



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# **Bachelorarbeit**

Jannik Tönges

## **Simulation der Energieverbraucher einer Spritzgießmaschine**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Mechanical Engineering and  
Production Management*

**Jannik Tönges**  
**Simulation der Energieverbraucher einer**  
**Spritzgießmaschine**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

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

Erstprüferin: Prof. Dr.-Ing. Heike Frischgesell  
Zweitprüfer: M.Sc. Nestorius Wiegandt

Abgabedatum: 8. Dezember 2016

**Jannik Tönges**

**Thema der Bachelorthesis**

Simulation der Energieverbraucher einer Spritzgießmaschine

**Stichworte**

Spritzgießen, Spritzgießmaschine, Spritzgießprozess, Simulation, Simulationssoftware, Modellierung, Dymola, Energieverbraucher

**Kurzzusammenfassung**

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wird der Energieverbrauch bei der Kunststoffverarbeitung im Spritzgießverfahren untersucht. In dieser Thesis wird dazu eine Mikrospritzgießmaschine vom Typ „Babyplast“ hinsichtlich der Energieverbraucher analysiert. Darauf aufbauend wird ein Simulationsmodell mit der Software „Dymola“ erstellt, welches die Energieströme der Hauptverbraucher in Abhängigkeit von ausgewählten Betriebs- und Prozessparametern abbildet. Ziel ist es, mithilfe des erzeugten Simulationsmodells, den Energieverbrauch der Spritzgießmaschine zu prognostizieren. Zur Validierung von Simulationsergebnissen werden, bei einem Kooperationsunternehmen aus dieser Branche, Messdaten erhoben.

**Jannik Tönges**

**Title of the paper**

Simulation of the energy consumers of an injection molding machine

**Keywords**

injection molding, simulation, simulation software, modeling, Dymola, energy consumer

**Abstract**

Within the framework of a research project, the energy consumption during the injection molding process is researched. In this thesis, a micro-injection molding machine of the type "Babyplast" is analyzed with regard to energy consumers. Based on this, a simulation model with the software "Dymola" is created, which maps the energy flows of the main users as a function of selected operating and process parameters. The aim is, to predict the energy consumption of the injection molding machine using the generated simulation model. In order to validate simulation results, measurement data is recorded at a cooperation company.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>6</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>Nomenklaturverzeichnis</b>	<b>8</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>10</b>
1.1 Aufbau und Inhalt . . . . .	10
1.2 Zielsetzung . . . . .	11
<b>2 Technische Grundlagen</b>	<b>12</b>
2.1 Das Spritzgießen . . . . .	12
2.1.1 Aufbau einer Spritzgießmaschine . . . . .	12
2.1.2 Der Spritzgießprozess . . . . .	16
2.2 Hydraulikkomponenten . . . . .	18
2.3 Einführung in Modelica . . . . .	21
<b>3 Analyse der Verbraucher</b>	<b>23</b>
3.1 Identifikation der Hauptverbraucher . . . . .	23
3.2 Analyse der Hauptverbraucher . . . . .	25
3.2.1 Das Hydrauliksystem . . . . .	25
3.2.2 Die Plastifiziereinheit . . . . .	28
<b>4 Modellierung der Verbraucher mittels Dymola</b>	<b>29</b>
4.1 Struktur des Simulationsmodells . . . . .	29
4.2 Simulationsaufbau der Komponenten . . . . .	32
4.2.1 Das Hydrauliksystem . . . . .	33
4.2.2 Plastifiziereinheit . . . . .	38
<b>5 Validierung der Erkenntnisse und Simulation mittels Dymola</b>	<b>41</b>
5.1 Plastifiziereinheit . . . . .	43
5.2 Hydrauliksystem . . . . .	44
<b>6 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>46</b>



# Tabellenverzeichnis

5.1 Parameter der Simulation des Hydrauliksystems . . . . . 44

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Darstellung einer Schneckenplastifizierung [WH09]	13
2.2	Kolbenplastifizierung der Babyplast [Hau15]	14
2.3	Zeitlicher Ablauf des Spritzzyklus [Wit15]	16
2.4	Schnittdarstellung einer Zahnradpumpe [WG15]	18
2.5	Schema eines Druckreduzierventils [WG15]	19
2.6	Modelica Code der Komponente Spring [DAS14]	21
2.7	Modelica Code vom Modell Partialcomplaint [DAS14]	22
2.8	Modelica Code vom Connector Flange_a [DAS14]	22
3.1	Energieströme der Babyplast Spritzgießmaschine nach [Cro14]	23
3.2	Hydraulikplan der Babyplast [Cro14]	25
3.3	Heizzonen einer Kolbenspritzgießmaschine [Hau15]	28
4.1	Struktur des Dymola Modells der Spritzgießmaschine	29
4.2	Änderung von Parametern	30
4.3	Erstellung eines Connectors	31
4.4	Dymola Modell der Spritzgießmaschine	32
4.5	Dymola Modell des Hydrauliksystems	33
4.6	Dymola Modell des Hydraulikaggregats	34
4.7	Modelica Code des Steuerventils	35
4.8	Dymola Modell der Steuerung	36
4.9	Dymola Modell eines Hydraulikzylinders	37
4.10	Dymola Modell der Plastifiziereinheit	38
4.11	Dymola Modell vom Heizelement	39
4.12	Dymola Modell vom Massenstrom	40
5.1	elektrische Leistung der Babyplast bei der Produktion eines Kunststoffteils	41
5.2	Leistung der Plastifiziereinheit	43
5.3	Druckverlauf bei der Simulation des Hydrauliksystems	44
5.4	Leistungsverlauf bei der Simulation des Hydrauliksystems	45

# Nomenklaturverzeichnis

$\eta_{el}$	elektrischer Wirkungsgrad
$\eta_{Pumpe}$	Wirkungsgrad der Hydraulikpumpe
$A$	Kolbenfläche
$c$	Federkonstante
$dp$	Druckänderung
$F$	Kraft
$f$	Frequenz
$I$	Stromstärke
$M$	Drehmoment
$m_{flow}$	Massenstrom
$n$	Drehzahl
$p$	Druck
$p_1$	Primärdruck
$p_2$	Sekundärdruck
$P_v$	Verlustleistung
$P_{el}$	elektrische Leistung
$P_{hyd}$	hydraulische Leistung
$P_{mech}$	mechanische Leistung

---

$Q$	Volumenstrom
$s$	Schlupf
$s_{rel}$	relative Strecke
$U$	Spannung
$u_1$	Eingangssignal
$V$	Verdrängungsvolumen
$v$	Geschwindigkeit
$y$	Ausgangssignal

# 1 Einführung

Im Zuge eines Forschungsprojektes soll der Energieverbrauch einer Mikrospritzgießmaschine untersucht werden. Dafür werden die Energieverbraucher dieser Maschine identifiziert und anschließend in der Softwareumgebung Dymola dargestellt. Ziel ist es, mit dem so erzeugten Simulationsmodell, den Energieverbrauch in Abhängigkeit von Prozessparametern möglichst exakt abbilden zu können. Bei der zu simulierenden Mikrospritzgießmaschine handelt es sich um eine Babyplast der Firma CHRISTMANN Kunststofftechnik GmbH. Das Projekt wird zudem in Zusammenarbeit mit der Firma IES GmbH durchgeführt, bei der relevante Prozessparameter während des Betriebsprozesses aufgezeichnet werden können. Die Simulationsergebnisse werden zuletzt auf ihre Plausibilität hin überprüft.

## 1.1 Aufbau und Inhalt

Um den Spritzgießprozess plausibel abbilden und simulieren zu können, sind Grundkenntnisse über das Produktionsverfahren des Spritzgießens notwendig. Daher werden die technischen Grundlagen des Spritzgießens zunächst kurz erläutert. Zudem wird auf die Funktionsweise einzelner Hydraulikkomponenten eingegangen und die Modellierungssprache Modelica an Hand eines Beispiels erläutert.

Im Anschluss wird eine Energieverbrauchsanalyse, des hier untersuchten Maschinentyps Babyplast, durchgeführt. Es werden die Hauptverbraucher identifiziert und analysiert. Dabei wird die Funktionsweise der Hauptverbraucher ergründet. Dies ist Grundlage, um die Verbraucher simulieren zu können.

Anschließend wird erörtert, wie sich die Hauptverbraucher der Spritzgießmaschine mittels Dymola abbilden lassen. Gleichzeitig wird eine Struktur erstellt, mit der sich die Modelle, der einzelnen Hauptverbraucher, zu einem Gesamtmodell zusammenfassen lassen.

Der darauf folgende Abschnitt befasst sich mit der Auswertung der Simulationsergebnisse. Dabei wird überprüft, ob diese schlüssige Ergebnisse liefern.

Abschließend werden die Ergebnisse der Arbeit noch einmal zusammengefasst und ein Ausblick für weitere Forschungsarbeiten gegeben.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel der Bachelorarbeit ist die Simulation des elektrischen Energieverbrauchs der Spritzgießmaschine. Genauer werden die Hauptverbraucher der Spritzgießmaschine, also das Hydrauliksystem und die Plastifiziereinheit berücksichtigt. Das Kühlsystem und Verbraucher mit geringerer Leistung werden hingegen nicht untersucht.

Bei der Validierung des Simulationsmodells werden die Simulationsergebnisse qualitativ ausgewertet, da eine quantitative Untersuchung die vollständige Parametrisierung des Simulationsmodells voraussetzt. Eine vollständige Parametrisierung des Simulationsmodells kann erst in nachfolgenden Forschungsarbeiten erfolgen.

## 2 Technische Grundlagen

### 2.1 Das Spritzgießen

Das Spritzgießen ist nach DIN 8580 ein Urformverfahren. Es wird hauptsächlich in der Kunststoffverarbeitung eingesetzt. Bei dem Fertigungsprozess wird der zu verarbeitende Werkstoff mit einer Spritzgießmaschine in den plastisch verformbaren Zustand gebracht und anschließend unter hohem Druck in ein Spritzgießwerkzeug eingespritzt. Im Werkzeug geht der Werkstoff durch Abkühlung wieder in den festen Zustand über und wird nach dem Öffnen des Werkzeugs als Fertigteil entnommen. Durch dieses Verfahren lassen sich heute Teile im Gewichtsbereich von wenigen Zehntel Gramm bis hin zu etlichen Kilogramm herstellen [Spi14]. Zudem sind die produzierten Formteile direkt, ggf. nach kurzer Nachbearbeitung, einsatzbereit. Da die Werkzeuge eine hohe Standzeit besitzen, lassen sich Formteile in großer Stückzahl kostengünstig herstellen.

#### 2.1.1 Aufbau einer Spritzgießmaschine

Die heute üblichen Spritzgießmaschinen bestehen aus zwei Einheiten. Aus der Plastifizier- und Spritzeinheit, die den Kunststoff aufschmilzt, plastifiziert und dosiert. Und der Schließeinheit, die das Formwerkzeug schließt, es geschlossen hält und wieder öffnet.

##### Plastifizier- und Spritzeinheit

Die Plastifizier- und Spritzeinheit sind oftmals in zwei Ausführungen anzutreffen, als Schneckenkolbenspritzgießmaschine und als Kolbenspritzgießmaschine.

Kernstück der Schneckenkolbenspritzgießmaschine (s. Abb 2.1) ist eine Schneckenwelle, die sich in einem Zylinder befindet. Der Innendurchmesser des Zylinders ist dabei gleich dem Außendurchmesser der Schnecke. Im hinteren Bereich des Schneckenzyinders befindet sich ein Einzug, in den das Granulat gefüllt und durch eine Öffnung dem Zylinder zugeführt wird. Durch Rotieren der Schnecke, wird der Kunststoff nach vorne transportiert und geschert. Dabei wird der Kunststoff plastifiziert. [MGKE09]

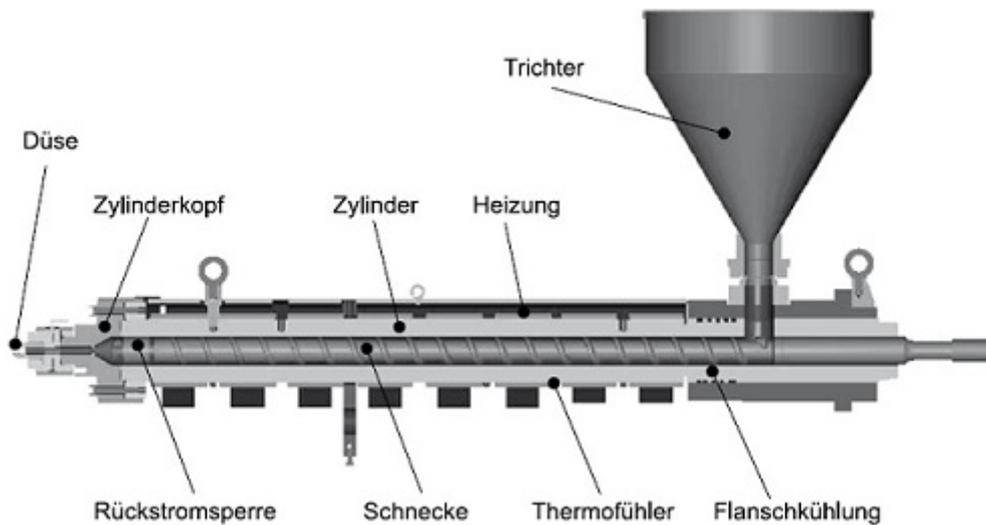


Abbildung 2.1: Darstellung einer Schneckenplastifizierung [WH09]

Bei Kolbenspritzgießmaschinen wird, statt einer Schnecke, ein einfacher Kolben eingesetzt. Bei heute erhältlichen Maschinen wird das Plastifizieren allerdings gelegentlich von einer Schnecke übernommen, während der Kolben nur für das Einspritzen und Nachdrücken zuständig ist. In dieser Arbeit wird eine Kolbenspritzgießmaschine, wie in Abbildung 2.2, untersucht. Auch bei dieser übernimmt ein Einspritzzylinder nur das Einspritzen und Nachdrücken. In einem zusätzlichen Plastifizierzylinder wird der Kunststoff plastifiziert und homogenisiert. Der Kunststoff wird dazu in dem Plastifizierzylinder an Stahlkugeln vorbei gepresst, wodurch der Kunststoff geschert wird. [JM04]

In beiden Fällen wird die Maschine über Heizelemente beheizt. Für ein optimales Temperaturprofil gibt es mehrere Heizzonen. Jede dieser Heizzonen ist einzeln steuerbar, damit das Temperaturprofil an die Werkstoffbeschaffenheit angepasst werden kann. In der Regel steigt die Temperatur zur Düse hin. Die Düse wird zusätzlich beheizt, damit der Kunststoff beim einspritzen nicht zu früh erstarrt und die Düse verstopft. [MGKE09]

Eine Rückstromsperre verhindert beim Einspritzen, dass Kunststoff zurück in den Einzug fließt. Bei Kolbenspritzgießmaschinen sitzt diese zwischen Einspritzzylinder und Plastifizierzylinder. Sobald Gegendruck aus Werkzeug-Richtung entsteht, verschließt die Rückstromsperre den Zuführkanal.

Bei Schneckenkolbenspritzgießmaschinen befindet sich die Rückstromsperre am Schneckende und besteht gewöhnlich aus drei Teilen. Der Schneckenspitze, dem Sperring und dem Druckring. Der Sperring sitzt auf der Schneckenspitze, vor dem Druckring. Beide gemeinsam fungieren als Anschlag. Wird dosiert, drückt die Schmelze den Sperring an die Schne-

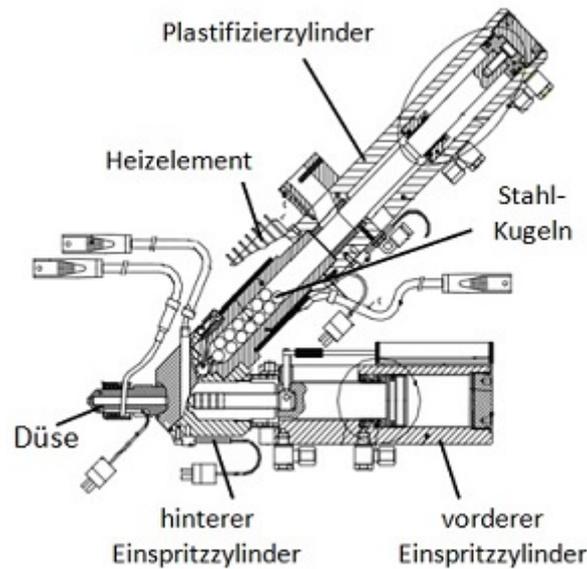


Abbildung 2.2: Kolbenplastifizierung der Babyplast [Hau15]

ckenspitze, sodass ein Spalt zwischen dem Sperring und dem Druckring entsteht. Durch den Spalt kann die Schmelze fließen. Wird hingegen eingespritzt, presst sich der Sperring an den Druckring und verschließt so die Schneckengänge. [JM04] [MGKE09]

Bei den Düsen wird zwischen offenen Düsen und Verschlussdüsen unterschieden. Die Verschlussdüse wird verwendet, wenn ein Heraustropfen der Schmelze verhindert werden soll. Die am häufigsten verwendete Düsenvariante ist die offene Düse. Bei ihr wird der Einspritzkanal verjüngt und geht anschließend in einen Gegenkonus über. Dadurch entsteht eine Sollbruchstelle, an der sich der erstarrende Kunststoff von der Schmelze trennt. [MGKE09]

### Schließeinheit

Die Schließeinheit ist für das Öffnen und Schließen des Werkzeugs, sowie für das Auswerfen des fertigen Kunststoffteils zuständig. Sie besteht aus einer beweglichen und einer festen Aufspannplatte, auf der die jeweiligen Werkzeughälften befestigt sind.

Die feste Aufspannplatte trägt dabei die Düsenseite des Werkzeugs und ist, die der Spritzeinheit am nächsten gelegene Platte. Sie besitzt eine zentrale Bohrung, durch die die Düse hindurchfahren und an das Werkzeug andocken kann. An der beweglichen Aufspannseite ist die Auswerfeinheit des Werkzeugs montiert. Diese wird mechanisch oder hydraulisch in Richtung der festen Aufspannplatte geschoben. Zwischen den beiden Werkzeughälften liegt die Werkzeugkavität, die der Formgebung des Bauteils dient. Es können mehrere Bauteile

gleichzeitig mit einem Werkzeug gefertigt werden. Die dafür benötigten Kavitäten werden auch Nester genannt. Bei Schließen des Werkzeugs bleibt zwischen Auswerferseite und Düsenseite ein Schlitz von wenigen Mikrometern, über den die Luft beim Einspritzen entweichen kann. Zur Werkzeugtemperierung wird in den meisten Fällen ein Wasser- oder Ölstrom durch das Werkzeug geleitet, mit dem Wärme ab- oder zugeführt werden kann. [MGKE09] [JM04]

Die Kraft in der Schließeinheit kann auf unterschiedlichen Wege aufgebaut werden. Man unterscheidet zwischen hydraulischen Maschinen und Kniehebel-Maschinen. Bei hydraulischen Maschinen wird die Kraft zum Schließen der Form durch große Hydraulikzylinder aufgebaut und gehalten. Bei Kniehebel-Maschinen wird das Werkzeug mithilfe eines Kniehebels zusammengedrückt. Der Kniehebel selbst wird entweder durch einen Hydraulikzylinder oder im Falle einer elektrischen Maschine, von einem Elektromotor betätigt. [MGKE09] [JM04]

Damit sich das Werkzeug beim Einspritzvorgang nicht öffnet, ist eine Verriegelung notwendig. Beim Kniehebelsystem ist das Werkzeug bei leicht abgelenktem Kniehebel geschlossen. Der Restweg des Kniehebels erzeugt die Zuhaltkraft und eine formschlüssige Verriegelung. Bei einer direkthydraulischen Verriegelung erfolgt das Zuhalten durch den Zuhaltezylinder. Sie stellt also eine kraftschlüssige Verriegelung dar. Bei der formschlüssigen hydromechanischen Verriegelung wird nach dem Aufbringen der Zuhaltkraft, die Schließeinheit mechanisch verriegelt. Die Werkzeugauftriebskraft wird dann von der Verriegelung aufgenommen. [MGKE09] [JM04]

Das fertige Kunststoffteil wird von einem Auswerfer aus der Form entfernt. Meistens besteht der Auswerfer aus einem hydraulischen Zylinder, dessen Kolbenstange durch die bewegliche Formplatte hindurchreicht. Auswerferstifte in der Form können mit dieser Kolbenstange gekoppelt werden, sodass beim Vorfahren des Zylinders, die Ausstoßstifte im Werkzeug ebenfalls nach vorne fahren und das Teil auswerfen. [MGKE09]

## 2.1.2 Der Spritzgießprozess

In Abbildung 2.3 sind die Prozessschritte des Spritzgießens in einem Balkendiagramm über die Zeit dargestellt. Im Folgenden werden die einzelnen Prozessschritte näher erläutert.

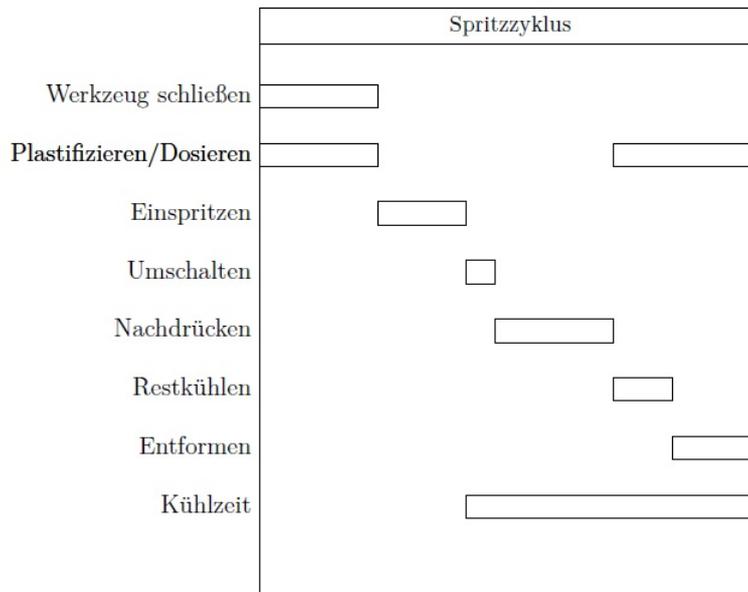


Abbildung 2.3: Zeitlicher Ablauf des Spritzzyklus [Wit15]

### Plastifizieren und Dosieren

Im ersten Schritt des Spritzgießprozesses, nach Schließen des Werkzeuges, wird der thermoplastische Kunststoff als Granulat über einen Trichter der Plastifiziereinheit zugeführt. Beim Plastifizieren wird dem Kunststoff solange Wärme zugeführt, bis er den Fließbereich erreicht. Dazu wird der Kunststoff durch Wärmezufuhr über Heizelemente und durch Friktionswärme, die beim Zerteilen und Scheren des Materials entsteht, aufgeheizt. Auf die Temperatur muss in dieser Phase besonders geachtet werden. Bei zu hohen Temperaturen besteht die Gefahr des Zersetzens des Kunststoffs und bei zu kalten Temperaturen erstarrt der verflüssigte Kunststoff zu früh, wodurch Mängel am Produkt entstehen können. Bei einem Plastifizierzylinder ohne Schnecke wird beim Dosieren die gewünschte Menge in die Spritzeinheit gedrückt. Wohingegen bei der Schneckenplastifizierung der Kunststoff durch Drehung der Schnecke nach vorne befördert und dort gestaut wird. Unmittelbar vor dem Einspritzen wird die Schnecke entlastet und der Kunststoff dekomprimiert. Zwischen Einspritzkolben bzw. Schneckenspitze und Düse muss immer ein Massepolster liegen, damit

die Kraft beim Nachdrücken in die Kavität übertragen werden kann. Deshalb wird immer etwas mehr Kunststoff dosiert, als für das Bauteil benötigt wird. [MGKE09] [JM04] [SK04]

## Einspritzen

In der Einspritzphase wird die Spritzeinheit an die Schließeinheit gefahren, mit der Düse angedrückt und der Einspritzkolben bzw. die Schnecke rückseitig unter Druck gesetzt. Anschließend wird die Schmelze unter hohem Druck durch die geöffnete Düse und den Anguss des Spritzgießwerkzeugs in die Werkzeugkavität gepresst. Die Rückstromsperre verhindert währenddessen ein Zurückströmen der Schmelze Richtung Einfülltrichter. [MGKE09] [JM04]

## Nachdrücken und Abkühlen

Da das Werkzeug kälter als die Kunststoffmasse ist, kühlt die Schmelze in der Form ab und erstarrt. Durch das Abkühlen verringert sich das Volumen der Kunststoffmasse. Dies wirkt sich nachteilig auf Maßhaltigkeit und die Oberflächenqualität des Werkstückes aus. Um diese Schwindung teilweise zu kompensieren, wird beim Nachdrücken auch nach Füllung der Form ein reduzierter Druck aufrechterhalten, damit Material nachfließen und die Schwindung ausgleichen kann. [MGKE09] [JM04]

Nach Beendigung des Nachdrückens kann die Düse geschlossen werden. In der Spritzeinheit kann bereits der Plastifizier- und Dosiervorgang für das nächste Formteil beginnen. Das Material in der Form kühlt in der Restkühlzeit weiter ab, bis auch der flüssige Kern des Werkstückes erstarrt ist, und eine zum Entformen hinreichende Steifigkeit erreicht ist. [MGKE09] [JM04]

## Entformen

Zum Entformen öffnet sich die Auswerferseite der Schließeinheit und das Werkstück wird durch, in die Kavität hineindringende Stifte, ausgeworfen und fällt entweder herunter oder wird durch Handlinggeräte aus dem Werkzeug entnommen. [MGKE09]

Der Anguss muss entweder durch separate Bearbeitung entfernt werden oder wird beim Entformen automatisch abgetrennt. Auch angussloses Spritzgießen ist mit Heißkanalsystemen, bei denen das Angusssystem ständig über der Erstarrungstemperatur bleibt und das enthaltene Material somit für den nächsten Schuss verwendet werden kann, möglich. [MGKE09]

Nach dem Entformen schließt sich das Werkzeug wieder und der Zyklus beginnt von neuem.

## 2.2 Hydraulikkomponenten

Die während des Spritzgießprozesses benötigten Bewegungen und Drücke werden, bei der hier betrachteten Maschine, durch ein Hydrauliksystem erzeugt. Es handelt sich also um eine hydraulisch angetriebene Spritzgießmaschine. Der Systemdruck wird dabei von einer Zahnradpumpe aufgebaut und durch ein Druckreduzierventil gesteuert. Daher wird im Folgenden, die Funktionsweise dieser wesentlichen Komponenten des Hydrauliksystems der Spritzgießmaschine erläutert.

### Zahnradpumpe

Zahnradpumpen sind die am häufigsten eingesetzten Drehkolbenpumpen. Diese arbeiten nach dem Verdrängerprinzip und können als Außen- oder Innenzahnradpumpen ausgeführt werden. Das Wirkprinzip einer Zahnradpumpe mit Außenverzahnung ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Über die Antriebswelle wird das Zahnrad 2 mechanisch in der eingezeichneten Drehrichtung angetrieben. Dadurch ergibt sich für Zahnrad 3 ein Zwangslauf mit umgekehrter Drehrichtung. An der Saugseite A der Hydropumpe bewegt sich der im Eingriff stehende Zahn des einen Zahnrades, aus der Zahnücke des anderen Zahnrades heraus. Durch die damit verbundene Volumenvergrößerung entsteht ein lokaler Unterdruck im Saugraum an den im Eingriff befindlichen Zähnen, wodurch sich die jeweilige Zahnkammer mit Hydraulikflüssigkeit füllt. [WG15]

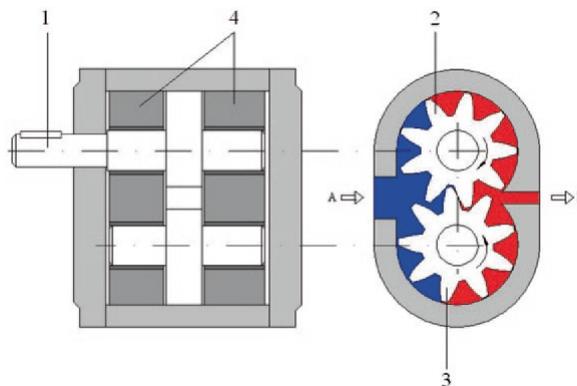


Abbildung 2.4: Schnittdarstellung einer Zahnradpumpe [WG15]

Außenzahnradpumpen haben folgende charakteristische Eigenschaften [WG15]:

- einfacher und robuster Aufbau,
- relativ preisgünstige Herstellung auch bei hoher Genauigkeit,

- hohe Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit,
- der Betrieb der Pumpe ist unabhängig von der Einbaulage,
- bei konstanter Drehzahl gutes Ansaugverhalten,
- geringe Schmutzempfindlichkeit,
- großer Drehzahlbereich  $n = 500$  bis  $6000$  U/min,
- guter Wirkungsgrad bis oft  $90\%$  und darüber hinaus.

### Druckreduzierventil

Druckreduzierventile (siehe Abbildung 2.5), auch als Druckminderventile VM bezeichnet, haben die Aufgabe, den Sekundärdruck  $p_2$  in einem Leitungsbereich vermindert konstant zu halten, unabhängig vom Volumenstrom  $Q$  und vom veränderlichen, aber höheren Primärdruck  $p_1$ . Das Druckreduzierventil ist notwendig, um im Hydrauliksystem, den Druck in einem Teilleitungsbereiche zu regeln. Durch Druckreduzierventile entsteht eine Verlustleistung, die zu einer Ölerwärmung führt. Der reduzierte Druck wird häufig für Nebenfunktionen oder für Steuerfunktionen benötigt, die nur kurzzeitig wirken. Druckreduzierventile werden als direkt gesteuerte, vorgesteuerte oder Drei-Wege-Ventile verwendet. [WG15] [MR14]

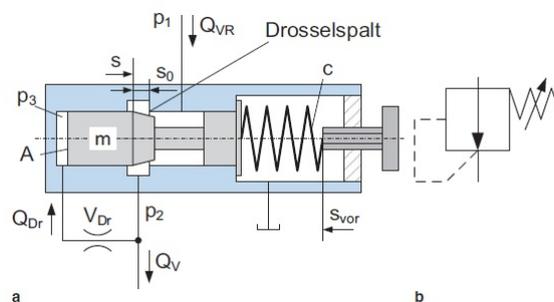


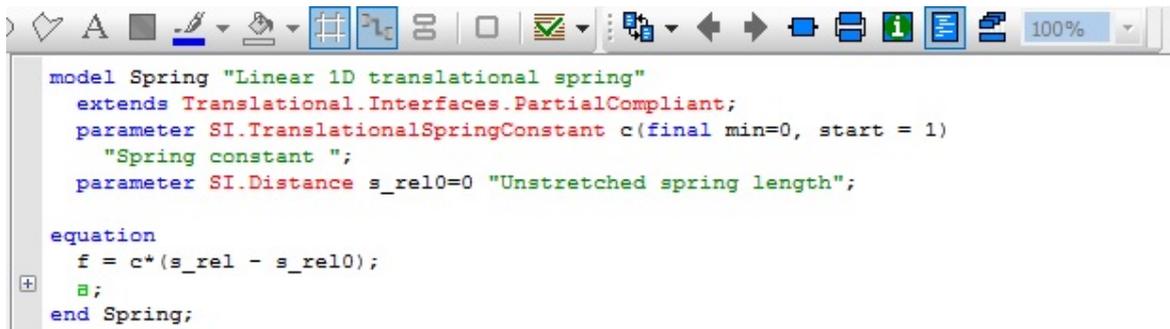
Abbildung 2.5: Schema eines Druckreduzierventils [WG15]

Das direkt gesteuerte Ventil besteht aus einem Kolbenschieberelement, das durch eine Feder, in seiner Ruhestellung, die Verbindung zwischen Primär- und Sekundärseite voll öffnet. Bei der direktgesteuerten Ventilvariante ist, die der Federseite gegenüberliegende Kolbenseite, mit einer Steuerleitung über eine Dämpfungs-drossel mit der Sekundärdruckleitung verbunden. Steigt der Primärdruck an, der durch das zunächst geöffnete Ventil auch auf der Sekundärseite wirkt, bis die Kolbenkraft die Federvorspannungskraft übersteigt, beginnt das Ventil zu schließen. Es bildet dann in Regelstellung gerade einen solchen Drosselspalt, der die Regelfunktion des Ventils aufrechterhält und den Sekundärdruck  $p_2$  konstant hält.

Beim vorgesteuerten Druckreduzierventil gibt es ein Vorsteuerventil, das ein direkt gesteuertes Druckbegrenzungsventil ist. Durch Variation der Federvorspannung am Vorsteuerventil wird der Sekundärdruck eingestellt. Das Druckreduzierventil bildet für den nachgeschalteten Kreislauf eine Druckquelle mit dem Druck  $p_2$ . Um die Funktion des Druckbegrenzungsventils zu gewährleisten muss der Primärdruck immer größer sein als der Sekundärdruck. Beim vorgesteuerten Ventil fließt ständig ein Steuervolumenstrom der die Druckreduzierung aufrecht erhält. Durch die Druckreduzierung wird eine Verlustleistung  $P_v = (p_2 - p_1) \cdot Q$ , erzeugt, die nur für kleine Leistungen und kurze Einschaltdauer akzeptabel ist. [WG15]

## 2.3 Einführung in Modelica

Um das Simulationsmodell nachvollziehen zu können, wird im Folgenden zunächst die Modellierungssprache Modelica anhand eines Beispiels erläutert. Mit Modelica und einer dazugehörigen Entwicklungsumgebung, wie beispielsweise Dymola, können physikalische Systeme einfach simuliert werden, indem einzelne Komponenten per Drag and Drop einem Modell hinzugefügt und anschließend miteinander verbunden werden. Hinter den einzelnen Komponenten verbirgt sich, der Modelica Code, der die physikalischen Gleichungen beinhaltet.



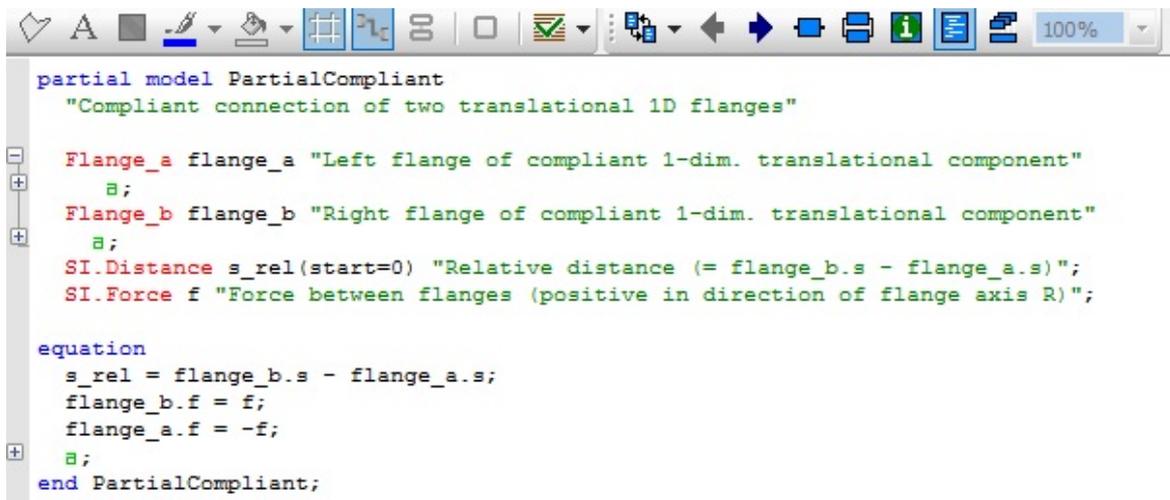
```
model Spring "Linear 1D translational spring"
  extends Translational.Interfaces.PartialCompliant;
  parameter SI.TranslationalSpringConstant c(final min=0, start = 1)
    "Spring constant ";
  parameter SI.Distance s_rel0=0 "Unstretched spring length";

  equation
    f = c*(s_rel - s_rel0);
    a;
end Spring;
```

Abbildung 2.6: Modelica Code der Komponente Spring [DAS14]

Der Modelica Code der Komponente Spring ist in Abbildung 2.6 aufgezeigt. Die Komponente Spring stellt das Modell einer mechanischen Feder dar. Die Modellierungssprache Modelica ist hierarchisch aufgebaut. Das heißt, ein Modell besteht aus mehreren untergeordneten Modellen, in denen physikalische Beziehungen vordefiniert sind. So wird mit dem Befehl `extends`, dem Modell Spring, das Modell `PartialCompliant` vererbt. Anschließend werden mit dem Befehl `parameter` zwei Parameter festgelegt. In diesem Beispiel ist das zu einem die Federkonstante  $c$  und zum anderen die relative Länge der Feder  $s_{rel0}$ . Mit dem Befehl `equation` werden in dem Modell die physikalischen Gleichungen definiert. In diesem Fall das Federgesetz. Die Gleichungen werden kausal definiert, was bedeutet, dass nicht angegeben werden muss, was die Eingangs- und Ausgangsvariablen sind. Um das Modell Spring verstehen zu können, muss zudem das untergeordnete Modell `PartialCompliant` betrachtet werden.

Im Modell `PartialCompliant` (Abbildung 2.7) werden am Anfang zwei Connectoren eingeführt. Zum einen der Flange\_a, der die Größen aufnimmt, die auf den linken Flansch wirken, zum anderen der Flange\_b, der die Größen aufnimmt, die auf den rechten Flansch wirken. In Abbildung 2.8 ist der Modelica Code eines Connectors abgebildet. In einem Connector wird immer eine Potentialgröße und eine Flussgröße definiert. In der Mechanik Bibliothek ist die Potentialgröße die Position  $s$  und die Flussgröße die Kraft  $f$ . Über den Connector Flange\_a wird dem Modell somit die Position des Flansches mitgeteilt, die benötigt wird, um die Flussgröße  $f$  zu berechnen. Nach den zwei Connectoren wird noch eine Distanz  $s_{rel}$  und eine



```

partial model PartialCompliant
  "Compliant connection of two translational 1D flanges"

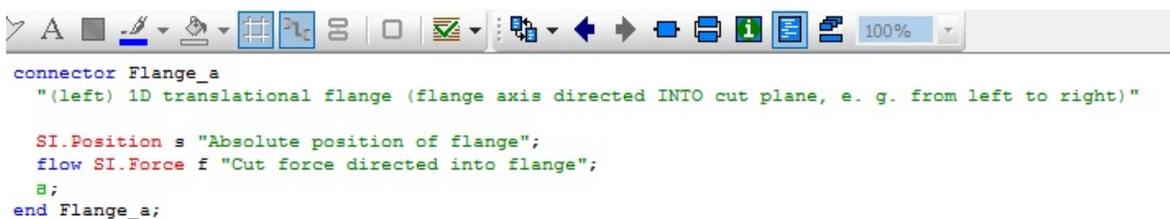
  Flange_a flange_a "Left flange of compliant 1-dim. translational component"
    s;
  Flange_b flange_b "Right flange of compliant 1-dim. translational component"
    s;
  SI.Distance s_rel(start=0) "Relative distance (= flange_b.s - flange_a.s)";
  SI.Force f "Force between flanges (positive in direction of flange axis R)";

  equation
    s_rel = flange_b.s - flange_a.s;
    flange_b.f = f;
    flange_a.f = -f;
  end;
end PartialCompliant;

```

Abbildung 2.7: Modelica Code vom Modell PartialCompliant [DAS14]

Kraft  $f$  eingeführt. Die beiden Größen werden mit den Befehlen SI.Distance und SI.Force mit den SI-Einheiten behaftet. Am Ende werden noch die Gleichungen definiert, in denen einmal die relative Strecke  $s_{rel}$  berechnet und zum anderen die Richtung der Kraft  $f$  vorgegeben wird. Die relative Strecke ergibt sich, als die Position von Flange\_b minus die Position von Flange\_a. Um die Variable Position  $s$  des Elements Flange\_a zu erhalten, lautet die Notation in Modelica Element.Variable. Die Strecke  $s_{rel}$  und die Kraft  $f$  findet man in der Gleichung des Modells Spring wieder (siehe Abbildung 2.6). Damit das Modell Spring die Kraft berechnen kann wurde ihm das Modell PartialCompliant vererbt.



```

connector Flange_a
  "(left) 1D translational flange (flange axis directed INTO cut plane, e. g. from left to right)"

  SI.Position s "Absolute position of flange";
  flow SI.Force f "Cut force directed into flange";
  s;
end Flange_a;

```

Abbildung 2.8: Modelica Code vom Connector Flange\_a [DAS14]

# 3 Analyse der Verbraucher

## 3.1 Identifikation der Hauptverbraucher

Ziel der Bachelorarbeit ist es, den Energieverbrauch der Spritzgießmaschine in Abhängigkeit den Prozessparametern vorherzusagen. Dazu müssen die Hauptverbraucher der Spritzgießmaschine zunächst identifiziert werden.

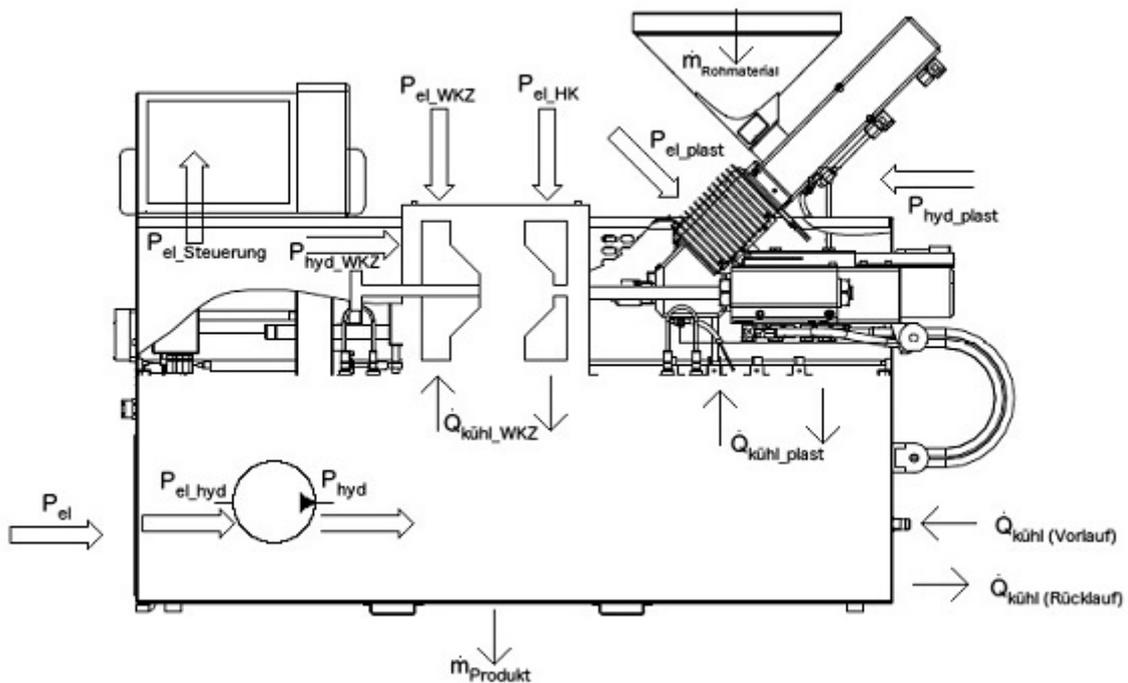


Abbildung 3.1: Energieströme der Babyplast Spritzgießmaschine nach [Cro14]

Die Babyplast wird hydraulisch angetrieben. Das heißt, die für die Produktion benötigten Bewegungen und Drücke werden von Hydraulikzylindern aufgebracht. In Abbildung 3.1 sind die Energieströme der Babyplast eingezeichnet. So benötigt die Platifizier- und Einspritzeinheit

hydraulische Leistung, ebenso wie das Werkzeug, das mit Hilfe von hydraulisch aufgebracht Kraft geschlossen wird. Die benötigte hydraulische Energie wird von einem Hydraulikaggregat erzeugt. Dieses wird wiederum von einem Elektromotor angetrieben, der über einen Frequenzumrichter elektrische Energie aus dem Netz bezieht. Die elektrische Leistungsaufnahme der Babyplast wird gemessen und später mit der Simulation abgeglichen. Das Hydraulikaggregat verbraucht den Großteil der elektrischen Energie, da alle Bewegungen von Hydraulikzylindern ausgeführt werden. Somit ist das Hydrauliksystem eindeutig ein Hauptverbraucher der Spritzgießmaschine.

In der Abbildung 3.1 ist außerdem zu erkennen, dass noch einige andere Verbraucher direkt elektrische Energie benötigen. Unter anderem verbrauchen die Steuerung, das Werkzeug und die Plastifiziereinheit elektrische Energie. In der Plastifiziereinheit wird die elektrische Energie von Heizbändern verbraucht, die dem Kunststoff Wärme zuführen und ihn so auf eine bestimmte Verarbeitungstemperatur bringen und halten. Außerdem wird die Düse temperiert, damit sie nicht verstopft. Aufgrund des hohen Energieverbrauchs, der für das Temperieren der Kunststoffmasse benötigt wird, zählt die Plastifiziereinheit ebenfalls zu den Hauptverbrauchern.

Die Steuerung und das Werkzeug haben im Vergleich zu dem Hydrauliksystem und der Plastifiziereinheit einen eher geringeren Energieverbrauch. Messungen haben ergeben, dass die Steuerung einen konstanten Stromverbrauch von ca. 50 W hat. Beim Werkzeug wird die elektrische Energie zum Beheizen benötigt, damit die Kunststoffschmelze nicht zu schnell erstarrt. Aufgrund der untergeordneten Rolle dieser Komponenten wurden sie in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

## 3.2 Analyse der Hauptverbraucher

### 3.2.1 Das Hydrauliksystem

Hydrauliksysteme können nach verschiedenen Konzepten erstellt werden. Diese unterscheiden sich in ihrer Speisung. Man unterscheidet zwischen Systemen mit Druckquellen konstanten Drucksollwertes, Druckquellen veränderlichen Drucksollwertes (Load sensing) und Volumenstromquellen. Innerhalb der Speisungen wird noch unterschieden, ob es sich um ein offenes oder geschlossenes System handelt und ob es stetig oder schaltend gesteuert wird. [WG15]

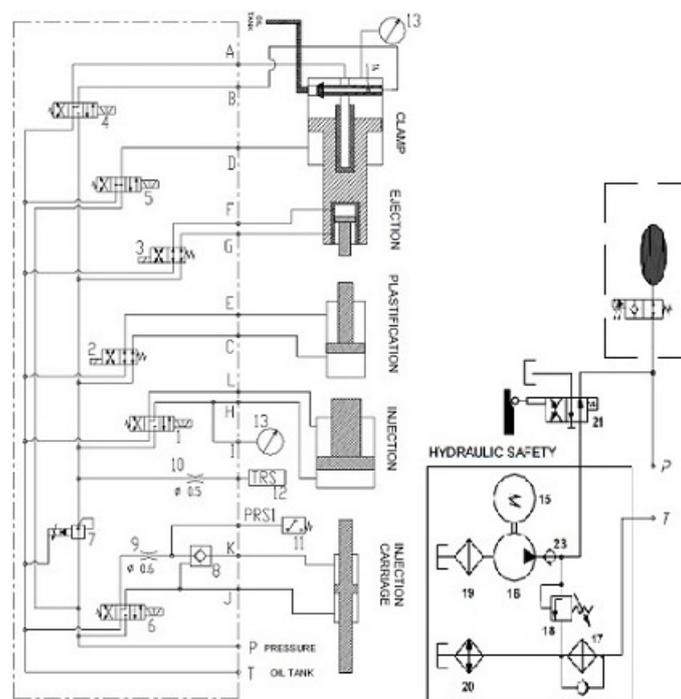


Abbildung 3.2: Hydraulikplan der Babyplast [Cro14]

In Abbildung 3.2 ist das Hydrauliksystem der Babyplast abgebildet. Auf der linken Seite sind die einzelnen Hydraulikzylinder zu sehen, die über Wegeventile mit der Druckleitung (P) und der Tankleitung (T) verbunden sind. In der Druckleitung befindet sich vor dem Plastifizierzylinder ein vorgesteuertes Druckreduzierventil (7). Direkt hinter dem Druckreduzierventil ist ein Drucksensor (12) eingebracht. In den Leitungen zum Hydraulikzylinder, der für die Fahrbewegung der Pastifiziereinheit zuständig ist, befinden sich zudem noch ein gesteuertes Rückschlagventil (8) und ein Druckschalter (11). Außerdem sind an dem Einspritzzylinder und dem Klemmzylinder Druckanzeigen (13) angeschlossen.

Auf der rechten Seite ist die Speisung des Hydrauliksystems dargestellt. Es ist eine Zahnradpumpe zu erkennen (16), die wiederum von einem Elektromotor (15) angetrieben wird. Die Saugseite der Pumpe ist über ein Filter mit dem Tank verbunden. An der Druckseite der Pumpe befindet sich zudem ein Sicherheitsschalter. Dieser sorgt dafür, dass die Hydraulikzylinder nur betrieben werden können, wenn die Schutzabdeckung geschlossen ist. Zum Ausgleich von kurzzeitigen Druckschwankungen, dient ein Hydraulikspeicher im System. In der Zuleitung zum Tank befindet sich ein weiterer Filter (17) und ein Kühler (20). Die Druckseite der Pumpe ist über ein Druckbegrenzungsventil (18) mit der Tankleitung verbunden. Es sorgt dafür, dass der Druck im Hydrauliksystem einen maximalen Systemdruck nicht überschreitet. Dieser liegt bei der Babyplast bei 130 bar.

Die Babyplast wird durch eine Volumenstromquelle gespeist. Eine Volumenstromquelle liefert einen, vom Anlagendruck nahezu unabhängigen Volumenstrom. Der Druck, gegen den die Pumpe fördert, baut sich abhängig vom Strömungswiderstand der Leitungen und von dem, durch den Verbraucher, zu überwindenden Gegenkräften/-momenten auf. Ist die Leitung zwischen Pumpe und Verbraucher ausreichend dimensioniert, entstehen beim Transport der hydraulischen Leistung keine nennenswerten Verluste [WG15]. Der Nachteil einer Volumenstromquelle ist, dass im Prinzip nur ein Verbraucher versorgt werden kann, weshalb jederzeit nur ein Hydraulikzylinder geschaltet sein darf. Die Volumenstromsteuerung erfolgt in diesem Fall mit Hilfe einer Konstantpumpe, die von einem drehzahlvariablen Motor angetrieben wird. Bei Kunststoffmaschinen und Pressen muss die Pumpe neben der Volumenstromsteuerung eine Druckregelung enthalten, da Nachdruckphasen in Kunststoffmaschinen und Pressvorgängen steuerbare Drücke und damit ihre Folgeregelung erfordern. Dies wird bei der Babyplast mit Hilfe des Druckreduzierventils (7) realisiert. Da die Volumenströme und Drücke vielfach variabel sind und durch eine übergeordnete Steuerung vorgegeben sind, werden die Druck- und die Volumenstromregler elektronisch realisiert. Das Druckbegrenzungsventil (18) spricht unter normalen Betriebsbedingungen nicht an. Es handelt sich um ein Sicherheitsventil.

Im Folgenden werden die physikalischen Gesetze erläutert, für die die Komponenten stehen. Die elektrische Leistung wird vom Leistungssensor aus dem Strom und der Spannung berechnet.

$$P_{el} = U \cdot I \quad (3.1)$$

Der elektrische Motor wandelt die elektrische Energie in mechanische Energie um. Dabei entstehen Verluste, die durch den elektrischen Wirkungsgrad der Asynchronmaschine berücksichtigt werden.

$$P_{mech} = P_{el} \cdot \eta_{el} \quad (3.2)$$

Die mechanische Leistung

$$P_{mech} = M \cdot 2\pi \cdot n \quad (3.3)$$

wird an die Pumpe übertragen. Diese wandelt die mechanische Energie in hydraulische

Energie um. Auch hierbei entstehen Verluste, die in Form von Wärme abgegeben werden.

$$P_{hyd} = P_{mech} \cdot \eta_{Pumpe} \quad (3.4)$$

Die hydraulische Leistung ergibt sich aus dem Volumenstrom und der zu überwindenden Druckdifferenz:

$$P_{hyd} = Q \cdot \Delta p \quad (3.5)$$

Der Volumenstrom ist abhängig von der Drehzahl der Welle  $n$  und dem Verdrängungsvolumen  $V$ , einer geometrische Kenngröße der Pumpe.

$$Q = n \cdot V \quad (3.6)$$

Die Drehzahl der Welle ist wiederum abhängig, von der Polzahl  $p$  und dem Schlupf  $s$  des Elektromotors, und der Frequenz des Drehstromes.

$$Q = V \cdot \frac{f \cdot (1 - s)}{p} \quad (3.7)$$

Der Schlupf  $s$  ist dabei eine Kenngröße der Asynchronmaschine. Somit lässt sich der Volumenstrom der Pumpe über den Frequenzumrichter steuern.

Bei einem Druckanstieg im Hydrauliksystem erhöht sich das Drehmoment, auf den Motor nach folgender Formel:

$$M = \frac{V \cdot \Delta p}{2\pi} \quad (3.8)$$

Mit dem Drehmoment steigt auch die mechanische Leistung, die der Elektromotor aufbringen muss, an und somit auch die benötigte Stromstärke.

Die Arbeitsgeschwindigkeit des Hydraulikzylinders hängt von der Fläche des Kolbens und dem Volumenstrom ab.

$$v = \frac{Q}{A} \quad (3.9)$$

Bei zunehmenden Volumenstrom steigt auch die Arbeitsgeschwindigkeit des Hydraulikzylinders und umgekehrt. Die Geschwindigkeit ist somit proportional zum Volumenstrom. Deshalb lässt sich die Arbeitsgeschwindigkeit des Hydraulikzylinders gut über den Volumenstrom steuern. Der Druck, den die Hydraulikpumpe überwinden muss, hängt von der Kraft, die auf den Hydraulikzylinder wirkt, und der Kolbenfläche ab.

$$p = \frac{F}{A} \quad (3.10)$$

Je höher die Arbeitsgeschwindigkeit des Zylinders und je größer die Kräfte, die auf den Zylinder wirken, desto größer ist auch die hydraulische Leistung, die der Hydraulikzylinder

benötigt.

$$P_{hyd} = Q \cdot \Delta p \quad (3.11)$$

### 3.2.2 Die Plastifiziereinheit

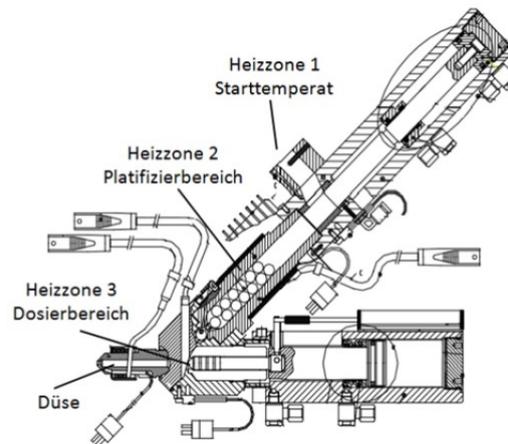


Abbildung 3.3: Heizzonen einer Kolbenspritzgießmaschine [Hau15]

Die Plastifiziereinheit erhitzt die Kunststoffmasse mittels Heizbänder auf eine vorgegebene Temperatur. Die Heizbänder erzeugen die Wärme, indem ein Material mit niedrigem elektrischem Widerstand von Strom durchflossen wird und sich dadurch erhitzt. Die Plastifiziereinheit hat drei Heizbereiche, in denen die Temperatur getrennt voneinander eingestellt werden kann. Die Temperaturen variieren je nach Material und Heizzone. In Abbildung 3.3 sind die drei Heizzonen eingezeichnet. Die erste Heizzone, für den Plastifizierbereich, hat eine Leistung von 1000 W, die zweite Heizzone, für den Dossierbereich, eine Leistung von 460 W und die dritte Heizzone, für die Düse, eine Leistung von 200 W. Sensoren überwachen die Temperaturen in den einzelnen Heizzonen. Ein elektronischer Regler regelt die Temperatur in den einzelnen Heizzonen auf die gewünschte Temperatur.

# 4 Modellierung der Verbraucher mittels Dymola

## 4.1 Struktur des Simulationsmodells

In Abbildung 4.1 ist ein Flussdiagramm dargestellt, das die Struktur des Modells veranschaulicht. Das Modell ist hierarchisch aufgebaut. Die Spritzgießmaschine teilt sich in die Hauptverbraucher Hydrauliksystem und Plastifiziereinheit auf. Das Hydrauliksystem lässt sich wiederum in die Einzelkomponenten Hydraulikaggregat, Steuerung, Druckregelventil und in die Hydraulikzylinder untergliedern. Der zweite Hauptverbraucher, die Plastifiziereinheit, wird in die drei Heizzonen und den Massenstrom unterteilt. Die Einzelkomponenten bestehen des Weiteren aus mehreren Komponenten, die vor allem aus der Standard Bibliothek von Modelica stammen. So besteht ein Hydraulikzylinder beispielweise aus dem Elementen Spring, Sweptvolum, Mass und Friction.

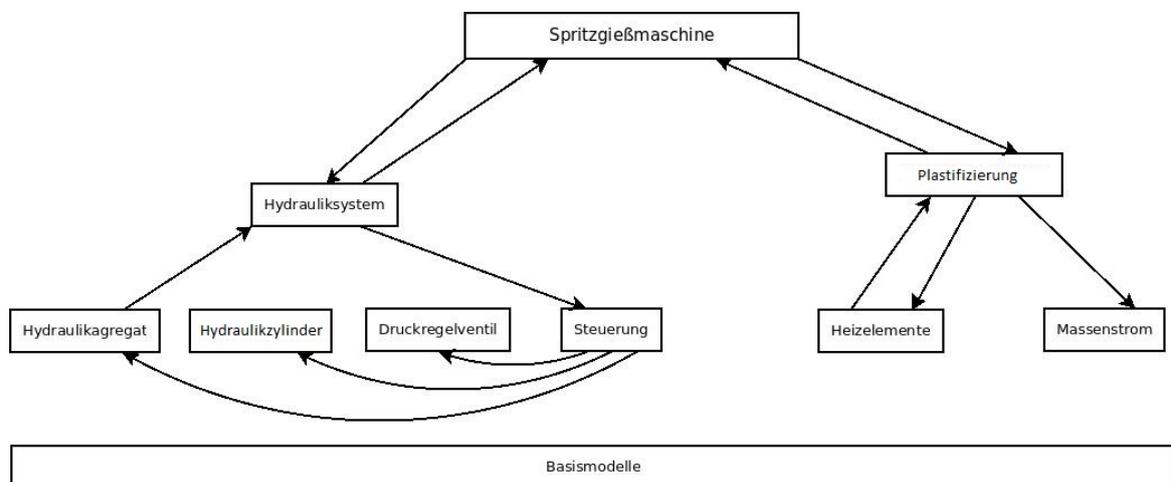


Abbildung 4.1: Struktur des Dymola Modells der Spritzgießmaschine

Die Pfeile im Diagramm symbolisieren den Austausch von Daten. So werden Prozessparameter, wie zum Beispiel Drücke, Geschwindigkeiten und Temperaturen, die im Modell Spritzgießmaschine eingestellt werden können, an die darunterliegenden Modelle weitergegeben.

Genauso werden auch Daten, wie z.B die momentane Leistung des Hydraulikaggregats, an darüber liegende Modelle übermittelt. Es können aber auch Daten zwischen Komponenten, die in einer Ebene liegen, ausgetauscht werden. Zum Beispiel verarbeitet die Steuerung Prozessparameter und gibt die Signale im Anschluss an die Hydraulikzylinder, das Druckregelventil und das Hydraulikaggregat weiter.

Die Übergabe von Prozessgrößen kann mit Hilfe von Connectoren erfolgen oder sie werden im Modell als Parameter definiert. Prozessgrößen werden als Parameter gesetzt, wenn sie während der Simulation konstant bleiben. Hingegen werden Größen, die im Verlauf der Simulation ihren Wert ändern, über Connectoren übergeben. Maschinenkonstanten, wie beispielsweise geometrische Größen, Stoffwerte, Wirkungsgrade, usw., die bei jeder Simulation gleich bleiben, werden direkt im Modell definiert und können nicht mehr im Hauptmodell Spritzgießmaschine eingestellt werden.

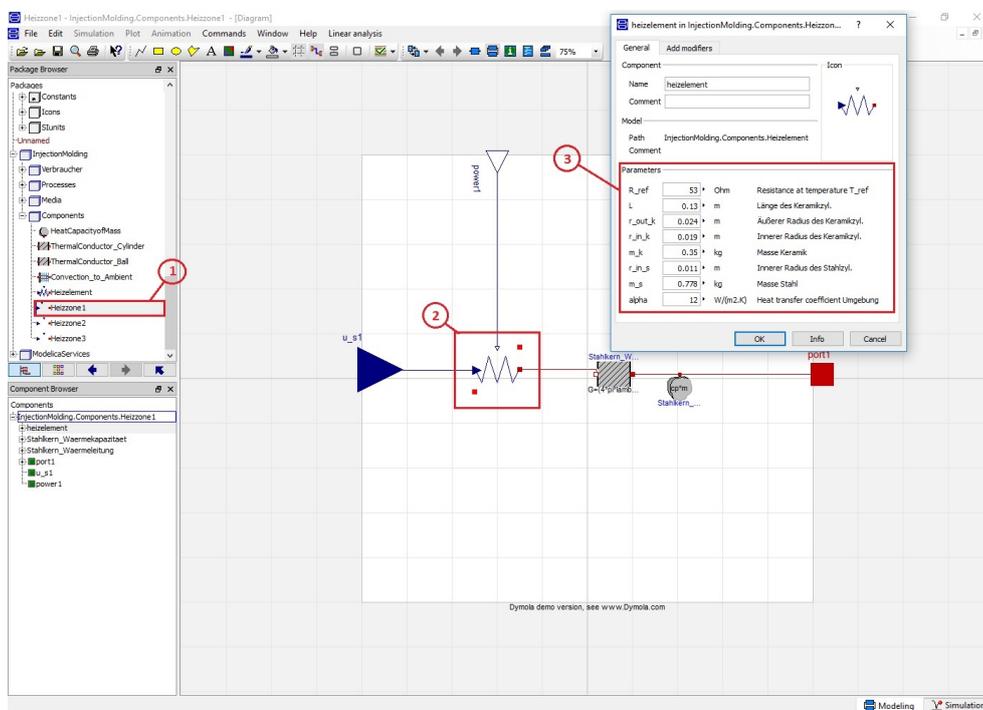


Abbildung 4.2: Änderung von Parametern

In Abbildung 4.2 wird veranschaulicht wie Maschinenkonstanten geändert werden können. Dazu muss zunächst das Modell, welches die entsprechenden zu verändernden Parameter enthält, in der Bibliothek geöffnet werden (1). Anschließend muss noch die Komponente angewählt werden, an der der Parameter geändert werden soll (2). Daraufhin öffnet sich das Menü der Komponente, indem alle Parameter dargestellt und angepasst werden können (3). Nachdem der Parameter geändert wurde, muss das Modell nur noch gespeichert werden und die Änderungen werden auch im Hauptmodell übernommen.

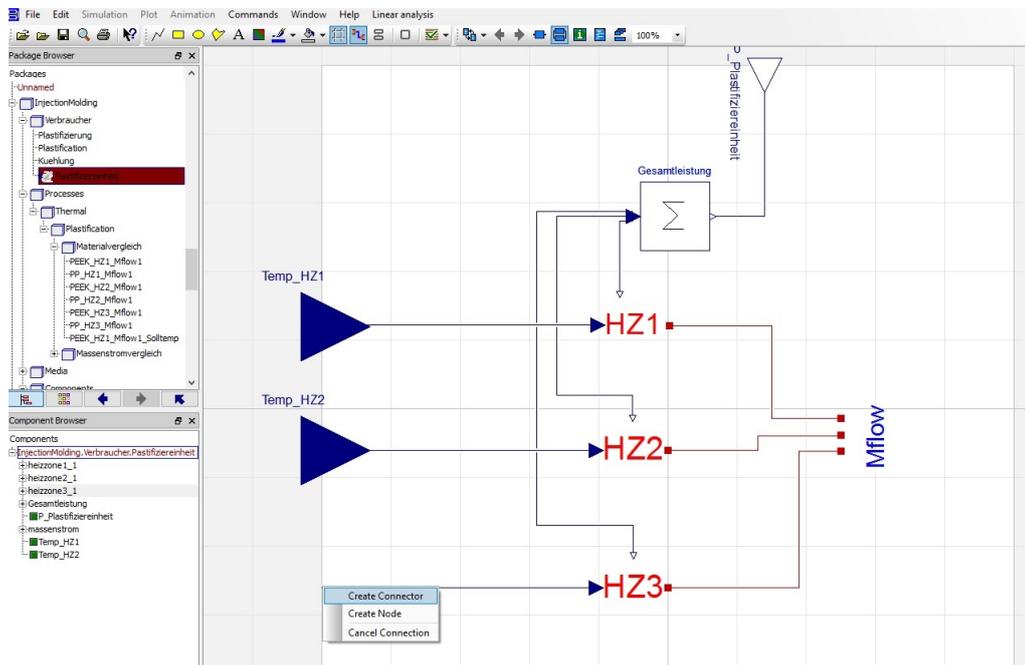


Abbildung 4.3: Erstellung eines Connectors

Mit Hilfe von einem Connector können Daten mit anderen Komponenten ausgetauscht werden. Abbildung 4.3 zeigt, wie ein Connector erstellt wird. Um einen Connector zu generieren, wird eine Verbindung von dem Ausgang/Eingang, der für andere Komponenten zugänglich gemacht werden soll, nach außen gezogen. Dann über die rechte Maustaste und dem, sich öffnenden Menü, „Create Connector“ auswählen. Über den Connector können nun Werte in das Modell übertragen werden.

## 4.2 Simulationsaufbau der Komponenten

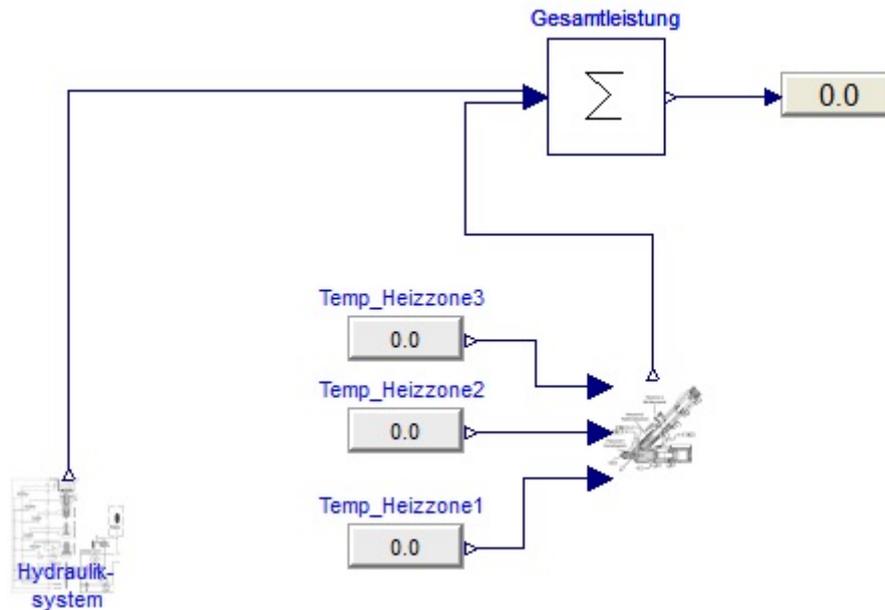


Abbildung 4.4: Dymola Modell der Spritzgießmaschine

In Abbildung 4.4 ist das Dymola Modell der Spritzgießmaschine dargestellt. Das Modell besteht aus den beiden Hauptverbrauchern: Hydrauliksystem und Plastifiziereinheit. Über Eingabefelder können die Temperaturen der drei Heizzonen eingestellt werden. Das Hydrauliksystem und die Plastifiziereinheit geben die aktuelle Leistung aus. Diese wird addiert, und die Gesamtleistung wird angezeigt. Der Aufbau der Hauptverbraucher wird in den nachfolgenden Abschnitten dargestellt.

### 4.2.1 Das Hydrauliksystem

In Abbildung 4.5 ist das Dymola Modell des Hydrauliksystems abgebildet. Das Hydrauliksystem besteht aus den Komponenten Hydraulikaggregat, Steuerung, Druckreduzierventil und den fünf Hydraulikzylindern. Von der Steuerung aus gehen Signale für den Sollvolumenstrom und Solldruck an das Hydraulikaggregat und das Druckreduzierventil. Außerdem gehen von der Steuerung noch Signale an die Hydraulikzylinder, mit denen diese betätigt werden. Die einzelnen Komponenten des Hydrauliksystems werden im Folgenden genauer betrachtet.

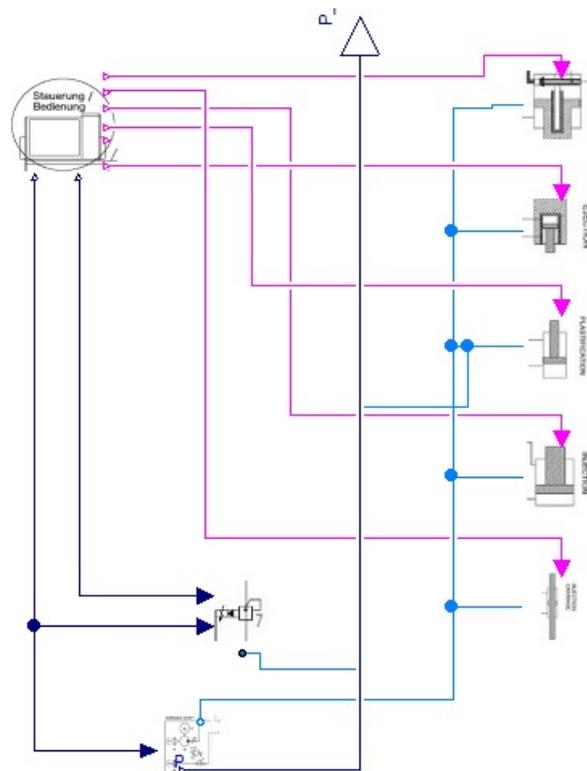


Abbildung 4.5: Dymola Modell des Hydrauliksystems

## Das Hydraulikaggregat

Das Modell des Hydraulikaggregats besteht aus verschiedenen Komponenten. Zur besseren Nachvollziehbarkeit ist in Abbildung 4.6 eine Übersicht des Modells dargestellt.

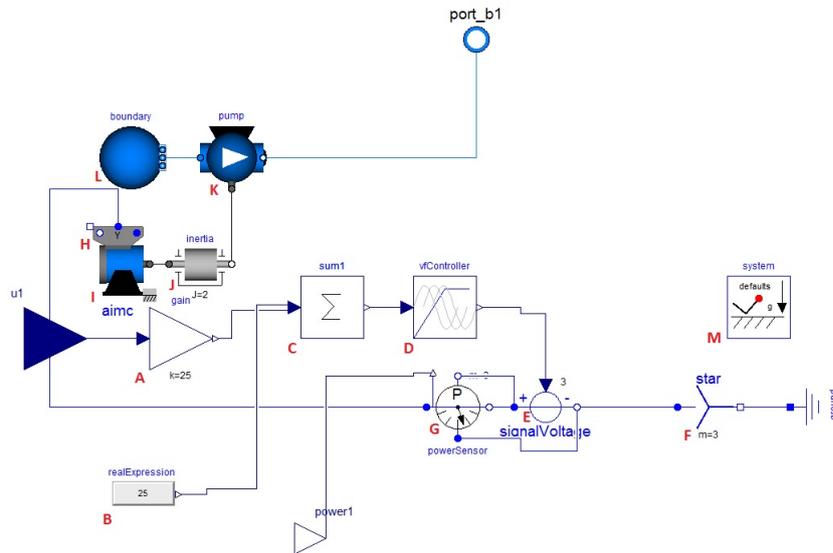


Abbildung 4.6: Dymola Modell des Hydraulikaggregats

Über den Eingang  $u_1$  wird ein Signal von der Steuerung aufgenommen. Das Signal beinhaltet die Sollgeschwindigkeit von 0 bis 100%. Es wird über die Komponenten (A), (B), und (C) wie folgt verarbeitet:

$$y = u_1 \cdot 25 + 25 \quad (4.1)$$

Dadurch entsteht bei einem Eingangssignal von 0% ein Ausgangssignal von 25 und bei einem Eingangssignal von 100% ein Ausgangssignal von 50. Die untere Grenze kann über den Parameter der Komponente (B) eingestellt werden und die obere Grenze über den Parameter der Gain Komponente (A) bestimmt werden. Das Ausgangssignal wird dann an den Voltage-Frequency-Controller (D) übergeben. Diese Komponente erzeugt ein Wechselspannungssignal, dessen Frequenz dem Wert des Eingangssignals entspricht. In der Komponente (E) wird das Signal aus dem Voltage-Frequency-Controller in eine elektrische Wechselspannung gewandelt. Über die Sternverbindung (F), ist die Spannung geerdet. Das ist notwendig, damit das Gleichungssystem bei der Berechnung nicht unterbestimmt ist. Der Leistungssensor (G) berechnet, aus der Spannung und dem Strom, die Leistung und gibt diese aus. Die Spannungsquelle ist über eine Schaltung (H), mit einem Asynchronmotor (I) verbunden. In der Schaltung (H) kann man festlegen, ob der Elektromotor in Stern- oder Dreieckschaltung mit der Spannungsquelle verbunden werden soll. Der Elektromotor wandelt die elektrische

Energie wiederum in mechanische Energie. Die mechanische Energie wird über eine Welle (J) an die Hydraulikpumpe (K) übertragen, welche die mechanische Energie in hydraulische Energie umwandelt. Die Komponente (L) dient zur Festlegung der Systemgrenzen. In diesem Fall die Temperatur und der Druck, die im Tank herrschen. Die hydraulische Energie wird anschließend an dem Port b ausgegeben.

## Druckreduzierventil

Die Funktionsweise des Druckreduzierventils wurde in Kapitel 2.2 beschrieben. Hier wird nun erläutert, wie das Druckreduzierventil im Modell simuliert wird. In Abbildung 4.7 ist der Modelica Code des Steuerventils dargestellt.

```

model Steuerventil
  "Valve for water/steam flows with linear pressure drop"
  extends Modelica.Fluid.Interfaces.PartialTwoPortTransport;
  parameter SI.AbsolutePressure dp_nominal
    "Nominal pressure drop at full opening";
  parameter Medium.MassFlowRate m_flow_nominal
    "Nominal mass flowrate at full opening";
  final parameter Types.HydraulicConductance k = m_flow_nominal/dp_nominal
    "Hydraulic conductance at full opening";
  Modelica.Blocks.Interfaces.RealInput druck(min=0,max=1)
    "a1: completely open, =0: completely closed"
  a;
  Modelica.Blocks.Interfaces.RealInput m_fl( min=0,max=1)
    "a1: completely open, =0: completely closed"
  a;
equation
  m_flow = if dp < dp_nominal*druck then 0 else (m_fl/druck)*k*dp;
  // Isenthalpic state transformation (no storage and no loss of energy)
  port_a.h_outflow = inStream(port_b.h_outflow);
  port_b.h_outflow = inStream(port_a.h_outflow);
a;
end Steuerventil;

```

Abbildung 4.7: Modelica Code des Steuerventils

Um das Druckreduzierventil zu simulieren wurde, auf Basis des in der Bibliothek vorhandenen Linearventils, das Steuerventil erstellt. Das Steuerventil hat zwei Signaleingänge. Über einen wird der Solldruck von der Steuerung übermittelt und über den anderen der Sollvolumenstrom. Mithilfe dieser Werte wird die Ventilkennlinie  $k$  so angepasst, dass der Druckabfall über das offene Ventil dem des Solldrucks entspricht, sobald der komplette Volumenstrom durch das Ventil strömt. Das Steuerventil ist als Bypass an die Druckleitung angeschlossen und mit dem Tank verbunden. Öffnet das Ventil, fließt der Volumenstrom über das Steuerventil ab. Da der Druckabfall über das Ventil dem Solldruck entspricht, wird der Druck in der Druckleitung auf diesen Wert gehalten. Damit das Ventil erst öffnet, wenn der Solldruck erreicht ist, wurde eine if...else Bedienung eingebaut. Somit hält das Ventil den Systemdruck konstant auf dem Sollwert.

Die Anpassung der Kennlinie des Steuerventils erfolgt, indem von der Steuerung ein Signal für den Solldruck von 0-130% an das Steuerventil übermittelt wird. Gleichzeitig wird ein Signal für den Sollvolumenstrom von 0-100% von der Steuerung an das Steuerventil übermittelt. Das Solldrucksignal von der Steuerung wird dann mit 100 bar multipliziert und das



Komponente Sum werden die einzelnen Trapezoid Signale miteinander zu einem fortlaufenden Signal verbunden. Die Komponente GreaterThreshold erzeugt ein Boolean Signal, das auf *true* wechselt sobald der Solldruck des jeweiligen Hydraulikzylinder größer als null wird. Mit dem Boolean Signal werden die Ventile gesteuert, die den Durchfluss zu den einzelnen Hydraulikzylinder öffnen.

## Hydraulikzylinder

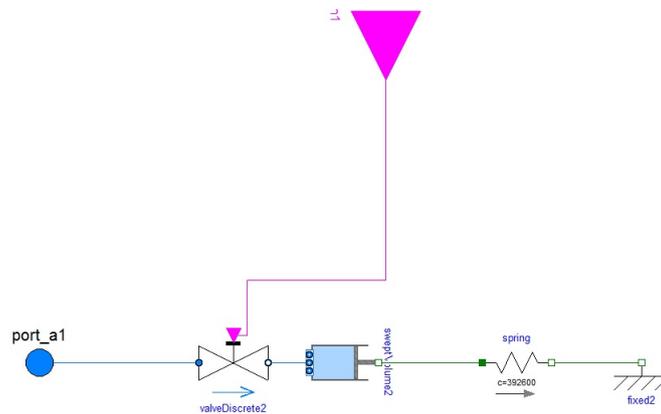


Abbildung 4.9: Dymola Modell eines Hydraulikzylinders

Hydraulikzylinder wandeln hydraulische in mechanische Leistung um. Die so entstehende translatorische Bewegung führt dazu, dass man Hydraulikzylinder auch als Linearmotoren bezeichnet. Kernstück der Modelle, die die Hydraulikzylinder der Spritzgießmaschine nachbilden sollen (siehe Abbildung 4.9), ist die Komponente SweptVolume. Mit dieser Komponente wird die hydraulische Leistung in mechanische Leistung umgewandelt. Über einen Fluid Port wird die hydraulische Energie von außen zugeführt. Ein diskretes Ventil, das von außen gesteuert wird, dient zur Betätigung des Hydraulikzylinders. Hinter der Komponente SweptVolume werden dann mechanisch Komponenten angeschlossen wie z.B Federn, Massen, oder Reibungskomponenten, die die mechanische Energie weiter in Potential- oder Wärmeenergie wandeln.

## 4.2.2 Plastifiziereinheit

In der Masterarbeit von Hautau wird mittels eines Modells der Plastifiziereinheit der Einfluss des Materials auf den Energieverbrauch untersucht. Dieses Modell wurde als Grundlage genommen, um den Verbraucher „Plastifiziereinheit“ zu simulieren. In der Masterarbeit werden die drei Heizzonen getrennt voneinander betrachtet. Um den Gesamtverbrauch der Spritzgießmaschine zu simulieren, müssen die Heizzonen in einem Modell zusammengefasst werden.

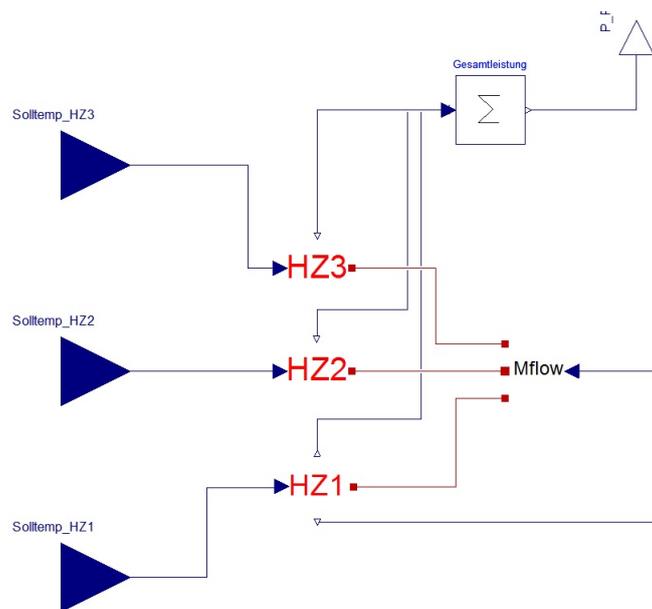


Abbildung 4.10: Dymola Modell der Plastifiziereinheit

In Abbildung 4.10 ist das Simulationsmodell dargestellt. Kernstück des Modells sind die drei Heizzonen HZ1, HZ2 und HZ3. Die Heizzonen besitzen drei Anschlüsse. Über den blauen Port wird der Heizzone die Solltemperatur übergeben. Über den roten Port wird ein Wärmestrom ausgegeben und über den weißen Port die Leistung, die Heizzone verbraucht, um die Kunststoffmasse zu erhitzen und auf Temperatur zu halten. Die Leistungen werden in der Komponente Gesamtleistung addiert und dann über einen Connector ausgegeben. Der Wärmestrom der Heizzonen wird an den Massenstrom übertragen. Die Solltemperaturanschlüsse der Heizzonen sind mit Connectoren verbunden, damit die Temperaturen von außen einstellbar sind.

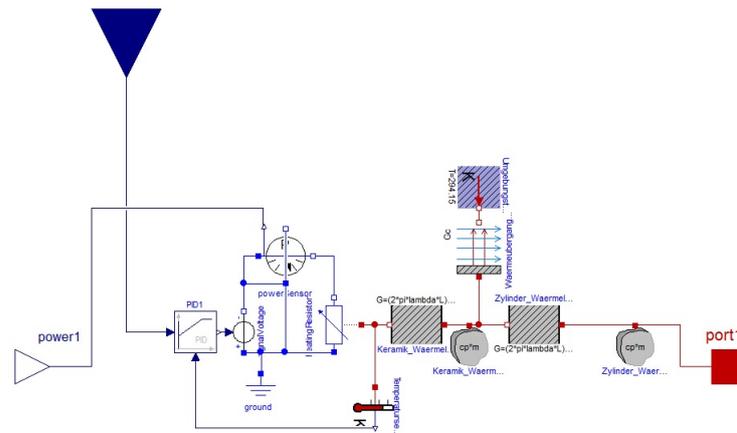


Abbildung 4.11: Dymola Modell vom Heizelement

## Heizzonen

Da sich die drei Heizzonen im Aufbau sehr ähnlich sind, wird zuerst aus dem Teil, der jedem Element gleich ist, ein neues Modell Heizelement erstellt. In Abbildung 4.11 ist das Modell des Heizelements abgebildet. Es besteht aus dem Heizwiderstand, der von einer Spannungsquelle gespeist wird. Die Spannungsquelle wird von einem PID-Regler geregelt. Die vom Heizwiderstand erzeugte Wärme, wird durch einen Keramikzylinder geleitet, in dem ein Teil der Wärme gespeichert wird. Die Wärme wird anschließend durch einen Metallzylinder geleitet, in dem ebenfalls Wärme gespeichert wird. Außerdem geht noch Wärmeenergie an die Umgebung verloren. Da bestimmte Größen, wie beispielsweise der Zylinderdurchmesser oder die Masse der Keramik, in den Heizzonen unterschiedlich sind, sind diese parametrisiert worden. Die Modelle der einzelnen Heizzonen beinhalten dann das Modell Heizelement und evtl. nachfolgende thermische Komponenten. Dabei wurden in der Komponente Heizelement die Parameter für die jeweilige Heizzone hinterlegt.

## Massenstrom

In der Abbildung 4.12 ist das Modell der Komponente Mflow zu erkennen, mit der der Kunststoffmassenstrom abgebildet werden soll. Um den Kunststoffmassenstrom zu simulieren, werden Komponenten der Bibliothek Thermal.FluidHeatFlow benutzt. Mit der Bibliothek Thermal.FluidHeatFlow lassen sich Wärmeübergänge an Flüssigkeiten simulieren. Über eine Pumpe wird der Kunststoffmassenstrom durch die einzelnen Bereiche der Spritzgießmaschine gefördert. Die Kunststoffmasse wird dabei einer Umgebung entnommen und in eine nachgeschaltete Umgebung gefördert. Der Plastifizier-, Dossier-, und Düsenbereich wird mit der Komponente HeatedPipe dargestellt, mit dem ein Rohr mit Wärmeaustausch simuliert

wird. In der Komponente HeatedPipe werden die Temperatur und die Masse an Kunststoff, die sich in dem jeweiligen Bereich befindet als Parameter hinterlegt. Der von der Heizzone erzeugte Wärmestrom wird, über den roten Port, dem Modell Mflow zugeführt. Der Wärmestrom wird anschließend, über einen konvektiven Wärmeübergang, dem jeweiligen Bereich und damit dem Massenstrom zugeführt. An die Pumpe schließt sich noch eine Regeleinheit an, die den Massenstrom regelt.

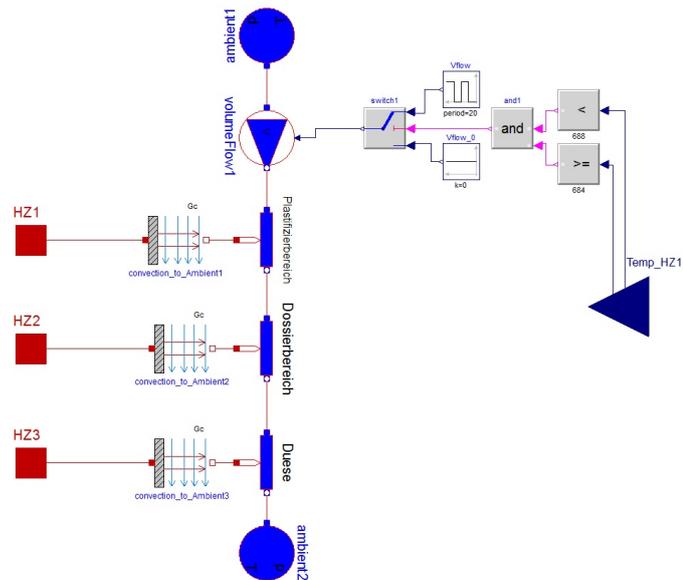


Abbildung 4.12: Dymola Modell vom Massenstrom

## 5 Validierung der Erkenntnisse und Simulation mittels Dymola

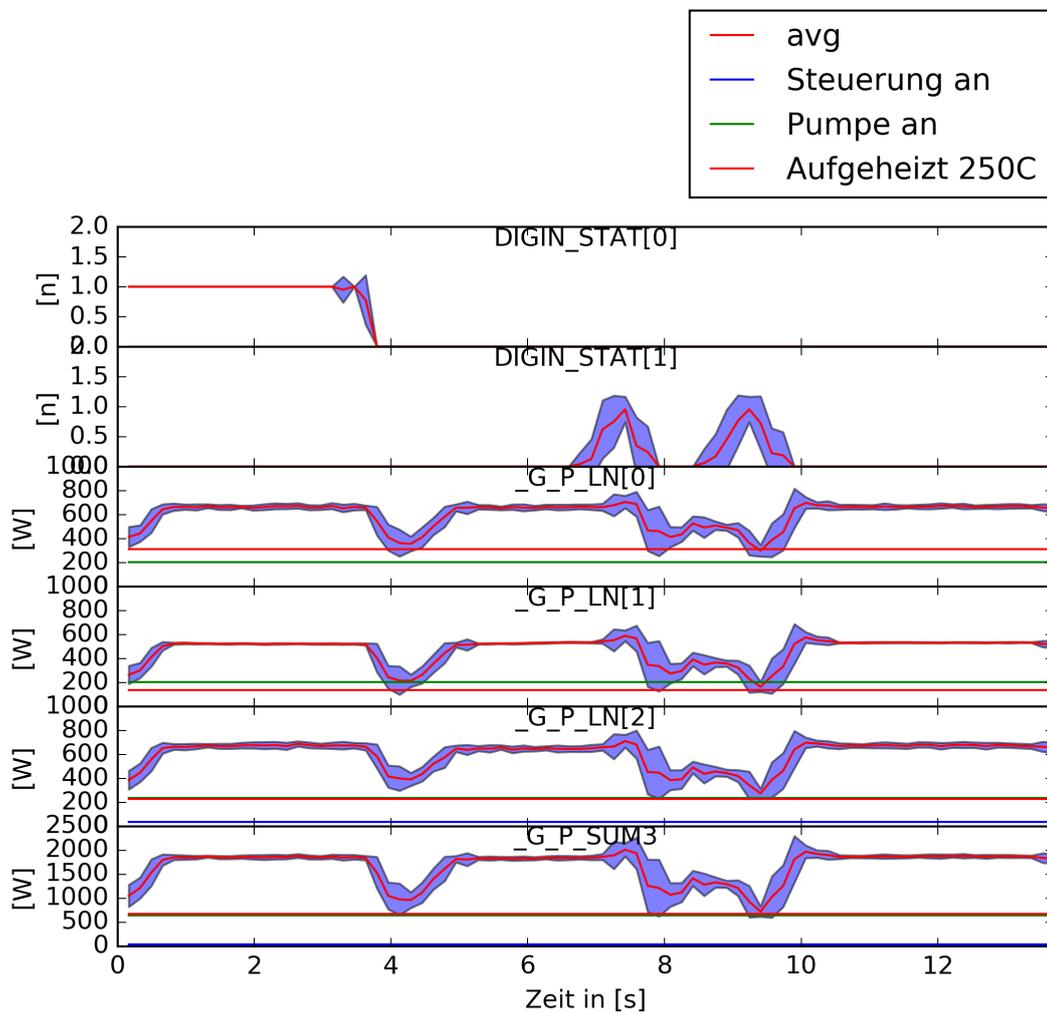


Abbildung 5.1: elektrische Leistung der Babyplast bei der Produktion eines Kunststoffteils

In der Abbildung 5.1 ist die Messung der elektrischen Leistungsaufnahme der Babyplast

über den Produktionszyklus dargestellt. Dazu wurde die Leistung beim Produktionsprozess mehrerer Bauteile aufgezeichnet und anschließend der Mittelwert bestimmt, welcher durch die roten Kurven repräsentiert wird.

In dem ersten Graph ist zu erkennen, wann sich das Magnetventil zur Betätigung des Einspritzzylinders öffnet. Der Sprung in der Kurve markiert somit das Ende des Einspritzvorgangs. Im darunter liegenden Diagramm werden die Öffnungszeiten des Magnetventils für den Schließzylinder dargestellt. Bei dem ersten Peak in der Kurve wird das Spritzgießwerkzeug, durch die Betätigung des Zylinders, geöffnet und beim zweiten Peak wieder geschlossen. Die drei darauf folgenden Graphen zeigen den Leistungsverlauf der drei Phasen des Drehstroms L1, L2 und L3. Die letzte Kurve gibt die Gesamtleistung der Spritzgießmaschine wieder. Zu Beginn steigt die Leistungsaufnahme der Pumpe an, da zum Einspritzen ein hoher Druck aufgebaut werden muss. Dieser Druck muss beim Einspritzen gehalten werden, weshalb die Leistung für drei Sekunden auf dem gleichen Niveau bleibt. Nach Abschluss des Einspritzvorgangs fällt die Leistung kurzzeitig ab. Anschließend steigt diese aber sofort wieder etwas an, weil Druck aufgebaut werden muss um das Werkzeug zu öffnen. Das geringere Leistungsniveau zwischen Sekunde Acht und Zehn lässt sich dadurch erklären, dass beim Auswerfen und Ausführen der Maschinenbewegung ein geringerer Leistungsbedarf besteht, als beim Einspritzen. Zuletzt steigt die Leistung wieder an, da Druck aufgebaut wird, um das Werkzeug zu schließen und der Spritzgießprozess beginnt von vorn. Die Prozessschritte des Plastifizierens und Dosierens lassen sich im Leistungsverlauf noch nicht ausmachen. Möglicherweise finden diese statt, während der Druck zum Schließen des Werkzeugs aufgebaut wird. Um dies sichtbar zu machen wird die Messeinrichtung zukünftig noch erweitert.

Ein Vergleich der hier aufgezeigten Messdaten, mit dem simulierten Leistungsbedarf der Spritzgießmaschine, ist erst nach einer Weiterentwicklung des jetzigen Modells sinnvoll. Grund dafür ist, wie sich in den nachfolgenden Unterkapiteln zeigt, dass das Hydrauliksystem aufgrund von unbekanntem Kennwerten noch zu ungenauen Ergebnissen liefert. Damit ist auch die simulierte Gesamtleistung der Maschine stark fehlerbehaftet, da das Hydrauliksystem den Großteil der Leistung der Spritzgießmaschine bezieht.

## 5.1 Plastifiziereinheit

Die Ergebnisse aus der Simulation der Plastifiziereinheit sind in Abbildung 5.2 dargestellt. Hier ist die Leistungsaufnahme beim Aufheizen der Heizelemente auf eine Temperatur von 250 °C und anschließender Produktion abgebildet.

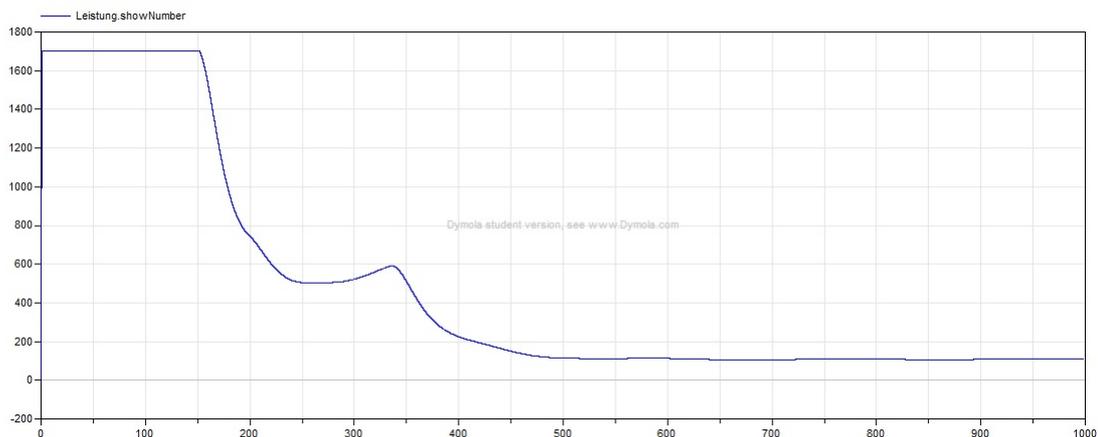


Abbildung 5.2: Leistung der Plastifiziereinheit

Am Anfang liegt die Leistungsaufnahme bei 1700 W, weil alle Heizelemente auf voller Leistung in Betrieb sind, um die Solltemperatur möglichst schnell zu erreichen. Ist diese erreicht, besteht nur noch ein geringer Leistungsbedarf, um das Temperaturniveau zu halten. Durch die Regelung wird die Leistungsaufnahme folglich gedrosselt. Dadurch sinkt die Leistung bei ca. 120 Sekunden abrupt auf einen Wert von 450 W ab. Gleichzeitig beginnt die Massenstromregelung Kunststoff zu fördern. Dies führt dazu, dass die Temperatur in der Plastifiziereinheit wieder fällt, weshalb die Heizelementregelung die Energiezufuhr wieder erhöht. Dadurch steigt die Leistungsaufnahme der Plastifiziereinheit noch einmal auf 600 W an. Ist die Prozesstemperatur anschließend wieder erreicht, pendelt sich die Leistung bei ca. 120 W ein, die bei der Produktion benötigt werden.

Damit liefert die Simulation der Plastifiziereinheit plausible Ergebnisse, die mit dem zu erwarteten Verlauf gut übereinstimmen.

## 5.2 Hydrauliksystem

In diesen Abschnitt werden die Simulationsergebnisse des Hydrauliksystems dargestellt. Die in den Abbildung 5.3 und 5.4 dargestellten Graphen sind mit den Parametern in Tabelle 5.1 generiert worden.

Tabelle 5.1: Parameter der Simulation des Hydrauliksystems

Hydraulikzylinder	Druck in bar	Geschwindigkeit in %
Injection	130	100
Plastification	120	40
Injection Carring	40	70
Ejection	40	10
Clamp	70	80

In Abbildung 5.3 ist der Druckverlauf bei der Simulation des Hydrauliksystems dargestellt. Die Zeit und die Reihenfolge in der die einzelnen Hydraulikzylinder aktiv sind, werden zu Testzwecken von der Steuerung des Hydrauliksystems vorgegeben. Bei dieser Simulation ist zuerst der Hydraulikzylinder Injection für vier Sekunden aktiv, danach für vier Sekunden der Zylinder Plastification. Anschließend sind die Zylinder Injection Carring und Ejection für je eine Sekunde aktiv, sowie zuletzt noch der Clamp-Zylinder für vier Sekunden.

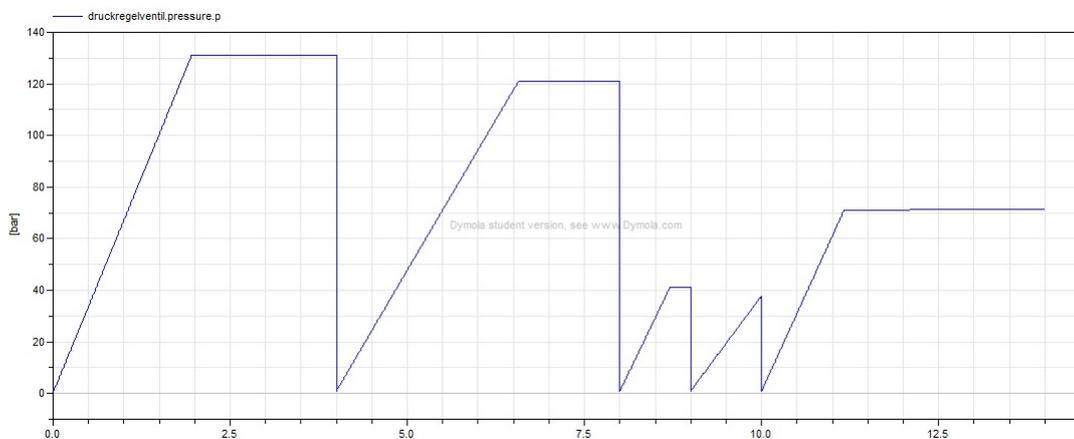


Abbildung 5.3: Druckverlauf bei der Simulation des Hydrauliksystems

Dadurch, dass an jedem Hydraulikzylinder eine Feder angeschlossen ist, steigt der Druck proportional zum Weg, den der Hydraulikarm zurücklegt. Schaltet die Steuerung, von einem Hydraulikzylinder zu einen anderen, fällt der Druckverlauf kurzzeitig ein. Es ist zu erkennen, dass das Modell des Druckreduzierventils gut funktioniert, da es erst eingreift wenn der Soll-druck erreicht ist und diesen dann konstant hält. Im Vergleich zum Hydraulikzylinder Injection

steigt der Druck beim Zylinder Plastifikation langsamer an. Dies liegt daran, dass beim Hydraulikzylinder Injection eine höhere Sollgeschwindigkeit eingestellt wurde, was zeigt, dass die Geschwindigkeitsregelung über den Frequenzumrichter ebenfalls gut anspricht.

Zur Simulation der elektrischen Leistung ist im Modell ein Leistungssensor vorgesehen. Dieser liefert bisher allerdings keine schlüssigen Ergebnisse, was auf eine fehlerhafte Parametrisierung des Elektromotors zurückzuführen ist, da noch keine Kennwerte des Motors vorliegen. Deshalb wurde, die in Abbildung 5.4 dargestellte, Leistungskurve bestimmt, indem die mechanische Leistung an der Welle zwischen Elektromotor und Hydraulikpumpe abgenommen und durch einen Standartwert für den elektrischen Wirkungsgrad des Elektromotors dividiert wurde.

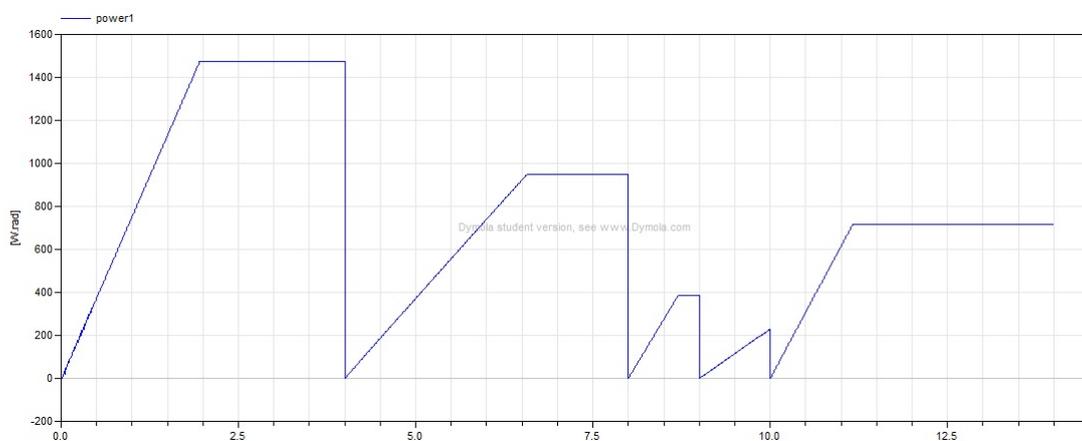


Abbildung 5.4: Leistungsverlauf bei der Simulation des Hydrauliksystems

Aus dem Graph wird deutlich, dass die Leistung höher ist, je höher auch die eingestellte Geschwindigkeit und der Druck ist. Dies entspricht den Erwartungen.

Die Ergebnisse, die die Hydrauliksystem-Simulation liefert, eignen sich noch nicht zu einem Vergleich mit Messwerten. Dies hat verschiedene Ursachen. Zum einen werden bei den Hydraulikzylindern beispielsweise noch keine Reibungsverluste oder der Einfluss von Trägheitskräften berücksichtigt und zum anderen fehlen, nicht nur die Kennwerte des Elektromotors zur Parametrisierung, sondern auch die des Frequenzumrichters, der Hydraulikpumpe usw. Die Simulationsergebnisse zeigen trotzdem, dass es grundsätzlich möglich ist das Hydrauliksystem in Dymola abzubilden, da der Verlauf qualitativ den Erwartungen entspricht.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Thesis wurden die Hauptenergieverbraucher der Mikrospritzgießmaschine Babyplast, der Firma CHRISTMANN Kunststofftechnik GmbH, mithilfe der Software Dymola simuliert. Dazu wurden zunächst die Grundlagen des Spritzgießens erarbeitet. Denn nur durch ein besseres Verständnis der physikalischen Vorgänge und der Entstehung von Energieströmen in der Maschine, lässt sich der Spritzgießprozess plausibel abbilden und modellieren. Da die Simulation einer gesamten Spritzgießmaschine eine sehr komplexe Aufgabe darstellt, wurde der Umfang dieser Arbeit auf eine Modellierung der Hauptenergieverbraucher beschränkt. Das Hydrauliksystem und die Plastifiziereinheit wurden bei einer Verbrauchsanalyse der Spritzgießmaschine als die relevanten Hauptverbraucher identifiziert. Diese wurden anschließend genauer betrachtet, wobei die Untersuchung des Hydrauliksystems besonders aufwendig war, da der Hydraulikplan der Babyplast, bei den vielen Gestaltungsmöglichkeiten von Hydrauliksystemen, schwer zu durchschauen war. Nach der abgeschlossenen Analyse der Hauptverbraucher, wurden diese in der Simulationsumgebung Dymola abgebildet. Dafür musste eine sinnvolle Struktur geschaffen werden, damit das Modell nicht zu unübersichtlich wird. Das Modell wurde daher in einzelne Komponenten untergliedert, wobei zu komplexe Komponenten nochmals unterteilt wurden. Bei dieser Untergliederung wurde Wert darauf gelegt, dass die Komponenten des Modells möglichst die Funktionen eines Bauteils der Spritzgießmaschine widerspiegeln. Außerdem war es besonders wichtig sinnvolle Schnittstellen zwischen den Einzelkomponenten zu erzeugen, damit mögliche Wechselwirkungen berücksichtigt werden können.

Mit den erstellten Simulationsmodellen wurden nachvollziehbare Ergebnisse erzeugt. Besonders die Simulationsergebnisse der Plastifiziereinheit entsprechen den Erwartungen, sodass diese mit Daten aus Messungen an der Babyplast verglichen werden können. Die Ergebnisse des Hydrauliksystems sind ebenfalls plausibel, lassen sich aber mit Messungen noch nicht abgleichen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in das Modell der Plastifiziereinheit schon Kennwerte der Spritzgießmaschine eingepflegt werden konnten, was beim Hydrauliksystem nicht der Fall ist. Insgesamt wurde gezeigt, dass eine Modellierung der Spritzgießmaschine in Dymola möglich ist und bei hinreichender Parametrisierung zu guten Ergebnissen führt.

Um den Gesamtverbrauch der Spritzgießmaschine möglichst exakt abbilden zu können, muss das Simulationsmodell in nachfolgenden Arbeiten noch durch die Verbraucher mit geringer Leistung erweitert werden. Zusätzlich muss für eine energetische Gesamtbetrachtung

der Maschine auch noch das Kühlsystem (siehe Abbildung 3.1) untersucht und berücksichtigt werden. Auch die Steuerung muss überarbeitet werden, da diese bisher nur stark vereinfacht modelliert wurde, um das Simulationsmodell testen zu können. Die tatsächliche Steuerung der Maschine ist dagegen deutlich komplexer und bietet wesentlich mehr Einstellmöglichkeiten. Außerdem muss untersucht werden, in welche Art von mechanischer Arbeit, wie z.B. in Reibung, die von den Hydraulikzylindern aufgebrachte Arbeit umgesetzt wird. Des Weiteren muss das Gesamtmodell noch mit entsprechenden Kennwerten parametrisiert werden, wozu eine aufwendige Auswertung von Messungen, Datenblättern der Maschine und Literatur notwendig ist. Die Generierung eines hinreichend genauen Simulationsmodells erfordert folglich noch einen hohen Untersuchungs- und Modellierungsaufwand.

Der Nutzen eines solchen Simulationsmodells rechtfertigt allerdings den Aufwand, da dadurch der Energieverbrauch der Spritzgießmaschine bei bestimmten Prozessparametern hervorgesagt werden kann. Es lassen sich interne Energieströme aufzeigen und deren Größe bestimmen. Dadurch können auch Energieverluste im Spritzgießprozess erkannt und entsprechende Maßnahmen zur Vermeidung entwickelt werden. Diese können wiederum am generierten Modell auf ihre Wirksamkeit hin untersucht und bewertet werden. Insgesamt kann der Energieverbrauch der Maschine optimiert werden, was zu einer wirtschaftlicheren Auslastung und damit zu Kosteneinsparung führt.

# Literaturverzeichnis

- [Ack11] ACKER, BERND: *Simulationstechnik. Grundlagen und praktische Anwendungen*. Expert Verlag, Renningen, 2 Auflage, 2011.
- [Bic12] BICHLER, MARTIN: *Prozessgrößen beim Spritzgießen. Analyse und Optimierung*. Beuth Verlag, 2 Auflage, 2012.
- [Cro14] CRONOPLAST S.L., Barcelona, Spanien: *Babyplast Bedienungsanleitung*, 6 Auflage, 2014.
- [DAS14] DASSAULT SYSTEMES: *Standard Library der Dymola Studentenversion 2014 - Informationstextansichten*, 2014.
- [Hau15] HAUTAU, ANJA: *Abbildung einer Produktionsstätte der Spritzgusstechnik mit Hilfe der Simulationsoftware Dymola*. Masterthesis, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2015.
- [HKW15] HARTMANN, MARKUS, PETER KARLINGER und MARTIN WÜRTELE: *Optimieren druck Simulieren*. Kunststoffe, 11/2015:60–63, 2015.
- [JM04] JOHANNABER, FRIEDRICH und WALTER MICHAELI: *Handbuch Spritzgießen*. Carl Hanser Verlag, München, 2 Auflage, 2004.
- [MGKE09] MICHAELI, WALTER, HELMUT GREIF, GERNOT KRETSCHMER und FRANK EHRING: *Technologie des Spritzgießens. Lern- und Arbeitsbuch*. Carl Hanser Verlag, München, 3 Auflage, 2009.
- [MR14] MATTHIES, HANS JÜRGEN und KARL THEODOR RENIUS: *Einführung in die Ölhydraulik*. Springer Verlag, Berlin; Heidelberg, 8 Auflage, 2014.
- [SK04] STITZ, SIEGFRIED und WALTER KELLER: *Spritzgiesstechnik: Verarbeitung - Maschine - Peripherie*. Carl Hanser Verlag, München, 2 Auflage, 2004.
- [Spi14] SPIERING, TIM: *Steigerung der Wirtschaftlichkeit im Kunststoffspritzgießen durch Energieeffizienz*. Vulkan-Verlag, Essen, 2014.
- [Tee15] TEETZEN, KENNETH: *Energieeffizienz in der Spritzgussproduktion*. Masterprojekt, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2015.

- 
- [Wat15] WATTER, HOLGER: *Hydraulik und Pneumatik. Grundlagen und Übungen - Anwendungen und Simulation*. Springer Vieweg Verlag, Berlin; Heidelberg, 4 Auflage, 2015.
- [WG15] WILL, DIETER und NORBERT GEBHARDT: *Hydraulik - Grundlagen, Komponenten, Systeme*. Springer Verlag, Berlin; Heidelberg, 6 Auflage, 2015.
- [WH09] WINTERMANTEL, ERICH und SUK-WOO HA: *Medizintechnik*. Springer Verlag, Berlin; Heidelberg, 5 Auflage, 2009.
- [Wit15] WITT, JONAS: *Energieströme in der Spritzgussproduktion*. Bachelorarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2015.



## 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 selbständig 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: Tönges

Vorname: Jannik

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

Simulation der Energieverbraucher einer Spritzgießmaschine

ohne fremde Hilfe selbständig 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 -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

08.12.2016

Ort

Datum

Unterschrift im Original