

Bachelorarbeit

Ezgi İşlemeciöglü

**Untersuchung von Energieströmen einer
Kolbenplastifiziereinheit in der Spritzgießproduktion mit Hilfe
einer Simulationssoftware**

Ezgi İşlemeciöglu

**Untersuchung von Energieströmen einer
Kolbenplastifiziereinheit in der Spritzgießproduktion
mit Hilfe einer Simulationssoftware**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau mit der Vertiefung Energie- und Anlagensysteme
am Department Maschinenbau und Produktion
an der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit dem Institut für erneuerbare Energien und energieeffiziente Anlagen.

Erstprüferin: Prof. Dr.-Ing. Heike Frischgesell

Zweitprüfer: M.Sc. Nestorius Wiegandt

Abgabedatum: 25.04.2017

Kurzzusammenfassung

Authorin: Ezgi İşlemecioglu

Thema der Bachelorarbeit:

Untersuchung von Energieströmen einer Kolbenplastifiziereinheit in der Spritzgießproduktion mit Hilfe einer Simulationssoftware

Stichworte:

Spritzgießmaschine, Spritzgießprozess, Spritzgießen, Kolbenplastifizierung, Plastifizieren, Energieströme, Energieverluste, Energiebedarf, Scherung, Reibungsenergie, Dissipation, Simulation, Simulationssoftware, ANSYS Fluent, CATIA V5, Kunststoff, Thermoplaste

Kurzzusammenfassung:

Die Bachelorarbeit entstand im Rahmen eines Forschungsprojektes. Das Projekt befasst sich mit der Kunststoffverarbeitung im Spritzgießprozess. Diese Arbeit thematisiert die Kolbenplastifizierung. Für den Einstieg in die Thematik werden die Grundlagen des Werkstoffes und des Spritzgießprozesses erläutert. Neben der Herleitung der Energieströme bezüglich des Kolbenspritzgießens an der Spritzgießmaschine von *Babyplast* ist der Schwerpunkt dieser Arbeit die analytische Herleitung der Energieströme, insbesondere die der Reibungswärme. Mit Hilfe der Herleitung werden die Energieströme der Plastifizier- und Spritzeinheit dargestellt. Anhand der Messdaten der Firma *Innovative-Erodier-Systeme GmbH (IES GmbH)* erfolgt eine Validierung. Abschließend werden die Ergebnisse mit der einer Schneckenplastifizierung gegenübergestellt. Es stellt sich heraus, dass der Wärmebeitrag der Reibung minimal ist.

Abstract

Author: Ezgi İşlemecioglu

Topic of the Bachelor Thesis:

The analysis of energy flows in a piston plasticizing unit in the injection molding production through the application of a simulation software

Keywords:

Injection molding machine, injection molding process, injection molding, piston plasticizing, plasticizing, energy flows, shear, energy dissipation, energy requirements, simulation, simulation software, ANSYS Fluent, CATIA V5, plastics, thermoplastic

Abstract:

The Bachelor thesis was developed as part of a research project. The assignment deals with the plastic processing in the injection molding process. This work addresses the subject of the piston plasticization. An introduction to the topic is given by the explanation of basics of the material and injection molding. In addition to the derivation of the energy flows with respect to the injection molding of the *Babyplast* injection molding machine, the main focus of this work is the mathematical description of the energy flows, espacially of the dissipation. By using this description these flows are displayed in the plasticizing and syringe unit. The data from the company *Innovative-Erodier-Systeme GmbH (IES GmbH)* is validated. Finally, the results are compared with a screw plasticization unit. It turns out that the energy dissipation effects a minimum global heating.

Aufgabenstellung für die Bachelorthesis

von Frau:

Ezgi İşlemecioglu

Matrikelnummer:

2047506

Thema:

Untersuchung von Energieströmen einer Kolbenplastifiziereinheit in der Spritzgießproduktion mit Hilfe einer Simulationssoftware

Schwerpunkte:

Im Rahmen eines Forschungsprojektes soll der Energieverbrauch bei der Kunststoffverarbeitung im Spritzgießverfahren untersucht werden. Zur Validierung von Simulationsergebnissen sollen Daten eines Kooperationsunternehmens aus dieser Branche verwendet werden. Speziell soll das Prinzip der Kolbenplastifizierung einer Mikrospritzgießmaschine des Herstellers Babyplast untersucht und diese unter Berücksichtigung verschiedener Anforderungen bewertet werden. Im Besonderen sind folgende Fragestellungen zu klären:

- Mathematische Abbildung der Massen- und Energieströme der Plastifiziereinheit in verschiedenen Betriebszuständen, insbesondere die Reibungswärme bei der Kolbenplastifizierung
- Erweiterung des bestehenden Simulationsmodells in Dymola

Am Ende sind die Ergebnisse kritisch zu bewerten. Die Ergebnisse der Arbeit sind in entsprechender Schriftform darzustellen und zu dokumentieren. Der Fortgang der Arbeit ist in regelmäßigen Abständen mit den Betreuern der Arbeit zu diskutieren.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	i
Tabellenverzeichnis	iii
Nomenklatur	iv
Vorwort	vii
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Vorgehensweise	1
1.2 Ziel und Grenzen der Arbeit	2
2 Einführung in die Grundlagen	3
2.1 Werkstoff	3
2.1.1 Eigenschaften der Thermoplaste	4
2.1.2 Rheologisches Verhalten im Spritzgießprozess	6
2.2 Aufbau der Spritzgießmaschine	9
2.2.1 Plastifizier- und Spritzeinheit	9
2.2.2 Schließenheit	12
2.3 Ablauf des Spritzgießprozesses	13
2.3.1 Plastifizieren und Dosieren	13
2.3.2 Einspritzen, Umschalten, Nachdrücken und Abkühlen	14
2.3.3 Entformen und Werkzeug schließen	14
3 Mathematische Abbildung der Energieströme	15
3.1 Ermittlung der Energieströme	15
3.1.1 Wärmeverluststrom	16
3.1.2 Heizwärmestrom	19
3.1.3 Reibungswärmestrom	21
3.1.4 Technische Leistungen	26
3.1.5 Energieströme des Kunststoffes	27
3.1.6 Zusammenfassung der Annahmen und Vereinfachungen	28
3.2 Ansätze der Reibungswärme	29
4 Modellierung & Simulation	32
4.1 Modellierung in CATIA V5	32
4.2 CFD-Simulation in ANSYS Fluent	32
4.2.1 Vernetzung des Modells	33
4.2.2 Vorgaben von Randbedingungen	33

4.2.3	Wahl des Lösungsmodells	35
4.2.4	Darstellung der Ergebnisse	35
5	Validierung & Auswertung der Reibungswärme	36
5.1	Plastifizierzylinder (Schüttung)	36
5.2	Einspritzzylinder / -düse	37
5.3	Plastifizierzylinder (Ersatzsystem)	39
6	Fazit und Ausblick	41
	Literaturverzeichnis	43
	Anhang	45
A	Werkstoff POLYFORT FPP 20 T	45
A.1	Diagramme	45
A.2	Wertetabelle	47
A.3	Werkstoffdatenblatt	48
B	Ansys Fluent	50
C	Hydraulikpumpe	56
	Eidesstattliche Erklärung	57

Abbildungsverzeichnis

1.1	Gesamtzeichnung der Mikrospritzgießmaschine, Modell: Babyblast 6/10P [5, S.103]	2
2.1	Übermolekulare Struktur von Thermoplasten	5
2.2	Formänderungsverhalten von amorphen Thermoplasten [13, S. 50]	6
2.3	Formänderungsverhalten von teilkristallinen Thermoplasten [13, S. 51]	7
2.4	Nichtlineares Verhalten nicht newtonscher Fluide in Abhängigkeit der Schergeschwindigkeit [15]	8
2.5	Einflüsse auf das Fließverhalten von Polymerschmelzen [13, S. 181]	8
2.6	Zeichnung der Spritzeinheit, Modell: Babyblast 6/10P [5, S. 101]	10
2.7	Prinzipskizze einer Schneckenplastifizierung	10
2.8	Prinzipskizze einer Schneckenplastifizierung mit Einspritzkolben	11
2.9	Prinzipskizze einer Kolbenplastifizierung mit Einspritzkolben	12
2.10	Spritzzyklus über die Zeit [34, S. 11]	13
3.1	Energiebilanz über das Gesamtsystem Plastifizier- und Einspritzeinheit	15
3.2	Allgemeiner Wärmestrom durch ein mehrschichtiges Rohr	17
3.3	Analogie zwischen Elektrotechnik und Wärmeübertragung	18
3.4	Systemgrenze des Teilsystems Plastifizierzylinder	23
3.5	Profile der Basisgrößen und repräsentative Schergeschwindigkeit für isothermes Fließen [30, S. 36]	24
3.6	Systemgrenze des Teilsystems Einspritzzylinder	25
3.7	Systemgrenze des Teilsystems Einspritzdüse	26
3.8	Schematischer Hydraulikdruckverlauf und zugehöriger Werkzeuginnendruckverlauf während eines Spritzgießzykluses [13, S. 309]	27
4.1	Darstellung der Kugelreihen in CATIA V5	33
5.1	Reibungswärmestrom im Plastifizierzylinder (Schüttung) abhängig von der Kolbengeschwindigkeit	36
5.2	Zusammenhang von Einlaufdruckverlust und Wandschubspannung [23, S. 127]	38
5.3	Reibungswärmestrom im Einspritzzylinder und in der Einspritzdüse abhängig von der Kolbengeschwindigkeit	39
5.4	Reibungswärmestrom im Plastifizierzylinder (Ersatzsystem) abhängig von der Kolbengeschwindigkeit	39
A.1	Viskositätsfunktion von POLYFORT FPP 20 T [4]	45
A.2	Fließfunktion von POLYFORT FPP 20 T [4]	46

B.1	Isometrische Darstellung des Netzes am Solidmodell	50
B.2	Auswerteebenen im Modell	50
B.3	Isometrische Darstellung des Netzes als Drahtmodell	51
B.4	Darstellungen des Netzes im Längsschnitt	52
B.5	Prismenschichten an der Stirnfläche des Drahtmodells	53
B.6	Residuen über Iterationen	54
B.7	Geschwindigkeiten im Längsschnitt	54
B.8	Scherraten im Längsschnitt	55
C.1	Kennlinien verschiedener Hydraulikpumpen [12]	56

Tabellenverzeichnis

2.1	Einteilung der Kunststoffe (DIN 7724:1993-04)	4
2.2	Verwendete Kunststoffe der IES GmbH [34, S.5]	6
3.1	Bewertung verschiedener Ansätze zur Beschreibung der Reibungswärme . .	31
4.1	Zusammenfassung vorgenommener Netzeinstellungen	34
4.2	Zusammenfassung vorgenommener Setupeinstellungen	34
4.3	Zusammenfassung vorgenommener Lösungseinstellungen	35
5.1	Reibungswärme im Plastifizierzylinder (Schüttung) abhängig von der Kolbengeschwindigkeit	37
5.2	Reibungswärme im Einspritzzylinder und in der Einspritzdüse abhängig von der Kolbengeschwindigkeit	38
5.3	Reibungswärme im Plastifizierzylinder (Ersatzsystem) abhängig von der Kolbengeschwindigkeit	40
A.1	Wertetabelle zur Viskositäts- und Fließfunktion von POLYFORT FPP 20 T [4]	47
B.1	Ermittelte Schergeschwindigkeiten in Abhängigkeit des Eintrittmassenstrom aus ANSYS Fluent	55

Nomenklatur

Formelzeichen

Größe	Einheit	Bedeutung
A	m^2	Fläche, Oberfläche
c	$J/(kg \cdot K)$	spezifische Wärmekapazität
d	m	Durchmesser
e	–	Abstand zur Kanalmitte
\dot{E}	W	Energiestrom
f	s^{-1}	Frequenz
H	m	Förderhöhe
\dot{H}	W	Enthalpiestrom
h	J/kg	spezifische Enthalpie
I	A	elektrische Stromstärke
K'	m^3	Düsenleitwert
l	m	Länge
M	Nm	Drehmoment
m	kg	Masse
m	$m^2/(N \cdot s)$	Fließexponent
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
n	s^{-1}	Drehzahl
P	W	elektrische-, technische Leistung
p	bar	Druck
p	–	Polzahl
Q	J	Wärmemenge
\dot{Q}	W	Wärmestrom
R	Ω	elektrischer,- thermischer Widerstand
R	m	äußerster Radius
r	m	Radius
Re	–	Reynolds-Zahl
s	–	Schlupf
t	s	Zeit
U	V	elektrische Spannung
V	m^3	Volumen, Verdrängungsvolumen der Pumpe
\dot{V}	m^3/s	Volumenstrom
v	m/s	Geschwindigkeit
\bar{v}	m/s	mittlere Geschwindigkeit über den Querschnitt
x	–	Anzahl
y	–	Scherrichtung

Nomenklatur

z	m	Höhe
α	W/(m ² ·K)	Wärmeübergangskoeffizient
$\dot{\gamma}$	s ⁻¹	wahre Schergeschwindigkeit, Scherrate
Δ	–	Differenz
η	Pa·s	dynamische Viskosität
$\bar{\eta}$	Pa·s	mittlere dynamische Viskosität
η	–	Wirkungsgrad
ϑ	°C	Temperatur
λ	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit
ν	m ² /s	kinematische Viskosität
τ	N/m ²	Scherspannung
ρ	kg/m ³	Dichte
ϕ	1/(Pa·s)	Fluidität
ψ	–	Hohlraumanteil

Indizes

A	Austritt
a	außen
b	benetzt
Bl	Blende
dyn	dynamisch
E	Eintritt
ED	Einspritzdüse
EK	Einspritzkolben
Ein	Einspritz
EK	Einspritzkolben
el	elektrisch
EZ	Einspritzzylinder
ges	Gesamt
H	Heiz
hyd	hydraulisch
i	innen
Iso	Isolierung
K	Kunststoff
k	laufender Wert
kin	kinetisch
Ku	Kugel
l	leer
mech	mechanisch
n	Endwert
Na	Nachdruck
PK	Plastifizierkolben
pot	potentiell

Pu	Pumpe
PK	Plastifizierkolben
PZ	Plastifizierzylinder
R	Reibung
rep	repräsentativ
s	scheinbare
Sch	Schüttung
St	Stahl
t	technisch
U	Umgebung
Um	Umschalt
V	Verlust
W	Wand
ZK	Zylinderkopf
Z	Heizelement der Zone 1, 2, bzw. 3

Abkürzungen

ANSYS	Analysis System
CATIA	Computer Aided Three-Dimensional Interactive Application
CFD	Computational Fluid Dynamics
ED	Einspritzdüse
EZ	Einspritzzierzylinder
FT	Fließtemperatur
GT	Glasübergangstemperatur
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
KST	Kristallit Schmelztemperatur
KSGM	Kolbenspritzgießmaschine
PBT	Polybutylenterephthalet
PC	Polycarbonat
PE	Polyethylen
PEEK	Polyetheretherketon
PEI	Polyetherimid
PIB	Polyisobuten
PP	Polypropylen
PPS	Polyphenylensulfid
PS	Polystyrol
PZ	Plastifizierzylinder
ST	Schmelztemperatur
SGM	Spritzgießmaschine
SGP	Spritzgießprozess
SSGM	Schneckenpritzgießmaschine
ZT	Zersetzungstemperatur

Vorwort

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die mich im Rahmen meiner Bachelorarbeit sowohl geistig, als auch praktisch unterstützt haben.

Allen voran möchte ich mich ganz besonders bei meiner Erstprüferin Prof. Dr.-Ing. Heike Frischgesell für die Aufgabenstellung und Ihr großes Verständnis bedanken. Vielen Dank, dass Sie mir diese Arbeit in Ihrem Institut ermöglicht haben.

Außerdem geht ein großer Dank an meinen Zweitprüfer M.Sc. Nestorius Wiegandt. Vielen Dank für Ihre intensive Betreuung der Arbeit. Durch Ihre ausgiebig fachliche Unterstützung, der konstruktiven Kritik haben Sie mich dazu motiviert über meine Grenzen hinaus zu denken.

Meinen Eltern und Geschwistern möchte ich dafür danken, dass sie mich in all meinen Entscheidungen von der Schulbank bis hin zum Studium unterstützt haben. Ein besonderer Dank geht an meinen Vater, der mich zu diesem Studium inspiriert und immer an mich geglaubt hat. Der größte Dank geht an meinen Ehemann, der gleichzeitig mein Kommilitone ist. Vielen Dank für die moralische Unterstützung und den liebevollen Beistand.

Hamburg, den 25.04.2017

Ezgi İşlemecioglu

1 Einleitung

Die Kunststoffverarbeitung ist im Vergleich zur Herstellung und Verarbeitung konventioneller Materialien wie Holz, Glas und Metall ein relativ junger Industriesektor. Im Zuge des konstruktiven Leichtbaus, wie z.B. in der Automobilindustrie, löst der Werkstoff aufgrund seiner Formgenauigkeit und seines geringen spezifischen Gewichtes herkömmliche Werkstoffe ab bzw. man verarbeitet diese in geeigneten Werkstoffkombinationen.

Wegen den steigenden Umsätzen von Kunststoffen bzw. den Stückzahlen von Kunststoffbauteilen, spielt neben den konstruktiven Vorteilen die energieeffiziente Produktion eine wichtige Rolle, welche im Zeichen der globalen Ressourcenschonung noch mehr an Bedeutung gewinnt.

Der Werkstoff lässt sich mit diversen Verfahren verarbeiten. Gemäß DIN 8580 sind die Herstellungsverfahren, unter anderem für Kunststoffe, unterteilt in die Hauptgruppen der Urform-, der Umform- und der Fügeverfahren. Bei dieser Ausarbeitung handelt es sich um das Spritzgießverfahren, im Detail um das Mikrospritzgießverfahren, in der Hauptgruppe des Urformens. Es ist das wichtigste Urformverfahren zum Herstellen von Kunststoffbauteilen.

1.1 Problemstellung und Vorgehensweise

Während des Spritzgießens entstehen, wie bei allen Herstellungsverfahren, irreversible Verluste. Sie entstehen in der Spritzeinheit und in der Schließeinheit in Form von Wärme- und Reibungsverlusten Abbildung 2.6. Diese Verluste sind quantitativ nur schwer zu erfassen bzw. im Vornherein schwer einzuschätzen. Doch die wirtschaftliche Betrachtung einer Produktionsstätte verlangt eine möglichst genaue Abschätzung der bevorstehenden Kosten. Der Energieverbrauch stellt dabei nur einen Aspekt der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung dar. Bei solch einer Problematik bietet sich ein rechnergestützter Lösungsansatz an. In vorherigen Arbeiten wurde die Software Dymola eingesetzt, welche die Simulation und Modellierung von dynamischen Verhalten und komplexen Interaktionen in – unter anderem thermodynamischen – Systemen ermöglicht. Mit Hilfe eines geeigneten Modelles können so Simulationsergebnisse erzeugt und mit real gemessenen Größen abgeglichen und bestenfalls validiert werden.

Bisher fehlt die mathematische und thermodynamische Beschreibung des Problems. Die ist zwingende Voraussetzung für den Entwurf des passenden Modells in der Software. Die Basis dafür, wird in dieser Arbeit behandelt, indem die verschiedenen Betriebszustände und die Energiebilanzen der Mikrospritzgießmaschine erörtert werden. Dies erfolgt überwiegend theoretisch mit Ausnahme der Beschreibung des dissipativen Anteils im Plastifizierzylinder. Als Hilfsmittel wird dazu die Software CATIA V5 und ANSYS Fluent eingesetzt.

Zum besseren Verständnis des behandelten Stoffes werden die werkstofftechnischen, sowie die prozesstechnischen Grundlagen in Kapitel 2 ab S.3 aufgeführt. Kapitel 3 ab S.15 setzt sich mit der mathematischen und thermodynamischen Beschreibung der einzelnen

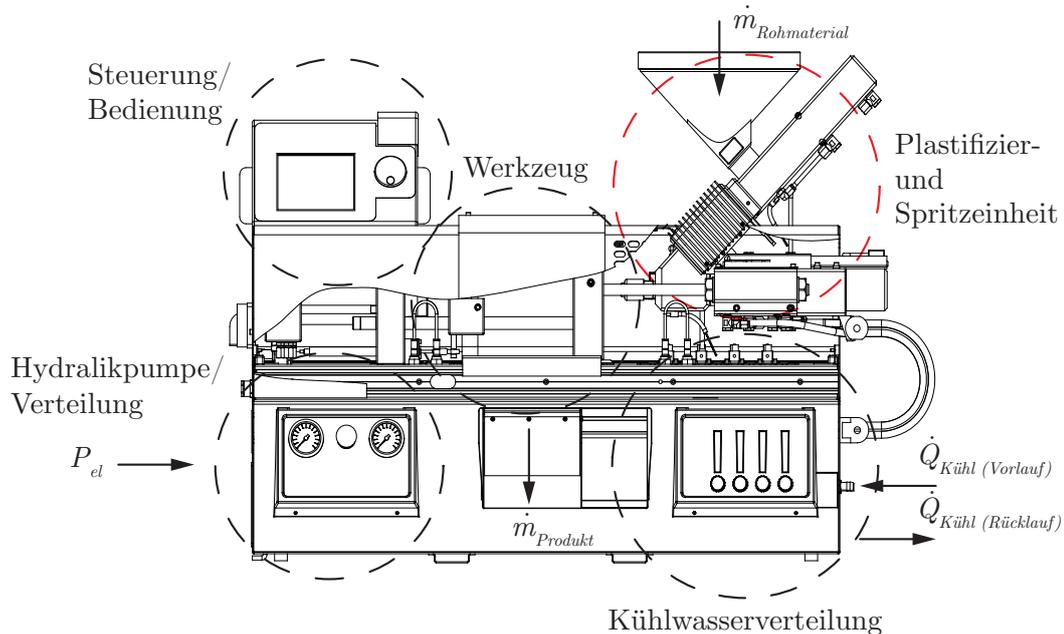


Abbildung 1.1: Gesamtzeichnung der Mikrospritzgießmaschine, Modell: Babyblast 6/10P [5, S. 103]

Betriebszustände auseinander. Die gewählten Parameter in CATIA V5 und ANSYS Fluent werden in Kapitel 4 ab S. 32 aufgeführt. Darauf basierend wird in Kapitel 5 ab S. 36 die Reibungswärme der Teilkomponenten – Plastifizierzylinder, Einspritzzylinder und Einspritzdüse – ausgewertet. In Kapitel 6 startend auf S. 41 werden die Ergebnisse mit den der Schneckenplastifizierung gegenübergestellt. Es findet eine Zusammenfassung der Gesamtarbeit und eine Diskussion über die gewonnenen Erkenntnisse, anknüpfend an einen kurzen Ausblick, statt.

1.2 Ziel und Grenzen der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es den Energieverbrauch des Spritzgießverfahrens unter Verwendung des Kolbenplastifizierkonzeptes analytisch darzustellen. Das Augenmerk liegt auf der Beschreibung der Reibungswärme. Es wird ausschließlich die Seite der Spritzeinheit berücksichtigt, die Schließeinheit entfällt bei der weiteren Betrachtung. Die behandelten Maschinenkomponenten, nämlich die Plastifizier- und Einspritzeinheit, sind in Abbildung 1.1 farblich markiert. Die Arbeit beschäftigt sich lediglich mit dem Spritzgießen von Thermoplasten. Es werden wesentlich die Energieströme der Reibungswärme ausgewertet. Die Schergeschwindigkeit im Plastifizierzylinder wird über ANSYS Fluent ermittelt und in der Berechnung berücksichtigt. Die Ergebnisse werden mit den realen Messwerten der *IES GmbH* validiert. Im Anschluss erfolgt die Auswertung und der Vergleich zur Schneckenplastifizierung.

2 Einführung in die Grundlagen

Das Spritzgießen ist nach DIN 8580 ein Urformverfahren, in welchem undefinierte und formlose Ausgangsstoffe – wie Flüssigkeiten, Pulver und Granulate – zu fest definierten Körpern urgeformt werden. Weitere Urformverfahren, auf welche hier nicht weiter eingegangen wird, sind das Sintern, das Rapid Prototyping bzw. das 3D-Drucken und das Auftragschweißen von Metallen.

Das Spritzgießen wird überwiegend für die Verarbeitung von Kunststoffen verwendet. Der Einsatz für Metalle ist ebenfalls möglich, doch wegen den vergleichsweise hohen Schmelztemperaturen findet dieser nur selten Anwendung. Beispielsweise können mit dem Spritzgießen Bauteile von bis zu 50 kg bis hin zu wenigen mg hergestellt werden [2].

Das Spritzgießen ist ein Überbegriff für weitere abgeleitete Verfahren. Abhängig vom verwendeten Grundwerkstoff unterscheidet man zwischen dem Thermoplast-Spritzgießen, dem Duroplast-Spritzgießen und dem Elastomer-Spritzgießen. Diese Ausarbeitung beschränkt sich ausschließlich auf das Thermoplast-Spritzgießen.

In diesem Kapitel wird der verwendeten Werkstoff, die Maschine und der Prozess des Spritzgießens behandelt.

2.1 Werkstoff

Der Begriff *Kunststoff* ist nicht eindeutig und schließt genau genommen alle synthetisch hergestellten Werkstoffe, wie z. B. künstliche Diamanten, in die Bezeichnung mit ein. Für den gemeinten Werkstoff ist der Begriff *Polymerwerkstoff* viel treffender.

Polymere bestehen in ihrer **Primärstruktur** aus verzweigten Makromolekülketten, die aus einer Vielzahl von Kohlenwasserstoffmolekülen bestehen, den **Monomeren**. Monomere stellen die kleinste Moleküleinheit bzw. den Grundbaustein der Polymere dar. Abhängig von der Konstitution des Monomers, sprich von der Art des Kohlenwasserstoffmoleküls, bilden sich die unterschiedlich zueinander orientierten Polymerketten aus. Die Konstitution des Monomers bestimmt grundlegend die chemischen, die physikalischen, die mechanisch-technologischen und die thermo-mechanischen Eigenschaften des Polymers und charakterisiert somit den Werkstoff. Sie ist ausschlaggebend für das Einstellen gewünschter Eigenschaften des Polymerwerkstoffes. Die Beschreibung der Primärstruktur ist äußerst komplex, sie wird in [8, S. 1 ff.] ausführlich erläutert. Polymerwerkstoffe sind nach ihrem **thermo-mechanischem Verhalten** unterteilt in Elastomere, Duroplaste und Thermoplaste. Ihre Eigenschaften sind in Tabelle 2.1 gegenübergestellt. Anlehnend an [28, S. 3] sind im Folgenden die wesentlichen Unterschiede geschildert:

Duroplaste: Wegen ihrer hochgradig vernetzten Polymerketten ist es nach der Aushärtung nicht mehr möglich den Werkstoff durch thermische Maßnahmen zu verformen. Er ist relativ hart und lässt sich nicht plastifizieren, somit eignet er sich nicht für eine mehrstufige Verarbeitung.

Tabelle 2.1: Einteilung der Kunststoffe (DIN 7724:1993-04)

Thermoplaste	thermoplastische Elastomere	Elastomere	Duroplaste
unvernetzt	schwach vernetzt		stark vernetzt
linear bis verzweigt	physikalisch und chemisch vernetzt		chemisch vernetzt
schmelzbar, löslich	schmelzbar, löslich	nicht schmelzbar, nicht löslich, quellbar	nicht schmelzbar, nicht löslich, nicht quellbar
plast. formbar, i. A. hoher E-Modul	gummielastisch, kleiner E-Modul		nicht plastisch formbar, hoher E-Modul

Elastomere: Ihre Polymerketten sind im Gegensatz zu den Duroplasten weitmaschig vernetzt, dadurch erhalten sie ihr charakteristisches gummielastisches Verhalten. Wie Duroplaste eignen auch sie sich nicht zum Verformen. Die Vernetzung behindert eine Plastifizierung unter Erwärmung.

Thermoplaste: Die Polymerketten sind unvernetzt, dadurch erweichen sie unter einem thermischen Einfluss und plastifizieren. Der Werkstoff ist wiederaufschmelzbar und lässt sich durch diese Eigenschaft gut verarbeiten, z. B. durch Spritzgießen, Extrudieren und Schweißen.

Wegen der Beschränkung des Werkstoffes auf die Thermoplaste, wird im nächsten Unterabschnitt ausschließlich nur dieser tiefergehend beschrieben.

2.1.1 Eigenschaften der Thermoplaste

Wie eingangs erwähnt, besteht die Besonderheit der Thermoplaste darin, dass sie im Gegensatz zu den übrigen Kategorien der Polymerwerkstoffe (Tabelle 2.1) über unvernetzte Polymerketten verfügen. Sie sind dadurch wiederaufschmelzbar und eignen sich deshalb besonders gut für das Schweißen und Spritzgießen. Die einzigen Bindungskräfte die unter den Polymerketten wirken sind Nebenvalenzkräfte. Nebenvalenzkräfte sind physikalische Anziehungskräfte und bewirken eine schwächere Bindung unter den Polymerketten als Hauptvalenzkräfte. Letztere resultieren aus chemischen Verbindungen und rufen dadurch eine insgesamt stärkere Bindung hervor.

Weiterhin kann die Sekundärstruktur (auch übermolekulare Struktur) von Thermoplasten eine *amorphe* oder eine *teilkristalline* Gestalt annehmen (vgl. Abbildung 2.1). Amorph (*gestaltlos*) bedeutet, dass die Molekülketten unregelmäßig und unstrukturiert zueinander angeordnet sind. Oft wird dafür die Vorstellung eines *Knäuelmodells* herangezogen. Im Unterschied dazu weist eine teilkristalline Struktur „... in regelloser Anordnung kristalline Bereiche, in denen die Ketten gestreckt sind und parallel liegen und nichtkristalline Bereiche mit verknäulten Ketten auf“ [8, S. 37]. Die beschriebenen Überstrukturen charakterisieren den Thermoplast in seinen physikalischen Eigenschaften. Kennzeichnend dabei sind die thermo-mechanischen Eigenschaften. Die Struktur beeinflusst das Verhalten des Werkstoffes oberhalb der Glas temperatur (GT), wie folgt:

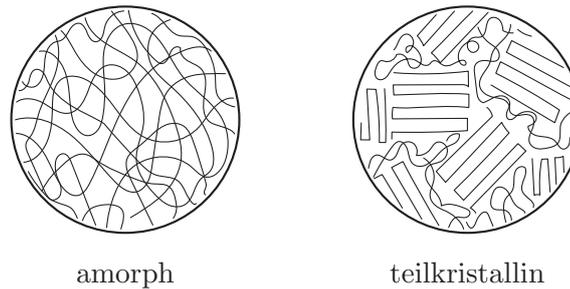


Abbildung 2.1: Übermolekulare Struktur von Thermoplasten

amorph: Amorphe Thermoplaste weisen oberhalb von GT ein thermoelastisches Verhalten auf und werden bei weiterer Erwärmung weich und plastisch verformbar. Die Glasstemperatur beschreibt die Schwelle zwischen glasig-hartem und elastischem Zustand. Generell besitzen diese Werkstoffe, aufgrund der schwachen intermolekularen Bindungskräfte, eine vergleichsweise geringe GT. Dadurch ergibt sich ihr thermolabiler Charakter.

Unter der Betrachtung des Formänderungsverhaltens (siehe Abbildung 2.2) wird deutlich, dass nach Überschreiten von GT die Festigkeit drastisch abnimmt und die Dehnung sich antiproportional dazu verhält. Der Werkstoff befindet sich dann im weichelastischen Bereich. Bei weiterer Erwärmung nehmen beide Eigenschaften kontinuierlich ab. Ab der Schmelztemperatur (ST) nimmt die Viskosität soweit ab, dass eine plastische Verformbarkeit erst möglich wird. Nach Überschreiten der Zersetzungstemperatur (ZT) geht der reversible Aufschmelzprozess in einen irreversiblen Prozess über. Das Temperaturintervall für das Spritzgießen liegt somit zwischen ST und ZT, in dem der Urformprozess „beliebig“ oft durchgeführt werden kann. Der Gebrauchsbereich von amorphen Thermoplasten liegt unterhalb GT. Sie besitzen dann eine geringe Reißdehnung, maximale Reißfestigkeit und sind spröde [15].

teilkristallin: Teilkristalline Thermoplaste verfügen sowohl über amorphe, als auch über kristalline Bereiche. Die amorphen Bereiche verhalten sich analog, wie oben bereits erwähnt. Die kristallinen Strukturanteile bewirken durch ihren festeren Zusammenhalt oberhalb von GT ein insgesamt zähelastisches und formbeständiges Verhalten.

In Abbildung 2.3 ist das Formänderungsverhalten von teilkristallinen Thermoplasten qualitativ dargestellt. Bei GT deutet sich ein Eigenschaftssprung der Festigkeit und Dehnung, hervorgerufen durch die rein amorphen Anteile des Thermoplasts, an. Insgesamt nimmt auch hier die Festigkeit ab, gleichzeitig nimmt die Dehnung zu. Zwischen GT und der Kristallitschmelztemperatur (KST) liegt der Gebrauchsbereich. Aufgrund der amorphen Anteile ist der Werkstoff zähelastisch und wegen der noch vorhandenen Kristallite hart zugleich. Anschließend nehmen bis KST Festigkeit und Dehnung kontinuierlich zu bzw. ab. Die festigkeitssteigernden Kristallite lösen sich nach KST vollständig auf. Es folgt der plastische Zustand, in dem ausschließlich amorphe Strukturverhältnisse vorherrschen. In diesem Bereich findet der Spritzgießprozess Anwendung. Auch hier wird bei Überschreiten von ZT der Aufschmelzprozess irreversibel.

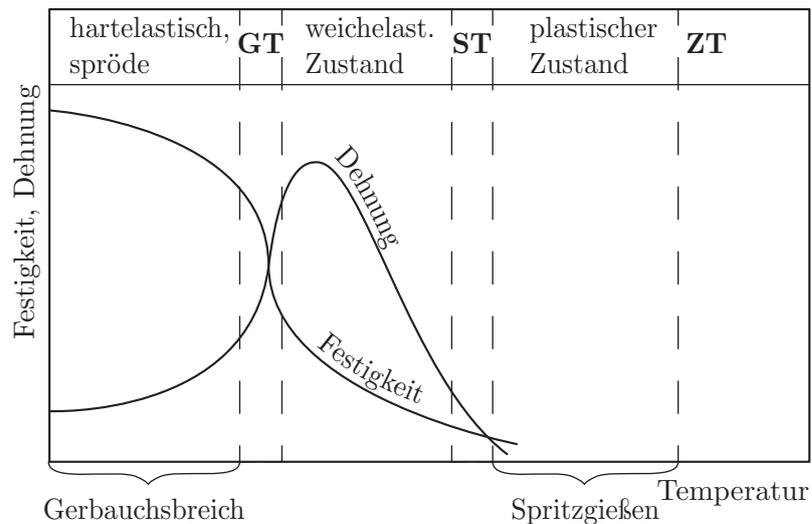


Abbildung 2.2: Formänderungsverhalten von amorphen Thermoplasten [13, S. 50]

Tabelle 2.2: Verwendete Kunststoffe der IES GmbH [34, S. 5]

Werkstoff	Bezeichnung	amorph	teilkristallin
Polypropylen ^a	PP		×
Polyetheretherketon	PEEK		×
Polybutylenterephthalet	PBT		×
Polyetherimid	PEI	×	
Polycarbonat	PC	×	
Polyphenylensulfid	PPS		×

^a verwendeter Werkstoff in dieser Arbeit

Die *IES GmbH* verwendet für das Spritzgießen beide Arten von Thermoplasten. In Tabelle 2.2 sind entsprechende Werkstoffe aufgelistet. Polypropylen (PP) ist der meist eingesetzte Kunststoff weltweit. Die Vorteile gegenüber dem sehr gut fließfähigen Polyethylen (PE) sind [13, S. 76]:

- um knapp $0,1 \text{ g/cm}^3$ leichter
- eine um 20 bis 40 °C höhere Gebrauchstemperatur
- eine höhere Steifigkeit als PE (E-Modul)
- PP lässt sich gut blenden und füllen

2.1.2 Rheologisches Verhalten im Spritzgießprozess

Grundlegende Voraussetzung für den Spritzgießprozess von Thermoplasten liegt in dem Erreichen und dem zuverlässigen Halten des Temperaturintervalls. Für amorphe Werkstoffe

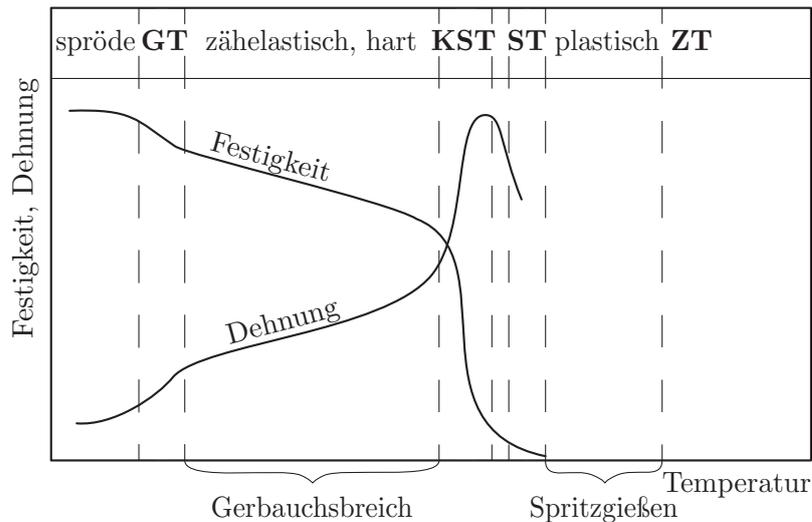


Abbildung 2.3: Formänderungsverhalten von teilkristallinen Thermoplasten [13, S. 51]

liegt dieses zwischen der Schmelztemperatur (ST) und ZT und für teilkristalline zwischen KST und ZT (vgl. Abbildung 2.2 und 2.3). Die **Viskosität** η sinkt, bzw. die **Fluidität** ϕ steigt, in diesem Temperaturbereich auf das für den Spritzgießprozess erforderliche Niveau. Die Viskosität ist ein Maß für die **Zähflüssigkeit** eines Fluides. Die Fluidität ist der reziproke Wert der Viskosität und beschreibt die **Fließfähigkeit** eines Fluides. Je höher die Viskosität, desto „dickflüssiger“ und je niedriger, umso „dünnflüssiger“ verhält sich das Fluid.

Bei dem betrachteten Stoffwert handelt es sich genauer um die **dynamische Viskosität** η . Diese ist, hingegen zur **kinematischen Viskosität** ν , eine temperaturabhängige Stoffgröße. Generell nimmt die Fließfähigkeit eines jeden Fluides mit Temperaturzunahme zu. Neben der Temperaturabhängigkeit spielt bei der Schmelze von Thermoplasten die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ eine gesonderte Rolle. Sie wird mathematisch folgender Maßen beschrieben:

$$\dot{\gamma} = -\frac{dv}{dy} \quad (2.1)$$

In stationären Fließprozessen entstehen Schubspannung, welche für newtonsche Fluide eine Linearität vorgibt:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (2.2)$$

Prinzipiell werden Polymerschmelzen den **nicht newtonschen Fluiden** zugeordnet. Anders als **newtonsche Fluide** weisen sie ein nichtlineares Verhalten zwischen der Schubspannung τ bzw. der Viskosität η und der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ auf:

$$\tau = \eta(\dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma} \quad (2.3)$$

bzw.

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \neq \text{const.}$$

Die Nichtlinearität kann einerseits in der Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit oder andererseits in der Zeitabhängigkeit begründet sein. Letztere spielt bei Kunststoffen keine Rolle und wird daher nicht weitergehend beschrieben. In Abbildung 2.4 ist schematisch die **Fließfunktion** $\tau = f(\dot{\gamma}, \vartheta)$ (links) und die **Viskositätsfunktion** $\eta = f(\dot{\gamma}, \vartheta)$ (rechts) von strukturviskosen und dilatanten Fluiden im Vergleich zum Newton'schen Fluid dargestellt. Polymerschmelzen verhalten sich **strukturviskos**, d. h., dass die Viskosität mit steigender Schergeschwindigkeit abnimmt und dadurch die Schubspannung, vergleichsweise zum newtonschen Fluid, schneller abgebaut werden kann. Weitere Abhängigkeiten auf das Fließverhalten von Polymerschmelzen, welche hier nicht behandelt werden, sind in Abbildung 2.5 dargestellt.

Beim Spritzgießen wird die Viskosität zum einen durch die externe Wärmezufuhr und

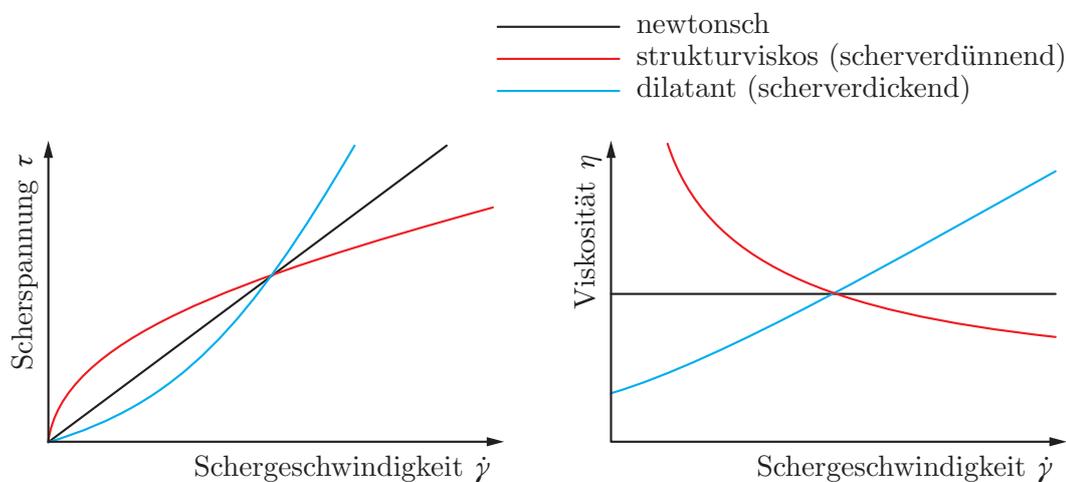


Abbildung 2.4: Nichtlineares Verhalten nicht newtonscher Fluide in Abhängigkeit der Schergeschwindigkeit [15]

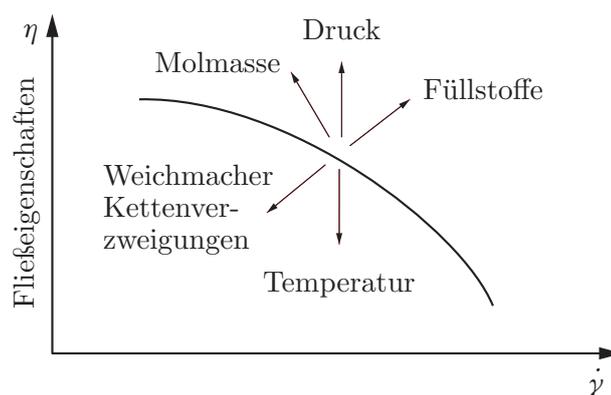


Abbildung 2.5: Einflüsse auf das Fließverhalten von Polymerschmelzen [13, S. 181]

zum anderen durch die entstehende innere Reibungswärme (dissipativ) verringert. Die Reibungswärme, nicht zu verwechseln mit der Oberflächenreibung zwischen Fluid und

Zylinderinnenwand, wird durch die Scherung des Fluides hervorgerufen. Je höher dabei die Schergeschwindigkeit ist, desto höher die Reibungswärme. Es gibt unterschiedliche Ansätze die Strukturviskosität mathematisch zu beschreiben [23, S. 27 ff]:

- Potenzansatz nach Ostwald und de Waele (allg. Polymere) [25]
- Sinus-Hyperbolicus-Gesetz nach Prandtl und Eyring [27]
- Carreau-Ansatz [14]
- Universelle Viskositätsfunktion nach Vinogradov und Malkin (für diverse PE, PP, PS, PIB,...) [32]
- Herschel-Bulkey-Modell (insbesondere für Kautschuk) [26]

Aufgrund der vorliegenden Berechnungsformeln nach dem *Potenzansatz von Ostwald und de Waele* wird in dieser Arbeit auf die Vertiefung der anderen Ansätze verzichtet. Der Potenzansatz sagt aus:

$$\dot{\gamma} = \phi \cdot \tau^m \quad (2.4)$$

$$m = \frac{\Delta \lg \dot{\gamma}}{\Delta \lg \tau} \quad (2.5)$$

$$\phi = \frac{\tau^{1-m}}{\eta} \quad (2.6)$$

Diese Gleichungen beschreiben den linearen Abschnitt in einem doppeltlogarithmischen Diagramm der Fließfunktion. Die entsprechenden Diagramme sind im Anhang hinterlegt (Abbildung A.2 auf S. 46). Der **Fließexponent** m und die **Fluidität** ϕ beschreiben das Fließvermögen vom Kunststoff und die Abweichung zum newtonschen Fluid. Bei $m = 1$ wird $\phi = \eta^{-1}$ und beschreibt somit ein newtonsches Fluid. Der Fließexponent liegt bei Kunststoffschmelzen üblicherweise zwischen 2–4. Die Formeln finden in Abschnitt 3.1.3 ab S. 24 weitere Anwendung.

2.2 Aufbau der Spritzgießmaschine

Spritzgießmaschinen bestehen im Wesentlichen aus zwei Teilbereichen. Zum einen die **Plastifiziereinheit** und **Spritzeinheit** (eingangsseitig) in dem der Ausgangswerkstoff zugeführt, verflüssigt und in das Werkzeug unter Druck eingespritzt wird. Und zum anderen die **Schließeinheit** (ausgangsseitig), in dem sich der Werkstoff verfestigt und Form annimmt [1].

2.2.1 Plastifizier- und Spritzeinheit

Es gibt unterschiedliche Ausführungen der Spritzgießmaschine. Sie unterscheiden sich hauptsächlich in dem Plastifizierungskonzept. Diese Arbeit thematisiert die **Kolbenspritzgießmaschine** (KSGM), welche genau genommen als Zweistufiges Kolben-Spritzaggregat bezeichnet wird (Abbildung 2.6). Parallel dazu wird das gängigste Modell, die **Schnecken-spritzgießmaschine** (SSGM), vorgestellt.

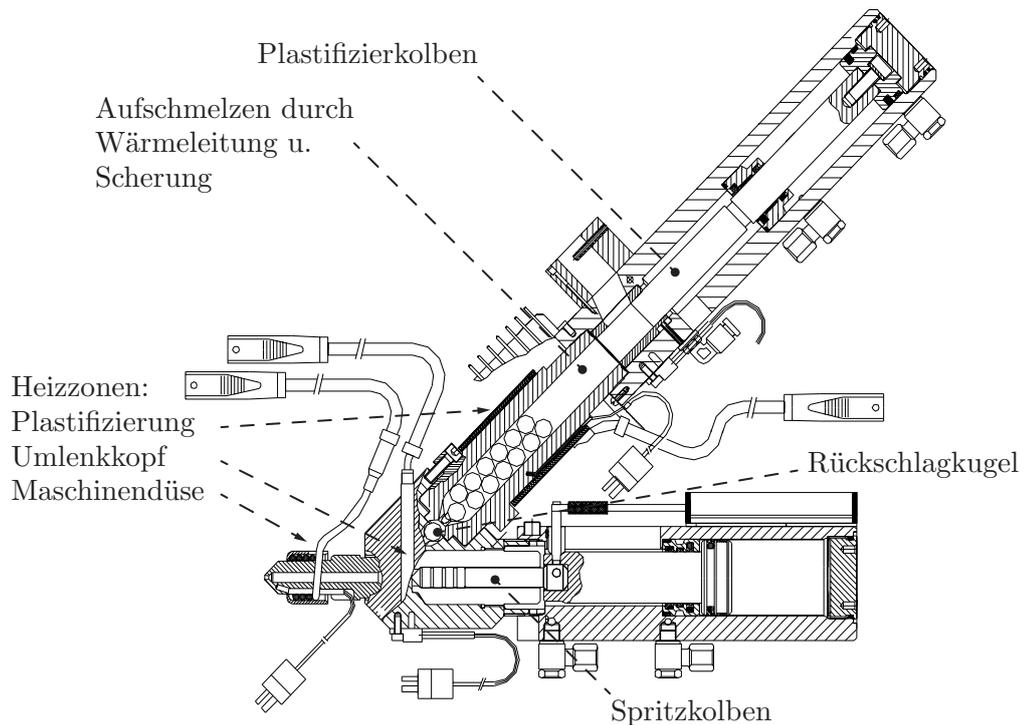


Abbildung 2.6: Zeichnung der Spritzeinheit, Modell: Babyblast 6/10P [5, S. 101]

Der entscheidende Unterschied der SSGM (Abbildung 2.7) ist, dass beide Einheiten (Plastifizier - und Spritzeinheit) sich in einer Baukomponente befinden. Die Schneckenwelle ist in einem Zylinder. Der Schneckenaußendurchmesser entspricht dem Zylinderinnendurchmesser. Das Ausgangsmaterial gelangt durch den Trichter in den beheizten Zylinder und wird durch die Drehung der Schnecke in Richtung der Einspritzdüse befördert. Die Plastifizierung erfolgt durch die Wärmezufuhr der Heizelemente und der Reibungswärme, welche durch Scherung des Kunststoffes durch die Schnecke entsteht [13, S. 300 f] [24].

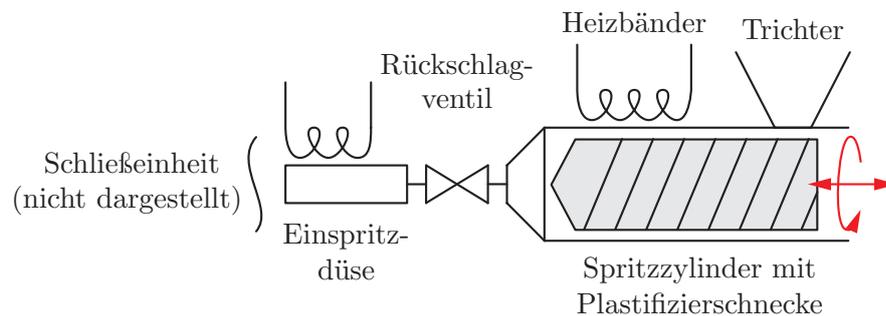


Abbildung 2.7: Prinzipskizze einer Schneckenplastifizierung

In einem verwandten Modell (Abbildung 2.8) ist die Plastifiziereinheit von der Spritzeinheit abgekoppelt. Die Plastifizierung übernimmt auch hier die Schnecke, das Einspritzen

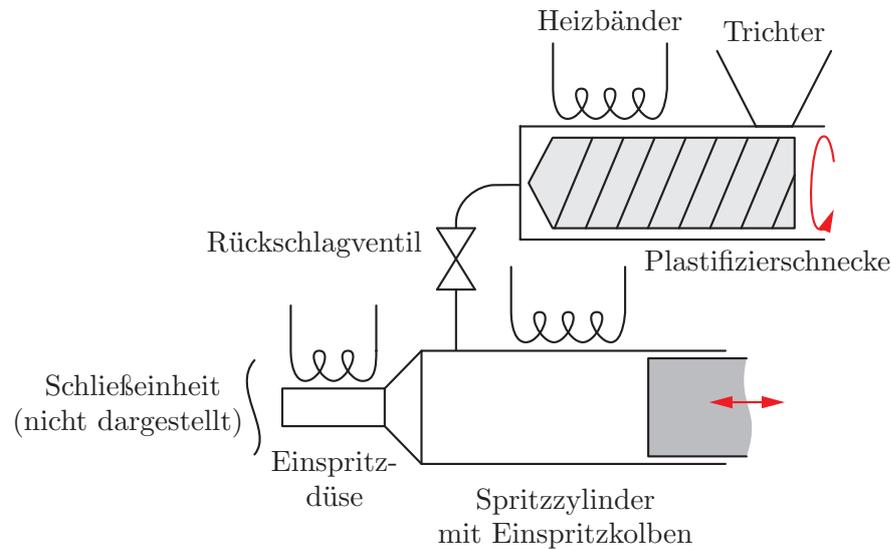


Abbildung 2.8: Prinzipskizze einer Schneckenplastifizierung mit Einspritzkolben

hingegen erfolgt durch einen Einspritzkolben [30].

In der **Kolbenspritzgießmaschine** (Abbildung 2.9) sind die Einheiten ebenso hintereinander geschaltet, dabei wird die Plastifizierschnecke durch einen hydraulisch betriebenen Kolben ersetzt. Es besteht auf hydraulischer Seite eine Wasserkühlung, die hier nicht weiter berücksichtigt wird. Die Plastifizierung des Ausgangsproduktes erfolgt in dem 45° angeordneten Plastifizierzylinder. Das Kunststoffgranulat wird für die weitere Verarbeitung durch eine mehrstufige Erwärmung mittels Heizelementen und Reibungswärme aufgeschmolzen. Das Material wird durch den Kolben an Stahlkugeln unter Kraftaufwand hindurchbefördert und homogenisiert. Der dabei erzeugte Scherungsprozess erzeugt die Reibungswärme. Der Einspritzzylinder füllt sich mit der einströmenden Schmelze bis zum eingestellten Dosierweg. Durch den Einspritzkolben wird die Schmelze über die Düse in das Werkzeug gepresst. Aufgrund der hohen entstehenden Drücke, wird das Zurückfließen der Schmelze von der Spritzeinheit zur Plastifiziereinheit durch ein **Kugelrückschlagventil** unterbunden. Dabei drückt die Schmelze die letzte Stahlkugel Richtung Plastifizierzylinder und versperrt somit den Durchfluss [11, S. 6].

Die **Rückstromsperre** in der SSGM befindet sich am Schneckenende. Sie besteht aus der Schneckenspitze, dem Sperr- und dem Druckring. Beim Einspritzen drückt der Druckring an den Sperring und die Schneckengänge werden verschlossen [17, S. 9].

Die Plastifizier- und Einspritzeinheit wird in mehreren Zonen mit unterschiedlichen Geometrien beheizt. Sie sind steuerbar und dienen der optimierten und materialschonenden Verarbeitung unterschiedlicher Kunststoffe mit unterschiedlichen Temperaturanforderungen. Die Einspritzeinheit und -düse sind ebenfalls beheizt, damit das plastifizierte Material nicht vorzeitig abkühlt und erstarrt. Bei der Kolbenplastifizierung wird der Plastifizierzylinder von einem **Heizband** ummantelt. Der Einspritzzylinder hingegen verfügt über zwei geradlinige Heizdrähte und die Düsen über ein spiralförmigen **Heizdraht**. Die Beheizung in der Schneckenplastifizierung erfolgt über **Heizschalen**. Es gibt unter den **Düsen** unter-

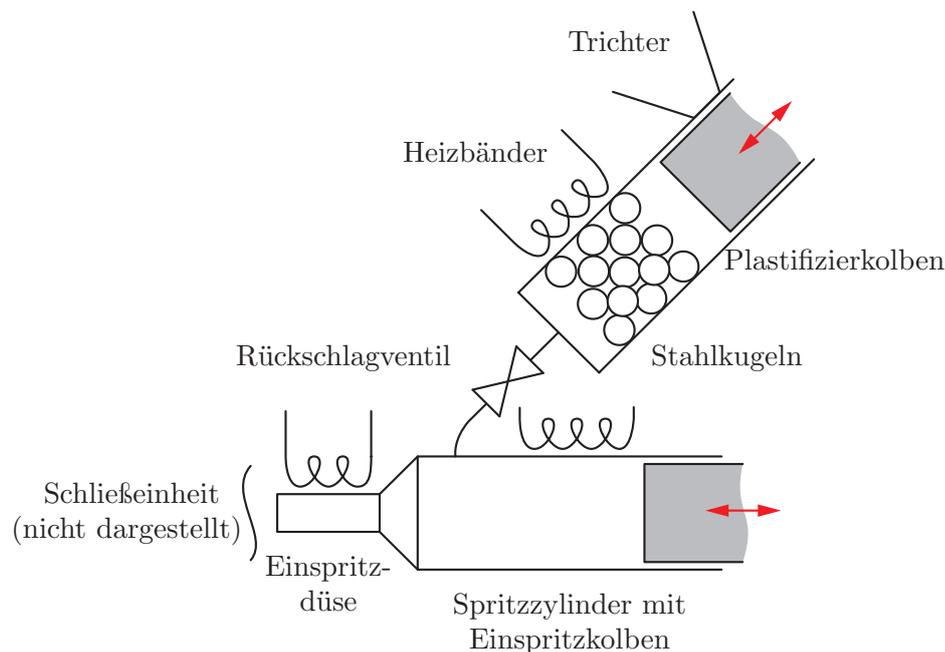


Abbildung 2.9: Prinzipskizze einer Kolbenplastifizierung mit Einspritzkolben

schiedliche Bauarten, welche nach Anwendungsfall eingesetzt werden. Die **Verschlussdüse** verhindert die Fadenbildung. Häufig kommt jedoch die **offene Düse** zum Einsatz. Bei dieser Variante entsteht durch die Verjüngung des Kanals die in einen Konus übergeht eine Sollbruchstelle, bei der sich der erstarrte Kunststoff von der Schmelze trennt [24, S. 11] [30].

2.2.2 Schließeinheit

Die Aufgabe der Schließeinheit besteht darin das Werkzeug zu öffnen, zu schließen und das ausgehärtete Werkstück auszuwerfen.

Über eine zentrale Bohrung an der unbeweglichen Aufspannplatte, kann die Düse der Einspritzeinheit zum Werkstück gelangen. Beide Werkzeughälften sind an Aufspannplatten befestigt, dabei wird nur die eine Hälfte hydraulisch über Führungssäulen bewegt. In Spritzgießanlage haben sich, aufgrund der hohen Schließkräfte, hydraulische Systeme bewährt. Im Werkzeug befindet sich die **Werkzeugkavität**, sie gibt dem Werkstück die Form und ist auswechselbar. In einem Zyklus können mehrere Bauteile mit einem Werkzeug erzeugt werden. Die beheizte Düse spritzt die Schmelze in das Werkzeug. Letzteres wird über einen Wärmetauscher temperiert, damit die einströmende Schmelze nicht frühzeitig erstarrt, bevor sie die Form ausfüllt. Beim Einströmen wird die eingespernte Luft über Spalte im Mikrometerbereich zwischen den zwei Werkzeughälften verdrängt. Die **Zuhalteeinrichtung** sorgt dafür, dass das Werkzeug geschlossen bleibt. Nach dem Auskühlprozess öffnen sich die Hälften und das Produkt wird durch den **Auswerfer** ausgeworfen oder händisch entnommen [24] [30].

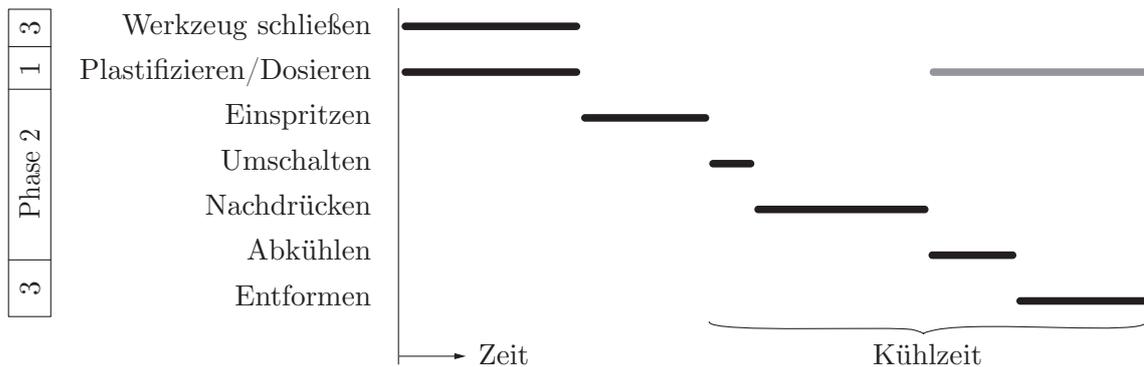


Abbildung 2.10: Spritzzyklus über die Zeit [34, S. 11]

2.3 Ablauf des Spritzgießprozesses

Der Spritzgießprozess (SGP) ist ein zyklischer Prozess. Er wird in drei Verfahrensphasen unterteilt. Diese werden in den nachfolgenden Unterabschnitten näher beschrieben. In Abbildung 2.10 sind die Verfahrensschritte des gesamten Prozesses in Abhängigkeit der Zeit aufgelistet.

2.3.1 Plastifizieren und Dosieren

Zu Beginn der ersten Phase wird das Werkzeug geschlossen. Für das **Plastifizieren** gelangt Kunststoffgranulat über den Trichter in den beheizten Plastifizierzylinder und wird bis zum Fließbereich erwärmt. Das Erwärmen wird zum einen über die Heizelemente erreicht, zum anderen durch die Reibungswärme. Sie tritt in zwei Formen auf. Zum einen die Oberflächenreibung zwischen dem Kunststoff und der Zylinderwand und zum anderen die innere Reibung, die beim Scheren des Kunststoffes entsteht. Bei der Temperierung ist besonders darauf zu achten, dass die Temperatur weder zu hoch, noch zu niedrig ist. Bei einer Unterschreitung von ST würde der Kunststoff erstarren und bei einer Überschreitung von ZT könnte er sich zersetzen und geforderte Qualitätskriterien nicht erfüllen. Die Temperatur des Materials kann durch die steuerbaren Heizelemente angepasst werden. Das **Dosieren** wird von dem Einspritzzylinder vorgegeben. Der Einspritzzylinder ist an ein Wegmessgerät angebunden. Dabei drückt der Plastifizierkolben das geschmolzene Material in den Einspritzzylinder, bis der Einspritzkolben den definierten Hub erreicht. Bei der Schneckenplastifizierung hingegen zieht sich die rotierende Schnecke das Kunststoffgranulat aus dem Einfülltrichter in den Zylinder. Das Granulat wird zum einen durch die Wärmezufuhr der Heizschalen, welche um den Zylinder liegen, zum anderen durch die mechanische Reibung, welche durch die Förderung des Kunststoffes über die Schnecke entsteht, aufgeschmolzen. Das aufgeschmolzene Material sammelt sich vor der Schneckenspitze und drückt die Schnecke translatorisch zurück [13, S. 301] [24] [30, S. 20 f].

Sobald sich genug Material vor der Schnecke gestaut hat und somit die Dosierung abgeschlossen ist, fährt die Schnecke ohne Drehung ein und schießt das Material in das Werkzeug. Der Einspritzzylinder verfügt immer über mehr Masse an Kunststoff, als die

Kavität aufnehmen kann. Wenn diese Phase abgeschlossen ist, beginnt das Einspritzen. Sie beginnt parallel zum Restkühlen erneut.

2.3.2 Einspritzen, Umschalten, Nachdrücken und Abkühlen

Sobald die Düse des Einspritzzylinders an die Schließeinheit andockt, fährt der Einspritzkolben bzw. -schnecke translatorisch ein und das **Einspritzen** beginnt. Der Einspritzdruck richtet sich nach dem Gegendruck und dem Strömungswiderstand, damit die Vorschubgeschwindigkeit konstant bleibt. Das Material schießt unter hohem Druck in die Werkzeugkavität ein.

Das **Umschalten** zum Nachdrücken beginnt im Anschluss zum Einspritzen. Beim Umschalten muss ein konstanter Druck in der Kavität gewährleistet sein, damit ein Einfallen des Bauteils und die Öffnung des Werkzeuges vermieden wird. Das **Nachdrücken** ist ausschlaggebend für die Materialqualität. Wie jedes Material, reagiert auch Kunststoff beim Abkühlen mit einem Volumenschwund. Um dem entgegenzuwirken, wird der Druck in der Einspritzdüse beibehalten, welcher bei Bedarf zusätzlich Material in die Form presst. Sobald die Düse geschlossen ist, beginnt der nächste Verfahrensschritt des **Abkühlens** parallel (vgl. Abbildung 2.10) zu der ersten Phase. Diese Zeit wird genutzt um den Plastifizierungsvorgang erneut zu starten. Die Phase endet mit der vollständigen Erstarrung des Produktes und dem Erlangen der geforderten Steifigkeit [13, S. 302] [24] [30, S. 21].

2.3.3 Entformen und Werkzeug schließen

Die nächste Phase beginnt mit dem **Entformen**. Das Werkzeug wird durch die bewegliche Aufspannplatte geöffnet. Bei Hohlkörpern fährt zuerst der **Schieber** heraus anschließend wird das Bauteil ausgeworfen. Dies geschieht über entsprechende Auswerfstifte. Die Stifte werden durch die Kavität hindurch an das Bauteil gedrückt. Um den Zyklus erneut starten zu können fährt das Werkzeug wieder zu. Gegenfalls fährt der Schieber wieder aus.

Der Prozesskreislauf schließt sich, sobald das **Werkzeug geschlossen** ist. Sobald das Plastifizieren und Dosieren abgeschlossen ist, kann das Einspritzen beginnen [13, S. 302] [24] [30, S. 21].

3 Mathematische Abbildung der Energieströme

In Abbildung 3.1 ist die **Stoff- und Energiebilanz** über das Gesamtsystem zu sehen. In diesem Fall umfasst das Gesamtsystem die Teilsysteme Plastifizierzylinder, Einspritzzylinder und Einspritzdüse. Die Grenzen sind eingangsseitig der Materialtrichter und ausgangsseitig die Einspritzdüse. Die **Massenströme** beziehen sich auf die eintretende und austretende Kunststoffmasse. Das Granulat tritt in das System ein und wird als Eingangsmassenstrom \dot{m}_{KE} bezeichnet. Die dosierte Einspritzschmelze ist der Ausgangsmassenstrom \dot{m}_{KA} . Die **technischen Größen** sind im unteren und die **Wärmeströme** im oberen Bereich abgebildet. Die Kühlung des Hydrauliksystems wird hier nicht betrachtet, sie liegt außerhalb der Systemgrenze. Einleitend werden die behandelten Prozessgrößen aufgelistet, um die anschließende Herleitung der Berechnung verständlich zu machen.

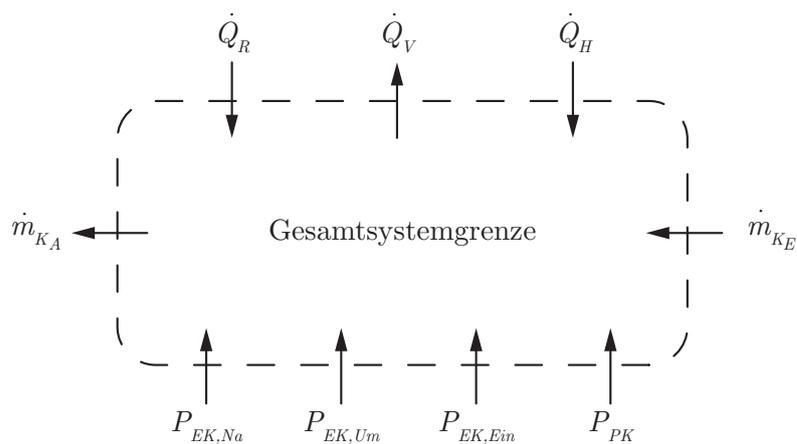


Abbildung 3.1: Energiebilanz über das Gesamtsystem Plastifizier- und Einspritzeinheit

3.1 Ermittlung der Energieströme

Die Triebkraft eines Wärmestroms in einem System ist im Allgemeinen die vorliegende Temperaturdifferenz. Solange sie vorhanden ist strebt das System nach einem thermischen Ausgleich. Wärmeübertragung findet zwischen allen Medien statt, ob Gas, Flüssigkeit oder Festkörper. Dabei unterscheidet man drei Arten von Wärmetransport [20, S. 19]:

- Die **Wärmeleitung** findet in einem Festkörper oder ruhenden Fluid statt. Dabei sind wichtige Kenngrößen der Temperaturgradient und die Stoffeigenschaft. Ein Beispiel

für die Wärmeleitung ist eine Gebäudewand.

- Die **Konvektion** entsteht nur in Verbindung mit einer Strömung von Flüssigkeiten oder Gasen. Es wird zwischen freier und erzwungener Konvektion unterschieden. Die **freie Konvektion** (z. B. an der Raumluft) beschreibt die Wärmeübertragung durch Strömung, welche durch Dichteunterschiede entsteht. Die **erzwungene Konvektion** hingegen (z. B. in einer Wärmepumpe) entsteht durch äußere Druckunterschiede.
- Die **Wärmestrahlung** ist eine besondere Art von Wärmetransport. Die Wärme wird ohne einen Stoffträger durch elektromechanische Wellen im Infrarotbereich übertragen, wie z. B. Sonnenstrahlen und Wärmestrahlen einer Glühbirne.

In dieser Arbeit beschränkt sich die Wärmeübertragung auf die Wärmeleitung in den Feststoffen und im Fluid, auf die freie Konvektion am Gehäuse und die erzwungene Konvektion im Fluid.

3.1.1 Wärmeverluststrom

Der Wärmeverluststrom, der an die Umgebung abgeführt wird, wird durch die Größe \dot{Q}_V beschrieben. Die Heizelemente wirken als primäre Wärmequelle und die Reibungswärme als sekundäre. Ein Teil der Reibungswärme wird genau genommen auch an die Umgebung abgegeben, doch im Verhältnis zum Wärmeverlust der Heizelemente ist sie gering. Sie wird in erster Linie für das Plastifizieren genutzt. Deshalb kann der Wärmeverluststrom der Reibungswärme vernachlässigt werden. Im Gesamtsystem setzt sich der Wärmeverluststrom \dot{Q}_V aus den Einzelbereichen Plastifizierzylinder (PZ), Einspritzzylinder (EZ) und Einspritzdüse (ED) wie folgt zusammen:

$$\dot{Q}_V = \dot{Q}_{VPZ} + \dot{Q}_{VEZ} + \dot{Q}_{VED} + \underbrace{\dot{Q}_{VRPZ} + \dot{Q}_{VREZ} + \dot{Q}_{VRED}}_{\approx 0} \quad (3.1)$$

$$\dot{Q}_V = \dot{Q}_{VPZ} + \dot{Q}_{VEZ} + \dot{Q}_{VED}$$

In einem mehrschichtigen Rohr, welches von einem warmen Medium durchlaufen wird (siehe Abbildung 3.2), nimmt der Temperaturverlauf von innen nach außen kontinuierlich ab. Das Temperaturgefälle zwischen Medium und Außentemperatur stellt dabei die Triebkraft dar. Die Isolierung bewirkt den größten Wärmetransportwiderstand. Abhängig von den Schichtdicken und den entsprechenden Wärmeleitfähigkeiten λ_k kann der gesamte Wärmeverluststrom an die Umgebung allgemein ermittelt werden durch [6, S. 37 f]:

$$\dot{Q} = \frac{\pi \cdot l \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_{n+1})}{\frac{1}{\alpha_i \cdot d_i} + \sum_{k=1}^n \left(\frac{1}{2 \cdot \lambda_k} \cdot \ln \frac{d_{k+1}}{d_k} \right) + \frac{1}{\alpha_a \cdot d_a}} \quad (3.2)$$

Plastifizierzylinder

Das Heizelement des Plastifizierzylinders befindet sich zwischen der Isolierung (Annahme: zylindrisch) und dem Stahlzylinder (vgl. Abbildung 2.6 auf S. 10). Da das Heizelement als

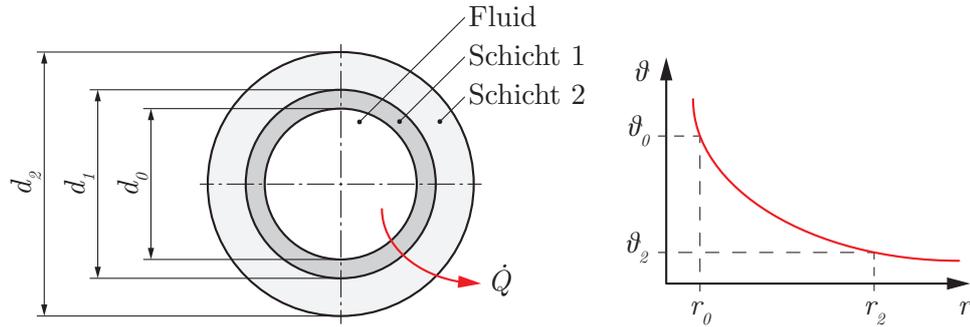


Abbildung 3.2: Allgemeiner Wärmestrom durch ein mehrschichtiges Rohr

primäre Wärmequelle zwischen zwei Wänden positioniert ist, kann Gleichung 3.2 nicht herangezogen werden. Diese ist streng genommen nur für eine einseitig gerichtete Wärmeleitung gültig. Dem hingegen herrscht hier eine parallele Wärmeleitung vor. Die Leistung aus dem Heizelement teilt sich dabei in einen Heizwärmestrom \dot{Q}_H und in einen Wärmeverluststrom \dot{Q}_V , welcher durch die Isolierung hindurch an die Umgebung abgegeben wird, auf. Um die anteiligen Wärmeströme, welche direkt von den vorliegenden Wärmetransportwiderständen R abhängen, wird auf die Analogie zur Elektrotechnik zurückgegriffen [20, S. 25]. In Abbildung 3.3 ist die Parallelschaltung von elektrischen Widerständen und die parallele Wärmeleitung zwischen zwei zylindrischen Wänden gegenübergestellt. Die Aufteilung des Wärmestromes \dot{Q}_{ges} verhält sich dabei analog zur Aufteilung der elektrischen Leistung P_{ges} und die Wärmetransportwiderstände entsprechen den elektrischen Widerständen. In Analogie gilt das Verhalten:

$$\text{elektrisch: } P_{ges} = P_1 + P_2 \quad (3.3)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad (3.4)$$

$$\text{thermisch: } \dot{Q}_{ges} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 \quad (3.5)$$

$$\frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad (3.6)$$

Das lineare Gleichungssystem lässt sich durch Umformung wie folgt lösen:

$$\leadsto \dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

$$\leadsto \dot{Q}_{ges} = \dot{Q}_2 \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_2 = \frac{\dot{Q}_{ges}}{1 + \frac{R_2}{R_1}} \quad (3.7)$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_1 = \dot{Q}_{ges} - \dot{Q}_2 \quad (3.8)$$

Die fehlenden Wärmetransportwiderstände R_1 und R_2 werden mit den entsprechenden Wärmeübergangskoeffizienten α seitens der Luft bzw. des Fluids und mit den Wärmeleitzahlen λ bestimmt ($\lambda_{St} = 50 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$). Der Wärmeübergangskoeffizient α_K ist eine dynamische Größe,

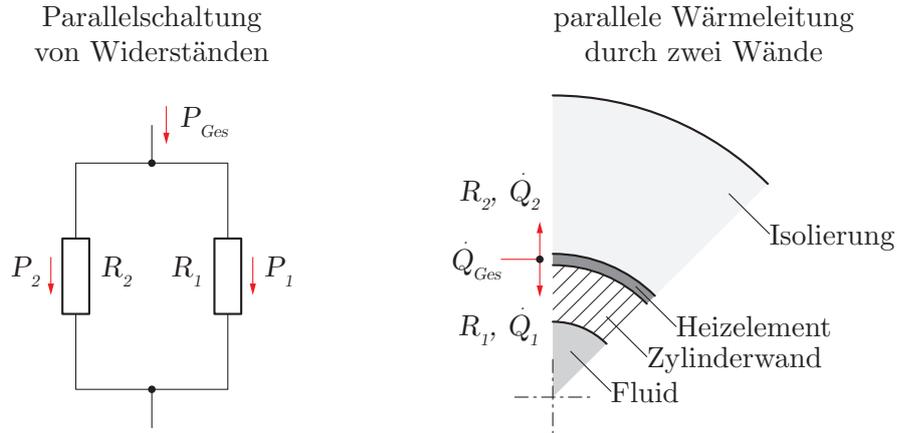


Abbildung 3.3: Analogie zwischen Elektrotechnik und Wärmeübertragung

welche sich aus den Strömungsverhältnissen der Kunststoffschmelze und der vorhandenen Schichtdicke an der wärmeübertragenden Wand ergibt. Als statisch angenommen wird dieser mit $\alpha_K = 800 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$ aus [18, S. 423] entnommen. Für den Wärmeübergang außen wird angenommen, dass die Umgebungsluft ruhend ist ($\alpha_U = 10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$). Für die Stahlkugeln wird der Wärmeleitwiderstand durch die untenstehende Gleichung, betrachtet als Hohlkugel [20, S. 102] herangezogen. Der Innenradius wird dazu klein gewählt, sodass es näherungsweise einer Vollkugel gleicht:

$$R_1 = \underbrace{\frac{\ln \frac{d_{aPZ}}{d_{iPZ}}}{2\pi \cdot \lambda_{St}}}_{\text{Wärmeleitung durch Stahlzylinder}} + \underbrace{\frac{\ln \left(\frac{1}{d_{aKu}} - \frac{1}{d_{iKu}} \right)}{4\pi \cdot \lambda_{St}}}_{\text{Wärmeleitung durch Stahlkugeln}} + \underbrace{\frac{1}{d_{iPZ} \pi \cdot \alpha_K}}_{\text{Konvektion am Fluid}} \quad (3.9)$$

$$R_2 = \frac{1}{d_{aIso} \pi \cdot \alpha_U} + \frac{\ln \frac{d_{aIso}}{d_{iIso}}}{2\pi \cdot \lambda_{Iso}} \quad (3.10)$$

Durch Einsetzen der Wärmetransportwiderstände in die Gleichungen 3.7 und 3.8 erhält man die anteiligen Wärmeströme. Es gilt die Zuordnung:

$$\dot{Q}_1 \equiv \dot{Q}_{HPZ}$$

$$\dot{Q}_2 \equiv \dot{Q}_{VPZ}$$

$$\dot{Q}_{ges} \equiv P_{elZ1}$$

Mit Gleichung 3.7, 3.9 und 3.10 ergibt sich der Wärmeverluststrom für den Plastifizierzylinder:

$$\dot{Q}_{VPZ} = \frac{P_{elZ1}}{1 + \frac{R_2}{R_1}} \quad (3.11)$$

Einspritzdüse

Die Einspritzdüse wird ebenfalls beheizt, um ein Erstarren der Schmelze beim Einspritzen zu vermeiden. Sie ist nicht isoliert, sondern mit einer funktionslosen Blende ummantelt (vgl. Abbildung 2.6 auf S. 10). Der Wärmeverlust ist entsprechend groß. Der Wärmeverluststrom \dot{Q}_{VED} verhält sich analog zu dem des Plastifizierzylinders \dot{Q}_{VPZ} (siehe Gleichung 3.11). Der Wärmeleitwiderstand der Isolierung λ_{Iso} wird lediglich mit dem der Blende λ_{Bl} ausgetauscht. Der Term der Stahlkugel ist hierbei nicht mehr vorhanden.

Einspritzzylinder

Die Geometrie des Einspritzzylinders ist für eine analytische Berechnung der Wärmeübertragung zu komplex, denn im Umlenkkopf herrschen dreidimensionale Temperaturgradienten vor. Genau genommen beeinflusst jedes Heizelement die Nachbarkomponenten, insbesondere die der Plastifiziereinheit, da diese die größte Leistung aufbringt (vgl. Abbildung 2.6 auf S. 10). Oft sind in der Wärmeübertragung Vereinfachungen für Standardquerschnitte – wie Kreise, Quadrate und Rechtecke – legitim, doch in diesem Fall ist selbst eine Abschätzung nicht hinreichend genau. Jedoch ist es besser, als den Wärmeverlust vollständig außer Betracht zu lassen. Es wird hier ausdrücklich darauf hingewiesen, dass eine CFD-Analyse der gesamten Plastifiziereinheit herangezogen werden müsste. Da dies allerdings den Rahmen dieser Ausarbeitung übersteigen würde, wird der Vollständigkeit halber versucht den Wärmeverlust durch einen Wirkungsgrad des Heizelementes abzuschätzen. Dieser definiert sich nach „Nutzen zu Aufwand“ durch:

$$\eta_{Z2} = \frac{\dot{Q}_{HEZ}}{P_{elZ2}} = \frac{\dot{Q}_{HEZ}}{\dot{Q}_{HEZ} + \dot{Q}_{VEZ}} \quad (3.12)$$

$$P_{elZ2} \approx \frac{U_{Z2}^2}{R_{Z2}} \quad (3.13)$$

An dieser Stelle wird eine Schätzung von $\eta_{Z2} \approx 66, \bar{6} \%$ vorgenommen. Dieser Wert bleibt korrekturbedürftig. Er wird in dieser Arbeit nicht weiter bearbeitet.

3.1.2 Heizwärmestrom

Der gesamte Heizwärmestrom \dot{Q}_H ergibt sich aus der Summe der elektrischen Einzelleistungen der Heizelemente. Dieser definiert den Wärmestrom, der über die Heizelemente in das System gelangt. Der vom Kunststoff effektiv aufgenommene Wärmestrom kann dabei abhängig vom Massenstrom abweichen. Im Gesamtsystem setzt sich der Heizwärmestrom \dot{Q}_H aus den Einzelbereichen Plastifizierzylinder (PZ), Einspritzzylinder (EZ) und Einspritzdüse (ED) wie folgt zusammen:

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_{HPZ} + \dot{Q}_{HEZ} + \dot{Q}_{HED} \quad (3.14)$$

Generell kann der Heizwärmestrom \dot{Q}_H über die elektrische Leistung P_{el} ermittelt werden. Unter der vereinfachenden Annahme, dass der elektrische Wirkungsgrad der Heizelemente $\eta_{el} = 100 \%$ beträgt, teilt sich die elektrische Leistung in einen Wärmeverlust- und Heizwärmestrom auf:

$$P_{el} \approx \frac{U^2}{R} = \dot{Q}_V + \dot{Q}_H \quad (3.15)$$

An dieser Stelle ist zu beachten, dass die zur Verfügung stehende elektrische Leistung der Heizelemente effektiv zu 30 % genutzt wird.

Plastifizierzylinder

Im Plastifizierzylinder geht ein Teil der elektrischen Leistung über die Isolierung an die Umgebung verloren (Wärmeverluststrom \dot{Q}_{VPZ}).

Zuvor wurden schon in Unterabschnitt 3.1.1 die Wärmeverlustströme, welche sich komplementär zu den Heizwärmeströmen verhalten, beschrieben. Aus den selben Gleichungen lassen sich nun die Heizwärmeströme ermitteln. Für den Einspritzzylinder vergleiche Gleichungen 3.7 bis 3.11, durch Einsetzen und Zusammenfassen folgt:

$$\dot{Q}_{HPZ} = P_{elZ1} \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_1}}\right) \quad (3.16)$$

oder

$$\dot{Q}_{HPZ} = P_{elZ1} - \dot{Q}_{VPZ} \quad (3.17)$$

Durch Einsetzen der Wärmeleitwiderstände R , siehe Gleichungen 3.9 und 3.10, kann der Heizwärmestrom \dot{Q}_{HPZ} für den Plastifizierzylinder berechnet werden.

Die **Wärmemengen**, welche durch die Heizelemente erbracht werden müssen, bevor sich eine stationäre Wärmeleitung eingependelt hat, sind auch zu berücksichtigen. Es müssen alle vorhandenen Festkörper bis zur Einstellung des thermischen Gleichgewichtes aufgewärmt werden. Betroffen sind dabei die Heizelemente, die Stahlzylinder, der Kunststoff und gegebenenfalls die Stahlkugeln [16, S. 33 f.]. Für die Wärmemenge gilt immer der Grundsatz:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\vartheta \quad (3.18)$$

Die Wärmemenge des Plastifizierzylinders lässt sich beschreiben durch:

$$Q_{PZ} = m_{PZ} \cdot c_{St} \cdot (\vartheta_{2PZ} - \vartheta_U) \quad (3.19)$$

Die Wärmemenge für die Stahlkugel wird mit der Anzahl der Kugeln x_{Ku} multipliziert.

$$Q_{Ku} = x_{Ku} \cdot m_{Ku} \cdot c_{Ku} \cdot (\vartheta_{2Ku} - \vartheta_U) \quad (3.20)$$

Es wird angenommen, dass die Stahlkugeln und der Kunststoff im Betrieb annähernd die selbe Temperatur besitzen. Somit gilt:

$$\vartheta_{2Ku} \approx \vartheta_{2K} \quad (3.21)$$

Anschließend wird die Wärmemenge berechnet, welche zur Plastifizierung der Kunststoffmasse benötigt wird:

$$Q_K = m_K \cdot c_K \cdot (\vartheta_{2K} - \vartheta_U) + \Delta H_f \quad (3.22)$$

Dabei beträgt die Schmelzenthalpie vom Werkstoff PP $\Delta H_f = 207 \frac{\text{J}}{\text{g}}$ [29, S. 12]. Unter Betrachtung aller Wärmemenge und Wärmeströme kann die Aufheizzeit auf Betriebstemperatur überschlägig ausgedrückt werden durch:

$$t_H = \frac{\sum Q}{\dot{Q}_H} \quad (3.23)$$

Einspritzzylinder / -düse

Der Heizwärmestrom des Einspritzzylinders ergibt sich aus dem pauschal angenommenen Wirkungsgrad η_{Z2} , vergleiche Gleichung 3.12.

$$\dot{Q}_{HEZ} = \eta_{Z2} \cdot P_{elZ2} \quad (3.24)$$

Der Heizwärmestrom der Einspritzdüse \dot{Q}_{HED} wird analog zu Gleichung 3.16 und 3.17 berechnet. Es ist lediglich der Wärmeleitwiderstand der Isolierung mit der der Blende auszutauschen und den Term der Stahlkugeln zu vernachlässigen. Die Wärmemengen für den Einspritzzylinder und die Einspritzdüse werden analog zum Plastifizierzylinder berechnet. Die benötigte Wärmemenge des Umlenkkopfes kann im Gegensatz zum Heizwärmestrom genau bestimmt werden, da sie von der Masse abhängt.

3.1.3 Reibungswärmestrom

Reibungswärme kann in unterschiedlicher Weise auftreten. In dem hier betrachteten System tritt sie in Form von Oberflächenreibung und Dissipation auf. Rechnerisch wird lediglich der Reibungswärmestrom des Plastifizier- und Einspritzvorgangs ermittelt. Denn während des Umschaltens findet keine Strömung und somit auch keine Reibung statt. Beim Nachdrücken hingegen fließt ein minimaler Massenstrom, dessen Reibung fällt in der Berechnung jedoch außer Betracht.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_R &= \dot{Q}_{RPZ} + \dot{Q}_{REZ,Ein} + \underbrace{\dot{Q}_{REZ,U_m} + \dot{Q}_{REZ,Na}}_{\approx 0} + \dot{Q}_{RED,Ein} + \underbrace{\dot{Q}_{RED,U_m} + \dot{Q}_{RED,Na}}_{\approx 0} \quad (3.25) \\ \dot{Q}_R &= \dot{Q}_{RPZ} + \dot{Q}_{REZ,Ein} + \dot{Q}_{RED,Ein} \end{aligned}$$

Bei newtonschen Fluiden wandelt sich der Energieverlust in Wärme um, dabei steigt lediglich die Temperatur des Fluides an. Nichtnewtonsche strukturviskose Fluide, wie Polymerschmelzen, verarbeiten den Energieverlust anteilig in Wärme und in viskoelastische Energie. Analytisch lässt sich dieser Sachverhalt für unseren Fall nicht ohne Weiteres beschreiben. Dafür wäre ein rein numerischer Ansatz, welcher alle Nichtlinearitäten berücksichtigen kann, eher angebracht [19, S. 26]. Daher wird in der weiteren Betrachtung die Viskoelastizität nicht berücksichtigt. Vor dem beschriebenen Hintergrund ist der Druckverlust ein Ausdruck für die Reibungswärme, welcher durch die Oberflächenreibung und Dissipation entsteht. Einlauf- und Auslaufeffekte werden hierbei nicht berücksichtigt. Die Kunststoffschmelze wird als inkompressibel angenommen. Die Temperaturerhöhung der Kunststoffschmelze durch Dissipation lässt sich folgendermaßen berechnen [23, S. 15]:

$$\Delta\vartheta_{12} = \frac{\Delta p_{12}}{\rho \cdot c_K} \quad (3.26)$$

Der Ausdruck Δp_{12} stellt den Druckverlust Δp_V über das betrachtete System dar. Um über die Temperaturerhöhung die Reibungswärme zu ermitteln wird folgende Gleichung herangezogen:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta\vartheta \quad (3.27)$$

Mit Gleichung 3.26 und 3.27 ergibt sich:

$$\dot{Q}_R = \frac{\dot{m}_K}{\varrho_K} \cdot \Delta p_V = \dot{V}_K \cdot \Delta p_V \quad (3.28)$$

Plastifizierzylinder

Für die Beschreibung der Reibungswärme des Plastifizierzylinders wird ein Vergleichsobjekt, welcher die Geometrie der Stahlkugeln berücksichtigt, gesucht. Der Ablauf der Ideenfindung und die Bewertung aller Lösungswege wird in Abschnitt 3.2 näher beschrieben. Das Modell *Schüttung in einem Rohr* nach [3] kommt den Ansprüchen nahe. Die Geometrie ist hierbei nahezu identisch. Der obere Bereich des Plastifizierzylinders wird als Rohrabschnitt betrachtet. Die Druckverlustberechnung hierzu findet analog zu der Gleichung 3.41 bis 3.45 statt. In Abbildung 3.4 ist die des unteren Bereiches des PZ als Systemgrenze dargestellt. Die Grundgleichung für den Druckverlust, auf unser System angepasst lautet [33, S. 143] :

$$\Delta p_{VPZ} = \lambda_{Sch} \cdot \frac{l_{Ku}}{d_{hyd}} \cdot \frac{\varrho_K}{2} \cdot \bar{v}_K^2 \quad (3.29)$$

Der hydraulische Durchmesser d_{hyd} wird ermittelt durch:

$$d_{hyd} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\psi}{1 - \psi} \cdot d_{Ku} \quad (3.30)$$

Darin ergibt sich der Hohlraumanteil ψ mit:

$$\psi = \frac{V_l}{V_{ges}} = \frac{V_{ges} - V_{Ku}}{V_{ges}} \quad (3.31)$$

Mit dem Gesamtvolumen V_{ges} vom Plastifizierzylinder und den Kugelvolumen:

$$V_{ges} = \pi \cdot r_{PK}^2 \cdot l_{Ku} \quad (3.32)$$

$$V_{Ku} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_{Ku}^3 \cdot x_{Ku} \quad (3.33)$$

Die Länge l_{Ku} , bzw. die Höhe der gesamten Stahlkugeln wird aus der technischen Zeichnung CATIA V5 entnommen. Die mittlere Geschwindigkeit \bar{v}_K zwischen den Stahlkugeln ist abhängig von der Fließgeschwindigkeit des Kunststoffes, welcher der Arbeitsgeschwindigkeit des Plastifizierkolbens v_{PK} gleichgesetzt wird. Sie ergibt sich aus:

$$\bar{v}_K = \frac{v_K}{\psi} \quad (3.34)$$

Der Druckverlustbeiwert λ_{Sch} ist eine Funktion der Reynolds-Zahl:

$$\text{Re} = \frac{\bar{v}_K \cdot d_{hyd}}{\nu_K} \quad (3.35)$$

Für den streng laminaren Bereich ($\text{Re} < 2$) folgt:

$$\lambda_{Sch} = \frac{64}{\text{Re}} \quad (3.36)$$

Für den gesamten Reynolds-Bereich kann überschlägig angesetzt werden:

$$\lambda_{Sch} \approx 2,2 \cdot \left(\frac{64}{Re} + \frac{1,8}{Re^{0,1}} \right) \quad (3.37)$$

Die kinematische Viskosität lässt sich beschreiben durch:

$$\nu_K = \frac{\eta_K}{\rho_K} \quad (3.38)$$

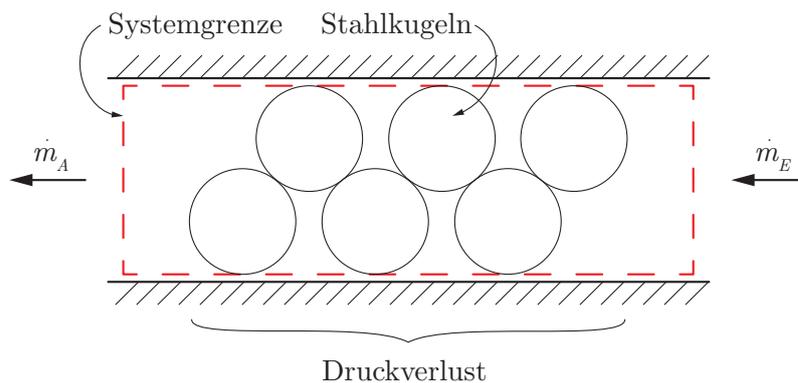


Abbildung 3.4: Systemgrenze des Teilsystems Plastifizierzylinder

Die dynamische Viskosität η ist – bei strukturviskosen nichtnewtonschen Fluiden – eine Funktion der Schergeschwindigkeit und der Temperatur ($\eta = f(\vartheta, \dot{\gamma})$). Die Scherrate $\dot{\gamma}$ wiederum ist eine Funktion der Fließgeometrie und der Fließgeschwindigkeit ($\dot{\gamma} = f(\text{Geometrie}, v_K)$). Für einfache Geometrien – wie Kreisquerschnitte und rechteckige Schlitze – liegen analytische Lösungswege vor, die zumindest eine erste Abschätzung mit einem Fehler von 10–30 % liefern [7] [21, S. 211] [23, S. 51]. Die hier vorliegende Geometrie ist jedoch zu komplex. Zur Ermittlung der Schergeschwindigkeit, die zwischen den dicht gepackten Stahlkugeln entsteht, wird deshalb ein numerischer Lösungsansatz gewählt. Dazu wurde im Voraus ein Modell in CATIA V5 annähernd an das Original entworfen, um es anschließend in die Simulationssoftware ANSYS Fluent einpflegen zu können. Es geht dabei allein um die Ermittlung der Schergeschwindigkeit. Einzelheiten zur Modellierung und zur Simulation werden in Kapitel 4 ab S. 32 beschrieben. Über werkstoffspezifische Kennlinien, wie in Abbildung A.1 auf S. 45 dargestellt, lässt sich die Viskosität grafisch oder durch lineare Interpolation bestimmen. Da es sich neben der Fließgeschwindigkeit, welche von dem Hydraulikzylinder vorgegeben wird, um eine geometrieabhängige Größe handelt, wird für die Simulation vereinfacht die Eigenschaft eines newtonschen Fluids angenommen. Ein weiterer Grund für diese Annahme ist, dass „... an einer so genannten repräsentativen Stelle e_{rep} die Schergeschwindigkeiten von newtonscher und strukturviskoser Substanz gleich sind, ... [30, S. 36 f]“ siehe Abbildung 3.5. Das von *Chmiel und Schümmer* beschriebene Korrekturverfahren (*Konzept der repräsentativen Viskosität*) lautet:

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_s \cdot e_{rep} \quad (3.39)$$

$$e_{rep} = \frac{\pi}{4} \quad (3.40)$$

Die aus der Simulation gewonnene scheinbare Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}_s$ wird somit korrigiert.

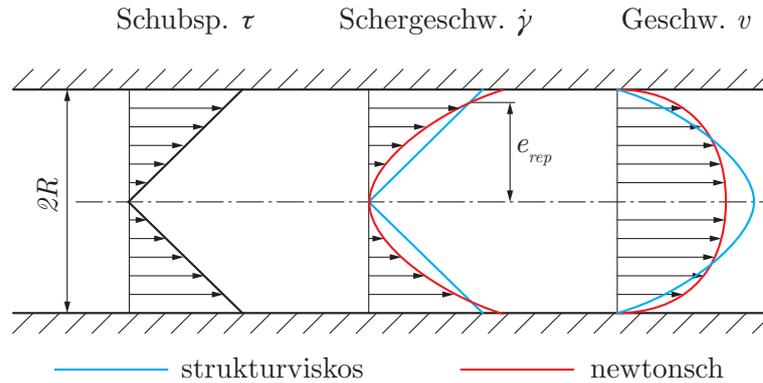


Abbildung 3.5: Profile der Basisgrößen und repräsentative Schergeschwindigkeit für isothermes Fließen [30, S. 36]

Einspritzzylinder

Der Einspritzzylinder wird in zwei Bereiche aufgeteilt (siehe Abbildung 3.6). Der erste beschreibt einen Zylinder, der zweite hingegen beschreibt eine Düse. Der Druckverlust lässt sich durch den Massen-, Impuls- und Energieerhaltungssatz herleiten. Für die einfache Rohrströmung bestimmt sich der Druckverlust und die Schergeschwindigkeit nach [23, S. 52 ff „Extrusions-Werkzeuge für Kunststoffe und Kautschuk“]. Die Verjüngung, bzw. den Übergang vom Einspritzzylinder zur Einspritzdüse, wird mit Hilfe des Düsenleitwertes im nächsten Unterabschnitt ermittelt. Der Druckverlust im EZ lässt sich für strukturviskose Strömungen durch den *Potenzansatz nach Ostwald und de Waele* ermittelt:

$$\Delta p_{V_{EZ}} = \left[\frac{2^m \cdot (m+3) \cdot \dot{V}_K}{\phi \cdot \pi \cdot r_{EZ}^{(m+3)}} \right]^{\frac{1}{m}} \cdot l_{EZ} \quad (3.41)$$

Der Fließexponent m lässt sich aus Abbildung A.2 grafisch ermitteln. Der erste lineare Bereich beschreibt mit $m = 1$ das newtonsche Plateau [22, S. 15]. In dem Übergangsbereich gilt $m \neq const$. Der dritte und lineare Bereich der Kurve beschreibt die Strukturviskosität des Kunststoffes. Dort kann der Fließexponent abgelesen werden. Dieser entspricht genau der Steigung des Graphes, wenn die Achsen vertauscht betrachtet werden. Der Fließexponent liegt für den Spritzgießprozess üblicherweise zwischen 2–4 [24, S. 36]. Die Wertetabelle zu den Diagrammen in Abbildung A.1 und A.2 ist in Tabelle A.1 auf S. 47 dargestellt. Aus dieser kann der Fließexponent m nach

$$m = \frac{\Delta(\lg \dot{\gamma})}{\Delta(\lg \tau)} \quad (3.42)$$

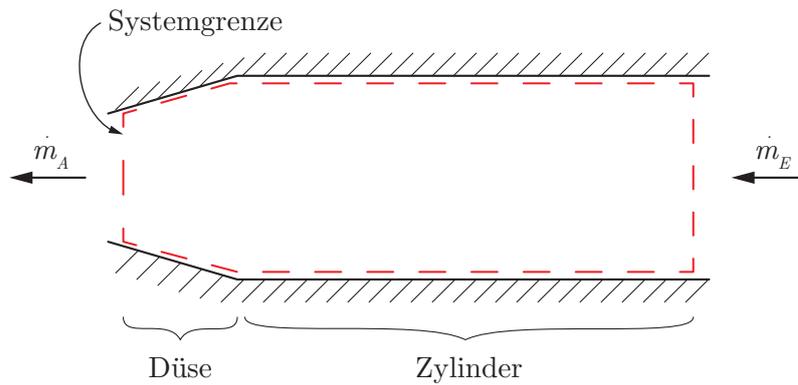


Abbildung 3.6: Systemgrenze des Teilsystems Einspritzzylinder

Für den ausgewählten Kunststoff POLYFORT FPP 20 T beträgt $m = 3,7$ (bei 230°C). Die Fluidität ϕ wird folgendermaßen ermittelt:

$$\phi = \frac{\tau^{1-m}}{\eta} \quad (3.43)$$

Die dynamische Viskosität η wird grafisch anhand des Diagramms in Abbildung A.1 ermittelt. Hierfür wird vorerst die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ berechnet. Sie ist eine Funktion vom betrachteten Radius. Bei $r = 0$ herrscht keine Scherung, demzufolge auch keine Schergeschwindigkeit. An der Rohrwand $r = R$ ist sie maximal. Die Funktion der Schergeschwindigkeit für strukturviskose Medien lautet:

$$\dot{\gamma} = \frac{(m+3) \cdot \dot{V}}{\pi \cdot R^3} \quad (3.44)$$

Für die weitere Berechnung wird die mittlere Schergeschwindigkeit über den Querschnitt verwendet. Die Schubspannung wird wie folgt berechnet:

$$\tau = \frac{\Delta p}{2 \cdot l} \cdot r \quad (3.45)$$

Einspritzdüse

Wie zuvor wird das Teilsystem für die Berechnung unterteilt in einen Zylinder- und in einen Düsenanteil, siehe Abbildung 3.6. Der Zylinderanteil berechnet sich hierbei analog zu dem des Einspritzzylinders. Die Verjüngung der Düse wird durch einen sogenannten Düsenleitwert K' in der Berechnung berücksichtigt [23, S. 62 f]:

$$\Delta p_{VED} = \sqrt[m]{\frac{\dot{V}}{K' \cdot \phi}} \quad (3.46)$$

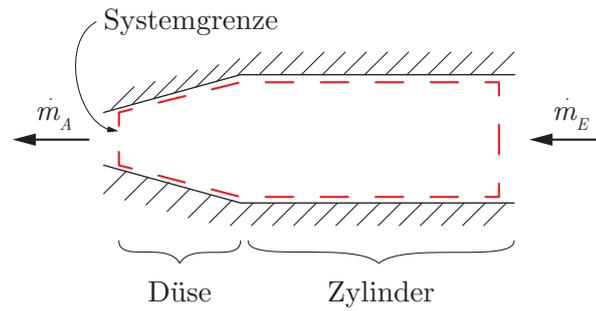


Abbildung 3.7: Systemgrenze des Teilsystems Einspritzdüse

Der Düsenleitwert ist von der Geometrie der Düse und von dem Fließexponenten m des Kunststoffes abhängig. K' für Kegelbohrungen:

$$K' = \frac{\pi}{2^m(m+3)} \cdot \left(\frac{3 \cdot \left(\frac{R_0}{r_0} - 1\right)}{m \cdot l \cdot \left(1 - \left(\frac{r_0}{R_0}\right)^{\frac{3}{m}}\right)} \right) \quad (3.47)$$

Hier drin ist R_0 der Radius des Eintrittsquerschnittes von der Düse und r_0 der des Austrittsquerschnittes ($R_0 > r_0$). Die Schergeschwindigkeit für Kegelbohrungen lautet:

$$\dot{\gamma} = \frac{(m+2) \cdot \dot{V}}{\pi \cdot \bar{r}^3} \quad (3.48)$$

3.1.4 Technische Leistungen

Die Plastifizier- und Einspritzkolben werden hydraulisch betrieben. Das Hydrauliksystem dieser SGM ist in der Bedienungsanleitung der Babyplast [5] abgebildet und ausführlich in der Arbeit [31, S.23 ff] beschrieben. Der Hydraulikdruck wird über ein Elektromotor durch die Hydraulikpumpe erzeugt. Dieser wird durch mehrere Faktoren beeinflusst, unter anderem die Öltemperatur, die Massetemperatur, Fließwiderstände, Inhomogenitäten der Schmelze usw. (siehe Abbildung 3.8). Genau genommen liegt ein Wechselspiel zwischen der Hydraulik und den Spritzgießprozessen, welche zu keinem konstanten Druck führen kann, vor. Aus diesem Grund wird sowohl beim Eindrücken in den Einspritzzylinder, sowohl beim Einspritzen, Umschalten und Nachdrücken der Druck als konstant betrachtet. Die technische Leistung des Plastifizierkolben kann dann allgemein wie folgt berechnet werden:

$$P_{PK} = A_{PK} \int_{v_{PK,0}}^{v_{PK,1}} p_{hyd} \cdot v_{PK} dv_{PK} \quad (3.49)$$

Die Arbeitsgeschwindigkeit des Hydraulikzylinders lässt sich wie folgt berechnen:

$$v_{PK} = \frac{\dot{V}_{hyd}}{A_{ZK}} \quad (3.50)$$

Die Arbeitsgeschwindigkeit v_{PK} entspricht der mittleren Fließgeschwindigkeit \bar{v}_K . Die maximale Fördermenge der Pumpe \dot{V}_{hyd} kann aus Abbildung C.1 auf S. 56 (P3-BR11)

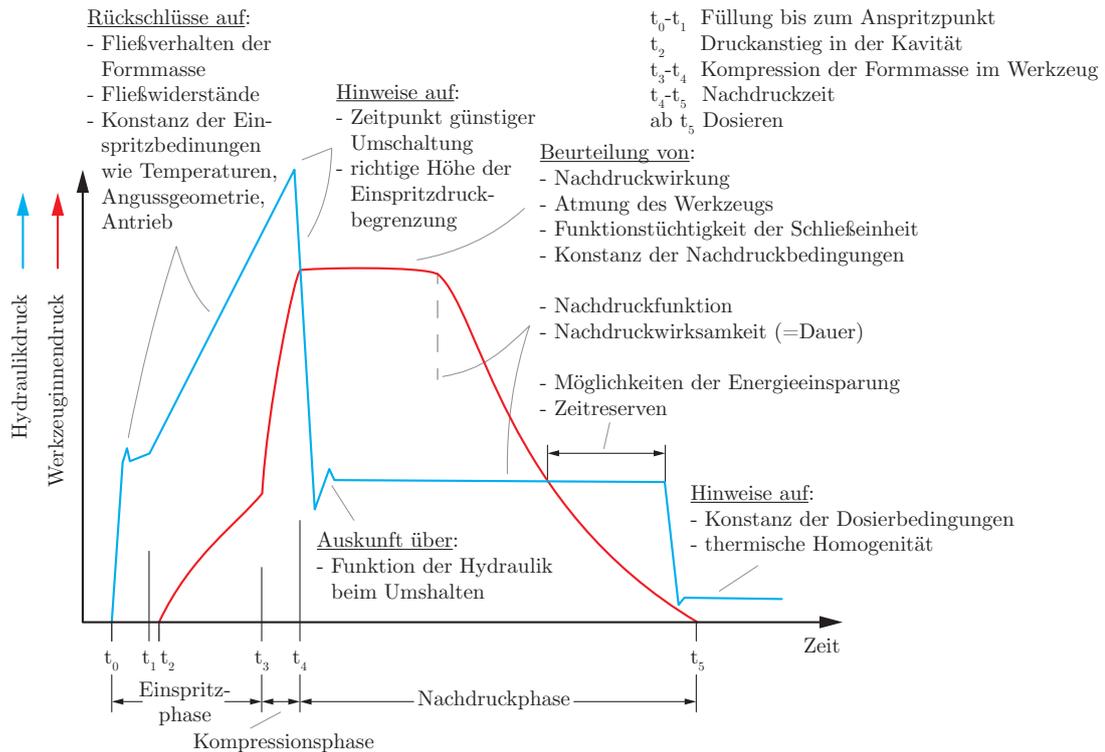


Abbildung 3.8: Schematischer Hydraulikdruckverlauf und zugehöriger Werkzeuginnendruckverlauf während eines Spritzgießzykluses [13, S. 309]

entnommen werden.

Die Leistung des Einspritzkolbens wird analog zu der des Plastifizierkolbens ermittelt (siehe Gleichung 3.49). Gleiches gilt für die Leistung des Umschaltens und Nachdrückens, welche ebenfalls vom Einspritzkolben geleistet werden.

$$P_{Ein} = A_{EK} \int_{v_{EK,0}}^{v_{EK,1}} p_{hyd} \cdot v_{EK} dv_{EK} \quad (3.51)$$

3.1.5 Energieströme des Kunststoffes

Die ein- und austretenden Massenströme führen Energie in das System ein bzw. ab. In der Aufheizphase auf Betriebstemperatur wird kein Kunststoff dem System zugeführt. Im laufenden Prozessbetrieb findet kein gewöhnlich kontinuierlicher, sondern ein diskontinuierlicher Kunststoffmassenstrom statt. Dieser Vorgang wird mit Hilfe des ersten Hauptsatzes für offene Fließprozesse der Thermodynamik beschrieben [10, S. 67 ff]:

$$\sum \dot{Q}_{12} + \sum P_{t_{12}} = \dot{m}_2 \cdot \left(h_2 + \frac{v_2^2}{2} + g \cdot z_2 \right) - \dot{m}_1 \cdot \left(h_1 + \frac{v_1^2}{2} + g \cdot z_1 \right) \quad (3.52)$$

$$\sum \dot{Q}_{12} + \sum P_{t_{12}} = \Delta \dot{H}_{12} + \Delta \dot{E}_{kin_{12}} + \Delta \dot{E}_{pot_{12}} \quad (3.53)$$

Die Kunststoffschmelze wird als inkompressibel angenommen. Über mehrere Prozesszyklen sind die Eingangs- und Ausgangsmassenströme identisch ($\dot{m}_1 = \dot{m}_2$). Die Änderung der Enthalpie ist wie folgt definiert:

$$\Delta \dot{H}_{12} = c_K \cdot \dot{m} \cdot (\vartheta_{2K} - \vartheta_U) \quad (3.54)$$

Die Anfangstemperatur ϑ_{K1} des Kunststoffgranulates entspricht der Umgebungstemperatur $\vartheta_U = 21^\circ\text{C}$ und die Temperatur ϑ_{2K} entspricht der Fließtemperatur. Der Term der potentiellen Energie wird somit vereinfacht zu:

$$z_2 \approx z_1 \Rightarrow \Delta \dot{E}_{pot12} \approx 0 \quad (3.55)$$

Die Kunststoffmasse wird im Plastifizier- und Einspritzzylinder durch den Hydraulikkolben befördert. Die Geschwindigkeit v_1 entspricht der vom Plastifizierkolben v_{PK} und v_2 entsprechend der vom Einspritzkolben v_{EK} , bezogen auf den Austrittsquerschnitt der Einspritzdüse. Diese hängen von der hydraulischen Fördermenge und der Kolbenfläche ab.

3.1.6 Zusammenfassung der Annahmen und Vereinfachungen

In diesem Kapitel werden alle Annahmen und Vereinfachungen aufgelistet, welche über die gesamte Herleitung getroffen wurden [23, S. 63 f]:

- die Reibungswärme wird komplett für das Plastifizieren genutzt, der Anteil des Wärmeverlustes sind somit gleich Null
- Analogie zur Elektrotechnik: Wärmeleitwiderstände verhalten sich analog zu elektrischen Widerständen
- die Stahlkugeln werden als Hohlkugeln mit einem sehr kleinen Innenradius vereinfacht
- elektrische Wirkungsgrade werden mit dem Faktor 1 versehen
- die Reibungswärme beim Umschalten und Nachdrücken sind minimal bzw. gleich Null; diese werden aus diesem Grund vernachlässigt
- Viskoelastizität von Kunststoffen wird hier nicht berücksichtigt
- stationärer Fließprozess
- laminare Strömung
- isotherme Strömung
- inkompessibles Fluid
- Schwerkraft wird vernachlässigt
- einphasige Strömung
- Vernachlässigung der Einlauf- und Auslauffeffekte

- Beim Einspritzen in den Einspritzzylinder und in die Kavität ist der Gegendruck der Umgebungsdruck; schwankende Fließwiderstände werden nicht berücksichtigt
- die potentielle Energie wird vernachlässigt
- Wandhaftung (Stokes'sche Reibung)
- die Geometrien wurden vereinfacht
- Umgebungsluft ruhend
- Wärmeübergangskoeffizient zur Kunststoffschmelze konstant

3.2 Ansätze der Reibungswärme

Nach der erfolglosen Recherche über die entstehende Dissipation während des Spritzgießens in dem zweistufigen Kolbenspritzaggregat, wurde nach Modellen ähnlicher Bauformen gesucht. In diesem Abschnitt wird die methodische Ideenfindung eines Modells, welches zur Beschreibung der Strömung in dem Plastifizierzylinder dienen soll, erläutert. Hierzu werden alle gefundenen Ansätze hinsichtlich der Kriterien bewertet und tabellarisch festgehalten, siehe Tabelle 3.1 auf S. 31. Die Kriterien stehen in der ersten Spalte. Um ein Vergleich herzustellen, wird jedem Kriterium eine Gewichtung, in Summe =1, zugeordnet. Die Scherung des Fluids wird im Wesentlichen von der Geometrie bzw. von der Umlenkung des Kunststoffes beeinflusst (siehe Gleichung 2.1). Deswegen ist sie der wichtigste Aspekt und wird deshalb mit einer Gewichtung von 0,6 versehen. Für die Berechnung der entstehenden Reibungswärme legt der Druckverlust den Grundstein und wird mit der Gewichtung 0,4 berücksichtigt. Die Berechenbarkeit der Schergeschwindigkeit hat die Gewichtung 0,1. Sie ist ohnehin analytisch schwer zu ermitteln, kann jedoch aus numerischen Strömungsanalysen bestimmt werden. Je Kriterium gibt es eine Punkteverteilung von 0-5 Pkt., welche mit der Gewichtung multipliziert und anschließend in der letzten Zeile zu einem Gesamtwert aufsummiert wird. Aus der Summenzeile lässt sich eine Schlussfolgerung darüber ziehen, welcher Ansatz weiterhin verfolgt wird.

Blende: Der Hohlraum zwischen den Stahlkugeln lässt sich auf ein Blendendurchmesser umrechnen. Die Querschnittsverengung beschreibt lediglich nur voluminös die vorhandene Geometrie. Aus strömungstechnischer Sicht jedoch liegt keine Ähnlichkeit vor, denn die Blende stellt ein zweidimensionales Modell dar. Vorteil an dieser Betrachtung ist, dass sich der Druckverlust und die Schergeschwindigkeit aufgrund der einfachen Geometrie, analytisch ohne weiteres berechnen lässt. Die Ergebnisse stimmen mit numerischen und realen Messwerten mit hoher Genauigkeit überein.

Lochscheibe: Über den Hohlraumanteil der dicht gepackten Kugeln kann eine Lochscheibe dimensioniert werden. Auch diese Geometrie beschreibt nicht das dreidimensionale Problem der Stahlkugeln. Die Druckverluste lassen sich analytisch und einfach berechnen. Die Schergeschwindigkeit hingegen wäre erst durch weitere vereinfachende Annahmen berechenbar.

Sieb: Dieses Modell nähert sich zwar der 3D-Geometrie an, jedoch schneidet es hinsichtlich der analytischen Berechnung der Schergeschwindigkeit schlecht ab.

Statische Mischer: Die Geometrie beschreibt die reale Geometrie bzgl. der Dreidimensionalität sehr gut. Es sind sehr viele Bauarten mit unterschiedlichen Mischkonzepten vorhanden. Kugelgeometrien sind dabei wenig enthalten, da diese keine effektive Durchmischung des Fluids, welches die Hauptfunktion statischer Mischer ist, hervorrufen. Jedoch liegt für jeden Bautyp ein experimentell ermittelter Druckverlustbeiwert vor, mit welchem man direkt ein Druckverlust analytisch bestimmen kann. Für die Übersetzung auf das Kugelmodell müsste man lediglich die Kugelgeometrie mit einem Korrekturfaktor berücksichtigen. Problematisch an dieser Herangehensweise ist, dass die Bestimmung der Schergeschwindigkeit nicht möglich ist. Dazu müsste auf eine CFD-Analyse zurückgegriffen werden. [9, S. 348 ff]

Schüttung: Die Schüttung beschreibt mit ihren geometrischen Parametern den vorliegenden Fall im Plastifizierzylinder sehr gut. Gleichungen für die Druckverlustberechnungen liegen vor. Die Schergeschwindigkeit hingegen kann, aufgrund der komplexen Geometrie, nicht analytisch berechnet werden. Mit diesem einzigen Nachteil, dass die Schergeschwindigkeit numerisch berechnet wird, wird dieser Ansatz für die weitere Betrachtung gewählt. [3, Laf1]

Nach Abschluss dieser Schlussfolgerung wurde der Ansatz des Extruders entdeckt. Es existieren analytische Berechnungsformel für die Schergeschwindigkeit und Druckverluste von strukturviskosen Medien. Diese Berechnungen wurden für die Bauteile Einspritzzylinder und Einspritzdüse eingesetzt.

Tabelle 3.1: Bewertung verschiedener Ansätze zur Beschreibung der Reibungswärme

Kriterium	Gew.	Blende		Lochscheibe		Sieb		stat. Mischer		Schüttung	
		Pkt.	Wert	Pkt.	Wert	Pkt.	Wert	Pkt.	Wert	Pkt.	Wert
Geometrieähnlichkeit bzgl. der Scherung des Fluids	0,6	1,0	0,6	2,0	1,2	2,0	1,2	4,0	2,4	5,0	3,0
analytische Berechnung des Druckverlustes Δp	0,2	5,0	1,5	5,0	1,5	5,0	1,5	5,0	1,5	5,0	1,5
analytische Berechnung der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$	0,1	5,0	0,5	3,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Σ	1,0		2,6		3,2		2,7		3,9		4,0

Gew.: Gewichtung, Pkt.: Punkte

4 Modellierung & Simulation

Es wurde zuvor erwähnt, dass die Schergeschwindigkeit der Kunststoffschmelze zwischen den Stahlkugeln des Plastifizierzylinders numerisch ermittelt wird. Ohne auf die Besonderheiten der verwendeten Softwares einzugehen, wird in diesem Kapitel die Vorgehensweise bei der Modellierung bzw. Simulation erläutert und die eingestellten Parameter beschrieben.

4.1 Modellierung in CATIA V5

Das Modell wird vorerst, aufgrund der besseren Handhabbarkeit, in CATIA V5 modelliert. Grundlage für das Modell ist die Detailzeichnung der Einspritzeinheit und die darin gegebenen Maße des Plastifizierzylinders. Als erstes wird eine einzelne Kugel mit $\varnothing 11$ mm als CATPart-Datei erstellt. In diesem Dateiformat wird innerhalb von CATIA ein Bauteil als Solid gespeichert. Als nächstes wird ein Zylinder mit den Abmaßen $130 \times \varnothing 21$ mm, ebenfalls als CATPart-Datei, erstellt. Nachdem beide Solids erzeugt wurden, kann der Zusammenbau zu einer CATProduct-Datei erst erfolgen. Für den Zusammenbau werden zu Beginn 13 Kugeln als Duplikate eingefügt. Diese sollen möglichst dichtestgepackt im Zylinder vorliegen. Hierfür werden zur Hilfe drei Mittellinien erstellt, welche orthogonal zu den Ecken des gleichschenkligen Dreiecks im Querschnitt gerichtet sind, siehe Abbildung 4.1. Für die korrekte räumliche Orientierung werden den Kugeln die Bedingungen gesetzt, dass:

- die Kugelmittelpunkte kongruent zu den Ecken des gleichschenkligen Dreiecks stehen bzw. zu den Hilfslinien
- die Kugeln tangential die Innenwand des Zylinders berühren
- aufeinander folgende Kugeln punktuellen Kontakt zueinander haben

Der Zylinder dient zur Modellierung lediglich als Hilfsobjekt. Dieses wird nicht mehr benötigt und kann deshalb deaktiviert werden. Die 13 Kugeln sind nun dichtestgepackt über drei Mittellinien im Zylinder aneinander gereiht und als CATPart-Datei abgespeichert.

4.2 CFD-Simulation in ANSYS Fluent

Um das Solid in ANSYS Fluent importieren zu können, muss die CATPart-Datei im Format IGES gespeichert werden. Dieses Format ermöglicht einen kompatiblen Austausch ohne Informationsverluste zwischen zwei unterschiedlichen 3D-CAD-Konstruktionssoftwares. In ANSYS Fluent können nun die Kugeln importiert werden. Zur Strömungssimulation benötigt die Software ausschließlich die Geometrie, in welchem das Fluid strömt. Diese wird erzeugt, indem um die Kugelreihen herum einen Zylinder als Solid gesetzt und von diesem die Kugeln logisch und räumlich subtrahiert wird. Übrig bleibt eine zusammenhängende

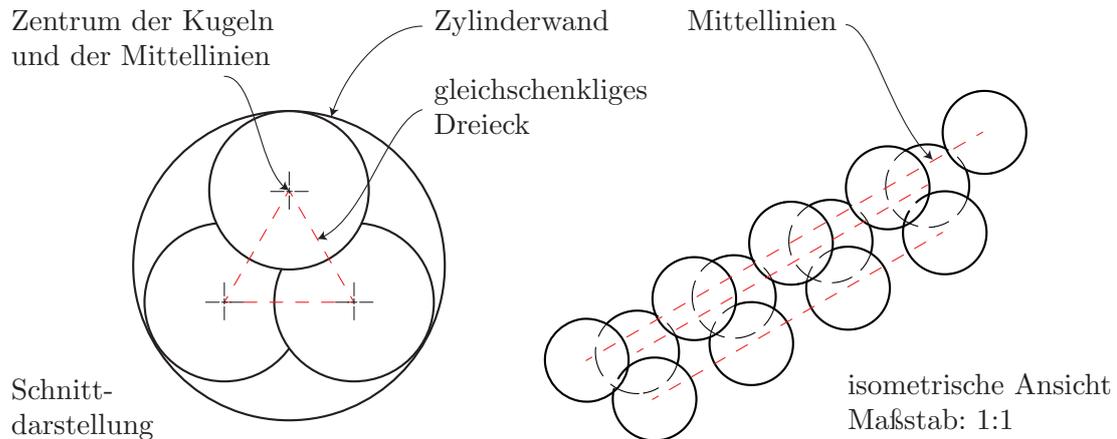


Abbildung 4.1: Darstellung der Kugelreihen in CATIA V5

Geometrie, welche nur vom Fluid ausgefüllt wird. Nachfolgend werden, analog zu den Kategorien des Navigationsfensters in ANSYS Fluent, die vorgenommenen Einstellungen erläutert. Die Kategorien wären:

- Meshing – „Vernetzung des Modells“
- Solution Setup – „Vorgaben von Randbedingungen“
- Solution – „Wahl des Lösungsmodells“
- Results – „Darstellung der Ergebnisse“

4.2.1 Vernetzung des Modells

Das CAD-Modell liegt bisher nur mit geometrischen Daten vor. Durch ein Meshing wird dieses mit variablen Volumenelementen lückenlos vernetzt und somit ein verwendbares Rechengebiet erzeugt. Ein Teil des Netzes wird einerseits durch globale Netzeinstellungen vom System automatisch generiert, andererseits durch anwenderspezifische Einstellungen. Das generierte Netz ist in Abbildung B.3 im Anhang auf S. 51 dargestellt. Global werden für das ganze Modell Tetraeder-Elemente verwendet. An den Randbereichen ist es in CFD-Simulationen üblich, dass diese qualitativ höher bzw. feiner aufgelöst werden. Dazu werden in diesen Bereichen bis zu max. fünf Schichten, bestehend aus Prisma-Elementen, erzeugt, siehe Abbildung B.5 auf S. 53. In ANSYS wird dies durch die Option *Inflation* ermöglicht. Die Randbereiche bestehen hier aus der Mantelfläche des Zylinders und aus den Oberflächen der Kugeln. Alle diesbezüglich vorgenommenen Einstellung sind im Einzelnen in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

4.2.2 Vorgaben von Randbedingungen

In diesem Setup werden dem *Solver* Randbedingungen – wie die Eintrittsgeschwindigkeit in das Rechengebiet, Art des Fluids, Temperatur des Fluids, (in-)stationäre Betrachtung – vorgegeben. In Tabelle 4.2 sind die vorgenommenen Einstellungen zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Zusammenfassung vorgenommener Netzeinstellungen

Parameter	Wert
Standardeinstellungen	
Physikvoreinstellung	CFD
Solver-Voreinstellung	Fluent
Relevanz	100
Elementqualität	CFD
Elementgröße	
Größenfunktion	gleichmäßig
physikgestützte Relevanz	fein
globale Netzgröße bezogen auf	gesamte Baugruppe
Glätten	hoch
Übergang	langsam
Erzeugung der Prismenschichten (Inflation)	
Komponente	wall
Option zur Erzeugung der Prismenschichten	weicher Übergang
Übergangsverhältnis	0,272
max. Anzahl der Schichten	5
Wachstumsrate	1,1
Physikvoreinstellung	CFD
Statistik	
Anzahl der Knoten	53648
Anzahl der Elemente	143803

Tabelle 4.2: Zusammenfassung vorgenommener Setupeinstellungen

Parameter	Wert
Setup	
Type	Pressure-Based
Velocity Formulation	Absolute
Time	Steady
Elementqualität	CFD
Model	Viscous → Laminar
Materials	Fluid → water-liquid
Cell Zone Conditions	Volume → fluid (water-liquid)
Boundary Conditions	inlet: 0,029–0,059 kg/s vgl. Abbildung B.3

Tabelle 4.3: Zusammenfassung vorgenommener Lösungseinstellungen

Parameter	Wert
Solution	
Solution Methods	Scheme → Simple Gradient → Least Squares Cell Based Pressure → Second Order Momentum → Second Order Upwind
Solution Initialization	Hybrid
Calculation	Number of Iterations → 200

4.2.3 Wahl des Lösungsmodells

In ANSYS wird vereinfacht mit Wasser als newtonschen Fluid die Strömung simuliert. Darauf basierend werden die Lösungsmodelle aus Tabelle 4.3 gewählt. Die Verläufe der Residuen in Abbildung B.6 beweisen, dass das gewählte Modell verlässlich konvergiert. Nach einer Anzahl von 200 Iterationen stellt sich ein Plateau mit geringsten Abweichungen ein.

4.2.4 Darstellung der Ergebnisse

Die Ergebnisse werden hauptsächlich in so genannten *Contourplots* realisiert. Die Darstellung dieser greift auf Auswerteebenen zurück, welche vom Anwender vorher fest definiert werden. Damit die Auswertungen verschiedener Parameteruntersuchungen vergleichbar sind, werden die Auswerteebenen generell nicht verändert. Dazu werden ein mittig gerichteter Längsschnitt und zwei Querschnitte gesetzt. Die Auswerteebenen sind in Abbildung B.2 auf S. 50 dargestellt. Innerhalb dieser Contourplots werden die Farbfelder zu den Geschwindigkeiten v (Abbildung B.7) und den Scherraten $\dot{\gamma}$ (Abbildung B.8) dargestellt.

5 Validierung & Auswertung der Reibungswärme

In diesem Kapitel wird die Reibungswärme, welche in der Plastifizier- und Einspritzeinheit entsteht, ausgewertet und grafisch dargestellt. In allen aufgeführten Diagrammen wird die Reibungswärme in der Einheit Watt als Ordinate und die entsprechende Kolbengeschwindigkeit in $\frac{\text{m}}{\text{min}}$ als Abzisse abgebildet. Hierfür werden die Daten aus der technischen Zeichnung, der Bedienungsanleitung und den Datenblätter entnommen. Die Plastifizierzeit wird mit 1–2 s und die Einspritzzeit mit 0,1 s angegeben.

5.1 Plastifizierzylinder (Schüttung)

Allgemein kann man in Abbildung 5.1 (siehe Werte in Tabelle 5.1) erkennen, dass durch Steigerung der Kolbengeschwindigkeit die Reibungswärme zunimmt. Im Vergleich zu der Reibungswärme, welche im Einspritzzylinder und in der Einspritzdüse entsteht, fällt diese relativ klein aus. Grund hierfür ist die Druckverlustformel der Schüttung, welche die Fluidität ϕ und den Fließexponenten m außer Acht lässt. Infolgedessen kann dieses Ergebnis nicht mit den übrigen Teilsystemen verglichen werden.

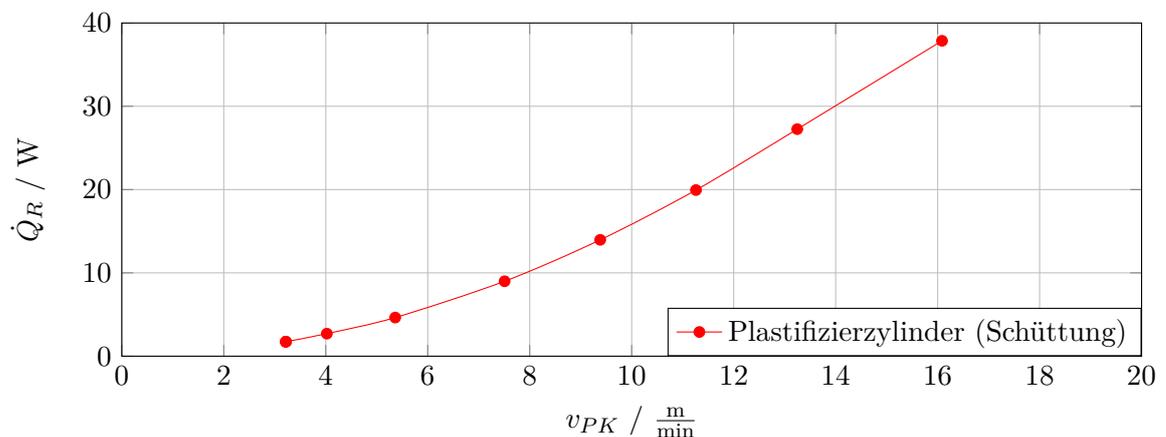


Abbildung 5.1: Reibungswärmestrom im Plastifizierzylinder (Schüttung) abhängig von der Kolbengeschwindigkeit

Tabelle 5.1: Reibungswärme im Plastifizierzylinder (Schüttung) abhängig von der Kolbengeschwindigkeit

$v_{PK} / \frac{\text{m}}{\text{min}}$	\dot{Q}_{RPZ} / W
16,086	37,857
13,247	27,253
11,260	19,940
9,383	13,966
7,507	8,992
5,362	4,637
4,021	2,706
3,217	1,739

5.2 Einspritzzylinder / -düse

Die Berechnung der Reibungswärme des Einspritzzylinders und der Einspritzdüse hingegen berücksichtigt die strukturviskosen Fließeigenschaften der Polymerschmelze. Die Rohrabschnitte können ohne Weiteres analytisch ermittelt werden. Die Druckverlustrechnung der Düsen kann analytisch erfolgen, jedoch nur für Düsen, die $l/d < 10$ erfüllen. Sowohl die Verjüngung des Einspritzzylinder, als auch der Einspritzdüse erfüllen diese Bedingungen nicht. Für unseren Anwendungsfall wird daher das Diagramm in Abbildung 5.2 zur Abschätzung herangezogen. Mit

$$\tau_W = \frac{\Delta p_V \cdot r}{2 \cdot l} \quad (5.1)$$

kann der Druckverlust der Düse abgelesen werden. Dieser Wert wird anschließend zu dem Druckverlust im Rohrabschnitt des jeweiligen Teilsystems aufaddiert. Auch in Abbildung 5.3 (siehe Werte in Tabelle 5.2) ist zu erkennen, dass die Reibungswärme mit der Kolbengeschwindigkeit steigt. Die Reibung in der Einspritzdüse ist im Vergleich zum Einspritzzylinder höher. Dies liegt hauptsächlich daran, dass gemäß Kontinuitätsgesetz in kleinen Querschnitten die Fließgeschwindigkeit und gleichzeitig die Schergeschwindigkeit höher ausfällt. Der unetwige Verlauf der Graphen kann zum einen auf die lineare Interpolation der dynamischen Viskosität η und zum anderen auf die beschränkte Ablesegenauigkeit des Druckverlustes im Düsenabschnitt zurückgeführt werden.

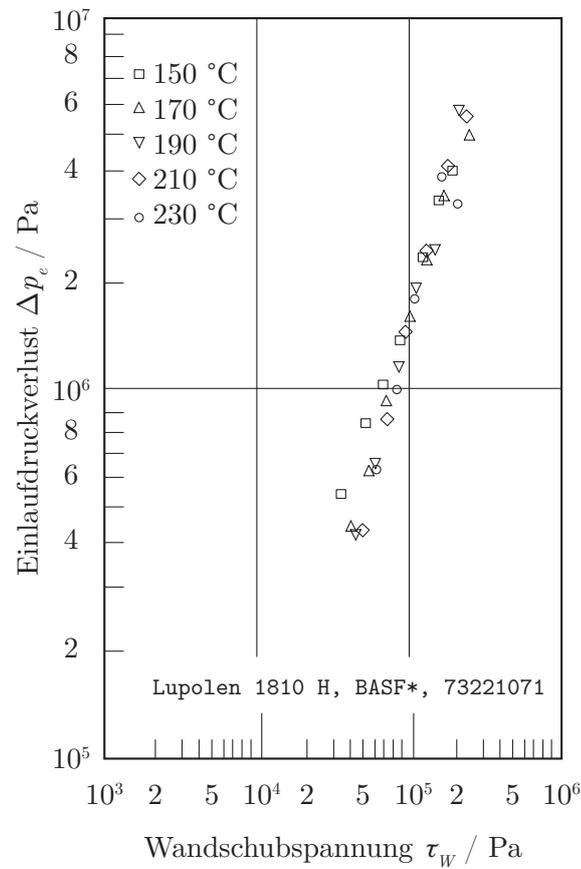


Abbildung 5.2: Zusammenhang von Einlaufdruckverlust und Wandschubspannung [23, S. 127]

Tabelle 5.2: Reibungswärme im Einspritzzylinder und in der Einspritzdüse abhängig von der Kolbengeschwindigkeit

$v_{EK} / \frac{\text{m}}{\text{min}}$	\dot{Q}_{REZ} / W	\dot{Q}_{RED} / W
34,484	181,280	576,394
28,736	167,156	411,862
22,989	153,906	269,853
19,158	125,956	184,241
17,242	110,693	167,678
11,495	54,356	99,122
8,621	32,636	60,399
6,897	20,742	40,626

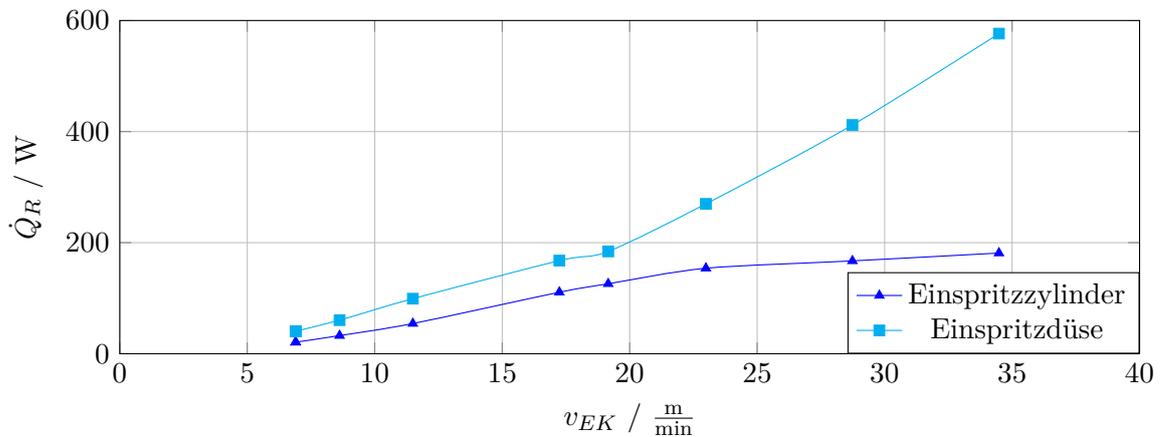


Abbildung 5.3: Reibungswärmestrom im Einspritzzylinder und in der Einspritzdüse abhängig von der Kolbengeschwindigkeit

5.3 Plastifizierzylinder (Ersatzsystem)

Zuvor wurde erwähnt, dass die Berechnung des Plastifizierzylinder mit den Formeln der Schüttung nicht mit den übrigen Teilsystemen vergleichbar ist. Um die Reibungswärme des Plastifizierzylinders unter Berücksichtigung der strukturviskosen Fließeigenschaften darzustellen, wird ein Ersatzsystem mit einem Ersatzdurchmesser berechnet. Hiermit wird die Reibungswärme, durch Einsetzten der aus ANSYS Fluent gewonnenen Schergeschwindigkeiten, ermittelt. Die Reibungswärme, welche im leeren Rohrabschnitt des Plastifizierzylinders entsteht, wird hinzu addiert.

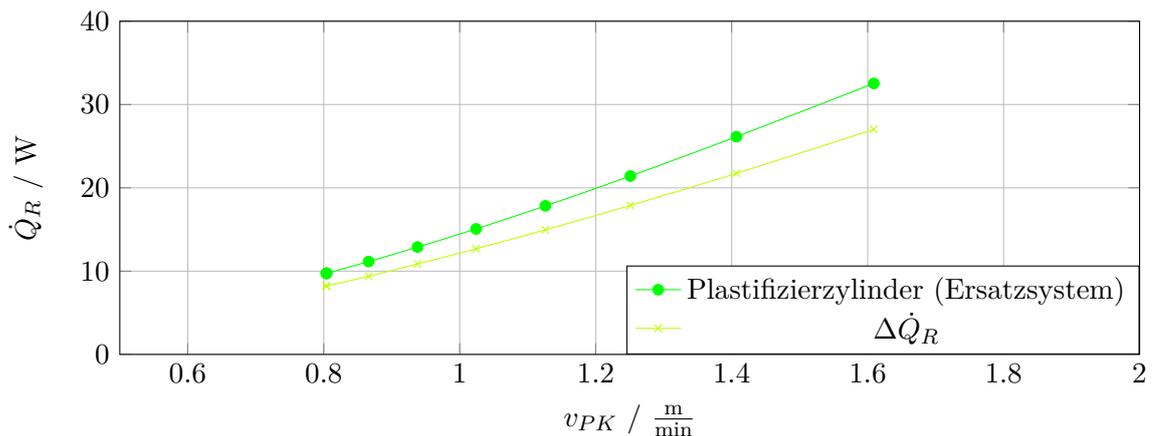


Abbildung 5.4: Reibungswärmestrom im Plastifizierzylinder (Ersatzsystem) abhängig von der Kolbengeschwindigkeit

In Abbildung 5.4 (siehe Werte in Tabelle 5.3) ist zu erkennen, dass sich die Reibungswärme analog zu den übrigen Teilsystemen verhält. Sie ist jedoch absolut gesehen kleiner als die Reibungswärme in der Einspritzeinheit. Dies liegt an den Querschnitten bzw. an den Fließgeschwindigkeiten.

Um den Einfluss der Stahlkugeln darzustellen, wird der gesamten Reibungswärme der Anteil, welcher im leeren Plastifizierzylinder entsteht, abgezogen. Die Differenz $\Delta\dot{Q}_R$ beschreibt den Anteil der Reibungswärme, welchen die Kugeln zusätzlich durch Scherung erzeugen. Die Schmelzenergie beträgt bei einer Plastifizierzeit von $t = 0,7\text{ s}$ in etwa $\dot{Q}_f = 2037\text{ W}$. Die Reibungswärme aus der Scherung durch die Stahlkugeln ergibt einen Anteil von 1,33 % bezogen auf die Schmelzenergie in einem Plastifizierzyklus. Im Hinblick auf die elektrische Leistung des Heizelementes von $P_{el} = 1000\text{ W}$, wobei nur 30 % effektiv genutzt werden, über eine Zykluszeit von 15 s, beträgt die eingebrachte Wärmemenge 4500 J. Die Reibungswärmemenge bei einer Plasifizierzeit von 0,7 s entspricht 18,9 J. Im Verhältnis macht die Reibung einen Anteil von 0,42 % aus. Die maximale Kolbengeschwindigkeit ist durch die maximale Fördermenge der Hydraulikpumpe eingeschränkt, siehe Abbildung C.1. Bei einer maximalen Auslastung der Pumpe entsteht eine Reibungswärme von etwa 50 W.

Tabelle 5.3: Reibungswärme im Plastifizierzylinder (Ersatzsystem) abhängig von der Kolbengeschwindigkeit

$v_{PK} / \frac{\text{m}}{\text{min}}$	\dot{Q}_{RPZ} / W	$\Delta\dot{Q}_{RPZ}$
1,609	32,529	27,020
1,407	26,142	21,734
1,251	21,416	17,890
1,126	17,839	14,958
1,024	15,070	12,680
0,938	12,893	10,869
0,866	11,151	9,383
0,804	9,737	8,209

6 Fazit und Ausblick

Das Ziel dieser Bachelorarbeit war die Einführung in das Themengebiet der Kolbenplastifizierung und die Abbildung bzw. mathematische Herleitung der Energieströme in der Plastifizier- und Einspritzeinheit. Dabei ist der Schwerpunkt der Herleitung die entstehende Reibungswärme durch Dissipation und das Verständnis für die Fließeigenschaften von Kunststoffschmelzen. Abschließend sollte eine Bewertung der Ergebnisse erfolgen.

Die Einführung in das Themengebiet beginnt im zweiten Kapitel mit den Grundlagen. Hierzu wurden Literaturen in Form von Büchern, Internetauszügen, Bachelor- und Masterarbeiten genutzt. Wichtig für die Bearbeitung dieses Themas ist das Verständnis des Fließprozesses nicht newtonscher Fluide. Hierfür wurden die relevanten Eigenschaften des eingesetzten Thermoplasts Polypropylen, der Aufbau der Maschine und der Ablauf des Spritzgießprozesses näher beschrieben.

Im dritten und wichtigsten Kapitel wird der Schwerpunkt dieser Arbeit geschildert. Die Abbildung und die Herleitung der Energieströme in der Plastifizier- und Einspritzeinheit werden ausführlich beschrieben. Hierfür wurden, neben der Literaturrecherche, Fachwissen von Professoren aus der eigenen Hochschule eingeholt, welche den Themengebieten der Kunststofftechnik (Prof. Dr.-Ing. Friedrich Ohlendorf) und der Thermodynamik (Prof. Dr.-Ing. Achim Schmidt) mächtig sind. Das Kapitel wird unterteilt in die Energieströme und die drei Teilsysteme Plastifizierzylinder, Einspritzzylinder und Einspritzdüse. Der größte Anteil der Recherche bezog sich auf die Reibungswärme im Plastifizierzylinder, welche hauptsächlich durch die Dissipation, infolge von Scherung und Umlenkung des Fluides, durch die Stahlkugeln entsteht. Es stellte sich im Verlauf der Bearbeitung heraus, dass die analytische Berechnung der Reibungswärme strukturviskoser Medien äußerst komplex ist. Aus diesem Grund wurden weitere Hilfsprogramme wie CATIA V5 und ANSYS Fluent herangezogen. Aus diesen Programmen wurde die Schergeschwindigkeit numerisch ermittelt. Zur Abschätzung des Druckverlustes wurde für die vorliegenden Geometrie ein Vergleichsmodell gesucht. Die Ideenfindung wird am Ende des dritten Kapitels vorgestellt. Auch der Heiz- und Wärmeverluststrom des Einspritzzylinders müsste mit einem Hilfsprogramm ermittelt werden. Da dies aber den Rahmen der Arbeit strapazieren würde, wurde schätzungsweise ein Wirkungsgrad angenommen, welcher korrekturbedürftig bleibt. Nach dieser Ausarbeitung besteht weiterhin ein Bedarf diese Arbeit im Rahmen weiterer Projekte fortzuführen. Grund hierfür sind die getroffenen Vereinfachungen und Annahmen. Eventuell müsste dazu ein Hilfsprogramm, wie z. B. ANSYS Polyflow, herangezogen werden, welches unter anderem:

- die viskoelastischen Fließeigenschaften von Polymerschmelzen
- die Wärmeleitverhältnisse im Einspritzzylinder
- die Wechselwirkung zwischen der technischen Leistung und dem Fließwiderstand der Schmelze

berücksichtigen kann. Durch den unerwarteten zusätzlichen Aufwand, wurde nur ein Teil dieser Arbeit in der Simulationssoftware abgebildet und ausgewertet. Die Ergebnisse wurden im vierten Kapitel ermittelt und im fünften Kapitel bewertet.

Der Hersteller Babyplast gab an, dass die Plastifizierung in dieser Anlage materialschonend ist und hauptsächlich durch die Heizelemente erfolgt. In einem Plastifizierzyklus macht die Reibungswärme im Verhältnis zur eingebrachten elektrischen Leistung nur 0,42 % aus. Dieser Betrag kann auch bei maximaler Auslastung der Hydraulikpumpe – dann sind es 0,7 % – nicht enorm erhöht werden. Die Kernaussage aus der Masterarbeit [16] wird somit ebenfalls bestätigt. Die Plastifizierung im Schneckenplastifizierkonzept erfolgt größtenteils durch die Reibungswärme [34], in der Kolbenplastifizierung hingegen durch die Heizelemente.

Literaturverzeichnis

- [1] *Matom Betriebs AG - Aufbau einer Spritzgussmaschine.* <http://matom.ch/index.php/produkte-service?id=98>, Abruf: 17.03.2017
- [2] *Kunststoff Spritzgießen mit höchster Präzision.* <http://www.eneff-industrie.info/projekte/2011/q-4/kunststoff-spritzgiessen-mit-hoechster-praezision/seite/1/>. Version: Oktober 2004, Abruf: 17.03.2017
- [3] *Kapitel Laf 1: Druckverlust bei Strömung durch Schüttungen.* In: *VDI-Wärmeatlas*. 10. Auflage. VDI e.V, 2006
- [4] *Kunststoff Datenbank.* <http://www.campusplastics.com>. Version: 2017, Abruf: 06.04.2017
- [5] BABYPLAST (Hrsg.): *Bedienungsanleitung 6/10P*. 4. Auflage. babyplast
- [6] BAEHR, Hans-Dieter ; STEPHAN, Karl: *Wärme- und Stoffübertragung*. 8. Auflage. Springer Verlag, 2013
- [7] BEAUMONT, John P.: *Auslegung von Anguss und Angusskanal*. Hanser Verlag, 2012
- [8] BONNET, Martin: *Kunststofftechnik*. 3. Auflage. Köln : Springer Vieweg, 2016
- [9] *Kapitel Mischgüte und Druckverlust statischer Mischer mit verschiedenen Bauformen.* In: BRÜNEMANN, H. ; JOHN, G.: *Chemie-Ing.-Techn. 43. Jahrg.*. Bd. Nr. 6. Badische Anilin- & Soda-Fabrik AG, 1971
- [10] CERBE, Günter ; WILHELMS, Gernot: *Technische Thermodynamik*. 17. Auflage. Hanser Verlag, 2016
- [11] CHRISTMANN KUNSTSTOFFTECHNIK GMBH (Hrsg.): *Babyplast Handbuch*. Christmann Kunststofftechnik GmbH, http://www.babyplast.de/fileadmin/user_upload/Produkte/Broschueren/msm_broschuere.pdf, Abruf: 16.03.2017
- [12] CHRISTMANN KUNSTSTOFFTECHNIK GMBH (Hrsg.): *Klein- und Kleinstteile effizient und erfolgreich produzieren*. Christmann Kunststofftechnik GmbH, 2017
- [13] FRIEDRICH, Johannaber ; MICHAELI, Walter: *Handbuch Spritzgießen*. 2. Auflage. Carl Hanser Verlag, 2004
- [14] GEIGER, K.: Analytische Berechnung einfacher Scherströmungen aufgrund eines Fließgesetzes vom Carreauschen Typ. In: *Acta* 23 (1984), S. 355–367
- [15] HÄBERLEIN, Prof. Dr. M.: *HTML-Vorlesungsskript Kunststofftechnologie*. <http://www.mhaeberl.de/KUT/13ThermischV.htm>. Version: Februar 2017, Abruf: 17.03.2017

- [16] HAUTAU, Anja: *Abbildung einer Produktionsstätte der Spritzgusstechnik mit Hilfe der Simulationssoftware Dymola*. Masterarbeit, 2015
- [17] JAROSCHEK, Christoph: *Spritzgießen für Praktiker*. 3. Auflage. Carl Hanser Verlag, 2013
- [18] KOHLGRUEBER, Klemens: *Der gleichläufige Doppelschneckenextruder: Grundlagen, Technologie, Anwendungen*. Hanser Verlag, 2007
- [19] KUNSTSTOFFTECHNIK, VDI-Gesellschaft: *Der Extruder als Plastifiziereinheit*. VDI-Verlag, 1977
- [20] MAREK, Rudi ; NITSCHKE, Klaus: *Praxis der Wärmeübertragung*. 2. Auflage. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2010
- [21] MENGES, Georg ; MICHAELI, Walter ; MOHREN, Paul: *Spritzgieß-Werkzeuge*. 5. Auflage. Hanser Verlag, 1999
- [22] MERTEN, Armin: *Untersuchungen zu Fließinstabilitäten bei der Extrusion von Polymeren mit der Laser-Doppler Anemometrie*. Erlangen, Technische Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg, Diss., 2005
- [23] MICHAELI, Walter: *Extrusions-Werkzeuge für Kunststoffe und Kautschuk*. 2. Auflage. München Wien : Carl Hanser Verlag, 1991
- [24] MICHAELI, Walter ; GREIF, Helmut ; KRETZSCHMAR, Gernot ; EHRIG, Frank: *Technologie des Spritzgießen*. 3. Auflage. München : Carl Hanser Verlag, 2009
- [25] OSTWALD, Wolfgang: Über die Geschwindigkeitsfunktion der Viskosität disperser Systeme. In: *Kolloid-Zeitschrift* (1925), S. 99–117
- [26] PAHL, M.: *Praktische Rheologie der Kunststoffschmelzen und Lösungen*. VDI-Verlag Düsseldorf, 1982
- [27] PRANDTL, Ludwig: Ein Gedankenmodell zur kinetischen Theorie der festen Körper. In: *ZAMM* 8 (1928), Nr. 2, S. 85–106
- [28] SCHRÖDER, Bernd: *Kunststoffe für Ingenieure*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014
- [29] SCHUBNELL, Dr. M.: *Berstimmung der Kristallinität bei Polymeren aus DSC Messungen*. 2001
- [30] STITZ, Siegfried: *Spritzgießtechnik*. 2. Auflage. München : Carl Hanser Verlag, 2004
- [31] TÖNGES, Jannik: *Simulation der Energieverbraucher einer Spritzgießmaschine*. Bachelorarbeit, Dezember 2016
- [32] VINOGRADOV ; MALKIN: Rheological properties of polymer melts. In: *TOC* 4 (1966), S. 135–154
- [33] WAGNER, Walter: *Strömung und Druckverlust*. 7. Auflage. Vogel Fachbuch, 2012
- [34] WITT, Jonas: *Energieströme in der Spritzgussproduktion*. Bachelorarbeit, 2015

A Werkstoff POLYFORT FPP 20 T

A.1 Diagramme

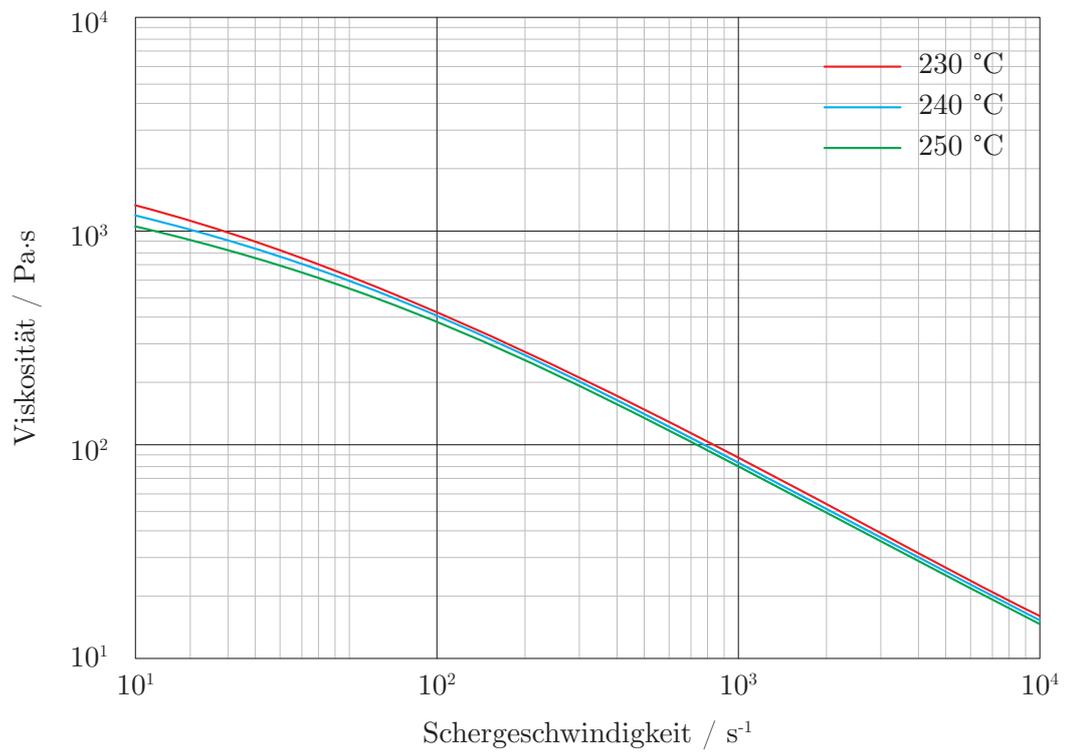


Abbildung A.1: Viskositätsfunktion von POLYFORT FPP 20 T [4]

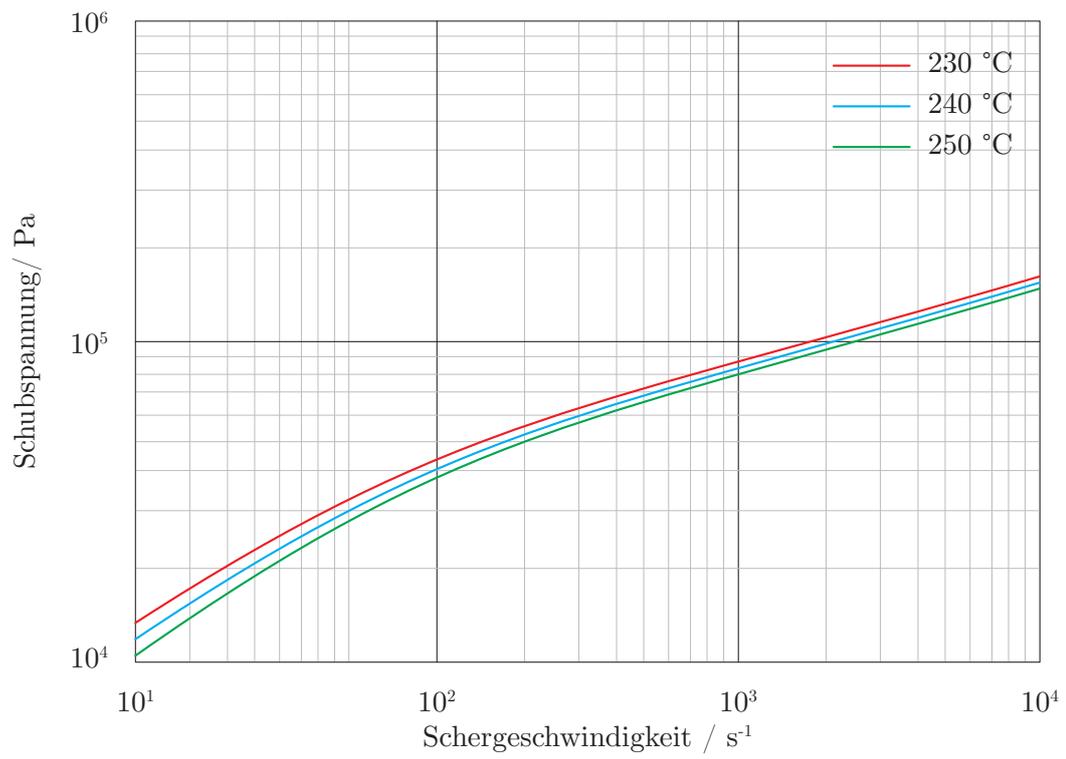


Abbildung A.2: Fließfunktion von POLYFORT FPP 20 T [4]

A.2 Wertetabelle

Tabelle A.1: Wertetabelle zur Viskositäts- und Fließfunktion von POLYFORT FPP 20 T [4]

Temperatur ϑ / °C	Scherrate $\dot{\gamma}$ / $\frac{1}{s}$	Schubspannung τ / Pa	dyn. Viskosität η / Pa·s
230	10	13392,4	1339,24
	100	43082,8	430,828
	500	71266,5	142,533
	1000	86460,9	86,4609
	5000	133299	26,6598
	10000	160204	16,0204
240	10	11876,3	1187,63
	100	40523,5	405,235
	500	67918,2	135,836
	1000	82553,1	82,5531
	5000	127471	25,4942
	10000	153229	15,3229
250	10	10554,1	1055,41
	100	38512,6	381,526
	500	64857,8	129,716
	1000	78996,2	78,9962
	5000	122187	24,4374
	10000	146909	14,6909

A.3 Werkstoffdatenblatt

CAMPUS® Datenblatt

POLYFORT® FPP 20 T - PP-T20
A. Schulman GmbH



Produkttext

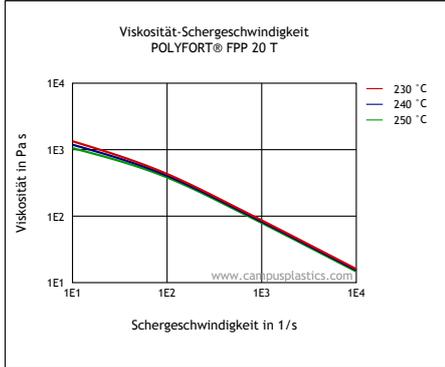
20% talkumverstärktes PP-Homopolymer

Rheologische Eigenschaften	Wert	Einheit	Prüfnorm
Schmelzevolumenrate, MVR	11	cm ³ /10min	ISO 1133
Temperatur	230	°C	ISO 1133
Belastung	2.16	kg	ISO 1133
Mechanische Eigenschaften	Wert	Einheit	Prüfnorm
Zug-Modul	2600	MPa	ISO 527-1/-2
Streckspannung	33	MPa	ISO 527-1/-2
Streckdehnung	6	%	ISO 527-1/-2
Charpy-Schlagzähigkeit, +23°C	38	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy-Schlagzähigkeit, -30°C	14	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy-Kerbschlagzähigkeit, +23°C	4	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Charpy-Kerbschlagzähigkeit, -30°C	2	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Thermische Eigenschaften	Wert	Einheit	Prüfnorm
Formbeständigkeitstemperatur, 1.80 MPa	58	°C	ISO 75-1/-2
Formbeständigkeitstemperatur, 0.45 MPa	109	°C	ISO 75-1/-2
Vicat-Erweichungstemperatur, 50°C/h 50N	84	°C	ISO 306
Brennbarkeit bei nominal 1.5mm	HB	class	IEC 60695-11-10
geprüfte Probekörperdicke	1.5	mm	IEC 60695-11-10
Yellow Card vorhanden	Yes	-	-
Brennbarkeit bei Dicke h	HB	class	IEC 60695-11-10
geprüfte Probekörperdicke	3.0	mm	IEC 60695-11-10
Yellow Card vorhanden	Yes	-	-
Andere Eigenschaften	Wert	Einheit	Prüfnorm
Dichte	1060	kg/m ³	ISO 1183

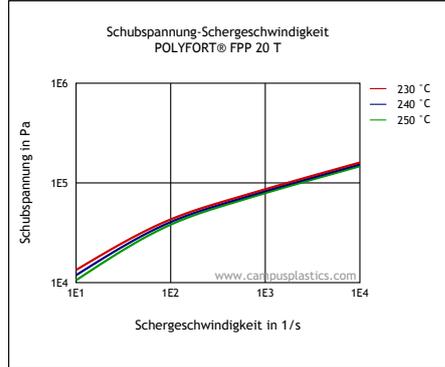
POLYFORT® FPP 20 T - PP-T20
A. Schulman GmbH

Diagramme

Viskosität-Schergeschwindigkeit



Schubspannung-Schergeschwindigkeit



Merkmale

Verarbeitungsmethoden

Spritzgießen

Regionale Verfügbarkeit

Nordamerika, Europa, Asien/Pazifik, Süd und Zentral-Amerika,
Nahost/Afrika

Weitere Informationen

Spritzgießen

VORBEHANDLUNG; Vorbehandlung

Vortrocknung normalerweise nicht notwendig (2-4h / 80 °C)

VERARBEITUNGSVERFAHREN ;Verarbeitung:

Schmelzetemperaturbereich 230 - 270 °C

ch

Werkzeugtemperaturbereich 40 - 70 °C

ch

Die Angaben zu unseren Produkten stellen typische Eigenschaftswerte dar, wie sie an naturfarbenen ISO-Prüfkörpern ermittelt wurden, falls in der Produktbezeichnung nicht anders angegeben ist. Sie stellen keine Zusicherung bestimmter Eigenschaften dar. Der Verarbeiter hat unsere Produkte vor der Verwendung eigenen Prüfungen und Versuchen zu unterziehen. Dies gilt insbesondere auch für die Eignung für einen bestimmten Verwendungszweck. Gleiches gilt sinngemäß für unsere sonstigen anwendungstechnischen Auskünfte und Beratungen in Wort und Schrift. Im Übrigen gelten unsere allgemeinen Geschäftsbedingungen, insbesondere zur Sachmängelhaftung.

Bei Fragen zu Angaben in dieser CAMPUS-Version, weiteren Produkteigenschaften oder weiteren A. Schulman-Produkten wenden Sie sich bitte an:

A. Schulman GmbH
Huetttenstrasse 130-138
50170 Kerpen
Tel: 02273 / 561-0
Kontakt: aschulman@de.aschulman.com
Betreff: Materialdaten

B Ansys Fluent

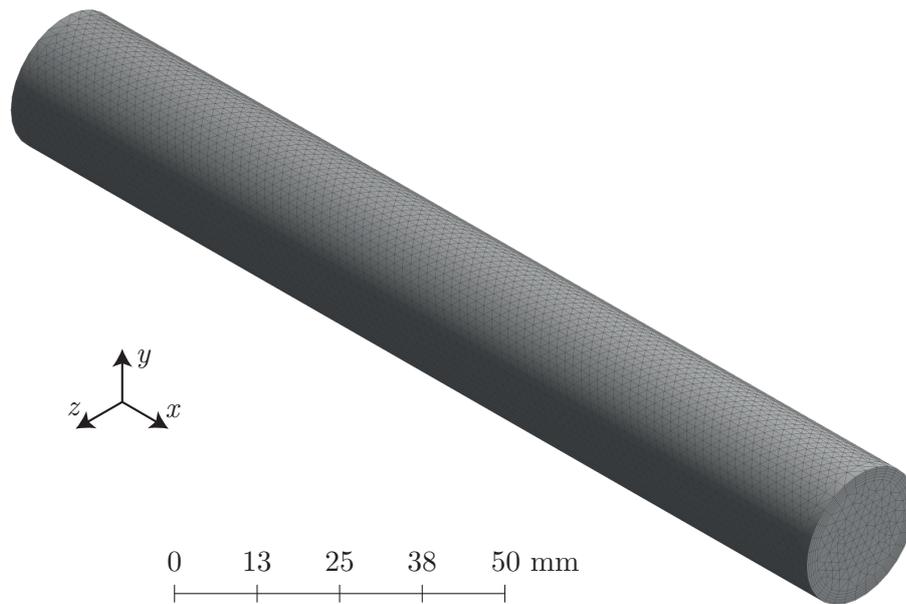


Abbildung B.1: Isometrische Darstellung des Netzes am Solidmodell

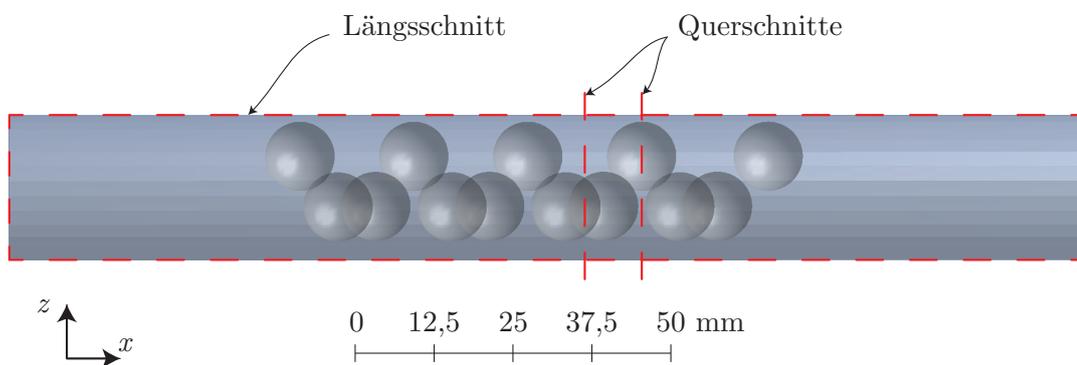


Abbildung B.2: Auswertebenen im Modell

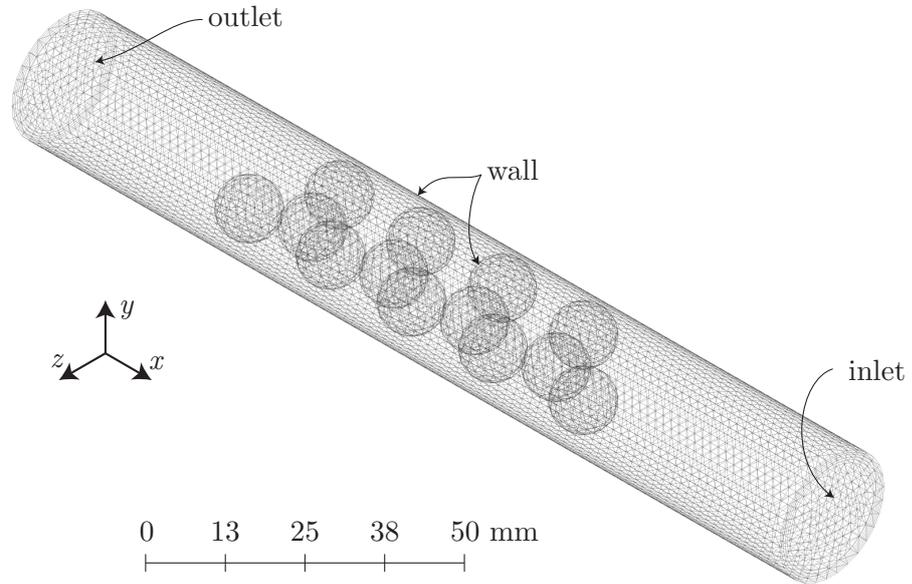


Abbildung B.3: Isometrische Darstellung des Netzes als Drahtmodell

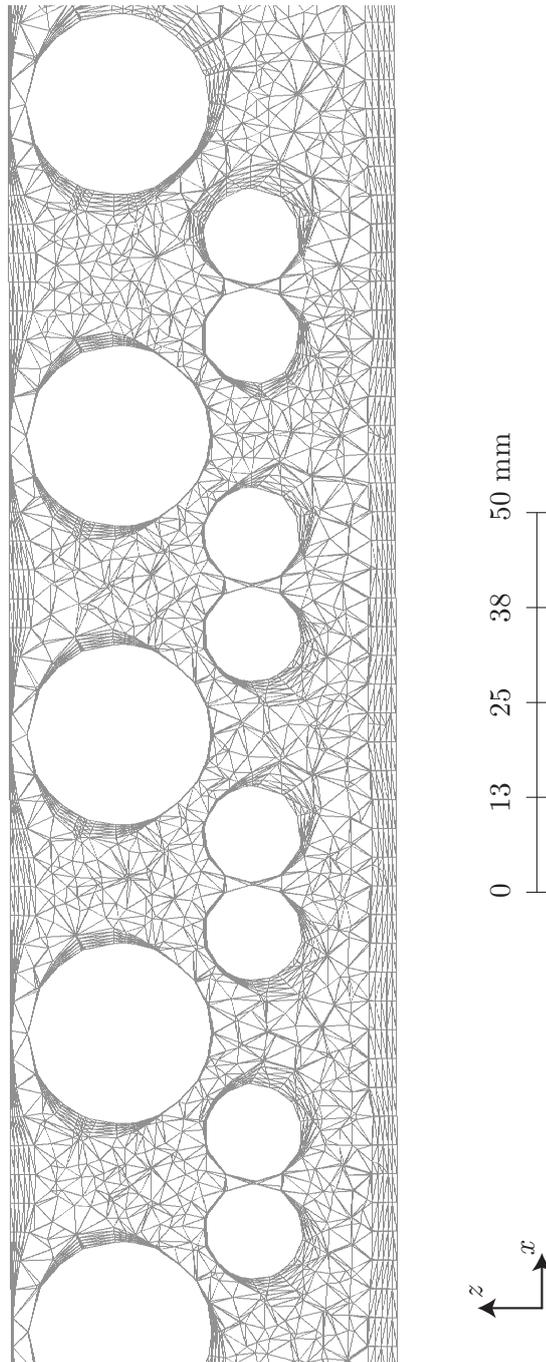


Abbildung B.4: Darstellungen des Netzes im Längsschnitt

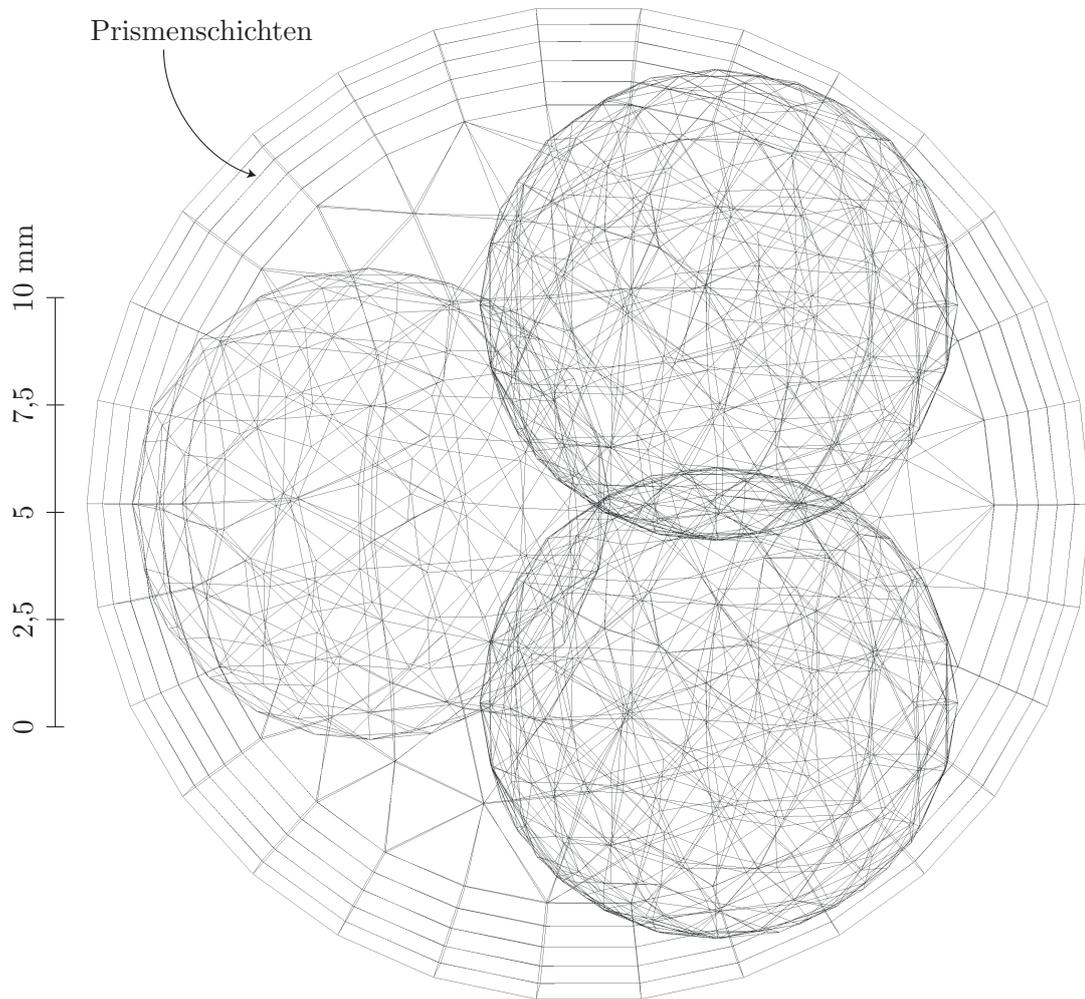


Abbildung B.5: Prismenschichten an der Stirnfläche des Drahtmodells

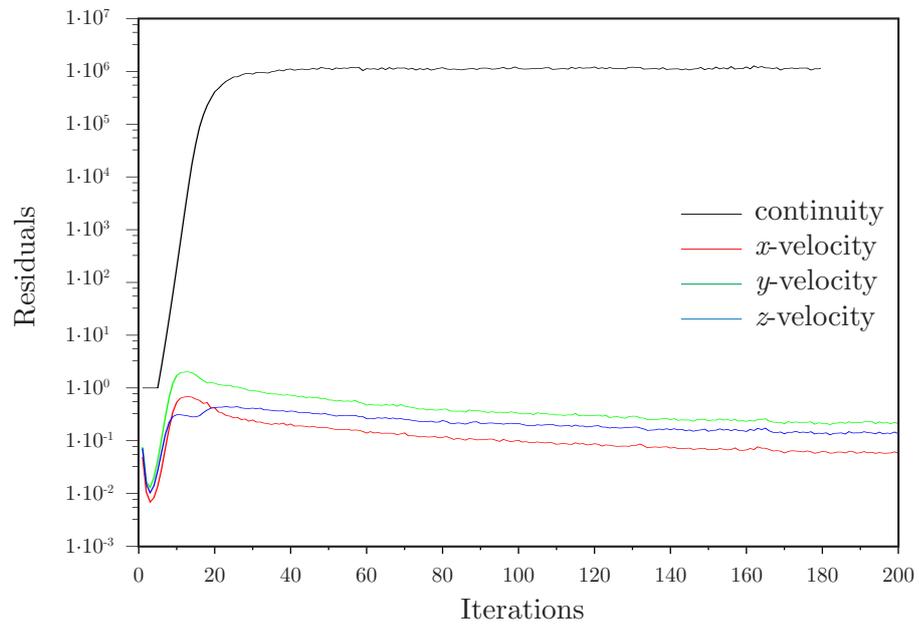


Abbildung B.6: Residuen über Iterationen

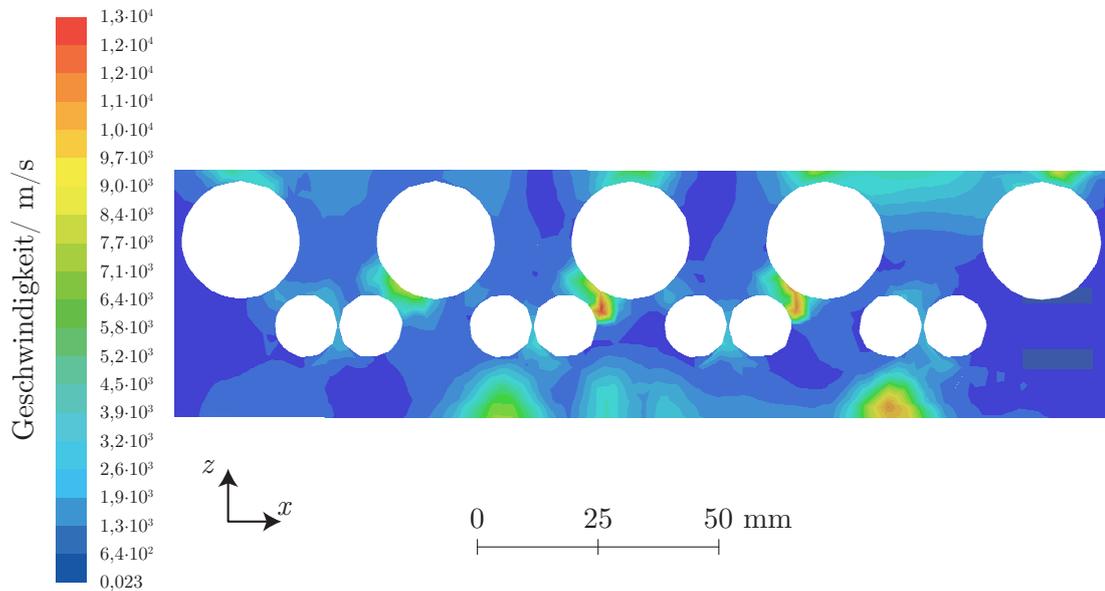


Abbildung B.7: Geschwindigkeiten im Längsschnitt

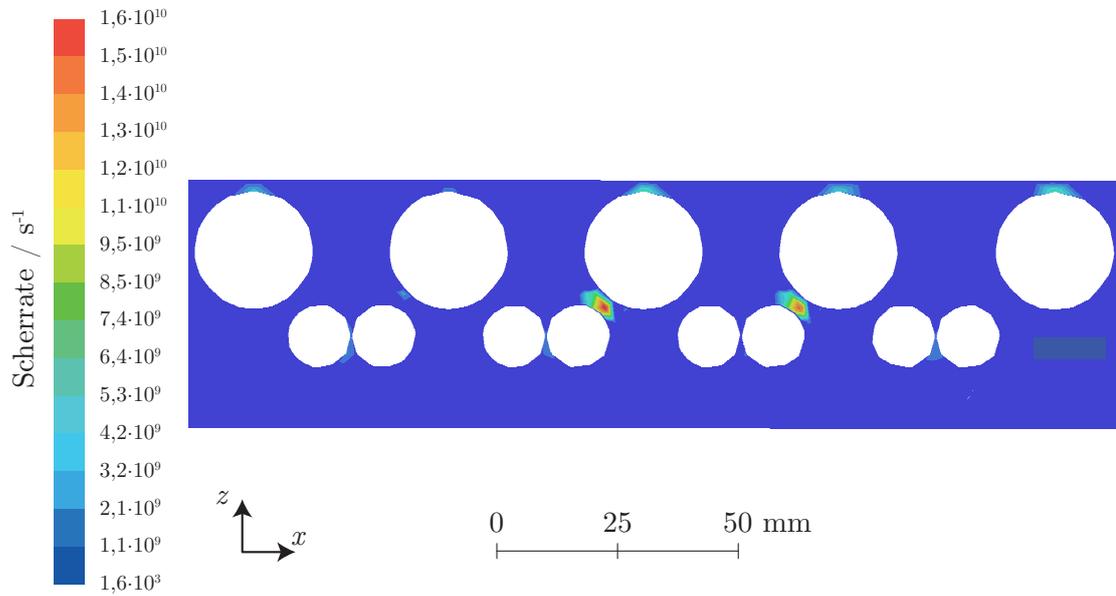


Abbildung B.8: Scherraten im Längsschnitt

Tabelle B.1: Ermittelte Schergeschwindigkeiten in Abhängigkeit des Eintrittsmassenstrom aus ANSYS Fluent

Massenstrom am Einlass $\dot{m}_{KE} / \frac{\text{kg}}{\text{s}}$	Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma} / \frac{1}{\text{s}}$
0,029	3606,95
0,032	3619,42
0,034	3735,33
0,037	3769,58
0,041	3789,39
0,046	3816,42
0,051	3855,44
0,059	4027,89

C Hydraulikpumpe

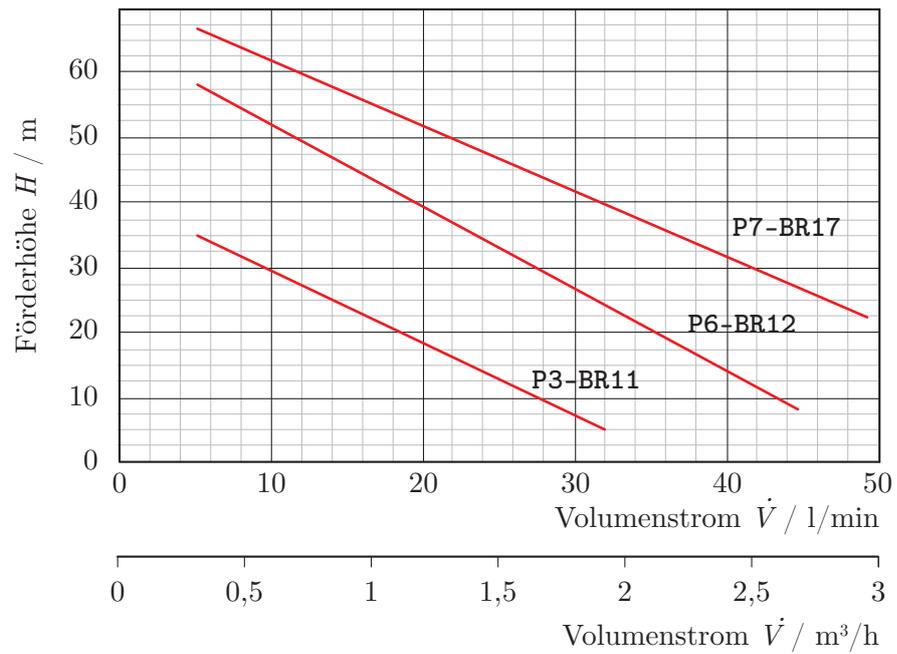


Abbildung C.1: Kennlinien verschiedener Hydraulikpumpen [12]



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: _____

Vorname: _____

dass ich die vorliegende _____ – bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der _____ ist erfolgt durch:

Ort

Datum

Unterschrift im Original