifischer Merkmale für Strömungen in Wendelverteilerwerkzeugen möglich ist und diese durch Ansätze zur Formulierung von Qualitätskriterien quantifizierbar werden. Die Bewertung der Verteilwirkung erlaubt zudem Rückschlüsse auf die spätere Ausprägung von Bindenähten im Produkt und lässt sich durch eine Stromlinienanalyse visualisieren und auswerten. Durch die präsentierte Auswertung lässt sich das oben beschriebene Ungleichgewicht in der Massestromverteilung detektieren, was aufgrund der Periodizität innerhalb der Sekundärverteilung Einflüsse durch die Primärverteilung abbildet.

3.3 Einfluss temperaturabhängiger Effekte

Die bisher gezeigten Ergebnisse verzichten auf eine Berücksichtigung der temperaturabhängigen Effekte. Dennoch unterliegen Kunststoffschmelzen innerhalb einer Werkzeugbaugruppe temperaturinduzierten Belastungen, wodurch die Berücksichtigung der dissipativen Erwärmung und die Temperaturabhängigkeit der Viskosität tiefere Einblicke in den Prozess bieten. Vor allem im Hinblick auf die Identifikation von Bereichen, welche

durch den Einsatz additiver Fertigungstechniken strömungsmechanisch und verfahrenstechnisch verbessert werden können, dem Ziel der Untersuchungen des Wendelverteilerwerkzeuges, erscheint dies sinnvoll.

Zatloukal et al. [ZT+01] ermittelten eine höhere Übereinstimmung zwischen experimentellen Erprobungen und FEM-Simulationen mit Berücksichtigung der temperaturabhängigen Viskosität. Die Ergebnisse von Yesildag [HoY16, Yes17] bestätigen die in Kapitel 3.2.3 untersuchten Erkenntnisse zur ungleichmäßigen Massestromverteilung in der Primärverteilung und führen zudem den Einfluss der äußeren Temperierung und der dissipativen Schererwärmung bei einem betrachteten 2^3-Verteiler an. Zur Verbesserung der thermischen Homogenität wird der Einsatz von Heizpatronen zur lokalen Anhebung der Baugruppentemperatur und einer isolierenden Aussparung als Gegenmaßnahme lokaler Temperaturspitzen vorgestellt. Die Untersuchungen zeigen eine signifikante Reduktion der Durchsatzabweichung.

Auch die Untersuchungen von te Heesen [Hee15] berücksichtigen den Einfluss temperaturabhängiger Effekte in den Simulationen und zeigen eine temperaturabhängige Absenkung der Wandschubspannung und der Viskosität durch die Schererwärmung. Diese bewirkte jedoch keine signifikante Änderung des Wendelmassestroms entlang der Wendellänge, da die betrachteten Druckgradienten annähernd identisch blieben. Für den vorgestellten Ansatz der automatisierten Werkzeugauslegung wurde die ausreichende Genauigkeit isothermer Simulationen somit belegt. Insgesamt wurden sowohl die Einflüsse der Schererwärmung auf die Temperaturverteilung, sowie Durchsatz- und Materialabhängigkeit untersucht. Die Ergebnisse berücksichtigten zudem die Wärmeleitung in den Stahlbauteilen und zeigten temperaturbedingte Auswirkungen auf die maximale und mittlere Schmelzetemperatur am Werkzeugaustritt, sowie die Ausprägung eines Wärmestaus im Werkzeugbereich der Nachfolgezone, welcher zum verbesserten Prozessverständnis weiter untersucht werden muss. Bei einer Steigerung des Massedurchsatzes von $100\ kg/h$ auf $200\ kg/h$ wurde ein signifikanter Anstieg der maximalen Temperatur auf der Innenseite des Ringspaltes, jedoch nur ein moderater Anstieg des gewichteten Mittels beobachtet. Dies legt die Vermutung nahe, dass die Schmelze aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit isolierend wirkt und die scherinduzierte Temperaturerhöhung lokal restringiert. Während die Wärme nach außen konvektiv abgeführt werden kann, kommt es im Inneren des Werkzeuges zu einem Anstieg der Werkzeugtemperatur. Es wird der Einsatz einer Werkzeuginnenkühlung vorgeschlagen und mögliche Effekte durch die Definition einer konstanten Wandtemperatur im Bereich der Innenbohrung des Düsendorn vorgestellt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die von te Heesen generierten Ergebnisse aufgebaut. Grundsätzliche Einflüsse der Berücksichtigung thermischer Effekte und unterschiedlicher Betriebspunkte werden nicht erneut betrachtet. Fokus der Untersuchungen liegt auf dem genannten Wärmestaubereich in der Nachfolgezone. Ein konkreteres Konzept einer Werkzeuginnentemperierung liefert Ergebnisse zur lokalen Beeinflussung des Wärmehaushaltes und gibt Aufschluss über die abzuführende Wärmemenge. Hieraus leiten sich weitere Ansätze für das entwickelte Werkzeugkonzept ab.

3.3.1 Identifikation von Wärmestaubereichen und thermischer Inhomogenität

Bei der nicht-isothermen Simulation einer Werkzeugbaugruppe werden temperaturabhängige Effekte neben der Miteinbeziehung der Temperaturabhängigkeit der Viskosität und der dissipativen Erwärmung des Materials zudem durch den Wärmeübergang zwi-

schen den Werkzeugkomponenten und im Austausch mit dem strömenden Medium berücksichtigt. Dementsprechend sind die in Kapitel 3.1.2 vorgestellten Randbedingungen durch zusätzliche thermische Randbedingungen zu ergänzen.

Für konsistente Ergebnisse wird der zuvor betrachtete 4-fach Wendelverteiler ebenfalls für die temperaturabhängigen Simulationen und die spätere experimentelle Erprobung herangezogen. Der grundsätzliche Aufbau und die Modellbildung entspricht dabei der Werkzeugbaugruppe, die in der Arbeit von te Heesen betrachtet wurde. Für die Definition der Randbedingungen sind nunmehr sämtliche Flächen, die im Wärmeaustausch stehen, relevant. Die äußeren metallischen Gehäuseflächen sind durchweg mit elektrischen Widerstandsheizbändern temperiert. An der Unterseite wird Wärme an die Umgebung durch freie Konvektion abgegeben. Grundsätzlich findet dies auch an der Oberseite statt, jedoch muss hier in die äußere Fläche des Zentrierrings und die innere Fläche des Düsendorns, innerhalb der Folienblase, unterschieden werden. Die Unterseite sowie die Zentrierringfläche sind im realen Prozess mit einer Isolierplatte versehen, zudem bewirkt der aufgelegte Kühlring einen zusätzlichen isolierenden Luftspalt. Te Heesen hat in seiner Arbeit aus diesem Aufbau die zusätzlichen thermischen Randbedingungen abgeleitet. Für die Widerstandsheizungen ergab sich lediglich eine konstante Wandtemperatur. Komplexer gestaltete sich die Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten an den übrigen Flächen. Als praxisorientiertes Mittel wählte te Heesen die experimentelle Messung der sich einstellenden Oberflächentemperaturen an den betreffenden Flächen. Auf Basis dieser Messwerte, wurden die Übergangskoeffizienten iterativ angepasst, bis die simulierten Temperaturen mit den Gemessenen übereinstimmten. Die daraus abgeleiteten Randbedingungen für die nachfolgend durchgeführten Simulationen sind in Abbildung 3.15 dargestellt. Da die Simulationen mit einem PE-HD aufgrund der spezifischen Fließeigenschaften den deutlichsten Einfluss auf die Temperatur zeigten und dieser erwartungsgemäß mit dem Durchsatz skalierten, werden die vorgestellten Ergebnisse ausschließlich diesen Simulationen entnommen.

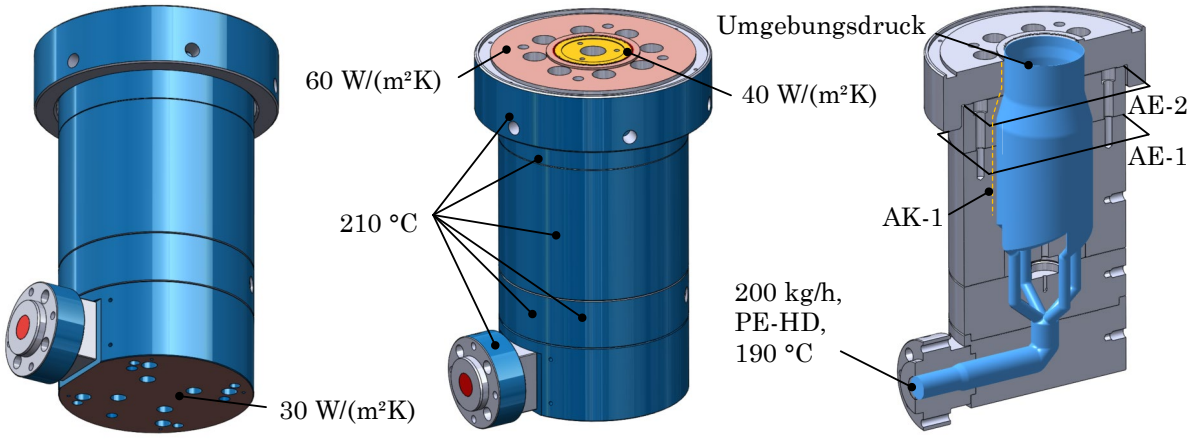


Abbildung 3.15: Aufbau und Randbedingungen der temperaturabhängigen Strömungssimulationen

Für die Auswertung der Temperaturverteilung werden zwei Ebenen entlang der Extrusionsrichtung definiert. Auswerteebene 1 (*AE-1*) ist am Ende des Wendelverteilers lokalisiert, Ebene 2 (*AE-2*) im Bereich der Nachfolgezone. Auf diesen Ebenen werden die Ergebnisse analog zu Kapitel 3.2.2 entlang des Umfangs jeweils in Wandnähe (*a* und *i*) mit einem Abstand von *0,1 mm* zu der jeweiligen Wand und in der Kanalmitte (*m*) ausgewertet. Zur Bewertung des Temperaturverlaufs entlang der Stahlbauteile sind zwei zusätzliche Kurven (*AK-1* und *AK-2*) im Gehäuse respektive Dorn konturnah mit einem Abstand von

2 mm zum Fließkanal definiert. *AK-1* ist in Abbildung 3.15 dargestellt, *AK-2* ist analog dazu auf der Innenseite des dargestellten Fluidvolumens lokalisiert.

In der Gegenüberstellung in Abbildung 3.16 (links) wird zunächst die Temperaturerhöhung in den Werkzeugkomponenten außerhalb (*AK-1*) und innerhalb (*AK-2*) des Kreisringspaltes verglichen. Beide Auswertekurven starten auf Höhe des Wendelauslaufs und verlaufen bis zum Werkzeugaustritt. Bereits hier wird der unterschiedliche Effekt der dissipativen Temperaturerhöhung auf die Werkzeugkomponenten deutlich. Der Verlauf der Temperatur auf der äußeren Kurve zeigt einen geringfügigen Anstieg von anfänglich 213,45 *°C* auf *214,56 °C,* überschreitet aber die Werkzeugwandtemperatur von *210 °C* nur marginal. Im Bereich der Nachfolgezone fällt die Temperatur signifikant ab, da in diesem Bereich Wärme durch freie Konvektion an die Umgebung abgegeben wird. Insgesamt resultiert die dissipative Schererwärmung zwar in einer Erhöhung der Gehäusetemperatur, kann jedoch ausreichend an die Umgebung abgeführt werden. Der Temperaturverlauf im Inneren des Dorns zeigt einen abweichenden Verlauf. Bereits am Anfang der Auswertekurve liegt die Materialtemperatur des Festkörpers bei 223 °C und steigt zum Düsendorn auf 227 °C an. Te Heesen [Hee15] beschreibt den Wärmestau im oberen Werkzeugbereich als Effekt der isolierenden Schmelzeschicht im Ringspalt. Es findet keine Wärmeabfuhr an die Umgebung statt, da radial die Schmelze und axial die Folienblase dies verhindern.

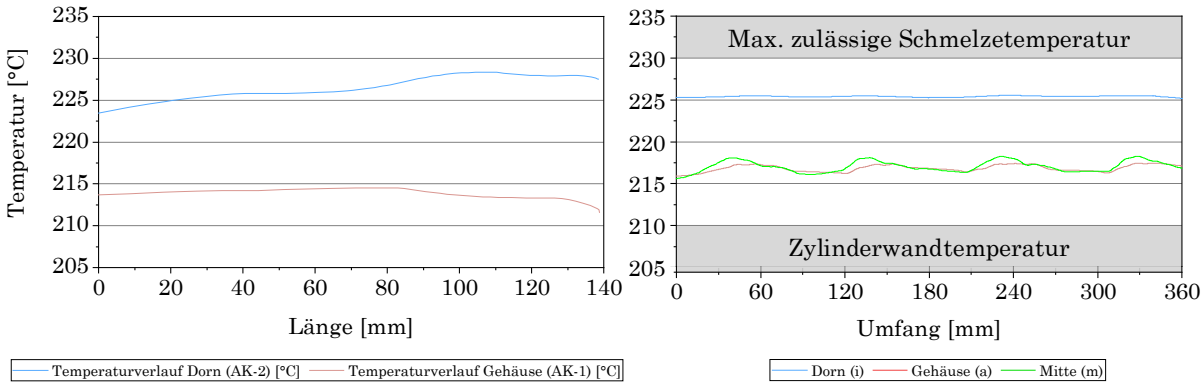


Abbildung 3.16: links: Verlauf der Bauteiltemperaturen in Gehäuse (AK-1) und Dorn (AK-2); rechts: Auswertung der Temperaturverteilung im Ringspalt (AE-1)

Die Auswirkungen auf die Schmelzeströmung werden durch die Auswertung der Schmelzetemperaturen im Ringspalt in Abbildung 3.16 (rechts) sichtbar. Für alle Auswerteebenen zeigt sich ein qualitativ vergleichbares Bild, sodass die Effekte anhand der Ergebnisse von *AE-1* dargestellt werden. Die Strömung weist radial einen Temperaturverlauf mit steigenden Temperaturen zum Inneren der Baugruppe auf. Der genannte Wärmestaubereich in den Werkzeugkomponenten führt somit ergänzend zur Dissipation zu einer Erhöhung der Materialtemperatur über die definierte Zylinderwandtemperatur hinaus. Dieses Phänomen ist qualitativ für ein weites Betriebspunktspektrum erkennbar, wenn auch moderater ausgeprägt bei geringeren Durchsätzen.

Die Auswertung der Temperaturverteilung in Abbildung 3.17 auf der Austrittsfläche (*AE-2*) untermauert die gezeigten Ergebnisse. Während sich die minimalen und mittleren Schmelzetemperaturen bei einer Erhöhung des Massedurchsatzes von *50 kg/h* auf *200 kg/h* nur geringfügig erhöhen und ein vergleichbares Niveau vorweisen, erkennt man für die maximalen Schmelzetemperaturen einen signifikanten Anstieg um bis zu 13 °C. Dies bestätigt die zitierte Aussage zu der isolierenden Wirkung der Schmelze.

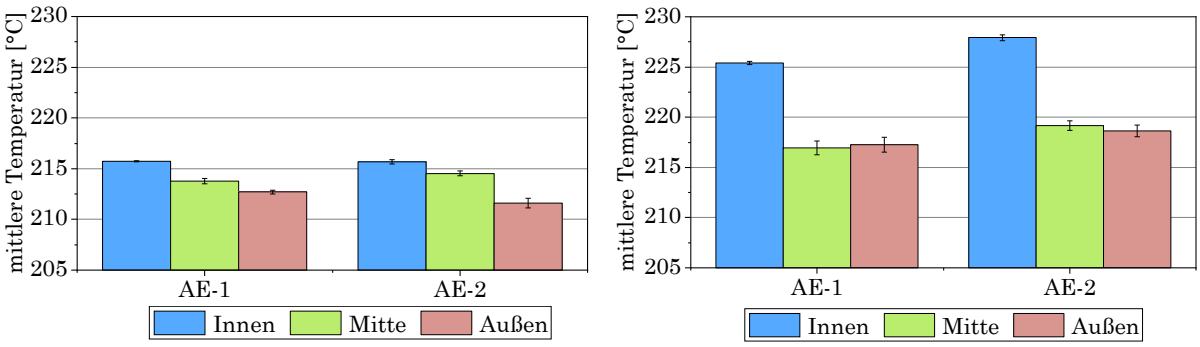


Abbildung 3.17: Minimale, mittlere und maximale Fluidtemperaturen für unterschiedliche Massedurchsätze; links: PE-HD 50 kg/h, rechts: PE-HD 200 kg/h

Zusammenfassend wird festgehalten, dass die Berücksichtigung temperaturabhängiger Effekte wichtige Einblicke in den Prozess ermöglichen und diesen insgesamt realitätsnäher abzubilden. Dies ermöglicht die Identifizierung weiterer Bereiche konventioneller Werkzeugkonzepte, welche vor dem Hintergrund möglicher Verbesserungen durch die fertigungstechnischen Möglichkeiten der additiven Fertigungstechnik im Fokus dieser Arbeit stehen. Für den Prozess ist eine Reduktion des Wärmestaubereichs gleichbedeutend mit einer potentiellen Durchsatzsteigerung, sofern zulässige Schmelzetemperaturen eingehalten werden können. Daher wird nachfolgend der Effekt einer Werkzeuginnenkühlung simuliert und die Ergebnisse für das weitere Vorgehen berücksichtigt. Abschließend wird im Vergleich zu den zuvor erwähnten Untersuchungen von Yesildag [Yes17] deutlich, dass bezüglich einer Werkzeugtemperierung keine allgemeingültige Aussage getroffen werden kann. Während in den genannten Untersuchungen und für die betrachtete Bauform der Primärverteilung eine Wärmezufuhr im Inneren der Baugruppe zielführend war, zeigen die Ergebnisse für den Düsenbereich des Wendelverteilerwerkzeuges eine notwendige Wärmeabfuhr.

3.3.2 Beeinflussung des Temperaturhaushalts durch Werkzeuginnenkühlung

Das bestehende Modell wird im Folgenden angepasst und durch eine Werkzeuginnenkühlung ergänzt. Da bei der Untersuchung kein Anspruch auf fertigungstechnische Umsetzbarkeit gesetzt wird, sondern die Ergebnisse vielmehr Grundlage für die nachfolgenden Entwicklung sind, wird der Kühlkanal in Form einer Helix durch den Wendel- und den Düsendorn ausgetragen. Dabei beträgt der Durchmesser der Helix *40 mm*, die Steigungshöhe 25 *mm*, und die Anzahl der Umdrehungen 8,5. Der Kreisquerschnitt des Kanals hat einen Durchmesser von 4 *mm*. Als Kühlmedium wird Luft mit einem Druck von *2 bar* als Eingangsrandbedingung definiert, die weiteren Randbedingungen bleiben bestehen. Der Aufbau ist in Abbildung 3.18 dargestellt.

Anhand der Ergebnisse zeigt sich der gewünschte Effekt für den Wärmestaubereich. Der erneute Vergleich der Inneren und Äußeren Dorn- bzw. Gehäusetemperatur zeigt, dass die Temperaturerhöhung in Extrusionsrichtung im Dorn signifikant reduziert werden konnte, ohne die Temperatur in den Gehäusebauteilen nennenswert zu beeinflussen. Der integrierte Kühlkanal ist somit in der Lage, die Dissipationsleistung zu kompensieren und die Wärme abzuführen. Für Variationen in Kanaldurchmesser, Steigungshöhe und Anzahl der Umdrehungen wird der Effekt jeweils verstärkt bzw. gedämpft. Die Intention der

Werkzeuginnenkühlung war jedoch nicht primär eine Reduzierung der Bauteiltemperatur, sondern vielmehr das unmittelbare Herabsenken der tatsächlichen Schmelzetemperatur.

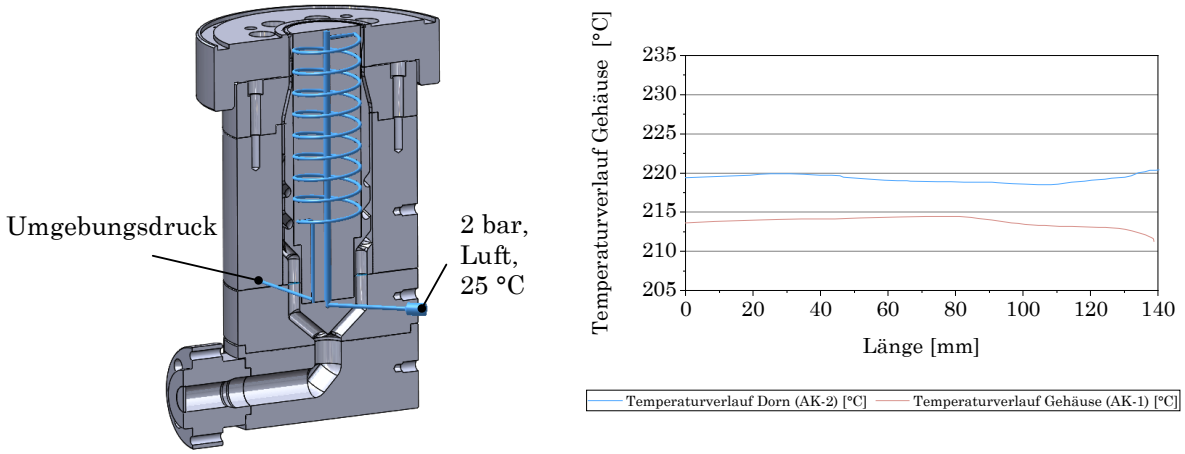


Abbildung 3.18: links: Integration der Innenkühlung in das Werkzeugmodell; rechts: Einfluss der Innenkühlung auf die Temperatur der Werkzeugkomponenten

Die generierten Daten werden analog zu den vorherigen Simulationen an den zwei definierten Ebenen ausgewertet. Inwieweit die Schererwärmung kompensiert werden kann, zeigt die Auswertung der minimalen, mittleren und maximalen Schmelzetemperaturen in Abbildung 3.19. Hier zeigt sich, dass die Schmelzetemperatur in der Mittenschicht und in Gehäusenähe nur geringfügig gesenkt wurden. Die isolierende Wirkung der Kunststoffschmelze führt zu keinem signifikanten Wärmeaustausch in diesen Bereichen. Die maximale Schmelzetemperatur konnte hingegen deutlich reduziert werden. Aufgrund der Strömungsrichtung der Kühlluft durch die Innenkühlung liegt die Maximaltemperatur in *AE-2*, als zuerst durchströmter Bereich, sogar unter der in *AE-1*. Verfahrenstechnisch ist dies durchaus sinnvoll, da die Temperatur am Werkzeugaustritt für eine effiziente Kühlung der Folienblase möglichst gering sein soll. Im Diagramm auf der rechten Seite wird die Entwicklung noch einmal durch die prozentuale Temperaturreduzierung im Vergleich zu den Berechnungen ohne Innenkühlung verdeutlicht. Hier kann die Maximaltemperatur um bis zu 3,8 % gesenkt werden.

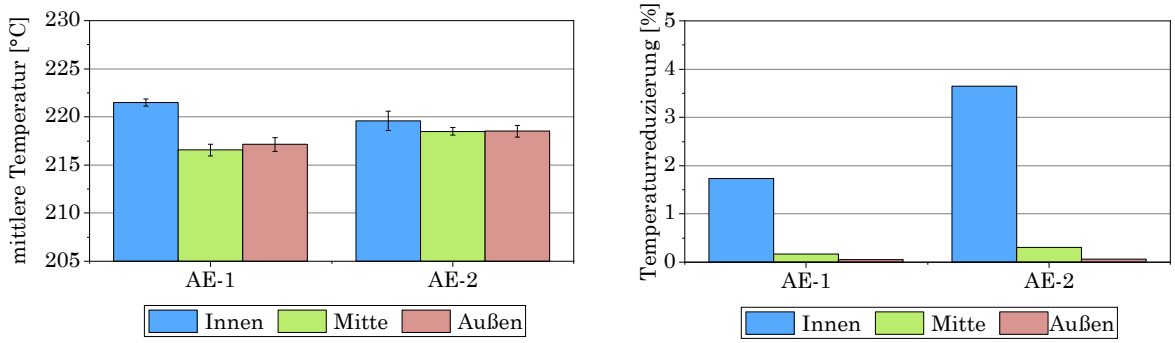


Abbildung 3.19: links: Minimale, mittlere und maximale Fluidtemperaturen für die Auswertebenen; rechts: prozentuale Temperaturreduzierung; PE-HD – 50 kg/h

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die abzuführende Wärmemenge verhältnismäßig gering ist. Das Problem an dieser Stelle ist weniger die dissipativ erzeugte Wärmeenergie, sondern vielmehr der ungenügende Wärmeaustausch mit der Umgebung oder zumindest

mit den äußeren Gehäusekomponenten. Das verdeutlicht vor allem die Auswertung der Schmelzetemperatur im Ringspalt. Weder die minimale, noch die mittlere Schmelzetemperatur werden durch die Innenkühlung nennenswert beeinflusst, obwohl die Temperatur der inneren Stahlbauteile um bis zu 9 °*C* und die Maximaltemperatur der Schmelze um bis zu 8 °*C* in der Nachfolgezone reduziert werden konnte. Werden zudem die Ergebnisse aus Kapitel 3.2 und dem daraus abgeleiteten Wunsch nach einer Intensivierung der Quermischung berücksichtigt, zeigt sich dieser Ansatz auch in Hinblick auf den Temperaturhaushalt der Werkzeugbaugruppe förderlich. Daher wird in Kapitel 4.2.1 eine Geometrie zur radialen Mischung vorgestellt und in Kapitel 4.3.3 der Einfluss auf die thermische Homogenität untersucht.

3.4 Zwischenfazit und Überlegungen zur verbesserten Schmelzeführung

An dieser Stelle werden die bisher generierten Ergebnisse kurz resümiert und in den Gesamtkontext der Arbeit eingeordnet. Auf Basis numerischer Strömungssimulation an einem bestehenden, konventionell gefertigten Werkzeug konnten zielgerichtet Bereiche identifiziert werden, welche für die lokale und globale Strömungssituation aus verfahrenstechnischer Sicht ungünstig ausgeführt sind. Der Fokus der Untersuchungen lag hierbei auf Bereichen, welche aufgrund spanabhebender Fertigungsverfahren eine bestimmte geometrische Ausprägung haben, nicht auf einer für den betrachteten Betriebspunkt ungünstigen Auslegung.

Relevant für das weitere Vorgehen sind speziell die Ergebnisse der Verweilzeituntersuchung und der temperaturabhängigen Berechnungen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass am Austritt des Wendelverteilerwerkzeuges eine ungleichmäßige Schmelzehistorie vorliegt und sich in einem breiten Verweilzeitspektrum äußert. Durch die Auswertung der mittleren Verweilzeit über die Berechnung des mittleren Alters konnte die Primärverteilung als eine Einflussgröße identifiziert werden, da sich durch die Umlenkung bereits früh abweichende Strömungsbedingungen über den Querschnitt einstellen. Ungünstigerweise führt die anschließende Aufteilung des Schmelzestroms zu unterschiedlichen Zuständen in den jeweiligen Speisebohrungen. Die Auswertung der Strömungsgeschwindigkeit und dementsprechend auch der Masseströme, sowie letztendlich der mittleren Verweilzeit lassen eine Quantifizierung dieser Abweichungen zu. Des Weiteren wurde untersucht, inwieweit ein Schmelzepartikel, welcher bereits im Bereich der Primärverteilung in der Randschicht strömt, in der nachfolgenden Sekundärverteilung eine Quermischung erfährt. Jedoch findet durch das Wirkprinzip der Verteilung in axialer und Umfangsrichtung kein erzwungener Austausch mit der Mittenschicht statt. Je nach Strömungsverlauf wird dieser Schmelzepartikel mitunter durch den vollständigen Wendelkanal transportiert und kann als verweilzeitbestimmend bewertet werden.

Schließlich zeigt die Berücksichtigung thermischer Effekte signifikante Einflüsse auf den Temperaturhaushalt einer Werkzeuggeometrie. Die äußeren Gehäusebauteile können Dissipations-Wärme an die Umgebung abgeben, da sie nicht mit der isolierenden Kunststoffschmelze umgeben sind. Aufgrund insuffizienter Wärmeabfuhr im Bereich des Düsendorns kommt es im Inneren der Baugruppe jedoch zu einem ein Wärmestau. Die äußeren Gehäusebauteile können diese Wärme an die Umgebung abgeben, da sie nicht mit der isolierenden Kunststoffschmelze umgeben sind. Die Auswertung der numerischen Strömungssimulationen zeigt daher einen Temperaturgradienten in der Ringspaltströmung von innen nach außen, wobei die maximalen Schmelzetemperaturen mitunter außerhalb des Verarbeitungsbereichs liegen. Unter Berücksichtigung der mangelhaften Quermischung findet auch in der Spaltströmung kein nennenswerter Wärmeaustausch statt.

Zusammenfassend bilden die gezeigten Ergebnisse die Grundlage zur Identifikation von Werkzeugbereichen, welche aufgrund der fertigungstechnischen Möglichkeiten in einer gewissen Form ausgeführt sind, jedoch verfahrenstechnische Defizite aufweisen. Es ergibt sich die Forderung, den Kenntnisstand zur Auslegung von Extrusionswerkzeugen durch neuartige Fertigungsverfahren zu erweitern. Die Motivation der Arbeit sieht dabei die Herstellung eines Demonstratorwerkzeuges durch das Laser-Strahlschmelzen vor, um die Potenziale einer Kanalführung ohne die Restriktionen konventioneller Fertigungsverfahren zu eruieren. Für den Auslegungsprozess werden drei Gestaltungsziele aus den bisherigen Erkenntnissen abgeleitet:

1. Eine Aufteilung des vom Extruder bereitgestellten Schmelzestroms vor der Umlenkung, um Teilströme identischer Schmelzehistorie zu generieren und so vergleichbare Bedingungen für die Sekundärverteilung zu schaffen.
2. Eine Primärverteilung, die durch eine verbesserte Kanalführung eine über den Querschnitt homogenere Schmelzeführung gewährleistet.
3. Eine Umlagerung der Strömung, zur Vermeidung von Teilströmen, welche dauerhaft in der Randschicht verlaufen und das Verweilzeitspektrum negativ beeinflussen.

4 Entwicklung eines additiv gefertigten Werkzeugkonzepts zur Blasfolienextrusion

Gemäß eingangs definierter Motivation der vorliegenden Arbeit wird nachfolgend der Entwicklungsprozess eines additiv gefertigten Extrusionswerkzeuges, auch Demonstratorwerkzeug genannt, beschrieben. Aufbauend auf den generierten Erkenntnissen besteht das Bestreben, die Blasfolienextrusionswerkzeugauslegung mit Fokus auf den Strömungsvorgängen im Werkzeug thermo-rheologisch zu verbessern. Der Aufbau gliedert sich in die Auslegung und Konstruktion eines Konzepts für eine additiv gefertigte Primär- bzw. Sekundärverteilung und bewertet die Ergebnisse mit Hilfe der numerischen Strömungssimulation.

4.1 Konzeptentwicklung einer Primärverteilung unter Berücksichtigung freier Kanalführung

Zunächst wird die Konzeptentwicklung der Primärverteilung vorgestellt. Das Hauptaugenmerk der Auslegung liegt dabei auf einer möglichst identischen Fließ- bzw. Belastungshistorie entlang der unterschiedlichen Teilströme. Diese Forderung (gemäß Kapitel 2.3) kann von einer konventionell gefertigten Primärverteilung aufgrund der Umlenkungen nicht vollständig gewährleistet werden. Verdeutlicht wird dies durch die gezeigte Auswertung der Teilmasseströme und der Verweilzeit. Zudem bewirkt eine unterschiedliche thermisch induzierte Belastung (wie von Yesildag [Yes17] untersucht), speziell bei zu Degradation neigenden Materialien, eine zusätzliche negative Beeinflussung der Wanddickenverteilung. Da die Strömungsvorgänge in der Sekundärverteilung um den Umfang aufgrund der Periodizität als annähernd identisch zu definieren sind, unterstreicht dies umso mehr die Forderung nach einer bestmöglich vergleichbaren Fließhistorie vor der Sekundärverteilung.

Innerhalb dieses Kapitels wird die Kanalführung nicht anhand der Werkzeuggeometrie, sondern des subtrahierten Schmelzevolumens dargestellt, da diese Aufbereitung ohnehin für die durchgeführten Simulationen notwendig ist. Die konkrete Gestaltung des Gehäuses wird im folgenden Kapitel aufgegriffen. Um die mechanische Integration in die vorhandene Technikumsanlage zu gewährleisten, wurden vorab allerdings einige Zwangsbedingungen definiert. Die geometrischen Grenzen orientieren sich an dem beschriebenen Referenzwerkzeug. Für die grundlegende Dimensionierung wird der äußere Gehäusedurchmesser des Referenzwerkzeuges übernommen, um eine problemlose Adaption auf dem Werkzeugwagen mit der vorhandenen Peripherie, sowie Heizbänder und Anschlussflansche zu gewährleisten. Zusätzlich ergibt sich ein definierter Eintrittsdurchmesser und der Austrittsquerschnitt nach der Primärverteilung als Schnittstelle zur Sekundärverteilung. Die Höhe ist anlagentechnisch zunächst kein einschränkendes Kriterium, sollte jedoch die Höhe der bestehenden Primärverteilung nicht überschreiten. Somit können bei vergleichbar dimensionierten Teilkanälen eine reduzierte Verweilzeit sowie Druckverbrauch angestrebt werden.

4.1.1 Fertigungsgerechte Querschnittsauslegung

Der nachfolgend gezeigte Ansatz sieht vor, die Forderung nach einer vergleichbaren Belastungshistorie für die Kunststoffschmelze mittels additiver Fertigung umzusetzen. Wie

bereits erläutert, kennzeichnet sich die Auslegung der Fließkanäle durch eine freie Führung ohne unmittelbare Knickbereiche, wie sie in 90°-Umlenkungen vorzufinden sind. Das grundlegende Auslegungsziel beruht dabei auf einer möglichst sanften Schmelzeführung mit einer identischen Fließweglänge bei identischen Querschnitten um eine vergleichbare Fließhistorie zu generieren.

Bevor die finale Kanalführung und deren Konstruktion genauer vorgestellt wird, werden kurz einige Details zusammengefasst, die während der Bearbeitung untersucht wurden. Dabei wurde thematisch vorrangig die Anzahl der Teilkanäle, der Einfluss der Querschnittsgeometrie auf den Fertigungs- und Verarbeitungsprozess, sowie die Konstruktion in der CAD-Umgebung behandelt. Für das Verständnis sind die während des Entwicklungsprozesses untersuchten Geometrien in Abbildung 4.1 zusammengefasst. Dabei zeigt die linke Abbildung das Fluidvolumen einer Variante mit zwölf Teilkanälen und einem runden Kanalquerschnitt. Der definierte zulässige Bauraum ist in blau angedeutet. Die mittlere Abbildung zeigt eine abgewandelte Variante mit einem elliptischen Querschnitt. Schließlich ist die finale Version mit vier Teilkanälen und einem elliptischen Kanalquerschnitt auf der rechten Seite dargestellt. Nachfolgend werden diese Geometrie und der dazugehörige Optimierungsprozess, sowie die simulierten und erprobten Ergebnisse vorgestellt. Zuvor werden anhand der vorherigen Varianten Konstruktionsempfehlungen für die additive Fertigung einer Primärverteilung mit freier Kanalführung abgeleitet, deren Grundlagen auf ähnliche Problemstellungen übertragbar sind.

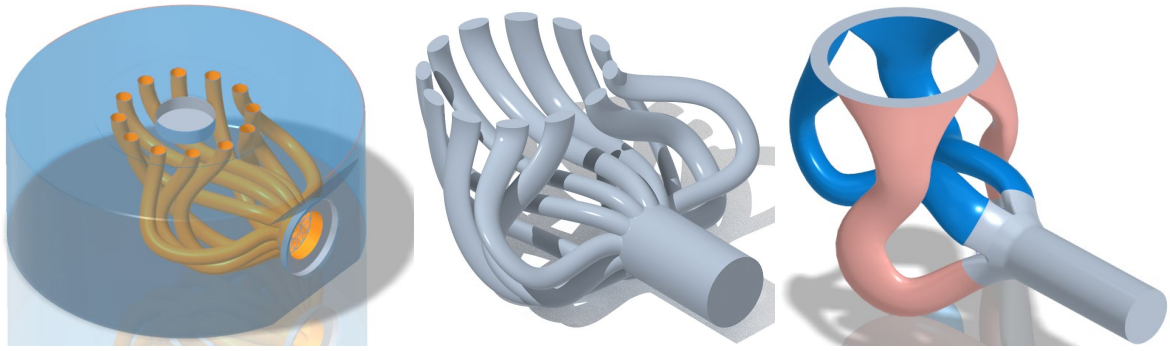


Abbildung 4.1: Varianten des Fluidvolumens im Entwicklungsprozess

Als offensichtliche Gemeinsamkeit der Varianten fällt zunächst der prinzipielle Verlauf der Teilkanäle auf. Diese werden allesamt frei im Bauvolumen geführt und sind ortsfest nur an der Schmelzeaufteilung und dem Austritt definiert. Eingangs wurde bereits die Forderung nach einer identischen Fließweglänge gestellt. Demnach müssen die Teilkanäle in Abhängigkeit zum Abstand zwischen Ein- und Austritt unterschiedlich aufwändig im Volumen geführt werden. Dabei muss ein Kompromiss zwischen der für das Volumen maximalen sinnvollen Kanallänge (in Abbildung 4.1 rot dargestellt) und einer Mindestlänge (blau dargestellt) gefunden werden. Die Mindestlänge ergibt sich offensichtlich aus der notwendigen minimalen Kanallänge, deren Fertigung eine geometrische Problemstellung darstellt. Demgegenüber muss für die maximale Kanallänge nach wie vor ein strömungsmechanisch zufriedenstellender Zustand für alle Teilkanäle gewährleistet sein, ohne, dass ungünstige Umlenkungen der Schmelze diesen beeinflussen. Sie stellt demnach ein zu lösendes verfahrenstechnisches Problem dar. Für die untersuchten Geometrievarianten wurde folglich ausgehend von einer definierten Mindestkanallänge die zulässige Länge iterativ erhöht, bis definierte Kriterien zur Bewertung der Kanalführung ein lokales Optimum aufwiesen. Auf die gewählten Kriterien wird im folgenden Kapitel näher eingegangen. Für die finale Geometrievariante stellte sich eine anzustrebende Kanallänge von *152 mm* als angemessen heraus. In diesem Zusammenhang zeigt die Kon-

struktionen bei einer höheren Kanalanzahl eine steigende Komplexität in der Kanalführung, sodass fertigungstechnische Bedingungen (*Mindestkanalabstände, zulässige Überhangswinkel, …*) und konstruktive Bedingungen (*möglicher Wertebereich der Kanaldefinition, Qualität der Kanalführung, …*) schwer zu vereinen sind. Die umgesetzte Primärverteilung wird aufgrund der Ergebnisse der Voruntersuchungen mit vier Teilkanälen ausgeführt, wodurch im weiteren Verlauf zudem der Vergleich mit der definierten Referenz begünstigt wird.

Neben dem offensichtlichen Unterschied der Kanalanzahl wird zudem eine Variation des Kanalquerschnitts deutlich. Wie bereits in Kapitel 2.5.2 erwähnt, sind bei der additiven Fertigung einige Besonderheiten im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren zu beachten. Während bei spanenden Fertigungsverfahren zumeist kreisrunde Kanalquerschnitte gewählt werden, da diese mit geringem Aufwand durch Standardbearbeitungsverfahren (bspw. Bohren) herzustellen sind, bergen diese Querschnitte bei der additiven Fertigung in Abhängigkeit ihrer Lage auf dem Baubett durchaus Probleme. Dies gilt vor allem für Bereiche mit lokalen Überhangswinkeln kleiner 45° (vgl. Abbildung 4.2 links), da hier mitunter Stützstrukturen notwendig werden und durch ungünstige Abkühlbedingungen wie erwähnt Balling-Effekte auftreten können, die in einem Zerfall der Schmelzespur und lokalen Bauteilüberhöhungen resultieren.

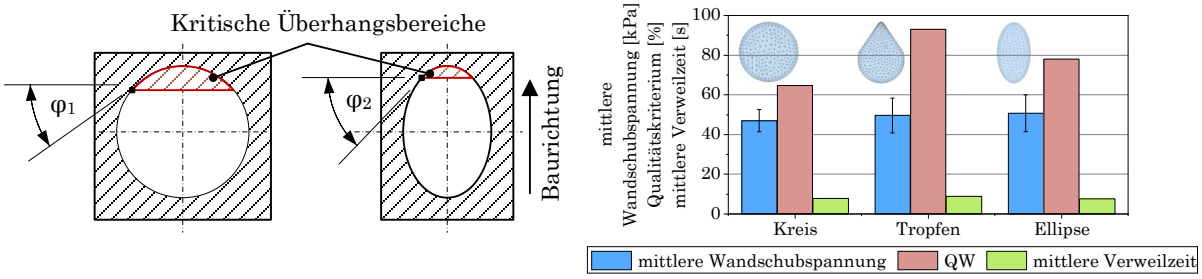


Abbildung 4.2: links: Korrelation zwischen Kanalquerschnitt und Überhangswinkel; rechts: Strömungsmechanischer Vergleich unterschiedlicher Kanalquerschnitte

Da die inneren Kanäle mechanisch nicht nachbearbeitet werden können, wurden fertigungstechnisch umsetzbare Alternativquerschnitte (nach Abbildung 4.2 rechts) numerisch in Hinblick auf ihre Strömungscharakteristik untersucht und bewertet. Hierzu wurden gerade Fließkanäle mit den entsprechenden Querschnitten und dem anteiligen Massestrom eines Teilkanals simuliert. Der kreisrunde Querschnitt dient als Referenz, zudem wird ein tropfenförmiger Querschnitt gewählt, welcher mit einem Winkel von 45° spitz zuläuft. Fertigungstechnisch erprobt sind zudem elliptische Querschnitte, welche auf Basis der strömungs- und fertigungstechnischen Ergebnisse einen Kompromiss bilden, sofern bei der Kanalführung auf die entsprechende Ausrichtung der 1. Hauptachse in Baurichtung geachtet wird. Der kritische Überhangbereich mit $\varphi_i < 45°$ kann deutlich reduziert werden (schematisch in Abbildung 4.2 dargestellt). Bezüglich der mittleren Verweilzeit und der mittleren Wandschubspannung sind ein Anstieg sowohl für ellipsen- als auch für tropfenförmige Querschnitte im Vergleich zu kreisrunden Querschnitten festzustellen, da das Verhältnis von Kanaloberfläche zu Volumen ungünstiger ist. Die tropfenförmigen Querschnitte zeigen zudem signifikante Erhöhungen der maximalen Wandschubspannungen. Dies spiegelt sich im Kriterium *QW* wieder. Daher wurde über den analytisch berechneten Durchmesser aus Gl. 4.1 eine flächenäquivalente Ellipse erstellt.

Final ergibt sich für die weiteren Untersuchungen das in Abbildung 4.3 auf der linken Seite dargestellte Modell der Primärverteilung, welches den Massestrom des Extruders unmittelbar nach der Einspeisung auf vier Teilkanäle elliptischen Querschnitts aufteilt und separat in vertikale Fließrichtung umlenkt. Dabei werden die Kanäle so ausgerichtet,

dass bei Orientierung parallel zur Bauplattform die 1. Hauptachse der Ellipse möglichst in Baurichtung zeigt. Initial werden bei dem spiegelsymmetrischen Bauteil die Teilkanäle über einen Spline konstruiert, welcher über Stützstellen im Raum definiert ist. An der Schmelzeaufteilung ist der Kanalquerschnitt als Skizze hinterlegt und wird entlang des Splines, welcher als Leitkurve dient, ausgetragen. Hierzu wird ein Zug-Konstruktionselement (kurz: Zug-KE) verwendet, wobei die Skizze über Teilungspunkte entlang der Leitkurve orientiert wird. Um innerhalb des zur Verfügung stehenden Bauraums die bestmögliche Kanalführung zu gewährleisten, wird der Verlauf der rein qualitativ definierten Splines durch eine Optimierungsstudie angepasst.

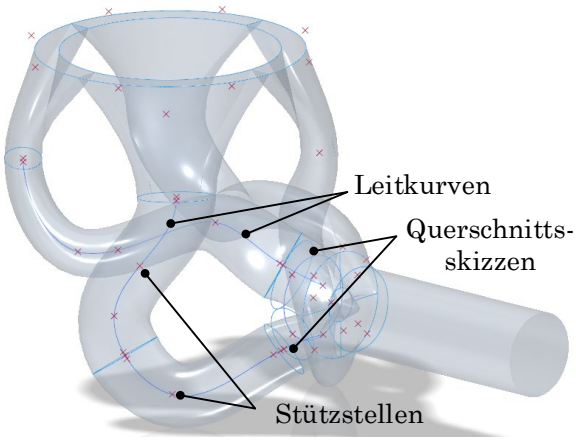


Abbildung 4.3: Definition der Leitkurven für die Kanalführung

4.1.2 Gestaltung der Schmelzeaufteilung

Der konstruktive Ansatz aus Kapitel 4.1.1 sieht eine vorgezogene Schmelzeaufteilung vor, um die notwendige Anzahl an Teilströmen aus der – im Fall der bestehenden Anlage – noch horizontal fließenden Speiseströmung aufzuteilen. Unterstellt man vom Extruder die Bereitstellung thermisch und stofflich vollständig homogenisierter Schmelze, ermöglicht dieser Ansatz die größtmögliche Schmelzehomogenität der einzelnen Teilströme. Anschließend muss gewährleistet werden, dass die so generierten Ströme eine identische Belastungshistorie erfahren.

Bevor die eigentliche Kanalführung konstruiert werden kann, gilt es, die Aufteilung zu gestalten. Die nennenswerten Einflussfaktoren sind dabei vor allem das Verhältnis von Einspeisungsdurchmesser zu dem Durchmesser der Teilkanäle und die Separierung in diese. Gemäß den Grundlagen der analytischen Kanalauslegung aus Kapitel 2.4.2 bzw. 3.1.1 wird auf den Ansatz konstanter Wandschubspannungen in Abhängigkeit der Verzweigungsanzahl zurückgegriffen. Bezogen auf den Eintrittsquerschnitt ergibt sich für die Teilquerschnitte:

$$R_{Vzw} = \frac{R_{Ein}}{\sqrt[3]{n}} \text{ bzw. } D_{Vzw} = \frac{D_{Ein}}{\sqrt[3]{n}} \qquad \text{Gl. 4.1}$$

$R_{Vzw}\ [mm]: Verzweigungsradius \qquad R_{Ein}\ [mm]: Einspeisungsradius \qquad n\ [-]: Kanalanzahl$

Der Radius bzw. Durchmesser ist somit von der dritten Wurzel der Anzahl der Teilströme abhängig. Bei einem vorgegebenen Durchmesser der Einspeisung von 35 *mm* resultiert dies für vier Teilströme in einem Durchmesser von ~*22 mm* bzw. einer Querschnittsfläche von *381,81 mm²*.

Für die finale Auslegung, und zur Gewährleistung einer gewissen Vergleichbarkeit zur gewählten Referenz, wird eine Verzweigung mit vier Teilkanälen gewählt. Diese werden symmetrisch zur Mittelebene mit einem Winkelversatz von *45°* angeordnet. Es wird zudem angestrebt, die Kreisströmung bereits vor der eigentlichen Aufteilung in eine Kreisringströmung zu überführen. Somit wird eine möglichst homogene Aufteilung erzeugt, da der Ringspalt anschließend lediglich in Kreisringsegmente aufgeteilt werden muss. In der Umsetzung wird dies durch einen Verdrängerdorn im Zentrum des Fließkanals, sowie Stege zur Aufteilung in die Teilkanäle realisiert. In Abbildung 4.4 ist der Bereich der Schmelzeaufteilung grafisch dargestellt.

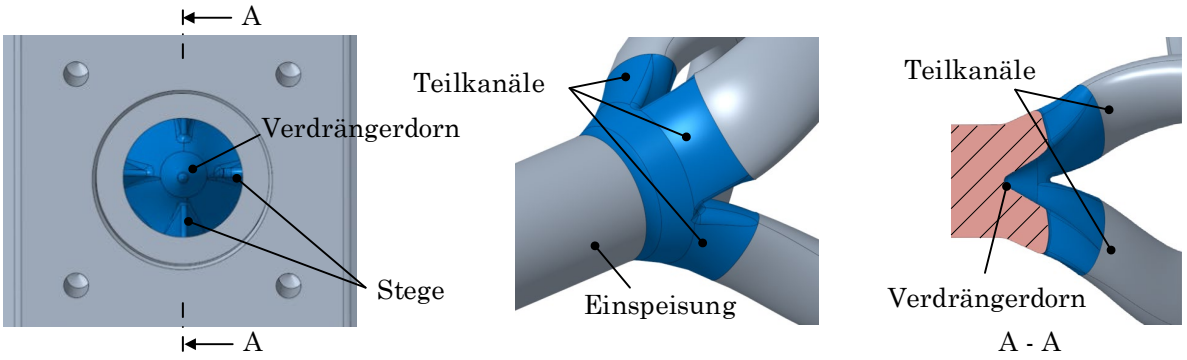


Abbildung 4.4: Gestaltung der Schmelzeaufteilung; v.l.n.r.: Draufsicht auf die Einspeisung im Gehäuse, Abgeleitetes Fluidvolumen, Schnittdarstellung durch das Fluidvolumen

Bezogen auf Kapitel 3.1.1 wird unmittelbar deutlich, dass die Herstellbarkeit mit spanabtragenden Fertigungsverfahren nur eingeschränkt möglich wäre. Vor allem das Zusammenspiel aus Kanaldurchmesser der Einspeisung, Kanaldurchmesser der Teilkanäle sowie dem Winkel der Teilkanäle unterliegt geringen fertigungstechnischen Restriktionen. Dieser Aspekt kann besonders bei Varianten mit einer größeren Aufteilungsanzahl und verhältnismäßig geringem Bauraum relevant werden. Während herkömmliche Primärverteilungen beispielsweise in der Wahl des Winkels der Speisebohrungen stets vom geometrischen Zusammenspiel aller Größen (Einspeisungsdurchmesser und -länge, Winkel und Länge der Speisebohrungen, etc.) abhängig sind, birgt der hier gezeigte Ansatz die Gestaltungsfreiheit der freien Kanalführung im Bauraum. An dieser Stelle sei angemerkt, dass aufgrund des Herstellverfahrens im Folgenden von der etablierten Nomenklatur der Speisebohrung Abstand genommen wird und weiterführend in diesem Kontext der Begriff Kanal verwendet wird.

4.1.3 Optimierungsstudie zur Kanalführung

Bis zu diesem Punkt beruht die Lage der Stützstellen der Leitkurve lediglich auf einer subjektiven Einschätzung durch eine qualitativ günstige Lage im Bauraum und der Vermeidung von Überschneidungen einzelner Teilkanäle. Bevor eine Analyse der Primärverteilung durch numerische Strömungssimulationen durchgeführt wird, muss der Verlauf der Leitkurven möglichst „strömungsgünstig“ definiert werden. Um dies zu erreichen, wird eine zweistufige geometriebasierte Optimierung der Kanalführung durchgeführt. In einem ersten Schritt muss eine Querschnittsoptimierung durchgeführt werden, um bei der Konstruktion entstandene Einschnürphänomene der Kanäle zu vermeiden. Diese treten durch die verwendeten Zug-KEs auf. Hierbei wird der durch eine Skizze definierte Kanalquerschnitt über programminterne Teilungspunkte entlang der Leitkurve orientiert. Durch eine Verdrehung um die Leitkurve kann dabei eine Einschnürung des Kanals

auftreten (siehe Abbildung 4.6). Anschließend findet die eigentliche Optimierung der Kanalführung statt. Der vollständige Optimierungsablauf ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

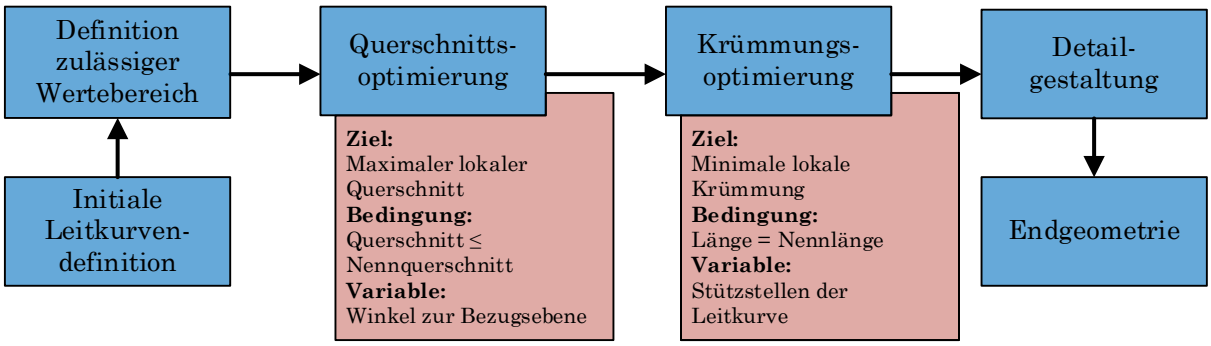


Abbildung 4.5: Optimierungsablauf innerhalb der CAD-Umgebung

Ausgangspunkt stellt die initiale Definition der Leitkurven dar, wobei jede Stützstelle der Leitkurven durch ihre X-, Y- und Z-Koordinate ausgedrückt werden kann. Für jeden dieser Punkte wird ein zulässiger Wertebereich im Bauvolumen angelegt, Überschneidungen benachbarter Kanäle können hier bereits durch geeignete Definition ausgeschlossen werden. Bei der Querschnittsoptimierung wird zunächst über die Variation des Winkels zwischen den Teilungspunkten der Querschnittsskizze und einer definierten Bezugsebene der lokale Querschnitt entlang der Leitkurve hinsichtlich des Nennquerschnitts maximiert. Dies ist in Abbildung 4.6 dargestellt. Durch den ersten Optimierungsschritt konnte die maximale Einschnürung entlang der Kanallänge signifikant reduziert werden. Das Minimum der Querschnittsfläche, normiert auf den Nennquerschnitt, konnte von *0,4* auf *0,94* angehoben werden. Die so erstellte Ausganggeometrie stellt die Grundlage für die anschließende Optimierungsstudie der Kanalführung dar.

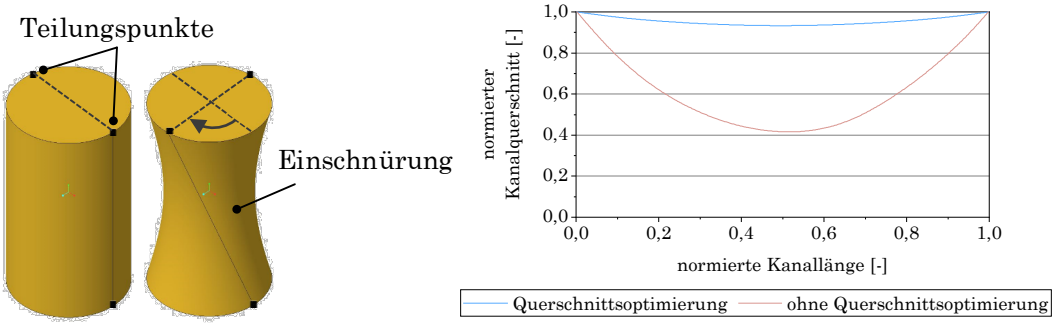


Abbildung 4.6: Optimierung der Kanaleinschnürung

Für die Kanalführung muss ein Zusammenhang zwischen parametrischen Größen des CAD-Modells und ihrem strömungsmechanischen Einfluss hergestellt werden. Dementsprechend benötigt die Optimierung der Kanalführung quantifizierbare Bewertungskriterien für den Verlauf. Aus dem Stand der Technik ist der Einfluss von Umlenkungen auf die Strömungsführung bekannt und bereits Niemeier [Nie06] untersuchte in seiner Arbeit den Einfluss variierender Querschnittsverläufe auf Wandschubspannung und Verweilzeit. Mittels eines Optimierungsalgorithmus wurde eine 90°-Umlenkung hinsichtlich einer Zielschergeschwindigkeit in den Wandelementen des FE-Netzes mittels Knotenverschiebung angepasst. Der Vergleich der von Niemeier vorgestellten Start- und Endgeometrie zeigt eine deutliche Vergrößerung des inneren und äußeren Umlenkungsradius. Da die Kanalführung zunächst ohne den Einsatz rechenintensiver CFD-Simulationen an-

gepasst werden soll, lässt sich aus den genannten Untersuchungen eine Korrelation zwischen verfahrenstechnisch geeigneter Kanalführungen und einem möglichst großen Radius der Leitkurve der Umlenkung feststellen. Mathematisch lässt sich dies über das Krümmungsmaß, als lokale Abweichung eines Punktes einer Kurve von einer Geraden, ausdrücken und entspricht dem Kehrwert des Radius.

$$\kappa = \frac{1}{r} \qquad \text{Gl. 4.2}$$

Die Krümmungsoptimierung wird vollständig innerhalb der CAD-Modellierung durchgeführt. Hierfür wird zunächst entlang jeder Leitkurven die maximale Krümmung automatisiert gemessen und als Analyse gespeichert. Außerdem wird die Kanallänge, ausgedrückt über die Länge der Leitkurve, als Konstruktionselement abgelegt. Als Optimierungsziel wird die Minimierung der maximalen Krümmung der Kurve vorgegeben, die Optimierungsbedingung ist dabei eine vorgegebene Kanallänge (siehe Kapitel 4.1.1.). Die Punkte der Leitkurvendefinition werden als Konstruktionsvariablen definiert. Der Optimierungsalgorithmus verschiebt diese innerhalb des definierten Wertebereichs solange im Raum und passt damit den dreidimensionalen Kurvenzug an, bis die minimale Krümmung der Kurve für die definierte Kurvenlänge erreicht ist. Eine Darstellung der Konstruktionsvariablen und die Ergebnisse der Krümmungsoptimierung sind Abbildung 4.7 zu entnehmen.

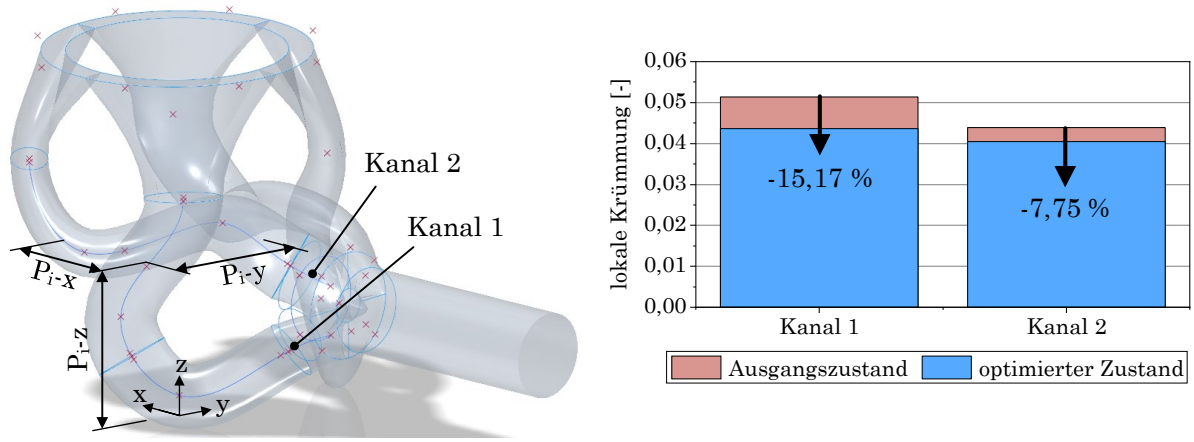


Abbildung 4.7: links: Konstruktionsvariablen; rechts: Ergebnisse der Krümmungsoptimierung

Die Ergebnisse der Krümmungsoptimierung zeigen die Reduktion von *-15,17 %* bzw. *-7,75 %* für die zwei Teilkanäle der spiegelsymmetrischen Hälfte. Die angestrebte Kanallänge wurde mit einer zu vernachlässigenden Abweichung von *20 µm* für alle Teilkanäle erreicht. Die Berechnungsdauer einer solchen Optimierung liegt bei ca. 30 min, sofern innerhalb einer Multiziel-Konstruktionsstudie neben der Krümmung auch der Mindestabstand zweier Kanäle berücksichtigt wird. Dieser wird ebenfalls entlang der Leitkurven zweier benachbarter Kanäle gemessen und abgespeichert. Über eine definierte Mindestgröße kann die Vermeidung von Überschneidungen automatisiert gewährleistet werden. Im Gegensatz zum Ausschluss von sich überschneidenden Wertebereichen der Stützstellen kann so eine größere Anzahl zulässiger Konstruktionsvarianten generiert werden.

Insgesamt zeigt sich die Optimierung des Verlaufs von Fließkanälen auf Basis geometrischer Größen als robustes und zeiteffizientes Vorgehen. Durch das Konstruktionsziel der minimalen Krümmung kann das Fluidvolumen strömungsmechanisch beeinflusst und quantifiziert werden, eine unmittelbare Rückkopplung zu den relevanten Strömungsgrößen (Wandschubspannung, Verweilzeit, Druckverbrauch) bleibt jedoch aus. Daher wird

die entwickelte Primärverteilung in Kapitel 4.3 analog zu der Referenzgeometrie numerisch bewertet. In diesem Rahmen erscheint eine Validierung der vorgestellten Optimierungsmethode angebracht, indem die Ergebnisse einer CFD-basierten Optimierung gegenübergestellt werden.

4.2 Konzeptentwicklung einer Sekundärverteilung mit radialer Mischwirkung

Aufbauend auf der Primärverteilung und in Anlehnung an die gezeigten Untersuchungen des Referenzwerkzeuges wird ein Konzept einer additiv gefertigten Sekundärverteilung vorgestellt. Zuvor wurden explizit die Schmelzeführung wandnaher Schichten und der Temperaturhaushalt einer Werkzeugbaugruppe im Produktionsbetrieb in den Fokus der Untersuchungen gestellt und eine Abhängigkeit zwischen diesen Phänomenen festgestellt. Wird eine radiale Umlagerung der Schmelze unter Beibehaltung einer homogenen Volumenstromverteilung am Austritt und vergleichbarer mechanischer Folienfestigkeit erreicht, wirkt sich dies positiv auf das Verweilzeitspektrum, Spülzeiten und die thermische Homogenität aus. Dabei müssen verfahrenstechnische Grenzen gemäß den Anforderungen an Extrusionswerkzeuge eingehalten, Gestaltungspotenziale der additiven Fertigungstechnik jedoch ausgenutzt werden.

Nachfolgend wird die Entwicklung eines alternativen Sekundärverteilungskonzepts vorgestellt. Dabei diskutiert Kapitel 4.2.1 den untersuchten Ansatz zur Umlagerung von Schmelzeströmen und beschreibt das daraus entstandene Konzept. Kapitel 4.2.2 sieht eine Detailoptimierung hinsichtlich der fertigungsgerechten Gestaltung vor.

4.2.1 Steggeometrien zur radialen Mischung

Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz sieht eine Umlagerung der Schmelze innerhalb des Ringspaltes vor und entspricht im Wesentlichen dem Wirkprinzip eines Statikmischers. Der Einsatz von Statikmischern ist in der Kunststoffextrusion bekannte Praxis, wenn einer Schmelze flüssige Zusatzstoffe zugeführt werden, oder Schmelzen unterschiedlicher Viskosität gemischt werden müssen [Wie04, Man09]. Das Funktionsprinzip beruht dabei stets auf Leitelementen, die den Massestrom aufteilen, umlagern und rekombinieren. Der Einsatz beschränkt sich zumeist auf Rohrströmungen und wird über entsprechende Einsätze realisiert.

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit finden sich in publizierten Forschungsarbeiten lediglich eine überschaubare Anzahl umgesetzter Konzepte zu additiv gefertigten Extrusionswerkzeugkomponenten, jedoch bieten gerade diese nennenswerten verfahrensrelevante Möglichkeiten. Hopmann und Schön [Sch18a, HP+19] zeigen potenzielle Synergieeffekte anhand eines simulativ ausgelegten, additiv gefertigten Statikmischers, welcher durch konturnahe Kühlkanäle eine Öltemperierung ermöglicht. Als Referenz diente ein Statikmischer des Typs SMB plus 40/3 der Firma Promix Solutions AG mit einem Nenndurchmesser von *40 mm*. Die Gestalt des additiven Statikmischers greift das Grundelement der sich wiederholenden Struktur auf und stellt eine strömungsoptimierte Alternative vor. Ziel der Entwicklung war eine Steigerung der Mischwirkung bei einer Senkung des Druckverbrauchs durch die bei konventioneller Fertigung nicht gegebenen Gestaltungsfreiheit. Gleichzeitig diente die Öltemperierung der Wärmeabfuhr zur Reduzierung scherinduzierter Temperaturspitzen. Die präsentierten Ergebnisse der experimentellen Erprobung zeigen für zwei untersuchte Durchsätze eines PE-HD eine Reduzierung

der Temperatur um bis zu 10 °C beim Durchströmen des additiv gefertigten Mischers, während der konventionell gefertigte Mischer eine Temperaturerhöhung verursacht. Unabhängig von den Ergebnissen, entspricht dieser Mischer einer zusätzlichen Baugruppe und kann bspw. einem Werkzeug vorgeschaltet werden. Demnach stellt er für den Prozess, unabhängig von der verbesserten thermischen Homogenisierung, einen zusätzlichen Druckverbraucher dar und führt zu einer Erhöhung der Verweilzeit.

Ähnlich dem zitierten Ansatz wird in dieser Arbeit auf die Mischwirkung statischer Mischelemente zurückgegriffen. Die Motivation sieht jedoch die Funktionsintegration des Statikmischers in die eigentliche Werkzeugbaugruppe vor. Demnach muss der Zustand und die Qualität der Schmelze den Produktanforderungen entsprechen. Eine thermische Homogenisierung wird nicht durch den Einsatz eines Temperiermediums realisiert, vielmehr wird die prozessbedingte thermische Inhomogenität durch die Mischwirkung egalisiert. Gemäß eingangs formulierter Forderung ist dazu das Ziel der Auslegung eine radiale Mischung der Schmelze umzusetzen. Da in der Sekundärverteilung die Schmelze bereits in einer Ringspaltströmung vorliegt, müssen die Steggeometrien in den Ringspalt integriert werden, was konventionell (wirtschaftlich) nicht umsetzbar ist und bisher keine Anwendung findet. Der Aufbau besteht aus sich wiederholenden, hintereinander geschalteten Strukturen, welche den Schmelzestrom zunächst radial mischen und anschließend um den Umfang verteilen um radiale Fließmarkierungen zu vermeiden. Durch die unidirektionalen Mischwirkung der strömungsleitenden Strukturen kann keine zeitgleiche Mischung in zwei Hauptrichtungen stattfinden. Demnach finden diese Prozesse nacheinander statt.

In Abbildung 4.8 ist auf der linken Seite die gesamte Mischergeometrie ohne Gehäusekomponenten angedeutet. In Blau ist das daraus resultierende Fluidvolumen hervorgehoben. Grundlegend besteht die Geometrie aus einer radialen Mischung (*A*), unmittelbar nach dem Eintritt in die Sekundärverteilung, und einer Umfangsmischung (*B*) vor dem Austritt aus der Sekundärverteilung.

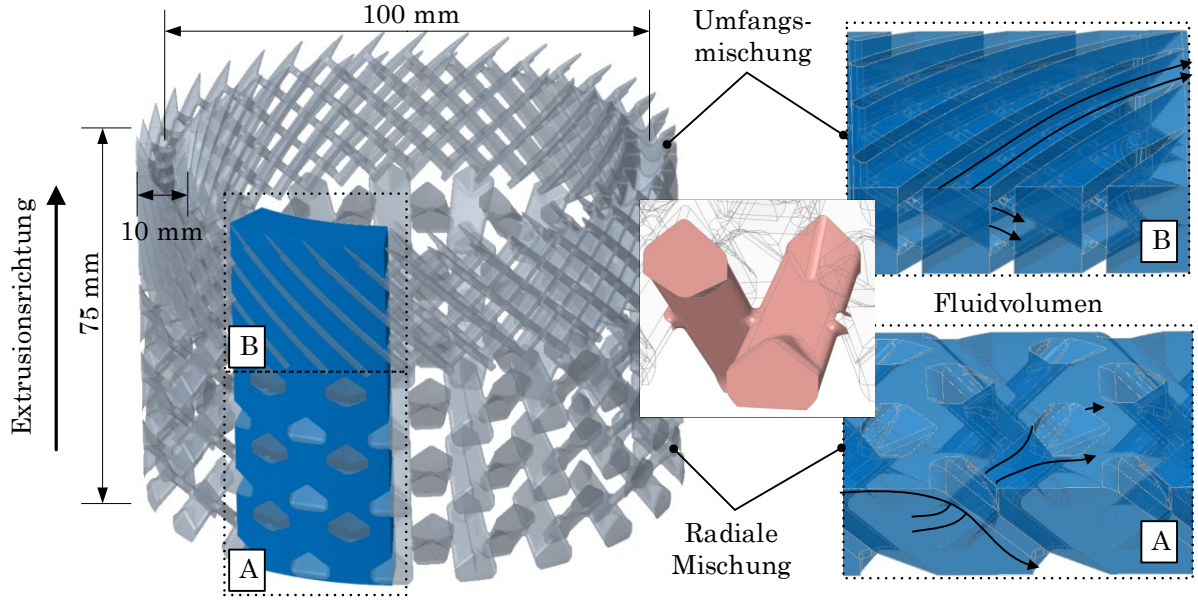


Abbildung 4.8: Fluidvolumen der Sekundärverteilung

Mittig erkennt man ein Stegsegment der radialen Mischung, welches 20-fach in Umfangrichtung gemustert wird und in Extrusionsrichtung in drei Stufen existiert. Demnach besteht jede Stufe aus *40* und die gesamte radiale Mischungszone aus 120 Einzelstegen

bei einem mittleren Kanaldurchmesser von *100 mm* und einer Spaltweite von *10 mm*. Die Umfangsmischung lässt sich ebenfalls auf *40* identische Segmente, bestehend aus je drei Teilstegen reduzieren. Somit ergibt sich für die gesamte Sekundärverteilung eine Anzahl von *240* Stegen und eine Höhe von *75 mm*. Jeder Einzelsteg ist mit der jeweiligen Gehäusewand verbunden und in einem *45*°-Winkel zur Extrusionsrichtung aufgebaut. Das gilt für beide Mischbereiche, da dies gemäß dem Stand der Technik dem maximalen Winkel entspricht, unter welchem die Struktur selbsttragend und ohne den Einsatz zusätzlicher Stützstrukturen additiv aufgebaut werden kann. Für die Auslegung ist dieser Aspekt unumgänglich, da im Nachgang durch fehlende Zugänglichkeit keine mechanische Nachbearbeitung möglich ist.

Auf der rechten Seite von Abbildung 4.8 ist das Fluidvolumen der beiden Mischerkomponenten abgebildet. Dabei wird jeweils ein Winkelausschnitt von *36*° betrachtet. Zusätzlich skizziert die Abbildung schematisch das gewünschte Fließverhalten. In Ansicht *A* wird der Effekt der radialen Mischung deutlich. Ein wandnaher Schmelzestrom wird von den mit der Gehäusewand verbundenen Stegen umgelenkt und in die Mittenströmung übergeben. Dabei findet ein komplexes Zusammenspiel der lokalen Strömungsbedingungen statt, was letztendlich zu einem Umströmen der Steggeometrie und somit der radialen Mischung betroffener Schmelzeströme führt. Durch die versetzte Anordnung wird gewährleistet, dass jede beliebige Stromlinie zu einem Zeitpunkt durch einen Steg umgelenkt wird. Im Vergleich zu der untersuchten Wendelverteilergeometrie wird ausgeschlossen, dass für wandnahe Bereiche keine Umlagerung der Schmelze stattfindet. Gleichzeitig findet nur geringer Austausch zweier benachbarter Stegsegmente statt, da die erzwungene Umlenkung keine Strömung in Umfangsrichtung begünstigt. Demnach werden am Ende der radialen Mischung ausgeprägte radiale Fließfronten zwischen den Stegsegmenten aufeinandertreffen.

Abgesehen von optischen Defiziten führen radiale Fließfronten zu signifikanten Einbußen in der mechanischen Folienfestigkeit senkrecht zur Extrusionsrichtung. Es kommt zu einer ungünstigen Orientierung der Makromoleküle wenn der Schmelzestrom radial durchgängig betroffen ist, sodass von einer deutlichen Schwachstelle im Produkt ausgegangen werden kann. Für die geforderte Produktqualität muss durch die Umfangsmischung das Auftreten radialer Fließmarkierungen vermieden werden. Dieser Effekt wird jedoch nur erreicht, wenn entlang der Spaltweite eine Überlagerung verschiedener Teilströme in der Strömungsführung eingestellt wird. Bei Wendelverteilerwerkzeugen geschieht dies für die Wendelströmung durch den um den Umfang variierenden Punkt des Überströmens des Wendelkanals und die Überlagerung mit der bestehenden Spaltströmung. Das entwickelte Werkzeugkonzept teilt die Strömung nach der radialen Mischung entlang der Spaltweite in drei Schichten. Durch die Zwangsführung der Stege werden diese um je 90° versetzt umgelenkt und überlagern sich mit bis zu sieben Teilströmen überströmter Stege. Diese Annahmen gilt es im Rahmen der Validierung durch die numerische Strömungssimulation und die experimentelle Erprobung zu überprüfen.

4.2.2 Fertigungsgerechte Detailoptimierung

Im Rahmen dieses Kapitels wird die Geometrie hinsichtlich ihrer fertigungsgerechten Konstruktion untersucht. Für die Steggeometrien wurde bereits kurz auf den Aspekt der selbsttragenden Gestaltung eingegangen. Maßgeblich hierfür ist der Überhangswinkel und die daraus resultierenden Downskin-Flächen (siehe auch Kapitel 2.5.2). Auf der linken Seite von Abbildung 4.9 ist diesbezüglich ein Segment der Mischergeometrie der Sekundärverteilung extrahiert.

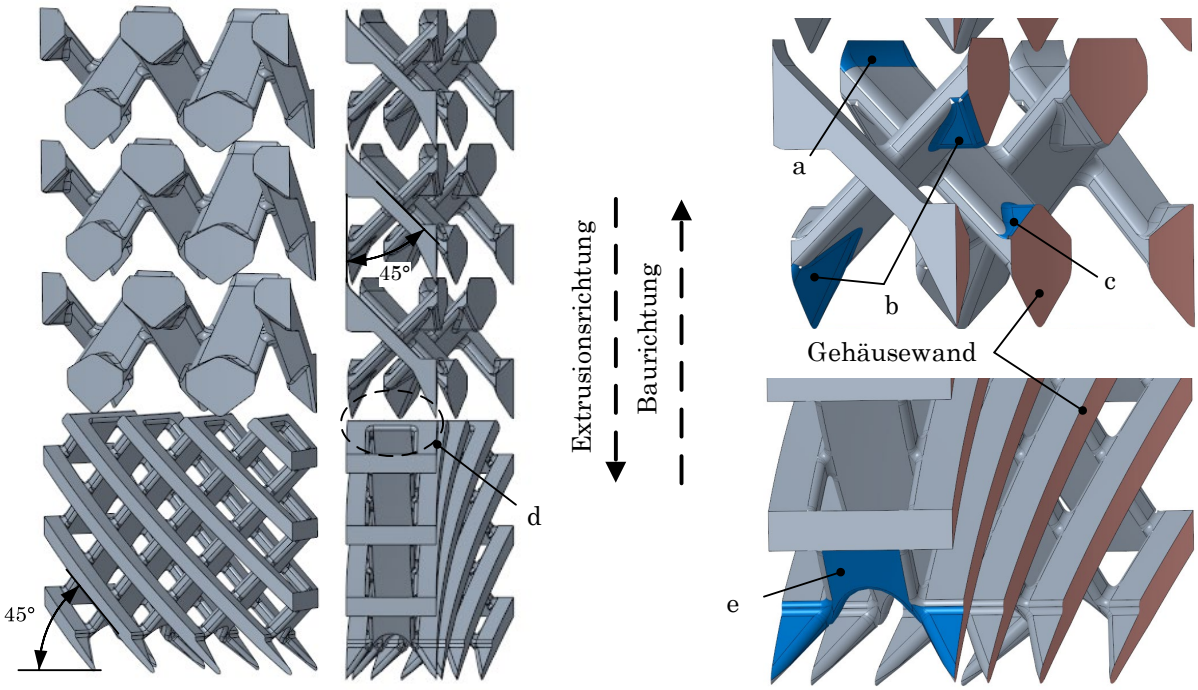


Abbildung 4.9: Fertigungsgerechte Gestaltung der Steggeometrien

Bei der Gestaltung wurde explizit darauf geachtet, dass alle Stege durch einen Aufbauwinkel von *45*° den Fertigungsvorgaben entsprechen. Durch die Gitterbauweise und den Kontakt zur Gehäusewand (Abbildung rechts, rote Flächen) erhält die Struktur zusätzliche Festigkeit. Grundsätzlich sind fertigungstechnische Vorgaben zu berücksichtigen und als Einschränkung in der Gestaltung zu sehen, jedoch zeigt der rechte Teil der Abbildung, inwiefern diese auch für eine positive Beeinflussung der Strömung genutzt werden kann. Detail *a* zeigt eine Rundung, welche den sanften Übergang zwischen Steg- und Gehäusegeometrie ermöglicht. Unter Betriebsdruck können lokale Spannungsspitzen in diesen Bereichen vermieden werden. Detail *b* zeigt Aufsätze auf den umströmten Stegflächen. Diese Bereiche sind prädestiniert für Stagnationszonen, da sie wandnah und hinter den Stegen lokalisiert sind. Durch die Aufsätze wird dieser Bereich konstruktiv eliminiert, gleichzeitig wird der Schmelzestrom durch die Form des Aufsatzes auf die Stege der nachfolgenden Stufe aufgeteilt. Fertigungstechnisch bietet der Aufsatz eine Basis für die Stege und steigert die Prozessstabilität für diese Bereiche, da der effektive Aufbauwinkel weiter reduziert wird. Selbiges gilt analog für Bereich *c*, verfahrenstechnisch wird vermieden, dass Schmelze in einer Kante zwischen Steg und Gehäusewand stagniert.

Für eine fertigungsgerechte Bauteilgestaltung gemäß additiver Fertigungsverfahren sind Konstruktionsrichtlinien nicht im gleichen Maß wie für spanabhebende Verfahren vorhanden (siehe Kapitel 2.5). Daher ist die Umsetzbarkeit und damit verbunden die Prozessstabilität individuell für die jeweiligen Bauteile zu prüfen. Anhand der Abbildung wird deutlich, dass die Baugruppe entgegen der Extrusionsrichtung aufgebaut ist. Diese Entscheidung wird durch die Orientierung der Stege der Umfangsmischung begründet. Der Übergang von radialer zur Umfangsmischung weist einen Bereich (Detail *d*) auf, in welchem der mittlere Steg der Umfangsmischung senkrecht zur Baurichtung ausläuft. Eine solche Orientierung ist für die Baurichtung in Extrusionsrichtung nicht mit ausreichender Prozessstabilität möglich. Für den Auslauf der Stege in Detail *e* muss dieser Bereich demnach angepasst werden. Geeignet ist hier eine Aussparung des mittleren Stegs

um die lokalen Überhangwinkel hinsichtlich der Prozessvorgaben anzupassen. Die äußeren Stege laufen in die jeweilige Gehäusewand aus und bieten für die Schmelze einen Überströmbereich vor dem Eintritt in die Nachfolgezone.

Zudem muss im vorliegenden Fall die Notwendigkeit von Stützstrukturen innerhalb der Fließkanäle vermieden werden. Durch die beschriebenen Anpassungsmaßnahmen konnten diese vollständig vermieden werden. Neben der Anpassung der Geometrie sind die Parametersätze auf das jeweilige Bauteil abzustimmen. Die prozessseitige Anpassung war nicht Teil dieser Arbeit und wurde in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Fertigungstechnik, Institut für Produkt Engineering der Universität Duisburg-Essen, umgesetzt. Im Rahmen dieser Untersuchungen konnten anhand von Probensegmenten erfolgreich Prozessparameter identifiziert werden, die eine angemessene Prozessstabilität für den finalen Bauprozess gewährleisten. Zur Bewertung der Parametersätze wurde das von Kleszczynski in [Kle18] entwickelte Prozessüberwachungssystem zur Identifizierung von Bauteilüberhöhungen während des Bauprozesses verwendet. Abbildung 4.10 zeigt die generierten Ergebnisse.

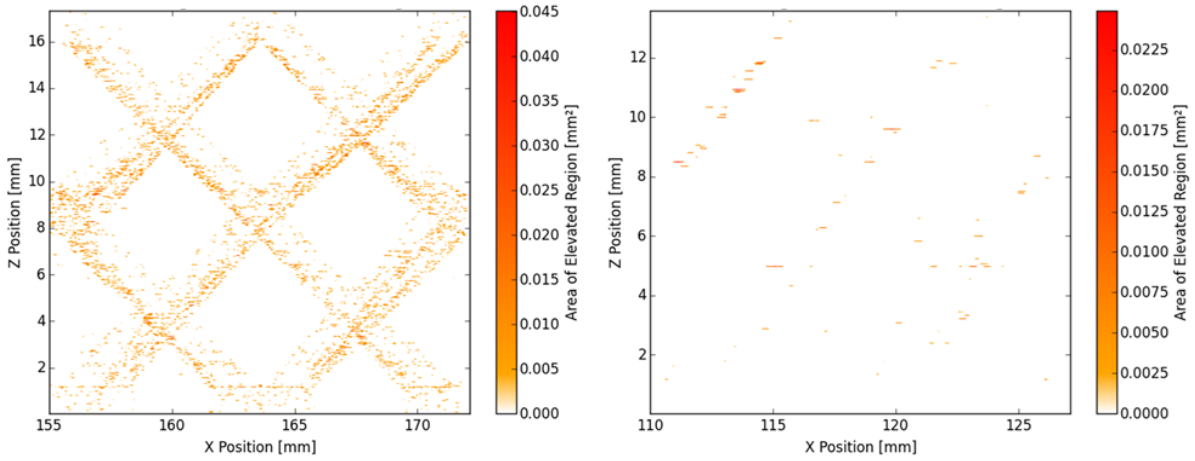


Abbildung 4.10:Ermittelte Überhöhungen während des Bauprozesses mittels BIGS Prozessüberwachungssystems. links: Nicht optimierte Parameter; rechts: optimierte Parameter [KJ+12, Kle18]

Über ein Kamerasystem im Bauraum der Laser-Strahlschmelzanlage wird während des Bauprozesses die lokale Bauteilüberhöhung visualisiert. Der Vergleich von Ausgangsprozess und dem Prozess mit optimierten Prozessparametern zeigt, dass die Bauteilüberhöhungen für das gedruckte Testsegment der Steggeometrien nahezu vollständig vermieden werden können.

4.3 Validierung mittels numerischer Strömungssimulation

Die Analyse des additiv gefertigten Extrusionswerkzeuges beruht analog zum Referenzwerkzeug auf numerischen Strömungssimulationen. Für die Berechnung wurde dabei auf drei Varianten des Modells zurückgegriffen. Alle Auswertungen, die die globale Strömungssituation beschreiben, wurden anhand des Fluidvolumens der gesamten Werkzeugbaugruppe durchgeführt. Für spezifische Untersuchungen zu Phänomenen die nur die Primär- bzw. Sekundärverteilung betreffen, wurde auf ein reduziertes Modell zurückge-

griffen. Die Sekundärverteilung wurde zur ressourceneffizienten Berechnung anhand eines Winkelabschnitts von 36° ausgewertet. Da auch in diesem Fall auf die Periodizität zurückgegriffen werden konnte, sind die Berandungsflächen als periodische Grenze definiert. Demnach wird numerisch der an *PG-2* austretende Volumenstrom und dessen Zustand als Eintrittszustand von *PG-1* genutzt. Die genutzten Modelle sind in Abbildung 4.11 dargestellt. Bezüglich der verwendeten Randbedingungen werden zur direkten Übertragbarkeit die Annahmen aus Kapitel 3.1.2 vorausgesetzt. Detaillierte Angaben zur Vernetzung sind im Anhang 9.3 aufgeführt.

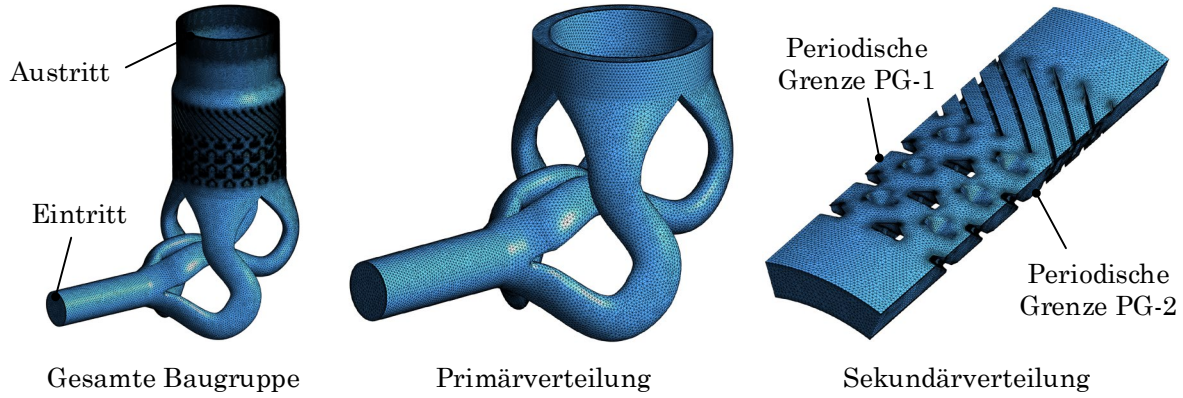


Abbildung 4.11: Varianten der Modellbildung der Werkzeugbaugruppe

In den folgenden Unterkapiteln wird die Strömungssituation innerhalb der Werkzeugbaugruppe sukzessive analysiert und bewertet. Dabei werden ausgehend von der allgemeinen Strömungssituation die Phänomene untersucht, welche für die Referenzbaugruppe als verfahrenstechnisch negativ identifiziert wurden. Neben der Massestromverteilung in der Primärverteilung stehen die Verweilzeitverteilung am Austritt, die Verteilwirkung und die thermische Homogenität im Fokus der Bewertung.

4.3.1 Analyse der qualitätsbeschreibenden Größen

Zunächst wird ein globaler Vergleich der sich einstellenden Strömungssituation mit der Referenzbaugruppe durchgeführt. Zur qualitativen Bewertung des Strömungsverlaufes, wird erneut auf eine Stromlinienanalyse mit *400* am Eintritt startenden Stromlinien zurückgegriffen, welche die lokale Strömungsgeschwindigkeit abbilden. Bei identischer Skalierung zu der Referenz, ist in Abbildung 4.12 insgesamt ein homogeneres Bild festzuhalten. Besonders deutlich ist dies im Bereich der Primärverteilung, da aufgrund der sanften Umlenkung keine lokalen Geschwindigkeitsspitzen auffallen. Insgesamt kann allerdings von einem grundsätzlich vergleichbaren Niveau gesprochen werden.

Deutliche Unterschiede ergeben sich für die Wandschubspannung, wobei hier zwischen der Primär- und der Sekundärverteilung zu differenzieren ist. Erstere lässt bereits zufriedenstellende Ergebnisse vermuten, der Verlauf wirkt insgesamt homogener als bei der konventionell gefertigten Variante. Speziell die Bereiche grenzwertig geringer Wandschubspannungen konnten reduziert werden, sodass Stagnationszonen in diesem Bereich minimiert wurden. Eine genauere Auswertung folgt in Kapitel 4.3.2. Die Sekundärverteilung zeigt signifikante Inhomogenitäten im Bereich der Mischergeometrie. Verglichen mit einem Wendelverteiler ist dies durch die Zwangsführung der Strömung und die häufige Umlenkung der Schmelze durch die Steggeometrien zu erklären. Demgegenüber wird die Schmelze in der Referenz über weite Bereiche an der Gehäusewand und ohne umlenkende Beeinflussung durch die Geometrie geführt. Insgesamt muss schlichtweg ein Kompromiss

zwischen einer bestmöglich homogenen Wandschubspannung und der geforderten Umlagerung der Schmelze gefunden werden. Ungeachtet davon ist die Einhaltung zulässiger Grenzwerte verfahrenstechnisch notwendig, was für das entwickelte Werkzeug in dem untersuchten Betriebspunktspektrum gewährleistet werden kann.

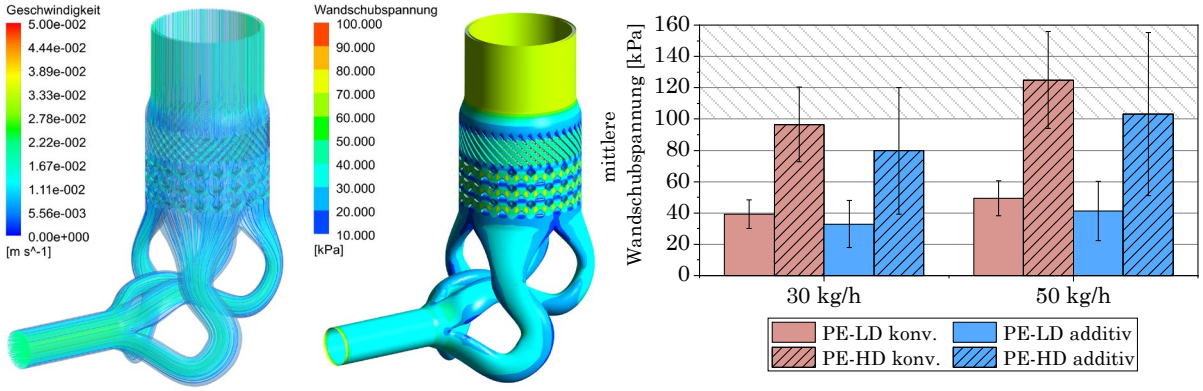


Abbildung 4.12: links: Auswertung von Strömungsgeschwindigkeit und Wandschubspannung, rechts: Bewertung der Wandschubspannung

Interessant ist an dieser Stelle die Betrachtung der Qualitätskriterien, um den entstandenen Eindruck zu quantifizieren. Vorab ist bereits zu erwarten, dass *QW* nach te Heesen für die vorliegende Geometrie aufgrund der Extremwertbetrachtung keine zufriedenstellende Bewertung ergibt. Daher ist der Vergleich der mittleren Wandschubspannung und deren Standardabweichung ein geeigneteres Mittel. Diese Gegenüberstellung ist in Abbildung 4.12 rechts dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die mittlere Wandschubspannung bei vergleichbaren Betriebspunkten für das additiv gefertigte Werkzeug geringer ist, als für die Referenz. Für einen Durchsatz von *50 kg/h* PE-HD ist die konventionelle Geometrie mit einer mittleren Wandschubspannung von *124,98 kPa* bereits unzulässig hoch. Das additiv gefertigte Werkzeug liegt mit einer mittleren Wandschubspannung von *103,24 kPa* deutlich unter diesen Werten. Die Tendenz ergibt sich für alle untersuchten Massedurchsätze und Materialien. Jedoch ist die Standardabweichung als Maß für die Streubreite um diesen Wert für das Demonstratorwerkzeug höher, was sich bereits optisch durch die Falschfarbenbilder andeutet. Positiv hervorzuheben ist die Schmelzebelastung in der Primärverteilung. Während für einen Massedurchsatz von *50 kg/h* mit dem gewählten PE-HD bei der konventionellen Primärverteilung die mittlere Wandschubspannung bei *93,18 kPa* liegt, ergibt sich in der additiv gefertigten Alternative ein Wert von *66,54 kPa*. Dies entspricht einer Reduzierung von *-28,59 %*.

Weiterführend wurde die Geschwindigkeitsverteilung am Austritt in Hinblick auf die zu erwartende Wanddickenverteilung des Produktes untersucht. Die Auswertung wurde in Anlehnung an die bereits durchgeführte Analyse und die Auswertekurven in vergleichbaren Werkzeugbereichen definiert. Demnach wird der Zustand der Strömungsgeschwindigkeit unmittelbar nach der Mischgeometrie und am Austritt des Werkzeuges jeweils in Wandnähe und in der Mittenschicht ausgewertet. Die Ergebnisse der Strömungsgeschwindigkeit über den Umfang sind in Abbildung 4.13 aufgetragen. Qualitativ zeigt sich ein deutlich abweichendes Bild, verglichen mit dem Referenzwerkzeug. Die Außenschichten strömen zwar gemäß der Wandhaftung langsamer, jedoch bleiben die deutlichen Geschwindigkeitsspitzen auf Höhe der Wendelausläufe aus. Insgesamt ist die Geschwindigkeitsverteilung schon hier als sehr homogen zu beschreiben. Die Summe der Amplituden entspricht der Anzahl der Stegsegmente. Insgesamt liegt die Strömungsgeschwindigkeit auf einem niedrigeren Niveau, was mit der größeren Spaltweite zu erklären ist.

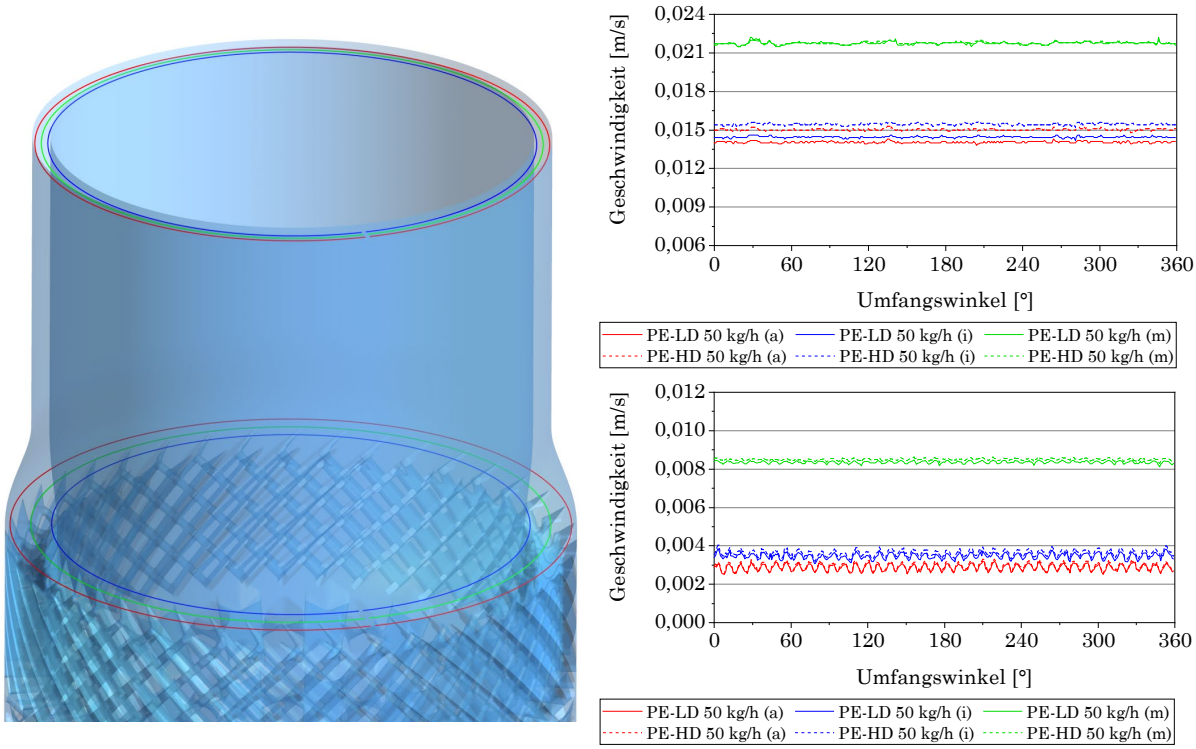


Abbildung 4.13: Auswertung der Strömungsgeschwindigkeit nach der Mischgeometrie und am Austritt

Für den Austrittsbereich ist ein deutlicher Anstieg des Geschwindigkeitsniveaus zu verzeichnen, insgesamt bleibt die Verteilung vergleichbar homogen wie im unteren Werkzeugbereich und auf Referenzniveau. Materialspezifische Unterschiede sind nicht zu detektieren. Die Ergebnisse sprechen für eine gute Geschwindigkeitsverteilung und es lässt sich eine einheitliche Wanddickenverteilung ableiten. Im Vergleich zu konventionellen Werkzeugen lässt sich bereits an dieser Stelle ein gleichmäßigerer Austrag der Schmelze vermuten, welcher mitunter auf die größere Anzahl sich wiederholender Segmente zurückzuführen ist. Während das Wendelverteilerwerkzeug zwar auch eine Periodizität aufweist, ist der Einfluss der vier auslaufenden Wendelkanäle signifikanter als jener der 40 Mischsegmente.

4.3.2 Charakterisierung der Verweilzeitverteilung des Demonstratorwerkzeuges

Als verfahrenstechnisch und wirtschaftlich relevantes Kriterium zur Bewertung einer Werkzeugauslegung wird nachfolgend die Verweilzeitverteilung des Demonstratorwerkzeuges untersucht. In Anlehnung an die Voruntersuchungen wird dabei sowohl das sich ergebende Verweilzeitspektrum am Werkzeugaustritt, als auch verweilzeitbeeinflussende Bereiche untersucht. Wird erneut das mittlere Alter als Bewertungsmöglichkeit herangezogen, zeigt sich in einem ersten Schritt, dass das konventionelle Werkzeug, gewichtet über den anteiligen Massestrom, einen Wert von *33,92 s* aufweist. Demgegenüber steht das Demonstratorwerkzeug mit *44,72 s*. Hierbei muss beachtet werden, dass die beschriebenen Werkzeuge in Bezug auf die Verweilzeit nicht direkt vergleichbar sind und das freie Volumen berücksichtigt werden muss. Demnach ist es entscheidend, die numerisch ermittelte mittlere Verweilzeit auf die nominelle Verweilzeit zu normieren, also die Zeit, die sich aus vorhandenem Volumen und Volumenstrom ergibt. Der Vergleich der normierten

Verweilzeit zwischen Referenz- und Demonstratorwerkzeug ist in Tabelle 4.1 dargestellt und zeigt eine positive Entwicklung für das Demonstratorwerkzeug. Die Abweichung zwischen nomineller und mittlerer Verweilzeit beträgt lediglich *2,33 %*. Im Vergleich dazu liegt dieser Wert für die Referenzgeometrie bei *6,75 %*.

Tabelle 4.1: Vergleich der nominellen und mittleren Verweilzeit

Geometrie	nominelle Verweilzeit	mittlere Verweilzeit	Abweichung
Referenzwerkzeug	*31,63 s*	*33,92 s*	*6,76 %*
Demonstratorwerkzeug	*43,68 s*	*44,72 s*	*2,33 %*

Für die Charakterisierung der Verweilzeitverteilung des neuen Werkzeugkonzepts ist jedoch nicht nur der isolierte Wert der mittleren Verweilzeit zu betrachten, vielmehr ist auch die Verteilung um den Umfang prozessentscheidend. Zunächst wird somit das mittlere Alter über den Umfang der Austrittsfläche der Simulationsdomäne berechnet. Dies geschieht abermals anhand der drei Auswertekurven in den Randschichtströmungen und der Mittenströmung und ist in Abbildung 4.14 (links) dargestellt. Verglichen mit der zuvor berechneten mittleren Verweilzeit belegt das Ergebnis auch hier den dominierenden Einfluss der Mittenschicht. Das mittlere Alter der Randschichten liegt durchweg über diesem Wert, entspricht aber nur einem geringen Anteil des Gesamtmassestroms. Auffällig sind der Verlauf der Kurven und die Ausprägung von vier sich wiederholenden Bereichen mit je einem lokalen Maximum des mittleren Alters.

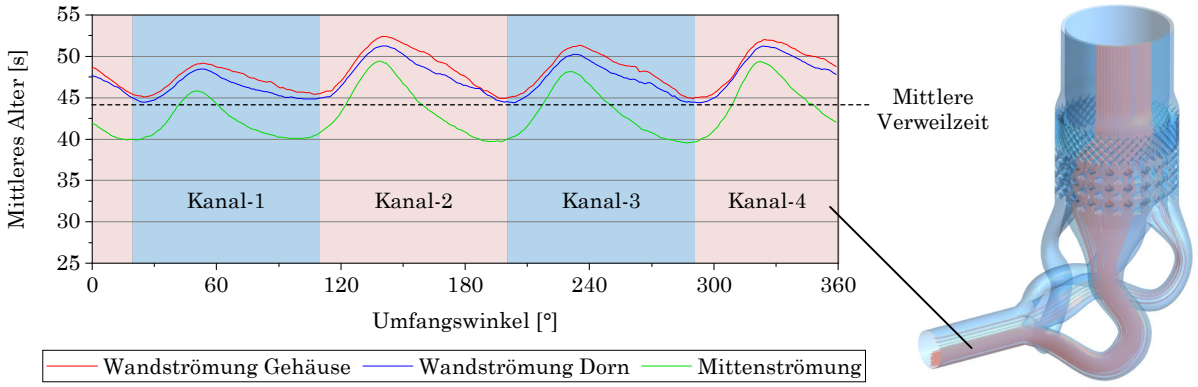


Abbildung 4.14: Auswertung der mittleren Verweilzeit am Austritt; PE-LD – 50 kg/h

Auch an dieser Stelle wird der Einfluss der Primärverteilung deutlich und spiegelt die vier Teilkanäle wieder. Wird der jeweilige Winkelbereich aus Abbildung 4.14 (links) auf der Austrittsfläche isoliert und als Startpunkt für Stromlinien entgegen der Extrusionsrichtung genutzt, ergibt sich exemplarisch das in Abbildung 4.14 (rechts) dargestellte Bild. Bis auf vereinzelte Ausnahmen entstammen demnach alle Stromlinien dieses Winkelbereichs aus einem Teilkanal der Primärverteilung. Im Umkehrschluss bedeutet dies für die Sekundärverteilung, dass keine Effekte auftreten, welche das Verweilzeitspektrum lokal signifikant beeinflussen. Sämtliche strömungsbeeinflussenden Phänomene geschehen um den Umfang homogen, sodass keine Auswirkungen in der Verweilzeit erkennbar sind.

Gleichzeitig zeigt sich für die Verweilzeit des Demonstratorwerkzeuges insgesamt ein homogener Verlauf. Verglichen mit der konventionellen Werkzeuglösung gibt es keine Winkelbereiche, die deutlich über bzw. unter der mittleren Verweilzeit liegen. Demnach scheint die Primärverteilung die Forderung der gleichmäßigen Strömungshistorie zu er-

füllen. Um diese Vermutung zu belegen, muss der Strömungszustand nach der Primärverteilung untersucht werden. Es wird jeweils die mittlere Verweilzeit am Ende der vier Teilkanäle, vor der Überführung in den Ringspalt, berechnet und in Abbildung 4.15 verglichen. Gemäß Kapitel 4.1.3 sind die Querschnitte und Kanallängen untereinander identisch und dies spiegelt sich in den homogenen Ergebnissen der Verweilzeit wieder. Die Abweichung zwischen dem Kanal der höchsten und dem der niedrigsten Verweilzeit liegt bei unter *4 %*. Eine vergleichbare Auswertung der Referenz ergibt eine Abweichung von 26 %. Demnach konnte hier eine deutliche Verbesserung erzielt werden.

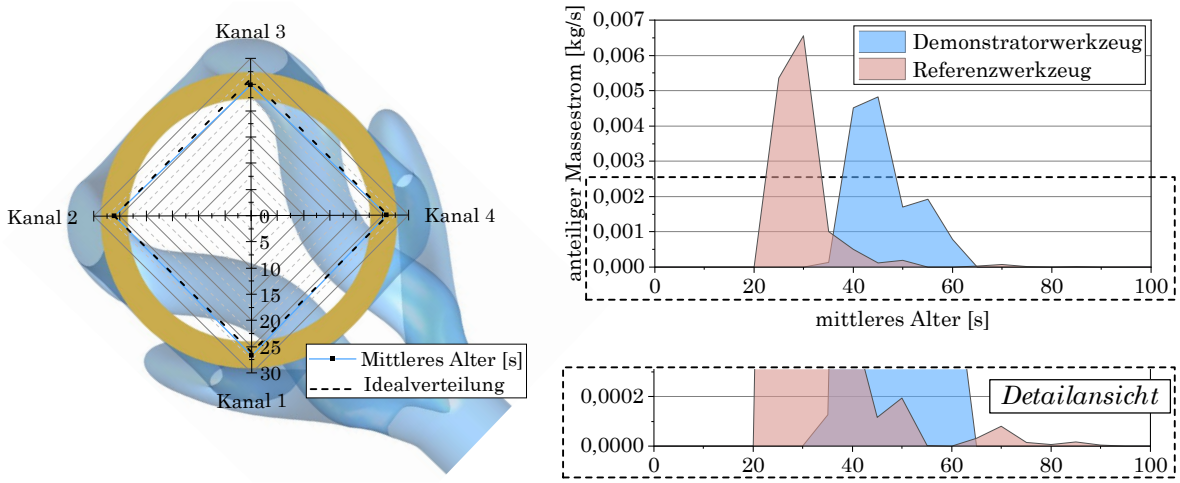


Abbildung 4.15: links: mittlere Verweilzeit der Teilkanäle der Primärverteilung; rechts: Gegenüberstellung der Verweilzeitspektren am Austritt

Die mittlere Verweilzeit bildet als gemittelter Wert nicht das Verweilzeitspektrum ab, in Kapitel 3.2.3 wurde dieses jedoch als beeinflussender Faktor der Wechselzeit identifiziert. Daher stellt Abbildung 4.15 rechts das Spektrum anhand der Massestromanteile dar und vergleicht es mit der Referenz. An dieser Stelle wird zweierlei deutlich. Zum einen verschiebt sich das Spektrum entsprechend der vorherigen Auswertung und begründet durch das größere Fluidvolumen zu höheren Verweilzeiten. Zum anderen konnte jedoch die Forderung nach einem zeitlich schmaleren Spektrum erfolgreich umgesetzt werden. Für das Demonstratorwerkzeug sind ab ca. *65 s* keine anteiligen Masseströme vorhanden, das Referenzwerkzeug weist in der Detailansicht Anteile bis annähernd *95 s* auf. Demnach können Wechselprozesse mit dem Demonstratorwerkzeug trotz der höheren mittleren Verweilzeit schneller durchgeführt werden. Für das PE-HD stellt sich ein vergleichbares Bild ein.

Für zukünftige Arbeiten ist eine weitere Homogenisierung der Verweilzeit erstrebenswert. Da die Teilströme nach der Primärverteilung jedoch zwingend in die Ringspaltströmung überführt werden müssen, bleibt die dargestellte Verteilung nicht aus und spiegelt lediglich den Unterschied zwischen der schnellströmenden Mittenschicht und den Randschichten wieder. Der Effekt kann jedoch reduziert werden, wenn die Anzahl der Kanäle weiter gesteigert und die jeweiligen Minima und Maxima somit angeglichen werden. Ein möglicher Ansatz wird im Ausblick diskutiert.

4.3.3 Validierung der Optimierungsmethode der Kanalführung

Der Verlauf der Teilkanäle beruht auf der zuvor vorgestellten Optimierung anhand geometrischer Größen. Die durchgeführte Auswertung belegt zwar die Eignung der daraus abgeleiteten Geometrie, validiert aber nicht grundsätzlich die Optimierungsmethode. An

dieser Stelle gilt es nachzuweisen, dass der gewählte Ansatz auch im Vergleich zu einer numerischen Optimierung geeignet ist. Hierfür wird ausgehend von dem CAD-Modell durch eine Kopplung zwischen CAD-Modell und CFD-Simulation hergestellt und mittels eines genetischen Algorithmus eine Parametervariation durchgeführt. Die Ergebnisse werden anhand definierter Kriterien bewertet. Die Fähigkeit dieses Verfahrens wurde von te Heesen [Hee15] bei der Entwicklung eines ganzheitlichen Auslegungsansatzes für Wendelverteilerwerkzeuge nachgewiesen. Für den detaillierten Ablauf eines genetischen Algorithmus wird auf diese Arbeit verwiesen. Der grundsätzliche Ansatz ist dabei vergleichbar mit der vorgestellten geometrischen Optimierung. Für das CAD-Modell werden zu variierende Parameter und deren Bandbreite vorgegeben und die Ergebnisse bewertet. Jedoch erfolgt die Bewertung anhand der Qualitätskriterien *QM* und *QW*, sodass für jede Parametervariation eine numerische Berechnung durchgeführt werden muss. Nach der initialen Definition wird durch den in der CFD-Software hinterlegten Parametersatz (genannt: *design points*) das CAD-Modell regeneriert. Die Vernetzung, Berechnung und Auswertung erfolgt automatisiert und die Definition der folgenden Geometrieparameter basiert auf den Ergebnissen der vorherigen Parametervariationen.

Im vorliegenden Fall der Primärverteilung besteht bei der Anpassung des Kanalverlaufs die Gefahr von Kanaldurchdringungen. Speziell bei einem automatisierten Optimierungsalgorithmus mit sich überschneidenden Wertebereichen muss die Durchdringung mittels eins zusätzlichen Kriteriums vermieden werden. Hierzu eignet sich, bei den hier bekannten Kanalquerschnitten, die zusätzliche Übergabe des Ergebnisses einer Abstandsanalyse. Ist diese kleiner als der doppelte Kanalradius, bzw. in diesem Fall kleiner als die 1. Hauptachse der Ellipse, und der geforderten Mindestwandstärke, wird der generierte design point über eine Zwangsbedingung verworfen. Insgesamt verläuft die Optimierung nach dem Schema in Abbildung 4.16 ab.

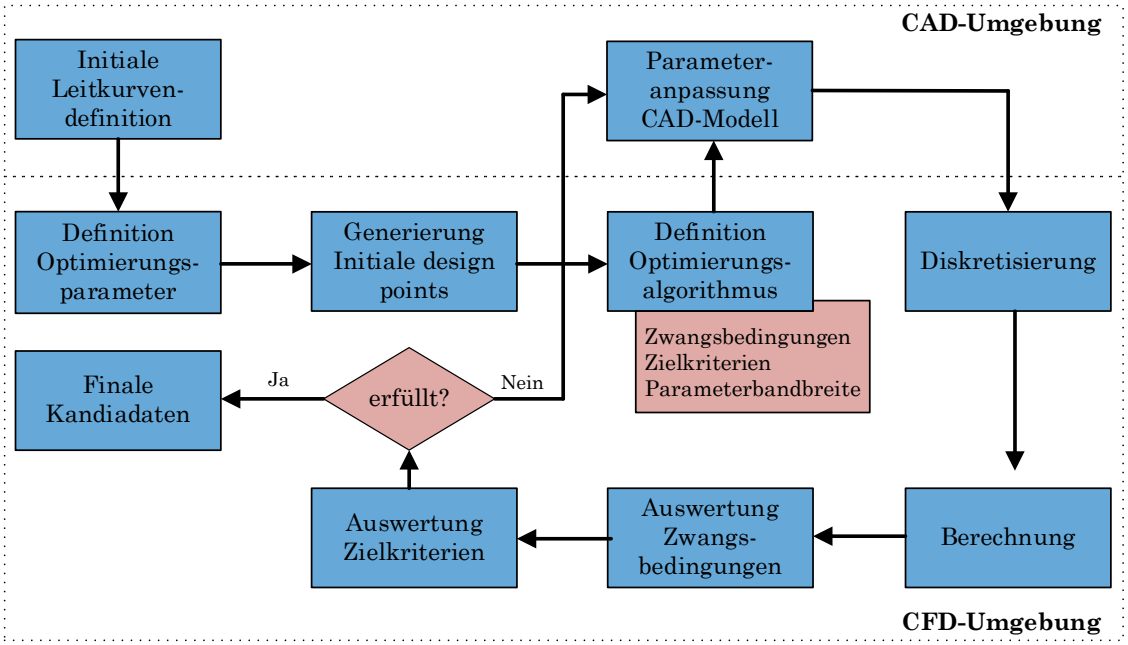


Abbildung 4.16: Ablauf des Optimierungsalgorithmus

Für die Validierung des Kandidaten der gewählten Optimierungsmethode (*CAD-Kandidat 1*) werden ausgehend von der initialen Geometrie als Referenz drei alternative Kandidaten durch den CFD-basierten Optimierungsalgorithmus erstellt. Anschließend werden für alle generierten Varianten die Kanallängen, die Qualitätskriterien *QW* und *QM*, sowie die maximale Kanalkrümmung ausgewertet. Aufgrund der Symmetrie wurde dabei

jeweils nur die Hälfte der Geometrie betrachtet. Die Ergebnisse in Abbildung 4.17 wurden zur besseren Einschätzung auf die Werte der Initialgeometrie normiert. Die Daten entstammen dem Betriebspunkt mit einem Massedurchsatz von $50\ kg/h$ des PE-LD.

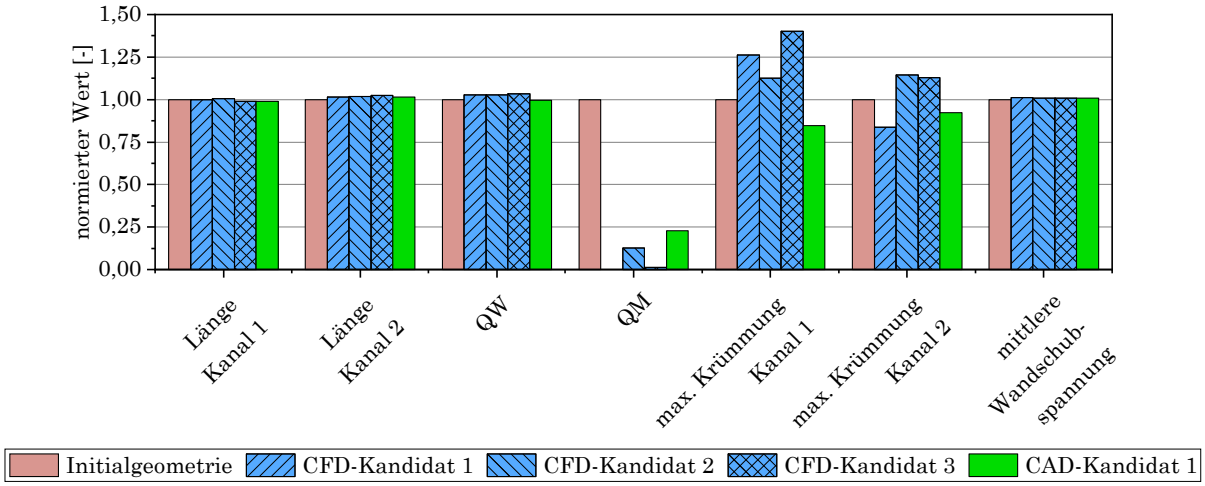


Abbildung 4.17: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Optimierungsansätze

Für die Kanallängen ist keine signifikante Veränderung zu erkennen, da die Definition der Leitkurve im CAD-Modell bereits mit der Ziellänge umgesetzt ist. Für *QW* ist eine geringfügige Verschlechterung der CFD-Kandidaten und eine geringfügige Verbesserung des CAD-Kandidaten sichtbar, die Betrachtung der mittleren Wandschubspannung bestätigt dies. Daraus lässt sich ableiten, dass die umgesetzte Art der freien Kanalführung bereit ohne ressourcenintensive Optimierungen positive Effekte auf die Schmelzebelastung aufweist. Die berechneten Veränderungen für *QW* werden wahrscheinlich durch Werte aus einzelnen Zellen hervorgerufen und eine nähere Untersuchung erscheint nicht zielführend. Am deutlichsten spiegelt sich die Notwendigkeit der Optimierung in *QM* wieder. Für alle Varianten werden deutliche Verbesserungen sichtbar und bestätigen die Ergebnisse aus Kapitel 4.3.1 und 4.3.2. Die maximale Krümmung wird vorrangig für den CAD-Kandidaten minimiert, da dies einem expliziten Optimierungsziel entspricht. Die CFD-Kandidaten zeigen mit einer Ausnahme (*CFD-Kandidat 1*) eine tendenzielle Steigerung.

Zusammenfassend lässt sich anhand der Ergebnisse festhalten, dass die gewählte Optimierungsmethode insgesamt als äußerst positiv zu bewerten ist. Die Ergebnisse der qualitätsbeschreibenden Kriterien weisen durchweg ein vergleichbares Niveau auf, ohne anhand vorheriger Strömungssimulationen optimiert zu werden. In Hinblick auf die Ressourceneffizienz ist zu erwähnen, dass die CAD-basierte Optimierungsmethode in 30 Minuten berechnet ist. Der verwendete genetische Algorithmus simuliert ca. 450 design points und benötigt durch die Aktualisierung des CAD-Modells und die wiederholte Diskretisierung annähernd 110 Stunden.

4.3.4 Beeinflussung der thermischen Homogenität durch die Sekundärverteilung

Nachfolgend werden die Effekte der umgesetzten radialen Mischung auf die thermische Homogenität untersucht. Der Einfluss der Schmelzeumlagerung wird explizit an der Sekundärverteilung, genauer einem Teilsegment (nach Abbildung 4.11 rechts), und unter Vorgabe eines erzwungen inhomogenen Temperaturprofils nachgestellt.

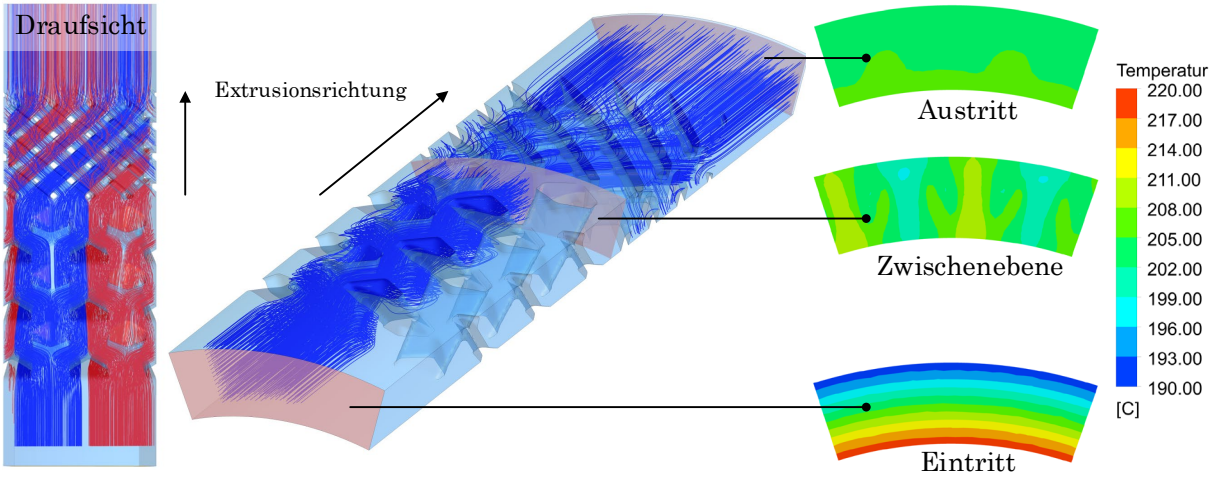


Abbildung 4.18: Auswertung der Temperaturverteilung entlang der Sekundärverteilung

Für die Untersuchung wird die Sekundärverteilung auf ein Winkelsegment von *36°* reduziert und die Periodizität durch eine entsprechende Randbedingung berücksichtigt. Für die Strömung bedeutet dies, dass auf der einen Seite über die Begrenzungsfläche austretende Schmelze auf der entsprechend anderen Seite wieder eintritt. So kann ein sich wiederholendes Fluidvolumen recheneffizient abgebildet werden. Für die Eintrittsfläche wird der Gesamtmassestrom auf den anteiligen Massestrom umgerechnet. Die Gehäusewandflächen werden als adiabat betrachtet, so kann die thermische Homogenität auf den Einfluss der Umlagerung zurückgeführt werden. Neben der grundsätzlichen Berücksichtigung der Energiegleichung bei der Berechnung wird der Eintrittsfläche ein Temperaturprofil aufgeprägt. Ausgehend von *190 °C* ist eine lineare Zunahme der Temperatur um *30 °C* von der äußeren Gehäusewand zur inneren Gehäusewand auf *220 °C* definiert. Dies ist in Abbildung 4.18 anhand des Falschfarbenbildes der Temperatur auf der Eintrittsfläche erkenntlich. Insgesamt wird die Entwicklung der Temperaturverteilung für drei Ebenen ausgewertet. Die Zwischenebene erlaubt die isolierte Bewertung der Quermischung. Hier ist bereits eine deutliche Homogenisierung der Temperatur erkennbar, jedoch zeigt sich die deutliche Ausprägung radialer Bereiche ähnlicher Temperatur. Demnach kann zwar zunächst eine erfolgreiche Umlagerung der Schmelze festgehalten werden, jedoch ist die thermische Homogenität als unzureichend zu bewerten. Die annähernd ausschließliche radiale Mischung wird auch an der Draufsicht und der Darstellung von isolierten Stromlinien der linken Hälfte der Eintrittsfläche deutlich. Ein Austausch mit der rechten Hälfte findet bis zur Zwischenebene nicht statt. Nach der Zwischenebene wird die Schmelze einer Eintrittshälfte durch die Umfangsmischung über die gesamte Segmentbreite verteilt. In der Draufsicht ist ab diesem Bereich eine Überlagerung der roten und blauen Stromlinien erkennbar. Folgerichtig findet auch eine thermische Homogenisierung in Umfangsrichtung statt. Anhand der Auswertung des Temperaturprofils auf der Austrittsfläche wird eine optisch homogene Temperaturverteilung ersichtlich.

Zur Bestätigung des optischen Eindrucks bietet sich an dieser Stelle die Auswertung der Temperaturverteilung über den anteiligen Massestrom in Form eines Flächendiagrams an. Diese ist in Abbildung 4.19 als überlagerte Darstellung der anteiligen Masseströme über den relevanten Temperaturbereich für zwei Materialien aufgetragen. Die Ergebnisse zeigen insgesamt keine nennenswerten materialabhängigen Abweichungen und bestätigen den Eindruck der Falschfarbenbilder. Für die Eintrittsfläche ist entsprechend des definierten Profils eine breite Verteilung über den gesamten Temperaturbereich zu erken-

nen. Diese wird für die Zwischenebene schmaler, die anteiligen Masseströme entsprechend größer. Für die Austrittsebene erstreckt sich der Temperaturbereich lediglich über *6 °C*. Der größte Anteil der Masseströme hat für PE-LD eine Austrittstemperatur von 203 °C. Für PE-HD liegt dies mit 205 °C materialbedingt geringfügig höher.

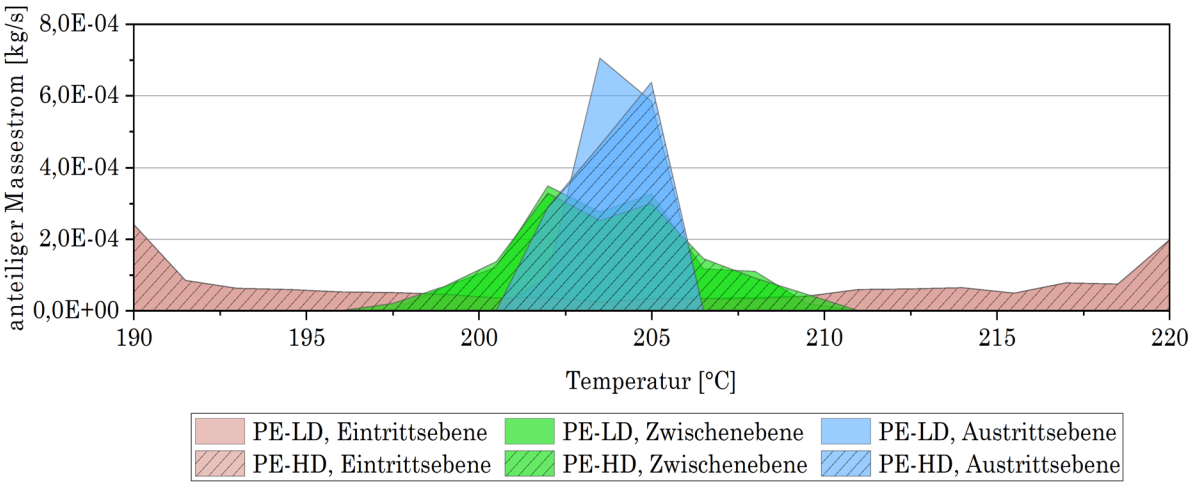


Abbildung 4.19: Auswertung der anteiligen Masseströme der Temperaturverteilung für verschiedene Durchsätze

Der positive Effekt auf die thermische Homogenität konnte durch die Strömungssimulation erfolgreich nachgewiesen werden. Die Ergebnisse zeigen, dass ein thermisch inhomogener Eingangsmassestrom durch die Umlagerung der Schmelzeschichten effektiv homogenisiert werden kann. Das gewählte Temperaturprofil entspricht in seiner Ausprägung den Phänomenen, welche durch die Berücksichtigung temperaturabhängiger Effekte für eine Wendelverteilerbaugruppe festgestellt wurden. Für den Prozess bedeuten die Ergebnisse die Möglichkeit der thermischen Homogenisierung durch Mischgeometrien und ohne zusätzliche Temperierlösungen. In der Konsequenz ist eine Steigerung des zulässigen Durchsatzes möglich, mit entsprechend positivem Effekt auf die Wirtschaftlichkeit. Das homogene Temperaturprofil erhöht zudem die Qualität der Folienkühlung und somit des Produktes, da die thermische Materialbelastung gleichermaßen homogen ist. Ungleichmäßige Abkühlbedingungen und deren Auswirkungen auf das Produkt können bestmöglich vermieden werden.

Neben der thermischen Homogenisierung ist es zudem die Aufgabe der Sekundärverteilung die Schmelze unter Vermeidung radial durchgängiger Fließmarkierungen gleichmäßig um den Umfang zu verteilen. Zur vollständigen Bewertung der additiv gefertigten Werkzeuggeometrie ist es demnach notwendig, eine Abschätzung der Verteilwirkung durchzuführen. Diese wird im folgenden Kapitel gegeben.

4.3.5 Abschätzung der Verteilwirkung

Abschließend wird die Verteilwirkung der Werkzeuggeometrie untersucht. Analog zu Kapitel 3.2.4 geschieht dies über eine Stromlinienanalyse. Die Primärverteilung und die radiale Mischung wird in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt, da zum einen bereits offensichtlich ist, dass die jeweiligen Teilströme mit einer radialen Fließfront zusammenfließen und zum anderen vor allem der zuletzt durchströmte Bereich die Ausprägung der Bindenähte am Austritt beeinflusst. Im vorliegenden Fall entspricht das der Umfangsmischung der Sekundärverteilung und es gilt den Einfluss der versetzten Stege auf mögliche

Fließmarkierungen zu beurteilen. Das Ziel wird die Vermeidung durchgängiger Fließfronten als definierte mechanische Schwachstelle sein.

Zum Ende der radialen Mischung ist primär eine Segmentierung gemäß der Stegbreite zu beobachten. Dieses Ergebnis zeichnete sich bereits in der Auswertung der Temperaturverteilung auf der Zwischenebene ab. Daher werden auf dieser Ebene Flächen in der Anzahl der davorliegenden Stege erstellt. Für die Stromlinien dienen diese Flächen als Startpunkt. Dies ist in Abbildung 4.20 auf der linken Seite dargestellt. Die Stromlinien der einzelnen Flächen werden anschließend unterschiedlich eingefärbt und der Verlauf durch die Umfangsmischung ausgewertet. Zunächst ist erwartungsgemäß die Umlenkung durch die Steggeometrien zu beobachten. Demnach wird die Strömung entlang der Spaltweite in drei Teilströme aufgeteilt und um jeweils 90° versetzt durch die Umfangsmischung geführt. Wichtiger als die unmittelbare Umlenkung ist jedoch die Verteilung der Stromlinien der einzelnen Segmente im Verhältnis zueinander und die sich ergebende Ausprägung auf der Austrittsfläche. Dabei kann aus der Grenzfläche zweier Stromliniensegmente eine dieser Grenzfläche folgende Fließmarkierung abgeleitet werden. Die Darstellung der Stromlinien auf der Austrittsfläche in Abbildung 4.20 (rechts), bzw. deren reduzierte Darstellung, veranschaulicht dies. Eine mögliche Bindenaht folgt hier bspw. der Grenzfläche zwischen den blauen und den roten Stromlinien.

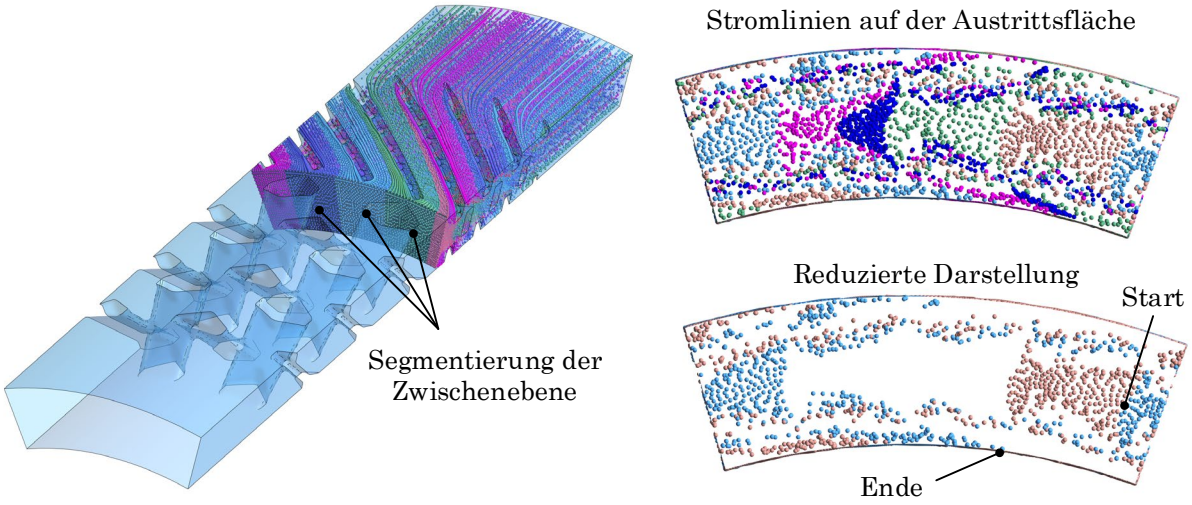


Abbildung 4.20: Abschätzung der Verteilwirkung durch Stromlinien

An dieser Stelle muss erneut die periodische Randbedingung angemerkt werden, was dazu führt, dass auf der rechten Seite austretende Stromlinien auf der linken Seite erneut zugeführt werden. Die eigentliche Verteilung erstreckt sich demnach weiter entlang der eigentlichen Umfangsrichtung. Hierauf wird in der detaillierten Auswertung weiter eingegangen. In der Darstellung der Stromlinien auf der Austrittsfläche ist bereits eine Verteilung erkenntlich, die es näher zu untersuchen gilt. Der Verlauf der Stromlinien wird anhand des blau eingefärbten Startsegments erläutert. Auf der Austrittsfläche beginnt dieses nahe der rechten periodischen Grenze und wird demnach auf der linken Seite weitergeführt. Anschließend ist eine Verteilung um den gesamten Winkelausschnitt erkennbar und das erneute Eintreten auf der linken Seite, bis die Stromlinien schließlich an den Gehäusewandflächen auslaufen. Es kann also zunächst von einem Überlappungswinkel ausgegangen werden, welcher größer ist als der 36°-Winkelausschnitt des betrachteten Fluidvolumens. Der charakteristische Verlauf nähert sich dabei einer verschachtelten V-Form an. In der detaillierten Auswertung wird der tatsächliche Überlappungswinkel berechnet und der Einfluss unterschiedlicher Materialien und Durchsätze berücksichtigt.

Gemäß den zuvor genannten Erkenntnissen muss der gesamte Überlappungswinkel durch das mehrfache Auftreten aufsummiert werden, in Abbildung 4.21 links ist dies erneut exemplarisch für die blau eingefärbten Stromlinien illustriert. Der Überlappungswinkel beginnt an *Punkt 1* verläuft über *Punkt 2* und endet an *Punkt 3*. Der Gesamtüberlappungswinkel δ_{Gesamt} ergibt sich demnach aus der Summe von δ_1, δ_2 und δ_3. Das nebenstehende Diagramm verdeutlicht, dass der Winkel durchsatzunabhängig und mit einer geringfügigen Zunahme für PE-HD bei ca. *60°* liegt.

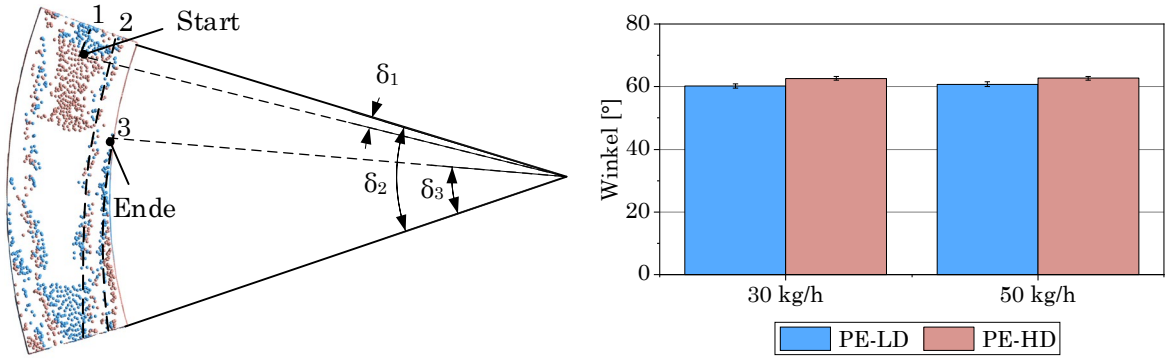


Abbildung 4.21: Berechnung des Überlappungswinkels

An dieser Stelle kann festgehalten werden, dass durch die entwickelte Geometrie eine Umlenkung der Schmelze gemäß den prozessrelevanten Forderungen umgesetzt werden konnte. Die aus der Stromlinienanalyse abgeleitete Abschätzung der Verteilwirkung und die demnach mögliche Ausprägung der Fließfronten deutet auf eine deutliche Umschlingung in Umfangsrichtung hin. Dabei entstehen keine radial durchgängigen Fließmarkierungen, über den halben Fließkanal werden bis zu sieben Schmelzeschichten übereinandergelegt. Es ist jedoch gleichermaßen zu beachten, dass zwar die geforderte Ausprägung der Fließmarkierungen erreicht werden konnte, hierüber aber nicht unmittelbar eine Korrelation zur mechanischen Festigkeit herzustellen ist. Sowohl für die unmittelbare Ausprägung als auch den mindestens notwendigen Überlappungswinkel von Teilströmen ist keine direkte Korrelation zur mechanischen Festigkeit bekannt. Qualitativ gilt, dass eine entsprechend größerer Winkelbereich der Überlappung die mechanische Festigkeit positiv, die Verweilzeit jedoch negativ beeinflusst. Ob und in welcher Höhe untere Grenzwerte existieren, müsste aufwendig durch experimentelle Versuchsreihen baugleicher Werkzeuge mit Parametervariationen zur Beeinflussung des Überlappungswinkels ermittelt werden. Anschließend können Folienproben vermessen und der Einfluss bewertet werden. Ergebnisse hierzu sind nicht bekannt. Für die finale Validierung werden im Rahmen dieser Arbeit in Kapitel 6.3 zumindest die Ergebnisse von ermittelten Festigkeitswerten von extrudierten Folienproben der beiden betrachteten Werkzeuggeometrien gegenübergestellt.

Abschließend ist anhand der durchgeführten Untersuchung eine positiv zu bewertende Verteilwirkung festzuhalten. Jedoch kann daraus nicht zwangsläufig eine gleichmäßige Massestromverteilung am Austritt vorausgesetzt werden. Es gilt diese final anhand des Qualitätskriteriums *QM* zu bewerten. Dabei wird ebenfalls auf das Fluidvolumen eines Teilsegments der Sekundärverteilung zurückgegriffen. Für die Auswertung wird die Austrittsfläche in zehn Kontrollflächen unterteilt. Für jede dieser Kontrollflächen wird die Abweichung vom mittleren Massestrom sowie das Qualitätskriterium *QM* für das Fluidsegment berechnet. Die Auswertung in Abbildung 4.22 wurde für PE-LD und PE-HD bei *50 kg/h* durchgeführt.

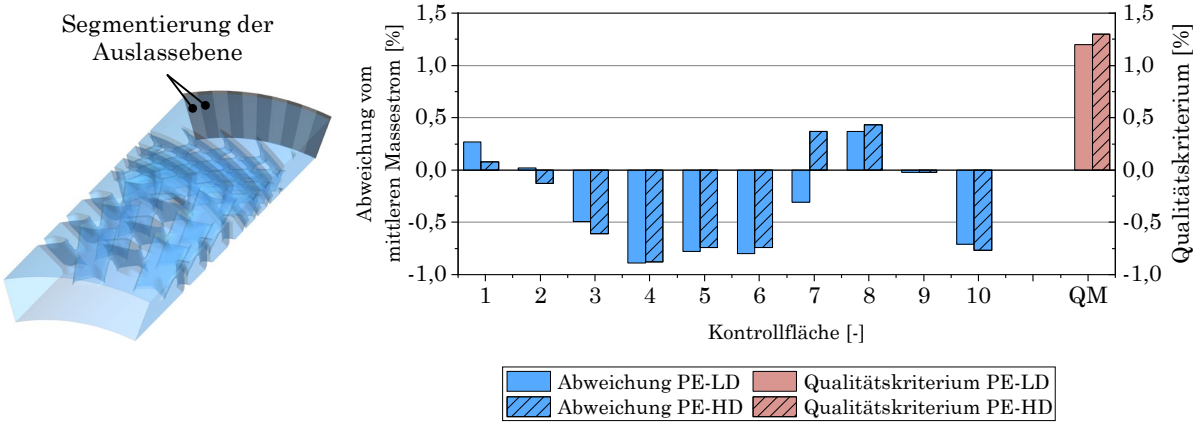


Abbildung 4.22: Bewertung der Massestromverteilung anhand des Qualitätskriteriums QM

Die Abweichung vom mittleren Massestrom von unter *±1 %* über alle Segmente ist als sehr gering einzustufen. Dies spiegelt sich letztendlich auch in einem sehr guten Ergebnis für das Qualitätskriterium wieder. Im Vergleich zur Auswertung des Referenzwerkzeugs konnte *QM* von 2,9 % auf unter 1,5 % reduziert werden. Die Abweichung vom mittleren Massestrom liegt zwischen *-1 – 0,5 %*. Für unterschiedliche Materialien ist kein nennenswerter Unterschied in den Ergebnissen festzustellen. Nach den Ergebnissen aus Kapitel 3.2.4 wurde für das Referenzwerkzeug eine Abweichung zwischen *-3 – 0,2 %* berechnet. Die Massestromverteilung ist durch das Konzept der Sekundärverteilung als homogener zu beschreiben.

4.4 Zwischenfazit zur Entwicklung additiv gefertigter Extrusionswerkzeuge

Nachdem die vollständige Entwicklung des Demonstratorwerkzeuges vorgestellt und die Strömungssituation mittels CFD-Simulationen analysiert wurde, wird ein kurzes Zwischenfazit zu den generierten Ergebnissen gezogen. Das Hauptaugenmerk bei der Entwicklung der vorgestellten Werkzeugbaugruppe lag auf der Verbesserung des Verweilzeitspektrums und der thermischen Homogenität durch die Implementierung der Freiheitsgrade der additiven Fertigung im Auslegungsprozess. Gleichzeitig galt die Einhaltung der definierten Grenzwerte für die qualitätsbeschreibenden Größen und bestenfalls eine Verbesserung der resultierenden Strömungssituation bzw. Schmelzebelastung als definiertes Ziel.

Für die Primärverteilung konnte erfolgreich ein Optimierungsansatz für frei geführte Teilkanäle innerhalb eines definierten Kontrollvolumens umgesetzt werden. Dieser wurde durch einen alternativen, CFD-basierten Optimierungsansatz validiert und berücksichtigt die Randbedingungen des Fertigungsverfahrens. Der Aufteilungspunkt der Schmelze konnte für das Demonstratorwerkzeug durch die fertigungstechnischen Möglichkeiten vor der Umlenkung der Schmelze realisiert werden und nachweislich die Fließhistorie homogenisieren. Die Ergebnisse der Strömungssimulationen zeigen positive Auswirkungen auf die Massestrom- und Verweilzeitverteilung nach der Primärverteilung. Die prozentuale Abweichung der minimalen zur maximalen mittleren Verweilzeit zwischen den vier Teilkanäle konnte von *26 %* für die Referenzgeometrie auf *4 %* für das Demonstratorwerkzeug reduziert werden. Gleichzeitig zeigte die Auswertung der Wandschubspannungen eine geringere mittlere Wandschubspannung mit einer schmaleren Verteilung. Die Ergebnisse

spiegeln eine geringere Schmelzebelastung und somit eine potentielle Steigerung maximaler Durchsätze wieder.

Im Fokus der Entwicklung der Sekundärverteilung stand die Realisierung einer Quermischung zur Verbesserung der thermischen Homogenität bei gleichzeitiger Gewährleistung einer gleichmäßigen Massestromverteilung am Austritt. Die temperaturabhängigen Simulationen zeigten sehr gute Ergebnisse für die Homogenisierung eines definierten Temperaturprofils. Durch die Umfangsmischung konnte die Massestromverteilung im Vergleich zur Referenz durch die Auswertung von *QM* nachweislich verbessert werden. Zudem zeigte die Stromlinienanalyse, dass die geforderte Vermeidung radialer Fließmarkierungen umgesetzt werden konnte. Dies spricht für eine verfahrenstechnisch günstige Ausprägung von Bindenähten im Prozess.

Die Auswertung der Simulationen der vollständigen Werkzeugbaugruppe ergab zudem Aufschluss über die Verweilzeitverteilung am Austritt. Durch das gesteigerte Fluidvolumen ergibt sich eine höhere mittlere Verweilzeit, jedoch konnte das Verweilzeitspektrum signifikant reduziert werden. Die Abweichung der mittleren Verweilzeit zur nominellen Verweilzeit wurde um *4 %* verringert. Vor allem konnten jedoch die anteiligen Massestöme sehr hoher Verweilzeit vollständig neutralisiert werden. Hieraus lässt sich der schnellere Abschluss eines Farb- oder Materialwechselprozesses ableiten.

Im Folgenden wird nunmehr die fertigungsgerechte Gestaltung der Gehäusekonstruktion und die Integration in die Technikumsanlage beschrieben. Abschließend werden die gezeigten Simulationsergebnisse durch experimentelle Erprobungen validiert und durch die Auswertung der mechanischen Folieneigenschaften die Produktqualität bewertet.

5 Gestaltung fertigungsgerechter Gehäusekonstruktionen

Die bisherigen Ergebnisse beziehen sich vollständig auf die Auslegung der unmittelbaren Strömungskanäle, sowie der Gehäusebereiche, welche in direkter Schmelzeinteraktion stehen. Für diese Bereiche ist die Herstellbarkeit gemäß den geforderten Ausführungen nachzuweisen. Aufgrund der signifikant höheren Rohstoffpreise als bei spanabhebenden Fertigungsverfahren bietet sich vor dem eigentlichen Bauprozess die Validierung der Geometrie anhand von Probekörpern an. Dies bietet zudem den Vorteil, dass auch innenliegende, schwer zugängliche Bereiche der Werkzeuggeometrie auf Ihre Herstellbarkeit untersucht werden können. Im nachfolgenden Kapitel wird der Kenntnisstand um eine fertigungsgerechte Gehäusekonstruktion und notwendige mechanische Nacharbeiten zur Integration in eine bestehende Anlage erweitert. Sämtliche Untersuchungen den Bauprozess und die Oberflächentopologie betreffend, wurden in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Fertigungstechnik der Universität Duisburg-Essen auf einer Anlage der Firma EOS GmbH vom Typ M290 durchgeführt. Das verwendete Pulvermaterial *EOS GP1* entspricht einem Edelstahl der Werkstoffnummer *1.4542*. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die verwendeten Parametersätze, die Prozesseinrichtung und die Folgeprozesse nicht weiter eingegangen. Es wird ausschließlich der Nachweis der Herstellbarkeit anhand der konstruktiven Anpassungen und deren Einflüsse auf die Werkzeugkomponenten diskutiert.

5.1 Voruntersuchungen zur Herstellbarkeit

Zur Validierung der Herstellbarkeit der Werkzeugkomponenten werden im Vorfeld Probenkörper der Primär- und der Sekundärverteilung aufgebaut. Anhand dieser können die fertigungsgerechte Auslegung und der Verzicht von Stützstrukturen nachgewiesen werden. Des Weiteren werden die ermittelten Parametersätze verifiziert. Für die Primärverteilung werden die einzelnen Teilkanäle aus dem CAD-Modell extrahiert und aufgedickt. Anschließend wurden die Probenkörper in der späteren Ausrichtung auf dem Baubett aufgebaut. Abbildung 5.1 (a) zeigt exemplarisch einen der Teilkanäle als Probe.

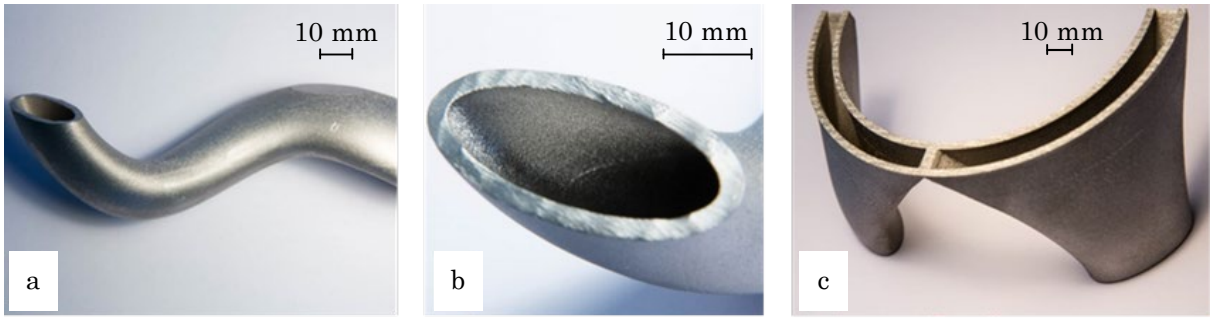


Abbildung 5.1: Probekörper zur Untersuchung der Herstellbarkeit der Kanalführung

Die Voruntersuchungen zeigen, dass die entwickelten Geometrien in der geplanten Ausrichtung herstellbar sind. Zur weiterführenden Analyse werden die Teilkanäle an fertigungskritischen Stellen aufgetrennt. Als solche sind vor allem Bereiche klassifiziert, in welchen die Ausrichtung des elliptischen Querschnitts in Bezug auf das Baubett zu ungünstigen Überhangswinkeln (gemäß den Ausführungen in Kapitel 4.2.2) führt. Detailansicht (b) zeigt einen aufgetrennten Kanal und veranschaulicht, dass die Kanalführung den Vorgaben des CAD-Modells entspricht. Für das Kanalinnere konnten keine Pulveranhaftungen oder signifikante Bauteilüberhöhungen festgestellt werden. Außerdem wurde der Bereich der Kanalzusammenführung untersucht. Die Probengeometrie (c) zeigt diesen als

Halbschnitt mit der Aufweitung der Teilkanäle zur Überführung in den Ringspalt. Auch dieser Bereich konnte erfolgreich auf Basis des CAD-Modells hergestellt werden.

Für die Sekundärverteilung wurden im Bereich des in Abbildung 5.2 betrachteten Segments vor allem minimale Stegstärken s sowie Überhangsbereiche (Detail a) und der Neigungswinkel α der Stege als fertigungskritisch identifiziert. Die finale Werkzeugbaugruppe ist mit einer Stegstärke von $1{,}5\ mm$ und einem Neigungswinkel der Stege von $\alpha = 45°$ ausgelegt. Analog zur Primärverteilung konnte durch die fertigungsgerechte Auslegung vollständig auf Stützstrukturen verzichtet werden. Die eingestellten Winkel sind über die gesamte Bauteillänge umsetzbar. Die Stegdicke ist für die einzelnen Stege konstant und weist keine Pulveranhaftungen auf. Der gekennzeichnete Überhangsbereich in der linken Abbildung wird im Rahmen weiterer Anpassungen nicht beachtet, da es nur an den Begrenzungsflächen des Teilausschnitts des Probekörpers zu den gezeigten Schmelzeausläufern kommt. In diesem Bereich wurden die gezeigten Stege geschnitten und resultieren in fertigungsungünstigen Überhängen. Die identischen Bereiche im Inneren des Testsegmentes sind ohne Anhaftungen herstellbar, da die ungeschnittenen Stege die entstandenen Downskin-Flächen abfangen.

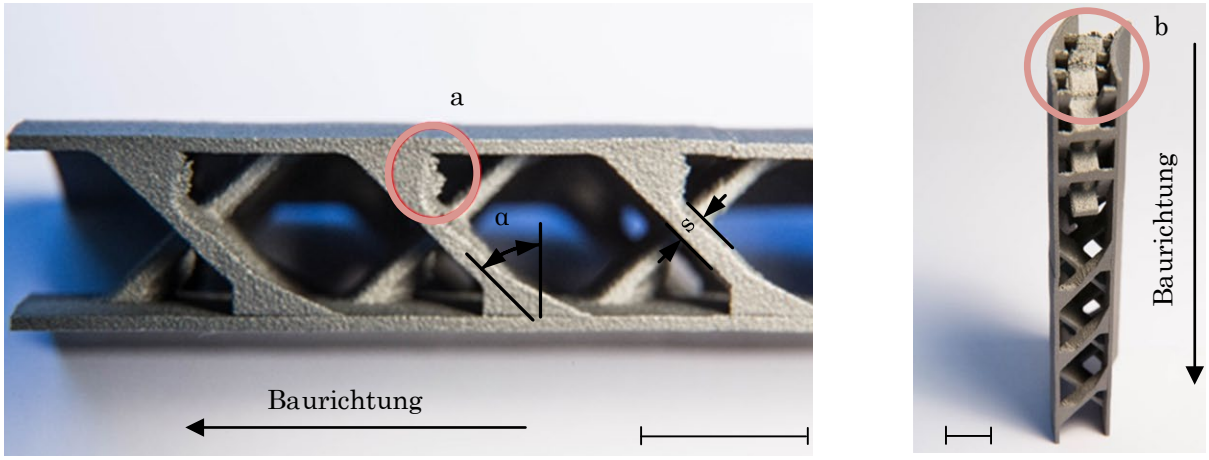


Abbildung 5.2: Probensegment zur Herstellbarkeit der Steggeometrien

Außerdem ist in Abhängigkeit von der Baurichtung der Anfangsbereich der Stege (Abbildung 5.2 rechts, Detail b) fehleranfällig. Abhilfe schafft hier ein sanftes Anwachsen der Stege aus der Gehäusewand heraus. Dies wurde bereits in der Auslegung diskutiert. Anhand der dargestellten Teilsegmente der Sekundärverteilung und des angedeuteten Gehäuses konnte die Herstellbarkeit sichergestellt und erprobt werden. Die Erkenntnisse aus den Versuchsaufbauten wurden für das finale laser-strahlgeschmolzene Bauteil entsprechend berücksichtigt.

5.2 Identifikation und Anpassung fertigungskrititscher Gehäusebereiche

Bisher hat die Gehäusekonstruktion in den gezeigten Untersuchungen keine Beachtung gefunden, da primär die Auslegung der Fließkanäle im Fokus stand. Dennoch wurden die Abmessungen von definierten Grenzwerten reglementiert. Um zunächst eine komplikationslose Integration in die Technikumsanlage zu gewährleisten, wurden die Anschluss-

maße zum Extruder und der Außendurchmesser des Referenzwerkzeuges vorgegeben. Somit sind zum einen die Flanschmaße definiert und zum anderen kann die vorhandene Peripherie, wie zu verwendende Widerstandsheizbänder und die Stützluftversorgung, ohne Anpassungen genutzt werden.

Beide zu fertigenden Gehäusekomponenten werden mit einem Außendurchmesser von *240 mm* konstruiert. Die Bauhöhe ist für die Integration keine kritische Größe und ergibt sich lediglich aus den Bauhöhen der Einzelkomponenten. Konkret beträgt diese für die Primärverteilung *155 mm* und für die Sekundärverteilung *90 mm*. Das Bauvolumen der Laser-Strahlschmelzanlage ist mit *250x250x325 mm* demnach ausreichend für den Bauteildurchmesser und unkritisch für die Bauteilhöhe. Bei einer konventionellen Werkzeugbaugruppe ist der Durchmesser des Rohmaterials unmittelbar durch den größten Bauteildurchmesser vorgegeben. Anschließend wird Material abgetragen, bis die Endkontur erreicht wird. Daraus resultieren massive Gehäusebaugruppen mit einem hohen Stahlanteil. Diese erlauben durch die gute Wärmeleitfähigkeit des Stahls zudem eine schnelle und gleichmäßige Aufheizung der Werkzeugbaugruppe. Bei additiv gefertigten Bauteilen ist ein gleichermaßen hoher Stahlanteil gleichbedeutend mit einer großen Belichtungsfläche je Schicht. Solche Konstruktionen sind aufgrund des benötigten Energieeintrags zum Aufschmelzen und den hohen Kühlraten zum lokalen Verschweißen des Pulvermaterials problematisch. Das Resultat sind hohe Eigenspannungen im Material, Gefügefehler und Rissbildung. Daher sieht der Ansatz zur Gehäusekonstruktion vor, nur in notwendigen Bereichen Gehäusestrukturen aufzubauen.

Im Fall der Primärverteilung werden vorrangig im Zentrum um die Teilkanäle Gehäusestrukturen aufgebaut. Dies ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Die linke Darstellung zeigt das Fluidvolumen in der gesamten Gehäusebaugruppe. Das CAD-Modell ist mittig abgebildet. Um die Teilkanäle und im vorderen Bereich zur späteren Bearbeitung der Anschlussfläche wird das Gehäuse massiv ausgeführt, auch um den vorherrschenden Betriebsdrücken standzuhalten. Der äußere Gehäusering (*I*) entspricht dem geforderten Nenndurchmesser und wird mit dem Innenteil (*II*) über radiale Verbindungsstege (*III*) verbunden. Die Stege beinhalten gleichzeitig die Kernlochbohrungen zur Montage mit der Sekundärverteilung. Die rechte Darstellung zeigt das gefertigte Bauteil nach der Nachbearbeitung (Kapitel 5.3). Im Vergleich zu einer üblicherweise als Vollkörper ausgeführten Werkzeugkomponente sind die erreichten Materialreduzierungen deutlich erkennbar.

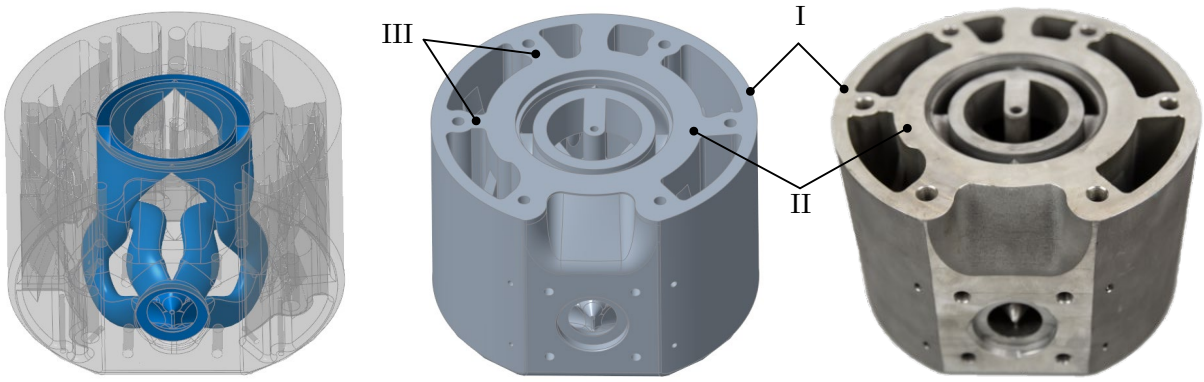


Abbildung 5.3: Gehäusekonstruktion und Fertigteil der Primärverteilung

Noch signifikantere Einsparungen sind bei der Sekundärverteilung erreicht worden. Dies liegt vor allem daran, dass der Außendurchmesser mit *240 mm* vorgegeben war, der relevante maximale Durchmesser der schmelzeführenden Kanäle jedoch lediglich *110 mm* beträgt. Dies ist in Abbildung 5.4 links erkennbar. Analog zur Primärverteilung sieht auch

die Gehäusekonstruktion der Sekundärverteilung ein massives Innenteil um die Fließkanäle und einen Außenring zur vollflächigen Temperierung durch die Widerstandsheizbänder vor. Die Bohrungen zur Verbindung mit der Sekundärverteilung sind in die Verstärkungsstege eingebracht. Für die Montage der Nachfolgezone in Form des Zentrierringes und Düsendornes sind zusätzliche Gewindetaschen (*IV*) am Innenteil vorgesehen.

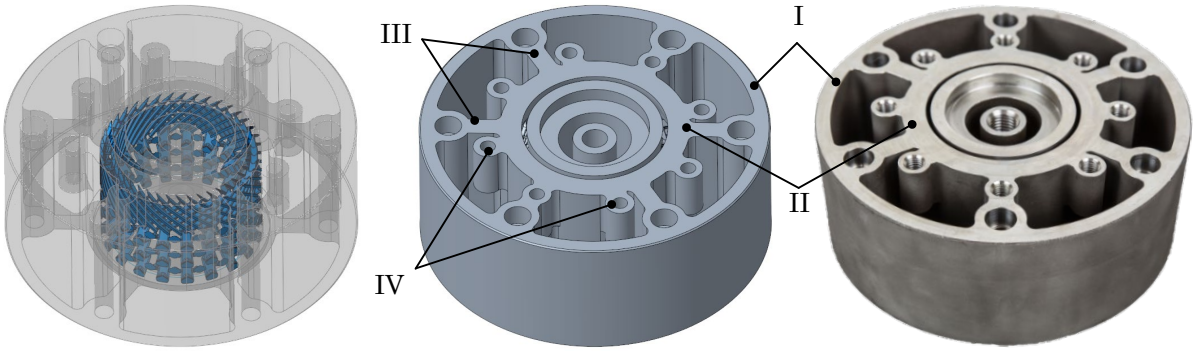


Abbildung 5.4: Gehäusekonstruktion und Fertigteil der Sekundärverteilung

In Tabelle 5.1 ist eine Gegenüberstellung der fertigungsgerechten Gehäuseausführungen mit den jeweiligen Vollkörper-Varianten ohne Anpassungen aufgeführt. Anhand dieses Vergleichs wird die signifikante Materialreduktion deutlich. Die Bauteilmasse konnte um bis zu *50 %* reduziert werden.

Tabelle 5.1: Auswirkung der fertigungsgerechten Gestaltung auf Stahlmasse und -volumen

Geometrie	Masse Vollkörper	Masse fertigungsgerecht	Volumen Vollkörper	Volumen fertigungsgerecht
Primärverteilung	*50,19 kg*	*31,79 kg*	$6{,}41 \cdot 10^6\ mm^3$	$4{,}06 \cdot 10^6\ mm^3$
Sekundärverteilung	*32,24 kg*	*16,01 kg*	$3{,}73 \cdot 10^6\ mm^3$	$2{,}04 \cdot 10^6\ mm^3$

Vor dem Hintergrund der zuvor erwähnten Aufheizprozesse sei an dieser Stelle angemerkt, dass das Demonstratorwerkzeug durch die mit Luft gefüllten Aussparungen mehr Zeit benötigt, bis das Werkzeuginnere die jeweilige Soll-Temperatur erreicht. Die direkte Wärmeleitung ist nur über die Verbindungsstege möglich. Dies wird für die ersten experimentellen Erkenntnisse mit längeren Aufheizprozessen in Kauf genommen. Sofern eine Überführung in Produktionsumgebungen für vergleichbare Extrusionswerkzeuge interessant wird, müssen die Aufheizbedingungen jedoch verbessert werden. Hier sind verschiedene Ansätze denkbar. Sofern der Außendurchmesser keinen definierten Wert erreichen muss, kann ein vergleichbares Werkzeug deutlich kompakter und mit Verzicht auf den äußeren Ring ausgeführt werden. Der Vorteil wäre dann eine signifikant kürzere Aufheizdauer, da unmittelbar um den Fließkanal geheizt werden kann. Wenn jedoch ein definierter Außendurchmesser erreicht werden muss, kann ein Kompromiss aus konventioneller und additiver Fertigung gefunden werden. Die Fließkanäle werden additiv gefertigt und als reduzierte Gehäusekomponenten ausgeführt. So können die fertigungstechnischen Freiheitsgrade genutzt werden. Anschließend wird ein Gehäusemantel bis auf den Nenndurchmesser durch konventionelle Fertigungsverfahren hergestellt. Durch entsprechende Passflächen können die beiden Komponenten gefügt werden und es besteht eine direkte Kontaktfläche zur Wärmeleitung. Einige weiterführende Gedanken zu den Potenzialen neuer Gehäusekonzepte werden zudem in Kapitel 5.4 formuliert.

5.3 Integration in eine Technikumsanlage

Als Vorteil der additiven Fertigung wird häufig die Herstellung fertiger Bauteile in einem Prozessschritt genannt. Dies ist zwar in Bezug auf komplexe Funktionsbauteile grundsätzlich korrekt, jedoch für den betrachteten Anwendungsfall nicht ausreichend. Das liegt vor allem an der mechanischen Integration in die bestehende Gesamtanlage und den daraus resultierenden Anforderungen. Üblicherweise werden Flansch- und Anschlussbereiche in der Kunststoffverarbeitung über metallische Dichtflächen mit entsprechend geringer Oberflächenrauheit ($Rz < 10\ \mu m$) ausgeführt. Hierfür sind hohe Passgenauigkeiten bei hohen Flächenpressungen notwendig. Unbearbeitete additiv gefertigte Bauteile können ohne Nachbearbeitung weder die geforderten Oberflächenrauheiten, noch die Passgenauigkeiten erfüllen (vgl. Grundlagen nach Kapitel 2.5). Daher müssen die äußeren Funktions- und Verbindungsflächen spanend nachbearbeitet werden.

Nachfolgend wird die Prozesskette nach der erfolgreichen additiven Fertigung der beiden Werkzeugkomponenten beschrieben. Nach dem Bauprozess weisen die gefertigten Bauteile trotz der optimierten Gestaltung hohe Eigenspannungen auf. Der Hauptgrund sind die zyklich auftretenden sehr hohen lokalen Temperaturen, verbunden mit der schnellen Abkühlung, über eine lange Prozessdauer. Anzeichen für hohe Eigenspannungen waren im vorliegenden Fall der Verzug der Substratplatte um bis zu *2 mm* in Baurichtung an den Randbereichen. Daher ist es ratsam die Bauteilspannungen vor der weiteren Bearbeitung über Wärmebehandlungsprozesse abzubauen, im vorliegenden Fall durch Spannungsarmglühen gemäß der Herstellerspezifikation des Pulverwerkstoffes. Anschließend wurden die Bauteile über ein Drahterodierverfahren von der Substratplatte getrennt und für die weitere Bearbeitung vorbereitet. Die betroffenen Flächen der folgenden materialabtragenden Nachbearbeitung sind in Abbildung 5.5 und Abbildung 5.6 farblich hervorgehoben.

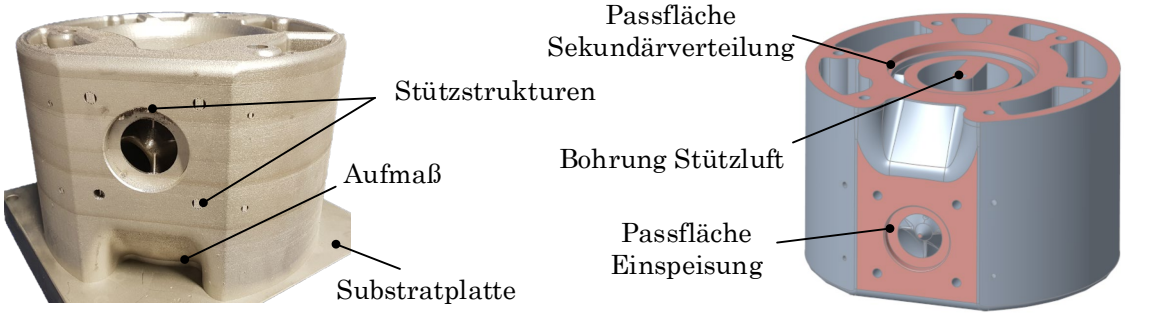


Abbildung 5.5: Bereiche mit mechanischer Nachbearbeitung der Primärverteilung

Für die Primärverteilung ist das Bauteil ohne vorherige Nachbearbeitung auf der linken Seite von Abbildung 5.5 dargestellt. Über der Substratplatte ist im unteren Bereich ein Aufmaß vorgesehen, um das Abtrennen von der Platte und die Nachbearbeitung zu kompensieren. Selbiges gilt für alle Bohrungen und Funktionsflächen. Auf der rechten Seite sind die flanschseitige und sekundärverteilungsseitige Verbindungsfläche hervorgehoben. Beide Flächen werden in einem Fräszentrum auf eine Oberflächenrauheit von *Rz 2,4* nachbearbeitet. Anschließend werden die Passflächen zur metallischen Dichtung ausgearbeitete und an die Anschlussmaße der Einspeisung bzw. Sekundärverteilung angepasst. Schließlich werden die benötigten Gewinde zur Verschraubung der Einspeisung, der Sekundärverteilung, der Montage auf dem Werkzeugträger und der Heizbänder sowie Temperaturfühler in die vorgesehenen Kernlöcher geschnitten. Im Zentrum des Bauteils wird

eine Bohrung für die Stützluft und auf der Mantelfläche die Anschlussverschraubung eingebracht.

Die Sekundärverteilung wird analog zum beschriebenen Vorgehen nachbehandelt. Hierbei sind die Ober- bzw. Unterseite als Kontaktfläche zur Primärverteilung und zur Nachfolgezone relevant. Die Bearbeitung beschränkt sich auch hier auf den Abtrag des vorherigen Aufmaßes zur Gewährleistung der Oberflächenrauheit und der Herstellung der Passflächen und Gewindebohrungen. Die bearbeiteten Flächen sind nachfolgend in Abbildung 5.6 gezeigt.

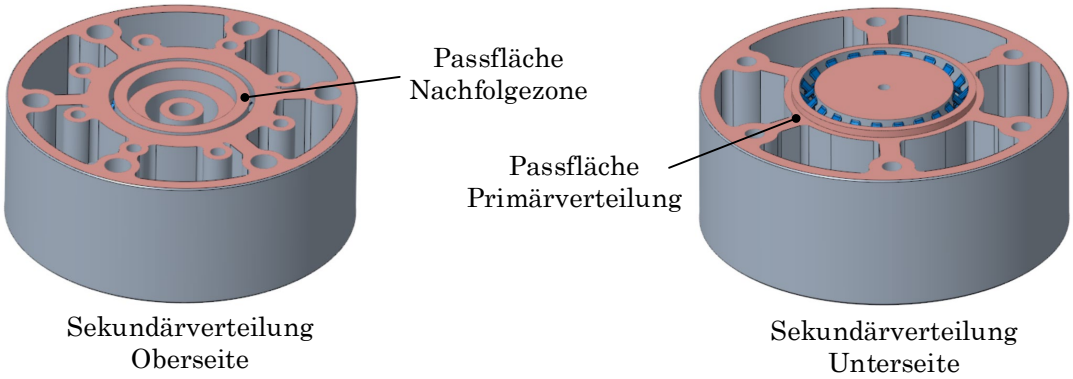


Abbildung 5.6: Bereiche mit mechanischer Nachbearbeitung der Sekundärverteilung

Es lässt sich festhalten, dass die spanende Nachbearbeitung somit auf ein Minimum reduziert werden kann und sich ausschließlich auf die Funktionsflächen, an denen Kontakt zu einem anderen Bauteil besteht, beschränkt. Da der vorliegende Demonstrator in zwei Einzelkomponenten hergestellt wurde, umfasst die Nachbearbeitung somit vier Kontaktflächen und alle benötigten Verschraubungen. Die eigentlichen Strömungskanäle werden in der vorliegenden Arbeit nicht weiter nachbehandelt und keiner Prozesskette zur Reduzierung der Oberflächenrauheit unterzogen. Demnach kann die Geometrie unmittelbar und ohne den Einfluss mehrstufiger mechanisch-abrasiver oder elektrochemischer Prozesse zur Verbesserung der Oberflächentopologie bewertet und mit der Referenz verglichen werden. Dies lässt eine Bewertung der Eignung des Fertigungsverfahrens zu und stützt die Ergebnisse nicht auf eine Folgebehandlungen. Aufbauend auf den experimentellen Ergebnisse lassen sich aus der sich einstellenden Oberflächentopologie zudem weitere Erkenntnisse zu Wechselwirkungen und Einflüssen der Kanaloberfläche auf Spül- und Wechselprozesse ziehen. Zu Prozessen zur Verbesserung der Oberflächentopologie von additiv gefertigten Bauteilen sei auf laufende Forschungsarbeiten des Lehrstuhls für Fertigungstechnik der Universität Duisburg-Essen verwiesen.

5.4 Zwischenfazit und Potenziale neuer Gehäusekonzepte

Zusammenfassend zeigt sich, dass die in Kapitel 4 entwickelte Werkzeuggeometrie auf Basis der Grundlagen aus Kapitel 2.5 fertigungsgerecht gestaltet werden konnte und der additive Bauprozess, gemäß den Forderungen, ohne interne Stützstrukturen möglich ist. Bei der additiven Fertigungstechnik ist die Herstellbarkeit nicht im selben Maße bewertbar, wie bei der konventionellen Fertigung, da die zuvor erwähnten Konstruktionsrichtlinien nicht im selben Maße bestehen. Als effektives Bewertungsmittel zeigte sich hierbei die Fertigung von Testsegmenten in der späteren Bauteilorientierung. Nachdem die Ka-

nalquerschnitte in ihrer Gestalt und Orientierung während der Auslegung möglichst fertigungsgerecht gestaltet wurden, bestätigte sich dies im Rahmen der Voruntersuchungen. Für die Testsegmente der Primärverteilung wurden die Teilkanäle aus dem Modell extrahiert und die Wandflächen aufgedickt. Die Proben ermöglichten die Bewertung der Oberflächentopologie entlang der im Gesamtmodell nicht zugänglichen Wandflächen und bestätigten eine homogene Oberflächentopologie. Im Bereich der Sekundärverteilung konnte die Herstellbarkeit der Steggeometrien durch einen fertigungsoptimierten Winkel und deren selbststützenden Struktur ebenfalls bestätigt werden. Einzig der Auslaufbereich im Übergang zur Nachfolgezone musste durch geringfügige Anpassungen verbessert werden. Durch einen graduellen Aufbau der Stege aus den Gehäusewänden heraus war auch dieser Bereich ohne Stützstrukturen oder Bauteildefekte realisierbar.

Nachdem die unmittelbaren Strömungskanäle für das finale Demonstratorwerkzeug herstellbar waren, musste die jeweilige Gehäusegeometrie an das Fertigungsverfahren angepasst werden. Dieser Schritt implizierte die Materialreduktion in dafür geeigneten Bereichen, ohne die Funktion zu beeinträchtigen. Aufgrund der zuvor definierten äußeren Abmaße konnte eine geeignete Lösung durch einen Außenring um die verfahrensrelevanten Fließkanäle im Inneren gefunden werden. Während das Innenteil die Strömungskanäle enthält, ist der Außenring maßgeblich für eine vollständige Funktionsintegration (z. B. Heizbänder) in die Gesamtanlage verantwortlich.

Die Funktionsflächen zur Montage in die Technikumsanlage, sowie die Verbindungsflächen der beiden Komponenten des Demonstrators wurden nach erfolgter Wärmebehandlung mechanisch nachbearbeitet. Dieser Schritt ist mit der Dichtfunktion und der Lagetoleranz für den Betrieb begründet. Alle innenliegenden Flächen wurden nicht gesondert nachbehandelt, um im Rahmen dieser Arbeit die Eignung des Fertigungsverfahrens für den Einsatz in einem Extrusionsprozess zu bewerten. Zum einen erweitert dies in der experimentellen Erprobung den Kenntnisstand über den Einfluss der Oberflächentopologie auf Spülprozesse, zum anderen bildet die erreichte Oberflächentopologie den aktuellen Stand der Fertigungstechnik für komplexe innenliegende Kanalflächen ab und dient als Grundlage für eine zielgerichtete Entwicklung geeigneter Nachbehandlungsroutinen.

Anhand des Demonstratorwerkzeugs konnten grundlegende Erfahrungen zur additiven Herstellung von Bauteilen mit verhältnismäßig großen Belichtungsflächen erarbeitet werden, da dies anfänglich zu Problemen in der Prozessstabilität sowie Wärmeverzug und Spannungsrissen geführt hat. Die Abmaße wurden in der vorliegenden Arbeit in Anlehnung an vorhandene Werkzeuge der Technikumsanlage des Lehrstuhls definiert. Für anknüpfende Arbeiten stellt es somit einen zu untersuchenden Ansatz dar, nur die eigentlichen schmelzführenden Kanäle mit entsprechenden Anschlussmöglichkeiten und einer der Schmelzedruckbelastung angemessenen Wandstärke herzustellen. Üblicherweise dient die Stahlmasse von Wendelverteilerwerkzeugen auch einer homogenen Temperaturverteilung an den Kanalwänden. Über eine konturnahe Bauteilgestaltung wäre aber auch eine direkte Temperierung unmittelbar an der Kanalwand über flexible Heizelemente realisierbar. Für die Primärverteilung ist somit sogar eine individuelle Temperierung einzelner Schmelzekanäle denkbar und bietet weiterführendes Forschungspotenzial zu den Ergebnissen von Yesildag [Yes17], der eine kanalspezifische Temperierung über Heizpatronen untersuchte. Relevant wird dieses Konzept auch im Hinblick auf Spülprozesse. Durch eine kurzfristig höhere Heizbandtemperatur kann die Schmelzeviskosität der Randschicht gezielt herabgesetzt werden. Weist anschließend das Zielmaterial eine höhere Viskosität auf, kann damit die Spülzeit verkürzt werden. Dies findet in der Industrie jedoch wenig Anwendung, da die Reaktionszeit der Stahlbaugruppe zu träge ist um anschließend auf eine verarbeitungsgerechte Temperatur abzukühlen. Diese Zeit kann durch die offene Bauweise eines additiv gefertigten Werkzeuges signifikant heruntergesetzt werden. Denkbar ist hier sogar eine Einhausung, die mit Öl als Temperiermedium

geflutet wird. Mit dem Verzicht auf Trennfugen besteht dabei keine Gefahr der Leckage. Da es hierzu jedoch keine Erfahrungen gibt, gilt es, das Konzept vorab zu prüfen, um auch eine ausreichende Umwälzung des Temperiermediums zu gewährleisten.

Abschließend zeigt Abbildung 5.7 die direkte Gegenüberstellung der beiden montierten Werkzeugvarianten. Die Bauhöhe konnte signifikant reduziert werden, sodass das Demonstratorwerkzeug eine um *47 %* geringere Höhe aufweist als das konventionelle Wendelverteilerwerkzeug (jeweils ohne Nachfolgezone).

Abbildung 5.7: Gegenüberstellung der Werkzeugvarianten; links: konventionelle Fertigung, rechts: additive Fertigung mit konventioneller Nachfolgezone

Neben den positiven wirtschaftlichen Effekten durch einen geringeren Energiebedarf zur Temperierung und weniger Energieverluste durch Wärmestrahlung an den Werkzeugoberflächen wirkte sich die Bauform vor allem positiv auf (De-)Montagearbeiten aus. Das Wendelverteilerwerkzeug wurde stets mit zwei Personen und Kraneinsatz montiert und die Montagezeit lag aufgrund der höheren Anzahl an Gehäusekomponenten und Schraubverbindungen deutlich über einer Stunde. Das Demonstratorwerkzeug konnte mit einer Person in deutlich unter einer Stunde montiert werden. Der Einsatz des Krans war dabei aufgrund des Bauteilgewichts nur für die konventionell gefertigte Nachfolgezone notwendig.

6 Experimentelle Erprobung der Werkzeuggeometrie

Im finalen Schritt ist die experimentelle Erprobung der Werkzeuggeometrie und deren Gegenüberstellung mit konventionellen Werkzeuglösungen notwendig, um das erarbeitete Demonstratorwerkzeug hinsichtlich der Prozessfähigkeit zu validieren. Daher wurden vergleichbare Versuchsreihen mit dem zuvor beschriebenen Referenzwerkzeug und dem additiv gefertigten Demonstratorwerkzeug durchgeführt und deren Ergebnisse gegenübergestellt. Alle nachfolgenden Ergebnisse entstanden während der Erprobung anhand eines randomisierten Versuchsplans, welcher jeden Betriebspunkt dreifach und mit variierender Historie anfährt.

Zunächst kann über die Versuchsergebnisse die Güte der Simulationen, welche initial zur Auslegung und Bewertung der präsentierten Geometrien dienten, anhand einer Gegenüberstellung mit experimentell erfassten Größen bewertet werden. Anschließend wird anhand der Untersuchung der durchgeführten Wechselprozesse der direkte Vergleich der Werkzeuge ermöglicht und eine Aussage über die Prozessqualität getroffen. Wie zuvor definiert, beschreiben zügige Wechselprozesse mit geringem Materialeinsatz eine Anforderung an Extrusionswerkzeuge um Ausschuss zu minimieren. Abgeschlossen wird die experimentelle Erprobung mit dem Vergleich der Produktqualität durch die Bestimmung der mechanischen Folieneigenschaften.

6.1 Gegenüberstellung der Druckverbräuche zur Validierung der Simulationsergebnisse

Bevor nachfolgend auf den Vergleich der berechneten und experimentell ermittelten Druckverbräuche eingegangen wird, ist eine Vergleichbarkeit der betrachteten Daten zu gewährleisten. In den gezeigten Simulationen resultiert der berechnete Druckverbrauch aus der mittleren Druckdifferenz zwischen den jeweiligen Ein- und Austrittsflächen der Fluiddomäne. Diese sind beschrieben durch die Eintrittsfläche in das jeweilige Werkzeug und die Austrittsfläche nach der Sekundärverteilung. Für die Simulationen wurde die identische Nachfolgezone aus Gründen der Rechenkapazität nicht betrachtet. Zum Vergleich mit den experimentell ermittelten Werten muss somit die Nachfolgezone demnach ergänzend berücksichtig werden. Zudem entspricht der Messpunkt des experimentell ermittelten Drucks aus maschinentechnischen Gründen nicht der Werkzeugeintrittsfläche. Der Drucksensor wurde während der Versuchsdurchführung in einer Schmelzeleitung zwischen Extruder und Werkzeugeintritt montiert, demnach muss der Druckverbrauch entlang dieser Leitung zusätzlich berücksichtigt werden. Hierfür wird der Betrag übereinstimmend analytisch und simulativ berechnet und für den nachfolgenden Vergleich zwischen den Simulationen und den Experimenten entsprechend addiert.

Für die Simulationen wurde an der Austrittfläche des Düsendorns Umgebungsdruck angenommen und somit ist der Druckverbrauch auf der Eintrittsfläche zu berechnen. Dieser ist in Abbildung 6.1 für die beiden verwendeten Materialien und Werkzeuggeometrien aufgetragen. Die experimentell ermittelten Werte bilden den Mittelwert des Massedrucks an benannter Messstelle für einen quasistationären Betriebszustand über einen Zeitintervall von 30 Minuten ab. Die Daten wurden mit Hilfe einer Messwerterfassungssoftware der Firma *iba AG* unmittelbar aus der Maschinensteuerung der Technikumsanlage ausgelesen und mit einer Messfrequenz von *20 Hz* aufgezeichnet. In der Gegenüberstellung ist, neben den Werten des Druckverbrauchs, zudem die Abweichung zwischen Simulation und Experiment des jeweiligen Betriebspunktes aufgetragen.

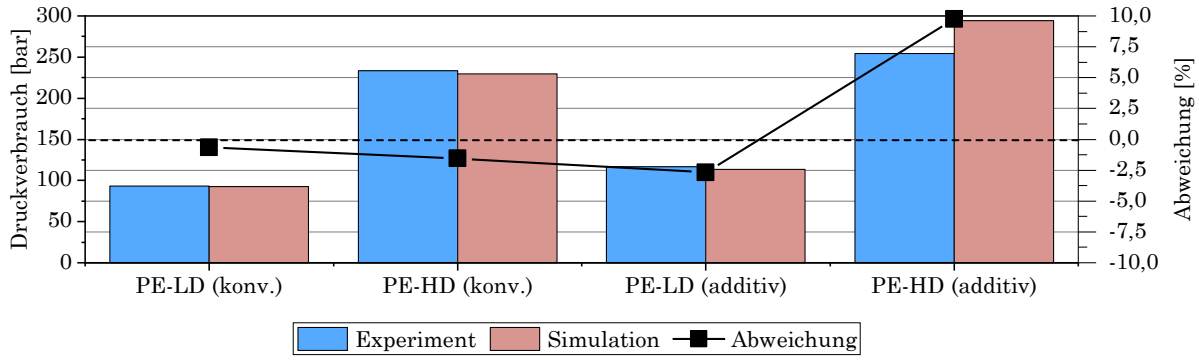


Abbildung 6.1: Vergleich des Druckverbrauchs zwischen Simulation und Experiment für das Referenzwerkzeug und das Demonstratorwerkzeug

Anhand der Auswertung ist die Entwicklung des Druckverbrauchs für beide Werkzeuggeometrien und Materialien bei einem Durchsatz von *30 kg/h* erkennbar. Für das Referenzwerkzeug stellt sich in der Simulation für PE-LD ein Druckverbrauch von *92,32 bar* ein. Das Experiment bestätigt diesen Wert mit einer Abweichung von *-0,65 %*. Erwartungsgemäß steigt der Druckverbrauch für die Versuche mit PE-HD signifikant an und beträgt *229,81 bar*. Erneut weisen die Simulationsergebnisse leicht erhöhte Werte bei einer Abweichung von *-1,54 %* auf. Diese grundsätzliche Tendenz bestätigt sich auch in der Auswertung des Demonstratorwerkzeugs. Hier stellte sich für die Versuche mit PE-LD ein leicht erhöhter Druckverbrauch von *113,36 bar* ein, welcher bezogen auf die Simulationsergebnisse in einer Abweichung von *-2,69 %* resultiert. Analog zur Referenz steigt der Druckverbrauch unter Verwendung von PE-HD an und berechnet sich in der Simulation zu *281,87 bar*. Hier liegt die Abweichung zu den Experimenten bei einem Wert von 9,74 %.

Insgesamt kann die Gegenüberstellung des simulierten und experimentell ermittelten Druckverbrauch als sehr gut beurteilt werden. Beide Werkzeugvarianten weisen für den betrachteten Prozess ein vergleichbares Druckniveau auf. Die Abweichungen liegen insgesamt im Bereich von *-2,6 – 9,8 %* und können auf verschiedenste Einflussfaktoren zurückgeführt werden, deren Untersuchung an dieser Stelle - und aufgrund der geringen Größe der Abweichung - als nicht zielführend erachtet wird. Als grundlegende mögliche Faktoren können Fertigungs- und Positionierungsungenauigkeiten der Komponenten genannt werden. Zudem muss die Vernachlässigung temperaturabhängiger Effekte in der Simulation berücksichtigt werden. Da die Schmelzetemperatur vor dem Eintritt in das Extrusionswerkzeug messtechnisch erfasst wird, können dennoch Abweichungen zwischen der tatsächlich im Werkzeug auftretenden und der in der Simulation angenommenen Temperatur vorliegen. Dies scheint vor allem für den Betriebspunkt des Demonstratorwerkzeuges mit dem Material PE-HD als wahrscheinlicher Grund für die höhere Abweichung zur Simulation. Zu guter Letzt sind die Simulationen und deren Genauigkeiten von den zugrunde gelegten Materialdaten abhängig und somit ausschlaggebend für die Berechnung des Druckverbrauchs. Selbiges gilt für die sich in den Experimenten einstellenden Druckverbräuche.

6.2 Einfluss der Werkzeuggeometrie auf Wechselprozessen

Ein Hauptaugenmerk bei der Entwicklung des Demonstratorwerkzeugs wurde auf eine kurze Verweilzeit und die Vermeidung von Stagnationszonen für ein geringes Verweilzeitspektrum gelegt. Zur Bestätigung der simulierten Ergebnisse werden nachfolgend die

Untersuchung von Wechselprozessen und der Spülmasse präsentiert. Zur Visualisierung hat sich die Verwendung von Farbpigmenten zur optischen Beeinflussung der Produktfarbe etabliert, da der Verlauf der Farbänderung messtechnisch erfassbar ist. Demnach wird wahlweise ein Ausgangsmaterial durch entsprechend eingefärbtes Material verdrängt, oder ein bereits eingefärbtes Ausgangsmaterial durch das naturbelassene Material. Für den Wechselprozess wird in einem quasistationären Betriebszustand zu einem definierten Zeitpunkt die Dosierung mit dem Ausgangsmaterial unterbrochen und auf das Zielmaterial umgestellt. Als Wechselzeit wird anschließend die Zeitspanne bezeichnet, bis das Ausgangsmaterial in den Fließkanälen durch das Zielmaterial verdrängt wurde. Durch die Erfassung des zeitlichen Verlaufes des Wechselprozesses anhand der Produktfarbe, kann anschließend eine Aussage über das Verweilzeitspektrum der Werkzeuggeometrie getätigt werden. Die Spülmasse ergibt sich aus der Wechselzeit und dem Durchsatz des Prozesses.

Die messtechnische Erfassung wird bei dieser Arbeit durch ein Spektralphotometer umgesetzt und geht auf die Arbeit von te Heesen [Hee15] zurück. Dieser integrierte ein auf dem Transmissionsprinzip beruhendes Messsystem (colorCONTROL ACS7000 mit Transmissionssensor ACS3, Micro-Epsilon Eltrotec GmbH) in den Abzugsbereich der verwendeten Technikumsanlage. Der Sender und der Empfänger des Spektralphotometers werden synchron auf einer Linearachse verfahren und ermöglichen so die online-Farbmessung entlang der gesamten Folienbreite des doppelt flachgelegten Folienschlauches. Die Farbermittlung erfolgt nach der Theorie des *CIE-L*a*b* Farbraums, welcher bereits durch [Gro06, Nie06, Szö14, Hee15, Bur19] erfolgreich für die Bewertung von Wechselprozessen eingesetzt wurde. Hierbei wird der Verlauf der *b**-Achse, welche den *Blauwert* repräsentiert, herangezogen. Demnach wird das Ausgangsmaterial mit einem blauen Masterbatch eingefärbt (Fa. A. Schulmann). Der gesamte Versuchsplan bildet jeden Wechsel dreifach ab und wurde randomisiert durchgeführt um Einflussfehler auszuschließen.

Tabelle 6.1: Übersicht der durchgeführten Wechselprozesse

Ausgangsmaterial	Zielmaterial	Massedurchsatz	Foliendicke	ABV
PE-LD (natur)	PE-LD + 2,5 Gew.% Masterbatch	30 kg/h	100 µm	2,5
PE-LD + 2,5 Gew.% Masterbatch	PE-LD (natur)	30 kg/h	100 µm	2,5
PE-LD (natur)	PE- HD + 2,5 Gew.% Masterbatch	30 kg/h	100 µm	2,5
PE- HD + 2,5 Gew.% Masterbatch	PE-LD (natur)	30 kg/h	100 µm	2,5
PE-HD (natur)	PE-HD + 2,5 Gew.% Masterbatch	30 kg/h	100 µm	2,5
PE-HD + 2,5 Gew.% Masterbatch	PE-HD (natur)	30 kg/h	100 µm	2,5

Zunächst werden für beide Werkzeuge exemplarisch die Ergebnisse des *b**-Wert Verlaufs über der Folienbreite für verschiedene Zeitpunkte gegenübergestellt. In Abbildung 6.2 wird die Breite des Folienschlauches auf der Abszisse von *50 – 400 mm* aufgelöst und entspricht einer Sensorfahrt. Die Messwerte des *b**-Wertes sind auf der y-Achse aufgetragen. Der zeitliche Verlauf wird durch die Messreihen *0, 5, 8, 10, 15 und 20 min* nach der Umstellung von PE-LD (eingefärbt) auf PE-LD (natur) wiedergespiegelt. Die linke Seite der Abbildung zeigt die Ergebnisse für das Referenzwerkzeug. Zu Beginn des Wechselprozesses liegen die Blauwerte für die eingefärbte Folie knapp über einem Wert von -30 und steigen im Verlauf des Wechselprozesses auf einen Wert von 5 an. Signifikant für die Referenzwerkzeuggeometrie ist hierbei die Detektierbarkeit der Wendelstreifen. Diese sind

im Bereich von *90, 150, 290* und *360 mm* Folienbreite mit einem deutlichen Ausschlag des Blauwertes sichtbar und nehmen erst aber einer Wechselzeit >*15 min* ab. Es bestätigt sich die längere Spülzeit der Wendelkanäle. Die gegenläufigen Ausschläge für die Messwerte bei *0* und *5 min* zeigen den Einfluss eines vorherigen Wechsels von PE-LD (natur) auf PE-LD (eingefärbt). Hier zeigen sich geringere Blauwerte im Bereich der Wendelstreifen, da das nicht eingefärbte Material nicht vollständig aus der Randschicht verdrängt wurde.

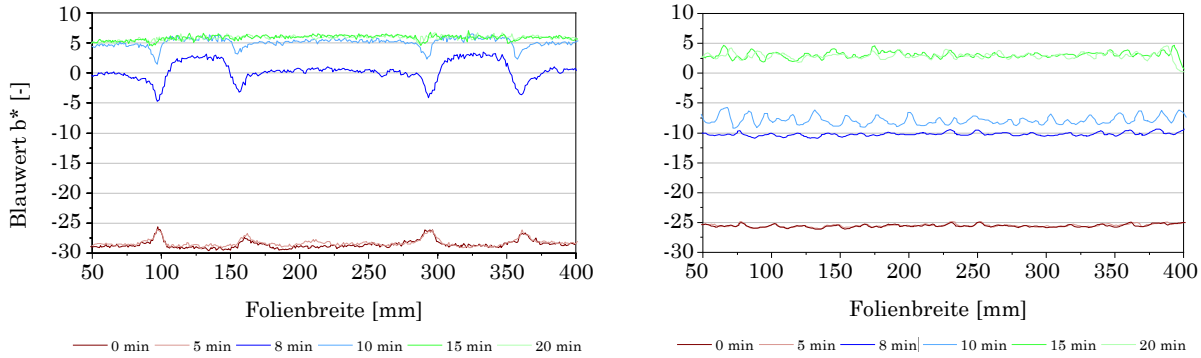


Abbildung 6.2: Gegenüberstellung der b-Wert Verläufe für das Referenzwerkzeug (links) und das Demonstratorwerkzeug (rechts)*

Dem gegenüber stehen die Ergebnisse des Demonstratorwerkzeuges auf der rechten Seite der Abbildung. Die ermittelten Farbwerte über die Folienbreite sind insgesamt als homogener zu beschreiben. Deutliche Spitzen in den Farbwerten sind aufgrund der Werkzeuggeometrie nicht zu erkennen, jedoch spiegelt sich der wiederkehrende Verlauf der Stege der Sekundärverteilung in den gemessenen Farbwerten wieder. Dies ist am besten für die Messwerte nach *10 min* zu erkennen und zeigt auch quantitativ die 40 sich wiederholenden Stege als jeweilige Hoch- und Tiefpunkte des *b**-Wertes.

Eine genauere Auswertung der Verweilzeit kann über den zeitlichen Verlauf des *b**-Wertes durchgeführt werden. Hierfür sind in Abbildung 6.3 die Messwerte für eine feste Breitenposition auf dem Folienschlauch für die beiden Werkzeugvarianten gegenübergestellt. Da im Rahmen der Arbeit ein Vergleich der Werkzeuggeometrien angestrebt wird, wird eine verweilzeitdominierende Breitenkoordinate zur exemplarischen Auswertung gewählt. Für das Referenzwerkzeug bietet sich der Bereich der Wendelstreifen an, da die Verweilzeit hier erfahrungsgemäß den Prozess dominiert. Die ausgewertete Verweilzeit bildet für das Referenzwerkzeug demnach die strömungstechnisch ungünstigsten Bereiche ab, was qualitativ zudem optisch während der Versuchsdurchführung bestätigt werden konnte. Aufgrund der identischen Segmente des Demonstratorwerkzeuges gibt es, wie bereits anhand von Abbildung 6.2 zu erwarten war, um den Umfang keine signifikanten Abweichungen in der Verweilzeit, daher wird die Folienmitte zur Auswertung gewählt. Während der Wechselprozesse konnte diese Einschätzung subjektiv ebenfalls bestätigt werden. Insgesamt ist der Austritt des eingefärbten Materials, als um den Umfang äußerst gleichmäßig und ohne vorauseilende Bereiche zu beschreiben.

Zur messtechnischen Quantifizierung wird anhand der Wechselprozesse von PE-LD (eingefärbt) auf PE-LD (natur) die Wechselzeit ermittelt. Diese wird anhand der dargestellten Kurvenverläufe deutlich, wobei der charakteristische Kurvenverlauf für die ausgewerteten Wechselprozesse als identisch zu beschreiben ist.

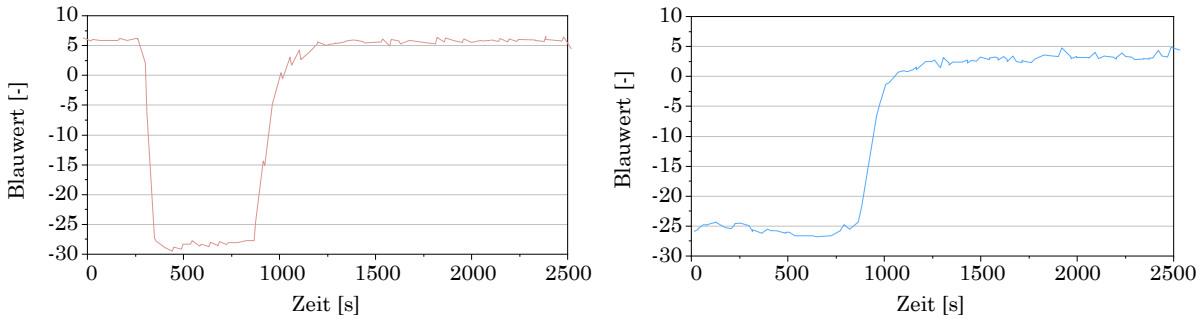


Abbildung 6.3: Zeitlicher Verlauf des b-Werts für eine feste Breitenkoordinate zur Bestimmung der Spülmasse*

Die linke Abbildung für das Referenzwerkzeug zeigt exemplarisch den vollständigen Prozess. Zunächst liegt der Blauwert für PE-LD (natur) bei einem Wert von ca. *5*. Das Ausgangsmaterial für den Wechselprozess führt zu einem rapiden Abfall des Blauwerts auf ca. *-30*, da das Farbpigment die Produktfarbe schnell dominiert. Anschließend wird der Prozess auf das Zielmaterial umgestellt und das eingefärbte Material wird in Extruder, Schmelzeleitung und Werkzeug durch das Zielmaterial verdrängt. Der Wechselprozess endet, sobald der Kurvenverlauf erneut den Referenzwert annimmt. Demnach ergibt sich die Wechselzeit aus der zeitlichen Differenz ab dem Anstieg des Blauwertes, bis zum Schnittpunkt des Kurvenverlaufes mit dem Referenzwert. Zur Bestimmung dieser Punkte wird jeweils der Mittelwert aus den ersten und letzten *500 s* des Versuches gebildet. Die Auswertung ergibt eine Verweilzeit von *25,3 min* für das Referenzwerkzeug und *20,7 min* für das Demonstratorwerkzeug. Für die betrachteten Versuche entspricht dies einer Reduktion der Spülzeit um *18,19 %*. Mit diesen Ergebnissen einhergehend kann die benötigte Spülmasse ebenfalls signifikant reduziert werden.

Zuletzt soll an dieser Stelle auf zwei Besonderheiten eingegangen werden, welche während der Versuchsdurchführung festgestellt wurden. Zum einen wurden im Rahmen der Auswertung lediglich die Farbwechselversuche des PE-LD betrachtet. Dies hat den Hintergrund, dass unter Verwendung des PE-HD die Folie im Abzugsbereich nicht ruhig genug geführt werden konnte, was auf Probleme mit dem Wickler zurückzuführen ist. Da das verwendete Messsystem jedoch äußerst sensibel auf Veränderungen des Messabstandes, sowie des Einfallswinkels auf die Folie reagiert, eigneten sich die Farbwerte nicht für eine belastbare Auswertung. Die grundsätzliche Tendenz, welche bei den Versuchen mit PE-LD festgestellt wurde, konnte während der Versuche jedoch bestätigt werden. Die beschriebenen Phänomene traten unabhängig der verwendeten Werkzeuggeometrie auf.

Zum anderen konnten während der Erprobung des Demonstratorwerkzeuges Bereiche in der Folie festgestellt werden, welche über die ermittelte Verweilzeit hinaus eingefärbte Streifen enthielten. Diese Streifen zeichneten sich durch eine scharfe farbliche Trennung zu den bereits gespülten Bereichen aus und hatten eine Breite von *1 - 2 mm*. Das örtliche Auftreten war über die verschiedenen Versuche reproduzierbar, wies jedoch um den Umfang keine Regelmäßigkeit auf. Dies lässt den Schluss zu, dass die Entstehung der Streifen zwar auf Stagnationszonen innerhalb des Werkzeuges zurückzuführen ist, diese jedoch kein konzeptionelles Problem darstellen. Sollte die Anordnung der Steggeometrien zu Stagnationszonen führen, müssen die Streifen in ihrer Anordnung und Anzahl mit der Geometrie korrelieren. Vielmehr zeigen die Versuche, dass trotz der vorherigen Testsegmente keine vollständige Vermeidung von Aufbaufehlern, wie Pulveranhaftungen, gewährleistet werden konnte. Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass die verwendete Werkzeuggeometrie keinerlei Nachbehandlung der innenliegenden Kanaloberflächen erhalten hat. Es kann angenommen werden, dass die beobachteten Streifen bei einer nachbehandelten Oberfläche nicht in dieser Form aufgetreten wären. Dieser Punkt, und die daraus

resultierenden Forschungsansätze, wird im Fazit erneut aufgegriffen. Inwiefern hieraus Nachteile auf die mechanische Festigkeit resultieren wird im folgenden Kapitel untersucht.

6.3 Gegenüberstellung der mechanischen Folieneigenschaften

Als finaler Schritt wird nach den Untersuchungen der Werkzeuggeometrie im Verarbeitungsprozess das Augenmerk auf das hergestellte Produkt gelegt. Übliche Verwendungszwecke von Blasfolien liegen im Bereich der Verpackungstechnik, häufig im Lebensmittelbereich, demnach werden entsprechende Anforderungen an die mechanischen Folieneigenschaften gestellt. Diese müssen auch durch die neue Werkzeuggeometrie gewährleistet werden. Aus diesem Grund werden aus den durchgeführten Versuchen Folienproben (kurz: FP) entnommen und hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften untersucht und mit der Referenz verglichen. Nachfolgend werden die Ergebnisse für die Elastizitätsmoduln, die Zugspannung und die Bruchdehnung in Maschinenrichtung (MR) und Umfangsrichtung (UR) präsentiert.

Alle Proben wurden auf einer Universalprüfmaschine der Firma Shimadzu aus der AGS-X-Serie mit pneumatischen Spannzeugen durchgeführt. Die verwendete Kraftmessdose weist im angegebenen Messbereich (*0 - 1000 N)* eine Messgenauigkeit von ± *0,5 %* auf. Alle Proben werden in Anlehnung an DIN EN ISO 527-3 vermessen, die Prüfbedingung waren dabei konstant. Die Ermittlung der Elastizitätsmoduln erfolgte bei einer Messgeschwindigkeit von *5 mm/min* in einem Bereich von *0,05 – 0,25 %* Dehnung. Die Bestimmung der Zugfestigkeit und Bruchdehnung erfolgte bei einer Messgeschwindigkeit von *500 mm/min*. Zur statistischen Absicherung wurde jeder Betriebspunkt mehrfach vermessen. Der Versuchsplan aus Kapitel 6.2 enthielt vergleichbare Betriebspunkte mit unterschiedlicher Versuchshistorie. Somit wurde für das Demonstratorwerkzeug für beide verwendeten Materialien jeweils eine Folienprobe aus drei unterschiedlichen Betriebspunkten entnommen. Für PE-LD sind dies FP1 – FP3, PE-HD ist mit FP4 – FP6 beschrieben. Jeder einzelnen Folienprobe wurden zudem drei Messproben entnommen, sodass die Auswertung mit jeweils neun Proben je Material durchgeführt wurde. Für das Referenzwerkzeug wurde je ein Betriebspunkt dreifach vermessen. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen dabei jeweils den gemittelten Messwert der drei Proben des jeweiligen Betriebspunktes, sowie die Standardabweichung.

In Abbildung 6.4 sind die Ergebnisse der gemessenen E-Moduln in Maschinenrichtung und Umfangsrichtung zusammengefasst. Für alle folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse des Demonstratorwerkzeugs in blau gehalten, wobei vollfarbige Balken die Ergebnisse in Maschinenrichtung beschreiben und schraffierte Balken in Umfangsrichtung. Analog dazu sind die Ergebnisse mit dem Referenzwerkzeug rot dargestellt. Zunächst fällt auf, dass die E-Moduln für alle Betriebspunkte in Maschinenrichtung deutlich geringer ausfallen, als in Umfangsrichtung. Diese Ergebnisse können durch Untersuchungen in der Literatur bestätigt werden [Neu18]. Für die Referenzbetriebspunkte wird in Maschinenrichtung ein E-Modul von *280,82 MPa* (PE-LD), bzw. *1685,08 MPa* (PE-HD) ermittelt, in Umfangsrichtung betragen diese *358,43 MPa* (PE-LD) und *2458,15 MPa* (PE-HD). Anhand der Daten des Demonstratorwerkzeuges wird für die Proben aus PE-LD eine gute Reproduzierbarkeit ersichtlich. Der gemittelte E-Modul aus den drei Folienproben beträgt *293,99 MPa* in Maschinenrichtung und *341,33 MPa* in Umfangsrichtung, was einer prozentualen Abweichung von *4,48 %*, bzw. -5*,01 %* zur Referenz entspricht. Auch die Schwankung innerhalb und zwischen den Folienproben ist als gering zu beschreiben. Etwas deutlichere Schwankungen sind für die Messungen der Folienproben aus PE-HD festzustellen, wobei auch hier die gemittelten E-Moduln in Maschinenrichtung lediglich

-7,25 % von der Referenz abweichen und die Ergebnisse in Umfangsrichtung *-1,85 %*. Grundsätzlich kann aufgrund der statistischen Verteilung keine Aussage getroffen werden, ob eine signifikante Abweichung vorliegt.

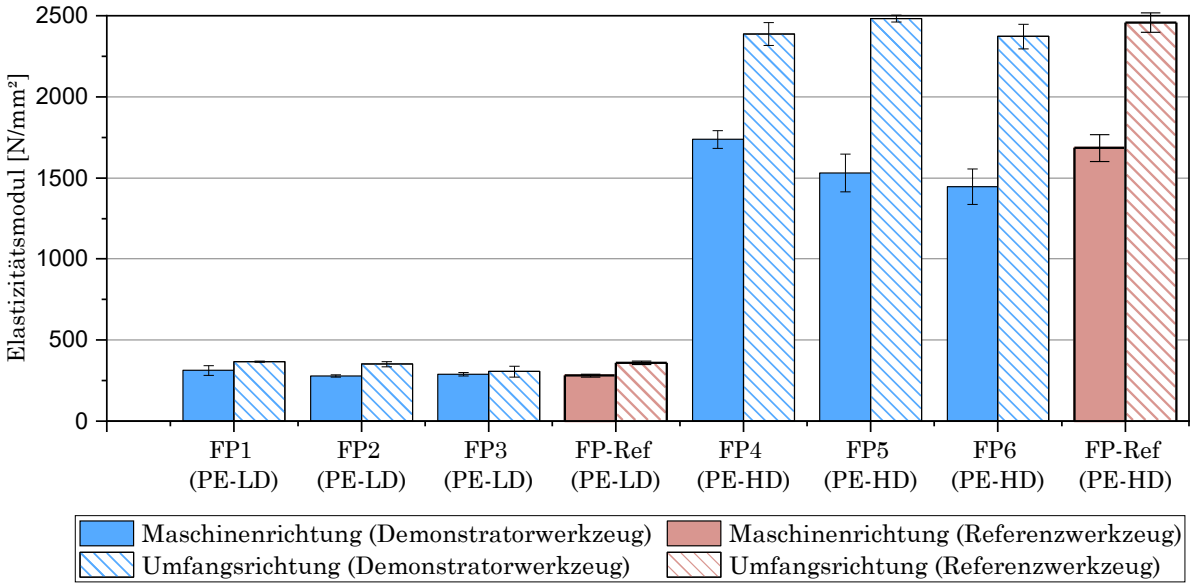


Abbildung 6.4: Vergleich der Elastizitätsmoduln in Maschinen- und Umfangsrichtung für die untersuchten Betriebspunkte

Als potentielle Ursachen für diese Abweichungen sind vielfältige Prozesseinflüsse möglich. Am wahrscheinlichsten sind jedoch Schwankungen im Dickenprofil aufgrund einer fehlenden Dickenprofilregelung, eine unzureichende Zentrierung der Anlagenkomponenten oder inhomogene Abkühlbedingungen zu nennen. Hieraus resultiert eine ungleichmäßige Verstreckung des Folienschlauches. Insgesamt ist der Vergleich des E-Moduls der extrudierten Folien zwischen Referenz- und Demonstratorwerkzeug als sehr gut zu bezeichnen.

Als nächstes wird ein Vergleich der Zugfestigkeit der Folienproben angestrebt. Dieser ist in Abbildung 6.5 zusammengefasst. Auch hier kann für PE-LD eine geringfügig höhere Zugfestigkeit in Umfangsrichtung als in Maschinenrichtung festgestellt werden. Diese beträgt für das Referenzwerkzeug *27,37 MPa* in Maschinenrichtung und *30,95 MPa* in Umfangsrichtung. Die gemittelten Werte der Folienproben des Demonstratorwerkzeuges betragen *25,89 MPa* (MR) und *28,33 MPa* (UR). Bezogen auf die Referenz entspricht dies einer prozentualen Abweichung von *-5,72 %* und *-9,25 %*. Bei den Betriebspunkten mit PE-HD liegt die Zugfestigkeit materialbedingt höher, zudem werden in Maschinenrichtung tendenziell höhere Werte ermittelt. Als mögliche Erklärung für diese abweichende Tendenz ist die Orientierung der Molekülketten in Längs- und Querrichtung denkbar. Das Zusammenspiel aus ABV und den Prozessbedingungen beeinflusst diese maßgeblich und ist bei den verwendeten Materialtypen unterschiedlich ausgeprägt. Zudem ist die Streuung der Messwerte sowohl für das Demonstratorwerkzeug, als auch das Referenzwerkzeug höher. Anhand der Messungen ergibt sich eine Zugfestigkeit von 65,24 MPa (MR) bzw. 38,84 MPa (UR) für das Referenzwerkzeug und *59,93 MPa* (MR) bzw. *42,65 MPa* (UR) für das Demonstratorwerkzeug. Analog zu den Betriebspunkten mit PE-LD zeigt auch PE-HD mit einer prozentualen Abweichung von *-8,87 %* und *8,93 %* eine gute Übereinstimmung der beiden Werkzeuggeometrien.

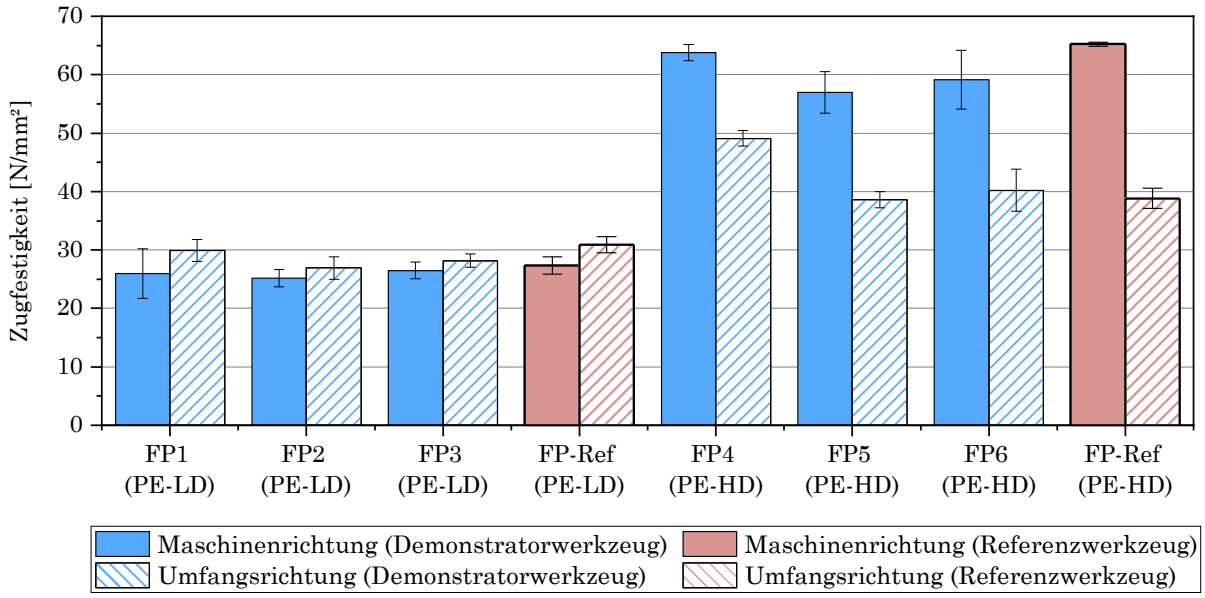


Abbildung 6.5: Vergleich der Zugfestigkeit in Maschinen- und Umfangsrichtung für die untersuchten Betriebspunkte

Abschließend wird in Abbildung 6.6 die Bruchdehnung der Folienproben gegenübergestellt und zeichnet sich durch eine große Streuung der Messwerte aus. Dies wird anhand der dargestellten Standardabweichung innerhalb der Ergebnisse der einzelnen Folienproben erkennbar.

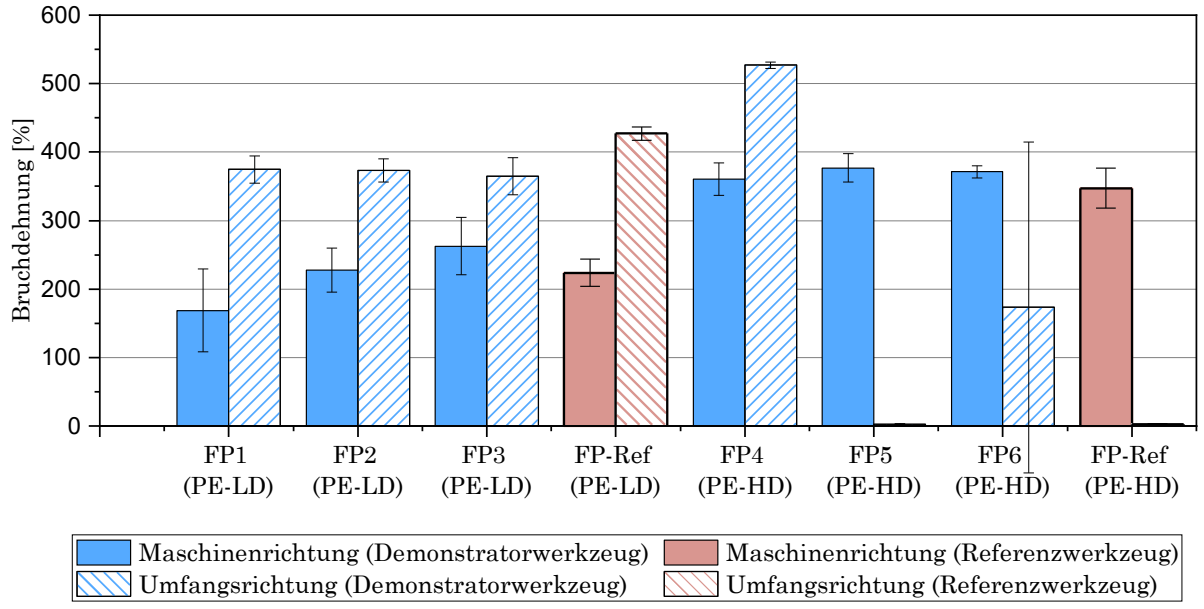


Abbildung 6.6: Vergleich der Bruchdehnung in Maschinen- und Umfangsrichtung für die untersuchten Betriebspunkte

Die Proben des Referenzwerkzeugs weisen für PE-LD in Maschinenrichtung eine Bruchdehnung von *223,75 %* auf, vergleichbar hoch ist dieser Wert für Proben des Demonstratorwerkzeugs mit *219,67 %*. Dies entspricht einer prozentualen Abweichung von *1,86 %*. Mit einer Abweichung von *15,21 %* zur Referenz sind die Messergebnisse in Umfangsrichtung für die Proben des Demonstratorwerkzeugs mit einer gewissen Signifikanz geringer.

Die Bruchdehnung des PE-HD aus den Referenzproben beträgt *347,33 %* in Maschinenrichtung und weicht um *6,01 %* von der gemittelten Bruchdehnung der Proben des Demonstratorwerkzeuges ab.

Einzig die Proben des PE-HD in Umfangsrichtung zeichnen sich durch keine Reproduzierbarkeit aus. Von den neun vermessenen Proben des Demonstratorwerkzeuges aus drei verschiedenen Betriebspunkten sind fünf Proben bei unter *3 %* gerissen. Jedoch weisen auch die drei Proben des Referenzwerkzeuges eine Bruchdehnung von maximal *3,1 %* auf, somit ist kann das Werkzeug als Ursache ausgeschlossen werden. Für vier der neun Proben des Demonstratorwerkzeuges konnten realistische Werte ermittelt werden. Die gemittelte Bruchdehnung dieser Proben beträgt *523,979 %*.

Eine Fehlerdiskussion gestaltet sich an dieser Stelle schwierig, da die Phänomene nicht auf eine Anlagenkonfiguration, Betriebspunkt oder Versuchstag zurückzuführen sind. Auch die Foliendicke der einzelnen Proben liegt in einem tolerierbaren Bereich. Da die einzige Gemeinsamkeit der Proben die Belastungsrichtung in Umfangsrichtung ist, muss eine unzureichende Verkettung der Molekülketten in Umfangrichtung angenommen werden. Aufgrund der Ergebnisse ist die weitere Betrachtung dieser Messergebnisse als nicht zielführend zu erachten, da der Effekt werkzeugübergreifend aufgetreten ist.

Insgesamt sind die Ergebnisse äußerst positiv zu bewerten, da die im Rahmen dieser Arbeite entwickelte Werkzeuggeometrie hinsichtlich der mechanischen Folieneigenschaften keine nennenswerten Abweichungen zum Referenzwerkzeug aufweist und die ermittelten Ergebnisse, abgesehen von der zuvor beschriebenen Problematik, eine durchweg hohe Reproduzierbarkeit aufweisen. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass die Oberflächen der Fließkanäle ohne Nachbehandlung dem additiven Fertigungsprozess entstammen und der Einfluss einer Oberflächenbehandlung auf die durchgeführten Versuche und die damit verknüpften Folieneigenschaften untersucht werden sollte. Hierauf wird im Ausblick eingegangen. Somit bleibt an dieser Stelle festzuhalten, dass das additiv gefertigte Extrusionswerkzeug prozess- und produkttechnisch im Vergleich zu einem herkömmlich gefertigten Wendelverteilerwerkzeug keine festgestellten Defizite aufweist. Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus Kapitel 6.2 konnte außerdem belegt werden, dass die Streifen, welche während der Wechselprozesse beobachtet werden konnten, keinen Einfluss auf die mechanischen Folieneigenschaften haben. Somit handelt es sich hierbei aller Wahrscheinlichkeit nach um Materialanhaftungen aus dem Herstellungsprozess, welche lokal zu Stagnationsbereichen führen. Diese gilt es ebenfalls durch geeignete Nachbehandlungsprozesse zu eliminieren. Als wichtigste Erkenntnis in Bezug auf die Werkzeugauslegung konnte mit den verwendeten Stegstrukturen eine prozessfähige Alternative zu Wendelverteilerwerkzeugen entwickelt werden. Die in Kapitel 4.3.5 ausgewertete Verteilwirkung kann im Rahmen der experimentellen Erprobung ebenfalls als geeignet bewertet werden und das Ziel der Vermeidung durchgängiger radialer Bindenähte zur Gewährleistung der mechanischen Folieneigenschaften zeigt die gewünschten Ergebnisse.

7 Fazit und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte die erfolgreiche Entwicklung und Erprobung eines additiv gefertigten Blasfolienextrusionswerkzeuges umgesetzt werden. Ausgehend von den Untersuchungen einer konventionell gefertigten Werkzeuggeometrie konnten Defizite, welche auf die unmittelbare Werkzeuggestalt bzw. deren Herstellung zurückzuführen sind, identifiziert und quantifiziert werden. Auf dieser Grundlage ist es gelungen, ein Konzept einer Primär- und Sekundärverteilung zu entwickeln, welches durch den Einsatz additiver Fertigungsverfahren die Gestaltung der Strömungskanäle besser an die komplexen strömungsmechanischen Anforderungen von Kunststoffschmelzen anpasst. Abgeleitet von den grundlegenden Anforderungen an Extrusionswerkzeuge und den von te Heesen [Hee15] erarbeiteten Qualitätskriterien konnte eine Gegenüberstellung und Bewertung der betrachteten Konzepte umgesetzt werden. Durch eine experimentelle Erprobung eines additiv gefertigten Demonstratorwerkzeuges wurde die Validierung der numerischen Simulationen ermöglicht und die Produktqualität durch die Bestimmung der mechanischen Folieneigenschaften bewertet.

Ausgehend von einer dem Stand der Technik entsprechenden Werkzeuggeometrie konnten Werkzeugbereiche identifiziert werden, welche in ihrer charakteristischen Ausprägung fertigungsbedingt sind. Eine Auswertung der durchgeführten numerischen Strömungssimulationen diente der Bestätigung dieser Annahmen. Bei der Anwendung der zur Bewertung herangezogenen Qualitätskriterien zeigten sich bei der Betrachtung der minimalen und maximalen Wandschubspannung Defizite in der Stabilität des Ansatzes aufgrund der reinen Extremwertbetrachtung. Während diese bei unmittelbar vergleichbaren und in ihrer Gestaltung identischen Werkzeuglösungen, bspw. der isolierten Bewertung von Wendeldornen, geeignete Ergebnisse produzieren, wurde in der vorliegenden Arbeit die mittlere Wandschubspannung und deren Streuung als geeignetes Mittel identifiziert. Durch Untersuchungen des mittleren Alters konnten Korrelationen zwischen dem Verweilzeitspektrum konventionell gefertigter Wendelverteilerwerkzeuge und wandnahen Strömungen, insbesondere reine Wendelströmungen, aufgezeigt werden. Jedoch konnte zudem festgestellt werden, dass die mittlere Verweilzeit am Werkzeugaustritt nicht ausschließlich auf den strömungsmechanischen Zustand innerhalb der Sekundärverteilung zurückzuführen ist. Stromlinienanalysen gaben Aufschluss über den Einfluss der Primärverteilung, insbesondere der 90°-Umlenkung, auf die inhomogene Massestrom- und Verweilzeitverteilung am Austritt. Die Analyse des Wandabstandes einzelner Stromlinien zeigte zudem auf, dass die fertigungsbedingte Ausführung des Einspeisebereichs diese negativen Phänomene verstärkte. Ferner wurden temperaturabhängige Simulationen durchgeführt, und der von te Heesen festgestellte Temperaturgradient aufgrund der schlechten Wärmeabfuhr innenliegender Stahlteile konnte bestätigt werden. Weiterführende Simulationen mit fließkanalnahen Kühlkanälen zeigten auf, dass bereits geringe Kühlluftströme die Temperaturverteilung signifikant verbessern konnten, nicht zuletzt aufgrund der vorliegenden Massestromanteile. Als Zwischenfazit konnte in Kombination mit den Ergebnissen der wandnahen Strömungen und der mangelhaften radialen Mischwirkung von Wendelverteilerwerkzeugen die Forderung nach der Umsetzung einer solchen formuliert werden.

Die Konzeptentwicklung der Primär- bzw. Sekundärverteilung greift die zuvor festgestellten Defizite vor dem Hintergrund der gestalterischen Freiheitsgrade der additiven Fertigungsverfahren auf. Für die Gestaltung der Primärverteilung konnte auf Basis einer freien Kanalführung ein Auslegungsansatz etabliert werden, welcher durch eine iterative Anpassung der kanaldefinierenden Leitkurve im Raum den Fließkanal ausschließlich

durch geometrische Größen optimiert. Zur Validierung dieser Vorgehensweise wurde ausgehend von einer identischen Initialgeometrie sowohl eine Optimierung auf Basis geometrischer Größen, als auch eine iterative Optimierung mittels numerischer Strömungsberechnungen durchgeführt. Das Ziel beider Optimierungsmethoden lag in der Minimierung der Wandschubspannung bei konstanter Fließkanallänge. Im Vergleich zeigten alle Ergebnisse zufriedenstellende Werte und insbesondere die Massestromverteilung konnte signifikant verbessert werden. Jedoch wurde ein vergleichbares Ergebnis mit dem vorgestellten Ansatz nach 30 Minuten, statt nach 110 Stunden berechnet. Durch die umgesetzte Kanalführung und die Aufteilung der Schmelzeströme vor der Umlenkung konnte eine homogenere mittlere Verweilzeit am Austritt der einzelnen Kanäle erreicht werden. Die Abweichung zwischen dem Kanal der maximalen und dem der minimalen mittleren Verweilzeit konnte von *26 %* auf *4 %* reduziert werden.

Die Forderungen hinsichtlich eines schmaleren Verweilzeitspektrums konnten durch die entwickelte Sekundärverteilung erreicht werden. Insbesondere die Massestromanteile überdurchschnittlich langer Verweilzeit, welche bei Wendelverteilern auf die mangelnde Umlagerung wandnaher Strömungen zurückzuführen sind, konnten vermieden werden. Gleichzeitig gaben Stromlinienanalysen Aufschluss über den Strömungsverlauf, dass zusammengeführte Teilströme keine radial durchgehenden Bindenähte erzeugen. Der eingangs vermutete Effekt der Umlagerung auf die Temperaturverteilung konnte mittels Durchführung temperaturabhängiger Simulationen belegt werden. Ein aufgeprägtes Temperaturprofil der Schmelze am Eintritt der Sekundärverteilung wurde durch die Mischgeometrie zufriedenstellend homogenisiert, sodass eine maximale Temperaturdifferenz von *30 °C* durch die radiale Umlagerung der Schmelzeschichten auf *6 °C* reduziert werden konnte.

Für die experimentelle Erprobung war die Fertigung eines Demonstratorwerkzeuges obligatorisch. Anhand vorheriger Probekörper konnte die Herstellbarkeit der gesamten Werkzeuggeometrie gewährleistet werden. Ferner zeigte die Herstellung, dass die definierten fertigungstechnischen Restriktionen hinsichtlich maximaler lokaler Überhangswinkel bei komplexen Kanalführungen neben den zufriedenstellenden Simulationsergebnissen auch als praxistauglich einzustufen sind. Durch die Ergebnisse des durchgeführten Versuchsplans konnten die vorangegangenen Simulationen durch eine gute Übereinstimmung zu reell bestimmten Messwerten validiert werden. Mittels Farb- und Materialwechselversuchen wurde die Spül- bzw. Verweilzeit auch experimentell untersucht. Auch hier wurde eine gute Übereinstimmung zu den Simulationen erkennbar, sodass die Reduzierung des Verweilzeitspektrums auch experimentell nachgewiesen werden konnte. Schlussendlich konnte die Prozessfähigkeit und die Gewährleistung der Produktqualität durch eine Gegenüberstellung mechanischer Folieneigenschaften nachgewiesen werden. Ermittelte E-Moduln, Zugfestigkeiten und Bruchspannungen belegen bei vergleichbaren Betriebszuständen und Zielprodukten eine sehr gute Übereinstimmung der vermessenen Folienproben.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte aufgrund der Bauteilgröße und Komplexität keines der etablierten Verfahren zur Nachbehandlung der Fließkanaloberflächen angewendet werden. Mechanisch-abrasive Verfahren scheiterten an der Zugänglichkeit innerhalb der Steggeometrien und elektrochemische Verfahren aufgrund einer konstant wandnahen Kathode oder zu hohen benötigten Stromdichten. Folglich weisen die Oberflächen mit Schmelzeinteraktion eine deutlich höhere Oberflächenrauheit und abweichende Oberflächentopologie im Vergleich zu konventionell gefertigten Fließkanälen auf. Zwar wurden seitens des Kooperationspartners die Prozessparameter bestmöglich an die Geometrie und Anforderungen angepasst, jedoch sind die Ergebnisse nicht mit spanend hergestellten Fließkanälen zu vergleichen. Hinzu kommen Schwankungen der Oberflächenqualität aufgrund der Richtungsabhängigkeit des Fertigungsprozesses. Ein deutlicher Indikator für

lokale, fertigungsbedingte Fehlstellen wurde in Form von Streifen im Extrudat während der Wechselversuche festgestellt. Für weiterführende Arbeiten ist daher die Nachbehandlung der Kanaloberflächen anzustreben und den bisherigen Versuchsergebnissen gegenüberzustellen. Neben einer Verbesserung der optischen Folienqualität ist zudem eine weitere Reduzierung der Verweilzeit denkbar, da die Oberflächentopologie ein nachgewiesener Einflussfaktor auf diese darstellt [Gro06, Szö14, Bur19].

Das entwickelte Demonstratorwerkzeug stellt einen ersten Lösungsansatz zur erfolgreichen Integration additiver Fertigungsverfahren in die Werkzeugauslegung dar. Dennoch müssen die Konzepte auf Basis der erarbeiteten Ergebnisse und den Möglichkeiten der Gestaltung weiter ausgebaut werden. Durch die numerische Strömungssimulation konnte die Primärverteilung, trotz ihres positiven Einflusses auf die mittlere Verweilzeit der Teilkanäle, als dominierender Faktor auf das mittlere Alter am Werkzeugaustritt identifiziert werden. Abbildung 7.1 greift diese Ergebnisse erneut in blau dargestellt auf. Der erarbeitete Ansatz der Primärverteilung ist jedoch hinsichtlich der Kanalanzahl skalierbar, sodass lokale Verweilzeitunterschiede durch geringere Massestromanteile am Austritt weniger ins Gewicht fallen. Somit ist eine Erhöhung der Anzahl der Teilkanäle denkbar, wie sie in Abbildung 7.1 ebenfalls konzeptionell für zwölf Teilkanäle dargestellt ist. Unter identischen Randbedingungen wird für die angepasste Primärverteilung ein deutlich homogeneres mittleres Alter am Austritt berechnet.

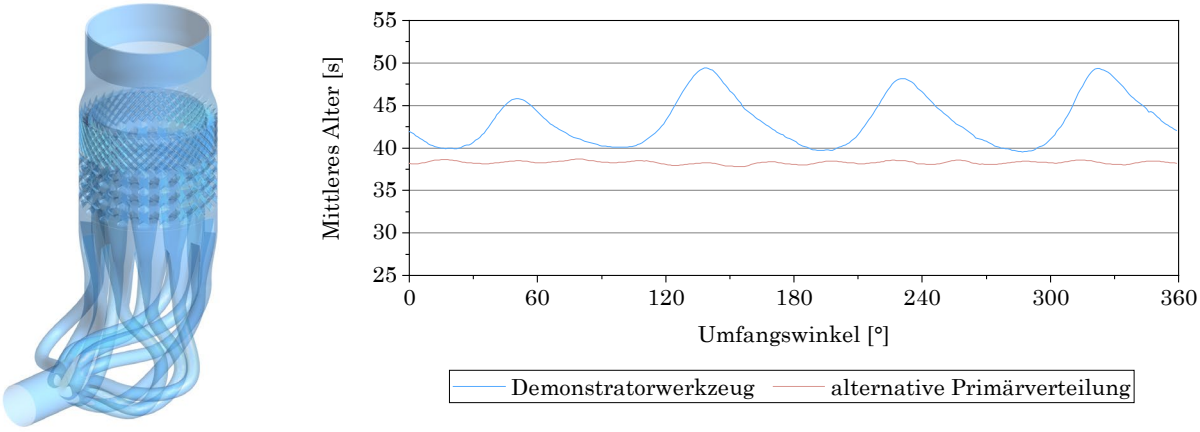


Abbildung 7.1: Einfluss der Kanalanzahl der Primärverteilung auf die mittlere Verweilzeit am Werkzeugaustritt

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde das Hauptaugenmerk auf die fertigungstechnischen Möglichkeiten bei der unmittelbaren Fließkanalgestaltung gelegt. In der Konsequenz kann der nächste Entwicklungsschritt die Anpassung bestehender Gehäusekonstruktionen innehaben. Das experimentell erprobte Werkzeug ist in seiner Dimensionierung zur besseren Integration in die vorhandene Anlagentechnik an das Referenzwerkzeug angelehnt. Speziell bei der Entwicklung der Gehäusekonstruktion konnten jedoch weitere Maßnahmen zur Verbesserung und Funktionsintegration identifiziert werden. Zunächst erscheint es sinnvoll, das bestehende Stahlvolumen weiter zu reduzieren, um eine konturnähere Temperierung zu realisieren und die Prozessführung so positiv zu beeinflussen. Des Weiteren sollten Möglichkeiten zur aktiven Werkzeugtemperierung untersucht werden. Durch die Möglichkeit zur Fertigung geschlossener Kanäle zur Temperierung kann bspw. eine Öltemperierung den Werkzeughaushalt weiter verbessern. Als ein denkbarer Ansatz sind Kühlkanäle in den Steggeometrien zu nennen, welche den scherinduzierten Temperaturanstieg durch die Mischvorgänge kompensieren.

8 Literaturverzeichnis

[Ast76] AST, W.: *Schlauchfolien- und Rohr-Extrusionswerkzeuge mit Wendelverteiler.* In: Kunststoffe, 66, 1976, S. 186–192.

[Ast79] AST, W.: *Extrusion von Schlauchfolien Theoretische und experimentelle Untersuchungen des Abkühlverhaltens.* Dissertation, Universität Stuttgart, 1979.

[BB+11] BREMEN, S.; BUCHBINDER, D.; MEINERS, W.; WISSENBACH, K.: *Mit Selective Laser Melting auf dem Weg zur Serienproduktion?* In: Laser Technik Journal, 8(6), 2011, S. 24–28.

[BeK13] BEYER, C.; KOCHAN, D.: *Innovationspotenzial der Generativen Fertigung.* In: Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich (Hrsg.) Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung, 2013, Springer Vieweg.

[Blö06] BLÖMER, P.: *Untersuchung und Weiterentwicklung von Berechnungsverfahren für Strömungen in Wendelverteilern.* Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, 2006.

[BLR13] BALDINGER, M.; LEUTENECKER, B.; RIPPEL, M.: *Strategische Relevanz generativer Fertigungsverfahren.* In: Industrie Management, 29(2), 2013, S. 11–14.

[Bod95] BODE, W. W. (Hrsg.): *Design considerations for concentric mandrel and stackable coextrusion blown film dies,* 1995.

[Bon16] BONTEN, C.: *Kunststofftechnik.* Einführung und Grundlagen, Hanser, München, 2016, ISBN: 9783446449176.

[Bur19] BURGFELD, Michael: *Einflussfaktoren auf das Randschichtverhalten in der Extrusion.* Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2019.

[BuS10] BURMANN, G.; SAUL, K.: *Werkzeugtechnik in der Extrusion.* Auswahl, Auslegung und Optimierung von Schmelzeverteilersystemen, Fachtagung: 7. Duisburger Extrusionstagung, 2010, Duisburg, Deutschland.

[BuW04] BURMANN, G.; WORTBERG, J.: *Grundlagen und Strategie für die Auslegung von Extrusionswerkzeugen,* Fachtagung: IKV-Seminar Auslegung von Schnecken und Werkzeugen in der Extrusion, 26.-27. April 2004, Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) an der RWTH Aachen, Deutschland.

[Car68] CARREAU, P. J.: *Rheological Equations from Molecular Network Theories.* Dissertation, University of Wisconsin, 1968.

[ChL17] CHUA, C. K.; LEONG, K. F.: *3D Printing and Additive Manufacturing,* WORLD SCIENTIFIC, 2017, ISBN: 978-981-314-675-4.

[ChS71] CHMIEL, H.; SCHÜMER, P.: *Eine neue Methode zur Auswertung von Rohrrheometer-Daten.* In: Chemie Ing. Techn., 43. Jahrgang, Nr. 23, 1971, S. 1257–1259.

[Chu19] CHUNG, C. I.: *Extrusion of polymers.* Theory and practice, Hanser Publishers; Hanser Publications, München.Cincinnati, 2019, ISBN: 978-1-56990-609-5.

[Cre08] CRETU, I. M.: *Analyse, Auslegung und Optimierung von Wendelverteilersystemen.* Dissertation, Universität Stuttgart, 2008.

[CS+04] CARNEIRO, O.; S., Nobrega, J.; M., Pinho, F.; T., Oliveira; P. J.: *Automatic Design of Profile Extrusion Dies: Experimental Assessment,* Fachtagung: The Polymer Processing Society, PPS, 14.-17.09.2004, Athen, Greece.

[Dan53] DANCKWERTS, P. V.: *Continuous flow systems.* In: Chemical Engineering Science, 2(1), 1953, S. 1–13.

[DiM20] DISPAN, J.; MENDLER, L.: *Branchenanalyse kunststoffverarbeitende Industrie 2020. Beschäftigungstrends, Kreislaufwirtschaft, digitale Transformation.* Working Paper Forschungsförderung, No. 186, Hans-Böckler-Stiftung, Düsseldorf, 2020.

[FeP99] FERZIGER, J. H.; PERIC, M.: *Computational Methods for Fluid Dynamics,* Springer, Berlin, 1999, ISBN: 3540653732.

[Fis01] FISCHER, P.: *Werkzeuge für Mehrschichtrohre.* Auslegung von Wendelverteilern. In: Kunststoffe, Nr. 08, 2001, S. 142–145, VM Verlag, Köln.

[Fis06] FISCHER, P.: *Wendel- oder Spiralverteiler.* In: Extrusion, Nr. 04, 2006, S. 43–45, VM Verlag, Köln.

[Fis96] FISCHER, P.: *Extruder- und Werkzeugtechnik.* In: Plastics-Special, Nr. 12, 1996, S. 12 - 14.

[Geb13] GEBHARDT, A.: *Generative Fertigungsverfahren.* Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping ; Tooling ; Produktion, Carl Hanser Verlag, s.l., 2013, ISBN: 978-3446436510.

[GKT16] GEBHARDT, A.; KESSLER, J.; THURN, L.: *3D-Drucken.* Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM), Hanser, München, 2016, ISBN: 9783446448452.

[Gro06] GROß, C.: *Einfluss von Farbpigmentbatchen auf den Produktwechsel bei der Blasfolienextrusion.* Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2006.

[Gro15a] GROß, H.: *Neuartige Mischdüsen verhindern Schmelzeinhomogenitäten.* In: Extrusion, 21(6), 2015, S. 36–37, VM Verlag, Köln.

[Gro15b] GROß, H.: *Selektives Laserschmelzen: Bietet die generative Fertigung einen neuen Weg zum Bau von Extrusionswerkzeugen.* In: Kunststoffe, Nr. 10, 2015, S. 157–160.

[Gro17] GROß, H.: *Überzeugende Ergebnisse mit generativ gefertigten Extrusionswerkzeugen.* In: Blasformen & Extrusionswerkzeuge, Nr. 13, 2017, S. 6–7, Fachverlag Möller, Velbert.

[Gro19] GROß, H.: *3D-gedruckte Minimalisten.* In: Kunststoffe, Nr. 1, 2019, S. 51–55, Carl Hanser Verlag, München.

[GRS10] GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B.: *Additive Manufacturing Technologies,* Springer US, Boston, 2010, ISBN: 978-1-4419-1119-3.

[Hee15] HEESEN, O. t.: *Ganzheitlicher Ansatz zur Dimensionierung und Optimierung von Extrusionswerkzeugen am Beispiel von Wendelverteilern.* Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2015.

[HH+13] HEESEN, O. t.; HUMPA, M.; WORTBERG, J.; KÖHLER, P.: *CFD based design of extrusion dies under manufacturing and process technology aspects,*

Fachtagung: 10th International Conference Advances in Plastics Technology (APT '13), 08.-10. Oktober 2013, Instytut Inżynierii Materiałów Polimerowych i Barwników, Gliwice, Polen.

[HoE12] HOPMANN, C.; EILBRACHT, S.: *Anforderungen, Simulation und automatische Optimierung von Blasköpfen,* Fachtagung: Folienextrusion – Trends bei Rohstoffen, Verarbeitung, Anwendung, 23.-24.10.2012, Aachen, Deutschland.

[HoM17] HOPMANN, C.; MICHAELI, W.: *Einführung in die Kunststoffverarbeitung,* Carl Hanser Verlag, München, 2017, ISBN: 9783446453555.

[HoW13] HOEREN, K. P. J.; WITT, G.: Design-Opportunities and Limitations on Additive Manufacturing Determined by a Suitable Test-Specimen, Bd. 411. In: *Digital Product and Process Development,* S. 138–152.

[HoY16] HOPMANN, Christian; YESILDAG, Nafi: *Numerical investigation of the temperature influence on the melt predistribution in a spiral mandrel die with different polyolefins.* In: Journal of Polymer Engineering, 36(7), 2016, S. 751–760.

[HP+19] HOPMANN, C.; POPRAWE, R.; SCHÖN, M.; SCHMITHÜSEN, T.: *Bessere statische Mischer dank Simulation und additiver Fertigung.* In: Blasformen & Extrusionswerkzeuge, 2019, Nr. 5, S. 5–9.

[Hua98] HUANG, Chung-Ching: *A systematic approach for the design of a spiral mandrel die.* In: Polymer Engineering and Science, 38(4), 1998, S. 573–582.

[HuK14a] HUMPA, M.; KÖHLER, P.: *Design Approach for Spiral Milling Parts Using Knowledge Based Engineering,* Fachtagung: 27th International Conference on CADCAM, Robotics and Factories of the Future, 2014, London, UK.

[HuK14b] HUMPA, M.; KÖHLER, P.: *Effizienzsteigerung des Produktentwicklungsprozesses durch fertigungsgerechte CAD-Methoden.* Methoden in der Produktentwicklung: Kopplung von Strategien und Werkzeugen im Produktentwicklungsprozess, Fachtagung: 12. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, 16.-17. Oktober 2014, Bayreuth, Deutschland.

[HW+13] HOPMANN, C.; WINDECK, C.; KURTH, K.; BEHR, M.; SIEGBERT, R.; ELGETI, S.: *Improving the automated optimization of profile extrusion dies by applying appropriate optimization areas and strategies,* Fachtagung: Proceedings of the Polymer Processing Society 29th Annual Meeting, PPS-29, 15.-19.07.2013, Nürnberg, Deutschland.

[HY+15] HOPMANN, C.; YESILDAG, N.; BREMEN, S.; WISSENBACH, K.; Merkt S.: *Surface quality of profile extrusion dies manufactured by Selective Laser Melting.* In: RTeJournal - Forum für Rapid Technologie, 2015

[Joh04] JOHANNABER, F. (Hrsg.): *Kunststoff-Maschinenführer.* 4. Ausg, München, Hanser, 2004.

[Kai18] KAINTH, S.: *Die Design for Extrusion of Plastic Tubes and Pipes, A Practical Guide,* Hanser Publishers, Cincinnati, Ohio, 2018.

[Kau04] KAUL, S.: *Rechnergestützte Optimierungsstrategien für Profil-Extrusionswerkzeuge.* Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, 2004.

[KB+10] KRUTH, J-P.; BADROSSAMAY, M.; YASA, E.; DECKERS, J.; THIJS, L.; VAN HUMBEECK, J.: *Part and material properties in selective laser melting of metals,*

Fachtagung: Proceedings of the 16th International Symposium on Electromachining, 19. - 23.04.2010, Shanghai, China.

[KCC11] KANAI, T. (Hrsg.); CAMPBELL, G. A. (Hrsg.); CAKMAK, M. (Hrsg.): *Film processing,* München, Carl Hanser Verlag, 2011.

[KDM17] KOOPMANS, R.; DOELDER, J. d.; MOLENAAR, J.: *Polymer melt fracture,* CRC Press, Boca Raton, 2017, ISBN: 1138034053.

[KHE15] KRANZ, J.; HERZOG, D.; EMMELMANN, C.: *Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4.* In: Journal of Laser Applications, 27(1), 2015

[KJ+12] KLESZCZYNSKI, S., et al. (Hrsg.): *Error detection in laser beam melting systems by high resolution imaging,* 2012.

[KKK16] KOHLHUBER, M. (Hrsg.); KAGE, M. (Hrsg.); KARG, M. (Hrsg.): *Additive Fertigung.* 1. Auflage, München.Halle (Saale).Mainz, acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften; Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V. - Nationale Akademie der Wissenschaften; Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften e.V, Dezember 2016 (Stellungnahme)

[Kle18] KLESZCZYNSKI, S.: *Potenziale der bildgestützten Prozessüberwachung zur Steigerung des technologischen Reifegrades von Laser-Strahlschmelzverfahren.* Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2018.

[Kum18] KUMKE, M.: *Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen,* Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2018, ISBN: 978-3-658-22208-6.

[Kum19] KUMMEROW, Jan: *Integration zeitabhängiger Materialmodelle in CFD-Simulationen von Extrusionswerkzeugen.* In: Zeitschrift Kunststofftechnik, 15(4), 2019, S. 288–313, Carl Hanser Verlag, München.

[KuW18] KUMMEROW, J.; WORTBERG, J.: *Local mean age of melt: New approaches for die optimisation,* Fachtagung: Proceedings of the Polymer Processing Society 34th, 21.-25.05.2018, Taipei.

[LaL17] LACHMAYER, R.; LIPPERT, R. B.: *Additive Manufacturing Quantifiziert,* Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 2017, ISBN: 978-3-662-54112-8.

[Lec14] LECHELER, S.: *Numerische Strömungsberechnung.* Schneller Einstieg durch anschauliche Beispiele mit ANSYS 15.0, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014, ISBN: 9783658052003.

[LF+13] LÖBER, L.; FLACHE, C.; PETTERS, R.; KÜHN, U.; ECKERT, J.: *Comparison of different post processing technologies for SLM generated 316l steel parts.* In: Rapid Prototyping Journal, 19(3), 2013, S. 173–179.

[Lim13] LIMPER, A. (Hrsg.): *Verfahrenstechnik der Thermoplastextrusion,* München, Hanser, 2013.

[Lip18] LIPPERT, R. B.: *Restriktionsgerechtes Gestalten gewichtsoptimierter Strukturbauteile für das Selektive Laserstrahlschmelzen.* Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, 2018.

[LL+12] LI, R.; LIU, J.; SHI, Y.; WANG, L.; JIANG, W.: *Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process.* In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 59(9-12), 2012, S. 1025–1035.

[Man09] MANAS-ZLOCZOWER, Ica: *Mixing and compounding of polymers.* Theory and practice, Carl Hanser Verlag, München.Cincinnati, 2009, ISBN: 9783446407732.

[Mei99] MEINERS, W.: *Direktes selektives Laser Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe.* Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, 1999.

[MeL12] METWALLY, H.; LEE, P. C.: *Optimization and Sensitivity Analysis of a Film Die,* Fachtagung: Society of Plastics Engineers (SPE) 70th Annual Technical Conference (ANTEC), 02.-04.04.2012, Orlando, USA.

[MGF08] MALEKZADEH, M.; GOHARPEY, F.; FOUDAZI, R.: *Flow Analysis of Flat Spiral Dies and Comparison with Cylindrical Spiral Mandrel Dies.* In: International Polymer Processing Journal of the Polymer Processing Society, 23(1), 2008, S. 38–46.

[MH+14] MENGES, G.; HABERSTROH, E.; MICHAELI, W.; SCHMACHTENBERG, E.: *Menges Werkstoffkunde Kunststoffe,* Carl Hanser Fachbuchverlag, München, 2014, ISBN: 3446427627.

[Mic09] MICHAELI, W.: *Extrusionswerkzeuge für Kunststoffe und Kautschuk.* Bauarten, Gestaltung und Berechnungsmöglichkeiten, Hanser, München, 2009, ISBN: 3446420266.

[MiH16] MICHAELI, Walter; HOPMANN, Christian: *Extrusion dies for plastics and rubber,* Hanser Publishers, Munich.Cincinnati, 2016, ISBN: 9781569906231.

[MiK04] MICHAELI, W.; KAUL, S.: *Approach of an automatic extrusion die optimization.* In: Journal of Polymer Engineering, 24(1-3), 2004, S. 123–136.

[MiP93] MICHAELI, W.; PÖHLER, F.: *Die Verwendung der Netzwerktheorie bei der Werkzeugauslegung.* In: Plaste und Kautschuk, Jahrg. 40, 1993, Nr. 2, S. 61-65.

[MMD16] MOUKALLED, F.; MANGANI, L.; DARWISH, M.: *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics.* An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab, Springer International Publishing, Cham.s.l., 2016, ISBN: 9783319168739 (Fluid Mechanics and Its Applications 113)

[Mül57] MÜLLER, K.: *Strenge Lösungen der Navier-Stokes-Gleichung für rotationssymmetrische Strömungen,* Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1957, ISBN: 9783663064060 (489)

[Nen06] NENTWIG, J.: *Kunststoff-Folien.* Herstellung, Eigenschaften, Anwendung, Hanser, München, 2006, ISBN: 3-446-40390-6.

[Neu18] NEUBERT, Benedikt P. A.: *Analyse und Optimierung der Folienkühlung in industriell betriebenen Hochleistungsblasfolienextrusionsanlagen mittels integrativer Prozessmodelle.* Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2018.

[Nie06] NIEMEIER, H.: *Analyse und Optimierung wandnaher Schmelzeströmungen in Extrusionswerkzeugen für die Kunststoffverarbeitung.* Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2006.

[OBD09] OERTEL, H.; BÖHLE, M.; DOHRMANN, U.: *Strömungsmechanik.* Grundlagen - Grundgleichungen - Lösungsmethoden - Softwarebeispiele, Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2009, ISBN: 9783834804839.

[OsM12] OSSWALD, T. A.; MENGES, G.: *Materials Science of Polymers for Engineers,* Carl Hanser Fachbuchverlag, München, 2012, ISBN: 1569905142.

[Ost25] OSTWALD, W.: *Über die Geschwindigkeitsfunktion der Viskosität disperser Systeme.* In: Kolloid-Zeitschrift, 36(3), 1925, S. 157–167.

[Pas05] PASCHEDAG, A.: *CFD in der Verfahrenstechnik.* Allgemeine Grundlagen und mehrphasige Anwendungen, Wiley-VCH, Weinheim, 2005, ISBN: 9783527309948.

[PeP91] PERDIKOULIAS, J. (Hrsg.); PETRIC, J. (Hrsg.): *Developments in annular coextrusion die design,* 1991.

[Pro72] PROCTER, B.: *FLOW ANALYSIS IN EXTRUSION DIES.* A power law fluid's axial flow in spiral mandrel dies is critically dependent on channel design and on the fluid's flow index. In: SPE JOURNAL, 28(2), 1972, S. 34–41.

[Rau14] RAUWENDAAL, C.: *Polymer extrusion,* Hanser Publications; Hanser Publication, Munich.Cincinnati, 2014, ISBN: 9781569905166.

[Rau87] RAUWENDAAL, C.: *Flow distribution in spiral mandrel dies.* In: Polymer Engineering and Science, 27(3), 1987, S. 186–191.

[Rot01] ROTTER, B. A.: *Rheologische und mechanische Auslegung von Radialwendelverteilerwerkzeugen.* Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, 2001.

[RSZ17] RICHARD, H. A.; SCHRAMM, B.; ZIPSNER, T.: *Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen,* Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017, ISBN: 978-3-658-17779-9.

[Sau11] SAUL, K.: *Automatisierte Auslegung von Extrusionswerkzeugen.* Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2011.

[Sch13] SCHWARZE, R.: *CFD-Modellierung.* Grundlagen und Anwendungen bei Strömungsprozessen, Springer, Berlin.Heidelberg, 2013, ISBN: 9783642243776.

[Sch17] SCHÖN, M.: *Schnelle Produktwechsel in der Extrusion,* 2017 , Überprüfungsdatum: 21.02.2020.

[Sch18a] SCHÖN, M.: *Thermische Homogenisierung von Schmelze durch simulativ optimierte statische Mischer.* In: Extrusion, 2018, 24(5), S. 36–38.

[Sch18b] SCHRÖDER, T.: *Rheologie der Kunststoffe.* Theorie und Praxis, Carl Hanser Verlag, München, 2018, ISBN: 9783446454057.

[Seh10] SEHRT, J. T.: *Möglichkeiten und Grenzen bei der generativen Herstellung metallischer Bauteile durch das Strahlschmelzverfahren.* Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2010.

[Sei06] SEIBEL, S.: *Konzeptionelle Aspekte bei der Gestaltung und Auslegung von Extrusionswerkzeugen.* Dissertation, Universität Paderborn, 2006.

[Soh01] SOHR, H.: *The Navier-Stokes Equations.* An Elementary Functional Analytic Approach, Springer, Basel, 2001, ISBN: 9783034805506.

[SpA10] SPURK, J. H.; AKSEL, N.: *Strömungslehre.* Einführung in die Theorie der Strömungen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010, ISBN: 3642131425 (Springer-Lehrbuch)

[Spa58] SPALDING, D. B.: *A note on mean residence-times in steady flows of arbitrary complexity.* In: Chemical Engineering Science, 9(1), 1958, S. 74–77.

[Sti01] STIEGLITZ, H.: *Ganzheitliche Betrachtung der Fließvorgänge in Breitschlitz- und Wendelverteilerwerkzeugen.* Dissertation, Universität Paderborn, 2001.

[Szö14] SZÖKE, L.: *Modellbildung von Produktwechselprozessen in Extrusionswerkzeugen.* Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2014.

[TaG06] TADMOR, Z.; GOGOS, C. G.: *Principles of polymer processing,* Wiley, Hoboken, 2006, ISBN: 0-471-38770-3.

[Thi14] THIJS, L.: *Microstructure and Texture of Metal Parts Produced by Selective Laser Melting.* Dissertation, KU Leuven, 2014.

[Uhl79] UHLAND, E.: *Das anomale Fließverhalten von Polyethylen hoher Dichte.* In: Rheologica acta, 18(4), 1979, S. 1-24, Dr. Dietrich Steinkopff Verlag, Darmstadt.

[VeM07] VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W.: *An introduction to computational fluid dynamics.* The finite volume method, Pearson/Prentice Hall, Harlow, 2007, ISBN: 9780131274983.

[Vla01] VLACHOPOULOS, J.: *The SPE guide on extrusion technology and troubleshooting,* Society of Plastics Engineers, Brookfield, Conn, 2001, ISBN: 9780972215923 (SPE Division series)

[VlA72] VLACHOPOULOS, J.; ALAM, M.: *Critcal stress and recoverable shear for polymer melt fracture.* In: Polymer Engineering and Science, 12(3), 1972, S. 184–192.

[Wae23] WAELE, A. d.: *Viscometry and plastometry.* In: Journal of the Oil and Color Chemists Association, 38(6), 1923

[Wae26] WAELE, A. d.: *Bemerkungen über Plastizität.* In: Kolloid-Zeitschrift, 38(1), 1926, S. 27–32.

[Wag02] WAGNER, C.: *Untersuchungen zum selektiven Lasersintern von Metallen.* Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, 2002.

[Wag79] WAGNER, M. H.: *Ein rheologisch-thermodynamisches Prozeßmodell des Folienblasverfahrens.* Dissertation, Universität Stuttgart, 1979.

[WeW12] WEGNER, A.; WITT, G.: *Konstruktionsregeln für das Laser-Sintern.* In: Zeitschrift Kunststofftechnik, 03, 2012

[Wie04] WIEDMANN, W.: Mischer, Kneter, Granuliervorrichtungen. In: JOHANNABER, F. (Hrsg.): *Kunststoff-Maschinenführer.* 4. Ausg. München : Hanser, 2004.

[WiL03] WIECZOREK, A.; LANGECKER, G. R.: *Gleichmäßiger Massestrom aus dem Wendelverteiler.* In: Kunststoffe, Nr. 7, 2003, S. 76-78, Carl Hanser Verlag, München.

[WLF55] WILLIAMS, M. L.; LANDEL, R. F.; FERRY, J. D.: *The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids.* In: Journal of the American Chemical Society, 77(14), 1955, S. 3701–3707.

[WoF96] WORTBERG, J. (Hrsg.); FISCHER, P. (Hrsg.): *Neue Wendelverteilerwerkzeuge,* 13. - 14.05.1996.

[Wor78] WORTBERG, J.: *Werkzeugauslegung für Ein- und Mehrschichtextrusion.* Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, 1978.

[YaK11] YASA, E.; KRUTH, J-P.: *Microstructural investigation of Selective Laser Melting 316L stainless steel parts exposed to laser re-melting.* In: Procedia Engineering, Nr. 19, 2011, S. 389–395.

[Yes17] YESILDAG, N.: *Simulative Auslegung von thermisch-rheologisch homogenen Vorverteilern in Wendelverteilerwerkzeugen.* Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, 2017.

[Zäh13] ZÄH, M. F. (Hrsg.): *Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien.* Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren. unveränderter Nachdruck der 1. Aufl. 2006, München, Hanser, 2013.

[ZiA12] ZIMMER, D.; ADAM, G.: Direct Manufacturing Design Rules. In: *Innovative developments in virtual and Physical prototyping,* S. 545–551.

[ZT+01] ZATLOUKAL, M.; TZOGANAKIS, C.; PERDIKOULIAS, J.; SAHA, P.: *Numerical simulations of polymer flow in flat spiral dies.* In: Polymer Engineering and Science, 41(10), 2001, S. 1683–1694.

8.1 Normen, Richtlinien und Patente

[Alb66] ALBERT, R. J.: *Extruding Apparatus*[E.I. du Pont de Nemours and Company]. Anmeldenr. 589,008, United States. 31.12.1968. Veröffentlichungsnr. 3,418,687

[DINb] *DIN EN ISO/ASTM 52900:2018-06, Additive Fertigung - Grundlagen - Terminologie (ISO/ASTM DIS_52900:2018)*

[DINa] *DIN 8580:2003-09, Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*

[Upm69] UPMEIER, H.: *Folienblaskopf zur Herstellung von Kunststoff-Schläuchen*[Windmöller & Hölscher]. Anmeldenr. P 19 64 675.4, Deutschland. 10.07.1971. Veröffentlichungsnr. 1964675

[VDIa] *VDI 3405 Additive Fertigungsverfahren.* Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen, 2014.

[VDIb] *VDI 3405 Additive Fertigungsverfahren.* Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen, 2015.

8.2 Datenblätter

[EOS20] *Materialdatenblatt EOS StainlessSteel GP1.* https://www.eos.info/werkstoffe-m, zuletzt geprüft am: 18.02.2020.

8.3 Eigene Publikationen des Autors

[a01] KARRENBERG, G.; NEUBRECH, B.; WORTBERG, J.: *CFD-Simulation der Kunststoffplastifizierung in einem Extruder mit durchgehend genutetem Zylinder und Barriereschnecke.* In: Zeitschrift Kunststofftechnik, 12(3), 2016, S. 205-238, Carl Hanser Verlag, München.

[a02] KARRENBERG, G.; NEUBRECH, B.; WORTBERG, J.: *Neuentwicklungen in der Extrudertechnologie.* Fachtagung: VDI Wissensforum - Einschneckenextruder, 08-09. März 2016, Ratingen.

[a03] NEUBRECH, B.; WORTBERG, J.: *Virtual and experimental comparison of different dynamic mixing devices for single screw extrusion.* Society of Plastics Engineering Annual Technical Conference (SPE Antec), Anaheim, California (USA), 08-10. Mai, (2017).

[a04] NEUBRECH, B.; SCHIFFERS, R.: *Extrusionswerkzeuge und neuartige (additive) Fertigungsmöglichkeiten.* Fachtagung: VDI Wissensforum - Einschneckenextruder, 07-08. März 2018, Köln.

[a05] JANßEN, M.; NEUBRECH, B.; STRATMANN, B.; WORTBERG, J.; SCHIFFERS, R.: *Two concepts for extending the 3D-simulation technique of melting processes in high-speed-extrusion based on a custom material model.* Society of Plastics Engineers Annual Technical Conference (SPE Antec), Detroit, Michigan (USA), März 18-21, (2019)

[a06] NEUBRECH, B.; WORTBERG, J.; WITT, G.; KLESZCZYNSKI, S.: *New Potentials for the Design of Extrusion Dies by Using Additive Manufacturing: Thermo Rheological Optimization of a Blown Film Extrusion Die.* Polymer Processing Society Conference 2017, Cancún.

[a07] NEUBRECH, B.: *Materialhandling präzise und effizient - Steuerungen rücken Automatisierung durch umfassende Konnektivität in den Fokus.* In: Kunststoffe, 09/2019, S. 65-71, Carl Hanser Verlag, München.

[a08] NEUBRECH, B.; WORTBERG, J.; SCHIFFERS, R.; WITT, G.; KLESZCZYNSKI, S.: *Neuartige Werkzeuggeometrien für die Blasfolienextrusion unter Verwendung additiver Fertigungstechnik.* In: Zeitschrift Kunststofftechnik, 16(3), 2019, S. 81-107, Carl Hanser Verlag, München.

8.4 Vom Autor betreute, unveröffentlichte studentische Abschlussarbeiten

[b01] WEDDERWILLE, L.: *Konzeptionierung und Auslegung eines Wärmetauschers für Polymerschmelzen mittels numerischer Strömungssimulation.* Masterarbeit, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, (2015)

[b02] SCHILLER, D.: *CFD - unterstütze Optimierung eines Breitschlitzwerkzeuges zur Minimierung von Randverdickung unter Verwendung von SolidWorks Flow Simulation.* Masterarbeit, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, (2016)

[b03] PARTING, P.: *Inbetriebnahme, Validierung und Optimierung eines neuen Online-Fehlerdetektionssystems bei der Floatglasproduktion.* Masterarbeit, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, (2016)

[b04] SCHÜTTE, M.: *Design-Studie zu Gestaltungsmöglichkeiten einer primären Schmelzeverteilung durch die Anwendung additiver Fertigungsverfahren.* Bachelorarbeit, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, (2017)

[b05] STRATMANN, B.: *Erweiterung der Simulationstechniken zur CFD-gestützten Extruderauslegung mittels eines Ansatzes unter Verwendung poröser Medien.* Bachelorarbeit, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, (2017)

[b06] NENTWIG, F.: *Konzeption von strömungsoptimierten Steggeometrien in neuartigen Blasfolienextrusionswerkzeugen unter Berücksichtigung der additiven Fertigungstechnik sowie deren Bewertung mittels CFD-Simulationen.* Bachelorarbeit, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, (2017)

[b07] LUGINGER, K.: *Machbarkeitsstudie zur Entwicklung eines neuartigen Auslegungsansatzes von Extrusionswerkzeugen mittels numerischer Strömungssimulation.* Bachelorarbeit, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, (2017)

[b08] EBER, C.: *Entwicklung einer Primärverteilung in Blasfolienextrusionswerkzeugen durch Ausnutzung konstruktiver Freiheitsgrade der additiven Fertigung.* Bachelorarbeit, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, (2018)

[b09] SCHULZ, L.: *Entwicklung von statischen Mischergeometrien zur Quermischung von Kunststoffschmelzen in einer Ringspaltströmung unter Berücksichtigung konstruktiver Freiheitsgrade der additiven Fertigungstechnik.* Bachelorarbeit, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, (2018)

[b10] ZSCHÄBITZ, J.: *Optimierung einer Primärverteilung mit integrierter 90°-Umlenkung unter Berücksichtigung der Fertigungsrestriktionen der additiven Fertigung.* Bachelorarbeit, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, (2018)

[b11] WIECHMAN, T.: *Konstruktion einer neuartigen Werkzeugbaugruppe zur Blasfolienextrusion basierend auf additiven Fertigungsverfahren.* Bachelorarbeit, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, (2019)

[b12] EBER, C.: *Automatisierte Optimierung von Fließkanalgeometrien mittels numerischer Strömungssimulation.* Masterarbeit, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, (2020)

9 Anhang

9.1 Simulationsrelevante Materialdaten

Nachfolgend sind die Materialdaten der teilkristallinen Thermoplasten vom Typ PE-LD und PE-HD, welche zur Bearbeitung der vorliegenden Arbeit genutzt wurden, zusammengefasst. Diese spiegeln zwei übliche Materialien zur Verwendung bei der Blasfolienextrusion wieder. Vergleichbare Typen fanden bereits in vorangegangenen Arbeiten von Szöke [Szö14] Verwendung.

In Tabelle 9.1 sind die Materialdaten aufgeführt, welcher bei den durchgeführten Strömungssimulationen verwendet wurden. Die Carreau-Parameter *A*, *B* und *C* wurden mittels einer benutzerdefinierten Funktion in das Simulationsprogramm eingebunden.

Tabelle 9.1: Parameter zur geometrischen Beschreibung der Primärverteilung

Parameter	PE-LD	PE-HD
A [Pa s]	*90.100*	*122.000*
B [s]	*31,5*	*17*
C [-]	*0,559*	*0,5*
ρ [g/cm³]	*770*	*850*
c_p [J/kgK]	*2900*	*2360*
λ [W/mK]	*0,26*	*0,26*
$T_{Verarbeitung\ [°C]}$	*190*	*210*

Das verwendete Masterbatch im Rahmen der experimentellen Erprobung entspricht dem organischen Farbbatch *Polybatch Blue 4020* der Firma A. Schulman

9.2 Verwendete Soft- und Hardware

Hardware Workstation

- Prozessor: 2x Intel Xenon CPU 2640 v4 @ 2,4 GHz
- Arbeitsspeicher: 64 GB RAM
- Festplatte: 256 GB SSD / 1,5 TB HDD
- Grafikkarte: NVIDIA Quadro P600
- Betriebssystem: Windows 10 x64

Software

PTC Creo Parametric 5.0

- Konzeptentwicklung der additiv gefertigten Primärverteilung (Kapitel 4.1)
- Konzeptentwicklung der additiv gefertigten Sekundärverteilung (Kapitel 4.2)
- Gestaltung der Gehäusekonstruktion (Kapitel 5.2 und 5.3)

ANSYS Workbench R19.0 mit den Modulen DesignModeler, Meshing, fluent, CFD-Post

- Modellbildung des Referenzwerkzeuges (Kapitel 3.1.2)
- Untersuchung des Referenzwerkzeuges hinsichtlich der Strömungssituation, der Verweilzeit und der Verteilwirkung, sowie Auswertung der Qualitätskriterien (Kapitel 3.2.2, 3.2.3 und 3.2.4)
- Untersuchung des Demonstratorwerkzeuges hinsichtlich der Strömungssituation, Verweilzeit, Verteilwirkung und thermischen Homogenität (Kapitel 4.3.1, 4.3.2, 4.3.4 und 4.3.5)
- Validierung des Optimierungsmethode zur freien Kanalführung (Kapitel 4.3.3)

Dassault Systèmes SolidWorks 2017 mit dem Modul Flow Simulation

- Bewertung des Einflusses temperaturabhängiger Effekte (Kapitel 3.3)

iba-AG ibaPDA und ibaAnalyzer

- Messdatenerfassung der experimentellen Erprobung sowie Auswertung (Kapitel 6.1 und 6.2)

9.3 Einstellungen der numerischen Strömungssimulationen

Netzeinstellungen

Tabelle 9.2: Netzeinstellungen für die verwendeten Simulationsmodelle

Parameter	Referenz-werkzeug	Demonstrator-werkzeug	Primär-verteilung (AM)	Sekundär-verteilung (AM)
Größenfunktion	*Krümmung*	*Wandabstand und Krümmung*	*Wandabstand und Krümmung*	*Wandabstand und Krümmung*
Max. Flächengröße	*2 mm*	*8 mm*	*8 mm*	*1 mm*
Min. Größe	*0,1 mm*	*0,3 mm*	*0,3 mm*	*0,3 mm*
Max. Tetraedergröße	*2 mm*	*2 mm*	*2 mm*	*2 mm*
Wandabstand-Minimalgröße	-	*0,1 mm*	*0,1 mm*	*0,1 mm*
Prismenschichten	*Programmgesteuert*			
Optionen zur Erzeugung	*Weicher Übergang*			
Max. Anzahl der Schichten	*5*			
Wachstumsrate	*1,2*			
Kollisionsvermeidung	*Schichtkomprimierung*			
Elementanzahl	*3 524 706*	*18 040 749*	*679 326*	*1 770 256*
Knoten	*1 709 537*	*5 920 798*	*218 976*	*577 216*
mittlere Schiefe	*0,19*	*0,27*	*0,20*	*0,27*
Min. / Max. Schiefe	*3,08e-5 / 0,95*	*1,32e-5 / 0,94*	*1,19e-4 / 0,94*	*4,58e-5 / 0,96*
Standardabweichung	*0,15*	*0,14*	*0,12*	*0,14*

Solvereinstellungen

Tabelle 9.3: Randbedingungen und Solvereinstellungen der verwendeten Simulationsmodelle

Parameter	
Solver Type	Pressure-Based
Time	Steady
Models	
Models	Viscous (Laminar)
Materials	
Density	770 / 850 kg/m³
Viscosity	User-defined
UDS diffusivity	Defined-per-uds
Cell zone conditions	

Source terms	Mean age
Boundary conditions	
Inlet	Mass-Flow inlet
	Reference Frame: Absolute
	Mass Flow Specification Method: Mass Flow Rate
	Direction Specification Method: Normal to Boundary
	UDS Boundary Condition: Specific value
Outlet	Backflow Reference Frame: Absolute
	Backflow Direction Specification Method: Normal to Boundary
	Backflow Pressure Specification: Total Pressure
Solution Methods	
Pressure-Velocity Coupling	Scheme: SIMPLE
Spatial Discretization	Gradient: Least Square Cell Based
	Pressure: Second Order
	Momentum: Second Order Upwind
	Mean Age: First Order Upwind
Under-Relaxation Factors	
Pressure	0,3
Density	1
Body Forces	1
Momentum	0,7
Mean Age	1

Residual	
Continuity	Convergence: Absolut criteria 1e-5
x-velocity	Convergence: Absolut criteria 1e-5
y-velocity	Convergence: Absolut criteria 1e-5
z-velocity	Convergence: Absolut criteria 1e-5
UDS	Convergence: Absolut criteria 1e-5

Einstellungen der CFD-basierten Geometrieoptimierung

Tabelle 9.4: Einstellungen der Direkten Optimierung

Parameter	Wert
Methode	MOGA
Anfängliche Stichprobe	100
Samples pro Iteration	50
Pareto-Prozentsatz	95
Konvergenz-Stabilitätsanteil	2
Maximale Iterationen	20

9.4 Verwendete Anlagentechnik

3-Schicht-Coextrusionsanlage:

- Extruder A: Fa. Bekum
  Plastifizierschnecke: Ø25, 25D (nicht verwendet, 1-schichtige Folie)
- Extruder B: Fa. Bekum
  Plastifizierschnecke: Ø38, 25D (nicht verwendet, 1-schichtige Folie)
- Extruder C: Fa. Kuhne
  Plastifizierschnecke: Ø48, 24D Barriereschnecke mit Wendelscher-Mischelement,
- Maximaler (betriebener) Massedurchsatz: *100 kg/h (30 kg/h)*
- Maximale (betriebene) Schlauchbreite: *500 mm (340 mm)*
- Durchsatzregelung: Fa. Inoex
- Breitenregelung: Fa. Kündig, Tube-Air

Sensorik:

- Massedruckaufnehmer: Fa. Gneuss
  Typ DA, Messbereich bis 600bar, Genauigkeit vom Endwert: 0,50 %
- Schmelzetemperaturfühler: Fa. Gneuss
  Typ TF-CX, Messbereich bis 350 °C, Messelement: PT100 Widerstandsthermometer
- Farbmessgerät: Fa. Micro-Epsilon
  Messkopf: ACS3 Transmissionssensorkopf, Messprinzip: Transmissionsprinzip, Farbraumauswahl: CIE-L*a*b

Lebenslauf

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

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

Offen im Denken

ub | universitäts bibliothek

Diese Dissertation wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt und liegt auch als Print-Version vor.

DOI: 10.17185/duepublico/74600
URN: urn:nbn:de:hbz:464-20210809-151915-7

Alle Rechte vorbehalten.