



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Jonas Witt

Energieströme in der Spritzgussproduktion

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

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

Jonas Witt

Energieströme in der Spritzgussproduktion

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: Dipl.-Ing. Jens Brodersen

Abgabedatum: 23 Juli 2015

Zusammenfassung

Name des Studierenden

Jonas Witt

Thema der Bachelorarbeit

Energieströme in der Spritzgussproduktion

Stichworte

Spritzgießprozess, Energieströme, Simulation, Dymola, Plastifizieren, Urformen, Werkzeug, Reibungsenergie

Kurzzusammenfassung

In einem Forschungsprojekt soll der Spritzgießprozess in Bezug auf seine Energieeffizienz untersucht und verbessert werden. Diese Arbeit befasst sich mit den Grundlagen des Spritzgießprozesses, wobei der Schwerpunkt auf die Herleitung der Energieströme gelegt wird. Diese werden auf Grundlage des Prozessablaufes hergeleitet und in Bezug auf ihre möglichen Einsparpotentiale qualitativ bewertet. Der Energiestrom im Plastifizierbereich einer Spritzgießmaschine, wird mit der Simulationssoftware Dymola, simuliert. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Einsparung im Plastifizierbereich möglich ist. Diese ergibt sich aus der optimierten Ausnutzung der verfügbaren Plastifizierzeit, sowie der besseren Ausnutzung der Reibungswärme. Die Arbeit zeigt weitere Einsparpotentiale auf, an denen geforscht werden könnte.

Name of Student

Jonas Witt

Title of the paper

Energy flows in the injection molding production

Keywords

Injection molding process, energy flows, simulation, Dymola, plastification, primary shaping, friction energy

Abstract

In a research project, the injection molding is to be examined and improved in terms of its energy efficiency. This work is concerned with the basics of the injection molding process, with emphasis on the derivation of energy flows. These are derived on basis of the process sequence and qualitatively assessed in terms of their potential for energy savings. The energy flow in the transition zone of an injection molding machine is to be simulated in the Simulation Software Dymola. The results show that considerable savings are possible in the transition zone. This results from the optimized utilization of the available plastification time, and the better utilization of the frictional heat. The study shows potential additional savings, that can be further examined.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-------------|
| Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen | VI |
| Abbildungsverzeichnis | VIII |
| Tabellenverzeichnis | IX |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Problemstellung | 1 |
| 1.2 Ziel der Arbeit | 1 |
| 1.3 Begrenzung der Arbeit | 1 |
| 2 Grundlagen der Spritzgießtechnik | 2 |
| 2.1 Werkstoff | 2 |
| 2.1.1 Thermoplaste | 3 |
| 2.1.2 Recycling von Thermoplasten | 4 |
| 2.1.3 Zusatzstoffe für Thermoplaste | 5 |
| 2.2 Aufbau der Maschine | 6 |
| 2.2.1 Plastifizier- und Spritzeinheit | 6 |
| 2.2.2 Werkzeug | 9 |
| 2.3 Ablauf des Spritzgießprozesses | 10 |
| 2.3.1 Plastifizieren und Dosieren | 10 |
| 2.3.2 Einspritzen, Umschalten, Nachdrücken und Abkühlen | 11 |
| 2.3.3 Entformen und Werkzeug schließen | 12 |
| 3 Qualitative Betrachtung der Energieströme | 13 |
| 3.1 Prozessgrößen | 13 |
| 3.2 Ermittlung der Energieströme des Werkzeugs | 15 |
| 3.3 Ermittlung der Energieströme der Plastifizier- und Spritzeinheit | 17 |
| 3.4 Bewertung der Energieströme im Werkzeug | 19 |
| 3.5 Bewertung der Energieströme in der Plastifizier- und Spritzeinheit | 22 |
| 4 Abbildung der Reibungsenergie mittels Dymola | 25 |
| 4.1 Rechnerische Abbildung der Plastifizierzone | 25 |
| 4.2 Aufbau des Simulationsmodells | 27 |
| 4.3 Durchführung der Simulation | 28 |
| 4.4 Auswertung der Simulationsergebnisse | 29 |
| 5 Zusammenfassung und Ausblick | 33 |

| | |
|--|-------------|
| | V |
| Literaturverzeichnis | X |
| Anhang | XI |
| Erklärung zur selbständigen Bearbeitung der Abschlussarbeit | XVII |

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Verwendete Formelzeichen

| Größe | Einheit | Bedeutung |
|-------------|------------------|----------------------------|
| A | m^2 | Fläche |
| c | $\frac{J}{kgK}$ | spezifische Wärmekapazität |
| C | $\frac{J}{K}$ | Wärmekapazität |
| d | m | Durchmesser |
| D | $\frac{N}{m}$ | Dehnungskonstante |
| F | N | Kraft |
| h | $\frac{J}{kg}$ | spezifische Enthalpie |
| l | m | Länge |
| n | $\frac{1}{s}$ | Drehzahl |
| p | bar | Druck |
| P | W | Leistung |
| Q | J | Wärme |
| r | m | Radius |
| s | m | Strecke |
| t | s | Zeit |
| u | $\frac{m}{s}$ | Umfangsgeschwindigkeit |
| U | V | elektrische Spannung |
| v | $\frac{m}{s}$ | Geschwindigkeit |
| V | m^3 | Volumen |
| W | kJ | Arbeit |
| x | — | Anzahl |
| y | m | Abstand |
| τ | $\frac{N}{m^2}$ | Schubspannung |
| ρ | $\frac{kg}{m^3}$ | Dichte |
| γ | $\frac{1}{s}$ | Schergeschwindigkeit |
| ϑ | $^{\circ}C$ | Temperatur |
| λ | $\frac{W}{mK}$ | Wärmeleitfähigkeit |
| η | $Pa \cdot s$ | Viskosität |

Indizes

| Indize | Bedeutung |
|---------------|------------------|
| <i>a</i> | außen |
| <i>A</i> | Auswerfer |
| <i>An</i> | Antrieb |
| <i>B</i> | Bauteil |
| <i>Do</i> | Dosieren |
| <i>Dü</i> | Düse |
| <i>Ein</i> | Einspritzen |
| <i>HK</i> | Heißkanal |
| <i>H</i> | Heizung |
| <i>Hy</i> | Hydraulik |
| <i>HZ</i> | Heizzone |
| <i>i</i> | innen |
| <i>I</i> | Isolation |
| <i>K</i> | Kunststoff |
| <i>Kü</i> | kühlen |
| <i>Na</i> | Nachdrücken |
| <i>r</i> | repräsentativ |
| <i>R</i> | Reibung |
| <i>s</i> | schließen |
| <i>S</i> | Säule |
| <i>Sch</i> | Schnecke |
| <i>Sm</i> | Schmelz |
| <i>Sp</i> | Spritzen |
| <i>T</i> | Temperierung |
| <i>U</i> | Umgebung |
| <i>Um</i> | Umschalten |
| <i>V</i> | Verlust |
| <i>Wz</i> | Werkzeug |
| <i>z</i> | zuhalten |
| <i>Z</i> | Zyklus |
| <i>ZK</i> | Zylinderkopf |

Verwendete Abkürzungen

| | |
|-----|---------------------|
| SGM | Spritzgießmaschine |
| SGP | Spritzgießprozess |
| SGV | Spritzgießverfahren |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Engmaschig vernetzte Makromolekülketten [Bri14] | 2 |
| 2.2 | Leicht vernetzte Makromolekülketten [Bri14] | 3 |
| 2.3 | Lineare und verzweigte Makromolekülketten [Bri14] | 3 |
| 2.4 | Formänderungsverhalten eines amorphen Kunststoffes [Fri01] | 4 |
| 2.5 | Formänderungsverhalten eines teilkristallinen Kunststoffes [Fri01] | 5 |
| 2.6 | Darstellung einer SGM mit Schneckenplastifizierung; Quelle: modifiziert nach [SGM15] | 7 |
| 2.7 | Maschine mit Schneckenplastifizierung und Kolbenspritzeinheit; Quelle: modifiziert nach [Sti04] | 8 |
| 2.8 | Zeitlicher Ablauf des Spritzzyklus; Quelle: eigene Darstellung | 11 |
| 3.1 | Das Energie Ersatzschaltbild des Werkzeugs; Quelle: eigene Darstellung . | 18 |
| 3.2 | Das Energie Ersatzschaltbild der Plastifizier- und Spritzeinheit; Quelle: eigene Darstellung | 20 |
| 3.3 | Einflussgrößen auf die Viskosität [Bic12] | 23 |
| 3.4 | Einfluss der Einspritzgeschwindigkeit, sowie der Abkühlung auf die Druckverluste [Jar13] | 24 |
| 4.1 | Rheologisches Verhalten von PEEK [Sol13] | 26 |
| 4.2 | Schaltbild des Dymola Modells; Quelle: Dymola | 27 |
| 4.3 | Ergebnis der Simulation; Quelle: eigene Darstellung | 29 |
| 4.4 | Wärmeeintrag über der Heizdauer; Quelle: eigene Darstellung | 30 |
| 4.5 | Reibungswärme bei unterschiedlichen Umfangsgeschwindigkeiten der Schnecke; Quelle: eigene Darstellung | 31 |
| 4.6 | Viskosität bei unterschiedlichen Schergeschwindigkeiten der Schnecke; Quelle: eigene Darstellung | 31 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Verwendete Kunststoffe in der IES GmbH | 5 |
| 3.1 | Prozessgrößen beim SGP | 14 |
| 4.1 | Daten der Heizzone eins in der Arburg 270C | 28 |

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wird der Energieverbrauch bei der Spritzgussproduktion ermittelt und untersucht. Hierfür werden alle Energieströme in der Maschine berechnet und bewertet. Auf Basis der ermittelten Energieströme wird mit Hilfe der Simulationssoftware „Dymola“ eine Simulation entwickelt, die den Energieverbrauch und das Systemverhalten vorhersagt. Dieses Projekt wird in Zusammenarbeit mit der Firma IES (Innovative Erodier Systeme) GmbH durchgeführt. Das Unternehmen ist in Barsbüttel ansässig und hat sich auf das Erodieren und Spritzgießen spezialisiert. Es stellt die benötigten Daten für das Projekt zur Verfügung.

1.2 Ziel der Arbeit

In dieser Arbeit wird der Grundstein für die Verbesserung des Spritzgießverfahrens in Hinblick auf die Energieeffizienz gelegt. Hierfür wird für das bessere Verständnis der Arbeit zunächst der Aufbau der Spritzgießmaschine (SGM), der Spritzgießprozess (SGP) und der verwendete Werkstoff erläutert, um anschließend die Energieströme in der SGM herzuleiten. Diese sollen zur Entwicklung einer Simulation des Spritzgießprozesses verwendet werden. Die hergeleiteten Energieströme werden qualitativ bewertet, wobei der Schwerpunkt auf den Einsparpotenzialen bei diesen liegt. Auf Basis der Simulation eines Teilbereichs des SGP und den Prozessdaten der IES GmbH wird eine quantitative Bewertung durchgeführt.

1.3 Begrenzung der Arbeit

Diese Arbeit beschäftigt sich nur mit dem Spritzgießen von Kunststoffen, speziell den Thermoplasten. Das erläuterte Verfahren, die beschriebenen Maschinenbestandteile und die Energieströme beziehen sich auf das Thermoplastspritzgießen. Die ermittelten Energieströme werden qualitativ bewertet. Die quantitative Analyse beschränkt sich auf die Bewertung der Energieströme auf Basis der von der IES GmbH zur Verfügung gestellten Daten und den in der Simulation ermittelten Größen. In der Simulation wird der Energieverbrauch der Plastifiziereinheit simuliert.

2 Grundlagen der Spritzgießtechnik

Das Spritzgießverfahren ist nach DIN 8580 ein Urformverfahren, welches zu der Gruppe „Urformen aus dem plastischen Zustand“ zählt. Bei diesem wird der Werkstoff in den plastisch verformbaren Zustand gebracht, um aus diesem Zustand heraus das fertige Bauteil Ur zu formen. Heutzutage sind ca. 60% aller Kunststoff verarbeitenden Maschinen SGM. Bei diesem Verfahren können Bauteile mit einem Gewicht von wenigen Zehntel Gramm bis hin zu etlichen Kilogramm hergestellt werden [Sti04]. Im Folgenden wird auf den Werkstoff, die Maschine und den Prozessablauf zur Herstellung von Kunststoffbauteilen mittels des Spritzgießens eingegangen.

2.1 Werkstoff

Beim Spritzgießen können sowohl Kunststoffe als auch Metalle als Werkstoff verwendet werden [Fri01]. In dieser Arbeit wird nur auf die Verarbeitung von Kunststoffen eingegangen. Diese sind Makromolekulare Stoffe, die aus vielen Makromolekülketten bestehen. Makromolekülketten sind eine Aneinanderreihung von vielen Molekülen zu einer Kette. Die verschiedenen Kunststoffe können nach ihren mechanisch-thermischen Eigenschaften in Thermoplaste, Duroplaste oder Elastomere eingeteilt werden. Die Duroplaste sind sehr harte und spröde Kunststoffe. Wenn dieser Kunststoff aus der Schmelze abkühlt und erhärtet, vernetzen sich die Makromolekülketten sehr engmaschig (vgl. Abb. 2.1), sodass bei erneutem Erhitzen das Material bis kurz vor der Zersetzungstemperatur hart und spröde bleibt und der Prozess somit irreversibel ist. Die besondere Eigenschaft von Elastomeren ist ihr elastisches Verhalten, welches durch ihre leicht vernetzten Makromolekülketten (vgl. Abb.2.2) zustande kommt [Bri14]. Dieser Kunststoff lässt sich ähnlich wie die Duroplaste nicht beliebig aufschmelzen, sondern zersetzt sich wie diese bei zu hohen Temperaturen. Auf die noch nicht genauer erläuterten Thermoplaste wird im weiteren Verlauf eingegangen, da in dieser Arbeit nur das Thermoplastspritzgießen behandelt wird. Die im Folgenden genannten Kunststoffe sind Thermoplaste.



Abbildung 2.1: Engmaschig vernetzte Makromolekülketten [Bri14]

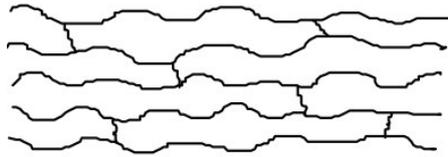


Abbildung 2.2: Leicht vernetzte Makromolekülketten [Bri14]

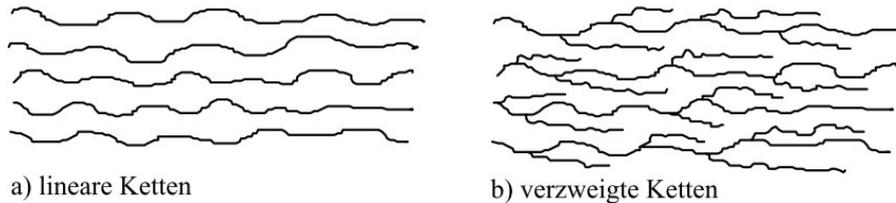


Abbildung 2.3: Lineare und verzweigte Makromolekülketten [Bri14]

2.1.1 Thermoplaste

Die Besonderheit bei Thermoplasten ist ihre Wiederaufschmelzbarkeit und die Möglichkeit sie zu schweißen und zu lösen. Diese Eigenschaften besitzen sie aufgrund des Aufbaues ihrer Makromolekülketten untereinander, welche als lineare oder als leicht verzweigte Ketten vorliegen (vgl. Abb.2.3). Diese einzelnen Ketten werden ausschließlich durch sekundäre Bindungskräfte zusammengehalten [Fri01]. Thermoplaste zeigen ein strukturviskoses Verhalten, das bedeutet, dass mit steigender Schergeschwindigkeit die Viskosität sinkt. Auf Grund ihres thermodynamischen Verhaltens werden thermoplastische Kunststoffe in amorphe und teilkristalline Kunststoffe unterteilt. Die Unterschiede werden bei Betrachtung ihres Formänderungsverhaltens in Abhängigkeit der Temperatur deutlich.

Amorphe Kunststoffe liegen bei Raumtemperatur in einem harten, spröden Zustand vor. Dieser wird auch Glaszustand genannt. In Abb.2.4 ist zu erkennen, dass sich die Eigenschaft des Werkstoffes beim Überschreiten der Glasübergangstemperatur T_G drastisch ändert. Die Festigkeit nimmt stark ab, während die Dehnbarkeit deutlich zunimmt. In diesem Stadium ist der Kunststoff hoch elastisch und verhält sich wie Kautschuk. Wird er weiter erhitzt, erreicht der Werkstoff seinen Fließbereich, indem die Viskosität soweit gesunken ist, dass ein urformendes Verarbeiten möglich wird. Wird der Kunststoff weiter erhitzt, kommt er in den Zersetzungsbereich, in dem sich die Hauptvalenzbindungen auftrennen und der reversible Aufschmelzprozess in einen irreversiblen Prozess übergeht. Wird diese Temperatur nicht überschritten, kann der Werkstoff theoretisch beliebig oft aufgeschmolzen und wieder abgekühlt werden. Der für das Spritzgießen relevante Bereich liegt zwischen dem Fließbereich und dem Zersetzungsbereich des Werkstoffes. Beim Spritzgießen ist dieser Prozess begrenzt, da mit jeder Wiederholung die mechanischen Eigenschaften geringfügig schlechter werden [Fri01].

Bei einem **teilkristallinen Thermoplast** liegen unterhalb der Glasübergangstempera-

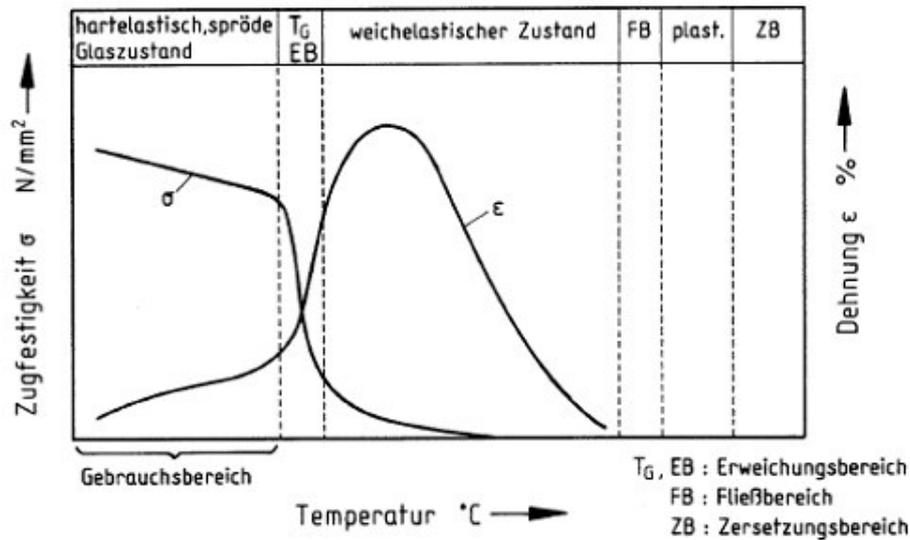


Abbildung 2.4: Formänderungsverhalten eines amorphen Kunststoffes [Fri01]

tur zwei Phasen vor. Die kristallinen Strukturen sind in amorphe Bereiche eingebettet. Der Werkstoff ist stark spröde. Wie in Abb. 2.5 zu erkennen ist, verändern sich die Eigenschaften des Kunststoffes mit Überschreiten der Glasübergangstemperatur deutlich weniger als bei einem rein amorphen Thermoplast. Dies liegt daran, dass nur im amorphen Bereich des Kunststoffes die Beweglichkeit ansteigt. Die Kristallite bleiben aufgrund ihrer höheren Nebenvalenzkräfte erhalten. In diesem Zustand wird der Kunststoff im Alltag verwendet, da er sich zäh elastisch (amorphe Bereiche) verhält, aber immer noch eine hohe Festigkeit (Kristallite) besitzt. Die Glasübergangstemperatur liegt meist unterhalb der Raumtemperatur. Wird bei weiterer Temperaturerhöhung der Kristallitschmelzbereich erreicht, verhält sich der Kunststoff ähnlich zum amorphen Kunststoff. Die Festigkeit sinkt stark ab und die Dehnbarkeit steigt. Es liegt dann ein rein amorpher Kunststoff vor. Bei geringer Überschreitung des Kristallitschmelzbereiches erreicht der Werkstoff eine so niedrige Viskosität, dass er im Spritzguss verarbeitet werden kann [Fri01]. Wird die Zersetzungstemperatur erreicht, gilt dasselbe wie für amorphe Kunststoffe, sie zersetzen sich und der Aufschmelzprozess wird irreversibel. Die in der IES GmbH verwendeten Thermoplaste werden in Tab.2.1 nach amorph und teilkristallin eingeteilt.

2.1.2 Recycling von Thermoplasten

Das Recycling von Thermoplasten ist grundsätzlich möglich. Dies bedeutet, dass Reste aus der Produktion z.B. Angüsse gemahlen und der neuwertigen Masse zugefügt werden, um die Produktionskosten zu senken. Dies darf nur geschehen, wenn die Bauteilqualität nicht darunter leidet oder die Veränderung der Eigenschaften des Bauteils so gering sind, dass diese kein Problem darstellen. Im Regelfall gibt der Hersteller des Kunststoffes an,

Tabelle 2.1: Verwendete Kunststoffe in der IES GmbH

| Bezeichnung | amorph | teilkristallin |
|-------------------------------|--------|----------------|
| PP (Polypropylen) | | X |
| PEEK (Polyetheretherketon) | | X |
| PBT (Polybutylenterephthalet) | | X |
| PEI (Polyetherimid) | X | |
| PC (Polycarbonat) | X | |
| PPS (Polyphenylsulfid) | | X |

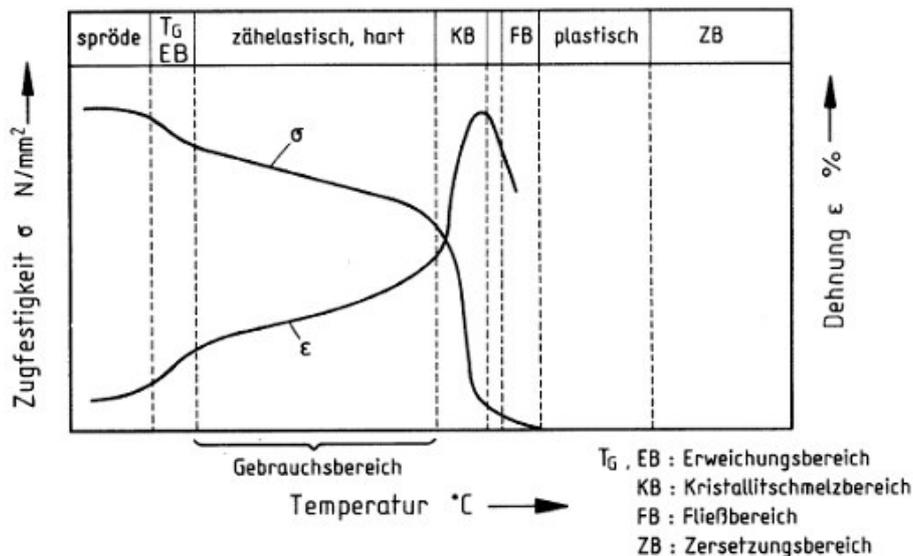


Abbildung 2.5: Formänderungsverhalten eines teilkristallinen Kunststoffes [Fri01]

wie viel Mahlgut verwendet werden darf. Die wieder verwendeten Granulate werden Regranulat genannt [Fri01]. Das Recycling kann zu einem energieeffizienterem Verfahren führen, indem die Abwärme des SGP zum Vorwärmen des Granulates oder dem Mahlen der Produktionsreste benutzt wird. Dies stellt ein mögliches Einsparpotenzial in dem SGP dar, dieses wird im Folgenden aber nicht genauer betrachtet.

2.1.3 Zusatzstoffe für Thermoplaste

Der zu verarbeitende Kunststoff kann mit Hilfsstoffen, sowie Füll- und Verstärkungsstoffen modifiziert werden. Diese dienen der Optimierung des Verarbeitungs- und Einsatzverhaltens und die Produktionskosten können gesenkt werden. Durch Zugabe von Gleit- oder Trennmitteln ist das Bauteil leichter aus der Form zu entfernen, zudem verändern sich die Fließeigenschaften je nach Hilfsstoff. Diese können das Spritzgießen behindern, aber auch verbessern. Durch die Zugabe von Füllstoffen können die Kosten reduziert wer-

den, da weniger Kunststoffmasse benötigt wird. Hiermit einher geht eine Veränderung der mechanischen und thermischen Eigenschaften. Die Wärmekapazität sinkt und die Wärmeleitfähigkeit steigt, dies führt zu einer Absenkung der Abkühlzeit, zudem sinkt der Wärmebedarf beim Schmelzvorgang. Dem entgegen steht eine Verschlechterung des Fließverhaltens sowie ein höherer Verschleiß der Maschine. Meistens dienen Füllstoffe der Kostenreduzierung. Die Zugabe von Verstärkungsmitteln erfolgt mit dem Ziel der Verbesserung der mechanischen und thermischen Eigenschaften, wobei die Maschine einen erhöhten Verschleißschutz benötigt [Fri01].

2.2 Aufbau der Maschine

Der Aufbau der Maschine wird in der Reihenfolge erläutert, in welcher der Kunststoff durch die Maschine verarbeitet wird. Der Weg des Kunststoffes wird an Hand von Abb.2.6 erklärt. Im Folgenden wird kurz der Prozessablauf beschrieben. In der Abb.2.6 wird der Kunststoff über den Trichter (1) in die Plastifiziereinheit transportiert. In dieser wird durch mechanische Reibung und eine Heizung der Kunststoff aufgeschmolzen. Danach wird der Kunststoff über eine Düse (4) in das Werkzeug gespritzt, welches dem Bauteil seine letztendliche Form gibt. Die für den Prozess relevanten Bauteile der SGM werden im Folgenden genauer erläutert. Hierfür wird die Maschine in Plastifizier- und Spritzeinheit sowie Werkzeug aufgeteilt.

2.2.1 Plastifizier- und Spritzeinheit

Der **Trichter** (1) dient dazu, das Granulat dem Plastifizierzylinder (2) zuzuführen. Meist besteht sie aus einem Trichter, aus dem das Granulat in den Zylinder fällt. Um den Prozessablauf zu verbessern, kann in den Trichter eine Röhreinrichtung oder Trocknungseinrichtung eingebaut werden. Die Röhreinrichtung dient bei Verwendung von Regranulaten der Durchmischung, dies führt zu einer gleichmäßigen Verteilung. Die Trocknungseinrichtung wird dafür benötigt, das Granulat zu trocknen, da dieses häufig zu viel Feuchtigkeit enthält. Besonders wichtig ist der Einsatz einer solchen Einrichtung bei Mahlgut, da dieses auf Grund seiner größeren Oberfläche mehr Feuchtigkeit aufnimmt. Des Weiteren gibt es Metallabscheider, diese sollen Verunreinigungen durch Metallstaub oder Splitter aus vorhergegangenen Herstellungsprozessen von Granulat entfernen. Das Metall kann zur Schädigung der Maschine führen oder das Bauteil unbrauchbar machen [Fri01].

Die **Plastifizier- und Spritzeinheit** dient der Förderung und Plastifizierung des Kunststoffes. Es gibt drei gängige Möglichkeiten diese aufzubauen. Bei der Kolbenspritzeinheit mit Schneckenplastifizierung (vgl. Abb.2.7), wird das Material in einem Zylinder mit Schneckenplastifiziereinheit und Heizung aufgeschmolzen und anschließend über die Kolbenspritzeinheit eingespritzt. Die zweite Aufbaumöglichkeit ist eine Kolbenspritzeinheit ohne Schneckenplastifizierung. Bei der Variante wird das Material in einem Zylinder vor allem durch die Heizung aufgeschmolzen. Eine Kolbenspritzeinheit befördert anschließend die benötigte Menge Kunststoff in eine weitere Kolbenspritzeinheit, welche dann den eigentlichen Einspritzvorgang übernimmt, diese Variante sieht wie die Maschine in

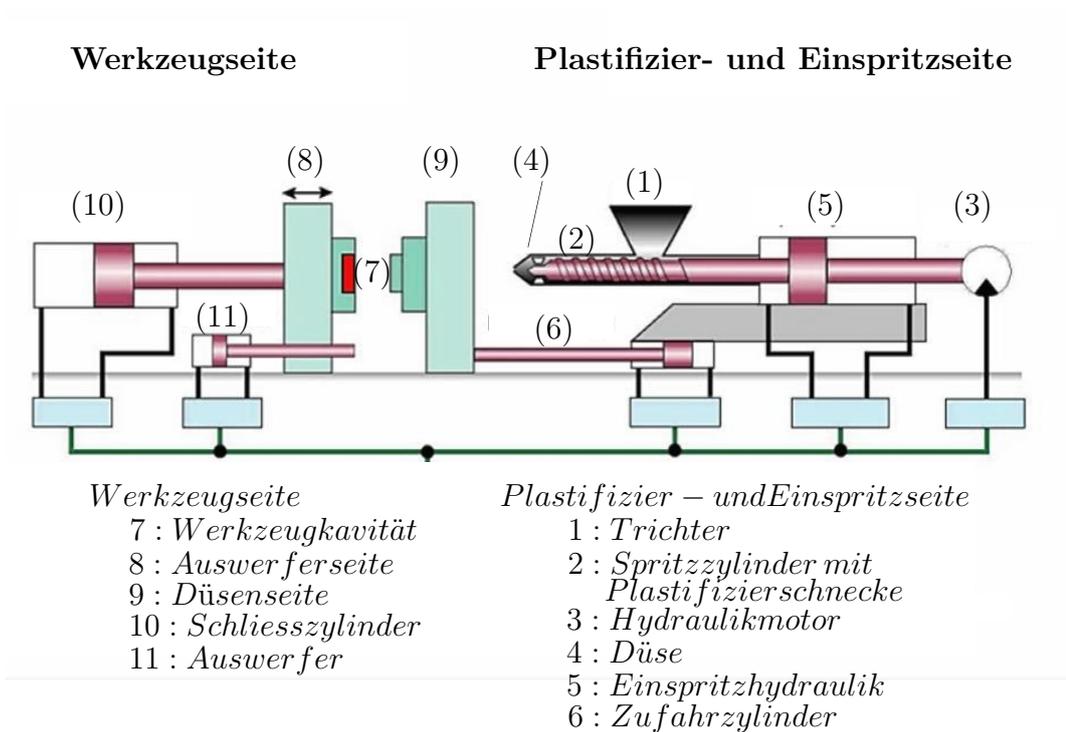


Abbildung 2.6: Darstellung einer SGM mit Schneckenplastifizierung;
Quelle: modifiziert nach [SGM15]

Abb.2.7 aus, nur das statt der Schnecke ein zweiter Kolben verbaut ist. Die letzte Variante ist die Kombination aus Schnecke und Kolben in einem Zylinder (vgl. Abb. 2.6). Bei allen drei Varianten ist zu beachten, dass die Einspritzeinheit eine Verschlusseinheit benötigt, damit das aufgeschmolzene Material beim Spritzen nicht zurückfließen kann. Sowohl Schnecke als auch Kolbenspritzeinheit können über eine Hydraulik oder einen Elektromotor betrieben werden [Fri01].

Die Beheizung der Maschine findet über **Heizschalen** statt. Diese können sowohl die Plastifiziereinheit als auch die Düse beheizen. Bei der Maschine in Abb. 2.6 sind diese um den Spritzzylinder (2) gebaut, da dort das Plastifizieren stattfindet. Um ein optimales Temperaturprofil in der Plastifiziereinheit zu bekommen, wird diese in mehrere Zonen aufgeteilt. Jeder Zone wird eine jeweils unabhängig steuerbare Heizschale zugeteilt, sodass je nach Aufbau und Werkstoff die Wärmezufuhr geregelt werden kann. Im Regelfall geben diese von der Einzugschale aus betrachtet hin zur Zylinder Spitze immer mehr Wärme ab, da bei zu hoher Temperatur bei der Einzugschale diese durch zu früh weich werdenden Kunststoff verstopfen könnte. Die Düse wird beheizt, damit der Kunststoff beim Spritzen nicht zu früh erstarrt und die Düse verschließen würde.

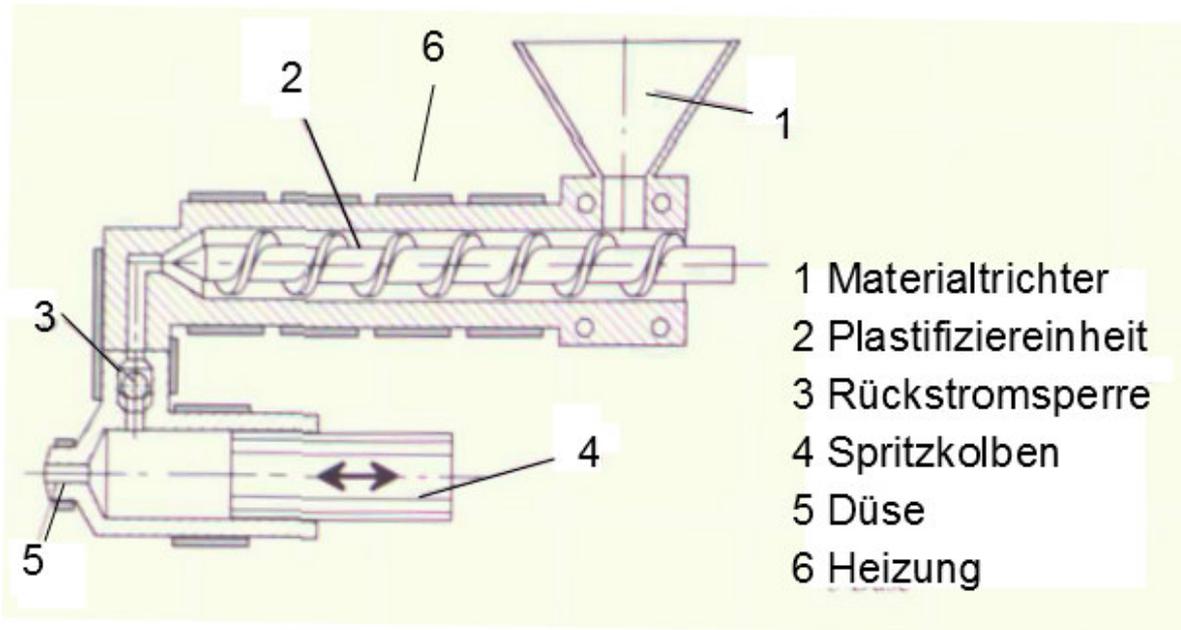


Abbildung 2.7: Maschine mit Schneckenplastifizierung und Kolbenspritzeinheit;
Quelle: modifiziert nach [Sti04]

Beim Einspritzen des Kunststoffes in das Werkzeug würde das geschmolzene Material aus der Einzugschleuse gedrückt werden. Um dies zu verhindern, haben die Spritzeinheiten eine **Rückstromsperre**. Sie sitzt zwischen Einspritzzylinder und Plastifizierzylinder (vgl. Abb.2.7) oder bei der Schnecke vorne auf der Spitze. Diese verschließt sobald beim Spritzen ein Gegendruck aus Richtung der Werkzeugseite kommt, sodass das Material immer nur in Richtung des Werkzeugs transportiert werden kann.

Die **Düse** (4) hat mehrere Funktionen, die sie erfüllen muss [Sti04], diese sind:

- das Verjüngen des Innendurchmessers der Spritzeinheit auf den Durchmesser des Werkzeugeingangs
- das Abdichten des Überganges zwischen Werkzeug und Spritzeinheit, während diese einspritzt, nachdrückt und dosiert
- das Verhindern, dass nach dem Abheben des Werkzeugs Schmelze aus der Düse austritt
- den Anguss ohne Fadenbildung von der Schmelze zu trennen
- das Verhindern von Rückstandbildung und Führen der Schmelze in das Werkzeug ohne große Druckverluste

Je nach Anwendungsfall kommen unterschiedliche Düsen zum Einsatz. Hier wird zwischen offenen Düsen und Verschlussdüsen unterschieden. Bei einer **offenen Düse** wird der Einspritzkanal zunächst verjüngt, um dann kurz vor der Mündung ins Werkzeug

in einen Gegenkonus überzugehen. Dies führt zu einer Sollbruchstelle, die dafür sorgt, dass sich der erstarrende Anguss von der Schmelze trennt. Dies funktioniert nur bei zähen Schmelzen, da sich ansonsten Fäden bilden oder Schmelze austritt. Zudem sollte beachtet werden, dass diese erst nach dem Plastifizieren von dem Werkzeug abfährt, da sonst Schmelze herausgedrückt wird. Aus verfahrenstechnischer Sicht ist diese Bauweise besonders günstig, da sie geringe Druckverluste erzeugt. Dies ist die am häufigsten verwendete Düse.

Die **Verschlussdüse** wird verwendet, wenn ein Heraustropfen der Schmelze oder eine Fadenbildung verhindert werden soll. Zudem kann auch mit abgefahrener Spritzeinheit plastifiziert werden. Dies ist möglich, da beim Abfahren des Werkzeugs die Düse verschließt. Für das Zufahren der Düsenseite und der Einspritzeinheit, wird der **Zufahrzylinder** (6) verwendet. Dieser dient der Bewegung der Plastifizier- und Spritzeinheit. Dies kann während des Produktionsprozesses passieren aber auch während der Einrichtung der Maschine [Sti04].

2.2.2 Werkzeug

Das Werkzeug wird in zwei Hälften aufgeteilt. Einerseits die Auswerferseite (8) aus der das Bauteil entfernt werden muss und andererseits der Düsenseite (9), die an der Düse (4) der Spritzeinheit anliegt. Zwischen diesen beiden Werkzeughälften liegt die **Werkzeugkavität** (7). Diese dient der Formgebung des endgültigen Bauteils und muss für jedes Bauteil und jede Maschine individuell angepasst werden. Zwischen Auswerferseite und Düsenseite bleibt beim Schließen des Werkzeugs ein Schlitz von wenigen Mikrometern übrig, über den die Luft beim Einspritzen entweichen kann. Es können mehrere Bauteile gleichzeitig mit einem Werkzeug geformt werden. Die benötigten Kavitäten werden auch Nester genannt.

Zum Öffnen und Schließen der beiden Werkzeughälften wird eine **Schließeinheit** (10) verwendet. Um ein Öffnen des Werkzeugs während des Spritzvorganges zu verhindern, wird eine **Zuhalteeinrichtung** (10) verwendet. In dem angeführten Beispiel fallen diese beiden Maschinenteile zusammen. Die benötigte Energie wird über eine Hydraulik zur Verfügung gestellt. Schließ- und Zuhalteeinrichtungen werden häufig über einen Kniehebel geschlossen und geöffnet, wobei dieser auch über einen Elektromotor betrieben werden kann.

Zur Werkzeugtemperierung wird in den meisten Fällen ein **Wärmetauscher** eingesetzt. Dieser wird mit Wasser oder Öl betrieben, welche durch die beiden Werkzeughälften (8), (9) geleitet werden. Dies sorgt, je nach Herstellungsverfahren für eine geregelten Wärme Ab- oder Zufuhr im Werkzeug.

Der **Auswerfer** (11) dient dazu, das fertig gespritzte Bauteil aus dem geöffneten Werkzeug zu drücken. Dies geschieht im Regelfall über eine Hydraulik. Es gibt Maschinen, bei denen dies über einen Elektromotor geschieht. Das so genannte Handling System wird eingesetzt, wenn ein einfaches Herausfallen des Bauteils aus dem Werkzeug nicht gewünscht ist. Es befördert das fertige Bauteil an den vorgesehenen Ort und kann auch den möglichen Anguss entfernen. Dieser entsteht dadurch, dass es in den meisten Fällen nicht möglich ist, das Werkzeug so zu bauen, dass die Kavität direkt an die Düse an-

grenzt. Aus diesem Grund werden **Angusskanäle** in das Werkzeug gebaut, diese leiten den flüssigen Kunststoff von der Düse in die Nester. Bei der Auslegung von Werkzeugen wird der Anguss möglichst klein gehalten, da dieser Abfall ist oder extra verarbeitet werden muss, um wiederverwendet werden zu können.

Ein **Schieber** wird eingesetzt, wenn das Bauteil z.B. wie ein Rohr geformt ist und somit innen hohl sein muss. In diesem Fall würde beim Schließen des Werkzeugs ein Schieber durch die Kavität geschoben werden, damit beim Befüllen dieser Bereich kunststofffrei bleibt. Ist das Bauteil fertig gespritzt, wird vor dem Entfernen aus dem Werkzeug, der Schieber wieder herausgezogen und ein Hohlraum entsteht [Sti04].

2.3 Ablauf des Spritzgießprozesses

Der SGP ist ein zyklischer Prozess, bei dem der zu formende Kunststoff in Form von Granulat einer Plastifiziereinheit zugeführt wird. In dieser wird der Kunststoff unter starkem Druck und hoher Temperatur in den schmelzflüssigen Zustand gebracht. In dieser Phase kann der Kunststoff geformt werden. Für diesen Vorgang wird der Kunststoff durch eine Düse in die Kavität gedrückt, in welcher der Werkstoff dann auskühlt und erhärtet.

Der SGP lässt sich in drei Prozessschritte [Eri08] aufteilen:

- Plastifizieren und Dosieren
- Einspritzen, Umschalten, Nachdrücken und Abkühlen
- Entformen und Werkzeug schließen

Die Prozessschritte werden in Abb. 2.8 in einem Balkendiagramm über der Zeit aufgetragen.

2.3.1 Plastifizieren und Dosieren

In diesem Prozessschritt wird in einem Zylinder der zu verarbeitende Kunststoff plastifiziert und dosiert. Dieser befindet sich nur auf der Plastifizier- und Spritzseite der Maschine (vgl. Abb 2.6). Beim **Plastifizieren** wird dem Kunststoff solange Wärme über Heizen und mechanische Reibung zugeführt, bis er den Fließbereich erreicht (vgl. Kap.2.1.1). In dieser Phase ist besonders darauf zu achten, dass die zulässige Temperatur nicht über- oder unterschritten wird, da sich der Kunststoff bei zu hohen Temperaturen zersetzt und bei zu niedrigen Temperaturen das Material nicht gespritzt werden kann oder zu früh erkaltet, sodass das Bauteil unbrauchbar wird. Bei einem Plastifizierzylinder ohne Schnecke wird beim **Dosieren** nur die gewünschte Menge in die Spritzeinheit gedrückt. Bei der Schneckenplastifizierung bewegt sich diese beim Plastifizieren rückwärts und das aufgeschmolzene Material sammelt sich vor der Schnecke. Bei der Rückwärtsbewegung wird die Schnecke hydraulisch oder elektrisch gebremst und es entsteht ein Staudruck. Vor dem Einspritzen wird die Schnecke entlastet und der Kunststoff dekomprimiert .

Es wird immer etwas mehr Kunststoff vorbereitet als für das Bauteil notwendig ist. Dies geschieht, da für das Nachdrücken in die Kavität ein Massepolster zwischen Einspritzkolben bzw. Schneckenspitze und Düse vorliegen muss. Ohne ein solches Polster würden der Kolben und die Düsen aneinander liegen und es könnte keine Kraft auf die Kunststoffschmelze ausgeübt werden [Fri01].

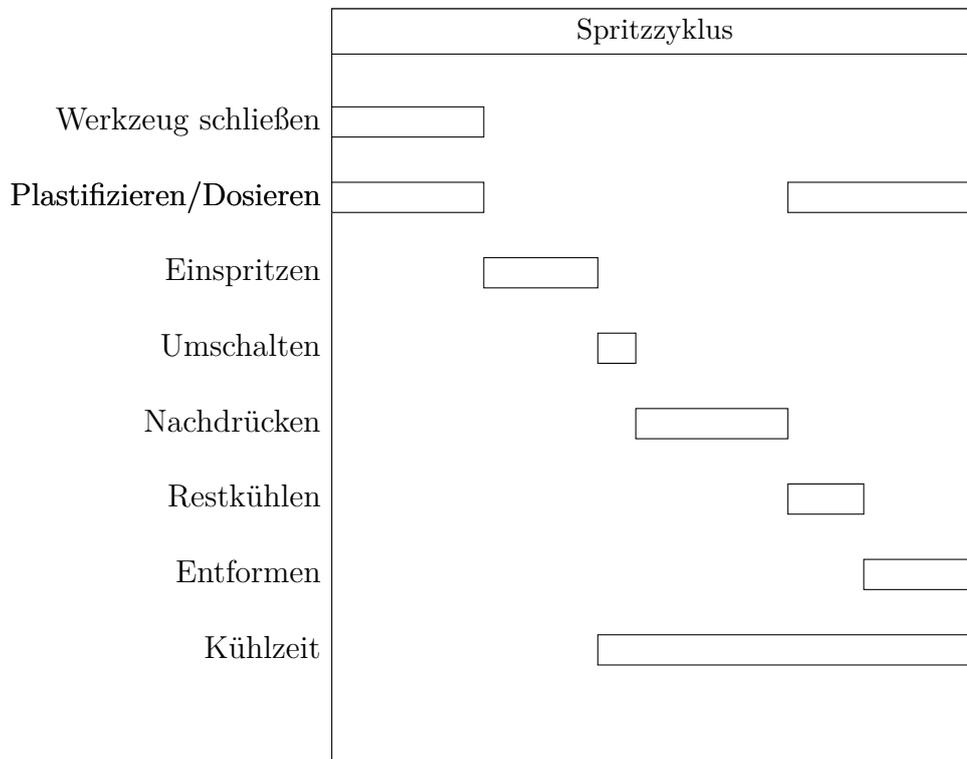


Abbildung 2.8: Zeitlicher Ablauf des Spritzzyklus;
Quelle: eigene Darstellung

2.3.2 Einspritzen, Umschalten, Nachdrücken und Abkühlen

In der **Einspritzphase** wird der zuvor plastifizierte Kunststoff in die Kavität gedrückt. Dies geschieht über eine translatorische Bewegung des Einspritzkolbens bzw. der Schnecke. Die zuvor dosierte Menge Kunststoff wird durch den Antrieb einem hohen Druck ausgesetzt, sodass diese durch die Düse und den Anguss in die Werkzeugkavität gedrückt wird. Hierfür wird eine konstante Vorschubgeschwindigkeit gewählt. Der benötigte Druck variiert je nach Strömungswiderstand und Gegendruck im Werkzeug.

Die **Umschaltphase** beschreibt den Übergang zwischen Einspritzen und Nachdrücken. In dieser Phase wird von einem dynamischen Einspritzvorgang in einen quasistatischen Nachdruckvorgang übergegangen. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass der Übergang ohne große Druckschwankungen von statten geht, da es bei einem zu niedrigen Druck zu einem Einfallen des Bauteils kommen kann. Andererseits führt ein zu ho-

her Druck dazu, dass die Schließeinheit auseinander gedrückt wird. Dies führt zu einer Überlastung und im schlimmsten Fall zur Zerstörung der Schließeinheit, zudem wird das Bauteil unbrauchbar.

In der **Nachdruckphase** wird Kunststoff in das Werkzeug gedrückt, um dem Volumenverlust des Bauteils entgegen zu wirken. Dieser Verlust kommt durch das Schrumpfen des Bauteils beim Abkühlen des Kunststoffes zustande. Dieser Vorgang geschieht unter konstantem Druck und je nach Massebedarf in der Kavität verändert sich die Vorschubgeschwindigkeit. Während der **Kühlphase** wird nicht mehr nachgedrückt. Das Bauteil kühlt im Werkzeug weiter ab, bis es eine Temperatur erreicht hat, bei der es nicht mehr seine Form verliert. Während dieser Phase kann wieder Plastifiziert werden (vgl. Abb.2.8) [Fri01].

2.3.3 Entformen und Werkzeug schließen

Bei diesem Vorgang wird das Werkzeug geöffnet, das Bauteil entfernt und wieder geschlossen. Bei dem **Entformen** fahren die Auswerferseite und die Düsenseite des Werkzeugs auseinander. Wenn ein Schieber vorhanden ist, fährt dieser mit heraus. Nach dem Auseinanderfahren oder währenddessen muss das Bauteil entfernt werden, um Platz für das nächste Bauteil zu schaffen. Falls das Bauteil nicht von selber herausfällt, muss ein Auswerfer verwendet werden, der das Bauteil aus der Kavität drückt. Ist dieser Vorgang beendet, wird das Werkzeug wieder **geschlossen**. Das bedeutet, die beiden Werkzeughälften fahren wieder zusammen und ggf. werden die Schieber wieder in die Kavität gefahren. Nach diesem Schritt kann je nach Dauer der Plastifizier- und Dosierphase direkt wieder eingespritzt werden. Der Zyklus beginnt von vorne [Fri01].

3 Qualitative Betrachtung der Energieströme

Mit Kenntnis des Materialverhaltens von Thermoplasten, dem Aufbau der SGM und des Verfahrensablaufes können die Energieströme ermittelt werden, dafür werden zuerst die Prozessgrößen nach den Energieströmen eingeteilt. Die Energieströme werden differenziert für die Werkzeugseite und für die Plastifizier- und Spritzseite, der SGM bestimmt. Für die Herleitung werden die einzelnen Prozessschritte des SGP betrachtet und darauf aufbauend die Energieströme bestimmt. Anschließend werden die Energieströme bewertet. Dabei wird betrachtet von welchen Prozessgrößen diese abhängig sind und wie die Energieströme sich untereinander beeinflussen. Zudem wird ermittelt wie die Energieströme besser genutzt oder der Energieverbrauch gesenkt werden kann.

3.1 Prozessgrößen

Zur besseren Beurteilung der Prozessgrößen (vgl. Tab.3.1) erfolgt eine Aufteilung. Einerseits werden sie nach den ermittelten Energieströmen eingeteilt, wobei diese nochmal den Bauteilen zugeordnet sind, wenn sie von den gleichen Größen abhängen. Andererseits werden sie unterteilt in einstellbare Prozessgrößen, die vom Maschinenführer direkt an der Maschine eingestellt werden. Dazu kommen die Größen, die sich aus den einstellbaren Größen ergeben und Prozessgrößen, die nur durch konstruktiven Aufwand veränderbar sind. Die aufgeführten Prozessgrößen sind nicht vollständig, es handelt sich dabei lediglich um eine Aufzählung, der für die Energieströme relevanten Größen.

Tabelle 3.1: Prozessgrößen beim SGP

| Energiestrom | Begriff | Einstellbare Prozessgröße | Sich ergebende Prozessgrößen | konstruktiv beeinflussbare Größen |
|-----------------------------|------------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| Allgemein | Zykluszeit | | t_z | |
| | Restkühlzeit | $t_{Kü}$ | | |
| Schließeinrichtung | | | | |
| Schließarbeit | Schließkraft | F_s | | |
| | Öffnungsstrecke | s_{Wz} | | |
| | Auswerferhub | s_A | | |
| Zuhaltearbeit | Schließgeschwindigkeit | v_s | | |
| | Werkzeuginnendruck | | $p_{Wz,i}$ | |
| | Anzahl der Nester | Anzahl | | x_{Ne} |
| | Bauteiloberfläche | | | A_B |
| | Dehnungsstrecke | | s_S | |
| | Dehnungskonstante | | D_S | |
| | Zuhaltezeit | | t_z | |
| | Spritzgeschwindigkeit | | v_{Sp} | |
| Kühlung | | | | |
| Wärmeabgabe an die Umgebung | Kunststofftemperatur | | ϑ_K | |
| | Werkzeugtemperatur | | ϑ_{Wz} | |
| | Werkstoff Wärmeleitfähigkeit | | | λ_{Wz} |
| | Werkstoff Wärmekapazität | | | C_{Wz} |
| | Isolation Wärmeleitfähigkeit | | | $\lambda_{Wz,I}$ |
| | Isolation Wärmekapazität | | | $C_{Wz,I}$ |
| Temperierung | Temperiermedium | | | Fluid |
| | Temperiertemperatur | | ϑ_T | |
| Heizung | | | | |
| Plastifizierwärme | Schmelztemperatur | | | $\vartheta_{K,Sm}$ |
| | Isolation Wärmeleitfähigkeit | | | $\lambda_{H,I}$ |
| | Isolation Wärmekapazität | | | $C_{H,Iso}$ |
| Heißkanalwärme | Heizzonentemperatur | ϑ_{HZ} | | |
| | Heißkanaltemperatur | ϑ_{HK} | | |
| | Heißkanaloberfläche | | A_{HK} | |
| Düsenwärme | Düsentemperatur | $\vartheta_{Dü}$ | | |

| | | | |
|----------------------------|-------------------------------|---------------|-------------|
| | Düsendurchmesser | | $d_{Dü}$ |
| | Düsenlänge | | $l_{Dü}$ |
| Plastifiziereinheit | | | |
| Reibungswärme | Schneckendurchmesser innen | | $d_{Sch,i}$ |
| | Schneckendurchmesser außen | | $d_{Sch,a}$ |
| | Gangvolumen | | V_{Do} |
| | Dosierzeit | t_{Do} | |
| | Umfangsgeschwindigkeit | v_{Sch} | |
| | Schergeschwindigkeit | | γ |
| Spritzeinheit | | | |
| | Schussgewicht | | m_K |
| | Zylinderkopffläche | | A_{ZK} |
| Einspritzleistung | Einspritzdruck | | p_{Ein} |
| | maximaler Einspritz- druck | $p_{Ein,max}$ | |
| | Einspritzgeschwindigkeit | v_{Ein} | |
| | Einspritzzeit | t_{Ein} | |
| Umschaltleistung | Vorschubstrecke | s_{Sch} | |
| | Umschaltdruck | p_{Um} | |
| | Umschaltgeschwindigkeit | | v_{Um} |
| | Umschaltzeit | t_{Um} | |
| Nachdruckleistung | Nachdruck | p_{Na} | |
| | Nachdruckgeschwindigkeit | | v_{Na} |
| | Nachdruckzeit | t_{Na} | |

3.2 Ermittlung der Energieströme des Werkzeugs

Um die Energieströme zu ermitteln wird betrachtet, welche Aufgaben das Werkzeug erfüllen muss und wie es die Energieströme beeinflusst.

Das Werkzeug besteht aus zwei Hälften, deshalb muss es beim Einspritzen zusammengehalten werden, um dem entstehenden Werkzeuginnendruck entgegen zu wirken. Hieraus ergibt sich, dass dem Werkzeug Arbeit zugeführt werden muss, damit es dem Werkzeuginnendruck beim Einspritzen, Umschalten und Nachdrücken standhalten kann. Diese Arbeit wird **Zuhaltarbeit** genannt, da sie das Werkzeug zusammenhält. Die Zuhaltarbeit W_z kann auf zwei Arten bestimmt werden. Einmal über den Innendruck $p_{Wz,i}$, die Werkzeuginnenfläche $A_{Wz,i}$, die Vorschubgeschwindigkeit v_{Sp} , mit der sich der Spritzkolben bzw. die Schnecke bewegt und der Zeit t_z , in der gespritzt wird. Auf diesem Weg wird die Zuhaltarbeit entsprechend Gl.3.1 berechnet. Hierbei wird betrachtet mit welcher Geschwindigkeit in das Werkzeug eingespritzt wird und welcher Druck auf die Flächen der Kavität wirkt. Hieraus ergibt sich die Kraft mit der das Werkzeug zugehalten werden

muss.

$$W_z = A_{Wz,i} \int_{t_{z,0}}^{t_{z,1}} p_{Wz,i}(t_z) \cdot v_{Sp}(t_z) dt_z \quad (3.1)$$

Andererseits kann bei dem Einsatz eines Kniehebels die Zuhallearbeit entsprechend Gl. 3.2 berechnet werden. Hierbei wird die Dehnung s_S der Säulen gemessen und über Dehnungskonstante D_S der Säulen und das Integral über die Dehnungsstrecke s_S die Spannarbeit berechnet.

$$W_z = \int_{s_{S,0}}^{s_{S,1}} D_S \cdot s_S \cdot ds_S \quad (3.2)$$

Bei der Berechnung der **Zuhalteleistung** P_z über den Werkzeuginnendruck $W_{Wz,i}$, kann die Zuhallearbeit nach dt differenziert werden, somit ergibt sich Gl. 3.3.

$$\frac{dW_z}{dt} = P_z = A_{Wz,i} \cdot p_{Wz,i} \cdot v_{Sp} \quad (3.3)$$

Wird die Zuhalteleistung P_z über die Spannarbeit W_z berechnet, muss die Dehnungskonstante D_S sowie die Dehnung s_S anstatt über die Dehnungsstrecke s_S über die Dehnungsgeschwindigkeit v_S der Säulen integriert werden. Damit ergibt sich Gl. 3.4.

$$P_z = \int_{v_{S,0}}^{v_{S,1}} D_S \cdot s_S \cdot dv_S \quad (3.4)$$

Um des Bauteil aus dem Werkzeug entfernen zu können, müssen die Düsen- und Auswerferseite auseinander gefahren und danach wieder geschlossen werden. Für diesen Vorgang muss Arbeit aufgewendet werden, die sogenannte **Schließarbeit** nach Gl.3.5. Diese berechnet sich über die Kraft $F_s(s_{Wz})$, die zum Schließen des Werkzeugs aufgebracht werden muss, sowie über den Schließweg s_{Wz} des Werkzeugs.

$$W_s = \int_{s_{Wz,0}}^{s_{Wz,1}} F_s(s_{Wz}) ds_{Wz} \quad (3.5)$$

Für die Berechnung der Arbeit zum Öffnen des Bauteils kann die gleiche Formel verwendet werden, wobei zu beachten ist, dass bei dem Auseinanderfahren des Werkzeugs möglicherweise Schieber aus dem Bauteil gezogen und ein Auswerfer betätigt werden muss, womit der Kraftaufwand größer ist.

Um die **Schließleistung** des Werkzeugs zu berechnen, muss die Kraft F_s über die Schließgeschwindigkeit v_s integriert werden. Somit ergibt sich die Leistung nach Gl.3.6.

$$P_s = \int_{v_{s,0}}^{v_{s,1}} F_s(v_s) dv_s \quad (3.6)$$

In dem Werkzeug muss das Bauteil abkühlen. Dies geschieht durch einen Wärmestrom \dot{Q}_U über das Werkzeug an die Umgebungsluft oder mittels eines Wärmestromes \dot{Q}_T , der über eine Temperierung, die das Werkzeug auf die benötigte Temperatur temperiert abgegeben wird. Die Wärmeabgabe an die Luft, sowie an das Temperiermedium berechnet

sich wie bei einem Wärmeübertrager über die Wärmeabgebende Fläche A , die Temperatur Differenz $\Delta\vartheta$ zwischen den beiden Medien, sowie den Wärmeübergangkoeffizienten k . Der **Umgebungswärmestrom** berechnet sich nach Gl. 3.7.

$$\dot{Q}_U = k_U \cdot A_U \cdot \Delta\vartheta \quad (3.7)$$

Der **Temperierwärmestrom** berechnet sich nach Gl.3.8.

$$\dot{Q}_T = k_T \cdot A_T \cdot \Delta\vartheta \quad (3.8)$$

Beim Einspritzen bzw. Nachdrücken kann es vorkommen, dass im Anguss die Temperatur durch Wärmeabgabe an das Werkzeug stark sinkt. Dies kann dazu führen, dass der Kunststoff zu früh erstarrt und die Kavität nicht gefüllt wird. Um diesem entgegen zu wirken, kann der Anguss beheizt werden. Dies geschieht wie bei der Plastifiziereinheit über Heizschalen.

Der an den Kunststoff abgegebene **Wärmestrom** \dot{Q}_{HK} berechnet sich über die Leistung P_{HK} abzüglich der Wärmeverluste $Q_{V,Wz}$ von dem Heißkanal an das Werkzeug, nach Gl.3.9. Die Wärmeverluste werden wie bei der Temperierung nach Gl. 3.8 berechnet.

$$Q_{HK} = P_{HK} - Q_{V,HK} = \frac{U^2}{R} - k_{Wz} \cdot A_{Wz} \cdot \Delta\vartheta \quad (3.9)$$

Zu den bisherigen Energieströmen kommt noch der **Wärmemassenstrom** der heißen Kunststoffmasse hinzu. Dieser berechnet sich über den Massenstrom \dot{m}_K und die Enthalpiedifferenz Δh_K , die durch die Druckänderung und die Wärmeabgabe zustande kommt, nach Gl.3.10.

$$\dot{Q}_K = \dot{m}_K \Delta h_K \quad (3.10)$$

Für die Erstellung des Ersatzschaltbildes des Werkzeugs, wird dieses zusammen mit der Zuhalte- bzw. Schließeinrichtung betrachtet. Es handelt sich dabei um ein offenes System. Die für diese Bauteile relevanten Leistungen, Wärmeströme und Massenströme sind in Abb.3.1 dargestellt.

3.3 Ermittlung der Energieströme der Plastifizier- und Spritzeinheit

Für die Ermittlung der Energieströme im Plastifizier- und Spritzeinheit wird das gleiche Vorgehen wie beim Werkzeug gewählt. Die Plastifiziereinheit sorgt für die Aufschmelzung des Kunststoffes. Die dafür benötigte Temperaturerhöhung findet über Zufuhr von Wärme und Reibungswärme statt. Diese entsteht durch die Reibung beim Fördern des Kunststoffes und durch die Drehung der Schnecke. Die Temperaturerhöhung durch die **Reibungswärme** berechnet sich nach Gl.3.11.

$$\frac{\delta\vartheta}{\delta t} = \frac{1}{\rho \cdot c} \cdot \tau \cdot \frac{\delta\dot{x}}{\delta y} \quad (3.11)$$

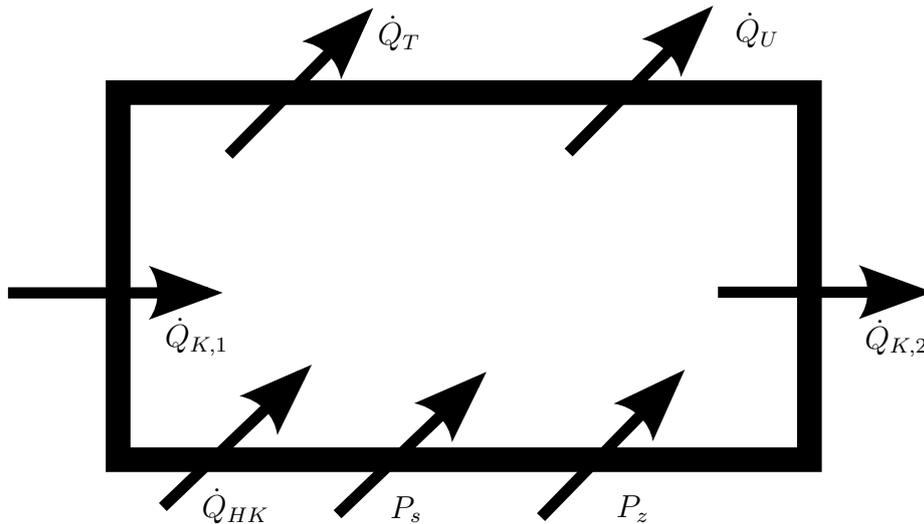


Abbildung 3.1: Das Energie Ersatzschaltbild des Werkzeugs;
Quelle: eigene Darstellung

Sie setzt sich aus dem Quotienten aus Schubspannung τ über der Dichte der Schmelze ρ und der spezifischen Wärmekapazität c , sowie der Ableitung der Schichtgeschwindigkeit \dot{x} über den Schichtenabstand y zusammen. Mit $c = \frac{C}{m}$, $\rho = \frac{m}{V}$ und $Q = c \cdot \Delta\vartheta$ ergibt sich durch Umformen die Gl. 3.12 für die zugeführte Wärme. Die zugeführte Wärme entspricht bei Vernachlässigung der Reibungsverluste der Antriebsleistung.

$$\dot{Q}_R = P_{An} = V \cdot \tau \cdot \frac{\delta \dot{x}}{\delta y} \quad (3.12)$$

Ersetzt man nun $\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$ und $\dot{\gamma} = \frac{\delta \dot{x}}{\delta y}$ ergibt sich Gl.3.13.

$$\dot{Q}_R = V \cdot \eta \cdot \dot{\gamma}^2 \quad (3.13)$$

An Gl.3.13 lässt sich erkennen, wie entscheidend die Schergeschwindigkeit für die Reibungswärme ist, sie geht quadratisch in die Gleichung ein.

Die durch die Heizung in den Kunststoff eingebrachte **Heizwärme** \dot{Q}_H entspricht der Leistung P_H der Heizung abzüglich der Wärmeverluste \dot{Q}_U , an die Umgebung. Damit ergibt sich Gl.3.14.

$$\dot{Q}_H = P_H - \dot{Q}_U = \frac{U_H^2}{R_H} - k_I \cdot A_I \cdot \Delta\vartheta \quad (3.14)$$

Wobei sich der Wärmeübergangskoeffizient k_I und die Fläche A_I , auf die Werte für die Isolation um die Heizung beziehen. Die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ herrscht zwischen Heizung und Umgebungsluft.

Die durch die Beheizung der Düse in das Material eingebrachte Wärme ergibt sich wie bei der Heizung nach Gl.3.14.

Die Spritzeinheit ist im Prozess für das Dosieren, Einspritzen und das Nachdrücken zuständig. Die **Einspritzleistung** wird durch die einspritzende Schnecke oder Kolben, sowie dem Antrieb bestimmt. Sie setzt sich zusammen aus der schiebenden Fläche A_{ZK} , dem Einspritzdruck p_{ZK} , der sich vor der Schnecke einstellt, sowie der Geschwindigkeit v_{Ein} mit der eingespritzt wird. Die Einspritzleistung P_{Ein} ergibt sich nach Gl.3.15

$$P_{Ein} = A_{ZK} \int_{v_{Ein,0}}^{v_{Ein,1}} p_{ZK}(v_{Ein}) dv_{Ein} \quad (3.15)$$

Sind die Werte für den Druck vor der Schnecke nicht bekannt, kann bei einem Hydraulikantrieb die Einspritzleistung P_{Ein} über die Fläche des Hydraulikkolbens A_H , sowie dem Hydraulikdruck p_H nach Gl.3.16 berechnet werden.

$$P_{Ein} = A_H \int_{v_{Ein,0}}^{v_{Ein,1}} p_H(v_{Ein}) dv_{Ein} \quad (3.16)$$

Bei der **Nachdruckleistung** wird unter einem festgelegten Druck Material in das Werkzeug nachgespritzt. In diesem Fall wird der Druck p_{Na} konstant gehalten und die Kolben- oder Schneckenvorlaufgeschwindigkeit v_{Na} variiert.

Die Nachdruckleistung ergibt sich nach Gl.3.17.

$$P_{Na} = A_{ZK} \int_{v_{Na,0}}^{v_{Na,1}} p_{Na}(v_{Na}) dv_{Na} \quad (3.17)$$

Die **Umschaltleistung** muss aufgebracht werden, um von dem Einspritzvorgang in den Nachdruckvorgang über zu gehen. Sie berechnet sich wie die Einspritzleistung und Nachdruckleistung über die Zylinderkopffläche A_{ZK} , den Druck p_{Um} und die Vorschubgeschwindigkeit v_{Um} beim Umschalten entsprechend Gl. 3.18.

$$P_{Um} = A_{ZK} \int_{v_{Um,0}}^{v_{Um,1}} p_{Um}(v_{Um}) dv_{Um} \quad (3.18)$$

Die Nachdruckleistung, sowie die Umschaltleistung können bei einem Hydraulikantrieb ebenfalls über die Gl.3.16 berechnet werden.

Um die Energiebilanz zu vervollständigen, wird auch noch der in dem Kunststoff transportierte **Wärmemassenstrom** betrachtet. Dieser wird wie für das Werkzeug berechnet und ergibt sich nach Gl.3.19.

$$\dot{Q}_K = \dot{m}_K \cdot \Delta h_K \quad (3.19)$$

Aus den zuvor ermittelten Energieströmen lässt sich das ESB (vgl. Abb.3.2) der Plastifizier- und Spritzeinheit ableiten. Das System wird als ein offenes System betrachtet.

3.4 Bewertung der Energieströme im Werkzeug

Im Folgenden wird in den Blick genommen, inwieweit die Energieströme unter Berücksichtigung den Prozessgrößen beeinflussbar beziehungsweise veränderbar sind. Teilweise

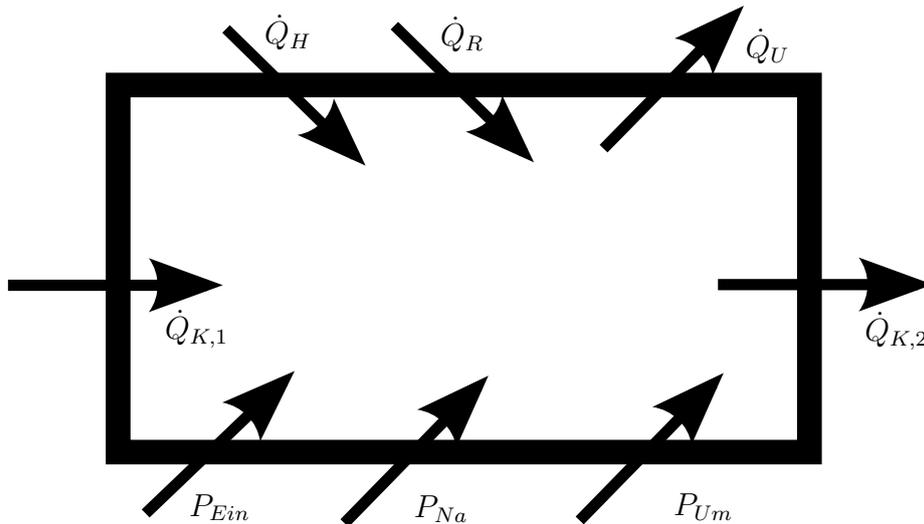


Abbildung 3.2: Das Energie Ersatzschaltbild der Plastifizier- und Spritzeinheit;
Quelle: eigene Darstellung

werden die Verbesserungsmöglichkeiten an den Prozessgrößen verdeutlicht und teilweise daran wie die Energieströme den Prozess verbessern oder besser genutzt werden können. Betrachtet man die **Zuhaltearbeit** sieht man, dass diese von vier Größen abhängig ist:

- der Dauer t_z , die das Werkzeug zugehalten werden muss
- dem Werkzeuginnenruck $p_{Wz,i}(t_z)$
- der Vorschubgeschwindigkeit $v_{Sp}(t_z)$
- der Werkzeuginnenfläche $A_{Wz,i}$

Die Zeit ist nur geringfügig beeinflussbar, da sie davon abhängt ist, wie schnell das Bauteil abkühlt. Dieser Vorgang kann durch die Kühlung beeinflusst werden. Das würde aber wieder einen zusätzlichen Energieaufwand bedeuten, sodass diese beiden Größen gegeneinander abgewogen werden müssen.

Die Geschwindigkeit und der Innendruck sind beide von der Zeit abhängig und können durch ein Variieren beim Einspritzen bzw. Nachdrücken beeinflusst werden. Hierfür muss der Antrieb für die Schnecke bzw. den Kolben betrachtet werden. Das strukturviskose Verhalten von Thermoplasten erlaubt ein schnelles Einspritzen, da bei erhöhter Spritzgeschwindigkeit die Schergeschwindigkeit steigt und damit die Viskosität sinkt. Dies führt zu einem besseren Fließverhalten, welches zu einer Verkürzung der Einspritzdauer führen und damit den Energieverbrauch senken würde. Hierbei ist zu beachten, dass eine zu hohe Geschwindigkeit dem Material schaden könnte, da es zu sehr erhitzt.

Bei der Werkzeuginnenfläche gibt es ein verhältnismäßig großes Einsparpotential. Hierbei kommt es auf die konstruktive Auslegung des Werkzeugs an. Am Besten lässt sich dies an einer einfachen Platte verdeutlichen. Liegen die beiden großen Flächen der Platte

parallel zum Öffnungsschlitz des Werkzeugs, so muss sehr viel Kraft aufgewendet werden, um die beiden Werkzeughälften zusammen zu pressen. Stehen die beiden größten Flächen senkrecht zur Trennebene, wird die meiste Kraft des Innendruckes ins Werkzeug geleitet. An dieser Stelle muss das Werkzeug entsprechend dimensioniert werden, damit die benötigte Energie zum Zuhalten des Werkzeugs sinkt.

Die **Schließarbeit** ist beeinflussbar über:

- die aufzuwendende Kraft F_s
- die Strecke s_s zum schließen des Werkzeugs

Bei der Kraft muss beachtet werden, dass sie nicht größer gewählt wird, als für das Bewegen des Werkzeugs nötig ist. Diese Kraft bestimmt sich vor allem über das Gewicht und den Aufbau der Zuhalteeinrichtung der Maschine. Der Weg ist auf zwei Arten beeinflussbar. Einerseits kann das Werkzeug so ausgelegt werden, dass es eine kleinere Strecke auseinander fahren muss damit das Bauteil entformt werden kann, andererseits ist die Strecke von der Art der Zuhalteneinrichtung abhängig. Bei einem Kniehebel kommt es darauf an, wie dieser eingebaut wird und sich die mögliche zu fahrende Strecke dadurch ändert.

Das Einsparpotenzial ist an dieser Stelle stark von dem Bauteil abhängig, da dieses den Aufbau und den Schließweg des Werkzeugs beeinflusst. Das Werkzeug müsste schon bei der Konstruktion angepasst werden.

Der **Umgebungswärmestrom** wird in erster Linie in die Temperierung und je nach Auslegung in die Umgebung geleitet. Für den Abwärmestrom aus dem Werkzeug gibt es viele Anwendungsmöglichkeiten. Er kann z.B. zum Beheizen der Ölhydraulik genutzt werden, im Verbund mit anderen Maschinen die Werkshalle heizen, eine weitere Maschine betreiben oder den Kunststoff im Trichter vorwärmen. Je nach Bauteil birgt die Temperierung viele Verbesserungspotenziale. Das Temperiermedium kann je nach Bauteil angepasst werden. Zudem ist die Aufteilung der Temperierrohre dem Aufbau des Bauteils anzupassen, sodass dieses gleichmäßig abkühlt.

Der **Wärmemassenstrom** ist durch das Verfahren und den verwendeten Kunststoff, sowie des herzustellenden Bauteils festgelegt und kann höchstens durch eine andere Zusammensetzung des Kunststoffs oder eine Veränderung des Verfahrens geändert werden. Dies soll im Folgenden nicht behandelt werden, da der elementare Aufbau der Kunststoffe nicht Teil dieser Arbeit ist.

Die im Heißkanal eingesetzte **Heizleistung** dient der Verbesserung des Strömungsverhaltens beim Einspritzen. Da die Kanalwände nicht kalt sind, erstarrt der Kunststoff dort nicht und kann deshalb länger eingespritzt bzw. nachgedrückt werden. Dadurch kann der Energieverbrauch beim Spritzen gesenkt werden. Weil der Kunststoff mit hoher Temperatur durch den Kanal fließt, muss wenig Leistung für die Heißkanal Heizung aufgebracht werden, um diesen auf Temperatur zu halten.

3.5 Bewertung der Energieströme in der Plastifizier- und Spritzeinheit

Bei der Bewertung, wird wie bei den Energieströmen im Werkzeug vorgegangen. Die erzeugte **Reibungswärme** ist abhängig von:

- dem bewegten Volumen V
- der Viskosität des Kunststoffes η_K
- der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}^2$

Das gescherte Volumen beim plastifizieren wird durch das Gangvolumen der Schnecke festgelegt. Beim Einspritzen wird es durch die Größe des Einspritzzylinders, der Düse und des Angusses festgelegt und ist damit nur durch großen konstruktiven Aufwand zu ändern.

Die Viskosität des verwendeten Kunststoffes hängt nach Abb.3.3 von vielen Einflussgrößen ab. Beim Spritzgießen wird versucht, die Viskosität niedrig zu halten, da der Kunststoff dann leichter zu spritzen ist und weniger Druckverluste auftreten [Fri01]. Durch den Einsatz von Weichmachern lässt sich eine niedrigere Viskosität erreichen, wobei zu beachten ist, dass die Formteilqualität darunter leiden kann. Des Weiteren führt eine hohe Temperatur zu einer niedrigen Viskosität. Hierbei muss beachtet werden, dass die Zersetzungstemperatur nicht überschritten wird. Zudem geht mit einer höheren Temperatur seitens der Heizung ein höherer Energieaufwand einher. Eine andere Möglichkeit die Temperatur hoch zu halten ist die Beheizung der Düse sowie des Angusskanals, damit beim Spritzen die Temperatur konstant und die Viskosität niedrig bleibt. Dies führt zu geringeren Druckverlusten, da keine Schmelze an der kalten Werkzeugwand erstarrt und der Fließwiderstand gering bleibt.

Ein weiterer Einflussfaktor für die Reibungswärme ist die Schergeschwindigkeit. Sie beeinflusst die Viskosität und geht quadratisch in die Gl. 3.13 ein. Beim Dosieren sorgt sie für ein schnelles Aufschmelzen und beim Einspritzen in Abhängigkeit von der Einspritzgeschwindigkeit für eine Schmelze mit geringer Viskosität. Hierbei muss beachtet werden, dass mit erhöhter Einspritzgeschwindigkeit auch der Druckverlust steigt. Reicht beim Einspritzen die Leistung der Einspritzeinheit nicht aus, um mit erhöhter Geschwindigkeit einzuspritzen, kann eine Temperaturerhöhung eine geeignete Maßnahme sein [Jar13]. Um Energie zu sparen, sollte die Viskosität niedrig und die Schergeschwindigkeit hoch gehalten werden.

Die **Heizleistung** hängt mit der Reibungswärme zusammen. Diese beiden Größen sorgen für das Aufschmelzen des Kunststoffes. Will man die Heizleistung senken, muss die Reibungswärme erhöht werden und umgekehrt. Um die Heizleistung unabhängig von der Reibungswärme zu verkleinern, müssen die Wärmeverluste minimiert werden. Dies kann über die Verbesserung der Isolation erfolgen. Da dies nach Tab. 3.1 einen konstruktiven Eingriff benötigt, lohnt sich dieser Schritt nur bei einer starken Verbesserung der Isolation. Zudem kann die Heizleistung gesenkt werden, wenn dafür die Reibungswärme erhöht wird. Das würde auch zu einer Verringerung der Wärmeverluste führen.

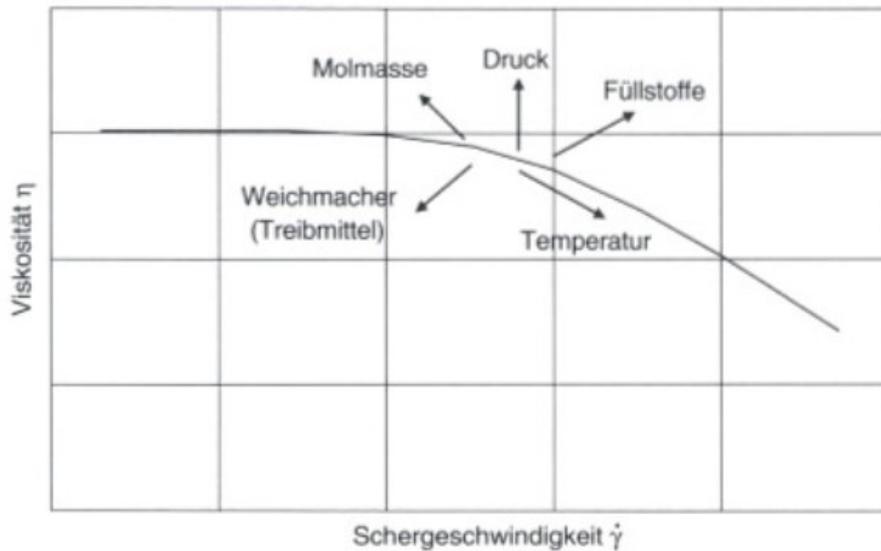


Abbildung 3.3: Einflussgrößen auf die Viskosität [Bic12]

Die **Einspritzleistung** ist abhängig von:

- der Geschwindigkeit v_{Ein}
- dem aufgebrachtem Druck p_{Ein}
- dem Zylinderkopffläche A_{ZK}

Beim Einspritzen soll die Einspritzgeschwindigkeit konstant gehalten werden. Der Druck variiert mit dem Widerstand beim Einspritzen. Die Abb.3.4 zeigt wie der Abkühlfluss des Werkzeugs und die Einspritzgeschwindigkeit den Druckverlust beeinflussen. Die Grafik zeigt, dass hohe Einspritzgeschwindigkeiten genauso hohen Druckverluste verursachen wie geringe Einspritzgeschwindigkeiten, da bei diesen der Einfluss der Abkühlung eine größere Rolle spielt. Somit sollte die Einspritzgeschwindigkeit so gewählt werden, dass das Druckverlustminimum erreicht wird. Dies führt zu einem geringeren Leistungsaufwand des Spritzeinheit, sowie zu einer in Kapitel 3.4 erwähnten Verringerung der Zuhaltarbeit. Des Weiteren ist zu beachten, dass es eine Obergrenze für die Einspritzgeschwindigkeit gibt. Wird diese überschritten, kann die Luft in der Kavität nicht schnell genug entweichen und es kommt zum sogenannten „Dieseleffekt“. Der Kunststoff verbrennt und weist dann beim fertigen Bauteil schwarze Stellen auf [Jar13]. Die Zylinderkopffläche kann nur geringfügig beeinflusst werden, da sie durch den Aufbau der Maschine festgelegt ist.

Die **Nachdruckleistung** verhält sich gegensätzlich zu der Einspritzleistung. Der Druck p_{Na} muss konstant gehalten werden und die Geschwindigkeit v_{Na} variiert, je nachdem wie viel Kunststoffvolumen in der Werkzeugkavität durch Schrumpfen verloren gegangen ist. Der Druck kann von dem Maschinenführer eingestellt werden und die Geschwindigkeit regelt sich ein. Um in diesem Prozessschritt Energie zu sparen, muss der Kunststoff

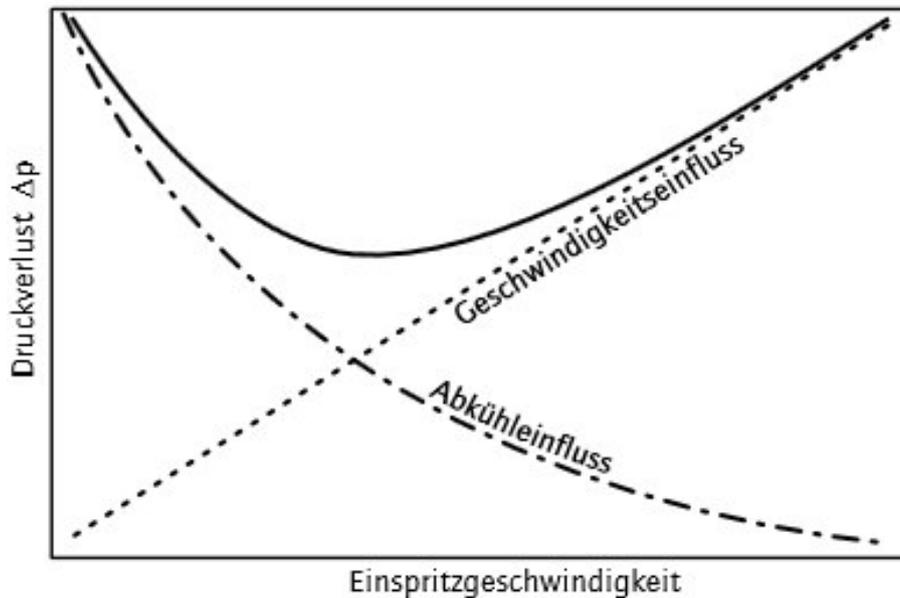


Abbildung 3.4: Einfluss der Einspritzgeschwindigkeit, sowie der Abkühlung auf die Druckverluste [Jar13]

betrachtet werden, da von diesem abhängt, wie stark und schnell er schrumpft. Daraus ergibt sich dann der benötigte Druck und daraus wiederum die Geschwindigkeit. Eine Möglichkeit das Schrumpfverhalten des Kunststoffes zu beeinflussen ist die Temperierung im Werkzeug. Durch sie kann das Bauteil schneller oder langsamer abkühlen, womit der Schrumpfprozess beeinflusst wird. Dies kann zu geringerem Druck führen, würde aber die Nachdruckzeit erhöhen. Eine weitere Möglichkeit ist die Zugabe von Zusatzstoffen, die den Werkstoff weniger schrumpfen lassen und damit die Nachdruckleistung verringern. Die **Umschaltleistung** beschreibt den Übergang zwischen Einspritzleistung und Nachdruckleistung. Sie spielt für den Prozessablauf eine wichtige Rolle, wird aber an dieser Stelle nicht genauer erläutert, da Ihre Optimierungsmöglichkeiten sich wie bei der Nachdruckleistung darstellen.

Die **Verlustwärme** entsteht in den Antrieben sowie in den Heizungen. Diese geht über die Außenhaut der Maschine an die Umgebung verloren. Der Großteil der Verlustwärme entsteht über die Heizung, die den Zylinder und den Kunststoff heizt. Dadurch, dass bei einem Zylinder nach außen hin die Fläche der Heizung viel größer ist als nach innen, muss diese stark isoliert werden, um den Wärmeverlust gering zu halten und den Wärmestrom in die Maschine zu leiten.

4 Abbildung der Reibungsenergie mittels Dymola

In diesem Kapitel wird der Energiestrom der Reibungswärme betrachtet. Bei der Bewertung wird auf die Daten der IES GmbH, sowie auf die entsprechenden Daten aus der im Folgenden beschriebenen Simulation zurückgegriffen. Die Firmendaten und die Messdaten der Simulation sind im Anhang beigefügt. Alle weiteren Bewertungen beruhen auf Annahmen, die auf Grundlage der in Kap. 3 aufgestellten Gleichungen hergeleitet werden.

Im Folgenden wird der Energiestrom der Reibungswärme bestimmt, wobei sich dabei auf die Reibung beim Plastifizieren beschränkt wird. Bei der Verfahrensbetrachtung in Kap.2 fällt auf, dass nach Abb.2.8 für die Plastifizierung des Kunststoffes ein verhältnismäßig großer Zeitraum zur Verfügung steht. In der Simulation soll eine Veränderung der Plastifizierdauer, sowie ein variieren der Plastifiziergeschwindigkeit untersucht werden, zudem sollen mögliche Einsparpotentiale aufgedeckt werden. Im Folgenden wird die Berechnung in der Simulation erläutert.

4.1 Rechnerische Abbildung der Plastifizierzone

Nach der Gl.3.13 bietet die Reibungswärme ein großes Optimierungspotenzial, da sie mit der zweiten Potenz der Schergeschwindigkeit ansteigt. Im Folgenden wird die Berechnung der Reibungswärme hergeleitet. Diese entsteht durch die Drehung der Schnecke und die damit verbundene Scherung des Kunststoffes. Die zum Aufschmelzen des Kunststoffes benötigte Reibungswärme muss der Antrieb der Schnecke aufbringen. Die Simulation wird für die Heizzone eins in der Spritzgießmaschine Arburg 270C durchgeführt.

Die entstehende Wärme wird mit der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$, der Viskosität η und dem bewegten Volumen $V_{Sch,HZ}$ nach Gl.4.1 berechnet.

$$\dot{Q}_R = \dot{\gamma}_r^2 \cdot \eta_r \cdot V_{HZ} \quad (4.1)$$

Um die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}_r$ zu berechnen, wird die Schnecke wie ein Rotationsviskosimeter behandelt [Rot15]. Dieses besteht aus einem Zylinder, in dem ein Fluid ruht und einem zweiten Zylinder, der sich in dem Fluid dreht und dieses schert. Bei der Simulation wird die Schnecke wie der innere Zylinder behandelt und das Fluid ist der Kunststoff. Mit dieser Annahme berechnet sich die Schergeschwindigkeit nach nach Gl.4.2.

$$\dot{\gamma}_r = \pi \cdot n_{Sch} \cdot \frac{d_{Sch,a}/2 + d_{Sch,i}/2}{d_{Sch,a}/2 - d_{Sch,i}/2} \quad (4.2)$$

Der Innendurchmesser $d_{Sch,i}$ der Schnecke wird über den Außendurchmesser $d_{Sch,a}$ der Schnecke und dem in der Heizzone betrachtete Gangvolumen $V_{Sch,HZ}$, sowie der Länge l_{HZ} der Heizzone berechnet, wobei sich das Volumen nach Gl.4.3 ergibt.

$$V_{Sch,HZ} = l_{HZ} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (d_{Sch,a}^2 - d_{Sch,i}^2) \quad (4.3)$$

Durch Umformen von Gl.4.3 ergibt sich die Formel für den Durchmesser der Schnecke in der untersuchten Heizzone nach Gl.4.4.

$$d_{Sch,i} = \sqrt{d_{Sch,a}^2 - \frac{4 \cdot V_{Sch,HZ}}{\pi \cdot l_{HZ}}} \quad (4.4)$$

Die Drehzahl der Schnecke berechnet sich über Umfangsgeschwindigkeit u_{Sch} und Durchmesser der Schnecke $d_{Sch,i}$, nach Gl.4.5.

$$n_{Sch} = \frac{u_{Sch}}{d_{Sch,i} \cdot \pi} \quad (4.5)$$

Die plastifizierte Masse $m_{K,HZ}$ in der Heizzone berechnet sich vereinfacht nach dem Gangvolumen $V_{Sch,HZ}$ mit der Dichte ρ_K nach Gl.4.6.

$$m_{K,HZ} = \rho_K \cdot V_{HZ} \quad (4.6)$$

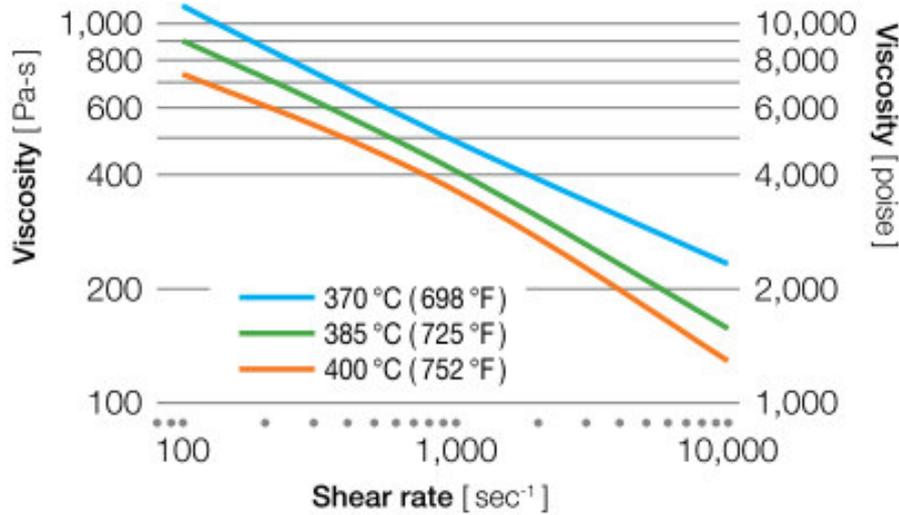


Abbildung 4.1: Rheologisches Verhalten von PEEK [Sol13]

Mit der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}_r$ kann auf der Grundlage, des in Abb.4.1 dargestellten Diagramms die repräsentative Viskosität η_r bestimmt werden. Für die Simulation wird die Kurve für die Temperatur linearisiert und mathematisch dargestellt. Für die Interpolation der Viskositätswerte aus dem Diagramm wird Gl.4.7 verwendet.

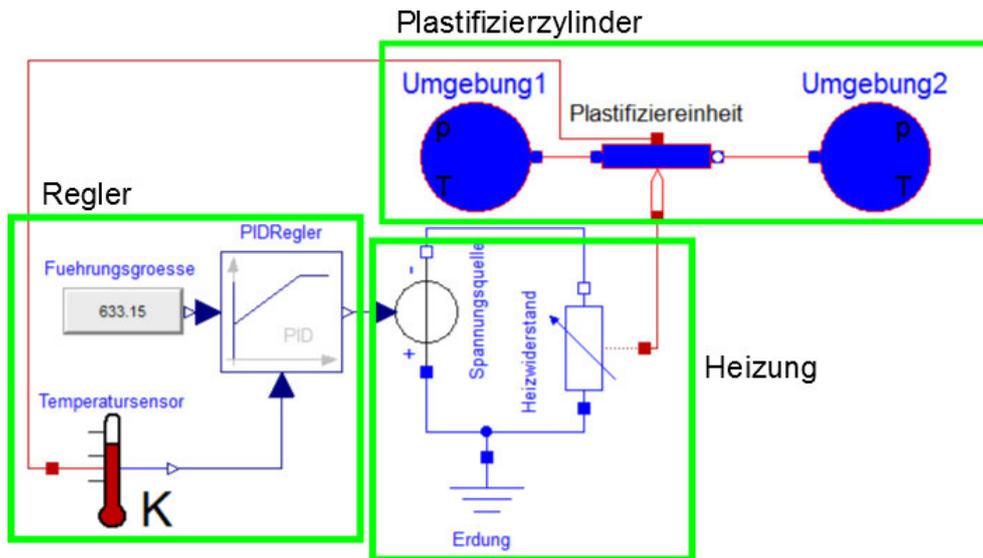


Abbildung 4.2: Schaltbild des Dymola Modells;
Quelle: Dymola

$$f(x) = f_0 \cdot e^{\frac{\ln \frac{x}{x_0} \cdot \ln \frac{f_1}{f_0}}{\ln \frac{x_1}{x_0}}} \quad (4.7)$$

Die ermittelten Werte werden ohne weitere Berechnung in der Simulation verwendet. Wie in Abb.4.1 zu erkennen ist, müssten für andere Temperaturbereiche auch andere Kurven verwendet werden. In dieser Simulation wird nur auf die Daten aus Abb.4.1 zurückgegriffen, da keine weiteren Diagramme vorliegen.

Mit der Viskosität und dem in der Schnecke bzw. Zylinder vorhandenen Volumen kann nach Gl.4.1 der Wärmestrom berechnet werden.

4.2 Aufbau des Simulationsmodells

Das Model zur Berechnung der Reibungs- und Heizungswärme wurde mit Hilfe der Simulationssoftware Dymola erstellt. Die Abb.4.2 zeigt das erstellte Model.

Die in der Abb. 4.2 markierte **Heizung** wird über eine Spannungsquelle und einen Widerstand simuliert. In dem Model wird der im Widerstand entstehende Wärmestrom in den Abschnitt **Plastifizierzylinder** geleitet, welcher die Heizzone eins repräsentiert. In diesem wird, in dem Block **Plastifiziereinheit** die Reibungswärme berechnet. Dies geschieht über die im vorherigen Kapitel erläuterten Berechnungen. Die beiden Umgebungsblöcke stellen die Temperatur und den Druck vor und hinter der simulierten Heizzone dar. Der Temperatursensor misst die durch den Wärmestrom der Heizung und der Reibungswärme entstehende Temperatur und gleicht sie mit dem Regler ab. Dieser besteht aus einem PID-Regler und der Führungsgröße, sowie dem Temperatursensor. Im **Regler** werden die Führungsgröße und die Regelgröße aus dem Temperatursensor

Tabelle 4.1: Daten der Heizzone eins in der Arburg 270C

| Nummer | Beschreibung | Größe | Wert | Einheit |
|--------|---------------------------------------|--------------------|-------|------------------|
| 1 | Dichte des Kunststoffes | ρ_K | 1510 | $\frac{kg}{m^3}$ |
| 2 | spez. Wärmekapazität des Kunststoffes | c_K | 1830 | $\frac{KqK}{W}$ |
| 3 | Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffes | λ_K | 0.37 | $\frac{W}{mK}$ |
| 4 | Gangvolumen pro Heizzone | $V_{Sch,HZ}$ | 20 | cm^3 |
| 5 | Länge der Heizzone | l_{HZ} | 130 | mm |
| 6 | Umfangsgeschwindigkeit der Schnecke | u_{Sch} | 10 | $\frac{m}{min}$ |
| 7 | Außendurchmesser der Schnecke | $d_{Sch,a}$ | 18 | mm |
| 8 | Masse des zu erhitzenden Kunststoffes | $m_{HZ,K}$ | 30.6 | g |
| 9 | Heizzone Eingangstemperatur | $\vartheta_{HZ,1}$ | 80 | $^{\circ}C$ |
| 10 | Heizzone Ausgangstemperatur | $\vartheta_{HZ,2}$ | 369 | $^{\circ}C$ |
| 11 | Umgebungsdruck | P_U | 1 | bar |
| 12 | Heizzone Leistung | P_{HZ} | 625 | W |
| 13 | Spannung an den Heizschalen | U_{HZ} | 230 | V |
| 14 | Widerstand der Heizschalen | R_{HZ} | 42.32 | Ω |

abgeglichen und die Heizung geregelt. Der Regler und die Heizung in dem Model sind dafür da, den Wärmeeintrag der Heizung zu simulieren, um diesen mit der Reibungswärme vergleichen zu können. Das verwendete Model vereinfacht den Wärmeeintrag der Heizung. Es werden die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität des Plastifizierkolbens vernachlässigt, sowie die Wärmeverluste an die Umgebung. Außerdem wird in der Plastifiziereinheit nur die Reibungswärme in einer Heizzone berechnet.

4.3 Durchführung der Simulation

Für die Simulation werden die Daten einer Arburg 270C Spritzgießmaschine verwendet. Der verwendete Kunststoff ist PEEK (KT880CF30) [Sol13]. Beides wird so bei der IES GmbH eingesetzt. Die für die Simulation benötigten Daten der Maschine stammen aus der Ersatzteilliste der Arburg 270C [Arb15]. Die für die Simulation verwendeten Daten sind in Tab. 4.1 aufgeführt. Es wird die Heizzone eins einer Arburg 270C simuliert, wobei zu beachten ist, dass um jede Heizzone zwei Heizschalen liegen und damit die Leistung doppelt so hoch ist. Zudem muss beim Benutzen des Models auf die Einheiten geachtet werden.

Um die Simulation durchzuführen müssen die Daten aus Tab.4.1 in das Model übertragen werden. Die Daten mit der Nummer 1 – 9 müssen in die Plastifiziereinheit eingegeben werden. Die beiden Umgebungsblöcke benötigen die Daten 1 – 3 und 9 – 11. Der Regler benötigt die Spannung der Heizschale 12, wobei diese auch in der Spannungsquelle angegeben werden muss. Im Heizwiderstand muss lediglich der Widerstand 14 angegeben werden. Die Heizzonen Ausgangstemperatur 10 muss in Kelvin in den Block Fuehrungsgrossen eingetragen werden. Die Leistung der Heizzonen 12 muss nicht direkt in das

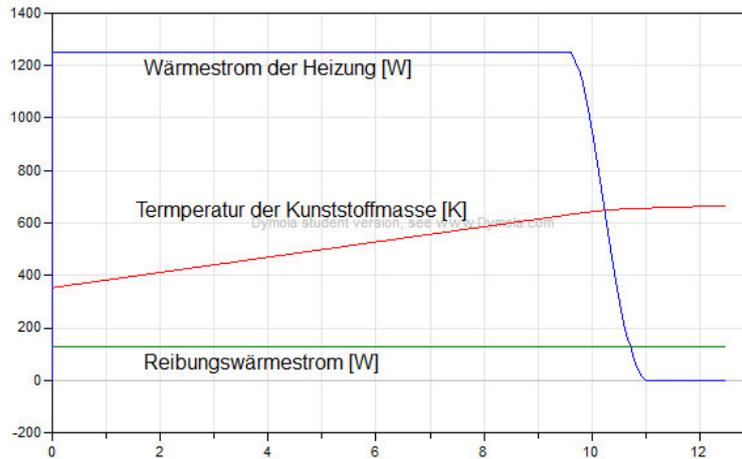


Abbildung 4.3: Ergebnis der Simulation;
Quelle: eigene Darstellung

Model eingegeben werden, wird aber für die Berechnung des Widerstandes benötigt und deshalb an dieser Stelle genannt.

Die Simulation wird für verschiedene Umfangsgeschwindigkeiten und Spannungen an der Heizung durchgeführt.

4.4 Auswertung der Simulationsergebnisse

Die Simulation ergibt die Abb. 4.3. Sie zeigt den Wärmestrom der Heizung, sowie den Wärmestrom durch die Reibung und den Temperaturverlauf im Kunststoff. An dem Punkt, in dem der Heizungswärmestrom abknickt und anfängt zu sinken, ist die gewünschte Temperatur im Kunststoff erreicht.

Durch Ablesen der Werte lässt sich die zugeführte Wärme, zum Erreichen der Temperatur berechnen.

$$\begin{aligned}
 Q_K &= Q_R + Q_H & (4.8) \\
 Q_K &= 128.7W + 1250W = 1378,7W
 \end{aligned}$$

Bei einer Spannung von 230V und einer Umfangsgeschwindigkeit von $10 \frac{m}{min}$ werden 1378,7W Wärmeenergie dem Kunststoff zugeführt.

Wird nun die Spannung in der Heizung reduziert, wird der Wärmestrom kleiner und die Zeit bis zum Erreichen der gewünschten Temperatur steigt. Dies wird für verschiedene Umfangsgeschwindigkeiten durchgeführt und in Abb.4.4 abgebildet. Dabei wurde die Heizungsleistung nicht komplett auf Null heruntergefahren, da diese zusätzlich zu ihrem Wärmeeintrag wie eine Isolation wirkt und verhindert, dass die Wärme aus dem Plastifizierzylinder fließt. In der Simulation wird die an der Heizung anliegende Spannung in 20V Schritten reduziert. Die drei Kurven werden bei verschiedenen konstanten

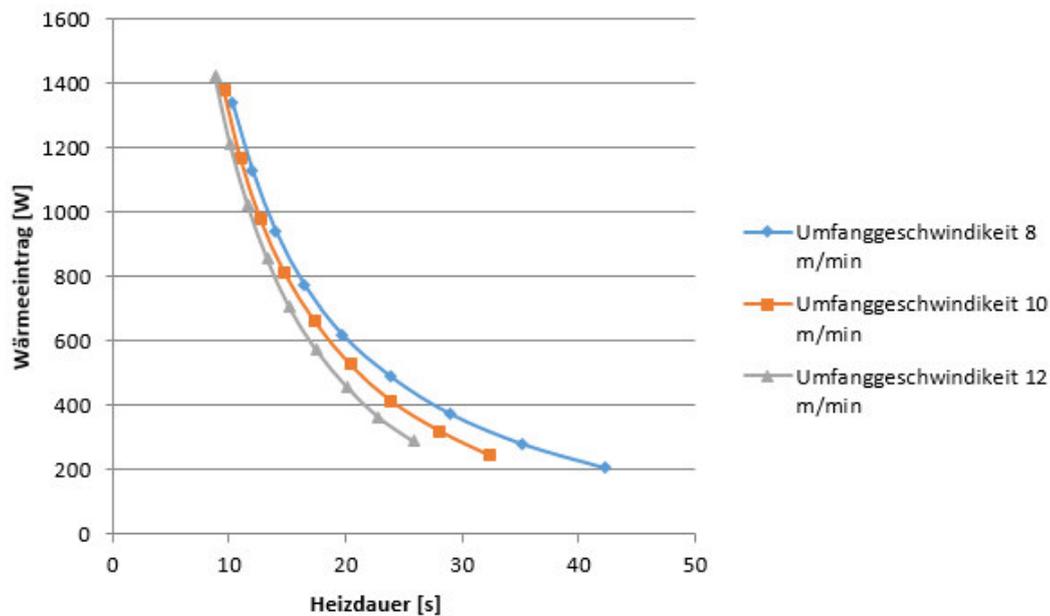


Abbildung 4.4: Wärmeeintrag über der Heizdauer;
Quelle: eigene Darstellung

Umfangsgeschwindigkeiten der Schnecke aufgenommen. Diese zeigen, wie bei Absenkung der Heizungsleistung der Wärmeeintrag sinkt und der Zeitbedarf steigt. Wird die Umfangsgeschwindigkeit erhöht steigt der Wärmeeintrag und die Dauer zum Aufschmelzen sinkt.

Wird nur die Reibungswärme, bei verschiedenen Umfangsgeschwindigkeiten und Spannungen berechnet entsteht die Abb.4.5. Die Simulation zeigt, dass eine Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit eine nicht lineare Steigerung der Reibungswärme führt, sie steigt überproportional an. Dies ist zu erwarten, wenn die Gl. 3.13 betrachtet wird. Die Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit geht über die Schergeschwindigkeit quadratisch in die Wärmeentwicklung ein, führt aber gleichzeitig nach Abb.4.1 zu einer Absenkung der Viskosität.

Zusätzlich wird noch die Veränderung der Viskosität über die Scherrate aufgenommen. Die Abb.4.6 zeigt wie mit einer Erhöhung der Schergeschwindigkeit, die Viskosität immer langsamer absinkt. Die Schergeschwindigkeit sollte somit nicht zu niedrig gewählt werden, da eine hohe Viskosität den weiteren Prozessablauf verschlechtert. Das Diagramm zeigt aber auch, dass bei einer Erhöhung der Schergeschwindigkeit die Viskosität immer geringer beeinflusst wird. Eine niedrige Viskosität sorgt beim Einspritzen und Nachdrücken für ein besseres Fließverhalten.

Mit der Annahme, dass zum Plastifizieren mehr Zeit zur Verfügung steht als momentan genutzt wird und den Ergebnissen der Simulation, ergeben sich zwei mögliche Einsparpotenziale. Die Leistung der Heizung wird gesenkt und die Schnecke dreht über einen längeren Zeitraum, wodurch weniger Wärmeverluste durch die Heizung entstehen. Eine

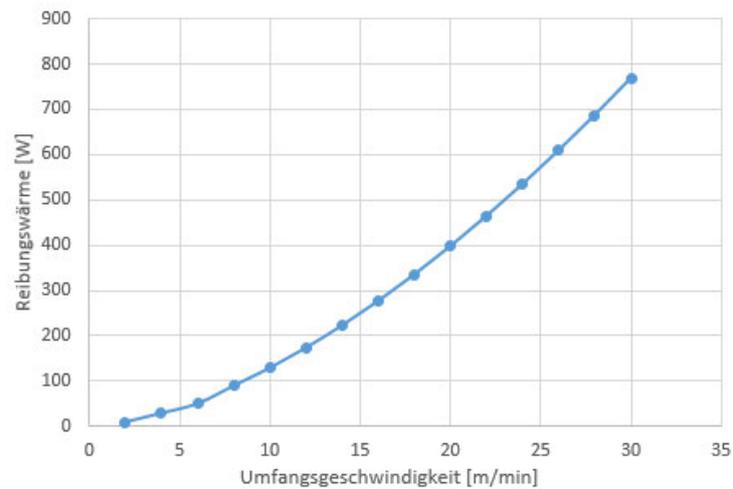


Abbildung 4.5: Reibungswärme bei unterschiedlichen Umfangsgeschwindigkeiten der Schnecke; Quelle: eigene Darstellung

weitere Möglichkeit Energie einzusparen kann die Beschleunigung des Aufschmelzprozesses sein. Die Heizung heizt mit maximaler Leistung und die Umfangsgeschwindigkeit der Schnecke wird erhöht. Diese führt nach Abb.4.5 zu einem deutlich erhöhtem Wärmeintrag. Durch die schnellere Aufschmelzung muss die Kunststoffmasse einen kürzeren Zeitraum auf einer hohen Temperatur gehalten werden und es wird weniger Energie benötigt.

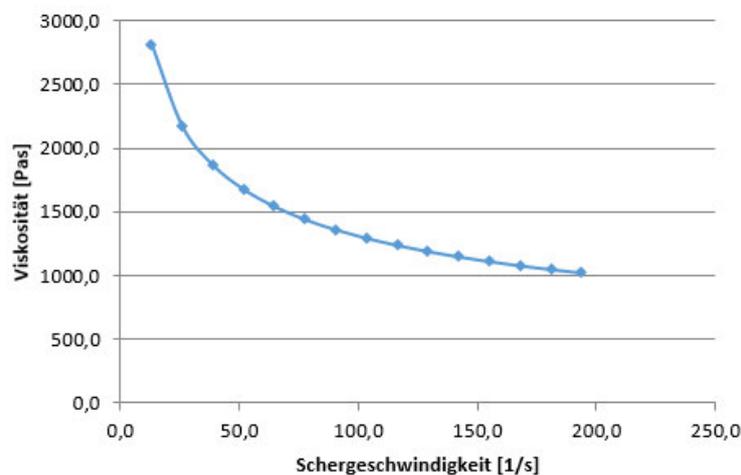


Abbildung 4.6: Viskosität bei unterschiedlichen Schergeschwindigkeiten der Schnecke; Quelle: eigene Darstellung

Um die Ergebnisse im Betrieb anwenden zu können, muss der Energiebedarf in jeder Heizzone berechnet werden. Zudem müssen die Energieverluste an die Umgebung und die Materialeigenschaften des Plastifizierzylinders, sowie der Schnecke beachtet werden. Des Weiteren sollte die Ermittlung der Viskosität Temperaturabhängig gemacht werden. Durch die Vereinfachungen, die für die Simulation gewählt werden, sind die Ergebnisse nicht realitätsgetreu. Sie können aber eine Tendenz aufzeigen, in welche Richtung sich der Energiefluss bei Änderung einer Einflussgröße entwickelt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einerseits eine Einführung in die Thematik des Spritzgießens zu geben und andererseits die Energieströme in dem SGP zu ermitteln und qualitativ zu bewerten. Aufbauend auf diesen wird ein Teilbereich des SGP simuliert. Die Aufgabenstellung wurde bearbeitet und wird an dieser Stelle noch einmal zusammengefasst.

Im Kap.2 wird das Verhalten der Thermoplaste erläutert, sowie der Aufbau der Maschine und der Ablauf des Prozesses beschrieben. Die behandelten Kunststoffe sind Thermoplaste, wobei diese in amorph und teilkristallin aufgeteilt werden. Es wird das Verhalten von diesen bei Erhöhung der Temperatur beschrieben bis zu dem Punkt, an dem sie den Fließbereich erreichen und damit spritzfähig sind.

Die SGM wird in die Werkzeugseite und Plastifizier- bzw Spritzseite eingeteilt, wobei der Werkzeugseite die Schließeinheit und der Auswerfer zugeteilt werden. Die andere Seite der Maschine besteht je nach Aufbau aus Plastifizier- und Spritzzylinder, sowie dem Trichter und der Heizung. Das Granulat wird der Maschine über den Trichter zugeführt und über eine Heizung und mechanische Reibung im Plastifizierzylinder aufgeschmolzen. Das Verfahren wird in drei Prozessschritte eingeteilt, wobei der Erste das Plastifizieren und Dosieren der Kunststoffmasse beschreibt. Im zweiten Schritt wird der Kunststoff eingespritzt, verdichtet und abgekühlt, bis er im letzten Schritt aus dem Werkzeug entfernt werden kann. Diese drei Schritte verlaufen zyklisch.

Auf Basis des beschriebenen Verfahrens werden die Energieströme ermittelt. Diese lassen sich nach Werkzeug und Plastifizier- bzw Spritzeinheit einteilen, wobei zu beachten ist, dass manche Energieströme stark voneinander abhängig sind. Dies spiegelt sich in den in Tab. 3.1 dargestellten Prozessgrößen wieder, die an mehreren Stellen unterschiedliche Energieströme beeinflussen. Einen großen Einfluss auf den Energieverbrauch haben die Leistungen, die von der Spritzeinheit aufgebracht werden müssen. Die Spritzeinheit ist pro Bauteil an mehreren Prozessschritten beteiligt und spielt deshalb eine große Rolle. Sie bringt die Leistung für das Einspritzen, Umschalten und Nachdrücken auf, wobei diese bei der Einspritzgeschwindigkeit und der Nachdruckzeit optimiert werden können. Die Zuhaltarbeit ist stark von dem Spritzdruck abhängig, da diese dem daraus resultierenden Werkzeuginnendruck entgegenhalten muss. Daraus ergibt sich ein hohes Einsparpotential bei der Optimierung des Spritzdruckes, da dieser sowohl Zuhaltarbeit als auch die Einspritzleistung beeinflusst. Eine weitere Möglichkeit zur Energieeinsparung zeigt sich bei der Abwärme. Diese wird komplett an die Umgebung oder aber an das Temperiermedium abgegeben und kann von dort aus abgeleitet und genutzt werden. Um den Energieverbrauch der Schließarbeit zu verringern, sollte bei der konstruktiven Auslegung des Werkzeugs dieser mit berücksichtigt werden. Der Energiestrom der Reibungswärme hat ebenfalls ein Einsparpotential. Die Simulation zeigt, dass durch eine

bessere Ausnutzung der Reibungswärme Energie gespart werden kann. Entweder wird die Leistung der Heizung reduziert und damit die Wärmeverluste an die Umgebung. Die fehlende Wärme wird durch die Schnecke in den Kunststoff eingebracht. Oder der Plastifizierprozess wird durch einer Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit der Schnecke stark beschleunigt, sodass der Kunststoff einen kürzeren Zeitraum, in der Plastifiziereinheit auf Temperatur gehalten werden muss.

Die Ergebnisse der Simulation beruhen auf Annahmen, sodass eine Weiterentwicklung der Simulation geschehen sollte. In einer weiterführenden Arbeit könnte nun der Wärmetransport in der Plastifiziereinheit und die Wärmeverluste an die Umgebung simuliert werden. Auf Basis der Simulation könnte dann ermittelt werden, wie viel Wärmeverluste durch den geringeren Einsatz von Heizleistung eingespart werden kann. Auserdem sollte die Temperaturabhängigkeit der Viskosität beachtet und untersucht werden. Des Weiteren sollten die hergeleiteten Einsparpotentiale genauer untersucht und bewertet werden.

Für die weitere Entwicklung, einer Simulation des SGP sollte noch einmal über die benutzte Software entschieden werden. Die verwendete Simulationssoftware Dymola bietet zwar viele vorgefertigte Bausteine, um daraus ein Model zu bauen. Bei der Einarbeitung in das Programm fällt aber auf, dass für die zu simulierenden Energieströme viele Bausteine fehlen oder nicht ausreichend genau sind. Um diese anzupassen, fehlt eine geeignete Entwicklungsumgebung, sodass es sehr mühselig ist die vorhandenen Funktionen zu verstehen oder zu verändern. Eine bessere Entwicklungsumgebung mit Debugger und eingebautem Editor findet sich bei Matlab. Zusätzlich bietet es die Möglichkeit eine grafische Oberfläche zu entwickeln, die die Bedienung der Simulation vereinfacht. Um die Simulation so anschaulich wie bei Dymola zu gestalten, kann das Entwicklungstool Simulink verwendet werden, welches in Matlab implementiert ist.

Literaturverzeichnis

- [Arb15] ARBURG: *Ersatzteilliste der Arburg 270 C*. 2015
- [Bic12] BICHLER, Martin: *Prozessgrößen beim Spritzgießen*. Bd. 2.Auflage. Beuth Verlag, 2012
- [Bri14] BRIEHL, Horst: *Chemie der Werkstoffe*. Bd. 3.Auflage. Springer Verlag, 2014
- [Eri08] ERICH, Wintermantel: *Medizintechnik Life Science Engineering*. Bd. 4.Auflage. Springer Verlag, 2008
- [Fri01] FRIEDRICH, Johannaber: *Handbuch Spritzgießen*. Hanser Verlag, 2001
- [Jar13] JAROSCHEK, Cristoph: *Spritzgießen für Praktiker*. Bd. 3.Auflage. Hanser Verlag, 2013
- [Rot15] *Schergeschwindigkeit im Rotationsviskosimeter*. <http://rheologie.homepage.t-online.de/index.html>. Version: 20.07.2015
- [SGM15] *Spritzgießmaschine*. <http://www.gojakob.de/media/Spritzgiessmaschieneueberarbeitet.jpg>. Version: 19.06.2015
- [Sol13] SOLWAY: *KetaSpire PEEK Design & Processing Guide*. 2013
- [Sti04] STITZ, Siegfried: *Spritzgusstechnik*. Bd. 2.Auflage. Hanser Verlag, 2004

Anhang

A.1 Daten von der IES GmbH

| | | | | | | | | | |
|------------------------------|--------|--------------|--------|--------|------------------------|---|------------------------|----------------------|------------------------------------|
| Material | | Maschine | | | | | | | |
| PEEK (KT880CF30) | | Arburg 270 C | | | | | | | |
| Plastifizieren | | | | | Dosieren | | | | |
| Heizzonen der Schnecke in °C | | | | | Verzögerung in s | Umfangs- geschwindigkeit in m/min | Staudruck in bar | Volumen in ccm | Schnecken- durchmesser in mm |
| Zone 0 | Zone 1 | Zone 2 | Zone 3 | Zone 4 | | | | | |
| 80 | 360 | 370 | 380 | 390 | 0,5 | 10 | 0 | 3 | 18 |

A.2 Messdaten aus der Simulation

Simulation PEEK (KT880CF30) mit Arburg 270C

| Spannung [V] | Reibungswärmestrom [W] | Heizungswärmestrom [W] | Dauer [s] | Gesamtwärmestrom [W] |
|--------------------------------|------------------------|------------------------|-----------|----------------------|
| Umfangsgeschwindigkeit [m/min] | | 10 m/min | | |
| 230 | 89,6 | 1250,0 | 10,3 | 1339,6 |
| 210 | 89,6 | 1042,0 | 12,0 | 1131,6 |
| 190 | 89,6 | 853,0 | 14,0 | 942,6 |
| 170 | 89,6 | 682,9 | 16,5 | 772,5 |
| 150 | 89,6 | 531,6 | 19,7 | 621,2 |
| 130 | 89,6 | 399,3 | 23,9 | 488,9 |
| 110 | 89,6 | 285,9 | 28,9 | 375,5 |
| 90 | 89,6 | 191,4 | 35,1 | 281,0 |
| 70 | 89,6 | 115,8 | 42,3 | 205,4 |
| Umfangsgeschwindigkeit [m/min] | | 8 m/min | | |
| 230 | 128,8 | 1250,0 | 9,6 | 1378,8 |
| 210 | 128,8 | 1042,1 | 11,0 | 1170,9 |
| 190 | 128,8 | 853,0 | 12,7 | 981,8 |
| 170 | 128,8 | 682,9 | 14,8 | 811,7 |
| 150 | 128,8 | 531,6 | 17,4 | 660,4 |
| 130 | 128,8 | 399,3 | 20,4 | 528,1 |
| 110 | 128,8 | 285,9 | 23,9 | 414,7 |
| 90 | 128,8 | 191,4 | 28,1 | 320,2 |
| 70 | 128,8 | 115,8 | 32,4 | 244,6 |
| Umfangsgeschwindigkeit [m/min] | | 12 m/min | | |
| 230 | 173,1 | 1250,0 | 8,8 | 1423,1 |
| 210 | 173,1 | 1042,0 | 10,1 | 1215,1 |
| 190 | 173,1 | 853,0 | 11,6 | 1026,1 |
| 170 | 173,1 | 682,9 | 13,3 | 856,0 |
| 150 | 173,1 | 531,6 | 15,2 | 704,7 |
| 130 | 173,1 | 399,3 | 17,5 | 572,4 |
| 110 | 173,1 | 285,9 | 20,1 | 459,0 |
| 90 | 173,1 | 191,4 | 22,8 | 364,5 |
| 70 | 173,1 | 115,8 | 25,8 | 288,9 |

| Messung | Umfangsgeschwindigkeit t [m/min] | Reibungswärme [W] | Schergeschwindigkeit gkeit [1/s] | Viskosität [Pas] |
|---------|-------------------------------------|-------------------|-------------------------------------|------------------|
| 1 | 2 | 9,4 | 12,9 | 2816,5 |
| 2 | 4 | 29 | 25,8 | 2173,3 |
| 3 | 6 | 56,1 | 38,7 | 1867,5 |
| 4 | 8 | 89,6 | 51,7 | 1677,0 |
| 5 | 10 | 128,7 | 64,6 | 1542,7 |
| 6 | 12 | 173,1 | 77,5 | 1441,0 |
| 7 | 14 | 222,5 | 90,4 | 1360,3 |
| 8 | 16 | 276,4 | 103,3 | 1294,0 |
| 9 | 18 | 334,7 | 116,3 | 1238,2 |
| 10 | 20 | 397,3 | 129,2 | 1190,4 |
| 11 | 22 | 463,9 | 142,1 | 1148,7 |
| 12 | 24 | 534,4 | 155,0 | 1111,9 |
| 13 | 26 | 608,6 | 167,9 | 1079,1 |
| 14 | 28 | 686,6 | 180,9 | 1049,6 |
| 15 | 30 | 768,1 | 193,8 | 1022,9 |



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: Witt

Vorname: Jonas

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

Energieströme in der Spritzgussproduktion

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 Bachelorarbeit ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

23.07.15

Datum

Jonas Witt

Unterschrift im Original