

Masterthesis

Name:

Hautau

Vorname:

Anja

Studiengang:

Erneuerbare Energien

vorgelegt am:

15. September 2015

Erstprüfer/in:

Prof. Dr. Ing. Heike Frischgesell

Zweitprüfer/in:

Prof. Dr.-Ing. Achim Schmidt

Thema:

Abbildung einer Produktionsstätte der Spritzgusstechnik mit Hilfe der Simulationssoftware Dymola®

Anja Hautau

Thema der Bachelorthesis

Abbildung einer Produktionsstätte der Spritzgusstechnik mit Hilfe der Simulationssoftware Dymola®

Stichworte

Spritzgießen, Spritzgießmaschine, Spritzgießprozess, Simulation, Simulationssoftware, Modellierung, Plastifizieren, Dymola® ; Energiebedarf

Kurzzusammenfassung

Diese Masterthesis entstand im Zuge eines Forschungsprojekts zur Untersuchung und Optimierung des Energieverbrauchs bei der Kunststoffverarbeitung im Spritzgussverfahren. Hauptgegenstand der Thesis ist die Abbildung und Simulation des Plastifizierprozesses als Teilprozess der Spritzgusstechnik. Die Auslegung des Simulationsmodells ermöglicht die Energiebedarfsanalyse des Prozesses. Die Modellierung und Simulation erfolgt mit der physikalisch-objektorientierten Simulationssoftware Dymola®. Eine technische Einleitung in das Thema umfasst die Grundlagen des Spritzgießens wie auch eine Einführung in die Simulationssoftware. Im Hauptteil wird vertiefend auf den Plastifiziervorgang eingegangen sowie die Prozessparameter und das Simulationsmodell vorgestellt. Über eine Beispielsimulation erfolgt die Plausibilitätsprüfung des Modells. Schließlich werden durch das Verändern von Prozessparametern verschiedene Varianten des Plastifizierprozesses betrachtet und hinsichtlich ihres Einflusses auf den Energiebedarf bewertet.

Anja Hautau

Title of the paper

Modelling of a manufacturing facility of injection molding technology by using the simulation software Dymola®

Keywords

Injection molding, injection molding machine, injection molding process, simulation, simulation software, modeling, plasticizing, Dymola®, energy requirements

Abstract

This master thesis arose in course of a research project dealing with the study and optimization of energy consumptions of plastics processing by injection molding. Core subject of the thesis is the modeling and simulation of the plasticizing process as a subprocess of the injection molding technology. The model is developed to enable energy demand analyses. Modeling and simulation is carried out with the physical-object-oriented simulation software Dymola®. A technical introduction covers the basics of injection molding technology as well as the basics of the simulation software. The main part deals with the details of the plasticizing process and presents the process parameters and the simulation model. Via a simulation example the model is checked for plausibility. Finally variations of the process parameters are applied and evaluated in terms of their influence on energy requirements.

Masterthesis

Abbildung einer Produktionsstätte der Spritzgusstechnik mit Hilfe der Simulationssoftware Dymola®

vorgelegt von	Name:	Hautau
	Vorname:	Anja
	Matrikelnummer:	2136803
	Studiengang:	Erneuerbare Energien

vorgelegt am: **15. September 2015**

Erstprüfer/in: Prof. Dr. Ing. Heike Frischgesell

Zweitprüfer/in: Prof. Dr.-Ing. Achim Schmidt

Inhaltsverzeichnis

I	Abkürzungsverzeichnis	5
II	Nomenklaturverzeichnis.....	6
1.	Einleitung.....	9
1.1.	Aufgabenstellung.....	9
1.2.	Vorgehen und Inhalt.....	10
2.	Technische Grundlagen des Spritzgießens	11
2.1.	Aufbau und Funktion einer Spritzgussmaschine	11
2.1.1.	Plastifizier- und Spritzeinheit	12
2.1.2.	Schließeinheit	12
2.1.3.	Werkzeug.....	13
2.1.4.	Antrieb.....	14
2.1.5.	Steuerung	15
2.2.	Spritzgießprozess.....	16
2.2.1.	Spritzgießzyklus	16
2.2.2.	Prozessparameter.....	18
2.2.3.	Energiebedarf und Energiebilanz	20
3.	Grundlagen der Simulation zur Abbildung und Analyse von Produktionssystemen.....	23
3.1.	Simulationssoftware Dymola®	25
3.1.1.	Grundlagen der Software	25
3.1.2.	Aufbau der Bibliothek in Dymola®	28
4.	Simulation einer Spritzguss-Produktionsstätte	29
4.1.	Plastifizieren als Teilprozess des Spritzgießens	30
4.1.1.	Plastifizierprozess	30
4.1.2.	Thermodynamische Einordnung	31
4.1.3.	Gleichungen zur Abbildung der Wärmeübertragung.....	32
4.1.4.	Annahmen und Vereinfachungen	37
4.2.	Modellierung und Simulation des Plastifizierprozesses	38
4.2.1.	Grundmodell.....	39
4.2.2.	Erweiterung der Bibliothek in Dymola®	41
4.2.3.	Anlagenparameter und Kennwerte.....	45
4.2.3.1.	Geometrie.....	46
4.2.3.2.	Elektrische Kenngrößen.....	46

4.2.3.3.	Material	47
4.2.3.4.	Temperaturen.....	47
4.2.3.5.	Massenstrom und Zykluszeit.....	48
4.2.4.	Beispielsimulation	49
4.2.4.1.	Solltemperatur der Heizung	49
4.2.4.2.	Massenstrom.....	53
4.2.4.3.	Resultierende Temperaturen und Wärmeströme je Komponente.....	53
4.2.4.4.	Spannungszufuhr an der Heizung.....	55
4.2.4.5.	Energieeinsatz	56
4.3.	Variantenvergleich hinsichtlich des Energiebedarfs	58
4.3.1.	Energieaufwand in Abhängigkeit des Thermoplasts	59
4.3.2.	Energieaufwand in Abhängigkeit des Massenstroms.....	62
4.3.3.	Energieaufwand in Abhängigkeit der Zykluszeit	65
4.4.	Ergebnisse.....	67
5.	Zusammenfassung und Ausblick	69
III	Abbildungsverzeichnis.....	72
IV	Tabellenverzeichnis	74
V	Literaturverzeichnis.....	75
VI	Anhang.....	77

I Abkürzungsverzeichnis

Dymola®	Dynamic Modeling Laboratory
HZ	Heizzone
IES (GmbH)	Innovative-Erodier-Systeme GmbH
ISO	Internationale Organisation für Normung
PEEK	Polyether-Etherketone
PP	Polypropylen
SI	Système international d'unités - Internationale Einheitensystem
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

II Nomenklaturverzeichnis

A	Fläche
C	Wärmekapazität eines Körpers
c	Spezifische Wärmekapazität eines Stoffes
c_1	Geschwindigkeit der Masse im Zustand 1
c_2	Geschwindigkeit der Masse im Zustand 2
Ec	Eckert-Zahl
g	Erdbeschleunigung 9,81 [m/s ²]
h	Spezifische Enthalpie
k	Geometrische Kennzahl eines Systems
L	Längen
L_0	Längenverhältnis des Körpers bei freier Konvektion
m	Masse
\dot{m}	Massenstrom
n	Anzahl der Stahlkugeln im Zylinder
n_A	Anzahl der Ausschusszyklen
P	Leistung
Pr	Prandtl-Zahl
p	Druck
Q	Zugeführte Wärmemenge
\dot{Q}	Wärmestrom
$\dot{Q}_{Abwärme}$	Wärmestrom durch Abwärme an die Umgebung
$\dot{Q}_{Elektrisch}$	Wärmestrom erzeugt durch eine elektrische Heizung
$\dot{Q}_{Kühl}$	Wärmestrom durch Kühlwasseraustritt aus dem System
\dot{Q}_{Masse}	Wärmestrom durch Massenaustritt aus dem System
R	Elektrischer Widerstand
Re	Reynolds-Zahl
r	Radius
S	Entropie
T	Temperatur
T_0	Temperaturdifferenz zwischen Medium und Körper bei freier Konvektion
t	Zeit

U	Elektrische Spannung
w_0	Strömungsgeschwindigkeit des Mediums bei freier Konvektion
\dot{W}	Arbeit je Zeit
z	Höhe
α	Wärmeübergangskoeffizient zwischen Wand und Medium
λ	Wärmeleitkoeffizient
ν	Kinematische Viskosität
η	Dynamische Viskosität
ρ	Dichte

Indizes

1	Zustand 1
2	Zustand 2
A	Aufheizphase
AS	Ausschuss
C	Keramik
E	Einspritzphase
H bzw. Heiz	Heizung
HZ	Heizzone
K	Stahlkugeln
N	Nachdruckphase
M	Spritzgussmasse
T	Test
W	Wand
Z	Zylinder (Zylinderwand)
a bzw. out	außen
el	elektrisch
i bzw. in	innen
irr	irreversibel
ist	Istzustand
$mech$	Mechanisch
$soll$	Sollzustand
start	Startzustand / Eingangszustand

1. Einleitung

Das Spritzgießverfahren ist ein Urformverfahren der kunststoffverarbeitenden Industrie, bei dem Thermoplasten, Duroplasten oder Kautschuk aufgeschmolzen, in eine Form gespritzt, verdichtet, abgekühlt und dann als Formteil ausgeworfen werden. Das Verfahren wird für die Fertigung hoher Stückzahlen eingesetzt. Die entstehenden Formteile weisen eine hohe Genauigkeit auf und bedürfen meist nur geringer Nacharbeit [MGKE2009]. Mit dem Spritzgussverfahren gefertigte Kunststoffteile werden in verschiedenen Branchen eingesetzt wie zum Beispiel in der Verpackungs-, Bau-, Fahrzeug und Elektroindustrie. Durch den stetig steigenden Umsatz und Wettbewerb [Disp2013] sowie durch die steigenden Energiekosten, gewinnt der Faktor Energieverbrauch in der kunststoffverarbeitenden Industrie immer mehr an Bedeutung. Die Analyse und Entwicklung der Anlagen ist der Hauptansatzpunkt für einen Ausbau der energieeffizienten Produktion.

1.1. Aufgabenstellung

In einem Forschungsprojekt soll der Energieverbrauch bei der Kunststoffverarbeitung im Spritzgussverfahren untersucht und optimiert werden. Im Rahmen des Projekts befasst sich diese Masterarbeit mit der Abbildung und Simulation einer Produktionsstätte der Spritzgusstechnik. Ziel ist es, einen Produktionsprozess so abzubilden, dass er hinsichtlich des Energiebedarfs untersucht werden kann. Die Modellierung und Simulation erfolgt mit der physikalisch-objektorientierten Simulationssoftware Dymola®, welche auf der Simulationssprache Modelica® beruht¹.

Um den Spritzgießprozess plausibel abbilden und simulieren zu können, sind Grundkenntnisse über das Produktionsverfahren des Spritzgießens wie auch über die Simulationssoftware notwendig. Das Vertraut machen mit der Spritzgießtechnik sowie das Einarbeiten in das Simulationsprogramm sind daher ebenfalls Teile der Aufgabenstellung. Beide Themengebiete sollen einleitend zur Modellbildung und Simulation kurz vorgestellt werden. Als Ergebnis der Einarbeitungsphase soll die Definition des Schwerpunktes der Prozessabbildung hervorgehen. Dazu gehört auch das Evaluieren der Anlagen- und Prozessparameter. Das Hauptthema sollen dann die Modellierung des Systems und die Simulation des Energiebedarfs bilden. Für eine möglichst realitätsnahe Abbildung des Prozesses gilt es, das Modell auf Plausibilität zu prüfen. Bei einer Variantenbetrachtung soll schließlich der Energiebedarf verschiedener Modellvarianten analysiert und auf ihr Potential zur Optimierung des Energiebedarfs abgewägt werden. Die Ausprägung der Varianten orientiert sich daran, welche Fragestellungen für den gewählten Teilprozess hinsichtlich des Energiebedarfs von Interesse sind. Ein Variantenvergleich bringt mitsich, dass in den Modellen Eingabeoptionen für die Prozessparameter vorgesehen sein sollen.

¹ Dymola®: Handelsmarke des Software-Entwicklungsunternehmens Dassault Systèmes; Modelica®: Handelsmarke der Modelica® Association

1.2. Vorgehen und Inhalt

In den ersten beiden Kapiteln dieser Arbeit werden die technischen Grundlagen für die Detailbetrachtung des Spritzgießprozesses vorgestellt. Dafür werden die Funktion der Spritzgießmaschine, der Prozesszyklus und die Prozessparameter sowie der Energiebedarf erläutert. Dann wird auf den Begriff der Simulation und dessen Bedeutung für die Planung energieeffizienter Anlagen eingegangen. Zudem wird die Simulationssoftware Dymola® vorgestellt.

Aufbauend auf die Grundlagen befasst sich der Hauptteil der Arbeit mit der Abbildung und Simulation des Plastifizierprozesses. Der Plastifizierprozess wird zunächst im Detail vorgestellt. Basierend auf der thermodynamischen Einordnung des Prozesses sowie der mathematisch-physikalische Abbildung werden die bei der Betrachtung getroffenen Annahmen und Vereinfachungen aufgezeigt.

Das Grundmodell stellt die Basis der Simulation dar. Im Rahmen der Modellerstellung erfolgen erforderliche Anpassungen des Modells in Form von Erweiterungen in der Dymola® - Bibliothek. Hinsichtlich der Anwendung des Modells werden die Eingaben und Einstellungen beschrieben, die vor einer Simulation vorgenommen werden müssen. Anhand einer Beispielsimulation werden die Abläufe im Modell veranschaulicht und auf ihre Plausibilität hin geprüft. Schließlich erfolgt die Simulation des Energieaufwands für das Plastifizieren. Dabei werden die Prozessparameter Material (Thermoplast), Massenstrom und Zykluszeit variiert und der Energiebedarf in Abhängigkeit der Parameter analysiert.

Abschließend werden die Modellbildung und die Ergebnisse der Simulation zusammengefasst. Dabei wird auf die Herausforderungen bei der Modellfindung und Simulation eingegangen. Die Kernaussagen werden ebenfalls zusammengefasst. In einem Ausblick werden Themen aufgezeigt, für die eine vertiefende Betrachtung empfohlen wird oder die eine Optimierung oder Erweiterung des Modells ermöglichen.

2. Technische Grundlagen des Spritzgießens

Im Zuge dieser Arbeit wird ein Teilbereich einer Spritzgießanlage modelliert und simuliert. Für das spätere Einordnen der Komponenten und die Prozessparameter werden in diesem Kapitel zunächst der Aufbau sowie die Funktion einer Spritzgießanlage beschrieben und der Spritzgießprozess erläutert.

2.1. Aufbau und Funktion einer Spritzgussmaschine

Unabhängig von der Bauform der Anlage kann die Spritzgussmaschine in vier Baugruppen gegliedert werden: Plastifizier- und Spritzeinheit, Schließeinheit sowie Antrieb und Steuerung. Eine weitere, jedoch meist unabhängig von der Maschine betrachtete Baugruppe, ist das Werkzeug. Jede Baugruppe setzt sich wiederum aus Unterbaugruppen zusammen und übernimmt bestimmte Funktionen [JoMi2004] [MGKE2009].

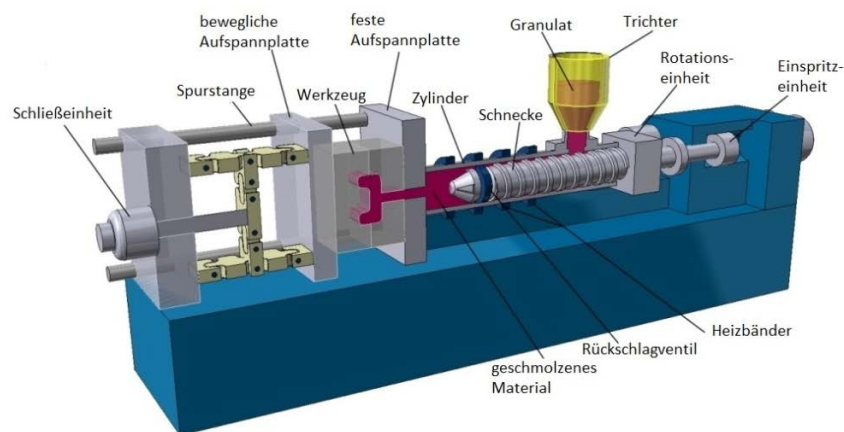


Abbildung 2 - 1: Komponenten einer Schneckenspritzgussmaschine [Rut12013]

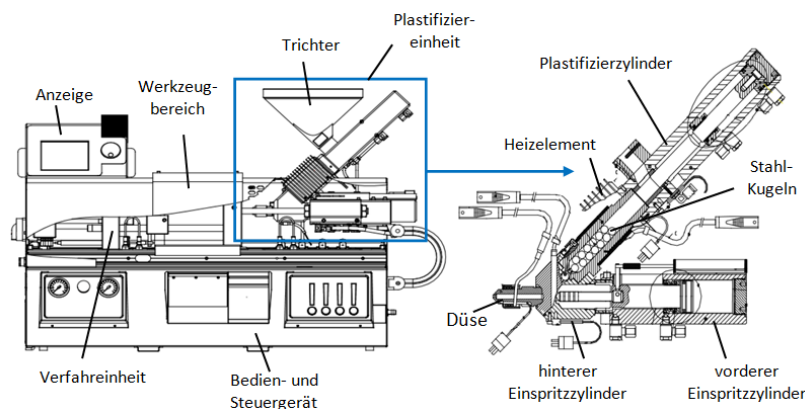


Abbildung 2 - 2: Komponenten einer Kolbenspritzgießmaschine [Cron2013]

Folgend werden die Funktionen der einzelnen Baugruppen kurz beschrieben. Dabei wird an einzelnen Stellen zwischen den beiden Varianten Schneckenspritzgießung und Kolbenspritzgießung unterschieden.

2.1.1. Plastifizier- und Spritzeinheit

Diese Baugruppe besteht überwiegend aus den Unterbaugruppen Trichter, Zylinder, Rotationsschnecke oder Kolben und Düse. Hier erfolgt die Zuführung des Granulats. Das Granulat wird aus dem Trichter in den Zylinder eingezogen. Je nach Bauart erfolgt die Plastifizierung über eine Schnecke im Zylinder oder über einen oder mehrere Zylinder mit Kolben und ggf. Stahlkugeln. In jedem Fall wird ein Erwärmen des Zylinders über separat temperierte Heizzonen realisiert (siehe auch Abbildung 4 - 7). Das Temperieren wird über Heizbänder realisiert, die außen um die Zylinder installiert sind. Über die Zylinderwand wird die Wärme der Masse zugeführt, welche dadurch aufgeschmolzen wird.

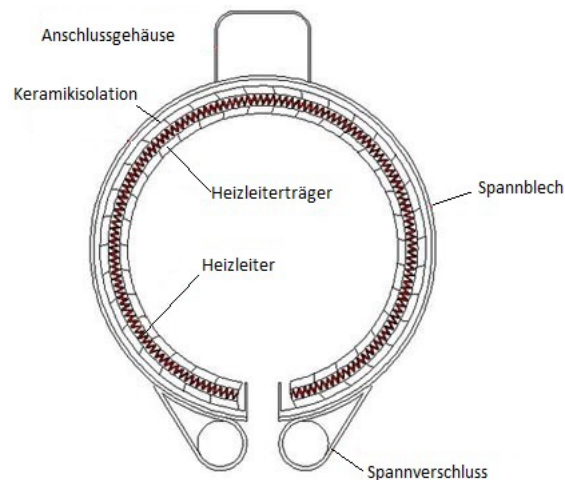


Abbildung 2 - 3: Aufbau eines keramikisolierten Zylinderheizbandes [Erge2009]

Die Schnecke und die Stahlkugeln dienen der Homogenisierung und der weiteren Erwärmung durch Reibung. Die Homogenisierung dient der gleichmäßigeren Schmelze- und Temperaturverteilung sowie dem Vermengen beim Einsatz von zwei Komponenten (z.B. Granulat und Farbe). Die Plastifiziereinheit ist meist verfahrbar gelagert, sodass diese für den Einspritzvorgang an das Werkzeug herangefahren werden kann. Über den Kolben oder die Schnecke, die nach vorne bewegt wird (Schnecke wirkt als Kolben), wird das aufgeschmolzene Granulat schließlich durch die Düse in das Werkzeug gespritzt [MGKE2009].

2.1.2. Schließeinheit

Für das Einspritzen in das Werkzeug und das anschließende Auswerfen muss das Werkzeug zu öffnen und zu schließen sein. Die Aufgabe wird durch die Schließeinheit realisiert. Diese Einheit wird aus einer festen und einer beweglichen Aufspannplatte gebildet. An den Aufspannplatten sind die Werkzeughälften befestigt. Die Hauptfunktionen der Schließeinheit sind das Ausführen von schnellen und exakten Bewegungen, das Öffnen und Schließen des Werkzeugs sowie das Anpressen der Werkzeughälften [MGKE2009].

Die Kinematik der Schließeinheit kann unter anderem mechanisch oder hydraulisch realisiert werden. Bei mechanischen Systemen wird die Bewegung der Aufspannplatte mit einem Kniehebel umgesetzt. Durch die Länge der Hebel kann Einfluss auf die am Werkzeug wirkende Kraft und auf die Geschwindigkeit der Bewegung genommen werden. Der Kniehebel wird entweder elektrisch oder hydraulisch angetrieben.

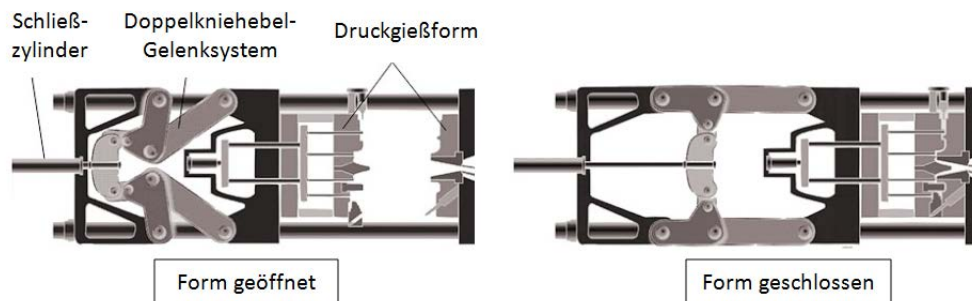


Abbildung 2 - 4: Kniehebelschließeinheit einer Spritzgießanlage [Foun2015]

Beim hydraulischen System erfolgt das Lösen und Anpressen der Aufspannplatten über einen Kolben. Die Presskraft wird hier über die Werkzeugfläche sowie den Öldruck geregelt. Nicht selten wird aus Effizienzgründen eine Kombination von Verfahrzylinder und Schließzylinder gewählt [MGKE2009].

2.1.3. Werkzeug

Grundsätzlich erfüllt das Werkzeug die folgenden Funktionen: Aufnehmen der Schmelze, Ausformen, Abkühlen und Entformen des Formteils. Um diese Funktionen erfüllen zu können, muss das Werkzeug bestimmte Eigenschaften aufweisen.

Zunächst muss das Werkzeug über ein für das jeweilige Formteil geeignetes Anguss und Verteilersystem verfügen. Dafür muss die Kavität (das Formnest) so gestaltet sein, dass die Schmelze alle Bereiche im selben Zustand erreicht. Die Gestaltung hängt dabei stark von der Anzahl der bei einem Guss beschickten Formnester sowie der Geometrie des Formteils ab [MGKE2009].

Zudem muss dem Werkzeug meist Wärme zu- oder abgeführt werden (je nach verarbeitetem Material). Für die Kühlung werden Kanäle im Werkzeug vorgesehen, welche mit Wasser durchströmt werden. Kühlung bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Temperatur im Bauteil zwar unterhalb der Schmelztemperatur liegen muss, jedoch damit meist noch weit über der Raumtemperatur liegt. Im Falle der Beheizung eines Werkzeugs werden meist elektrische Heizvorrichtungen vorgesehen [JoMi2004] [MGKE2009].

2.1.4. Antrieb

Eine Spritzgussmaschine kann über verschiedene Arten angetrieben werden. Gängige Antriebsarten sind ein elektrohydraulischer Antrieb, ein elektromechanischer Antrieb sowie Hybridantriebe. Der Hybridantrieb stellt eine Kombination aus hydraulischem und elektromechanischem Antrieb dar. Jeder Antrieb hat Vor- und Nachteile. Aufgrund der geringen Anschaffungskosten ist der elektrohydraulische Antrieb die am häufigsten eingesetzte Antriebsart [JoMi2004]. Die Antriebsart ist maßgebend für den Energieverbrauch der Anlage. Zur Bewertung des Energieverbrauchs sowie betriebswirtschaftlichen Einordnung, werden folgend die drei Antriebsarten kurz vorgestellt.

Elektrohydraulischer Antrieb

Hauptelemente des elektrohydraulischen Antriebs sind der Elektromotor und die Hydropumpe. Mit ihnen wird elektrische in mechanische und schließlich mechanische in hydraulische Leistung umgewandelt. Über das Öl im Hydrauliksystem und zwischengeschaltete Ventile wird die Leistung an die Verbraucher weitergegeben und in Kräfte und Bewegungen umgesetzt. Aufgrund der mehrfachen Energieumwandlung ist die Antriebsart mit vergleichsweise hohen Verlusten behaftet. Eine große Rolle spielt dabei das Öl, welches sich während des Prozesses erwärmt und daher mit zusätzlicher Energie gekühlt werden muss.

Der elektrohydraulische Antrieb kann mittels verschiedener Pumpensysteme realisiert werden: Konstantpumpenantrieb, Regelpumpenantrieb oder Druckspeicherantrieb. Je Pumpenantriebsystem ergeben sich durch unterschiedliche Pumpen- und Regelungskombinationen wiederum mehrere Varianten [JoMi2004].

Elektromechanischer Antrieb

Bei diesem Antriebskonzept wird über einen Elektromotor zunächst elektrische Energie in mechanische Energie umgewandelt. Diese mechanische Energie wird den Verbrauchern über Getriebe zugeführt. Als Antrieb für die Spindel oder die Hebelgetriebe werden frequenzumrichter-gesteuerte Drehstrommotoren verwendet. Die Anforderungen an die Sensorik sind aufgrund des entfallenden Hydraulikdrucks anspruchsvoller.

Bei dem elektromechanischen Antrieb erfolgt folglich keine weitere Umwandlung wie bei dem elektrohydraulischen Antrieb. Dies macht diese Antriebsart in energetischen Gesichtspunkten sehr attraktiv. Hinzu kommen weitere positive Aspekte, wie der ölfreie Betrieb, vergleichsweise geringe Betriebskosten, eine präzise Arbeitsweise, niedriger Wartungsaufwand und geringe Instandhaltungskosten. Diesem Vorteil stehen jedoch die technischen Grenzen einzelner Komponenten sowie die höheren Beschaffungskosten entgegen, die zu einem preislichen Nachteil von ca. 30 bis 50 % führen. Der technische Stand der Servomotoren limitiert zudem das realisierbare Drehmoment. Außerdem können durch den Direktantrieb geringere Geschwindigkeiten erreicht werden als bei den Alternativantrieben. Diese Nachteile bewirken, dass der Anteil elektromechanischer Antriebe in der Industrie noch sehr gering ist [JoMi2004] [MGKE2009].

Hybridantrieb

Bei Hybridantrieben werden Elemente aus dem elektrohydraulischen und dem elektromechanischen Antrieb kombiniert. Im Vergleich zum elektrohydraulischen Antrieb ergeben sich dadurch Vorteile im Betrieb wie ein verbesserter Wirkungsgrad, eine bessere Reproduzierbarkeit und eine geringere Geräuschbelastigung. In der Anschaffung ist der Hybridantrieb teurer als der elektro-hydraulische Antrieb. Im Vergleich zum elektro-mechanischen Antrieb sind die Anschaffungskosten jedoch geringer, wodurch der Hybridantrieb eine gute Alternative zu den konventionellen Antrieben darstellt.

Zusammenfassend und ergänzend sind in Tabelle 2 - 1 die drei Antriebsarten hinsichtlich der wichtigsten Merkmale bewertet:

Tabelle 2 - 1: Antriebsarten von Spritzgussmaschinen mit ihren Vor- und Nachteilen [JoMi2004]

Merkmal	Antriebsart		
	elektro-hydraulisch	hybrid	elektro-mechanisch
Schließen/Öffnen	+	+	-
Spritzaggregat vor/zurück	+	+	-
Einspritzen	+	+	-
Dosieren	-	+	+
Soll/Ist-Abweichung der Position	o	o	+
Reproduzierfähigkeit	o	+	+
Anschaffungskosten	+	o	-
Wirkungsgrad	-	o	+
Hydraulikölmanagement	-	-	+
Verschleiß bewegter Stellglieder und bewegter Teile	-	-	+
Funktion Kerne ziehen	o	o	+
Funktion Auswerfen	o	o	+
Arbeitsplatzauberkeit/-Hygiene	-	-	+
Geräuschbelastigung	-	o	+
Ersatzteilbedarf/-Aufwand	-	- (o)	+
Serviceaufwand	-	-	+
Verfügbarkeit	-	- (o)	+
Anfahrvorbereitung/thermisches Gleichgewicht	- (o)	- (o)	+ (o)

2.1.5. Steuerung

Spritzgussmaschinen verfügen über in die Anlage integrierte Schaltschränke. Der Schaltschrank bildet die Zentrale für alle Mess-, Steuer- und Regelaktivitäten während des Spritzgusszyklus [MGKE2009]. Im Verlauf eines Spritzgusszyklus werden darüber verschiedene Prozessparameter gemessen, gesteuert oder geregelt. Dies dient zum einen der Prozessabsicherung, aber auch der Qualitätssicherung. An der Spritzgussmaschine bezieht sich das Messen, Steuern und Regeln überwiegend auf die Temperatur, Drücke und Wege [Bich2012]. Wesentliche Prozessparameter werden in Kapitel 2.2 erläutert.

2.2. Spritzgießprozess

Beim Spritzgießprozess werden durch das Zusammenwirken elektrischer, mechanischer, hydraulischer und thermischer Einflussgrößen Formteile aus Kunststoff hergestellt. Es können verschiedene Kunststoffe im Spritzgießverfahren eingesetzt werden. Die drei großen Gruppen der Kunststoffe sind die Thermoplasten, die Duroplaste und die Elastomere. Im Unterschied zu den Duroplasten und Elastomeren können Thermoplasten mehrfach wieder eingeschmolzen werden. Aufgrund ihrer vielfältigen Verwendbarkeit machen Sie mengenmäßig den größten Anteil in der Kunststofffertigung aus [MGKE2009; S.8]. Die in dieser Arbeit vorgestellten Prozessparameter und Analysen basieren daher auf der Verarbeitung von Thermoplasten. Der Spritzgießprozess läuft in einem bestimmten Zyklus ab, welcher von dem verarbeiteten Material sowie den verarbeiteten Mengen abhängig ist. Im folgenden Abschnitt wird der Spritzgießzyklus erläutert. Zudem wird auf die auf den Prozess einflussnehmenden Parameter eingegangen.

2.2.1. Spritzgießzyklus

Der Grundlegende Ablauf beim Spritzgießen von thermoplastischen Kunststoffen ist wie folgt:

Über einen Trichter an der Maschine wird das Material als Granulat in die Maschine eingefüllt. In beheizten Zylindern mit einer rotierenden Schnecke oder in Zylindern mit Kolben wird das Material durch verschiedene Heizzonen befördert. Dabei wird das Material aufgeschmolzen und homogenisiert. Durch eine Düse wird das vollständig aufgeschmolzene Material unter Druck in den Hohlraum des Werkzeugs eingespritzt. Unter Nachdruck kühlt die Formmasse im Werkzeug ab und erhält somit ihre Formstabilität. Nach der Kühl- und Härtezeit wird das Formteil ausgeworfen.

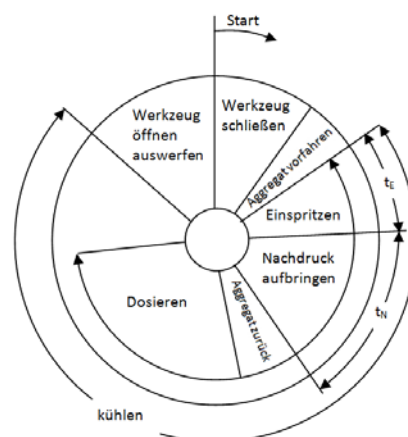


Abbildung 2 - 5: der Spritzgusszyklus bei der Verarbeitung von Thermoplasten (nach [MGKE2009])

Der Spritzgussprozess besteht demnach aus einzelnen, auf einander folgenden Phasen, die sich überschneiden. Der einmalige Ablauf der Phasen nach einander wird als Zyklus bezeichnet. Während jedes Zyklus werden ein oder mehrere Formteile gefertigt. Beim Spritzgießen laufen viele Zyklen nacheinander automatisch ab. Entlang des Ablaufes von Abbildung 2-5 liegen während jeder der Phasen eines Zyklus immer die gleichen Einstellungen an der Maschine vor.

Start

Die Schließeinheit ist geöffnet und es befindet sich keine Formteil im Werkzeug. Die Auswerfer sind zurückgezogen und das Werkzeug ist auf die materialspezifische Temperatur temperiert. Der Zylinder oder die Schnecke sind auf vorgeschriebene Temperaturen erwärmt und befinden sich in der Ausgangsposition. In der ersten Heizzone befindet sich bereits aufgeschmolzenes Material. Die Düse ist verschlossen [MGKE2009].

Einspritzen

Das Werkzeug wird geschlossen und mit einer definierten Schließkraft geschlossen gehalten. Dann wird zunächst die gesamte Plastifiziereinheit nach vorne gefahren, sodass deren Austritt am Eingangskanal des Werkzeugs anliegt. Je nach Bauart wird dann die Schnecke im Kolben oder der Zylinder im Kolben nach vorne gefahren und die Masse gelangt in das Werkzeug. Rückströmsperren verhindern, dass das Material zurück in den Zylinder gelangt [MGKE2009].

Nachdruck

Die Plastifiziereinheit liegt weiterhin an der Düse an. Die Düse ist weiterhin geöffnet. Das Werkzeug ist noch immer geschlossen. Im Werkzeug setzt direkt das Abkühlen der Masse ein. Infolge der materialspezifischen Wärmeausdehnung und der Ausbildung intermolekularer Wechselwirkungen zwischen den Polymerketten, hat ein Abkühlen der Masse immer eine Schwindung des Volumens zur Folge. Um die Schwindung zu vermeiden, wird die Düse am Werkzeug gehalten und Material nachgedrückt. Dies gleicht die Schwindung aus. Der Nachdruck kann so lange gehalten werden, wie der Anguss, also der mit Masse gefüllte Kanal zum Bauteil, noch flüssig ist. Um dies möglichst lange zu gewährleisten, ist der Anguss in der Regel an der dicksten Stelle des Formteils vorgesehen. Der Nachdruck gewährleistet, dass das Formteil nach dem Abkühlen die vorgesehenen Abmaße hat. [MGKE2009], [JoMi2004].

Kühlen

Das Werkzeug ist weiterhin verschlossen. Mit dem Abschließen der Nachdruckphase beginnt die Kühlphase. Genau genommen beginnen die beide Phasen parallel, da die Masse direkt nach dem Einspritzen beginnt abzukühlen. In der reinen Kühlphase findet jedoch kein Nachdruck mehr statt. Wie bereits in Kapitel 2.1 erwähnt, heißt Kühlung diesem Fall meist, dass dem Werkzeug trotzdem Wärme zugeführt wird. Diese ist nur geringer als die der plastifizierten Formmasse. Man spricht auch von kontrollierter Kühlung. Thermoplasten besitzen

eine geringe Wärmeleitfähigkeit, sodass es relativ lange dauern kann, bis ein Formteil vollständig auf die Werkzeugtemperatur heruntergekühlt ist. Es reicht jedoch meist ein gewisser Erstarrungsgrad der Randbereiche aus, damit das Formteil stabil genug ist, um es auswerfen zu können. Da während der Kühlzeit keine neuen Teile produziert werden können, kann man somit die Durchsatzrate maximieren. Die Kühlzeit wird genutzt, um neu zu dosieren und den nächsten Schuss vorzubereiten [MGKE2009], [JoMi2004].

Dosieren / Plastifizieren

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, wird beim Dosieren das Material durch Wärmezufuhr an den Zylinder sowie durch Reibung plastifiziert. Über die Schnecke oder Kolben wird das Material dosiert. Aus wirtschaftlichen Gründen ist darauf zu achten, dass die Dosierzeit die Kühlzeit nicht überdauert. Damit würde sie sonst *“zyklusbestimmend“* werden [MGKE2009].

Der Prozess der Plastifizierung wird im Zuge dieser Arbeit als Simulationsbeispiel genauer betrachtet.

Entformen / Auswerfen

Nach Ablauf der Kühlzeit wird das Werkzeug geöffnet. Dies geschieht über das Verfahren einer der Aufspannplatten in die Öffnungsstellung. Das Auswerfen wird meist über Auswerfstifte realisiert, die im Werkzeug integriert sind und hydraulisch betrieben werden. Je nach Material und Komplexität des Bauteils kann das Auswerfen jedoch über Druckluft oder per Hand realisiert werden. Nach dem Zurückfahren der Auswerfer befindet sich die Maschine wieder in der Ausgangsposition [MGKE2009].

2.2.2. Prozessparameter

Anhand der in den Kapiteln 2.1 bis 2.2 beschriebenen Komponenten und Abläufe wird ersichtlich, dass für die Simulation eine Vielzahl an Prozessparametern berücksichtigt werden müssen, um den Spritzgießprozess zu realisieren und zu kontrollieren. Die Parameter sind überwiegend Größen aus den Kategorien Druck, Temperatur, Zeit und Geschwindigkeit. Die Drücke werden meist über ein hydraulisches System realisiert. Es werden hier nicht alle Prozessparameter im Detail vorgestellt. Um jedoch einen Überblick über die Vielzahl und die Art der Parameter zu bekommen, wird folgend ein Überblick der am Prozess beteiligten Größen in Abhängigkeit der Kategorie gegeben:

Tabelle 2 - 2: wesentliche Prozessparameter beim Spritzgießen [Bich2012], [JoMi2004], [MGKE2009]

Drücke und Kräfte	Schließkraft am Werkzeug
	Einspritzdruck
	Werkzeuginnendruck
	Nachdruck
	Staudruck (bei Schneckenplastifizierung)
	Kompressionsdruck (Druck bevor Nachdruck beginnt)
Temperaturen	Zylindertemperatur
	Werkzeugwandtemperatur
	Massetemperatur
	Heißkanaltemperatur
	Öltemperatur
	Vortrocknungstemperatur
Zeit	Aufheizzeit
	Zykluszeit
	Dosierzeit
	Verweilzeit (Durchlaufzeit von Einfüllen bis Austritt)
	Kühlzeit
Geschwindigkeit	Drehzahl (der Schnecke bei Schneckenplastifizierung)
	Einspritzgeschwindigkeit
Sonstiges	Geometrie der Komponenten

Hinzu kommen Randbedingungen wie die elektrische Anbindung, Platzangebot und Geometrie der Komponenten.

Wie die Parameter einzustellen sind, wird durch das Formteil und die Anforderungen an das Formteil bestimmt. Anforderungen, die die Auswahl der Prozessparameter bestimmen können, sind zum Beispiel: Maßhaltigkeit, geringer Verzug, gute Oberfläche, Homogenität und Farbverteilung. Durch den Marktwettbewerb spielen bei der Parameterwahl auch die Qualitätssicherung und die Ausschussminimierung eine große Rolle. Um diesen nachzukommen, sind modernen Spritzgussmaschinen häufig vielfältige Kontroll- und Analysensysteme angebunden, die dabei helfen, den Prüfaufwand zu reduzieren, die Produktion zu kontrollieren und Langzeitauswertungen durchzuführen. Weitere wirtschaftliche Aspekte, die an Bedeutung gewinnen, sind kurze Zykluszeiten sowie Energieeinsparung im Betrieb [Bich2012]. Das Deutsche Institut für Normung e.V. gibt die folgende Richtlinie zu den Stellenwerten der einzelnen Prozessparameter zu den Anforderungen, wobei eins für einen hohen und fünf für einen geringen Stellenwert steht:

Tabelle 2 - 3: Stellenwerte einiger Prozessparameter zu den Anforderungen [Bich2012]

Prozessparameter Anforderungen	Einspritzgeschwindigkeit	Werkzeugtemperatur	Masstemperatur	Nachdruckhöhe	Nachdruckzeit	Schließkraft	Schnecken-drehzahl	Staudruck
Maßhaltigkeit		2	4	1	3	5		
geringer Verzug	4	1	5	3	2			
gute Oberfläche	2	1	4	3	5			
Homogenität			3				1	2
Farbverteilung			3				1	2

Analog zur Bedeutung der Prozessparameter kommen der Steuerung und Regelung der Spritzgießanlagen eine große Bedeutung zu. Über sie werden die Parameter eingestellt und koordiniert. Herausforderungen beim Optimieren des Spritzgießprozesses sind somit die Evaluierung und Interpretation der Prozessparameter sowie deren optimale Umsetzung an der Maschine. Die Literatur über das Spritzgießen geht auf die Steuerung und Regelung meist nur oberflächlich ein. Dies ist einerseits mit der Größe und Komplexität dieses Teilgebiets zu begründen und andererseits auf die individuell zu betrachtenden Abhängigkeiten von Maschine und Formteil zurückzuführen.

2.2.3. Energiebedarf und Energiebilanz

Nach aktuellen Statistiken des Umweltbundesamtes sind vom Gesamtenergiebedarf in Deutschland 28 Prozent auf den Industriesektor zurückzuführen [DasU2015]. Mit einem Anteil von 2,5 Prozent vom Gesamt-Primärenergiebedarf des verarbeitenden Gewerbes liegt die kunststoffverarbeitende Industrie auf Platz 9 der 19 Industriesektoren, die das verarbeitende Gewerbe bestimmen [DasU2012]. Es ist daher davon auszugehen, dass das Reduzieren des Energiebedarfs in der Kunststoffverarbeitung sich auch am Gesamtenergiebedarf der Industrie bemerkbar machen würde. In Anbetracht der stetig steigenden Energiepreise bietet eine verbesserte Energieeffizienz in der Kunststoffverarbeitung ein Potential zur Kostenreduzierung für die jeweiligen Firmen.

Das Spritzgießen ist ein weitverbreitetes Produktionsverfahren zur Verarbeitung von Kunststoffen. Um aus dem Eingangsmaterial ein Formteil zu erzeugen, sind verschiedene Teilprozesse und Parallelsysteme notwendig, die immer auch in einer Wechselwirkung mit der Umgebung stehen. Basierend auf den Eingangs- und Prozessparametern kann eine Systemskizze der Energiebilanz für das Gesamtsystem Spritzgießmaschine erstellt werden [Hess2015].

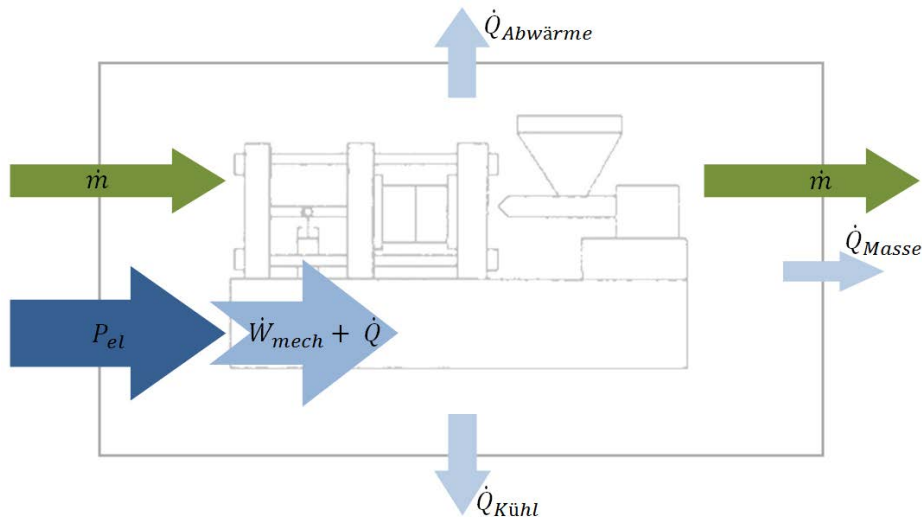


Abbildung 2 - 6: Systemskizze zur Energiebilanz einer Spritzgießmaschine nach [Hess2015]

Die Abbildung 2 - 6 zeigt die Stoff- und Energiebilanz einer Spritzgießmaschine. Aus der Abbildung geht hervor, dass dem System elektrische Energie zugeführt wird. Zudem tritt ein Massenstrom in das System ein. Die elektrische Energie wird während des Prozesses in mechanische Energie zur Formänderung und in Wärmeenergie umgewandelt. Über die Systemgrenzen des Gesamtsystems wird während verschiedenen Prozessschritten Wärme abgegeben. Neben der Wärmeabgabe durch die Kühlung am Werkzeug und die Wärmeabgabe der Maschine an die Umgebung wird auch über den austretenden Massenstrom ein Teil der Wärme aus dem System abgeführt. So wird, wie auch aus dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik hervorgeht, die zugeführte Energie durch verschiedene Prozesse in andere Energieformen umgewandelt und auch wieder abgeführt. Wie hoch der Energiebedarf ist, hängt von den Prozessparametern sowie auch von der Antriebsart der Spritzgussmaschine ab.

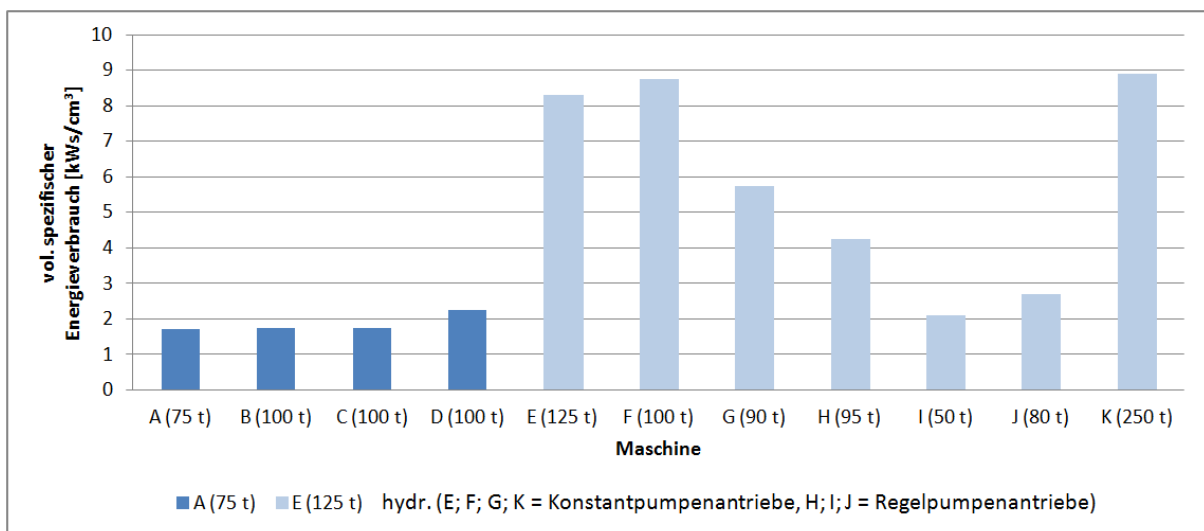


Abbildung 2 - 7: Energieverbrauch von Spritzgießmaschinen in Abhängigkeit der Antriebsart und der Schließkraft [JoMi2004]

Die Abbildung 2 - 7 zeigt den Energieverbrauch von Spritzgießmaschinen in Abhängigkeit der Schließkraft und der Antriebsart. Der Energieverbrauch ist dabei auf das Formteilvermögen

bezogen und Kilowattsekunden pro Kubikzentimeter dargestellt. Bei den Maschinen werden verschiedene Typen unter Angabe der Schließkraft aufgeführt. Aus dem Balkendiagramm geht hervor, dass der Energiebedarf hydraulisch angetriebener Maschinen grundsätzlich höher ist als der Energiebedarf elektrisch angetriebener Maschinen. Dies liegt daran, dass insbesondere die weit verbreiteten hydraulischen Konstantpumpenantriebe die Leistung nicht bedarfsgerecht zur Verfügung stellen können. Hier wird die Leistungsregelung mittels Dissipation durch Ventile realisiert, womit hohe Verluste verbunden sind [JoMi2004]. Über Regelpumpen mit verstellbaren Fördervolumen kann dem hohen Verbrauch entgegengewirkt werden (Maschinen H; I; J). Auch der Einsatz von kombinierten Konstantpumpenantrieben kann den Energieverbrauch von hydraulisch betriebenen Spritzgießmaschinen senken. Der niedrigere Energiebedarf der elektrisch angetriebenen Spritzgießmaschinen resultiert vor allem aus dem Einsatz von Servomotoren, durch die eine einfache Drehzahlregelung möglich ist. Zudem erfolgt bei elektrisch angetriebenen Maschinen die Bewegungsumsetzung überwiegend durch mechanische Getriebe wie Kurbelgetriebe, Kugelumlaufspindeln und Zahnstangengetriebe welche hohe Wirkungsgrade aufweisen [JoMi2004].

Wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, werden beim Spritzgießen verschieden Phasen eines Zyklus durchlaufen. Aus den verschiedenen Phasen des Spritzgießzyklus resultiert eine diskontinuierliche Leistungsaufnahme. Entsprechend muss die Leistung bedarfsgerecht zur Verfügung gestellt werden [JoMi2004]. Dies lässt sich auch anhand der folgenden Abbildung nachvollziehen.

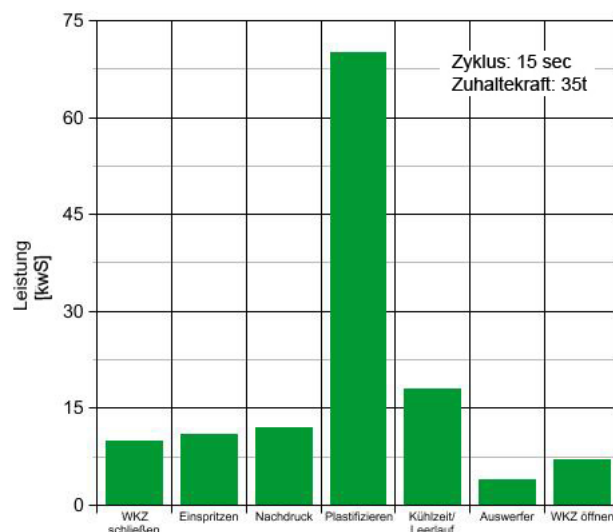


Abbildung 2 - 8: Leistungsbedarf im Zyklus einer hydraulischen Spritzgießmaschine [Tame2009]

Die Abbildung 2-8 zeigt den Leistungsbedarf der einzelnen Zyklusphasen einer hydraulischen Spritzgießmaschine. Die Leistung ist in Kilowattsekunden dargestellt. Aus der Verteilung der Leistung über die Zyklen geht hervor, dass die Plastifizierphase mit Abstand den höchsten Leistungsbedarf aufweist. Dies ist auf die hohe Wärmezufuhr zurückzuführen. Um den Energiebedarf des Plastifiziervorgangs besser nachzuvollziehen und dessen Abhängigkeit von den Prozessparametern zu untersuchen, befasst sich diese Arbeit mit der Modellierung und Simulation dieses Teilprozesses. Dazu wird folgend zunächst auf den Begriff der Simulation eingegangen.

3. Grundlagen der Simulation zur Abbildung und Analyse von Produktionssystemen

Der Hauptteil dieser Arbeit befasst sich mit der Simulation einer Produktionsstätte der Spritzgusstechnik. Einleitend wird in diesem Kapitel zunächst auf den Begriff der Simulation und die allgemeine Anwendung in der Produktion eingegangen. Anschließend wird das Simulationsprogramm Dymola® vorgestellt, welches für die Simulationen der Spritzgussproduktionsstätte gewählt wurde.

Das Wort Simulation leitet sich von dem lateinischen Wort *Simulare* ab, was in etwa mit *nachbilden*, *vorgeben* oder *ähnlich machen* zu übersetzen ist [ABMW2011]. Die VDI Richtlinie 3633 befasst sich mit der Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Im Beiblatt 1 der Richtlinie ist der Begriff der Simulation wie folgt definiert:

„Simulation ist das Nachbilden eines dynamischen Prozesses in einem System mit Hilfe eines experimentierfähigen Modells, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. Im weiteren Sinne wird unter Simulation das Vorbereiten, Durchführen und Auswerten gezielter Experimente mit einem Simulationsmodell verstanden.“ [Vdig2014]

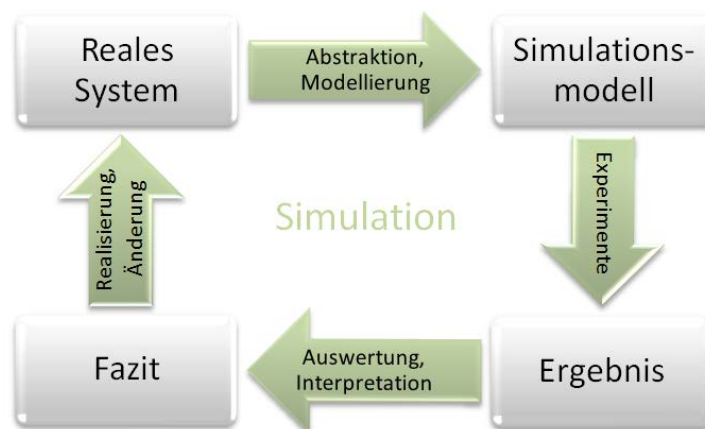


Abbildung 3 - 1: Simulationskreislauf [Kühn2006]

Für eine Simulation wird ein geplantes oder bereits reales System durch ein Modell abgebildet. Das Modell kann analog sein (mechanisch, elektrisch hydraulisch) oder digital (grafisch-mathematisch). Durch die stetigen Entwicklungen in der Computer- und Softwaretechnik erlangen die digitalen Modelle immer mehr an Gewicht.

Mit dem erstellten Modell werden Experimente in Abhängigkeit der Eingangsparameter durchgeführt. Durch die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse kann man zu Erkenntnissen gelangen, die auf das reale System anwendbar sind.

Vor der Modellerstellung ist wichtig, dass die Grenzen des zu modellierenden Systems bekannt sind. Das heißt, die Systemgrenzen müssen klar definiert sein. Sind diese bekannt, wird identifiziert, welche für die Fragestellung relevanten Elemente sich innerhalb der Sys-

temgrenzen befinden und welche Schnittstellen zur Umgebung bestehen. Die Elemente sind mit Eigenschaften wie Geometrie oder Kennwerten belegt. Bei den Schnittstellen kann es sich um Materialfluss (Zeit- und mengenorientierte Daten), Energiefluss und Informationsfluss (Ablauf- und Steuerungsdaten) in das bzw. aus dem System handeln. Sie beeinflussen das Verhalten des Systems. Für die Modellierung ist es notwendig, die Daten zur Beschreibung der Elemente und der Ein- und Ausgangsparameter zu beschaffen. Da ein Modell immer auch eine Abstraktion eines Systems darstellt, wird auch mit Annahmen und Vereinfachungen gearbeitet. Liegen alle Daten vor, kann das Modell erstellt und implementiert werden. Über erste Modellversuche wird das Modell verifiziert und auf Plausibilität geprüft. Schließlich können entlang eines Versuchsplans verschiedene Simulationsläufe und Simulationsvarianten durchgeführt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass ein für die Fragestellung sinnvoller Simulationszeitraum gewählt wird. Die Auswertung der Simulationsergebnisse kann entweder zur Optimierung des Modells oder final zur praktischen Umsetzung genutzt werden [Kühn2006].

Das Einsetzen von Modellen und Simulationen zur Anpassung oder Erstellung von Realsystemen bietet verschiedene Vorteile, die mit einem realen System nur mit erhöhtem Aufwand umgesetzt werden können [Kühn2006]:

- Es können nicht existierende Systeme abgebildet werden.
- Es erfolgt kein Eingriff in den laufenden Betrieb.
- Es können unterschiedlichen Varianten und Szenarien ohne hohen Zusatzaufwand untersucht werden.
- Das Systemverhalten über einen langen Zeitraum kann durch kurze Simulationszeiten schneller analysiert werden (Zeitraffer).
- Es können Zustände simuliert werden, die im realen System zu einem Fehler oder einem Schaden führen würden.

Daraus ergeben sich Vorteile wie Kosteneinsparungen (weniger Ausschuss, geringerer Materialeinsatz, geringerer Energiebedarf, kürzere Prozesszeiten, etc.), höhere Sicherheit, eine verbesserte Prozessführung und ein verbessertes Systemverständnis.

Im Zuge von simulationsgestützter Energieeffizienzbetrachtung kann der Energieein- und Austritt der gesamten Produktionsstätte (globale Betrachtung) sowie von Teilprozessen (spezifische Betrachtung) analysiert und optimiert werden. Diese Arbeit befasst sich mit der Abbildung und Analyse des Plastifizierprozesses als Teilprozess der Spritzguss-Produktionsstätte. Der Plastifizierprozess wird dazu mit einem grafisch-mathematischen Modell abgebildet. Das grafisch-mathematische Modell ermöglicht eine anschauliche Darstellung der Prozessgrößen und deren Zusammenhänge wie auch eine mathematische Auswertung des Systems.

3.1. Simulationssoftware Dymola®

Auf dem Markt gibt es verschieden Programme zur Abbildung und Simulation von Systemen und Prozessen. Geläufige und verbreitete Programme sind zum Beispiel Dymola, SimulationX®, Wolfram SystemModeler® wie auch Matlab/Simulink® [Mode2015]. Die Modellbildung und Simulationen in dieser Arbeit werden mit der Software Dymola® abgebildet. Im folgenden Abschnitt wird das Grundprinzip dieser Software vorgestellt.

3.1.1. Grundlagen der Software

Die Software Dymola® (**D**ynamic **M**odeling **L**aboratory) ist ein Programm, mit dem technische Systeme abgebildet und simuliert werden können. Mögliche Anwendungen sind mechanische, elektrische, thermische, hydraulische und pneumatische Prozesse sowie Kombinationen dieser. Dymola® basiert auf der Modellierungssprache Modelica® und wird durch grafische Symbole veranschaulicht. Die grafischen Symbole stellen technische Komponenten dar. Für die Komponenten können Eigenschaften sowie mathematische und physikalische Zusammenhänge mittels Modelica®-Text definiert und zugewiesen werden. Die Steuerung und Regelung der Systeme kann dabei ebenfalls berücksichtigt werden.

Hinsichtlich der Ansicht im Programm und auch der Anwendung ist Dymola® in zwei Ebenen unterteilt. Die Modellierungsebene und die Simulationsebene. Über zwei Reiter unten rechts in der Programmansicht kann zwischen den Ebenen gewechselt werden. Zunächst wird in der Modellierungsebene das Modell erstellt auf dessen Basis in der Simulationsebene die Simulation erfolgt. Die Systemsprache ist Englisch.

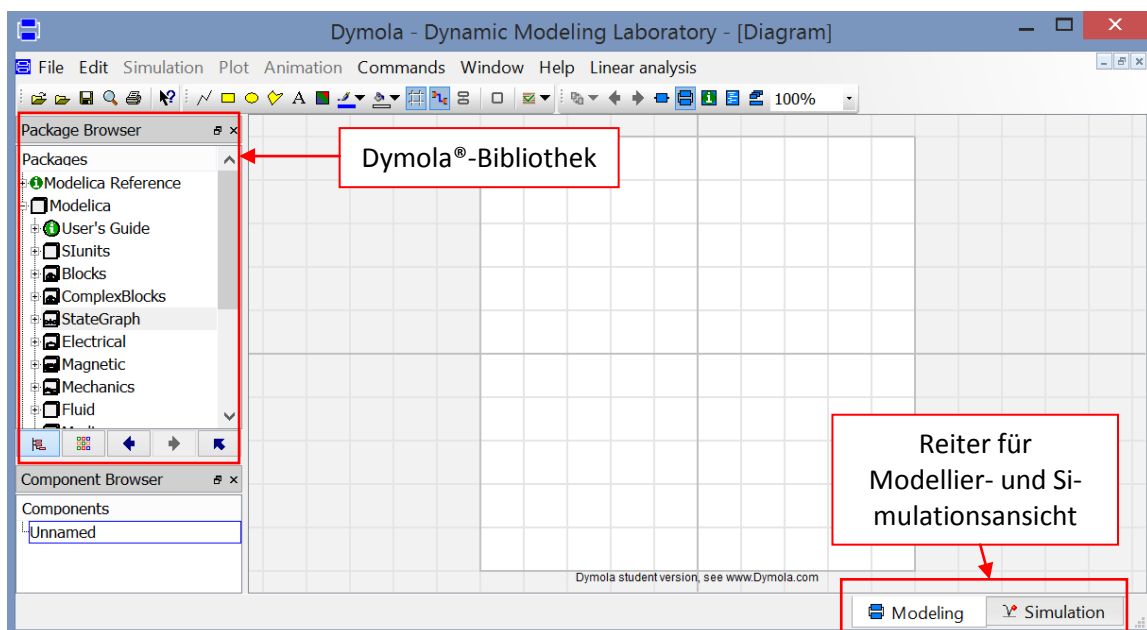

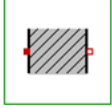


Abbildung 3 - 2: Benutzeroberfläche zur Modellerstellung im Simulationsprogramm Dymola®

Dymola® verfügt über eine Standardbibliothek, in welcher bereits viele Komponenten aus den verschiedenen technischen Bereichen vordefiniert sind. Die Bibliothek kann je nach Bedarf um weitere Komponenten erweitert werden. Folgend wird an einem Beispiel die Grundfunktion des Programms für die Modellbildung und die Simulation erklärt.

[Modelica.Thermal.HeatTransfer.Components.ThermalConductor](#)

Lumped thermal element transporting heat without storing it

Information

This is a model for transport of heat without storing it. It may be used for complicated geometries where the thermal conductance G (= inverse of thermal resistance) is determined by measurements and is assumed to be constant over the range of operations. If the component consists mainly of one type of material and a regular geometry, it may be calculated, e.g., with one of the following equations:

- Conductance for a **box** geometry under the assumption that heat flows along the box length:

$$G = k \cdot A / L$$

k : Thermal conductivity (material constant)
 A : Area of box
 L : Length of box

Parameters

Type	Name	Default	Description
ThermalConductance	G		Constant thermal conductance of material [W/K]

Connectors

Type	Name	Description
HeatPort_a	port_a	
HeatPort_b	port_b	

Modelica definition

```

model ThermalConductor
  "Lumped thermal element transporting heat without storing it"
  extends Interfaces.Element1D;
  parameter Modelica.SIunits.ThermalConductance G
    "Constant thermal conductance of material";

equation
  Q_flow = G*dT;
end ThermalConductor;

```

Abbildung 3 - 3: Beispiel für eine thermische Komponente in Dymola®

Die Abbildung 3 - 3 zeigt die Informationsansicht für eine exemplarische Komponente der Dymola®-Datenbank. Es handelt sich hier um die Wärmeleitung durch einen Körper (engl.: *Thermal Conductance*). Oben rechts ist das Symbol für diese Komponenten dargestellt. Die Info-Ansicht erklärt zunächst um was für eine Komponente es sich handelt und was diese physikalisch abbildet. Weiter gibt sie Aufschluss über die Parameter, die als Variable hinterlegt sind und durch den Benutzer zugewiesen werden müssen (*Parameters*). In diesem Fall handelt es sich um den Parameter G , welcher die konstante thermische Leitfähigkeit eines Körpers beschreibt. Wie in den Informationen erläutert, ist dieser in Abhängigkeit der Geometrie des Körpers zu bestimmen und für die Komponente zu hinterlegen. Außerdem zeigt die Ansicht, welche Anschlüsse (*Connectors*) an der Komponente vorgesehen sind. Hier handelt sich um zwei thermische Anschlüsse (*Heat Port*). An ihnen können bei der Modellierung weitere Komponente angebunden werden. Schließlich ist in der Info-Ansicht aufgezeigt, wie die Komponente mittels Modelica®-Text definiert ist (*Modelica® definition*). Die ausführliche Definition kann man sich über die Text-Ansicht für die Komponente anzeigen lassen. Die hinter-

legten Gleichungen bilden die mathematischen und physikalischen Zusammenhänge ab und ermöglichen die Simulation der Komponente in einem System.

Wie exemplarisch dargestellt, sind alle Komponenten der Dymola-Bibliothek beschrieben und definiert. Bestehende Komponenten können modifiziert und neue Komponenten definiert werden. Komponenten der gleichen technischen Kategorie können zu Modellen zusammengesetzt werden. Folgend ist die Komponente *Thermal Conductance* mit weiteren Komponenten aus dem thermischen Bereich zu einem Modell verbunden:

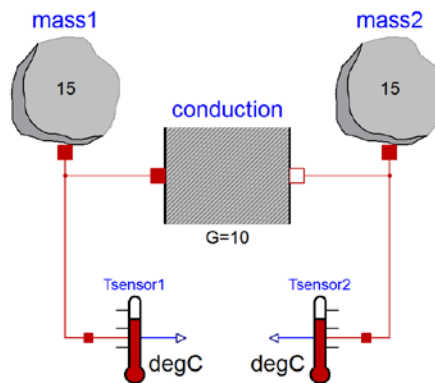


Abbildung 3 - 4: Beispiel für ein thermisches System in Dymola® – Ausgangssituation: $T_{\text{Masse1}} > T_{\text{Masse2}}$

Die Abbildung 3-4 zeigt ein Beispiel für ein thermisches System aus der Dymola®-Bibliothek. Je nach System und Sinnhaftigkeit kann ein Modell aus beliebig vielen Komponenten bestehen. Das abgebildete System besteht aus fünf Komponenten: zwei Massen, eine Wärmeleitung und zwei Temperatursensoren. Die Massen dienen als Wärmequellen, wobei der Masse 1 eine höhere Temperatur zugewiesen ist als der Masse 2. Die Wärmeleitung stellt die thermische Verbindung der beiden Massen her. Über die Temperatursensoren kann nach einer Simulation die Temperatur der beiden Massen abgelesen werden.

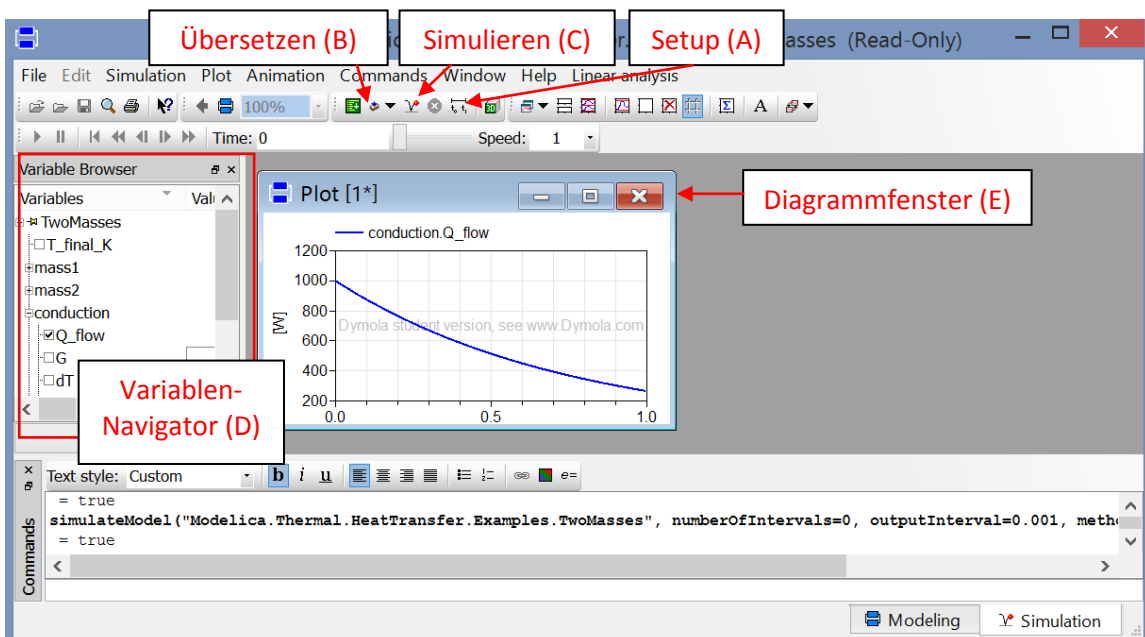


Abbildung 3 - 5: Benutzeroberfläche zur Simulation im Simulationsprogramm Dymola®

Für eine Simulation des Modells muss zunächst in die Simulationsebene gewechselt werden. Über das Simulations-Setup (A) werden die Randbedingungen der Simulation, wie das Simulationsintervall und die Simulationsmethode festgelegt. An dieser Stelle können noch weitere Einstellungen wie zum Beispiel zur Simulationsansicht und Warnmeldungen vorgenommen werden. Schließlich kann das Modell zunächst übersetzt (B) und dann simuliert werden (C). Ist das Modell durch fehlerhafte oder mathematisch - physikalisch unlogische Verbindungen und Eingaben nicht lösbar, wird bereits nach dem Übersetzen darauf hingewiesen. Über den Navigator an der linken Seite der Arbeitsansicht (D) kann man nun die einzelnen Parameter zu Anzeige bringen.

Das beschriebene Beispielmodell ist so konzipiert, dass durch eine Temperaturdifferenz zwischen den beiden Massen ein Wärmestrom über die Wärmeleitung von der Masse 1 zu der Masse 2 fließt. Im Zuge der Simulation wird das Verhalten der Variablen in Abhängigkeit der deklarierten Eigenschaften und der Zeit simuliert. Das Diagrammfenster (E) ermöglicht die Anzeige des relevanten Verhaltens, wie beispielsweise den Wärmestrom in Abhängigkeit der Zeit.

3.1.2. Aufbau der Bibliothek in Dymola®

Die Bibliothek in Dymola® führt Komponenten verschiedener mathematischer und physikalischer Rubriken, für die sowohl graphische Objekte als auch die Modelica®-Definition hinterlegt sind. Außerdem führt sie Hilfsmittel für das Erstellen und Deklarieren neuer Komponenten. Die folgenden Hauptrubriken sind in der Standardbibliothek von Dymola® gelistet:

Tabelle 3 - 1: Aufbau der Dymola®-Bibliothek

Dymola-Bibliothek im Überblick	
Rubrik	Erläuterung
Blocks	Kontroll-und Steuerungssignale (stetig, unstetig, logisch, mathematisch,...)
Complex Blocks	komplexe Kontroll-und Steuerungssignale (s.o.)
State Graph	Beschreibung von unstetigen und reaktiven Zuständen
Electrical	elektrische Komponenten / Maschinen (analog, digital, mehrphasig)
Magnetic	physikalische Zusammenhänge / Maschinen die auf Magnetismus beruhen
Mechanics	mechanische Komponenten (rotatorisch, translatorisch, Mehrkörpersyst.)
Fluid	Strömungsprozesse unter Einfluss des Mediums
Media	Medien mit deklarierten Eigenschaften
Thermal	thermische Komponenten für Wärmeübertragung u. einfache Stoffströme
Math	einfache mathematische Zusammenhänge (Funktion, Vektoren, Matrizen)
Complex Math	komplexe mathematische Zusammenhänge (s.o.)
Utilities	Hilfsmittel zum Schreiben von Modelica® Skripten
Constants	mathematische und natürliche Konstanten (e.g. π)
Icons	Symbole z.B. zum Erstellen neuer Komponenten
SI-Units	SI-Einheiten und Definition nach ISO 31-1992

Für jede der Rubriken sind die physikalischen oder mathematischen Themenbereiche in Unterrubriken angelegt. Neben den Komponenten, Signalen und Größen enthalten alle Rubriken Beispiele bzw. Beispielmodelle, die die Nutzung der Komponenten verdeutlichen. Für das Erstellen eines Modells kann man alle Komponenten der Standardbibliothek verwenden. Zudem kann man sich für eigene Zwecke neue Modelle erstellen und die Bibliothek entsprechend erweitern. Auf das Erweitern der Bibliothek wird in Kapitel 4.2.2 eingegangen.

4. Simulation einer Spritzguss-Produktionsstätte

Im Zuge des Abbildens des Spritzgießprozesses in Dymola® wurde zunächst der Ansatz verfolgt, die gesamte Spritzgießanlage als System abzubilden. Dies stellte sich bald als sehr komplex und fehleranfällig heraus. Vor allem die Übersichtlichkeit des Modells war durch eine Gesamtbetrachtung nicht mehr gegeben. Auch müssten für viele Eingangsparameter Annahmewerte getroffen werden, da zum derzeitigen Stand des Projekts nur wenige Realdaten vorliegen. Daher wird die Modellbildung auf einen Teilbereich des Spritzgießprozesses beschränkt. Der Fokus wird auf das Abbilden und Simulieren des Plastifizierprozesses gelegt. Der Teilbereich des Plastifizierens wurde vor allem deshalb gewählt, da dieser Teilprozess die Möglichkeit einer Vertiefung in späteren Arbeiten zu Energieeinsparmöglichkeiten bietet. Als Leitfrage für die Modellbildung und Simulationen wurde daher die Frage nach dem Energieaufwand für den Plastifiziervorgang beim Spritzgießprozess in den Vordergrund gestellt. Zunächst wird dazu der Prozess des Plastifizierens erläutert sowie thermodynamisch eingeordnet. Anschließend wird das Modell erläutert, welches mittels der Simulationssoftware Dymola® erstellt wurde. Zur Erläuterung und Prüfung der durchgeführten Simulationen werden die Eingangsparameter beschrieben und die Ergebnisse einer Beispielsimulation bezüglich der Sinnhaftigkeit analysiert. Schließlich werden die Ergebnisse verschiedener Varianten hinsichtlich des Einflusses des Spritzgießmaterials, des Massenstroms sowie der Zykluszeit ausgewertet. Als Beispiele für den Materialvergleich werden die Spritzgießwerkstoffe PEEK² und PP³ gewählt. Dieser Vergleich wird mit einem diskontinuierlichen Massenstrom von 0,0141 kg/s durchgeführt. Bei dem Massenstromvergleich wird das Material PEEK bei demselben diskontinuierlichen Massenstrom im Vergleich zum doppelten diskontinuierlichen Massenstrom (0,0282 kg/s) betrachtet. Die Zykluszeit bei der ersten und der zweiten Variante beträgt 20 Sekunden. Von den 20 Sekunden ist der Massenstrom eine Sekunde aktiv. Schließlich erfolgt ein Vergleich des Einflusses des Massenstroms hinsichtlich der Massenstromdauer in Relation zur Zykluszeit. Dazu wird die Zykluszeit von 20 auf 40 Sekunden verdoppelt, während die Massenstromdauer von einer Sekunde beibehalten wird.

² PEEK - Abkürzung für Polyether-Etherketone. Kunststoff aus der Gruppe der Thermoplasten

³ PP – Abkürzung für Polypropylen. Kunststoff aus der Gruppe der Thermoplasten

Die gewählten Größen sind an die Produktionsdaten der IES GmbH⁴ angelehnt. Die geometrischen Eingangsdaten der Simulationen sind an die Kolbenspritzgießmaschine des Typs Babypplast® angelehnt. Einleitend zur Variantenbetrachtung sind die Eingangswerte noch einmal tabellarisch zusammengefasst.

4.1. Plastifizieren als Teilprozess des Spritzgießens

Vorbereitend für die Darstellung der Modellbildung und Simulation wird in diesem Abschnitt der Plastifizierprozess zunächst erläutert. Anschließend wird der Prozess thermodynamisch eingeordnet und die den Prozess beschreibenden Formeln werden vorgestellt. Letztlich wird auf Annahmen und Vereinfachungen der hier durchgeführten Betrachtung eingegangen.

4.1.1. Plastifizierprozess

Beim Plastifizieren wird der Werkstoff mittels Wärmezufuhr von einem festen in einen formbaren Zustand überführt. Dies kann über verschiedene Verfahren realisiert werden, ist aber immer mit Wärmezufuhr verbunden.

Kolbenplastifizierung

Bei der Kolbenplastifizierung gelangt das Granulat aus dem Einzug zunächst in den beheizten Plastifizierzylinder. Über Heizbänder um den Zylinder wird der Aufheizvorgang realisiert. Ist eine bestimmte Materialtemperatur erreicht, wird ein Teil des Materials durch den Kolben in einen ebenfalls beheizten Raum vor dem Einspritzzylinder befördert. Man spricht hier vom Dosieren, da nur so viel Material bewegt wird, wie für einen Schuss in das jeweilige Werkzeug notwendig ist. Zur Homogenisierung der Masse befinden sich Stahlkugeln im ersten Zylinder, durch deren Zwischenräume das Material hindurchgedrückt wird. Über einen zweiten Kolben wird das dosierte Material durch den beheizten Einspritzzylinder (Düse) schließlich in das Werkzeug befördert.

Während des Aufheizvorgangs findet kein Massenstrom statt. Im weiteren Verlauf findet ein diskontinuierlicher Massenstrom statt, da Material immer nur je Schuss durch das System bewegt wird.

Schneckenplastifizierung

Bei der Schneckenplastifizierung wird das Material über einen Trichter eingezogen und gelangt in einen Zylinder mit Schneckeneinsatz. Der Aufheizvorgang und die Plastifizierung finden hier in der Schnecke statt. Die Schneckengeometrie verändert sich mit ihrer Länge

⁴ Innovative-Erodier-Systeme GmbH. Fertigungsbetrieb der Umform-, Urform- und Zerspanungstechnik in 22885 Barsbüttel. Die Produktionsstätte ist das Anschauungsobjekt des Forschungsprojekts zur Untersuchung und Optimierung des Energieverbrauchs bei der Kunststoffverarbeitung im Spritzgussverfahren

(Gangtiefe, Gangbreite), folglich variiert auch das Volumen entlang der Schneckenlänge. Die Schnecke ist axial gelagert und bewegt sich zusätzlich zur Drehung beim Dosieren nach hinten, somit wird die Dosierung ebenfalls über die Schnecke realisiert. Sie übernimmt außerdem die Förderung der Formmasse ins Werkzeug, indem sie durch die axiale Lagerung als Kolben eingesetzt wird.

Bei diesem Verfahren finden demnach zwei Massenströme statt. Zum einen der durch die Förderung entlang der Schnecke (kontinuierlich) und zum anderen der Massenstrom je Schuss (diskontinuierlich).

Bei beiden Plastifizierverfahren hängt es vom verwendeten Material ab, in welcher Zone welche Verarbeitungstemperatur zu erreichen ist.

4.1.2. Thermodynamische Einordnung

Global betrachtet ist das Plastifizieren eine irreversible, isobare und instationäre Zustandsänderung ($dS_{irr} > 0$; $p = konst$; $\dot{m} \neq konst$) in einem offenen System ($\dot{m} \neq 0$). Da hier die Spritzgussmasse durch Temperaturerhöhung von einem flüssigen in einen fließfähigen Zustand überführt wird, ist hier zusätzlich ein Phasenwechsel gegeben. Dieser nimmt wiederum Einfluss auf die Eigenschaften der verarbeiteten Materialien.

Genauer betrachtet, lässt sich der Prozess des Plastifizierens in zwei verschiedene thermodynamische Prozesse untergliedern:

1. Ruhendes (geschlossenes) System $\rightarrow \dot{m} = 0$

Beim Aufheizvorgang und Anteilen des Spritzgießzyklus findet keinerlei Massenstrom statt. Das Material wird über Wärmeleitung für die weitere Verarbeitung vorbereitet.

2. Prozess mit Massenstrom $\rightarrow 0 \neq \dot{m} \neq konstant$

Über die Dosier- und Einspritzvorgänge entsteht ein Massenstrom. Dieser ist jedoch über die Zeit betrachtet nicht kontinuierlich, da das Einspritzen stoßartig durchgeführt wird (Schuss) und sich dies auch entsprechend auf den Massenstrom auswirkt. Ein näherungsweise konstanter Massenstrom ist nur beim Plastifizieren der Masse mittels Schnecke im Zylinder gegeben. Der Einspritzvorgang sowie die Kolbenplastifizierung haben einen diskontinuierlichen Massestrom zur Folge.

4.1.3. Gleichungen zur Abbildung der Wärmeübertragung

Zur Analyse des Gesamtprozesses ist die investierte Gesamtleistung des Prozesses zu berechnen. Die investierte Gesamtleistung ist eine Summe von Einzelleistungen, die an verschiedenen Schnittpunkten in das System eingehen. Beim Plastifizieren gehen neben der Leistung, welche der elektrischen Heizung zugeführt wird, auch Leistungen für die Kolben- und Schneckenbewegung in das System ein. Um eine vollständige Energiebilanz der Spritzgießmaschine aufstellen zu können, müssten neben dem Energieaufwand für die Wärme auch der Energieaufwand für die mechanischen und hydraulischen Komponenten betrachtet werden. Hinsichtlich des Plastifizierprozesses sind das die Rotation der Schnecke bzw. die Hubbewegung der Kolben. Bei einem Vergleich der beiden Verfahren – Kolbenplastifizierung und Schneckenplastifizierung – mit demselben Werkstoff und vergleichbaren Massen, ist eine Betrachtung der weiteren Energieeinträge zu berücksichtigen. Wenn, wie im Zuge dieser Arbeit, verschiedene Materialien, Massenströme und Prozesszeiten vergleichend betrachtet werden, können die Bewegungsleistungen für die mechanischen Teile, wie Schnecke und die Kolben, vernachlässigt werden. Zu rechtfertigen ist dies damit, dass die zu bewegenden Volumina identisch und die zu bewegenden Massen sehr ähnlich sind. Von größerer Bedeutung ist hier die Betrachtung des Energiebedarfs zur Betreibung der elektrischen Heizung. Das Betrachten weiterer Energiebedarfe ist daher nicht Teil dieser Arbeit.

Folgend wird auf die Berechnung der Leistungsaufwände zur Wärmeübertragung eingegangen. Für die rechnerischen Grundlagen wurden die folgenden Quellen herangezogen: [ArbE2015], [BaSt2004], [CeWi2010], [Dass2013], [SpFr2014]

Wärmeübertragung durch Wärmeleitung

Es wird vereinfacht angenommen, dass der Eingangswärmestrom in etwa der zugeführten elektrischen Leistung entspricht. Auch in den Simulationsmodellen ist elektrische Heizung nicht mit Verlusten behaftet:

$$\dot{Q}_{\text{Start}} \approx P_{el} = \frac{U^2}{R} \quad (1)$$

Die mittels des Widerstandes der elektrischen Heizung erzeugte Wärme wird durch die Zylinderwand geleitet. Für den Wärmestrom durch die einschichtige zylindrische Wand wird das Produkt aus den geometrischen Größen des Zylinderquerschnitts (wobei das Verhältnis von Außen- zu Innendurchmesser berücksichtigt wird), dem Wärmeleitkoeffizienten des Zylindermaterials, der Länge des Zylinderabschnitts und der Temperaturdifferenz von Innen zu Außen berechnet:

$$\dot{Q}_Z = \frac{2 \cdot \pi}{\ln \frac{r_{Z,a}}{r_{Z,i}}} \cdot \lambda_Z \cdot L_{HZ} \cdot (T_{Z,a} - T_{Z,i}) \quad (2)$$

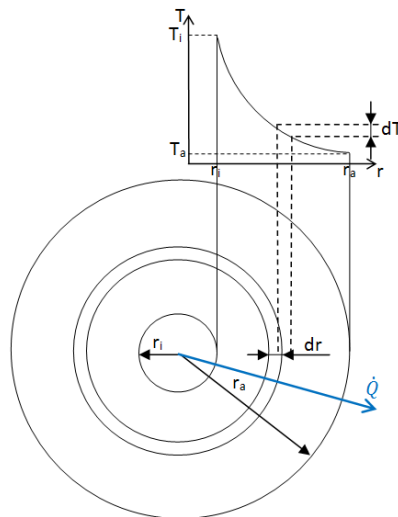


Abbildung 4 - 1: Wärmeleitung durch eine einschichtige Zylinderwand nach [BaSt2004]

Beispiel: In der ersten Heizzone einer Plastifiziereinheit hat der Zylinder einen Außenradius von 0,019 m und einen Innenradius von 0,011 m. Die Länge der Heizzone beträgt 0,13 m. Aufgrund der in den Zylinder strömenden Masse beträgt die Innentemperatur für einen Moment 140°C. Von außen erzeugt die Heizung eine Temperatur von 360°C. Der Zylinder ist aus Stahl mit einem Wärmeleitkoeffizient von 50 (W/K m). Aufgrund des Temperaturgefälles strömt dann ein Wärmestrom von 16,4 kW durch die Zylinderwand. Hierbei handelt es sich im betrachteten Prozess jedoch nur um eine Momentaufnahme. Da die Temperatur der Masse im Zylinder stetig zunimmt, wird auch der Wärmestrom geringer.

Die Zylindermasse speichert während der Wärmeleitung Wärme in Abhängigkeit der Wärmekapazität der Zylindermasse und der Temperaturdifferenz zwischen dem Zustand 1 und dem Zustand 2.

$$Q_Z = m_Z \cdot c_Z \cdot (T_{Z,2} - T_{Z,1}) \quad (3)$$

Beispiel: In der ersten Heizzone einer Plastifiziereinheit hat der Zylinder eine Masse von 0,778 kg. Der Zylinder ist aus Stahl und hat entsprechend eine Wärmekapazität von 452 (J/kg K). Zu Beginn des Aufheizvorgangs hat die Zylinderwand Raumtemperatur (21°C). Mit Hilfe der Heizung wird der Zylinder auf 360°C erwärmt. Die gespeicherte Wärmemenge beträgt dann 119 kJ.

Analog zum Wärmestrom durch die Zylinderwand wird die Wärme durch die Formmasse geleitet. Es ist jedoch zu erwähnen, dass die Masse eigentlich nicht die Geometrie einer einschichtigen Zylinderwand aufweist. Näherungsweise wird der Ansatz auch hier gewählt. Dies lässt sich insbesondere dadurch rechtfertigen, dass der Zylinder nicht vollständig mit der Formmasse, sondern auch mit den Stahlkugeln gefüllt ist. Das heißt, das Volumen des Zylinders teilt sich auf die Masse und die Stahlkugeln auf. Es ist näherungsweise anzunehmen, dass die Spritzgussmasse überall Kontakt zur inneren Zylinderwand hat und von dort die

Wärme an die Masse übertragen wird. Der Innenradius ist entsprechend des Volumens der Masse zu wählen.

$$\dot{Q}_M = \frac{2 \cdot \pi}{\ln \frac{r_{M,a}}{r_{M,i}}} \cdot L_{HZ} \cdot \lambda_M \cdot (T_{M,a} - T_{M,i}) \quad (4)$$

Die Wärmemenge, die der Kunststoffmasse zugeführt wird, um sie vom Zustand eins auf den Zustand zwei zu erwärmen, resultiert dann analog zur Formel (2):

$$Q_M = m_M \cdot c_M \cdot (T_{M,2} - T_{M,1}) \quad (5)$$

In anderer Schreibweise auch:

$$Q_M = m_M \cdot c_M \cdot (T_{M,soll} - T_{M,ist}) \quad (6)$$

Aus der benötigten Wärmemenge zur Erreichung der Soll-Temperatur der Formmasse und aus dem der Formmasse zugeführtem Massestrom wird die Dauer des Beheizungs Vorgangs berechnet. Das ist die Zeit, die benötigt wird, um die Kunststoffmasse vom Zustand 1 auf den Zustand 2 zu erwärmen:

$$t = \frac{Q_M}{\dot{Q}_M} \quad (7)$$

Neben dem Stahlzylinder und der thermoplastischen Formmasse sind die Wärmeleitung und -speicherung in den Stahlkugeln zu berücksichtigen.

Für die Kugeln im ersten Zylinder der Kolbenspritzgussmaschine wird zur Berechnung des Wärmestroms die Gleichung für die Hohlkugel herangezogen. Der Innenradius wird entsprechend klein gewählt.

$$\dot{Q}_K = \frac{4 \cdot \pi}{\frac{1}{r_{K,i}} - \frac{1}{r_{K,a}}} \cdot \lambda_K \cdot (T_{K,a} - T_{K,i}) \quad (8)$$

Die Wärmemenge, die den Kugeln zugeführt werden muss, um sie vom Zustand 1 auf den Zustand 2 zu erwärmen, wird analog zu Formel (3) und (5) berechnet, wobei n die Anzahl der Kugeln ist:

$$Q_M = n \cdot [m_K \cdot c_K \cdot (T_{K,2} - T_{K,1})]$$

$$Q_K = \dot{Q}_K \cdot t \quad (9)$$

Die Berechnung erfolgt anhand der Werkstoffkennwerte von Stahl.

Wärmeübertragung an Stoffstrom

Bei der Wärmeübertragung an einen Stoffstrom ist der Massenstrom zu berücksichtigen. Wie bereits in Kapitel 4.1.2 erläutert, wird dieser Prozess als stationär und reversibel angenommen. Der konstante Massenstrom tritt mit der Temperatur T_1 in das System ein und mit der Temperatur T_2 wieder aus dem System aus.

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik besagt:

$$\dot{Q} + P = \dot{m} \left(h_2 + \frac{c_2^2}{2} + g \cdot z_2 \right) - \dot{m} \left(h_1 + \frac{c_1^2}{2} + g \cdot z_1 \right) \quad (10)$$

bzw.

$$\dot{Q} + P = \dot{m} \left[(h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + g \cdot (z_2 - z_1) \right] \quad (11)$$

Die Änderung potenzieller Energie findet bei dem Prozess der Plastifizierung nicht oder in vernachlässigbarem Umfang statt. Außerdem wird dem System kein zusätzlicher Wärmestrom zugeführt. Ohne den Anteil der potentiellen Energie lautet der erste Hauptsatz demnach:

$$P = \dot{m} \left[(h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) \right] \quad (12)$$

Bei einem Schneckenantrieb wird dem System weitere Energie durch die sich drehende Schnecke zugeführt. Die elektrisch angetriebene Schneckendrehung bewirkt eine konstante Beförderung der Masse, also eine kinetische Energie. Die Änderung der Geschwindigkeit zwischen den Systemgrenzen (System-Eingang zu System-Ausgang) ist jedoch sehr gering. Es findet also keine effektive Beschleunigung des Materials durch die Schneckenrotation statt. Bei der Kolben- wie auch bei der Schneckenspritzgießmaschine findet beim Einspritzen eine kurzfristige Beschleunigung der Masse statt. Gemessen an der Gesamtzykluszeit ist der Anteil, bei dem die Masse in Bewegung ist, sehr gering und wird daher vernachlässigt. Gleiches gilt auch für den Einspritzvorgang bei der Schneckenspritzgussmaschine. Daraus folgt schließlich:

$$c_1 \approx c_2 \text{ bzw. } c_1 - c_2 \approx 0 \quad (13)$$

Dies wiederum reduziert die Gleichung für die Wärmeübertragung an einen Stoffstrom auf:

$$P = \dot{m} [(h_2 - h_1)] \quad (14)$$

Zumindest für die Kolbenspritzgussmaschine ist anzunehmen, dass das Plastifizieren des Materials überwiegend durch die, mittels der Heizung zugeführten, Wärme realisiert wird. Die Leistung, die benötigt wird, um den Massenstrom zu erwärmen, entspricht daher in etwa der, der Heizung zugeführten elektrischen Leistung (Verluste werden vernachlässigt):

$$P_{el,H} = \dot{m} [(h_2 - h_1)] \quad (15)$$

Die Spritzgussmasse wird dabei als inkompressibel angenommen. Die Änderung der Enthalpie ist nur von der Temperatur, aber nicht vom Druck abhängig. Die Änderung der Enthalpie wird, wie bei der Wärmeübertragung, dann mittels der Wärmekapazität des Materials und der Temperaturdifferenz berechnet:

$$h_1 - h_2 = \Delta h = c_M(T_{M2} - T_{M1}) \quad (16)$$

Durch Einsetzen erhält man für die elektrische Leistung schließlich die folgende Formel:

$$P_{el,H} = \dot{m} c_M(T_{M2} - T_{M1}) \quad (17)$$

Beispiel: Bei einem Massenstrom der Spritzgussmasse von 0,0141 (kg/s) und einer Wärmekapazität des Werkstoffs PEEK von 1810 (J/kg K) wird demnach eine Leistung von 5,6 kW benötigt, um den Massenstrom von der Eingangstemperatur 140°C auf die Solltemperatur von 360°C zu erhitzen.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass für eine ganzheitliche Leistungsbilanz, die für den Antrieb der kinematischen und hydraulischen Komponenten benötigte Energie, ebenfalls zu berücksichtigen ist. Außerdem ist zu erwähnen, dass bei der Schneckenplastifizierung ein erheblicher Teil der Wärme durch Reibung erzeugt wird, was das Plastifizieren des Materials unterstützt. Der Spritzgussmaschinenhersteller Arburg gibt an, dass bei einer Schnecken-spritzgussmaschine *60 % der benötigten Energie durch Reibungswärme und lediglich 40 % durch die Heizbänder aufgebracht* [ArbB2015] werden. Bei Kolbenspritzgussmaschinen sollte das Verhältnis wesentlich geringer ausfallen, da keine konstante Förderung der Masse stattfindet. Durch fluidmechanische Berechnungen und Versuche kann der Einfluss der Reibung auf das Plastifizieren der Spritzgussmasse genauer untersucht werden. Die Modelle und Simulationen dieser Arbeit beschränken sich auf die thermodynamischen Einflüsse.

Für Wärmeübergänge, zum Beispiel vom Zylinder an die Umgebungsluft oder vom Zylinder an die Masse, ist der konvektive Wärmeübergang zu berücksichtigen. Dieser wird wie folgt berechnet:

$$\dot{Q} = \alpha A(T_W - T_{Medium}) \quad (18)$$

Wobei T_W die Temperatur der Wand ist und T_{Medium} die Temperatur des jeweiligen Mediums (Luft oder Spritzgussmasse). A ist die Wandfläche, also in diesem Fall die Außen- oder Innenfläche des Zylinders. Das Formelzeichen Alpha (α) bezeichnet den Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Wand und Medium. Die Berechnung des Koeffizienten erfolgt mittels experimentell ermittelten Abhängigkeiten. Für die im Zuge dieser Arbeit erfolgenden Simulationen werden die Wärmeübergangskoeffizienten nicht experimentell ermittelt, sondern der Literatur entnommen. Die Literaturwerte stellen nur Näherungswerte dar. Sollten zu einem späteren Zeitpunkt des Gesamtprojekts genauere Wärmeübergangskoeffizienten für den Wärmeübergang vom Zylinder zur Umgebung und vom Zylinder an die Masse benötigt werden, sind diese am realen Prozess der Maschinen experimentell zu bestimmen. Der Ansatz für die Bestimmung wird angehend kurz behandelt:

Der Wärmeübergangskoeffizient wird durch den folgenden Zusammenhang berechnet.

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{L_0} \quad (19)$$

λ ist die Wärmeleitfähigkeit des Mediums. L_0 ist das Längenverhältnis des Körpers. Bei Nu handelt es sich um die Nußelt-Zahl, eine dimensionslose Kennzahl zur Beschreibung der Wärmeübertragung. Diese Nußelt-Zahl ist von mehreren Parametern abhängig.

$$Nu = f(Re; Pr; Ec, k_{Geometrie}) \quad (20)$$

Wobei

$$Re = \frac{w_0 L_0}{\nu} \quad \rightarrow \text{Reynoldszahl} \quad (21)$$

$$Pr = \frac{\eta c_p}{\lambda} \quad \rightarrow \text{Prandtl-Zahl} \quad (22)$$

$$Ec = \frac{w_0^2}{c_p \Delta T_0} \quad \rightarrow \text{Eckert-Zahl} \quad (23)$$

$k_{Geometrie} \rightarrow$ geometrische Kennzahlen des Systems

Wobei w_0 die Geschwindigkeit ist, mit der das Medium entlang des Körpers strömt. ν ist die kinematische Viskosität des Mediums, η ist die dynamische Viskosität des Mediums, c_p ist die Wärmekapazität und ΔT_0 die Temperaturdifferenz zwischen Medium und Körper. Die Eckertzahl kann an dieser Stelle vernachlässigt werden, da sie nur bei sehr hohen Geschwindigkeiten (Im Bereich der Schallgeschwindigkeit) Anwendung findet. Die Abhängigkeit zwischen der Reynoldszahl, der Prandtl-Zahl sowie der Geometrie ist entweder durch eine detailliertere Simulation zu dieser Fragestellung zu berechnen oder mittels Experimenten an den Maschinen zu messen. Sie ist von System zu System unterschiedlich.

4.1.4. Annahmen und Vereinfachungen

Hinsichtlich der Abbildung des Prozesses des Plastifizierens werden Annahmen und Vereinfachungen vorgenommen. Diese werden folgend zusammengefasst und erläutert:

1. Die Irreversibilität des Prozesses wird bei der Simulation wie auch beim rechnerischen Nachweis vernachlässigt: die Nicht-Umkehrbarkeit des Prozesses der Pazifizierung ergibt sich überwiegend aus dem Wärmeverlust des Systems an die Umgebung. Da keine empirischen Werte über die Wärmeabgabe an die Umgebung vorliegen und weil in einer vergleichenden Analyse, wie sie hier vorgenommen wird, der Einfluss sekundär ist, wird der Einfluss der Umgebung hier vernachlässigt. Die Modelle lassen eine Adaption zu einem späteren Zeitpunkt zu.
2. Die Phasenänderung des Spritzgusswerkstoffes wird vernachlässigt: Im rein festen Zustand (Granulat) liegt das Spritzgussmaterial nur ganz zu Beginn des Plastifizierens

vor. Spätestens in der zweiten Zylinderzone wird die Schmelztemperatur des Werkstoffes erreicht [JoMi2004; S168ff]. Des Weiteren sind die Materialkennwerte der Werkstoffe meist nur für einen Norm-Zustand verfügbar [Solv2013], [Kern204], so dass der phasenabhängige Einfluss auf die Kennwerte zu vernachlässigen ist.

3. Der kinematische Anteil des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik wird vernachlässigt, da es sich beim Spritzgießen um einen kurzfristigen und diskontinuierlichen Massenstrom handelt und keine konstante Beschleunigung der Masse stattfindet.
4. Anteile potentieller Energie werden vernachlässigt: Der Prozess der Plastifizierung findet entweder auf identischem Höhenpotential statt, oder die Höhenunterschiede sind so gering (z.B. schräg zugeführter Kolben bei der Kolbenplastifizierung), dass man diese vernachlässigen kann.
5. Reibeffekte durch die Zylinderwand bzw. durch die Schnecke werden vernachlässigt.

4.2. Modellierung und Simulation des Plastifizierprozesses

Im diesem Kapitel wird grundlegend die Modellbildung und Simulation des Plastifizierprozesses behandelt. Zunächst wird kurz die Modellfindung beschrieben. In den dann folgenden Unterkapiteln wird zunächst das Grundmodell erläutert. Anschließend werden die notwendigen Eingangsparameter vorgestellt. Danach folgt eine erste Beispielsimulation, um die Plausibilität des Modells zu erläutern und die Abläufe und Grenzen des Modells zu veranschaulichen.

Das Modell soll eine Simulation ermöglichen, die die folgende Fragestellung verfolgt: Welcher Energiebedarf ergibt sich durch das Plastifizieren des Materials, in Abhängigkeit der Rahmenbedingungen wie Material, Masse, Zyklus und Anlagengeometrie? Es gilt also mittels des Modells zu ermitteln, wieviel Energie den Zylinderzonen von außen zugeführt werden muss, um das Material von einer Temperatur T_1 auf die zum Aufschmelzen benötigte Temperatur T_2 zu erwärmen.

Da der Plastifizierprozess in verschiedenen Zonen mit unterschiedlichen geometrischen und thermischen Eigenschaften stattfindet wird zudem ein Ansatz für ein Modell verfolgt, der das einfache Übertragen auf verschiedene Zonen erlaubt und bei dem der Massenstrom eingestellt werden kann. Das Modell muss demnach die folgenden Voraussetzungen erfüllen:

- Berücksichtigung aller einflussnehmenden Komponenten
- Wärmeübertragung auf ruhende Masse
- Wärmeübertragung auf Massenstrom (diskontinuierlich)
- variable (einstellbare) geometrische und stoffliche Kennwerte
- variabler (einstellbarer) Massenstrom
- ablesbarer Energieeintrag als Ergebnis

Weitere Randbedingungen, wie beispielsweise eine Spannungsquelle von 230V, ergeben sich durch Grundgegebenheiten und die Infrastruktur der Produktionsstätte. Alle Randbedingungen müssen schließlich in einem Modell vereint sein.

Die Komponenten des Modells entstammen überwiegend der thermischen Rubrik der Dymola®-Bibliothek. Vereinzelt wird die Bibliothek durch angepasste Komponenten erweitert. Im Anschluss hieran werden das Grundmodell und die Modifikation einzelner Komponenten erläutert.

4.2.1. Grundmodell

Das Modell besteht aus verschiedenen Komponenten, die bei der Wärmeleitung in die Spritzgussmasse oder in einen Spritzgussmassenstrom Einfluss nehmen. Zur besseren Nachvollziehbarkeit ist folgend zunächst eine Übersicht des Modells dargestellt:

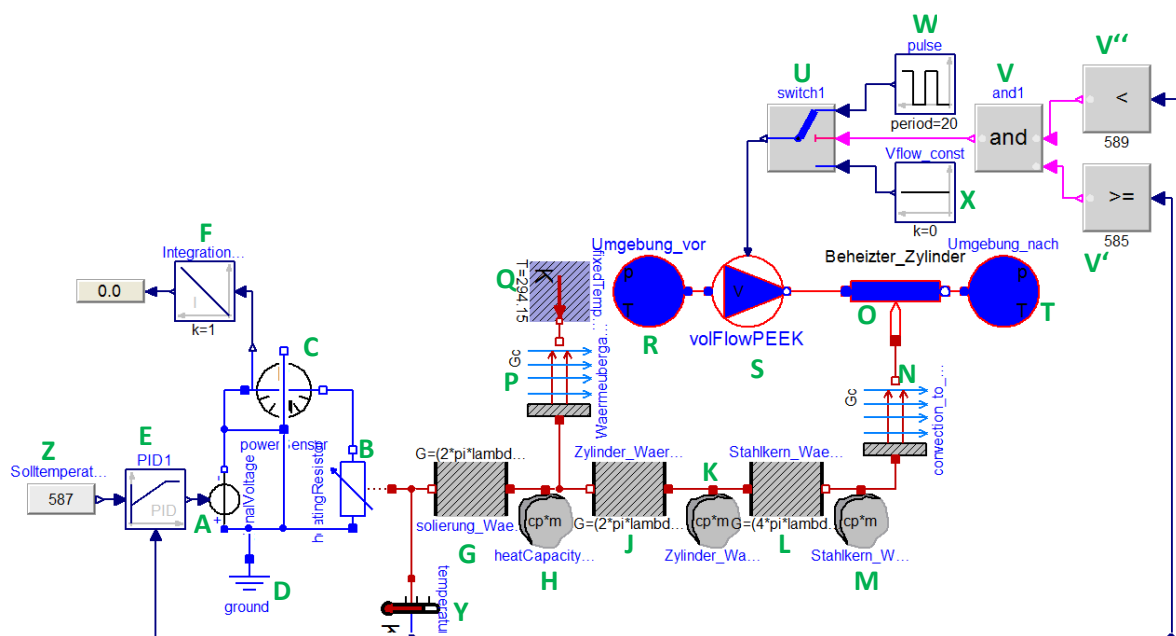


Abbildung 4 - 2: Übersicht Dymola®-Modell – Wärmeübertragung an einen Stoffstrom

Die Wärme wird mittels einer elektrischen Heizung erzeugt. Die Heizung ist aus einer variablen Spannungsquelle (A), einem Heizwiderstand (B) und einem Leistungssensor (C) zusammengesetzt und ist geerdet (D). Die Spannungszufuhr der Heizung wird über einen PID-Regler⁵ geregelt (E). Für das Auswerten der Simulationsergebnisse wird die Leistung am Sensor (C) integriert (F), sodass die Energie als Ausgabewert zur Anzeige gebracht werden kann. So ist nach einer Simulation zu jedem Zeitpunkt des Simulationszeitraums die bis dahin benötigte Energie ablesbar.

⁵ PID-Regler: Elektronisches Element zur Regelung von physikalischen Größen auf einen vorgegebenen Wert. Der PID-Regler zeichnet sich im Vergleich zu anderen Reglern dadurch aus, dass er schnell auf Abweichungen vom Soll-Wert reagiert, dass er Überschwingungen entgegen wirkt und sich keine bleibende Regelabweichung einstellen [BBBE2008]

Die mittels der Heizung erzeugte Wärme wird durch mehrere Komponenten und somit durch unterschiedliche Materialien geleitet. Jede der Komponenten ist durch die Eigenschaften *Wärmeleitung* (Komponenten G, J, und L) und *Wärmekapazität* (Komponenten H, K, und M) charakterisiert. Die am Widerstand erzeugte Wärme wird zunächst in und durch einen Keramikmantel geleitet, der den Heizwiderstand umgibt (G; H). An dieser Stelle ist neben der Wärmeleitung zwischen den Komponenten auch der konvektive Wärmeübergang an die Umgebung zu berücksichtigen (P, Q). Ist die Systemtemperatur einer Maschine höher als die Umgebungstemperatur, gibt die Maschine Wärme an die Umgebung ab. Dieser Wärmestrom an die Umgebung ist unvermeidlich und stellt für das System einen Verlust dar. Von der Keramik erfolgt die weitere Wärmeleitung in und durch den Zylinder der Plastifiziereinheit (J, K).

Wie bereits erwähnt, gibt es beim Spritzgießen verschiedene Varianten, um das Material zu plastifizieren und homogenisieren. Häufig sind dazu Stahlelemente im Inneren des Zylinders installiert, wie die Schnecke (Schneckenantrieb) oder Stahlkugeln (Zylinder 1 des Kolbenantriebs). Diese Komponenten werden im Prozess ebenfalls erwärmt und leiten die Wärme weiter. Je nach Konstruktionsart ist zu unterscheiden, ob die Wärmeleitung erst durch die innenliegenden Stahlkomponenten oder erst in die Spritzgussmasse erfolgt. Genau genommen passiert dies wohl in jedem Fall mehr oder weniger synchron. In dem hier betrachteten Modell geht der Wärmestrom vereinfacht zunächst in die Stahlkomponenten (L, M) und dann über einen konvektiven Wärmeübergang (N) in die Rohrleitung mit der Spritzgussmasse (O). Für die Rohrkomponente, so wie sie in Dymola® verfügbar ist, sind keine Eigenschaften hinterlegt, sondern nur für den Inhalt, hier die Spritzgussmasse. Durch die vorgeschalteten Anlagenkomponenten werden die Eigenschaften des Rohrs dennoch abgebildet. Mit der Rohrleitung kommt ein wichtiger Parameter hinzu: der Massenstrom. Über eine Pumpe (S) kann ein definierter Massenstrom in das System eingebracht werden. Die Starttemperatur des Massenstroms ist durch die der Pumpe vorgeschaltete Umgebung (R) definiert. Der Massenstrom gelangt über die Rohrleitung in die nachgeschaltete Umgebung (T). Hier soll schon einmal erwähnt sein, dass der nachgeschalteten Umgebung ebenfalls eine Temperatur zugewiesen werden kann. Diese hat durch den gerichteten Massenstrom jedoch keinen Einfluss auf die Erwärmung des Spritzgussmaterials.

Die Regelung der Heizung erfolgt über die Abnahme der Ist-Temperatur nach dem Heizwiderstand (Y) und deren Übermittlung an den PID-Regler (E). An diesem ist eine Solltemperatur (Z, Angabe in Kelvin) als Referenzwert hinterlegt. Das System ist so zu regeln, dass der Massenstrom erst dann einsetzt, wenn die vorgegebene Heizungstemperatur +/- 2°C erreicht ist. Welcher Wert hier für die Solltemperatur an der Heizung hinterlegt wird, ist nicht trivial. Der Wert und die Einstellung der Solltemperatur wird im Detail unter Kapitel 4.2.4.1 näher betrachtet.

Schließlich ist noch eine Regeleinheit an der Pumpe vorgesehen (U, V, W, X). Diese regelt den Massenstrom. Der definierte Massenstrom (W) setzt nur dann ein, wenn die Heizungstemperatur (Y) in einem bestimmten Temperaturbereich (V) liegt, beispielsweise im Bereich

der Solltemperatur $\pm 2^\circ\text{C}$. Ist die Solltemperatur außerhalb dieses Bereichs, findet kein Massenstrom statt (X).

Entsprechend der Komponenten stehen die Verbindungslinien für unterschiedliche physikalische Verbindungen:

- Wärmestrom (dunkelrot)
- Massenstrom / Volumenstrom (hellrot)
- Realwert-Signal (dunkelblau)
- logische Verknüpfungen (rosa)
- elektrische Verbindung (hellblau)

Durch das Einstellen der Parameter, wie geometrische Kenndaten, Temperaturen und Materialkennwerte, kann man mit diesem Modell verschiedene Zonen oder Varianten des Prozesses betrachten.

4.2.2. Erweiterung der Bibliothek in Dymola®

Die Bibliothek der Komponenten und Funktionen in Dymola® ist beliebig erweiterbar. Zum einen lassen sich neben den Standardkapiteln der Bibliothek weitere Kapitel anlegen. Dies ist sinnvoll, wenn man einen bestimmten Teilbereich der Technik tiefer abbilden möchte und sich dazu aus verschiedenen Modelica® Standardpaketen bedient. Zum anderen lassen sich aus den in Dymola® gegebenen Grundkomponenten neue Komponenten zusammenstellen. Es ist aber auch möglich, vorhandene Komponenten zu modifizieren und als Modifikation in die Datenbank aufzunehmen.

Kapitelstruktur des Modells in Dymola®

Für die Modellierung des Plastifizierprozesses beim Spritzgießen wird in Dymola® zunächst ein neues Kapitel namens *“InjectionMolding”* (engl.: Spritzguss) erstellt. Dieses Kapitel dient der Bündelung aller spritzgusspezifischen Betrachtungen. Zur weiteren technischen Einordnung ist das Erstellen von Unterkapiteln sinnvoll. So lässt sich das Themengebiet des Spritzgießens u.a. in die Unterbereiche *„Prozesse“*, *„Komponenten“* und *„Medien“* unterteilen. Das Unterkapitel *„Prozesse“* kann wiederum z.B. in Hinblick auf physikalische Prozesse unterteilt werden. Da es sich beim Plastifizieren um einen überwiegend thermischen Prozess handelt und er nur ein Teilprozess des Spritzgießens ist, wurde beim Anlegen der Kapitel für das hier behandelte Projekt wie folgt verfahren: *InjectionMolding* → *Processes* → *Thermal* → *Plastification*. Unter dem Kapitel des Plastifizierens lassen sich verschiedene Modelle und Varianten anlegen.

Modifikation von Komponenten

Beim Abbilden des Plastifizierprozesses ist es notwendig, Komponenten aus der Standardbibliothek geringfügig abzuändern. Diese werden als Komponente im Projekt angelegt. Bei den Komponenten handelt es sich um Modifikationen der Standardkomponenten der Wärmeleitung und der Wärmekapazität. Durch die Modifikation können für die späteren Simulationen und Vergleiche bei den Komponenten Rohdaten wie Geometriewerte und Materialkennwerte hinterlegt werden. Somit ist die maschinenspezifische Anwendung des Modells in der Produktion gewährleistet. Mathematische, physikalische und thermodynamische Abhängigkeiten und Zusammenhänge sind als Formeln hinterlegt und werden im Zuge der Simulation berechnet. Damit wird vermieden, dass bereits vorab manuelle Berechnungen vorgenommen werden müssen, welche ggf. Fehlerquellen darstellen. So wäre z.B. für die Wärmekapazität des Zylinders der Teil " $m_M \cdot c_{p,M}$ " der Formel (3) bereits vorab zu lösen und als Parameter C für die Komponente zu hinterlegen (Abbildung 4 - 3 und Abbildung 4 - 5). Um hierbei Fehler zu vermeiden, wird die Komponente so modifiziert, dass alle Parameter und Eingangsdaten der Komponente und die entsprechenden Formeln in der Komponente hinterlegt sind (Abbildung 4 - 4 und Abbildung 4 - 6 und). Analog wird mit der Komponenten der Wärmeleitung verfahren.

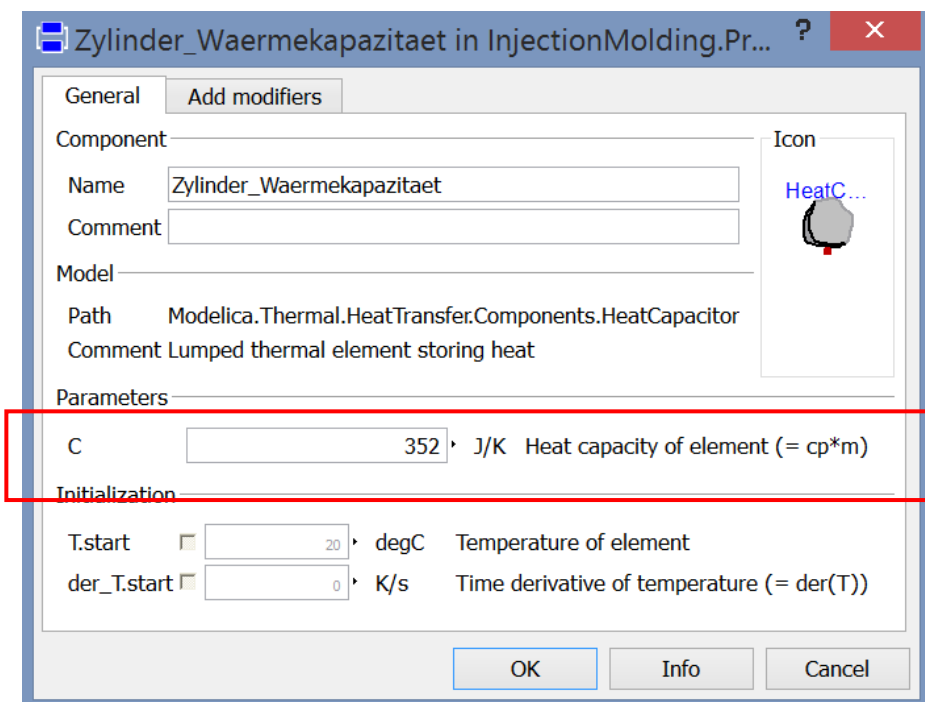


Abbildung 4 - 3: Infoansicht der Komponente *Wärmekapazität* - standard

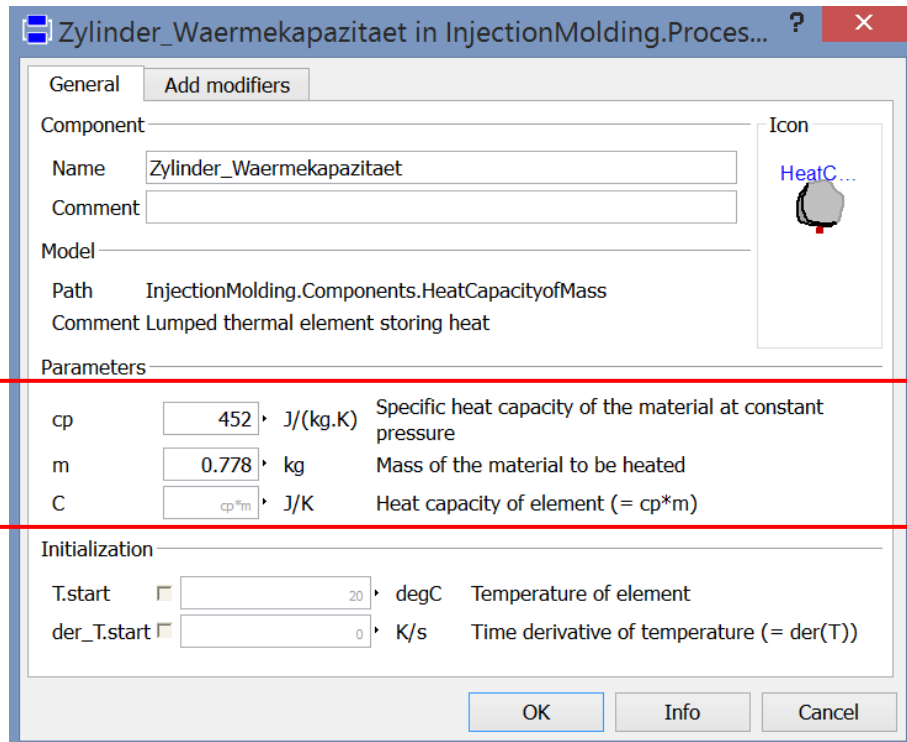


Abbildung 4 - 4: Infoansicht der Komponente *Wärmekapazität* - modifiziert

```

model Modelica.Thermal.HeatTransfer.Components.HeatCapacitor
  "Lumped thermal element storing heat"
  parameter Modelica.SIunits.HeatCapacity C "Heat capacity of element (= cp*m)";
  Modelica.SIunits.Temperature T(start=293.15, displayUnit="degC")
    "Temperature of element";
  Modelica.SIunits.TemperatureSlope der_T(start=0)
    "Time derivative of temperature (= der(T))";
  Interfaces.HeatPort_a port;
equation
  T = port.T;
  der_T = der(T);
  C*der(T) = port.Q_flow;
end HeatCapacitor;

partial package Modelica.Icons.InterfacesPackage
  "Icon for packages containing interfaces"
  //extends Modelica.Icons.Package;
end InterfacesPackage;

connector Modelica.Thermal.HeatTransfer.Interfaces.HeatPort_a
  "Thermal port for 1-dim. heat transfer (filled rectangular icon)"
  extends HeatPort;
end HeatPort_a;

partial connector Modelica.Thermal.HeatTransfer.Interfaces.HeatPort
  "Thermal port for 1-dim. heat transfer"
  Modelica.SIunits.Temperature T "Port temperature";
  flow Modelica.SIunits.HeatFlowRate Q_flow
    "Heat flow rate (positive if flowing from outside into the component)";
end HeatPort;

```

Abbildung 4 - 5: Textansicht der Komponente *Wärmekapazität* - standard

```

model HeatCapacityofMass "Lumped thermal element storing heat"
  parameter Modelica.SIunits.SpecificHeatCapacityAtConstantPressure cp=1
    "Specific heat capacity of the material at constant pressure";
  parameter Modelica.SIunits.Mass m=1 "Mass of the material to be heated";
  parameter Modelica.SIunits.HeatCapacity C=cp*m
    "Heat capacity of element (= cp*m)";
  Modelica.SIunits.Temperature T(start=293.15, displayUnit="degC")
    "Temperature of element";
  Modelica.SIunits.TemperatureSlope der_T(start=0)
    "Time derivative of temperature (= der(T))";
  Modelica.Thermal.HeatTransfer.Interfaces.HeatPort_a port;

equation
  T = port.T;
  der_T = der(T);
  C*der(T) = port.Q_flow;
end HeatCapacityofMass;

partial package Modelica.Icons.Package "Icon for standard packages"
end Package;

partial package Modelica.Icons.InterfacesPackage
  "Icon for packages containing interfaces"
  //extends Modelica.Icons.Package;
end InterfacesPackage;

connector Modelica.Thermal.HeatTransfer.Interfaces.HeatPort_a
  "Thermal port for 1-dim. heat transfer (filled rectangular icon)"

  extends HeatPort;
end HeatPort_a;

partial connector Modelica.Thermal.HeatTransfer.Interfaces.HeatPort
  "Thermal port for 1-dim. heat transfer"
  Modelica.SIunits.Temperature T "Port temperature";
  flow Modelica.SIunits.HeatFlowRate Q_flow
    "Heat flow rate (positive if flowing from outside into the component)";
end HeatPort;

```

Abbildung 4 - 6: Textansicht der Komponente *Wärmekapazität* - modifiziert

Für eine bedienungsfreundliche Eingabe und um Fehler zu vermeiden, werden analog die Eingabeparameter für die Komponenten Wärmeleitung und Konvektion modifiziert.

4.2.3. Anlagenparameter und Kennwerte

Die Qualität einer Simulation ist immer abhängig von der Qualität der Eingangswerte, die dem Modell zu Grunde gelegt werden. Am Anfang jeder Simulation steht also immer das Einholen und Eingeben der Prozess- und Maschinenparameter, die eine Simulation ermöglichen und beeinflussen. Auch bei dem Modell zum Plastifizierprozess sind einige Eingaben nötig, bevor eine Simulation gestartet werden kann. Folgend ist eine Übersicht gegeben, die zeigt, welche Eingangsdaten für das in Kapitel 4.2.1 beschriebene Modell benötigt werden:

Tabelle 4 - 1: Übersicht der notwendigen Eingangsparameter für eine Simulation des Plastifizierprozesses

Kategorie		Kenngröße	Einheit	Anmerkung
Geometrie		Innen- \emptyset des Zylinders	m	Je Heizzone; zur Ermittlung der Massen und Kontaktflächen
		Außen- \emptyset des Zylinders	m	
		Außen- \emptyset der Keramik	m	
		\emptyset der innenliegenden Stahlteile	m	
		Längen der Heizzonen	m	
Elektrische Kennwerte		Spannung U	V	Je Heizzone
		Widerstand R	Ω	
Materialkennwerte	Mechanisch	Dichte ρ	kg/m ³	Nur bei Berücksichtigung der Reibung im Rohr für Thermoplast, kann auch aus dyn. Viskosität ermittelt werden
		Kinem. Viskosität ν	m ² /s	
	Thermisch	Wärmeleitkoeffizient λ	W/(K m)	
		spez. Wärmekapazität c	J/(kg K)	
		Wärmeübergangskoeffizient α - Maschine – Umgebung - Zylinder - Masse	W/(m ² K)	
Temperaturen		Solltemperaturen je Heizzone	°C oder K	
		Starttemperaturen je Heizzone	°C oder K	
Prozessgrößen		Zykluszeit	s	+ Verlaufskurve
		Massenstrom + Verlauf	kg/s	

Die Parameter sind überwiegend der Literatur, Datenblättern und Spezifikationen zu entnehmen oder an der Maschine selbst zu evaluieren. In manchen Fällen muss ggf. auf Annahmen und Erfahrungswerte zurückgegriffen werden (z.B. Wärmeübergangskoeffizient von Stahl zu Spritzgussmasse). Da der Massenstrom vorgegeben wird, ist auch die Zykluszeit eine vorgegebene Größe.

Die Berücksichtigung der Viskosität als Materialeigenschaft von Spritzgussmaterialien ist im Rahmen der Simulation problematisch. Für Spritzguss-Thermoplaste findet man weniger die Viskosität, sondern vielmehr den Schmelzflussindex (MFR = Melt Flow Rate) in den Spezifikationen. Er dient der Beschreibung der Viskosität der Kunststoffschmelze [Wfpl2013]. Nur

selten sind direkt Angaben zur Viskosität aufgeführt. Sind Daten vorhanden, sind diese an einen bestimmten Zustand der Schmelze hinsichtlich Temperatur und Scherrate gebunden. Bei dem erstellten Dymola®-Modell nimmt die Viskosität nur Einfluss, wenn die Reibung in den Zylindern berücksichtigt wird. In den hier vorgenommenen Simulationen wird die Reibung vernachlässigt. Soll jedoch zu einem späteren Zeitpunkt der Studie auch die Reibung berücksichtigt werden, sollte sich vorab zunächst mit der Kenngröße Viskosität auseinandergesetzt werden.

Folgend werden nun die Eingangsdaten vorgestellt, die bei den später durchgeführten Simulationen als Grundlage dienen.

4.2.3.1. Geometrie

Aus dem Datenblatt der Kolbenspritzmaschine sind die geometrischen Größen der Komponenten zu entnehmen, in welchen die Plastifizierung des Materials stattfindet.

Tabelle 4 - 2: geometrische Eingangsparameter für die Beispielsimulationen

Kenngrößen Heizzone	Heizlänge [m]	Anzahl Kugeln	Radien [m]			
	L	n	Zylinder		Keramik	Innenliegende Stahlkugeln
			$r_{z,a}$	$r_{z,i}$	$r_{c,a}$ (Annahme)	r_k
Plastifizierbereich	0,13	13	0,019	0,011	0,024	0,0055
Dosierbereich	0,06	-	0,030	0,006	0,035	-
Düse	0,07	-	0,010	0,004	0,015	-

Die Heizlänge orientiert sich an der Länge der einzelnen Zylinder. Eine Homogenisierung durch im Zylinder befindliche Stahlkugeln erfolgt nur im Plastifizierbereich. Die geometrischen Größen für den Dosierbereich und der Düse sind ebenfalls mit aufgeführt, da diese Bereiche für das Betrachten des Gesamt-Plastifizierprozesses zu berücksichtigen sind.

4.2.3.2. Elektrische Kenngrößen

Für die Einstellung der Heizung benötigt man die anliegende Spannung sowie den Widerstand der jeweiligen Heizzone.

Tabelle 4 - 3: elektrische Eingangsparameter für die Beispielsimulationen

Kenngrößen Heizzone	Spannung U [V]	Widerstand R [Ω]
Plastifizierbereich	230	53
Dosierbereich	230	94
Düse	230	265

4.2.3.3. Material

Im Vergleich werden in dieser Arbeit die Thermoplasten PEEK und PP betrachtet. Diese beiden Materialien werden in dem Betrieb der IES GmbH, welcher als Grundlage für die Studie dient, am häufigsten eingesetzt.

Tabelle 4 - 4: Materialkennwerte für die Beispielsimulationen

Kenngröße Material	spez. Wärmekapazität c [J/(Kg K)]	Wärmeleitkoeffizient λ [W/(K m)]	Dichte ρ [kg/m ³]	dyn. Viskosität η [Pa s]
PEEK (KT880CF30)	1810	0,37	1410	450
PP (H = Homopolymer)	1700	0,22	903	nicht verfügbar

Die Materialkennwerte der beiden Werkstoffe sind den verfügbaren Materialspezifikationen von Herstellern entnommen [Kern2014], [Khpk2015], [Solv2013]. Die dynamische Viskosität ist in diesem Fall nur zur Information aufgeführt. Für den Werkstoff PEEK ist die Viskosität in diesem Fall als Schmelzviskosität bei einer Temperatur von 400°C und einer Scherrate von 1000s⁻¹ hinterlegt. Für das Material PP konnte auch nach Anfrage bei dem Hersteller keine Information zur Viskosität recherchiert werden.

4.2.3.4. Temperaturen

Beim Plastifizierprozess sind, in Abhängigkeit des Materials, in den unterschiedlichen Zonen bestimmte Temperaturen einzuhalten, um eine optimale Verarbeitung zu gewährleisten.

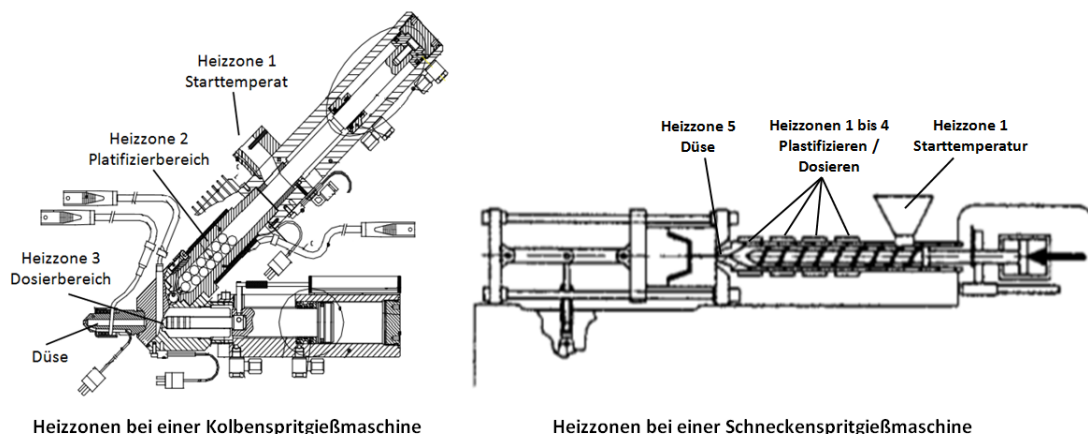


Abbildung 4 - 7: Heizzonen bei Kolben- und Schneckenextrudern

Für die Information, welche Temperatur im Modell je Zone für das Material eingestellt werden muss, bieten sich verschiedenen Quellen an. Die Fachliteratur bietet Richtwerte für viele Materialien. Die Datenblätter geben meist ebenfalls Temperaturen für die einzelnen Zonen vor. Schließlich kann auf reale Daten aus dem Datenstamm der Produktion zurückgegriffen werden.

fen werden. Für die vergleichenden Simulationen werden hier die Daten aus der aktuellen Literatur verwendet, die folgend gelistet sind [JoMi2004]:

Tabelle 4 - 5: Literaturwerte für Verarbeitungstemperaturbereiche von PEEK und PP [JoMi2004]

Werkstoff	Solltemperaturen [°C]				
	Einzugszone	HZ 1	HZ 2	HZ 3	Düse
PEEK	120 – 140*	250 - 280	340 - 360	360 - 390	360 - 400
PP	20 - 30	150 - 210	210 - 250	240 - 290	240 - 300

*Vorgetrocknet bei 120 bis 150°C

Für die hier durchzuführenden Simulationen wird immer der höhere Wert als Vorgabe angesetzt. Die Temperaturen der Einzugszone stellen die Starttemperatur des Werkstoffes dar. Da die in diesen Beispielen betrachtete Kolbenspritzmaschine nur über drei Heizzonen verfügt (Plastifizierbereich, Dosierbereich, Düse), werden die Temperaturen der ersten Heizzone übersprungen. Für die drei Heizzonen ergeben sich demnach die folgenden Vorgaben:

Tabelle 4 - 6: für die Simulation gewählte Verarbeitungstemperaturen von PEEK und PP

Werkstoff	Zone			
	Starttemperatur	Solltemperatur Plastifizierbereich	Solltemperatur Dosierbereich	Solltemperatur Düse
PEEK	140	360	390	400
PP	30	250	290	300

Ein Abgleich mit dem Datenstamm der IES GmbH (siehe Anhang A) zeigt, dass die Literaturwerte für Heizzonentemperaturen für PEEK vergleichbar mit den Realdaten der Produktion sind. Allein die Starttemperatur wird in der Literatur höher angesetzt. Für PP sind die Literaturwerte insgesamt höher angesetzt als in der Produktion der IES GmbH. Dabei ist zu beachten, dass Realdaten nur für Schneckenextruder vorliegen und die Anzahl der Heizzonen hier variiert. Für eine einheitliche Basis werden für die Simulation die Literaturdaten verwendet. Für spätere Simulationen im Zuge des Projekts oder anderer Projekte können die Temperaturen im Modell angepasst werden.

4.2.3.5. Massenstrom und Zykluszeit

In Anlehnung an den Datenstamm aus der Produktion wird für alle Simulationen eine Zykluszeit von 20 Sekunden gewählt.

Wie schon erwähnt, verläuft der Massenstrom beim Spritzgießen nicht kontinuierlich. Daher wird ein in der Zykluszeit ein diskontinuierlicher Massenstrom gewählt. Dieser wird später variiert und die Ergebnisse miteinander verglichen. Bei dem Massenstromvergleich wird zunächst das Material PEEK bei einer Massenstromintensität von 0,0141 kg/s im Vergleich zum doppelten Massenstrom (0,0282 kg/s) bei gleicher Zykluszeit betrachtet. Als weitere mögli-

che Variable des diskontinuierlichen Massenstroms erfolgt zudem ein Vergleich des Einflusses des Massenstroms hinsichtlich des Verhältnisses von Massenstromdauer zur Zykluszeit. Das Ausgangsverhältnis ist ein Massenstrom von einer Sekunde bei einer Zykluszeit von 20 Sekunden. Dazu wird das Verhalten bei einem Massenstrom von einer Sekunde bei einer doppelten Zykluszeit von 40 Sekunden betrachtet.

4.2.4. Beispielsimulation

Anhand einer Beispielsimulation werden in diesem Kapitel das Vorgehen veranschaulicht und die erzeugten Ergebnisse auf Plausibilität überprüft. Da das Vorgehen unabhängig von der Heizzone, dem Material und dem Massenstrom ist, wird exemplarisch die Simulation nur einer Heizzone mit einem Material (PEEK) und einem Massenstrom (0,0414 kg/s) vorgestellt. Bei der später folgenden Ergebnisauswertung wird dasselbe Vorgehen für alle Modellvarianten angewandt.

Zunächst werden je nach Ausgangssituation, die in Kapitel 4.2.3 vorgestellten Kennwerte in den Komponenten hinterlegt. Dies wird im folgenden Bild beispielhaft für die Wärmeleitung des Zylinders in der ersten Heizzone dargestellt.

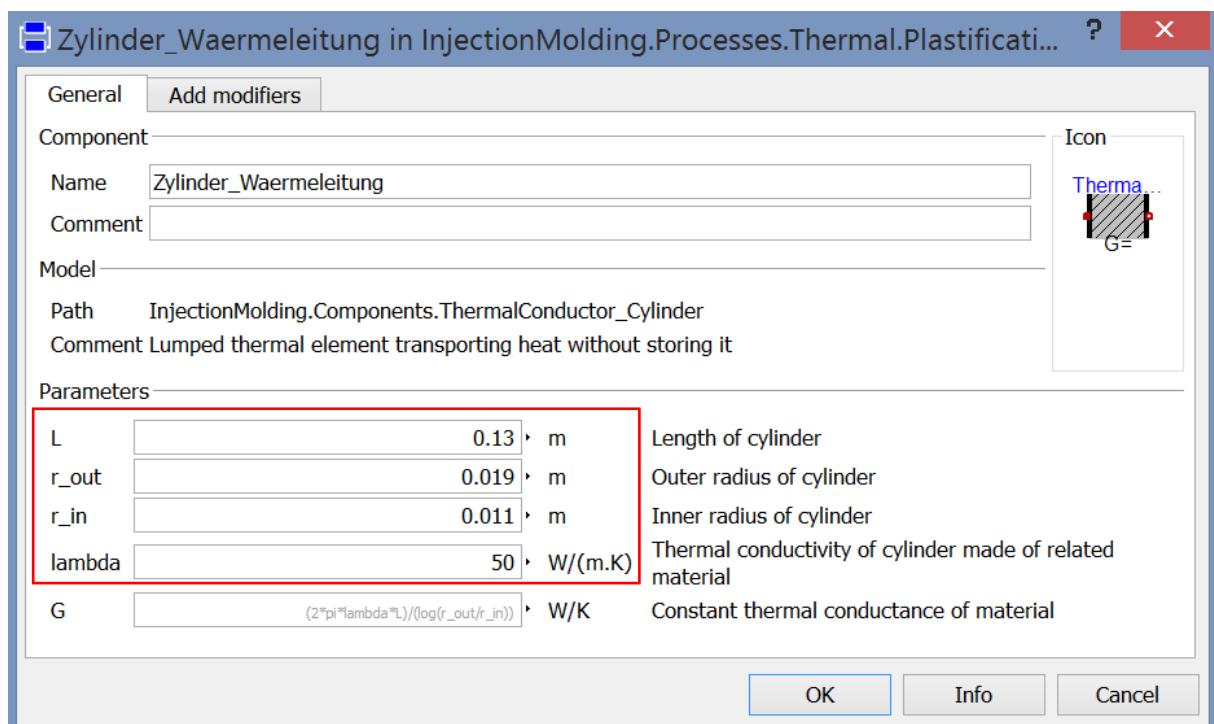


Abbildung 4 - 8: Parametereingabe; Zylinderwärmeleitung in der ersten Heizzone

4.2.4.1. Solltemperatur der Heizung

Wie bereits in Kapitel 4.2.1 erwähnt ist die Solltemperatur der Heizung von besonderer Bedeutung. Diese muss im Modell am Regler für die Heizung hinterlegt werden. Im Gegensatz zu den anderen

Parametern kann die Solltemperatur nicht ohne weitere Erfahrungswerte direkt zu Beginn hinterlegt werden. Vielmehr muss sie durch die Simulation iterativ bestimmt oder vorab mit den in Kapitel 4.1.3 vorgestellten Formeln berechnet werden. Folgend wird der Zusammenhang zwischen der Heizungstemperatur und der Temperatur des Massenstroms veranschaulicht.

Für die Solltemperatur ist vorerst ein Platzhalter einzugeben. Im ersten Simulationsbeispiel wird als Solltemperatur zunächst die Temperatur eingesetzt, die der Spritzgussmassenstrom in dieser Zone erreichen soll (hier 360°C). Sind zusätzlich alle Parameter zur Geometrie, zum Material, zu Temperaturen und Infrastruktur eingegeben, wird in die Simulationsansicht gewechselt.

Ein Teilergebnis der Simulation des Spritzgussprozesses ist die Dauer der Materialerwärmung auf Solltemperatur. Das heißt, dass die Dauer und somit die notwendige Simulationszeit zunächst nicht bekannt ist. Daher ist bei der ersten Simulation unter *Setup* eine ausreichend lange Simulationszeit in Sekunden zu wählen, die als Vorgabe für die Prozessdauer dient und später angepasst werden kann. Ein Anpassen der Simulationszeit ist dann notwendig, wenn die eingestellte Zeit nicht ausreicht, um den Aufheizprozess oder auch die gewünschte Anzahl Zyklen abzubilden. Schließlich wird über das Drücken der Schaltfläche *Simulate* die erste Simulation durchgeführt. Im *Variable Browser* kann man nun die einzelnen Komponenten öffnen und sich die Eingabeparameter wie auch die während der Simulation berechneten Werte in Diagrammen anzeigen lassen. Wählt man die eingegebene Solltemperatur für die Heizung, die zu erreichende Massestemperatur sowie die in am Massenstrom erreichte Temperatur in die Anzeige, stellen sich die Temperaturen in Abhängigkeit der Zeit wie folgt dar:

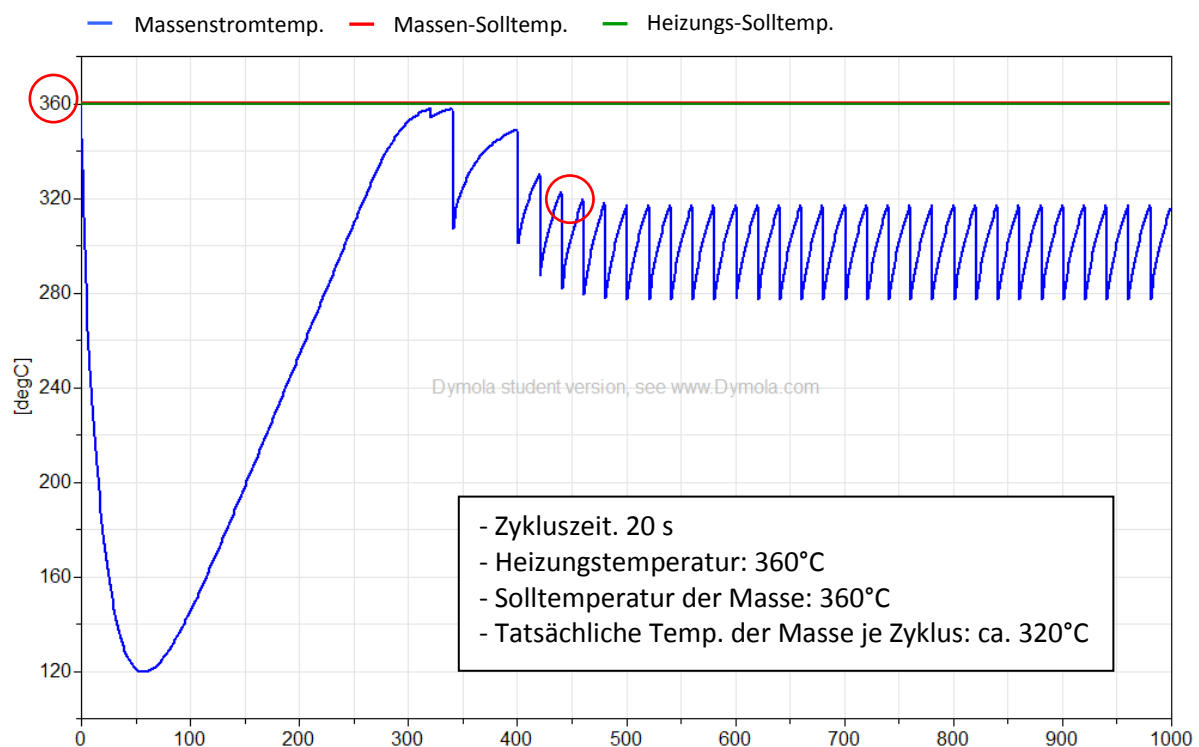


Abbildung 4 - 9: Verlauf der Temperaturen im Vergleich – eingestellte Heizungstemperatur ist noch nicht ausreichend, um die Solltemperatur zu erreichen (Simulationszeit 1000 s)

Das Diagramm zeigt die Temperaturen des Massenstroms, die Solltemperatur der Masse sowie die Solltemperatur der Heizung in Grad Celsius in Abhängigkeit der Zeit. Die simulierte Zeit beträgt 1000 Sekunden. Die Zykluszeit ist mit 20 Sekunden eingestellt. Wie der rote Kreis an der Temperaturachse aufzeigt, sind für die Solltemperatur der Masse sowie der Heizung 360°C vorgegeben. Der Verlauf der Temperatur zeigt das Erwärmen des Systems auf die an der Heizung eingestellte Solltemperatur bis ca. 320 Sekunden. Aufgrund dessen, dass die eingestellte Solltemperatur erstmalig erreicht wird, setzt der Massenstrom ein. Ab ca. 440 Sekunden stellt sich ein kontinuierlicher Zyklus ein, bei dem die Masse je Zyklus eine Temperatur von etwa 320°C erreicht (roter Kreis am Temperaturverlauf des Massenstroms).

Aus den Verläufen geht hervor, dass der Massenstrom die Solltemperatur der Masse nur einmal knapp erreicht und sich dann, nach etwa 450 Sekunden, bei jedem Zyklus auf eine Temperatur, etwa 40°C unter der Solltemperatur der Masse, einpendelt.

Daraus ist zu schließen, dass es nicht ausreicht, an der Heizung die Solltemperatur der Masse einzustellen, um in der Zykluszeit die Solltemperatur am Massenstrom zu erreichen. Die Temperaturdifferenz und der daraus folgende Wärmestrom zwischen Heizung und Massenstrom reichen folglich nicht aus, um in der vorgegebenen Zykluszeit den Massenstrom auf die Solltemperatur zu erwärmen. An der Heizung muss also eine höhere Temperatur gewählt werden als die Solltemperatur der Masse.

Durch das Berechnen oder auch das iterative Anpassen der Heizungstemperatur in der Simulation, kann die Temperatur ermittelt werden, die notwendig ist, um den Massenstrom nach jedem Zyklus auf die Solltemperatur zu bringen. Durch iterative Simulation wurde für dieses Beispiel eine Solltemperatur von 413°C berechnet. Diese Temperatur wird für die Heizung eingegeben. Für die Regelung des Einsetzens des Massenstroms muss dort entsprechend die Temperatur mit Toleranz eingesetzt werden. Die Toleranz sollte etwa $\pm 2^\circ\text{C}$ betragen. Dieser Toleranzbereich stellt sicher, dass Material die Verarbeitungstemperatur mit ausreichender Genauigkeit erreicht. Das Einstellen und Erreichen einer genauen Temperatur ohne Toleranz ist regelungstechnisch nicht realisierbar.

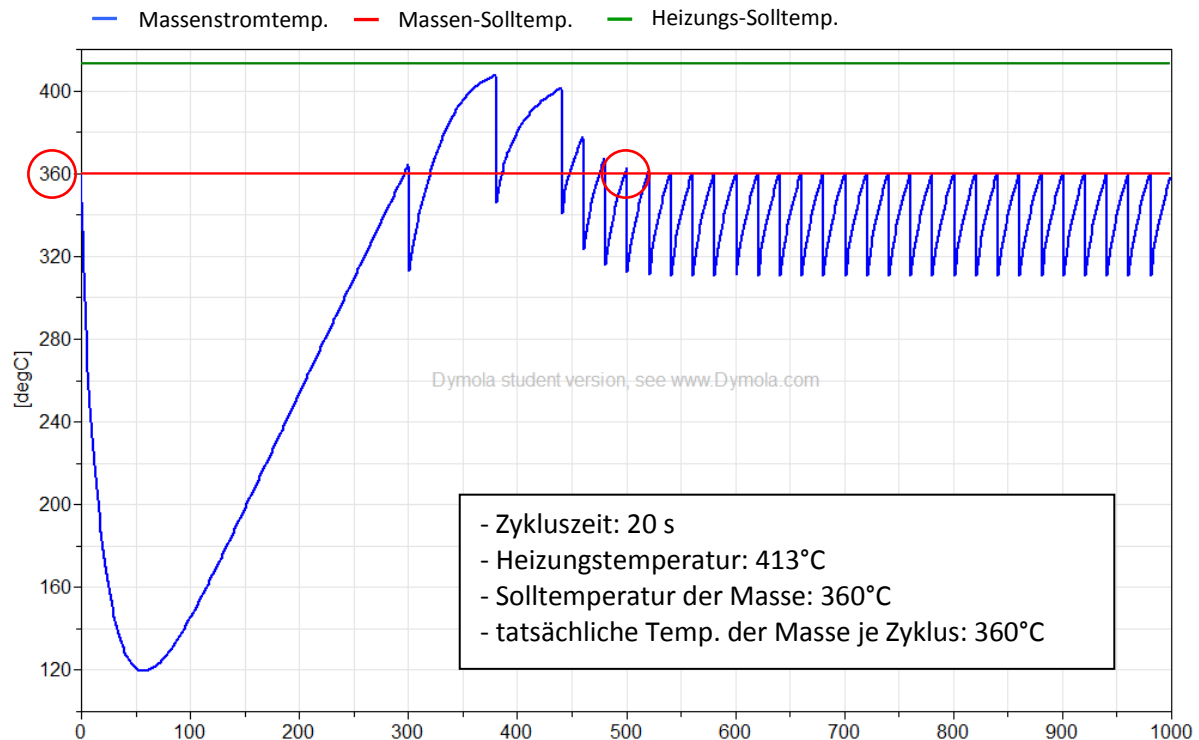


Abbildung 4 - 10: Verlauf der Temperaturen im Vergleich bei abgestimmter Solltemperatureinstellung (Simulationszeit 1000 s)

Das Diagramm zeigt die Temperaturen des Massestroms, die Solltemperatur der Masse sowie die Solltemperatur der Heizung in Grad Celsius in Abhängigkeit der Zeit. Die simulierte Zeit beträgt 1000 Sekunden. Die Zykluszeit ist mit 20 Sekunden eingestellt. Wie der rote Kreis an der Temperaturachse aufzeigt, sind für die Solltemperatur der Masse 360°C vorgegeben. Die angepasste Solltemperatur der Heizung ist nun mit 413°C eingestellt. Das Diagramm zeigt das Erwärmen des Systems auf die an der Heizung vorgegebene Solltemperatur bis ca. 300 Sekunden. Aufgrund dessen, dass die eingestellte Solltemperatur erstmalig erreicht wird, setzt der Massenstrom ein. Ab ca. 480 Sekunden stellt sich ein kontinuierlicher Zyklus ein, bei dem die Masse je Zyklus eine Temperatur von etwa 360°C erreicht (roter Kreis am Temperaturverlauf des Massenstroms).

Die Simulation mit der angepassten Heizungstemperatur zeigt, dass nun nach einer Aufheizphase von etwa 500 Sekunden nach jedem Zyklus die Solltemperatur des Massenstroms erreicht wird.

Wie aus den Formeln in Kapitel 4.1.3 hervorgeht, ist die notwendige Heizungstemperatur von den Wärmekapazitäten und Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Komponenten, den jeweiligen Ausgangstemperaturen sowie vom Massenstrom abhängig. Bei jeder Modellvariante ist demnach in Abhängigkeit der Rahmenbedingungen die Solltemperatur der Heizung neu zu berechnen.

4.2.4.2. Massenstrom

Der diskontinuierliche Verlauf des Massenstroms stellt sich über den Simulationszeitraum wie folgt dar:

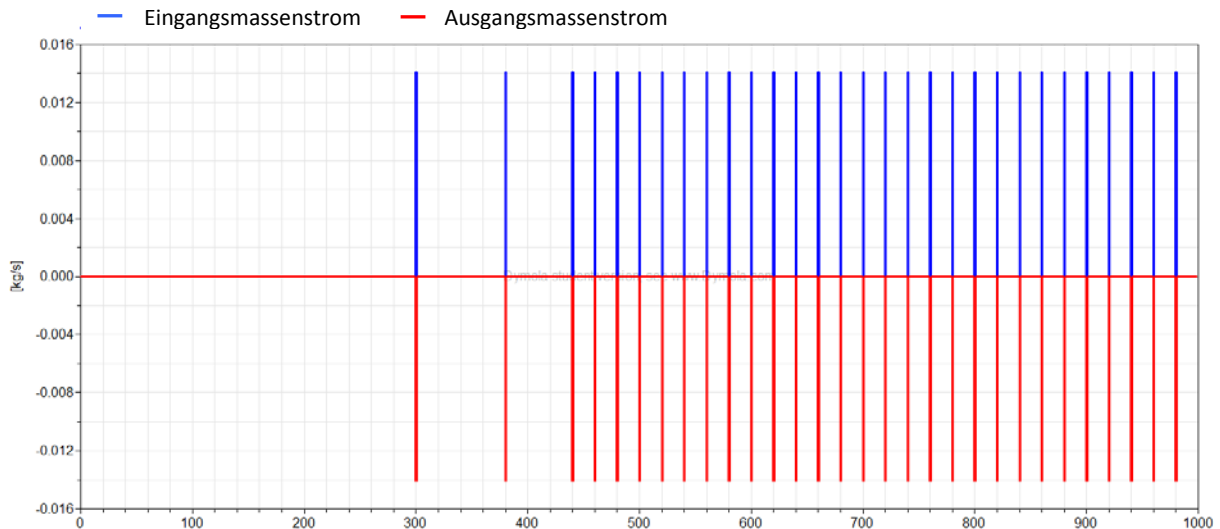


Abbildung 4 - 11: Masseneinsatz und Massenstromverlauf (Simulationszeit 1000 s)

Das Diagramm zeigt den Massenstrom in Kilogramm pro Sekunde in Abhängigkeit der Zeit. Die simulierte Zeit beträgt 1000 Sekunden. Die Zykluszeit ist mit 20 Sekunden eingestellt. Von den 20 Sekunden ist eine Sekunde der Massenstrom aktiv. Das System ist so geregelt, dass der Massenstrom erst dann einsetzt, wenn die eingestellte Heizungstemperatur $\pm 2^\circ\text{C}$ erreicht ist. In diesem Beispiel setzt dadurch der Massenstrom das erste Mal nach ca. 300 Sekunden ein. Da die Solltemperatur aber aufgrund der Trägheit des Systems mehrfach über das Toleranzband hinaus unterschritten wird, setzt der Massenstrom wieder aus. Ein konstanter Einsatz des diskontinuierlichen Massenstroms erfolgt erst nach 440 Sekunden. Hier ist zu bemerken, dass die Soll-Vorgaben für einen Zyklus erst dann vollständig erfüllt sind, wenn in der Zykluszeit auch die Solltemperatur erreicht wird. Dies ist hier erst nach 500 Sekunden der Fall. Zu dem Zeitpunkt haben bereits fünf Massenstrom-Zyklen stattgefunden. Die in dieser Zeit produzierten Teile sind als Ausschuss zu betrachten.

4.2.4.3. Resultierende Temperaturen und Wärmeströme je Komponente

Die Temperatureinstellung und der sich einstellende Wärmestrom haben natürlich nicht nur Auswirkungen auf die Spritzgussmasse, sondern auch auf die Temperaturen aller anderen Komponenten. Im folgenden Diagramm ist abgebildet, wie sich die eingestellte Temperatur und der vorgegebene Massenstrom auf die Temperaturen der Komponenten auswirken.

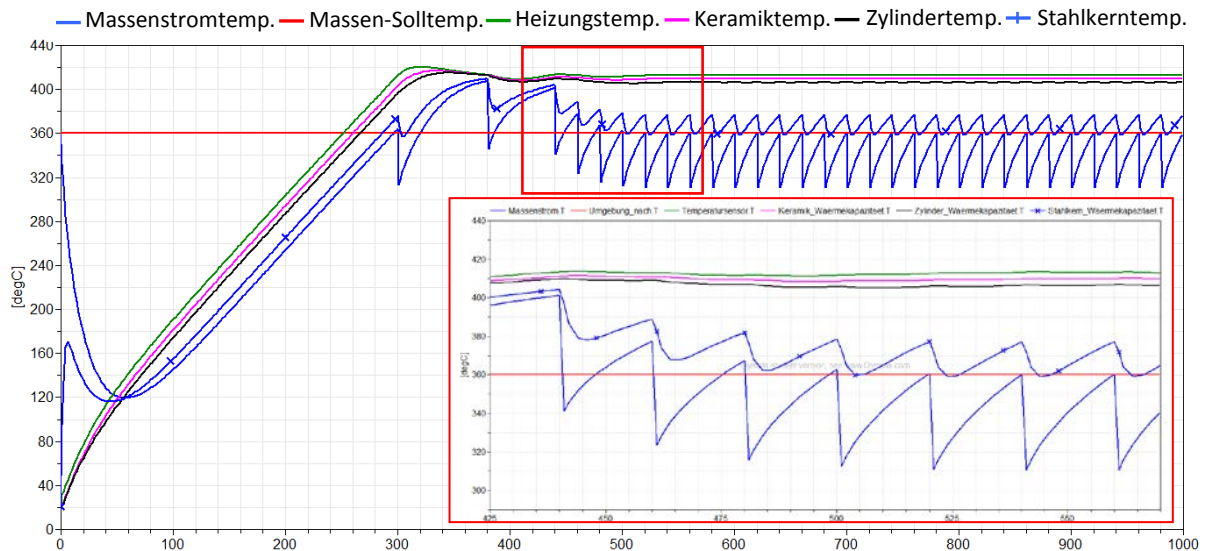


Abbildung 4 - 12: Verlauf der Temperaturen der Komponenten und der Masse, Überblick und Detailauschnitt (Simulationszeit 1000 s)

Das Diagramm zeigt die Temperaturen der Komponenten und der Masse, die Solltemperatur der Masse und die Solltemperatur der Heizung in Grad Celsius in Abhängigkeit der Zeit. Die simulierte Zeit beträgt 1000 Sekunden. Die Zykluszeit ist mit 20 Sekunden eingestellt. Für die Solltemperatur der Masse sind 360°C vorgegeben. Die an der Heizung eingestellte Solltemperatur beträgt 413°C. Das Diagramm zeigt das Erwärmen des Systems bis die Heizung die vergebene Solltemperatur erreicht. Nach 300 Sekunden setzt erstmalig der Massenstrom ein. Nach 480 Sekunden stellt sich hinsichtlich der Temperatur ein kontinuierlicher Zyklus innerhalb der Zykluszeit ein, bei dem die Masse je Zyklus eine Temperatur von etwa 360°C erreicht.

Die Temperatur des Massenstroms sowie die Solltemperatur der Masse sind bereits aus den vorhergegangenen Diagrammen bekannt. Anstatt der Solltemperatur der Heizung sind hier die Ist-Temperatur an der Heizung sowie zusätzlich die Temperaturen des Keramikmantels, des Zylinders und der Stahlkugeln in der Heizzone 1 dargestellt. Die Simulation zeigt, dass durch den diskontinuierlichen Massenstrom die Stahlkugeln am meisten in ihrer Temperatur beeinflusst werden. Dies ist auf den direkten Kontakt zur Spritzgussmasse und auf das Massenverhältnis zurückzuführen. Aus dem Detail wird ersichtlich, dass die Temperaturen der weiteren Komponenten ebenfalls beeinflusst werden. Diese reagiert jedoch in Abhängigkeit der Massen und der dazwischenliegenden Wärmekapazitäten langsamer auf die Veränderung des Wärmestroms. Dies spiegelt sich auch in den Verläufen der Wärmeströme durch die Komponenten und in der Spritzgussmasse wider:

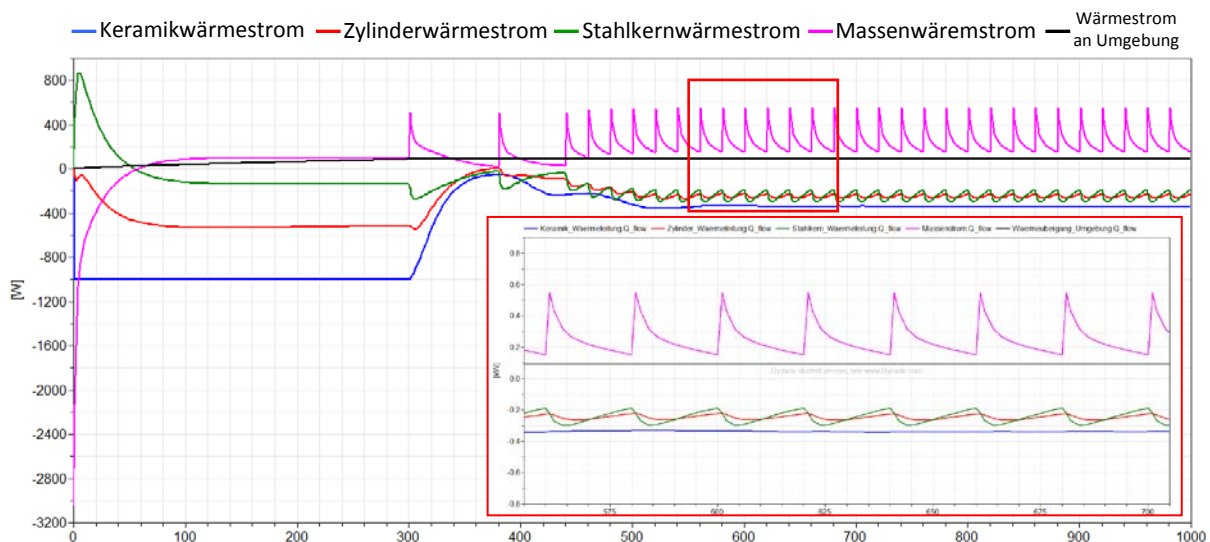


Abbildung 4 - 13: Verlauf der Wärmeströme durch die Komponenten und die Masse, Überblick und Detailausschnitt (Simulationszeit 1000 s)

Im Diagramm ist, äquivalent zu Abbildung 4-10, der simulierte Verlauf der Wärmeströme dargestellt. Das Diagramm zeigt die Wärmeströme durch die verschiedenen Komponenten, den Wärmestrom in die Masse hinein, wie auch den Wärmestrom, der an die Umgebung abgegeben wird. Die Wärmeströme sind in Abhängigkeit zur Zeit abgebildet und in Watt angegeben. Die simulierte Zeit beträgt 1000 Sekunden. Die Zykluszeit ist mit 20 Sekunden eingestellt. Der Verlauf der Wärmeströme korreliert mit dem Verlauf des Massenstroms. Zunächst wird die Wärme über die Komponenten in die Masse geleitet, bis die Heizung erstmalig die Solltemperatur erreicht. Der nach 300 Sekunden erstmalig einsetzende Massenstrom hat einen Einfluss auf die Wärmeleitung durch alle Komponenten. Die steigende Temperaturdifferenz zur Spritzgussmasse aufgrund des diskontinuierlichen Massenstroms hat einen Anstieg des Wärmestroms zur Folge. Ein Anstieg der Wärmezufuhr wird durch die geregelte Heizung gewährleistet.

4.2.4.4. Spannungszufuhr an der Heizung

Die Regelung der Heizung beeinflusst die Spannung, die an der Heizung anliegt. Es wird die Spannung eingestellt, die notwendig ist, um die Solltemperatur der Heizung zunächst erstmalig und dann nach Einsetzen des Massenstroms immer wieder zu erreichen. Die maximale Spannung beträgt 230V. Über einen Simulationszeitraum von 1000 Sekunden wird der folgende Spannungsverlauf eingestellt:

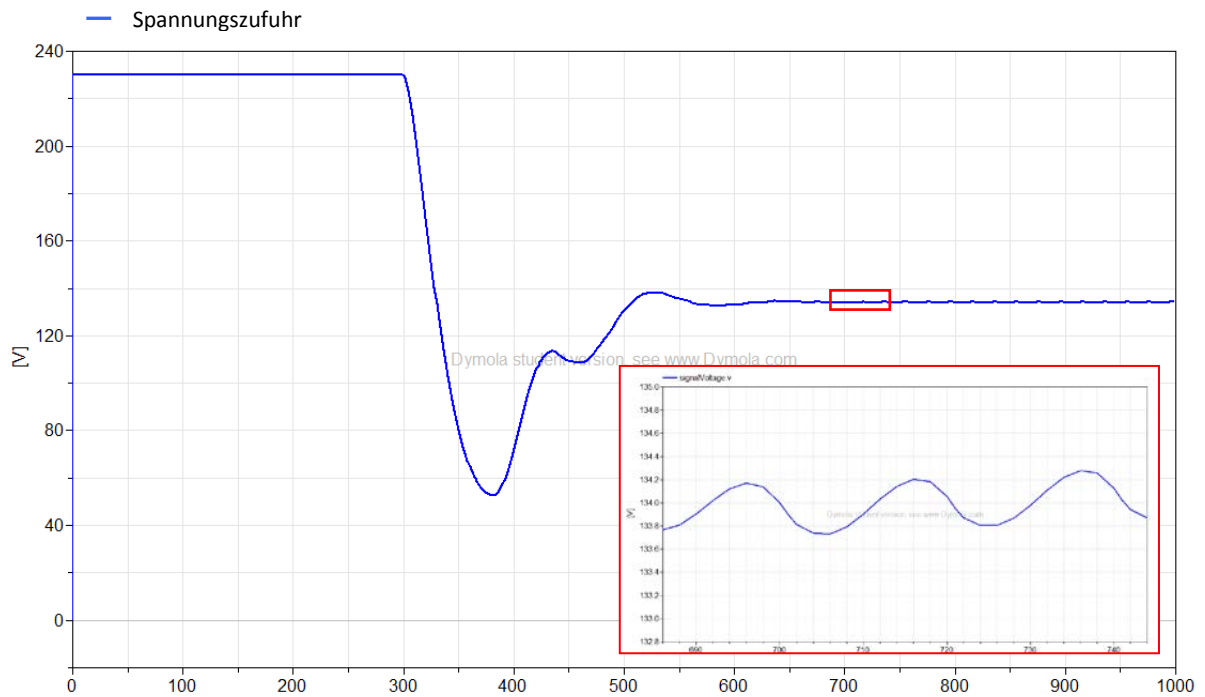


Abbildung 4 - 14: Verlauf der Spannungszufuhr zum System, Überblick und Detailausschnitt (Simulationszeit 1000 s)

Das Diagramm zeigt die Spannungszufuhr zur Heizung in Volt in Abhängigkeit zur Zeit. Die simulierte Zeit beträgt 1000 Sekunden. Als maximale dem System zuführbare Spannung sind 230 Volt eingestellt. Die Spannungszufuhr ist über einen Regler mit der Solltemperatur der Heizung verknüpft. Aus dem Diagramm geht hervor, dass über eine Dauer von 300 Sekunden der Heizung die maximale Spannung von 230 V anliegt. Danach fällt die Spannung kurzfristig ab und stellt sich dann auf eine Spannungszufuhr von 134 Volt ein. Die zunächst konstante Spannungszufuhr von 230 Volt ist darauf zurückzuführen, dass die volle Spannung benötigt wird, um das System zunächst auf die Solltemperatur zu bringen. Da das System kurzzeitig überhitzt wird und die Heizung weniger Wärme einbringen muss, fällt die Spannung zunächst ab. Mit dem einsetzenden Massenstrom stellt sich die Spannungszufuhr um 134 Volt ein. Diese wird kontinuierlich nachgeregelt. Wie aus dem Detail ersichtlich wird, erfolgt eine permanente Nachregelung der Spannung aufgrund der Wärmeleitung an den Massenstrom.

4.2.4.5. Energieeinsatz

Aus der benötigten Spannungszufuhr und dem installierten Widerstand der Heizung resultiert die Leistungszufuhr an das System. Da der Widerstand gleich bleibt, verläuft die Leistung analog zur Spannung:

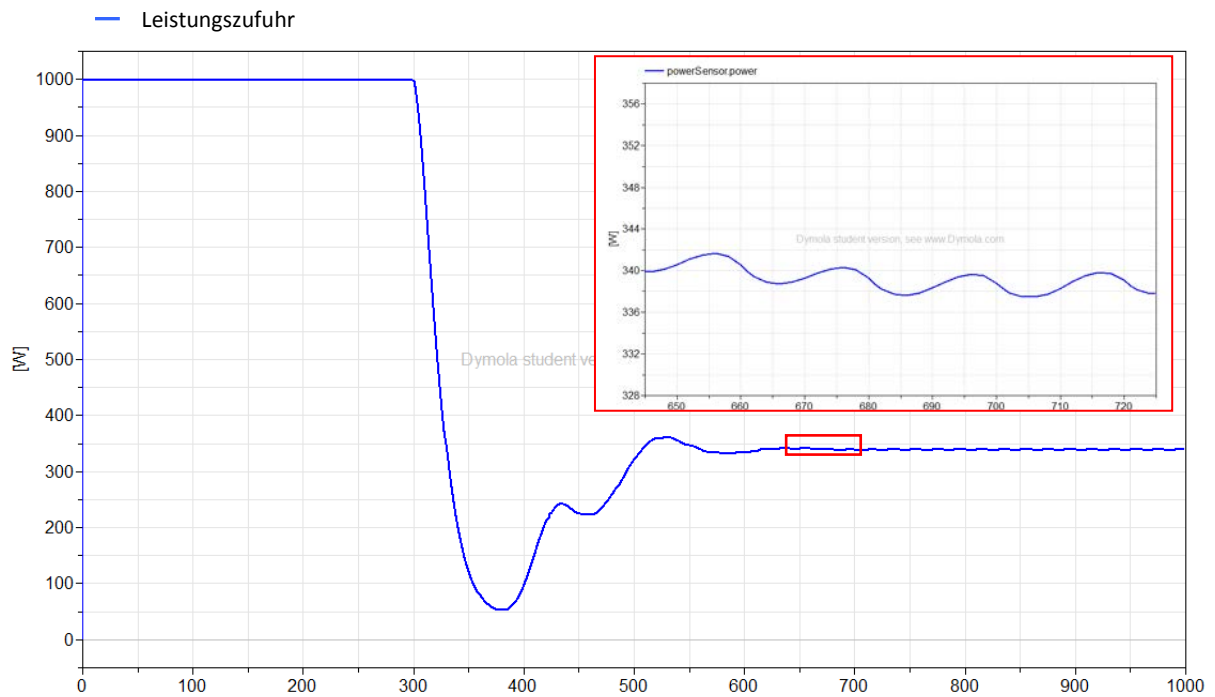


Abbildung 4 - 15: Verlauf der Leistungszufuhr, Überblick und Detailausschnitt (Simulationszeit 1000 s)

Das Diagramm zeigt die Leistungszufuhr zur Heizung in Watt in Abhängigkeit zur Zeit. Die simulierte Zeit beträgt 1000 Sekunden. Die Leistung ist eine Funktion der Spannungszufuhr sowie des Widerstandes ($P = U^2/R$). Da der Widerstand konstant ist, ist der Verlauf der Leistung analog zum Verlauf der Spannung.

Über die Integration der Leistung über die Zeit erhält man die eingesetzte Energie.

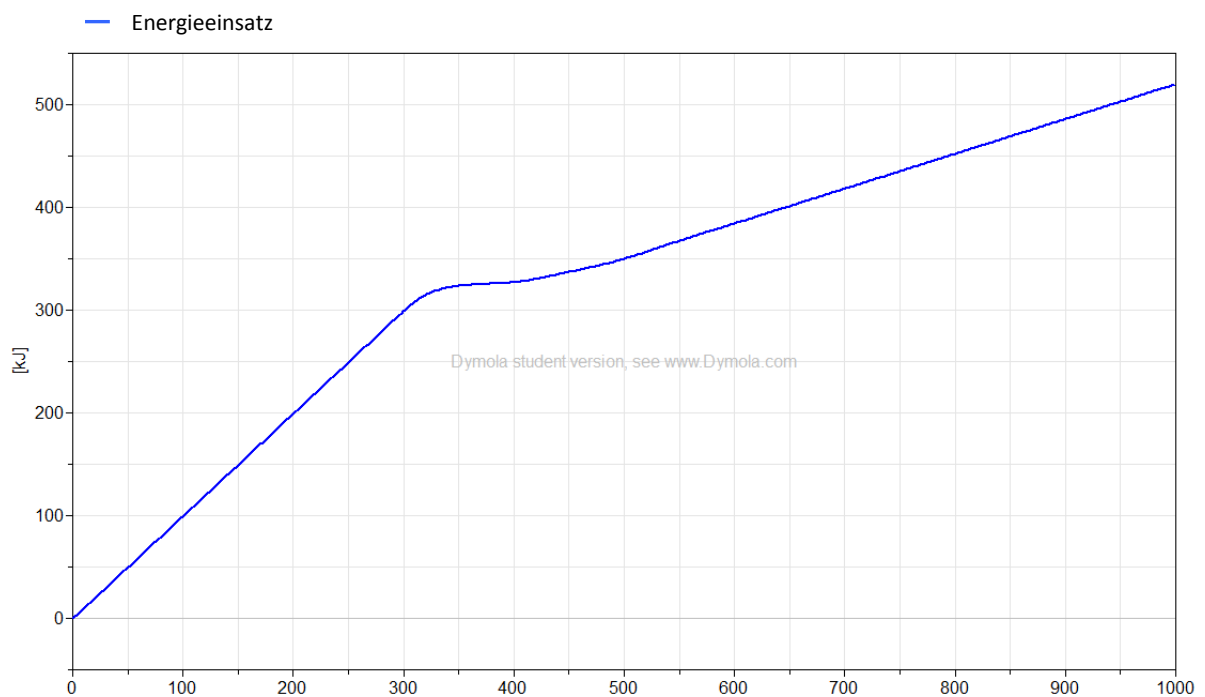


Abbildung 4 - 16: Verlauf des Energieeinsatzes (Simulationszeit 1000 s)

Das Diagramm zeigt den Energieeinsatz in Kilojoule in Abhängigkeit zur Zeit. Die zu erreichende Solltemperatur nach jedem Zyklus ist mit 360°C vorgegeben. Die simulierte Zeit beträgt 1000 Sekunden. Dies beinhaltet die Aufheizphase, das Einstellen des Massenstroms sowie das kontinuierliche Erwärmen des Massenstroms über mehrere Zyklen (bei einer Simulationszeit von 1000 s werden in der ersten Heizzone 25 vollständige Zyklen abgeschlossen).

Die eingesetzte Energie steigt stetig an. Nach 300 Sekunden stagniert der Energieeinsatz kurzfristig und steigt dann geringer, aber immer noch stetig an. Der Verlauf ist durch die folgenden Abhängigkeiten zu erklären: Für die Aufheizphase wird die maximal mögliche Leistung pro Zeit in das System eingebracht. Dementsprechend hoch ist die eingebrachte Energie. Aufgrund der geringen Leistungszufuhr nach dem Einstellen des Zyklus steigt auch der Energiebedarf langsamer an. So lässt sich schließlich aussagen, dass mit den oben genannten Parametern zur Erwärmung des Systems in der ersten Heizzone, und das Erwärmen von 25 Zyklen des Spritzgusswerkstoffes PEEK, ein Energieeinsatz von etwa 520 kJ benötigt wird.

Die in den letzten Absätzen beschriebenen Einstellungen und Ansätze zur Auswertung werden auf alle Modellvarianten übertragen und angewandt. Welche Varianten betrachtet werden, wird jeweils in Tabellen vorgestellt. Die jeweiligen Diagramme sind zur Information im Anhang (Anhang VI.I) hinterlegt. Im Zuge der nächsten beiden Kapitel werden die Daten aller Varianten in Hinblick auf den benötigten Energieaufwand ausgewertet.

4.3. Variantenvergleich hinsichtlich des Energiebedarfs

Aufbauend auf das Grundmodell werden nun verschiedene Varianten betrachtet. Der Massenstrom wird dabei stets als diskontinuierlich angenommen.

Zunächst erfolgt die Simulation des Plastifizierens von zwei verschiedenen Materialien im Vergleich. Als Beispiele für den Materialvergleich werden die Spritzgießwerkstoffe PEEK und PP gewählt. Anschließend erfolgt das Variieren der Massenstromintensität bzw. der Vergleich der entsprechenden Simulationsergebnisse. Schließlich wird das Verhältnis von Massenstromdauer zur Zykluszeit variiert und der Einfluss auf den Energiebedarf analysiert.

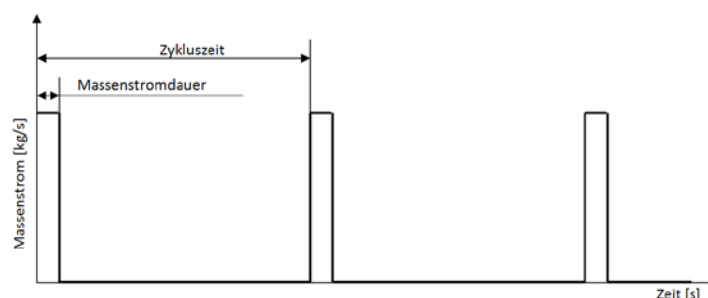


Abbildung 4 - 17: Zyklus mit diskontinuierlichem Massenstrom

Die Abbildung 4 - 17 stellt einen Zyklus mit diskontinuierlichem Massenstrom dar. Diskontinuierlich heißt, dass der Massenstrom während eines Zyklus nicht konstant ist bzw. nur anteilig zur Zykluszeit stattfindet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass immer nur dann Masse durch das System bewegt wird, wenn ein Schuss in das Werkzeug stattfindet. Die Masse je Schuss, also die Bauteilmasse, wirkt sich somit ebenfalls auf den Massenstrom aus.

4.3.1. Energieaufwand in Abhängigkeit des Thermoplasts

Im ersten Variantenvergleich wird der Energiebedarf beim Plastifizieren für die Materialien PEEK und PP miteinander verglichen. Für den Vergleich wird das Grundmodell verwendet. Die Änderung des Materials bringt zum einen eine Änderung der Materialeigenschaften zum anderen auch unterschiedliche Verarbeitungstemperaturen mit sich. Die Variation der Modelle ergibt sich daher aus der Veränderung dieser Parameter (Vergl. Tabelle 4-4 und Tabelle 4-6).

Für die Solltemperaturen der Heizung ($T_{\text{Soll,Heiz}}$) werden in Abhängigkeit der Solltemperaturen der Materialien ($T_{\text{Soll,Masse}}$) je Heizzone die folgenden Werte verwendet:

Tabelle 4 - 7: Solltemperaturen der Heizung [°C]; Materialvergleich

Werkstoff	Heizzone 1		Heizzone 2		Heizzone 3	
	$T_{\text{Soll,Heiz}}$	$T_{\text{Soll,Masse}}$	$T_{\text{Soll,Heiz}}$	$T_{\text{Soll,Masse}}$	$T_{\text{Soll,Heiz}}$	$T_{\text{Soll,Masse}}$
PEEK	413	360	395	390	402	400
PP	276	250	293	290	301	300

Für den Vergleich des Energieaufwandes wird nun je Material die folgende Frage zu Grunde gelegt:

Wieviel Energie muss eingesetzt werden, um das System auf Betriebstemperatur zu bringen, bis ein diskontinuierlicher Massenstrom mit einer Zykluszeit von 20 Sekunden auf die Solltemperatur des Materials erwärmt werden kann?

Die Massenströme sind bei dem Vergleich je Heizzone für beide Materialien gleich. Ein Sollzyklus liegt dann vor, wenn in der vorgegebenen Zykluszeit der Massenstrom des Spritzgussmaterials auf die Solltemperatur erwärmt wurde. Solange die Bedingung noch nicht erfüllt ist, befindet sich das System noch immer in der Aufheiz- bzw. Einlaufphase. Betrachtet man die Temperaturverläufe für alle drei Heizzonen (Anhang VI.I.I und VI.I.II), stellt man fest, dass das erstmalige Erreichen der Solltemperatur innerhalb der Zykluszeit in jeder Heizzone zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfüllt ist. Maßgebend für das Ende der Aufheiz- bzw. Einlaufphase ist daher die Heizzone, die zuletzt diesen Zustand erreicht. Ein weiterer Unterschied ist die Anzahl der Zyklen, die bereits stattgefunden haben, ohne in der Zykluszeit die Solltemperatur zu erreichen (Ausschusszyklus = n_A). Zusammengefasst aus den Simulationen für die einzelnen Materialien und die einzelnen Zonen stellen sich die folgenden Aufheizzeiten (t_A) und Ausschusszyklen ein:

Tabelle 4 - 8: Aufheizzeiten je Heizzone [s]; Materialvergleich

Werkstoff	Heizzone 1		Heizzone 2		Heizzone 3	
	t_{A1} [s]	n_{AS1}	t_{A1} [s]	n_{AS1}	t_{A1} [s]	n_{AS1}
PEEK	500	5	400	5	500	3
PP	420	3	540	5	470	4

Folglich ist bei der Betrachtung des Gesamtprozesses (d.h. über alle drei Heizzonen) die Aufheizphase bei PEEK nach 500 Sekunden (8,3 Minuten) und bei PP nach 540 Sekunden (9 Minuten) abgeschlossen. Nach diesen Zeiten wird in jeder Heizzone die vorgeschriebene Verarbeitungstemperatur in der vorgegebenen Zykluszeit erreicht.

Diese Dauer der Aufheizphase stellt nun die Testdauer (t_T) für den Vergleich dar. Sie ist der Eingangswert für die erste Auswertung des Energiebedarfs. Nach den Simulationen der verschiedenen Varianten (Material je Heizzone) kann nun nämlich der Energiebedarf für die Testdauer abgelesen werden. Im folgenden Diagramm ist dies für die Aufheizphase dargestellt.

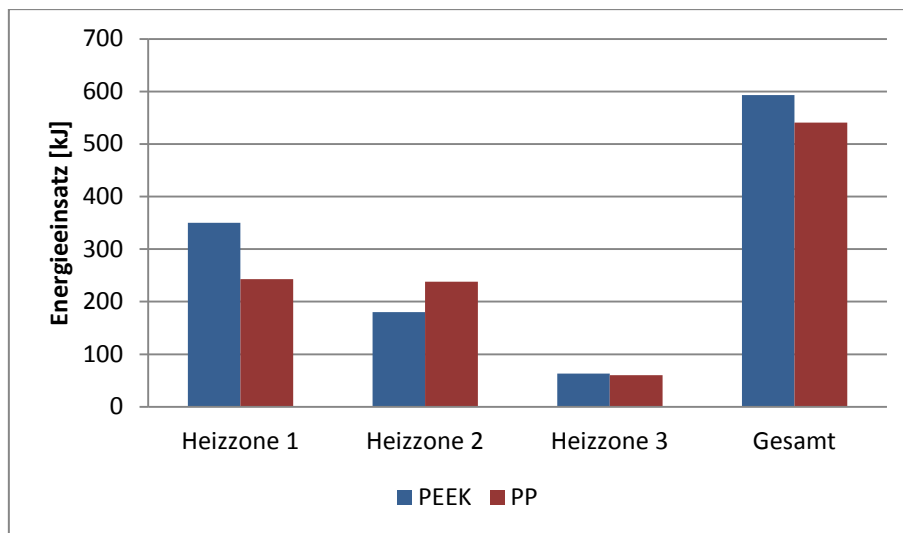


Abbildung 4 - 18: Energieeinsatz für die Aufheizphase für PEEK ($T_A = 500$ s) und PP ($T_A = 540$ s)

Das Balkendiagramm zeigt den Energieeinsatz für die Aufheizphase in Abhängigkeit der Heizzone und des Materials. Der Energieeinsatz ist in Kilojoule dargestellt. Für die Aufheizphase sind für PEEK die Zeit von 500 Sekunden und für PP die Zeit von 540 Sekunden zugrundegelegt. Die verwendeten Parameter sind aus den Tabellen in Kapitel 4.2.3 zu entnehmen.

Aus dem Verhältnis des Energieeinsatzes geht hervor, dass für die Heizzonen eins und drei für PEEK ein höherer Energieeinsatz nötig ist als für PP. In der Heizzone ist der Energieeinsatz für das Erwärmen von PP höher als für das Erwärmen von PEEK. Der Gesamtenergiebedarf für das Aufheizen von PEEK ist höher als für PP. Dieses Ergebnis ist plausibel, da die zu erreichenden Temperaturniveaus bei beiden Werkstoffen unterschiedlich hoch sind. Für den Werkstoff PEEK muss das System um 100 Grad Celsius mehr erwärmt werden als bei dem Werkstoff PP (Vgl. Tabelle 4-7). Der mit der Heizzone abnehmende Energieaufwand ist auf

verschiedene Gründe zurückzuführen. Zum einen spielt hier die Masse der Komponenten eine Rolle. Je mehr Masse der Komponenten erwärmt werden muss, desto mehr Energie wird benötigt. Die erste Heizzone stellt den der Plastifiziereinheit dar, welche die meisten Komponenten und die höchste Masse hat. Danach folgt die Heizzone 1 und dann die Heizzone 2. Zum anderen ist der Energieaufwand von der Temperaturdifferenz zur vorherigen Zone abhängig. Bei beiden Materialien liegt die größte zu überwindende Temperaturdifferenz in der ersten Heizzone vor und nimmt dann mit den Heizzonen ab. In der zweiten Zone ist die Temperaturdifferenz bei PP größer als bei PEEK, womit zu erklären ist, warum hier der Energiebedarf für PP größer ist.

Des Weiteren ist zu berücksichtigen, ob bereits ein Massenstrom eintritt, ohne die Solltemperatur in der Sollzykluszeit zu erreichen. Dies ist dann der Fall, wenn die Solltemperatur bereits einmal erreicht wurde, aber noch nicht in der Zykluszeit die Solltemperatur der Masse erreicht wird. Das heißt, der Aufheizprozess ist noch nicht beendet, aber ein Massenstrom findet bereits statt. Der einsetzende Massenstrom hat dann ebenfalls Einfluss auf die Aufheizenergie.

Der Einfluss des Massenstroms auf den Prozess wird folgend genauer betrachtet. Dazu ist durch Simulation berechnet worden, wieviel Energie bei einer Zykluszeit von 20 Sekunden für das Plastifizieren von zehn Soll-Zyklen eingesetzt werden muss.

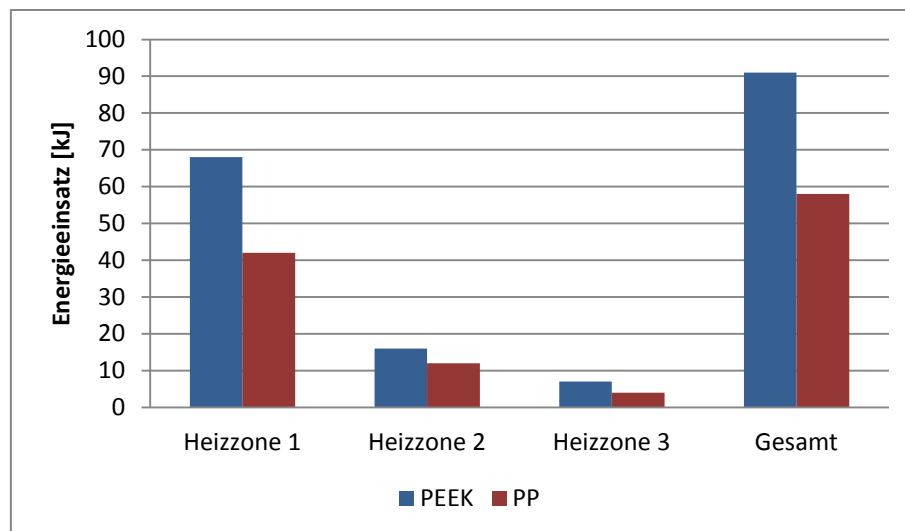


Abbildung 4 - 19: Energieeinsatz für 10 Zyklen gleicher Dauer und gleichen Massenstroms für PEEK und PP

Das Balkendiagramm zeigt den Energieeinsatz für zehn Soll-Zyklen in Abhängigkeit der Heizzone und des Materials. Der Energieeinsatz ist in Kilojoule dargestellt. Für zehn Zyklen ist eine Dauer von 200 Sekunden nach der Aufheizphase zugrunde gelegt. Die verwendeten Parameter sind aus den Tabellen in Kapitel 4.2.3 zu entnehmen.

Aus dem Verhältnis des Energieeinsatzes geht hervor, dass für die Erwärmung von zehn Zyklen des Materials PEEK mehr Energie eingesetzt werden muss als für zehn Zyklen des Materials PP. Dieses Verhältnis ist in erster Linie erneut auf die höheren Verarbeitungstemperaturen von PEEK zurückzuführen. Auch wenn die Temperaturdifferenzen zwischen den Heizzo-

nen vergleichsweise ähnlich sind, muss für die Erwärmung von PEEK jedoch konstant eine höhere Temperatur und somit auch eine höhere Leistung erbracht werden. Da die Temperaturdifferenz von Eingangs- zu Ausgangstemperatur des Massenstroms mit den Heizzonen geringer wird, wird auch der Energieeinsatz von Zone zu Zone geringer.

4.3.2. Energieaufwand in Abhängigkeit des Massenstroms

Im zweiten Variantenvergleich wird der Massenstrom verändert und dessen Einfluss auf den Energiebedarf bewerten zu können. Alle anderen Parameter bleiben wie in der Ausgangsvariante. Die Betrachtung erfolgt ausschließlich für den Werkstoff PEEK. Für einen einfachen Vergleich wird der Massenstrom verdoppelt. Das heißt, dass bei sonst gleichen Prozessparametern der Durchsatz der Masse doppelt so groß ist. Die Dauer des Massenstroms anteilig am Zyklus bleibt dabei gleich. Zusammengefasst werden demnach die beiden in der folgenden Tabelle aufgeführten Varianten betrachtet:

Tabelle 4 - 9: gewählte Massenströme bei gleichbleibender Zykluszeit

Merkmalsvariante	Zykluszeit [s]	Dauer des Massenstroms in % der Zykluszeit	Massenstrom [kg/s]	Erläuterung
I (Ausgangsvariante)	20	5 (± 1 s)	0,0141	Von einer Zyklusdauer von 20 Sekunden findet 1 Sekunde ein Massenstrom von 0,014 kg/s statt.
II	20	5 (± 1 s)	0,0282	doppelter Massenstrom bei selber Zykluszeit wie in I

In beiden Fällen wird eine Zyklusdauer von 20 Sekunden gewählt. In der ersten Variante beträgt der Massenstrom 0,0141 kg/s, in der zweiten Variante 0,0282 kg/s. Entsprechend des erhöhten Massenstroms sind andere Heizungstemperaturen notwendig, um den Massenstrom in der Zykluszeit auf die Solltemperatur zu erwärmen. Diese sind in der folgenden Tabelle im Vergleich zur Ausgangsvariante (Massenstrom I) aufgeführt:

Tabelle 4 - 10: Solltemperaturen der Heizung [°C]; Massenstromvergleich

Werkstoff	Heizzone 1		Heizzone 2		Heizzone 3	
	T _{Soll,Heiz}	T _{Soll,Masse}	T _{Soll,Heiz}	T _{Soll,Masse}	T _{Soll,Heiz}	T _{Soll,Masse}
Massenstrom I	413	360	395	390	402	400
Massenstrom II	452	250	396	290	402	300

Wie im Vergleich der Werkstoffe ist auch hier das Ende der Aufheizphase von der Zone abhängig, die zuletzt die Solltemperatur in der Zykluszeit erreicht. Für den zweiten Massenstrom ist dies die Heizzone 1. Zusammengefasst stellen sich je Zone die folgenden Aufheizzeiten und Ausschusszyklen ein:

Tabelle 4 - 11: Aufheizzeiten je Heizzone [s]; Massenstromvergleich

Werkstoff	Heizzone 1		Heizzone 2		Heizzone 3	
	t_{A1}	n_{AS1}	t_{A2}	n_{AS2}	t_{A3}	n_{AS3}
Massenstrom I	500	5	400	5	500	3
Massenstrom II	700	6	400	4	520	4

Schließlich kann der Energieeinsatz für den zweiten Massenstrom mittels Simulation berechnet und mit der Ausgangsvariante verglichen werden.

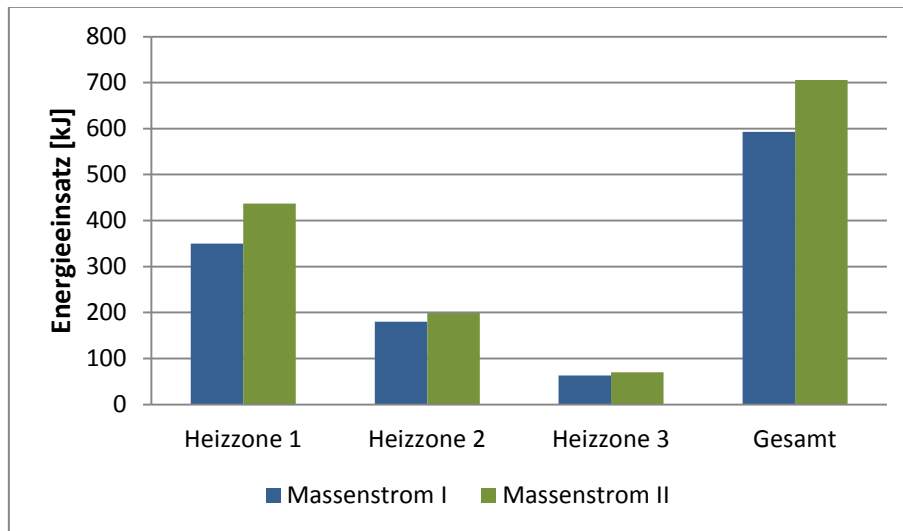


Abbildung 4 - 20: Energieeinsatz für die Aufheizphase in Abhängigkeit des Massenstroms (Varianten I und II)

Das Balkendiagramm zeigt den Energieeinsatz für die Aufheizphase in Abhängigkeit der Heizzone und des Massenstroms. Der Energieeinsatz ist in Kilojoule dargestellt. Für die Aufheizphase sind für den ersten Massenstrom eine Dauer von 500 Sekunden und für den zweiten Massenstrom eine Dauer von 700 Sekunden zugrundegelegt. Die weiteren verwendeten Parameter sind aus den Tabellen in Kapitel 4.2.3 zu entnehmen.

Für die Aufheizphase zeigen sich Unterschiede im Energiebedarf für alle drei Zonen wie auch für den Gesamtenergiebedarf. Dies erscheint zunächst nicht plausibel, da es sich hier nur um die Aufheizphase handelt, welche erstmal unabhängig vom Massenstrom ist. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass bei der Regelung des Modells auch bereits dann ein Massenstrom eintritt, wenn das System das erste Mal die Heizungstemperatur erreicht. So setzt während der Aufheizphase bereits vereinzelt ein Massenstrom ein, der allerdings nicht in der Zykluszeit auf die Solltemperatur erwärmt wird. Bei erhöhtem Massenstrom hat dies einen größeren Einfluss auf die Temperatur des Systems und somit auch auf den Energiebedarf der Heizung. Dies ergibt den Unterschied im Energiebedarf schon während der Aufheizphase.

Der tatsächliche Einfluss des Massenstroms auf den Energiebedarf wird erst beim Betrachten der Zyklen sichtbar. Dazu wurde auch in diesem Vergleich mittels Simulation der Energiebedarf für zehn Soll-Zyklen je Massenstrom berechnet.

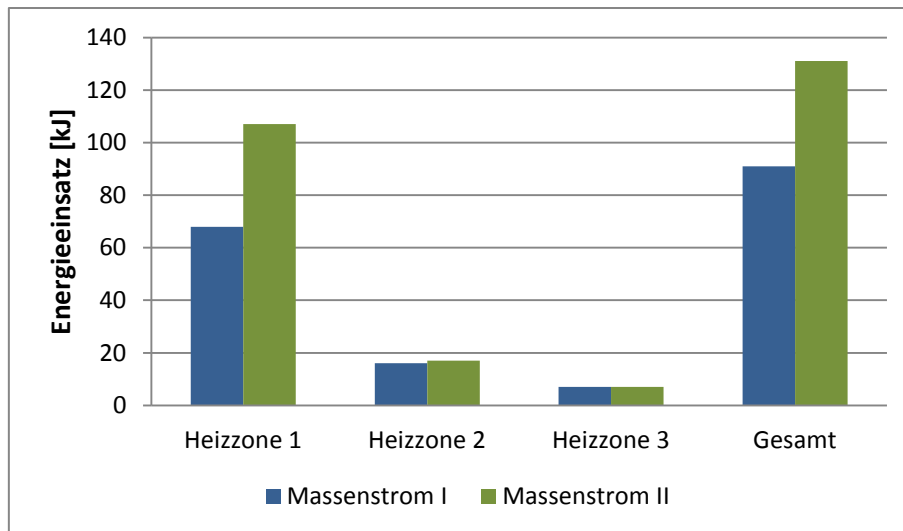


Abbildung 4 - 21: Energieeinsatz für 10 Zyklen in Abhängigkeit des Massenstroms (Variante I und II)

Das Balkendiagramm zeigt den Energieeinsatz für zehn Soll-Zyklen in Abhängigkeit der Heizzone und des Massenstroms. Der Energieeinsatz ist in Kilojoule dargestellt. Für zehn Zyklen zu jeweils 20 Sekunden ist eine Dauer von 200 Sekunden nach der Aufheizphase zugrunde gelegt. Die weiteren verwendeten Parameter sind aus den Tabellen in Kapitel 4.2.3 zu entnehmen.

Aus dem Verhältnis des Energieeinsatzes geht hervor, dass für das Erwärmen des doppelten Massenstroms mehr Energie notwendig ist. Im Gesamtvergleich wird das 1,45-fache an Energie eingesetzt als beim einfachen Massenstrom. Die höchste Differenz im Energieeinsatz entsteht in der ersten Heizzone. Hier ist der Energiebedarf zum Erwärmen des doppelten Massenstroms etwa 1,6-Mal so groß wie der Energieeinsatz für den einfachen Massenstrom. In der zweiten Heizzone ist der Energieeinsatz für zehn Zyklen nur wenig größer und in der dritten Heizzone gleich dem Energieeinsatz für den einfachen Massenstrom. Die hohe Differenz in der ersten Heizzone ist durch die hohe Temperaturdifferenz zu begründen, welche vom Eingangszustand der Zone zum Ausgangszustand der Zone überwunden werden muss. In den beiden darauffolgenden Zonen ist die Temperaturdifferenz zwischen Eingangs- und Ausgangszustand erheblich geringer, sodass weniger Energie in das System eingebracht werden muss, um den Ausgangszustand zu erreichen.

Unklar scheint zunächst, warum der Energiebedarf nur um die Hälfte steigt. Zieht man für die Energieberechnung die Formel $P = \dot{m} c_p (T_{M2} - T_{M1})$ heran, liegt erstmal nahe, dass sich mit dem doppelten Massenstrom auch der Energieeinsatz verdoppelt müsste. Eine Begründung dafür, dass es sich hier nicht so verhält, liegt in den Wärmekapazitäten. Sie dienen als Speicher und erzeugen eine Grundtemperatur des Systems. Wie in Tabelle 4 - 10 aufgeführt, muss daher die Heizungstemperatur auch nicht bei doppeltem Massenstrom doppelt so hoch sein. Ob das Verhältnis des in der Simulation errechneten Energiebedarfs in Abhängigkeit der Massenströme dem der Realität entspricht, müsste zur vollständigen Bewertung durch Messdaten überprüft werden.

4.3.3. Energieaufwand in Abhängigkeit der Zykluszeit

Im dritten Variantenvergleich wird die Zykluszeit verändert um deren Einfluss auf den Energiebedarf bewerten zu können. Alle anderen Parameter bleiben wie in der Ausgangsvariante. Die Betrachtung erfolgt ausschließlich für den Werkstoff PEEK. Für einen einfachen Vergleich wurde die Zykluszeit verdoppelt. Die Dauer des Massenstroms ist in beiden Varianten eine Sekunde, wodurch die einteilige Dauer am Zyklus variiert. Zusammengefasst werden demnach die beiden in der folgenden Tabelle aufgeführten Varianten betrachtet:

Tabelle 4 - 12: gewählte Massenströme bei gleichbleibender Zykluszeit

Merkmal Variante	Zykluszeit [s]	Dauer des Massenstroms in % der Zykluszeit	Massenstrom [kg/s]	Erläuterung
Zykluszeit I (Ausgangsvariante)	20	5 (\cong 1 s)	0,0141	Von einer Zyklusdauer von 20 Sekunden findet 1 Sekunde ein Massenstrom von 0,014 kg/s statt.
Zykluszeit II	40	2,5 (\cong 1 s)	0,0141	doppelte Zykluszeit bei selben Massenstrom wie in I

Für die dritte Variante wurde die Zykluszeit auf 40 Sekunden verdoppelt. Die Dauer des diskontinuierlichen Massenstroms beträgt weiterhin eine Sekunde. Zur Erwärmung des gleichen Massenstroms von gleicher Dauer steht dem System zur Erwärmung also mehr Zeit zur Verfügung. Aufgrund der veränderten Zykluszeit sind nun auch geringe Heizungstemperaturen ausreichend, um den Massenstrom in der Zykluszeit auf die Solltemperatur zu erwärmen. Diese sind in der folgenden Tabelle im Vergleich zur Ausgangsvariante (Zykluszeit I) aufgeführt:

Tabelle 4 - 13: Solltemperaturen der Heizung [°C]; Zykluszeitvergleich

Werkstoff	Heizzone 1		Heizzone 2		Heizzone 3	
	$T_{\text{Soll,Heiz}}$	$T_{\text{Soll,Masse}}$	$T_{\text{Soll,Heiz}}$	$T_{\text{Soll,Masse}}$	$T_{\text{Soll,Heiz}}$	$T_{\text{Soll,Masse}}$
Zykluszeit I	413	360	395	390	402	400
Zykluszeit II	379	250	392	290	401	300

Wie in den Vergleichen zuvor, ist auch hier das Ende der Aufheizphase von der Zone abhängig, die zuletzt die Solltemperatur in der Zykluszeit erreicht. Für die zweite Zykluszeit ist dies, wie auch bei den Varianten zuvor, die Heizzone eins. Zusammengefasst stellen sich je Zone die folgenden Aufheizzeiten und Ausschusszyklen ein:

Tabelle 4 - 14: Aufheizzeiten je Heizzone [s]; Zykluszeitvergleich

Werkstoff	Heizzone 1		Heizzone 2		Heizzone 3	
	t_{A1}	n_{AS1}	t_{A2}	n_{AS2}	t_{A3}	n_{AS3}
Zykluszeit I	500	5	400	5	500	3
Zykluszeit II	640	4	400	3	600	4

Schließlich kann der Energieeinsatz für die zweite Zykluszeit mittels Simulation berechnet und mit der Ausgangsvariante verglichen werden.

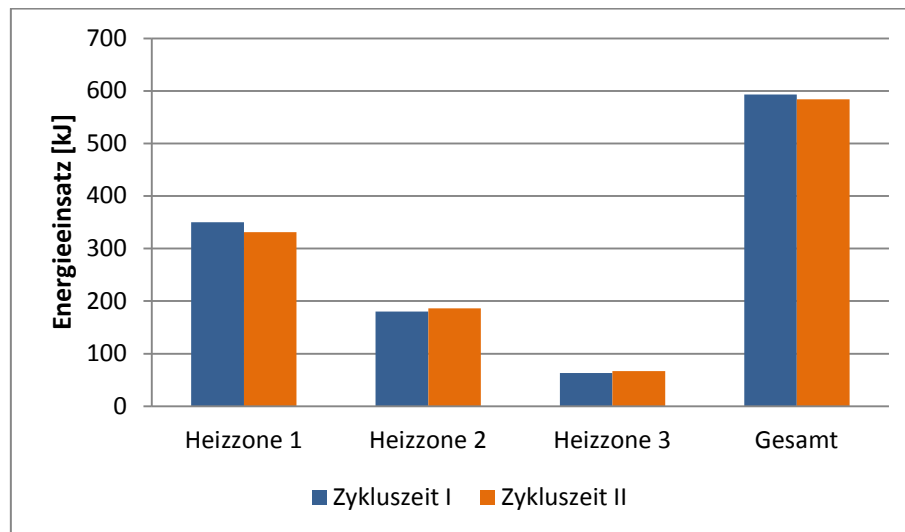


Abbildung 4 - 22: Energieeinsatz für die Aufheizphase in Abhängigkeit der Zykluszeit (Varianten I und II)

Das Balkendiagramm zeigt den Energieeinsatz in der Aufheizphase in Abhängigkeit der Heizzone bzw. der Zykluszeit. Der Energieeinsatz ist in Kilojoule dargestellt. Für die Aufheizphase sind für die Variante der ersten Zykluszeit eine Dauer von 500 Sekunden und für die Variante der zweiten Zykluszeit eine Dauer von 640 Sekunden zugrundegelegt. Die weiteren verwendeten Parameter sind aus Kapitel 4.2.3 zu entnehmen.

Für die Aufheizphase zeigen sich nur geringe Unterschiede im Energiebedarf für alle drei Zonen wie auch für den Gesamtenergiebedarf. Der Energieaufwand nimmt für beide Varianten von Zone 1 zu Zone 3 ab. Das Verhalten ist wie folgt zu begründen: Bei einer längeren Zykluszeit steht eine längere Zeit zur Verfügung, in der Wärme in den Massenstrom geleitet werden kann. Nach der Formel (7) $t = Q_M / \dot{Q}_M$ ist demnach ein geringerer Wärmestrom und somit eine geringe Heizungstemperatur notwendig, um die Solltemperatur zu erreichen. Dies geht auch aus Tabelle 4-13 hervor. Die Heizleistung muss jedoch auch über die längere Dauer erbracht werden, was schließlich wieder zu einem vergleichbaren Energiebedarf führt wie für die Zykluszeit von 20 Sekunden. Die Abweichung der Energiebedarfe ist überwiegend durch die Anzahl der Ausschusszyklen zu erklären, die durch Einsetzen des Massenstroms ohne das Erreichen der Solltemperatur der Masse in der Zykluszeit hervorgerufen werden. Das Ergebnis erscheint damit plausibel. Das Validieren mit dem realen System ist dennoch ratsam.

Auch in diesem Vergleich wird folgend der Einfluss der Änderung der Zykluszeit auf den Energiebedarf für zehn Zyklen eingegangen. Dazu wurde auch in diesem Vergleich mittels Simulation der Energiebedarf für zehn Soll-Zyklen je Zykluszeit berechnet.

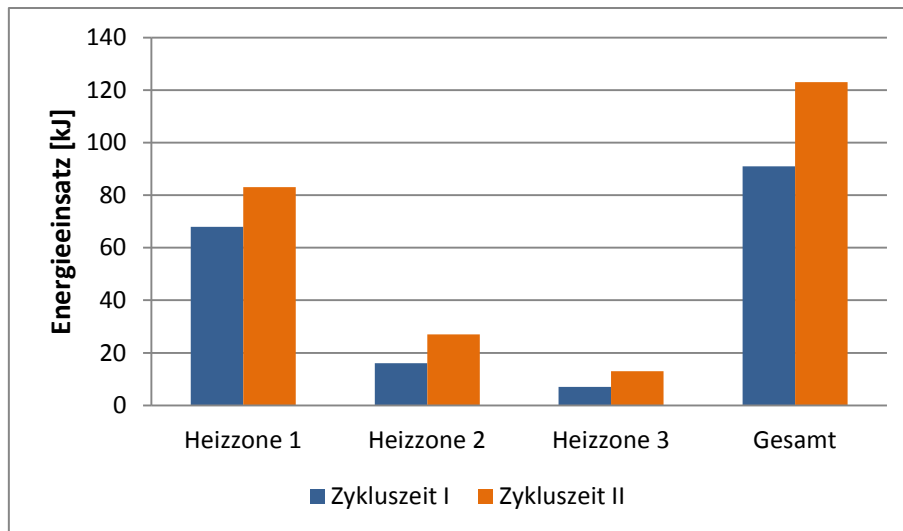


Abbildung 4 - 23: Energieeinsatz für 10 Zyklen in Abhängigkeit der Zykluszeit (Variante I und III)

Das Balkendiagramm zeigt den Energieeinsatz für zehn Soll-Zyklen in Abhängigkeit der Heizzone und der Zykluszeit. Der Energieeinsatz ist in Kilojoule dargestellt. Für zehn Zyklen ist in Variante I eine Dauer von 200 Sekunden nach der Aufheizphase und für Variante II eine Dauer von 400 Sekunden nach der Aufheizphase zugrundegelegt. Die weiteren verwendeten Parameter sind aus den Tabellen in Kapitel 4.2.3 zu entnehmen.

Aus dem Diagramm geht hervor, dass für das Erwärmen des Massenstroms bei doppelter Zykluszeit (40 s) etwas mehr Energie benötigt wird als beim Erwärmen des Massenstroms bei einfacher Zykluszeit (20 s). Die größte Differenz im Energiebedarf (ca. 15 kJ) in Abhängigkeit der Zykluszeit liegt in der ersten Heizzone vor. Dies ist darauf zurückzuführen, dass hier für das Erreichen der Solltemperatur in der längeren Zykluszeit trotzdem eine vergleichsweise hohe Temperatur erforderlich ist, (Vergl. Tabelle 4-13) die von der Heizung für die längere Dauer bereitgestellt werden muss. Ob eine Abweichung von etwa 15 kJ zwischen den beiden Varianten realistisch ist, sollte mit Messungen überprüft werden.

4.4. Ergebnisse

Aus der Modellierung und Simulation des Plastifizierprozesses können die folgenden allgemeinen Ergebnisse abgeleitet werden:

Eine Abbildung des Produktionsprozesses der Spritzgießtechnik mit der Simulationssoftware Dymola® ist grundsätzlich möglich. Bei der Abbildung ganzer Anlagen wird die Modellbildung mit Dymola® aufgrund der vielen Abhängigkeiten jedoch schnell unübersichtlich. Dies kann insbesondere bei der Eingabe der nötigen Kennwerte und Parameter zu Fehlern führen. Es ist daher ratsam, Systeme in Teilsysteme zu untergliedern und zunächst getrennt voneinander zu betrachten. Das Erweitern der Dymola®-Bibliothek lässt sich über das Modifizieren des Modelica®-Textes bereits existierender Komponenten einfach realisieren. Das Anpassen

von Komponenten hinsichtlich der spezifischen Anwendung ist ratsam, um weitere Fehlerquellen zu vermeiden.

Das Recherchieren und Evaluieren von Anlagenparametern sowie Eingangskennwerten stellt einen wichtigen Baustein für die Modellierung des Prozesses dar. Um ungenaue oder fehlerhafte Annahmen zu vermeiden, sollten möglichst viele Parameter anhand von Datenblättern sowie durch Messungen am Realprozess spezifiziert werden.

Des Weiteren können die folgenden spezifischen Ergebnisse hinsichtlich des Plastifizierprozesses abgeleitet werden:

Für das Plastifizieren des Materials ist es nicht ausreichend, die Solltemperatur des Materials an der elektrischen Heizung einzustellen. Aufgrund der Trägheit des Systems wäre der Wärmestrom dann nicht stark genug, um in der Zykluszeit die Masse auf die Solltemperatur zu erwärmen. An der Heizung muss daher eine höhere Temperatur als die Solltemperatur der Masse eingestellt werden. Die einzustellende Heizungstemperatur kann formell oder über Simulation berechnet werden. Ob das Einstellen der optimalen Heizungstemperatur über eine verbesserte Regelung realisiert werden kann, müsste in weiteren Modellanpassungen überprüft werden.

In der Aufheizphase wird die maximale Energiezufuhr benötigt. Ist das System erwärmt, pendelt sich der Energiebedarf trotz einsetzendem Massenstrom um einen Wert niedriger der maximal möglichen Energiezufuhr ein.

Das Variieren des Werkstoffes kann Auswirkungen auf den Energiebedarf für das Plastifizieren haben. Zurückzuführen ist dies jedoch fast ausschließlich auf die von Werkstoff zu Werkstoff variierenden Verarbeitungstemperaturen.

Die Wärmekapazitäten der Maschinenelemente dienen als Wärmespeicher. Dies hat den Effekt, dass beim Erhöhen der Massenstromintensität nicht zwingend auch der Energiebedarf um die gleiche Relation steigt. Ob die in der Simulation berechneten Relationen mit der Realität vergleichbar sind, sollte in einer weiterführenden Betrachtung evaluiert werden.

Die Zykluszeit hat hinsichtlich der Plastifizierung durch Wärme nur geringfügig Einfluss auf den Energiebedarf des Prozesses. Bei einer längeren Zykluszeit ist zwar aufgrund der Möglichkeit der längeren Dauer der Wärmezufuhr eine geringe Energiezufuhr je Zeit möglich, dies wird durch die längere Dauer aber wieder aufgeholt.

Über das Potential der oben betrachteten Parameter zur Optimierung des Energiebedarfs lässt sich an dieser Stelle noch keine eindeutige Aussage ableiten. Aus den zuvor erläuterten Ergebnissen kann jedoch gefolgert werden, dass die notwendige Systemtemperatur den größten Einfluss auf den Energiebedarf nimmt. Da die Systemtemperatur durch die Verarbeitungstemperaturen des Werkstoffes vorgegeben ist, kann diese nicht hinsichtlich des Energiebedarfs angepasst werden. Ein Potential zur Energiebedarfsreduzierung würde sich hier vielmehr in der Betrachtung verschiedener Optionen zur Wärmerückgewinnung und Wärmeverlustreduzierung in der Produktionsstätte zeigen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war die Abbildung und Simulation eines Teilbereiches einer Spritzgussproduktionsstätte mit der Simulationssoftware Dymola®. Vorbereitend sollten dazu zunächst die Grundlagen der Spritzgusstechnik sowie das Werkzeug der Simulation zur Abbildung von Prozessen vorgestellt werden. Der Schwerpunkt der Arbeit sollte auf der Modellbildung liegen. Dort hinführend sollten auch die Grundlagen von Dymola® und die Bibliothek in Dymola® vorgestellt werden. Im Weiteren Verlauf sollte die Simulation eines modellierten Prozesses im Vordergrund stehen. In einem Variantenvergleich sollten verschiedene Einflussparameter untersucht werden.

Zunächst wurden die Grundlagen des Spritzgießens erarbeitet. Dazu wurde mittels Literatur und der Begehung in einer Spritzgussproduktion der IES GmbH ein Verständnis für die Anlagentechnik, den Prozessablauf sowie die Prozessgrößen geschaffen. Parallel erfolgte das Einarbeiten in das Simulationsprogramm Dymola®. Mittels Schulungsunterlagen und Beispielsimulationen wurde ein Grundverständnis für die Anwendung und die technischen Möglichkeiten des Programms geschaffen. Im nächsten Schritt wurde mit der Modellbildung eines Spritzgießprozesses begonnen. Hier wurde zunächst der Ansatz zur Abbildung der gesamten Spritzgießanlage verfolgt. Es stellte sich heraus, dass dies für den ersten Ansatz zu komplex und fehleranfällig gewesen wäre. Daher wurde die Modellbildung auf einen Teilbereich des Spritzgießprozesses, das Plastifizieren, beschränkt. Hintergrund der Wahl dieses Teilbereiches war vor allem die Möglichkeit einer Vertiefung in späteren Arbeiten zu Energieeinsparmöglichkeiten beim Plastifizieren. Das Leitmotiv für die Modellbildung und Simulationen wurde daher die Berechnung des Energieaufwands für den Plastifiziervorgang beim Spritzgießprozess. Um dem Leitmotiv gerecht zu werden, wurden die Abläufe und Abhängigkeiten beim Plastifiziervorgang vertiefend studiert und in der Arbeit vorgestellt. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf den thermodynamischen Vorgängen. Nach verschiedenen Ansätzen in Dymola® wurde das Grundmodell für den Plastifiziervorgang erstellt. Dabei wurden überwiegend Bausteine aus der thermischen Datenbankrubrik verwendet und mit Steuerungselementen kombiniert. Um den Energiebedarf messbar zu machen, wurde dem System eine elektrische Heizung angebunden. Für eine Beispielsimulation, die Prüfung auf Plausibilität sowie für den späteren Vergleich unter Anwendung variiertes Parameter wurden die Eingangsparameter recherchiert. Dazu wurden die Datenblätter der Maschinen und Materialien sowie Literaturwerte herangezogen. Nach der Prüfung auf Plausibilität wurden die Simulationen des Modells durchgeführt. Hierbei wurde zum einen das verarbeitete Material und die davon Abhängigen Temperaturen und Kenngrößen variiert und untersucht. Zum anderen wurde auch der Einfluss des variierten Massenstromes und des Verhältnisses von Massenstrom zur Zykluszeit untersucht.

Zusammenfassend kann man sagen, dass eine Abbildung und Simulation von Teilprozessen des Spritzgießens mit der Simulationssoftware Dymola® möglich ist. Eine Verknüpfung von Teilprozessen zur Abbildung des Gesamtprozesses und aller Abhängigkeiten ist denkbar, müsste aber geprüft werden. Eine Schwierigkeit dabei wäre sicherlich die Übersichtlichkeit

des Modells und der zu berücksichtigenden Parameter. Der Teilprozess des Plastifizierens lässt sich hinsichtlich der Frage zum Energieaufwand mit Dymola® abbilden und simulieren. Aus dem Variieren des Materials, der Massenstromintensität sowie des Verhältnisses von Massenstromdauer zur Zykluszeit in dem betrachteten Modell können bereits einige Erkenntnisse gezogen werden:

Erstens: Das Variieren des Materials beeinflusst den Energiebedarf vor allem aufgrund der unterschiedlichen Verarbeitungstemperaturen.

Zweitens: Aufgrund der verschiedenen Bauelemente und deren Wärmekapazitäten weist das System eine gewisse Trägheit auf, sodass eine Speicherwirkung entsteht. Dies bewirkt, dass bei einem Anstieg der Massenstromintensität der Energiebedarf nicht zwingend um den gleichen Faktor steigt.

Drittens: Einem größeren Verhältnis von Massenstromdauer zu Zykluszeit steht nicht grundsätzlich ein geringerer Energieverbrauch gegenüber, da bei einer längeren Zykluszeit zwar geringere Leistung benötigt wird, jedoch über einen längeren Zeitraum.

In Hinblick auf die Validierung der Eingangsparameter und Ergebnisse sowie als Leitfaden für weiterführende Betrachtungen wird folgend ein Ausblick auf einige Ansatzpunkte gegeben: Für eine vollständige Bewertung des Energiebedarfs sind die Energiebedarfe für den Antrieb der mechanischen Elemente zu berücksichtigen. Das heißt, dass in einer weiteren oder erweiterten Simulation der Kolben- bzw. Schneckenantrieb implementiert werden sollte. Des Weiteren bildet die Steuerung einen Ansatzpunkt zur Optimierung. Über das Einbinden weiterer Steuer- und Regelelemente könnten die Abläufe im Modell weiter automatisiert werden, was wiederum einen Einfluss auf die Reaktivität des Modells und somit auch auf die Energiebedarfsrechnung hätte. Eine Möglichkeit wäre der Einsatz eines geregelten Heizwiderstandes im Gegensatz zu einem festen Widerstand. Weiter würde sich durch die Berücksichtigung der Reibung insbesondere bei der Schneckenplastifizierung ein geringerer Energiebedarf einstellen. Um dies zu berücksichtigen, sind jedoch zunächst fluidmechanische Untersuchungen notwendig. Auch eine genauere Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangs von der Zylinderwand zur Spritzgießmasse mittels produktionsnaher Daten könnte das Modell weiter optimieren. Schließlich gilt es, die mittels Simulation berechneten Daten durch Realdaten zu validieren. Erst dann kann eine eindeutige Aussage über den Wert der Erkenntnisse vorgenommen werden.

III Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2 - 1: Komponenten einer Schneckenspritzgussmaschine [Rutl2013].....	11
Abbildung 2 - 2: Komponenten einer Kolbenspritzgießmaschine [Cron2013].....	11
Abbildung 2 - 3: Aufbau eines keramikisolierten Zylinderheizbandes [Erge2009]	12
Abbildung 2 - 4: Kniehebelschließereinheit einer Spritzgießanlage [Foun2015]	13
Abbildung 2 - 5: der Spritzgusszyklus bei der Verarbeitung von Thermoplasten (nach [MGKE2009]).	16
Abbildung 2 - 6: Systemskizze zur Energiebilanz einer Spritzgießmaschine nach [Hess2015].....	21
Abbildung 2 - 7: Energieverbrauch von Spritzgießmaschinen in Abhängigkeit der Antriebsart und der Schließkraft [JoMi2004].....	21
Abbildung 2 - 8: Leistungsbedarf im Zyklus einer hydraulischen Spritzgießmaschine [Tame2009]	22
Abbildung 3 - 1: Simulationskreislauf [Kühn2006]	23
Abbildung 3 - 2: Benutzeroberfläche zur Modellerstellung im Simulationsprogramm Dymola®	25
Abbildung 3 - 3: Beispiel für eine thermische Komponente in Dymola®	26
Abbildung 3 - 4: Beispiel für ein thermisches System in Dymola® – Ausgangssituation: $T_{\text{Masse1}} > T_{\text{Masse2}}$	27
Abbildung 3 - 5: Benutzeroberfläche zur Simulation im Simulationsprogramm Dymola®	27
Abbildung 4 - 1: Wärmeleitung durch eine einschichtige Zylinderwand nach [BaSt2004].....	33
Abbildung 4 - 2: Übersicht Dymola®-Modell – Wärmeübertragung an einen Stoffstrom	39
Abbildung 4 - 3: Infoansicht der Komponente <i>Wärmekapazität</i> - standard.....	42
Abbildung 4 - 4: Infoansicht der Komponente <i>Wärmekapazität</i> - modifiziert	43
Abbildung 4 - 5: Textansicht der Komponente <i>Wärmekapazität</i> - standard	43
Abbildung 4 - 6: Textansicht der Komponente <i>Wärmekapazität</i> - modifiziert.....	44
Abbildung 4 - 7: Heizzonen bei Kolben- und Schneckenspritzgießmaschinen.....	47
Abbildung 4 - 8: Parametereingabe; Zylinderwärmeleitung in der ersten Heizzone.....	49
Abbildung 4 - 9: Verlauf der Temperaturen im Vergleich – eingestellte Heizungstemperatur ist noch nicht ausreichend, um die Solltemperatur zu erreichen (Simulationszeit 1000 s)	50
Abbildung 4 - 10: Verlauf der Temperaturen im Vergleich bei abgestimmter Solltemperatureinstellung (Simulationszeit 1000 s)	52
Abbildung 4 - 11: Massenstromeinsatz und Massenstromverlauf (Simulationszeit 1000 s)	53
Abbildung 4 - 12: Verlauf der Temperaturen der Komponenten und der Masse, Überblick und Detailausschnitt (Simulationszeit 1000 s)	54
Abbildung 4 - 13: Verlauf der Wärmeströme durch die Komponenten und die Masse, Überblick und Detailausschnitt (Simulationszeit 1000 s)	55
Abbildung 4 - 14: Verlauf der Spannungszufuhr zum System, Überblick und Detailausschnitt (Simulationszeit 1000 s)	56
Abbildung 4 - 15: Verlauf der Leistungszufuhr, Überblick und Detailausschnitt (Simulationszeit 1000 s)	57
Abbildung 4 - 16: Verlauf des Energieeinsatzes (Simulationszeit 1000 s).....	57
Abbildung 4 - 17: Zyklus mit diskontinuierlichem Massenstrom	58
Abbildung 4 - 18: Energieeinsatz für die Aufheizphase für PEEK ($T_A = 500$ s) und PP ($T_A = 540$ s)	60
Abbildung 4 - 19: Energieeinsatz für 10 Zyklen gleicher Dauer und gleichen Massenstroms für PEEK und PP.....	61
	72

Abbildung 4 - 20: Energieeinsatz für die Aufheizphase in Abhängigkeit des Massenstroms (Varianten I und II)	63
Abbildung 4 - 21: Energieeinsatz für 10 Zyklen in Abhängigkeit des Massenstroms (Variante I und II)	64
Abbildung 4 - 22: Energieeinsatz für die Aufheizphase in Abhängigkeit der Zykluszeit (Varianten I und II).....	66
Abbildung 4 - 23: Energieeinsatz für 10 Zyklen in Abhängigkeit der Zykluszeit (Variante I und III).....	67

IV Tabellenverzeichnis

Tabelle 2 - 1: Antriebsarten von Spritzgussmaschinen mit ihren Vor- und Nachteilen [JoMi2004]	15
Tabelle 2 - 2: wesentliche Prozessparameter beim Spritzgießen [Bich2012], [JoMi2004], [MGKE2009]	19
Tabelle 2 - 3: Stellenwerte einiger Prozessparameter zu den Anforderungen [Bich2012].....	20
Tabelle 3 - 1: Aufbau der Dymola®-Bibliothek	28
Tabelle 4 - 1: Übersicht der notwendigen Eingangsparameter für eine Simulation des Plastifizierprozesses	45
Tabelle 4 - 2: geometrische Eingangsparameter für die Beispielsimulationen.....	46
Tabelle 4 - 3: elektrische Eingangsparameter für die Beispielsimulationen	46
Tabelle 4 - 4: Materialkennwerte für die Beispielsimulationen.....	47
Tabelle 4 - 5: Literaturwerte für Verarbeitungstemperaturbereiche von PEEK und PP [JoMi2004]	48
Tabelle 4 - 6: für die Simulation gewählte Verarbeitungstemperaturen von PEEK und PP	48
Tabelle 4 - 7: Solltemperaturen der Heizung [°C]; Materialvergleich	59
Tabelle 4 - 8: Aufheizzeiten je Heizzone [s]; Materialvergleich	60
Tabelle 4 - 9: gewählte Massenströme bei gleichbleibender Zykluszeit.....	62
Tabelle 4 - 10: Solltemperaturen der Heizung [°C]; Massenstromvergleich.....	62
Tabelle 4 - 11: Aufheizzeiten je Heizzone [s]; Massenstromvergleich	63
Tabelle 4 - 12: gewählte Massenströme bei gleichbleibender Zykluszeit.....	65
Tabelle 4 - 13: Solltemperaturen der Heizung [°C]; Zykluszeitvergleich	65
Tabelle 4 - 14: Aufheizzeiten je Heizzone [s]; Zykluszeitvergleich	65

V Literaturverzeichnis

- [ABMW2011] ACKER, BERND (Bartz, Wilfried j. / Mesenholl, Hans-Joachim / Wippler, Elmar) (2011): Simulationstechnik. Grundlagen und praktische Anwendungen. 2. Auflage, Renningen: Expert Verlag
- [ArbB2015] ARBURG GmbH + Co KG (2015): Betriebsanleitung für Maschinennr. 210345. IES GmbH. 270 C 400 – 70. 1. Auflage, Lossburg, ARBURG GmbH + Co KG
- [ArbE2015] ARBURG GmbH + Co KG (2015): Ersatzteilliste für Maschinennr. 210345. IES GmbH. 270 C 400 – 70. 1. Auflage, Lossburg, ARBURG GmbH + Co KG
- [BaSt2004] BAEHR, H.D. / STEPHAN, K. (2004): Wärme- und Stoffübertragung. 4. Auflage, Berlin / Heidelberg: Springer Verlag
- [BBBE2008] BASTIAN, PETER et al. (2008): Fachkunde Elektrotechnik. 26. Auflage, Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel- Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG
- [Bich2012] BICHLER, MARTIN (DIN Deutsches Institut für Normung E.v.) (2012): Prozessgrößen beim Spritzgießen. Analyse und Optimierung. 2. Auflage, Berlin: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
- [CeWi2010] CERBE PROF. DR.-ING. GÜNTER / WILHELMS PROF. DR.-ING. GERNOT (2010): Technische Thermodynamik: Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen. 16., aktualisierte Auflage, München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
- [Cron2013] CRONOPLAST S.L. (2013): Babyplast® Bedienungsanleitung. 6. übersetzte Auflage, 08630 Abrera (Barcelona) España: CRONOPLAST S.L.
- [Dass2013] DASSAULT SYSTÈMES ® (2013): Standard Library der Dymola® Studentenversion 2014 - Informationstextansichten, Version 2014; Dassault Systèmes
- [DasU2012] DAS UMWELTBUNDESAMT (2012): Primärenergienutzung des verarbeitenden Gewerbes.
<http://www.umweltbundesamt.de/daten/industrie/branchenabhaengiger-energieverbrauch-des> (25.08.2015)
- [DasU2015] DAS UMWELTBUNDESAMT (2015): Energieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren.
<http://www.umweltbundesamt.de/daten/energiebereitstellung-verbrauch/energieverbrauch-nach-energetraegern-sektoren> (15.08.2015)
- [Disp2013] DISPAN, JÜRGEN (2013) Kunststoffverarbeitung in Deutschland. Branchenreport 2013. Informationsdienst des IMU Instituts – Heft 4/2013, Stuttgart: Informationsdienst des IMU Instituts
- [Erge2009] ERGE ELEKTROWÄREMTECHNIK (2009): Zylinderheizkörper Keramikisoliert Aufbau. <http://www.erge-elektrowaermetechnik.de/k-aufbau.htm>

- (15.03.2015)
- [Foun2015] FOUNDRY TECHNOLOGIES & ENGINEERING GMBH (FT&E) (2015): Gießereilexikon-Formzuhaltung. <http://www.giessereilexikon.com/fileadmin/images/stories/F/Formzuhaltung/05/05.png> (02.08.2015)
- [Hess2015] HESSELBACH, JENS (2012): Energie- und klimaeffiziente Produktion. Grundlagen, Leitlinien und Praxisbeispiele. 1. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg
- [JoMi2004] JOHANNABER, FRIEDRICH / MICHAELI, WALTER (2004): Handbuch Spritzgießen. 2. Auflage, München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
- [Kern2014] KERN GMBH (2014): Werkstoff-Datenblätter. <http://www.kern.de/index.html?/kunststoff/service/werkstoffe/eigenschaften/datenblatt.htm> (07.03.2015)
- [Khpk2015] KHP KUNSTSTOFFTECHNIK E. K. (2015): Werkstoffdatenblatt PP. Auflage unbekannt; Aurachtal (DE); KHP Kunststofftechnik e. K.
- [Kühn2006] KÜHN, WOLFGANG (2006): Digitale Fabrik. Fabriksimulation für Produktionsplaner. 1. Auflage, München Wien: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
- [MGKE2009] MICHAELI, WALTER / GREIF, HELMUT / KRETSCHMER, GERNOT / EHRING, FRANK (2009): Technologie des Spritzgießens. Lern- und Arbeitsbuch. 3. Auflage, München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
- [Mode2015] MODELICA® ASSOCIATION (2015): Modelica® and the Modelica® Association <https://www.Modelica.org/> (11.08.2015)
- [Rutl2013] RUTLAND PLASTICS LTD. ALL RIGHTS RESERVED (2013): Plastic Injection Moulding Machine. http://www.rutlandplastics.co.uk/advice/moulding_machine.html (08.01.2015)
- [SpFr2014] SPINDLER, APL. PROF. DR.-ING. K. / FRANK, DIPL.-ING. A. (2014): Umdruck zur Vorlesung: Grundlagen der Wärmeübertragung. Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart, Stuttgart: Scriptum
- [Solv2013] SOLVAY SPECIALTY POLYMERS (2013): KetaSpire® PEEK. Design & Processing Guide. 1. Auflage, Bollate (IT) Alpharetta (USA) Shanghai (CN): Solvay Specialty Polymers
- [Tame2009] TAMER im KUNSTOFFREPORT (2009): Energieverbrauch – Hydraulik Spritzgießmaschine. <http://kunststoffreport.de/energieverbrauch-hydraulik-spritzgiesmaschine/> (15.08.2015)
- [Vdig2014] VDI-GESELLSCHAFT PRODUKTION UND LOGISTIK (2014): VDI 3633 Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Grundlagen. 1. Auflage; Düsseldorf. Verein Deutscher Ingenieure e.V.
- [Wfpl2013] WF PLASTIC GMBH (2013): Schmelzindexmessung. <http://www.schmelzindex.de/> (02.08.2015)

VI Anhang

VI.I	Modelle und Diagramme des Variantenvergleichs	78
VI.I.I	PEEK; Massenstrom 1; Zykluszeit 1	78
VI.I.II	PP; Massenstrom 1; Zykluszeit 1	92
VI.I.III	PEEK, Massenstrom 2; Zykluszeit 1	105
VI.I.IV	PEEK; Massenstrom 1; Zykluszeit 2	111
VI.II	Heizzonentemperaturen in der Produktion	117

VI.I Modelle und Diagramme des Variantenvergleichs

VI.I.I PEEK; Massenstrom 1; Zykluszeit 1

Heizzone 1; PEEK; Massenstrom 1; Zykluszeit 1

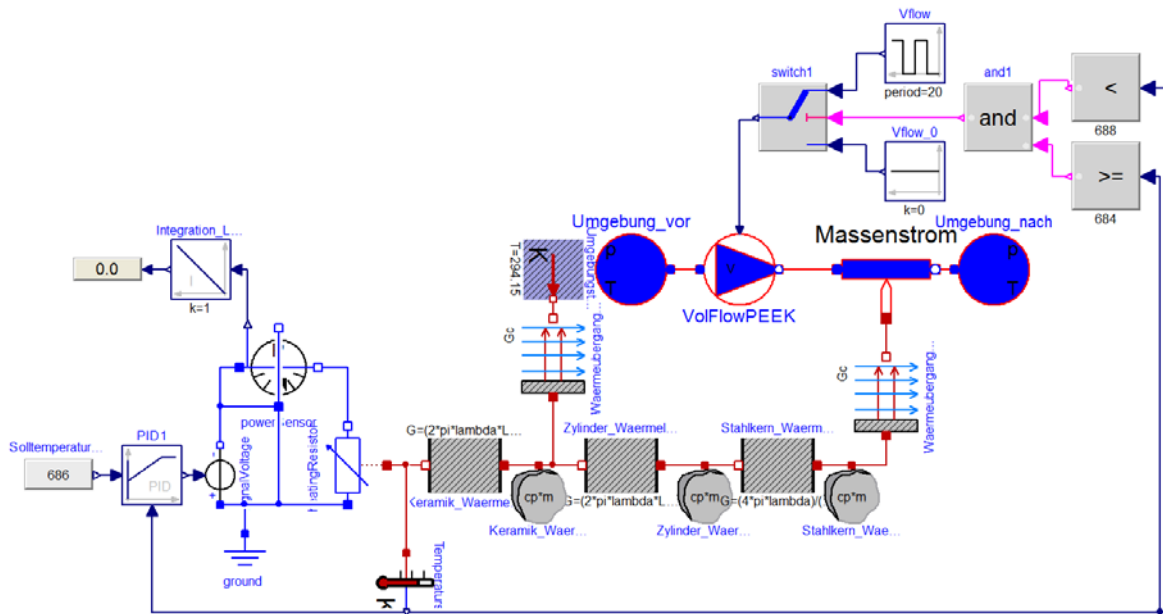


Abbildung VI-1: Übersicht Dymola®-Modell – Heizzone 1; Massenstrom 1, PEEK; Zykluszeit 1

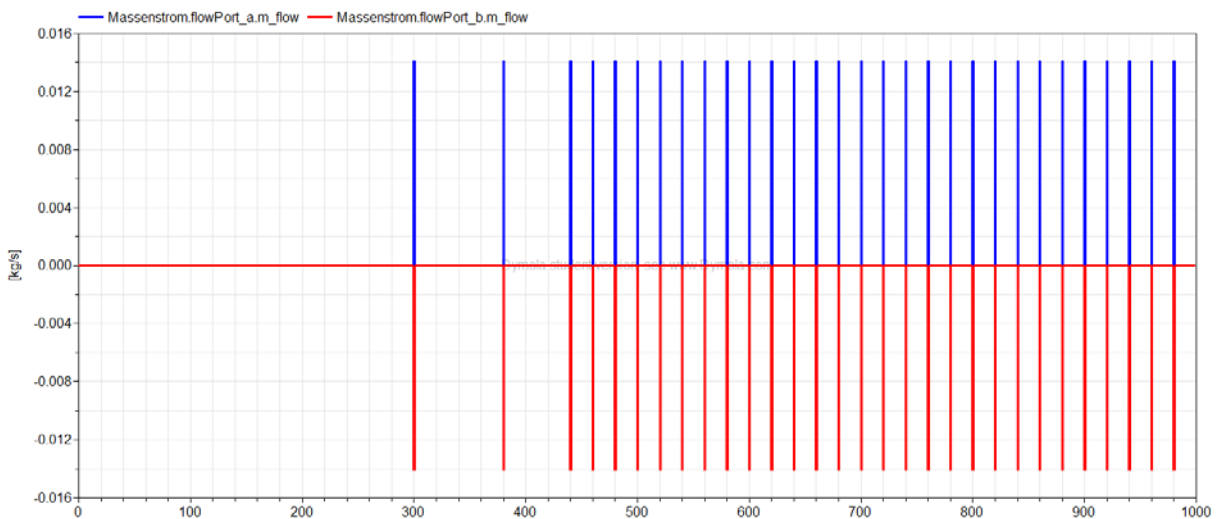


Abbildung VI-2: Massenstrom – Heizzone 1; Massenstrom 1, PEEK; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

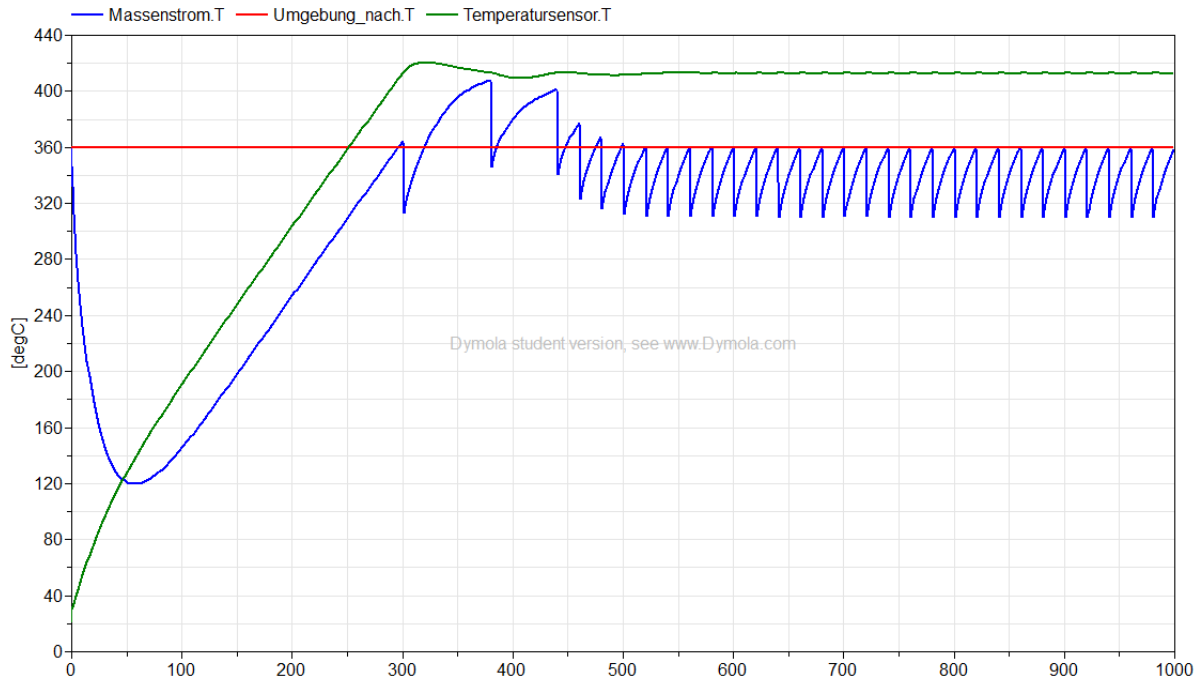


Abbildung VI-3: Temperaturen der Masse, Solltemperatur der Masse und Temperatur am Sensor– Heizzone 1; Massenstrom 1, PEEK; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

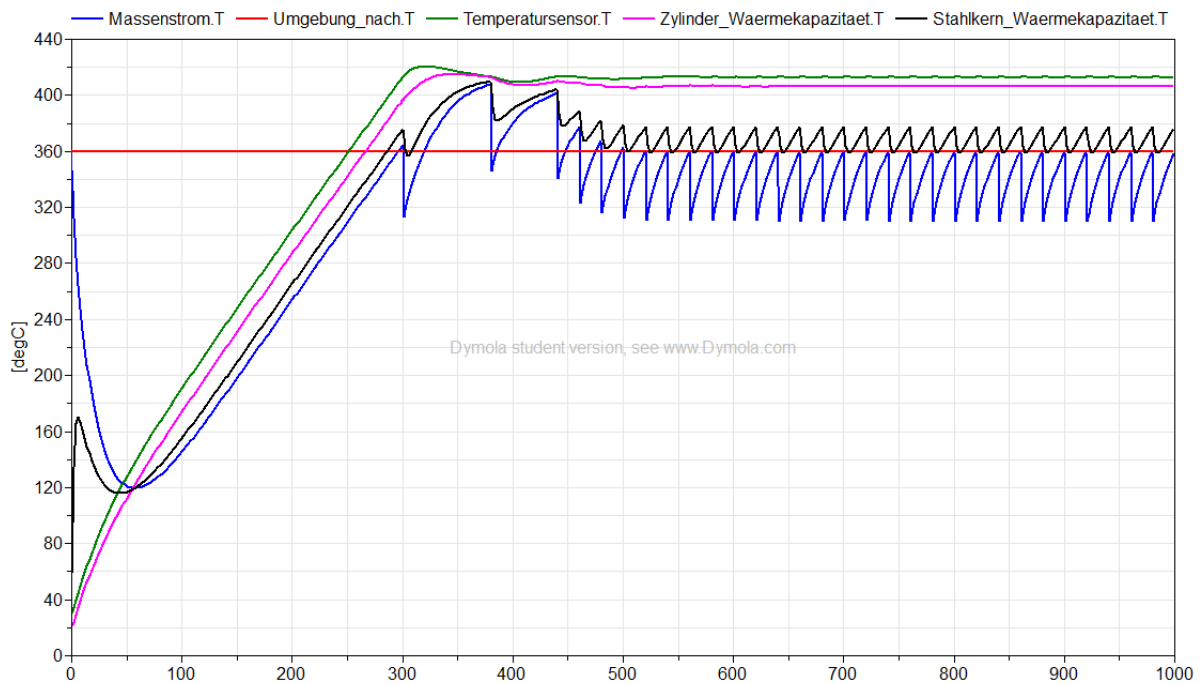


Abbildung VI-4: Temperaturen aller Komponenten sowie der Masse – Heizzone 1; Massenstrom 1, PEEK; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

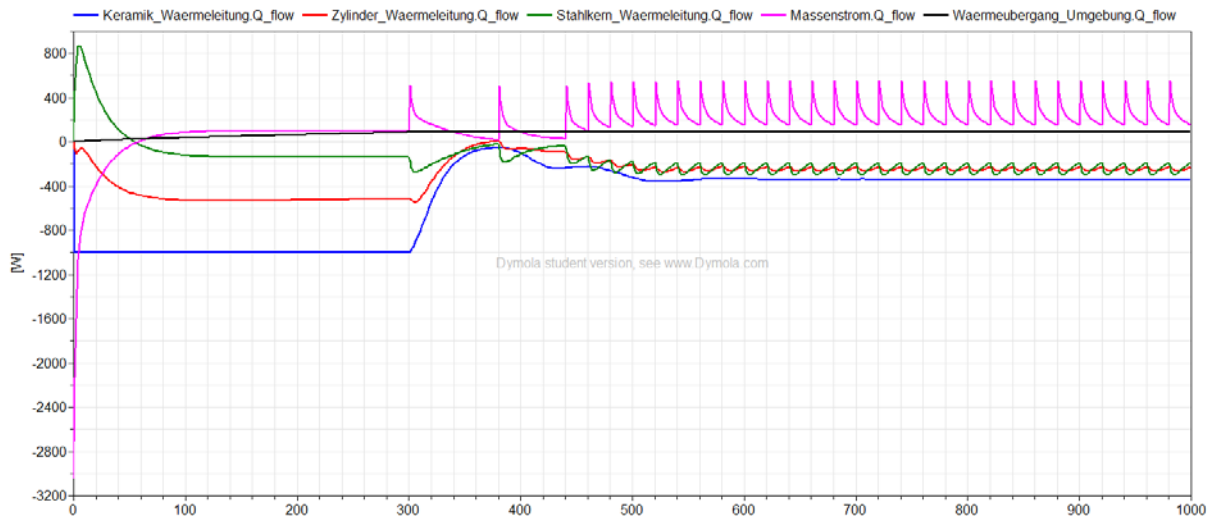


Abbildung VI-5: Wärmeleitung durch alle Komponenten sowie in die Masse und an die Umgebung – Heizzone 1; Massenstrom 1, PEEK; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

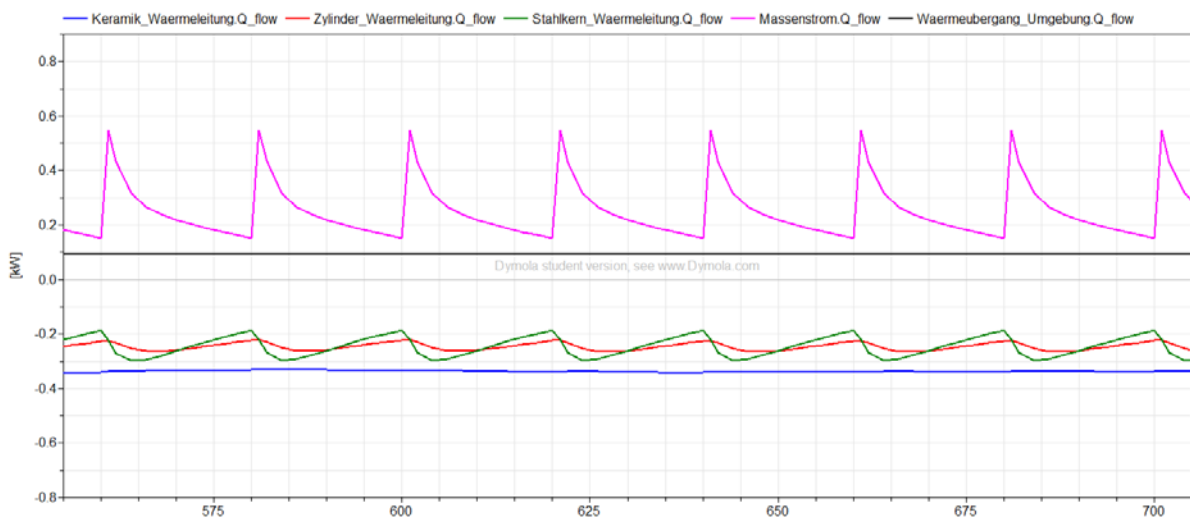


Abbildung VI-6: Detail - Wärmeleitung durch alle Komponenten sowie in die Masse und an die Umgebung – Heizzone 1; Massenstrom 1, PEEK; Zykluszeit 1

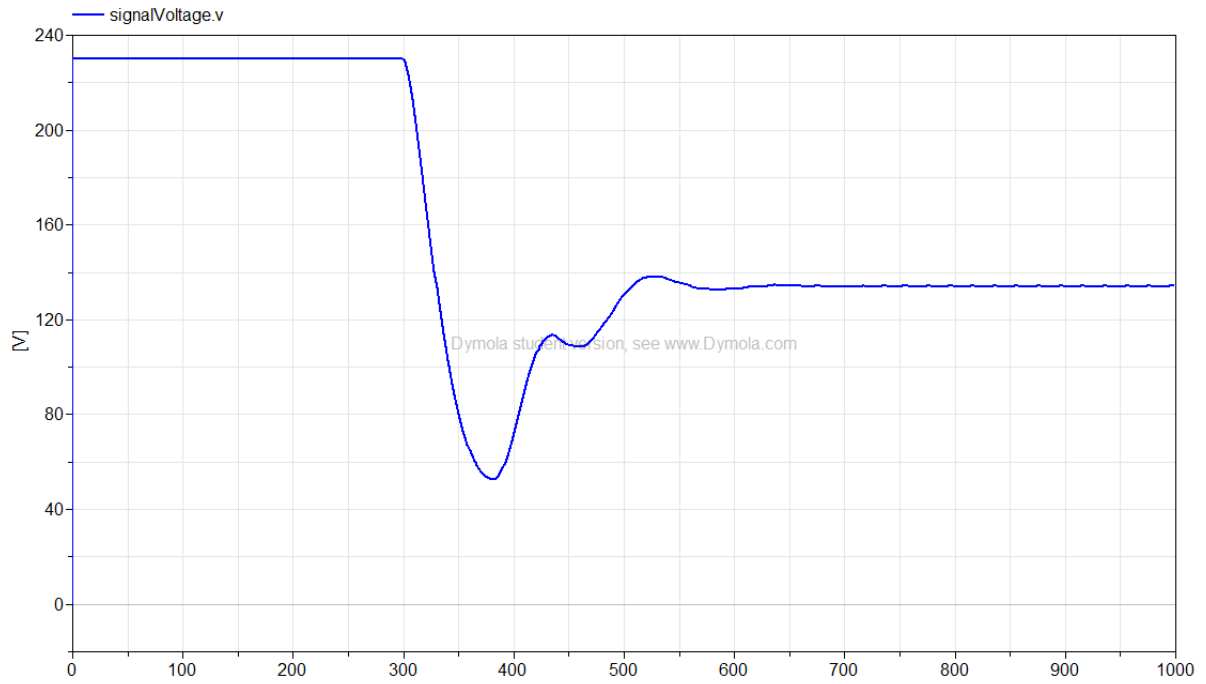


Abbildung VI-7: Spannungszufuhr an das System – Heizzone 1; Massenstrom 1, PEEK; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

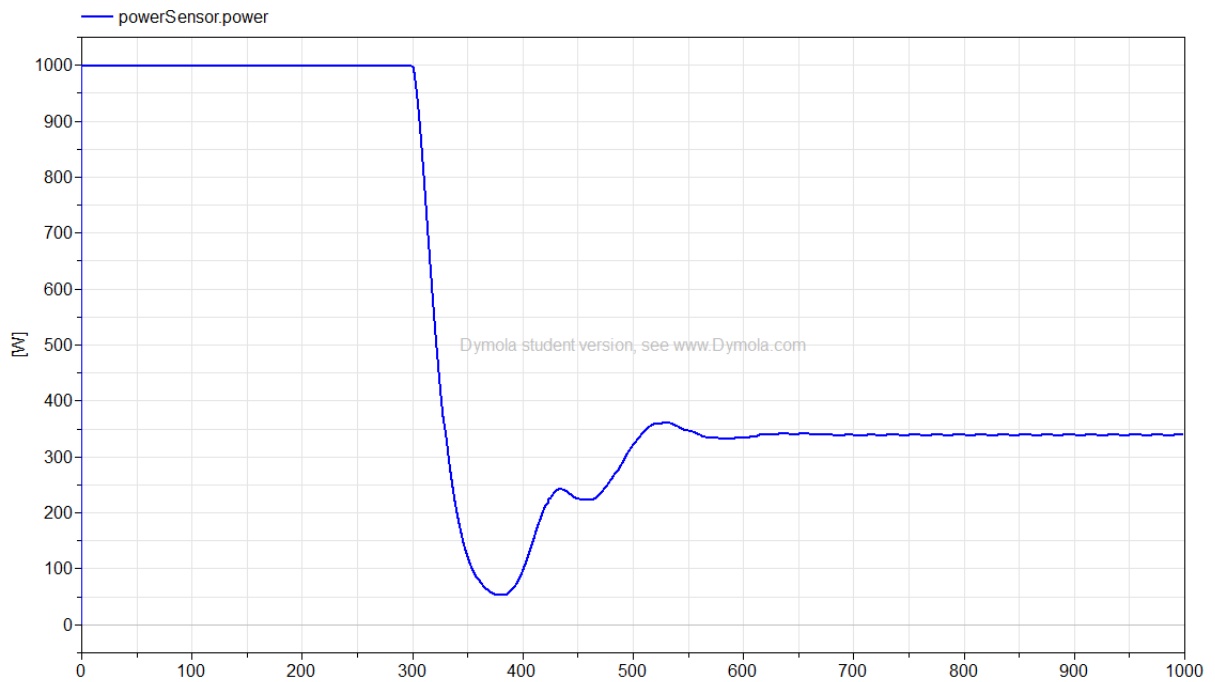


Abbildung VI-8: Leistungszufuhr an das System – Heizzone 1; Massenstrom 1, PEEK ; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

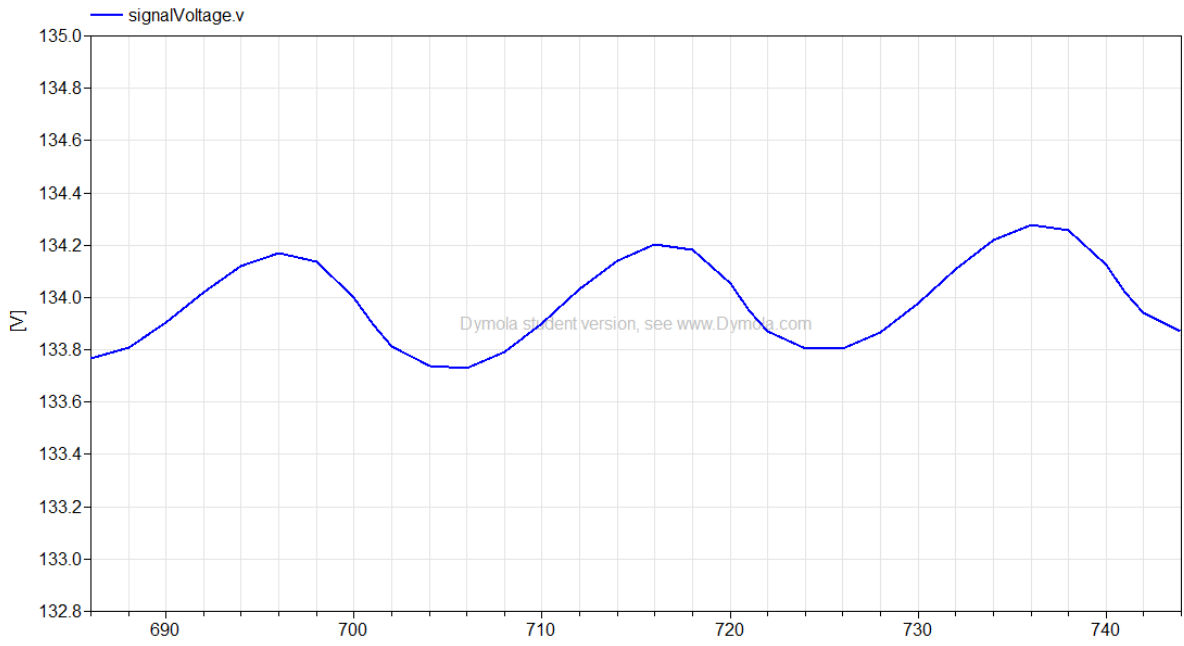


Abbildung VI-9: Detail - Leistungszufuhr an das System – Heizzone 1; Massenstrom 1, PEEK; Zykluszeit 1

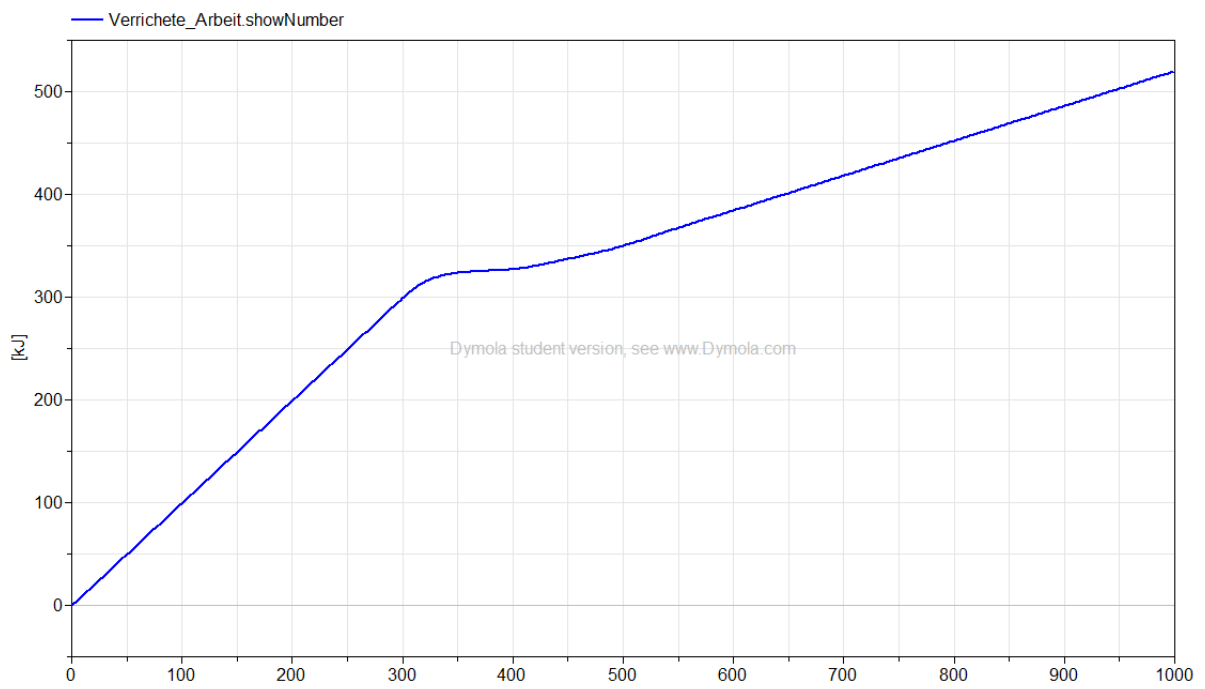


Abbildung VI-10: Energieeinsatz – Heizzone 1; Massenstrom 1, PEEK; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

Heizzone 2; PEEK, Massenstrom 1; Zykluszeit 1

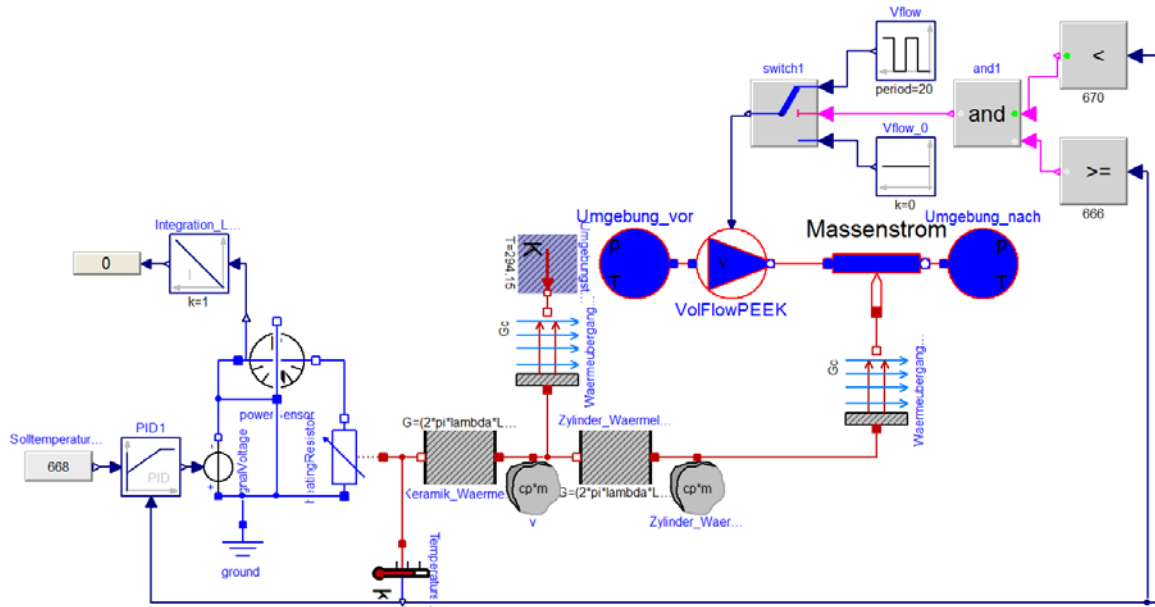


Abbildung VI-11: Übersicht Dymola®-Modell – Heizzone 2; Massenstrom 1, PEEK; Zykluszeit 1

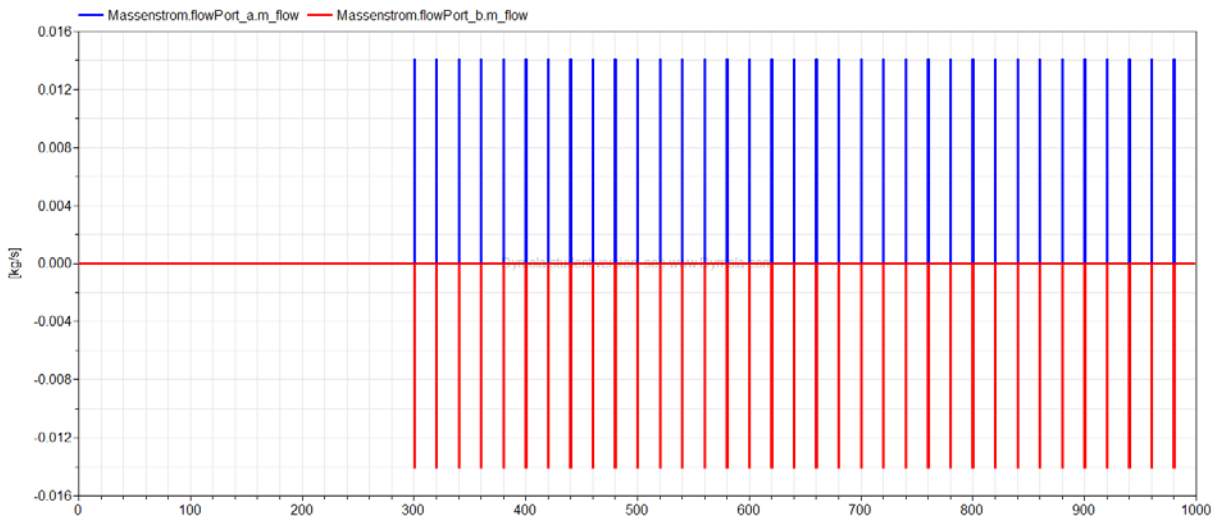


Abbildung VI-12: Massenstrom – Heizzone 2; Massenstrom 1, PEEK; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

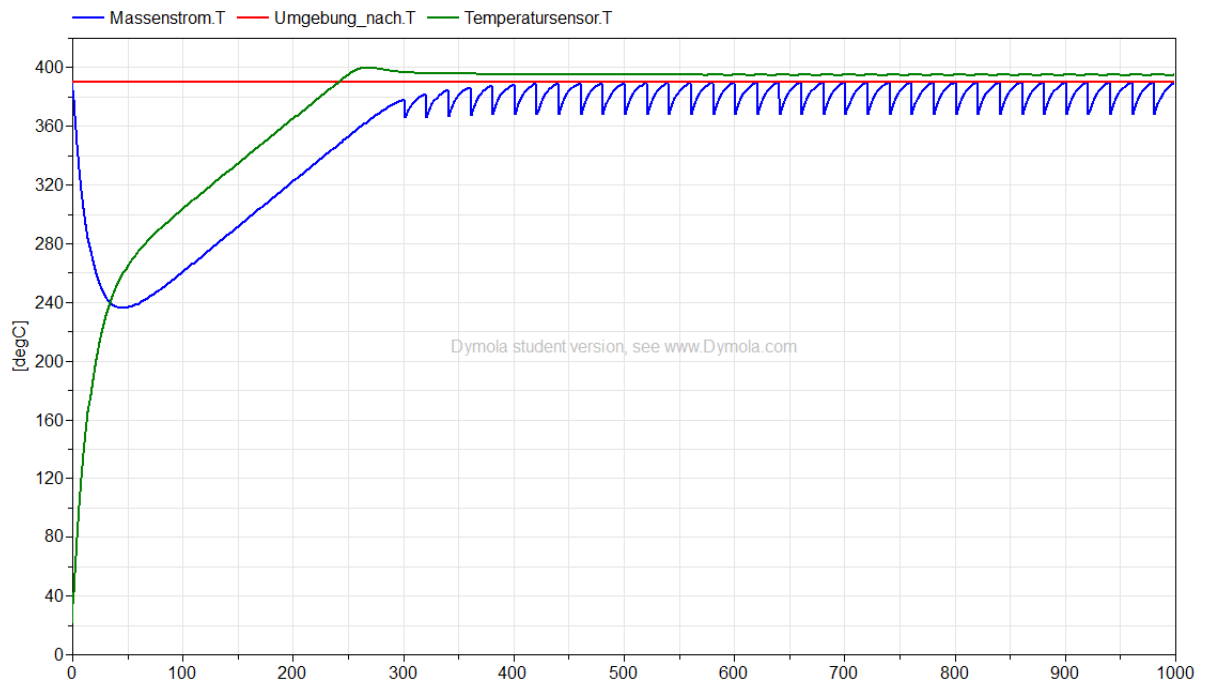


Abbildung VI-13: Temperaturen der Masse, Solltemperatur der Masse und Temperatur am Sensor– Heizzone 2; Massenstrom 1, PEEK; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

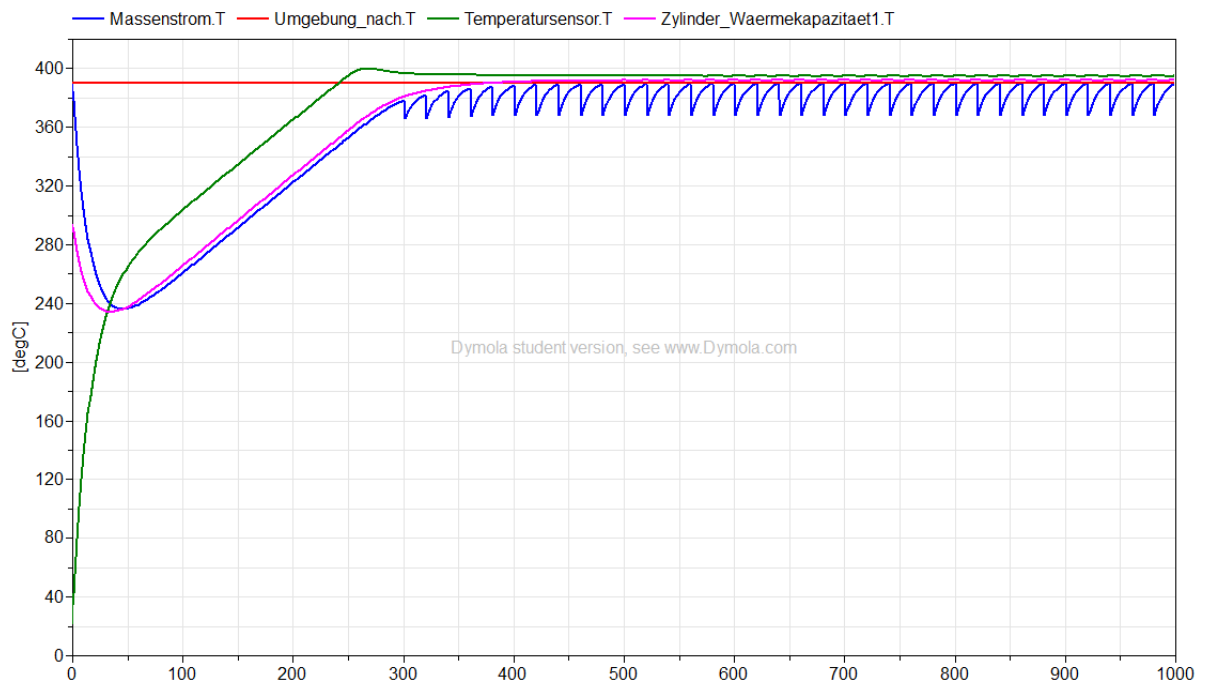


Abbildung VI-14: Temperaturen aller Komponenten sowie der Masse – Heizzone 2; Massenstrom 1, PEEK; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

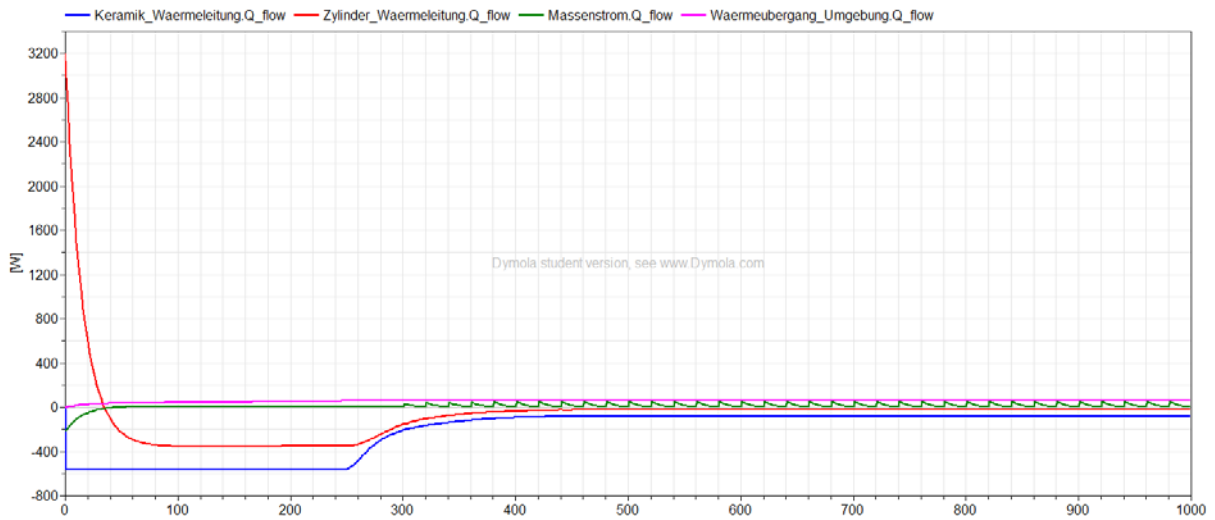


Abbildung VI-15: Wärmeleitung durch alle Komponenten sowie in die Masse und an die Umgebung – Heizzone 2; Massenstrom 1, PEEK; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

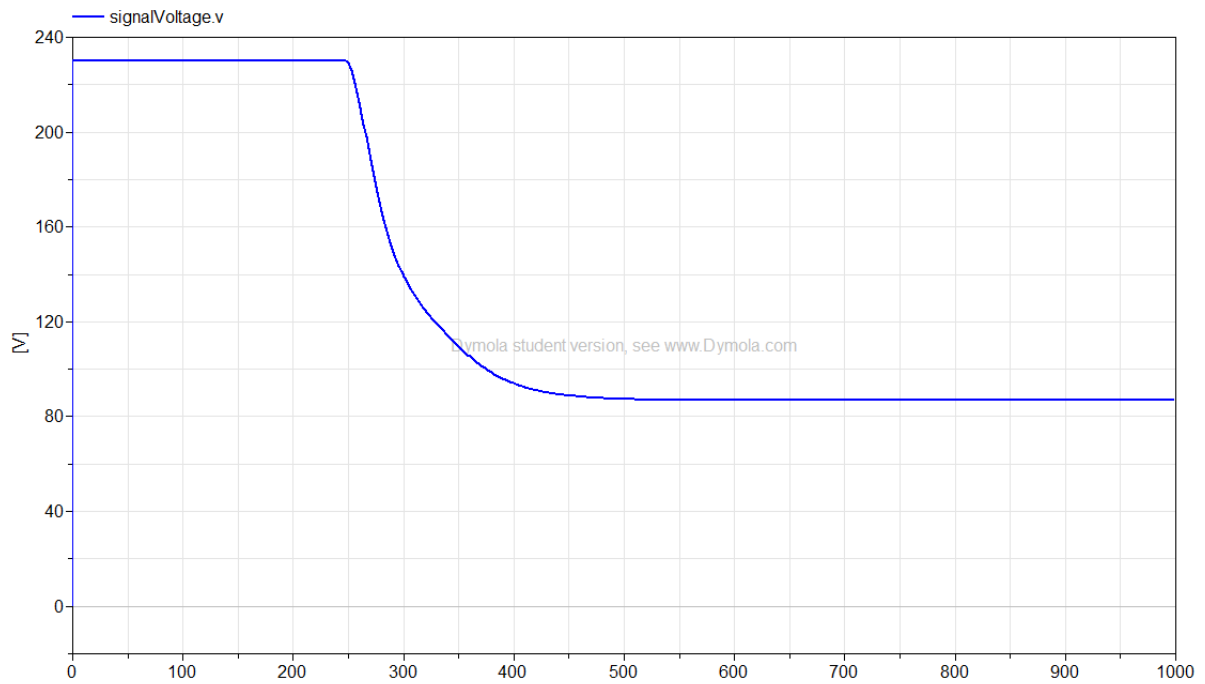


Abbildung VI-16: Spannungszufuhr an das System – Heizzone 2; Massenstrom 1, PEEK; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

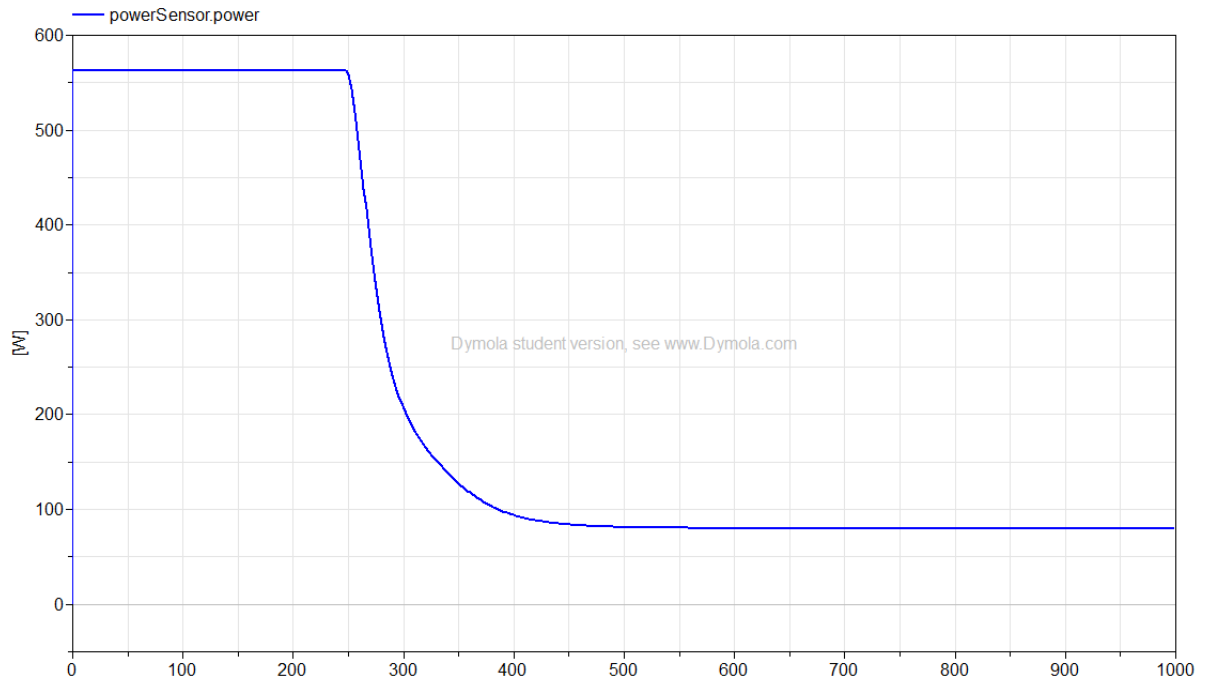


Abbildung VI-17: Leistungszufuhr an das System – Heizzone 2; Massenstrom 1, PEEK; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

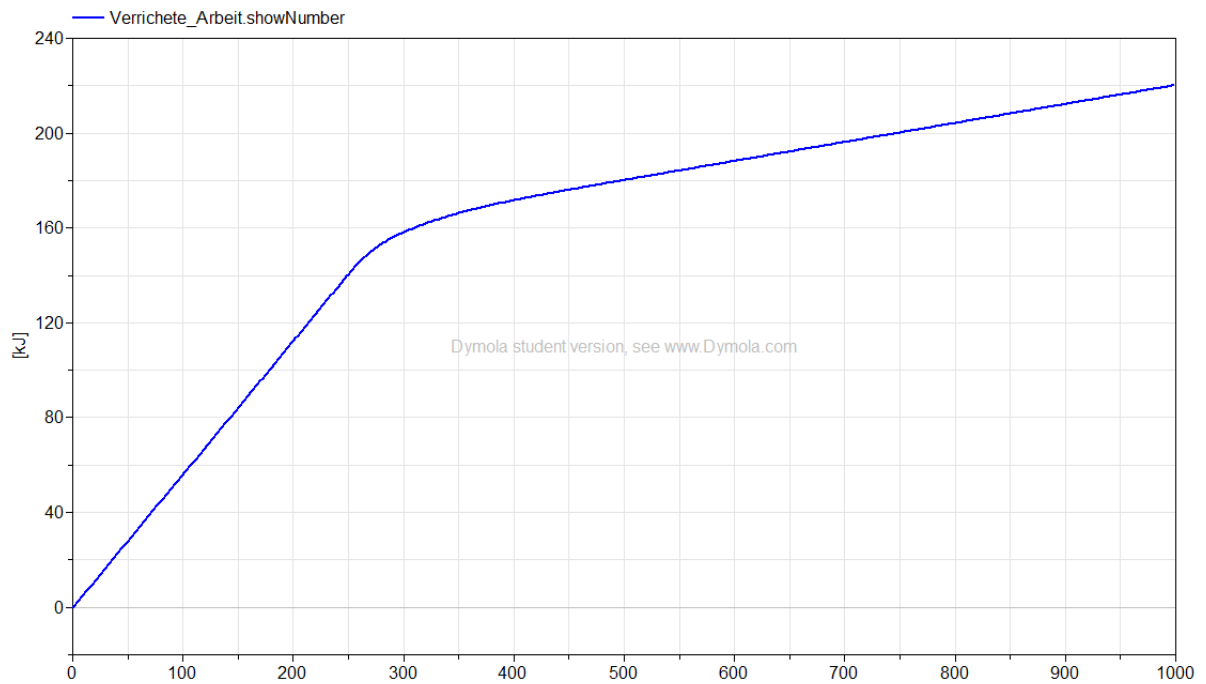


Abbildung VI-19: Energieeinsatz – Heizzone 2; Massenstrom 1, PEEK; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

Heizzone 3; PEEK; Massenstrom 1; Zykluszeit 1

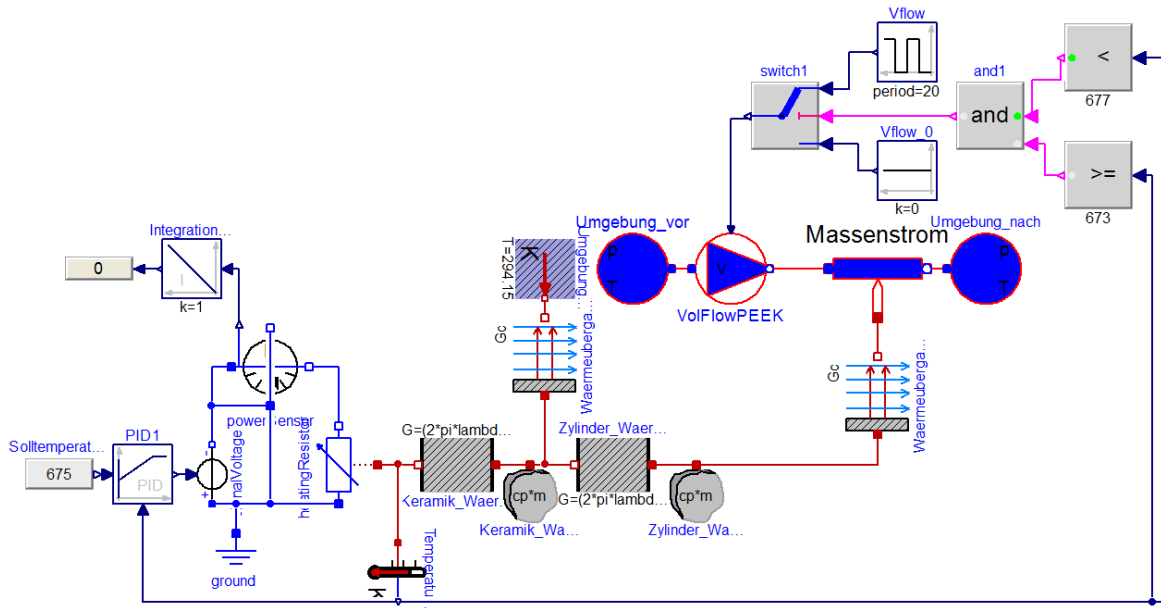


Abbildung VI-20: Übersicht Dymola®-Modell – Heizzone 3; Massenstrom 1, PEEK; Zykluszeit 1

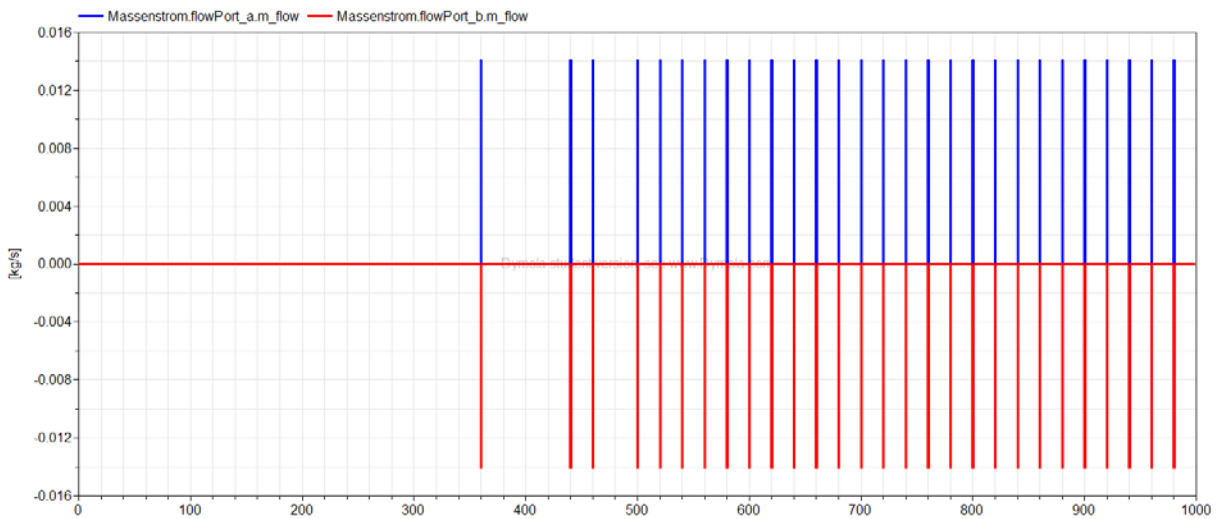


Abbildung VI-21: Massenstrom – Heizzone 3; Massenstrom 1, PEEK; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

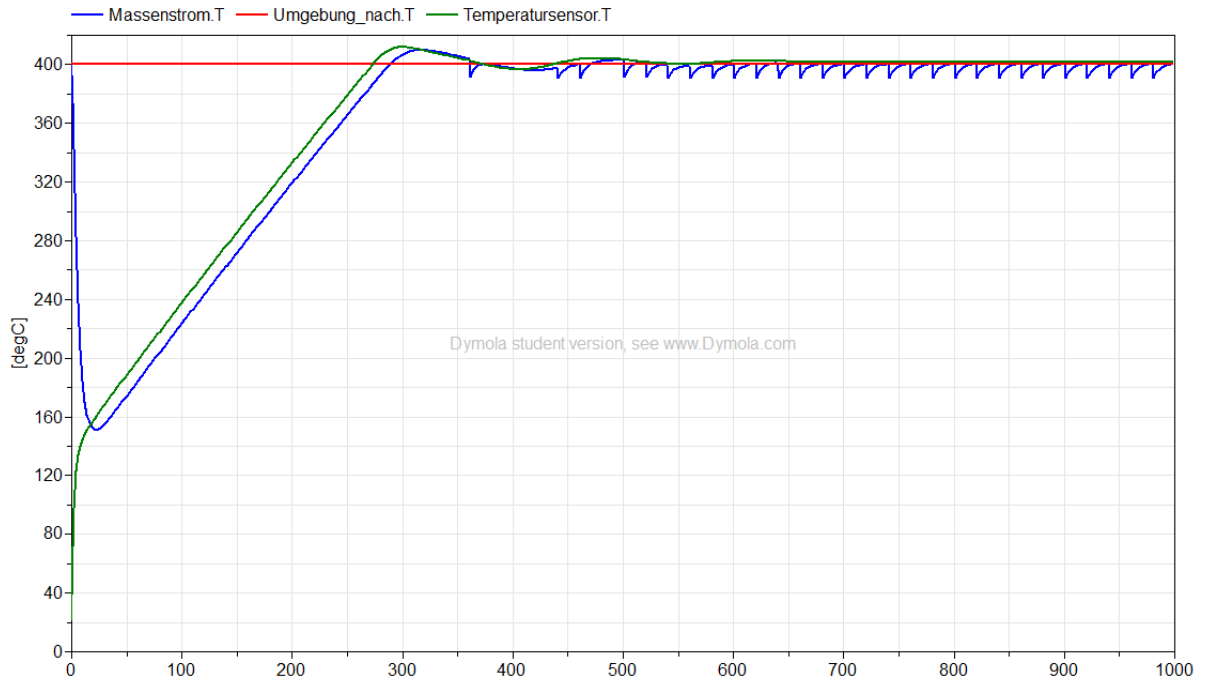


Abbildung VI-22: Temperaturen der Masse, Solltemperatur der Masse und Temperatur am Sensor– Heizzone 3; Massenstrom 1, PEEK; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

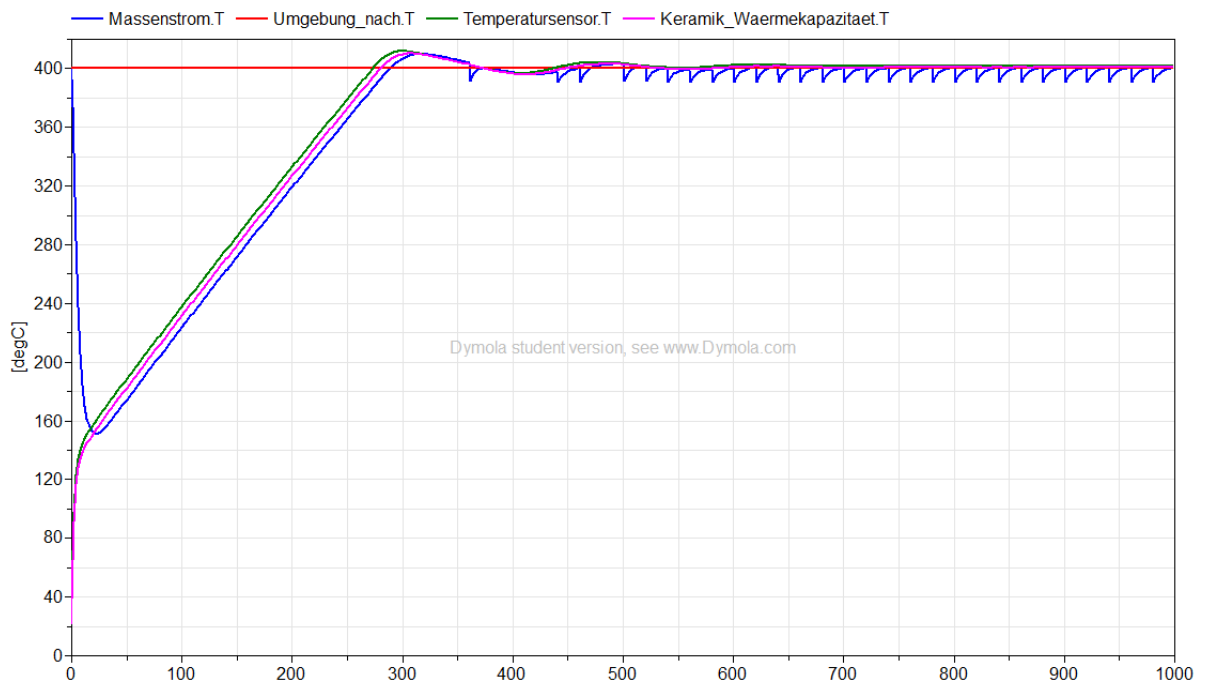


Abbildung VI-23: Temperaturen aller Komponenten sowie der Masse – Heizzone 3; Massenstrom 1, PEEK; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

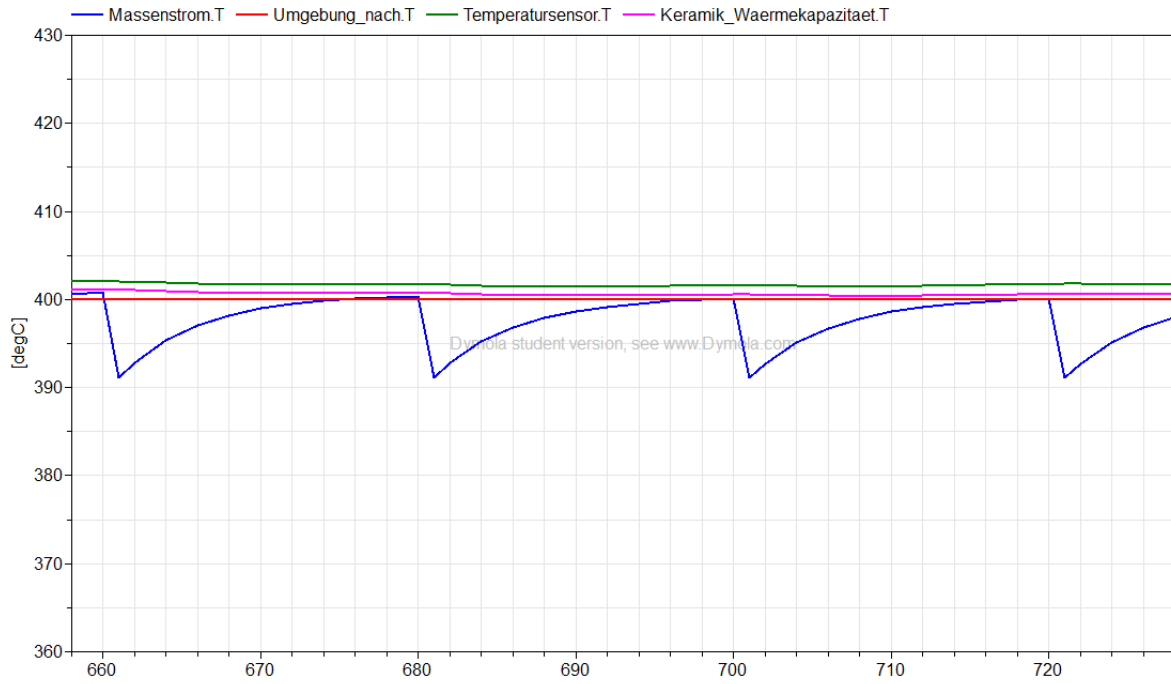


Abbildung VI-25: Detail - Temperaturen aller Komponenten sowie der Masse – Heizzone 3; Massenstrom 1, PEEK; Zykluszeit 1

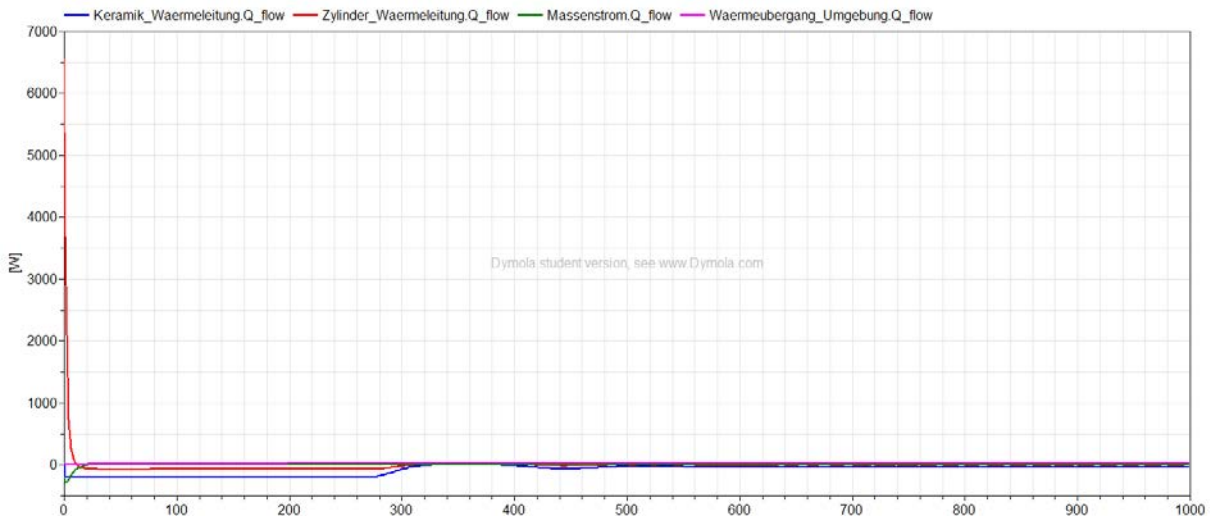


Abbildung VI-26: Wärmeleitung durch alle Komponenten sowie in die Masse und an die Umgebung – Heizzone 3; Massenstrom 1, PEEK; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

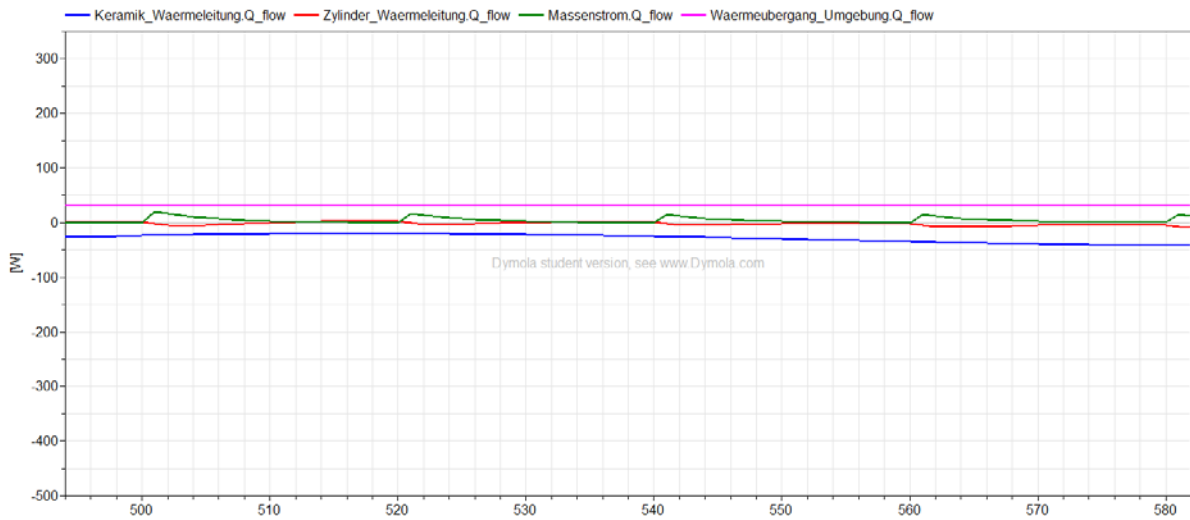


Abbildung VI-27: Detail - Wärmeleitung durch alle Komponenten sowie in die Masse und an die Umgebung – Heizzone 3; Massenstrom 1, PEEK; Zykluszeit 1

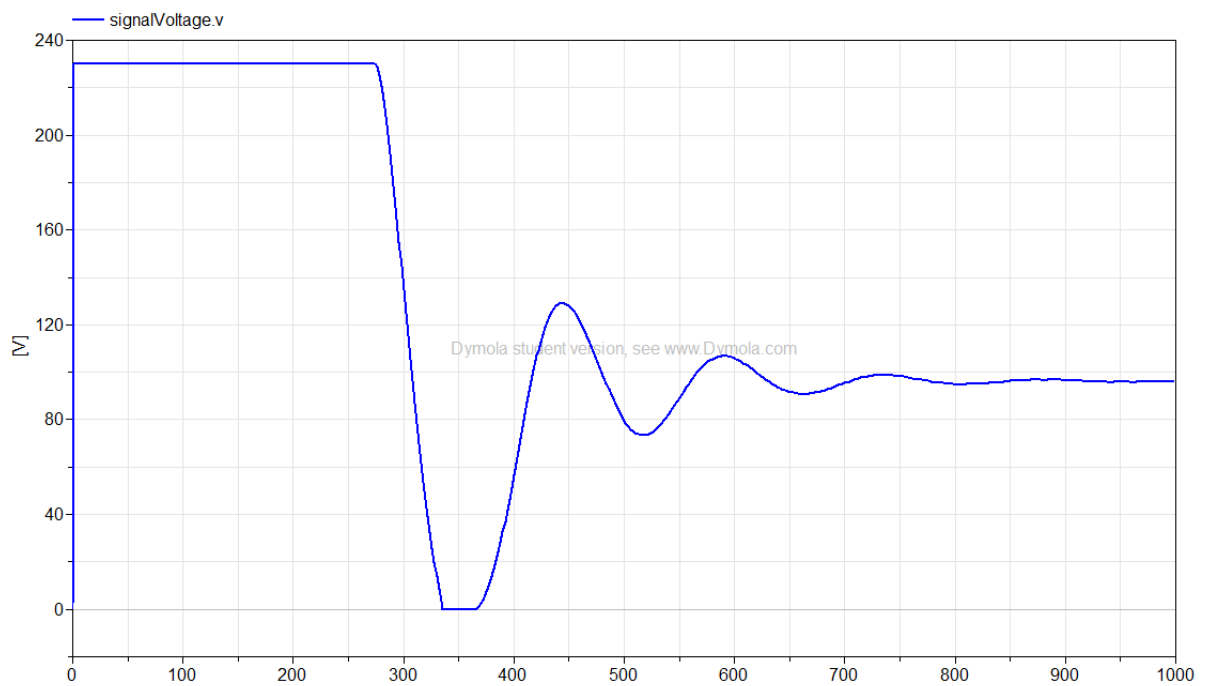


Abbildung VI-28: Spannungszufuhr an das System – Heizzone 3; Massenstrom 1, PEEK; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

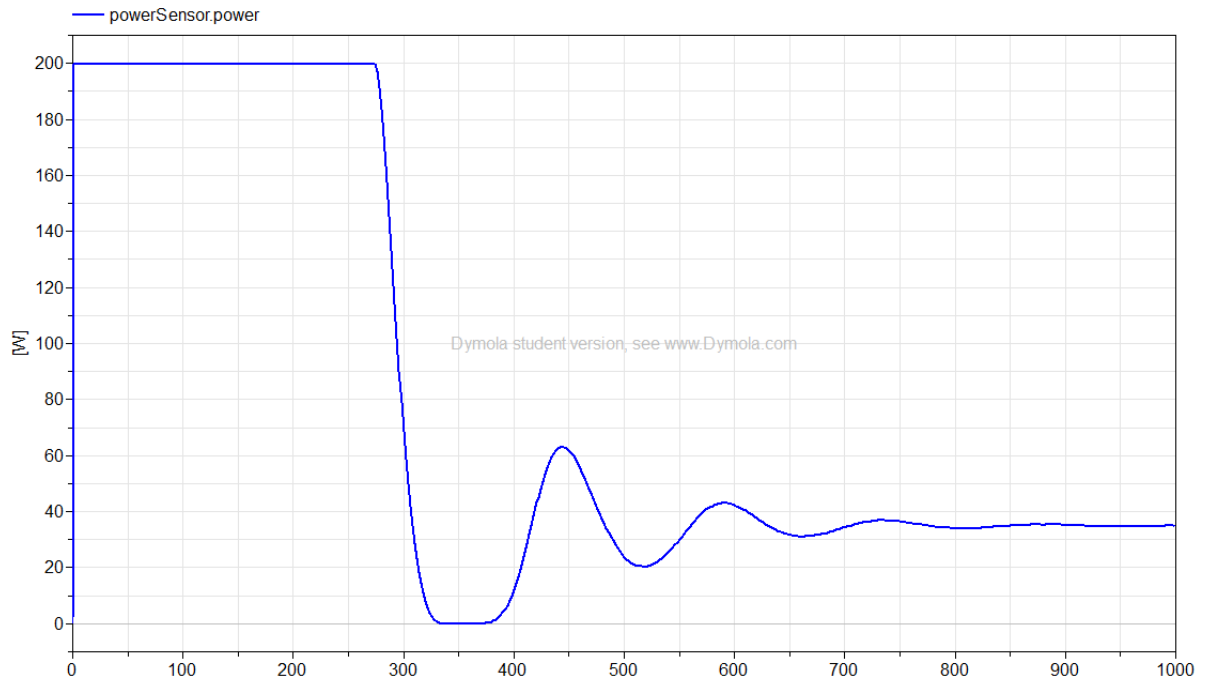
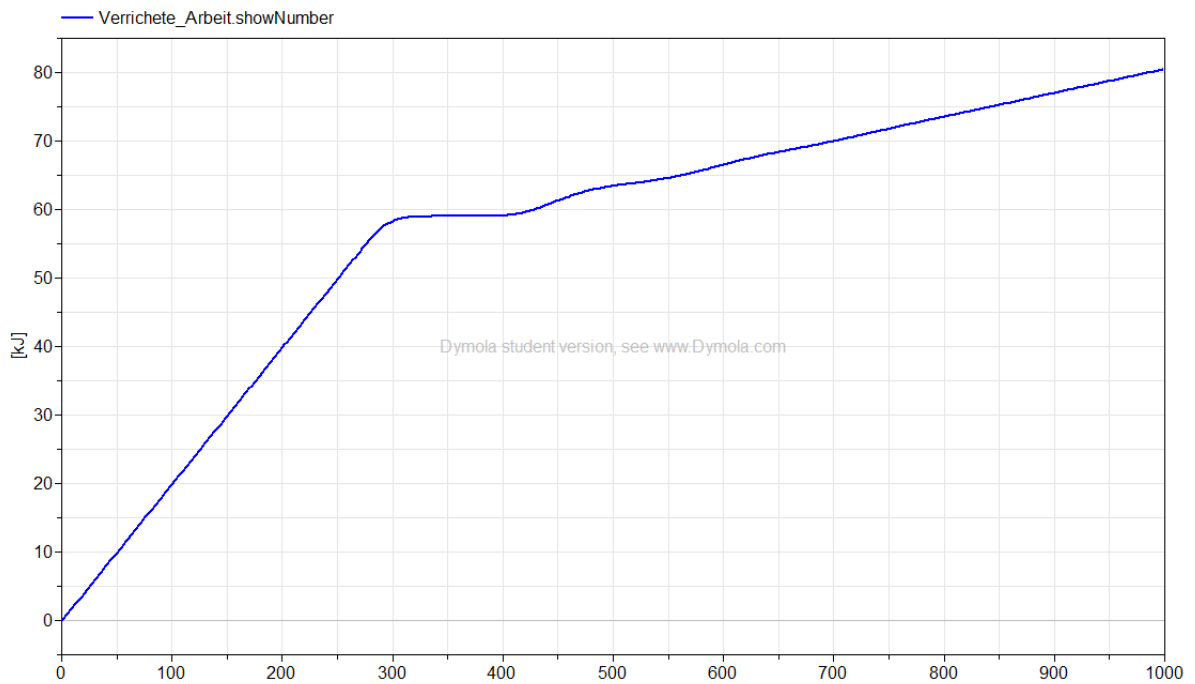


Abbildung 29: Leistungszufuhr an das System – Heizzone 3; Massenstrom 1, PEEK; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)



A. Abbildung VI-30: Energieeinsatz – Heizzone 3; Massenstrom 1, PEEK; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

VI.I.II PP; Massenstrom 1; Zykluszeit 1

Heizzone 1; PP; Massenstrom 1, Zykluszeit 1

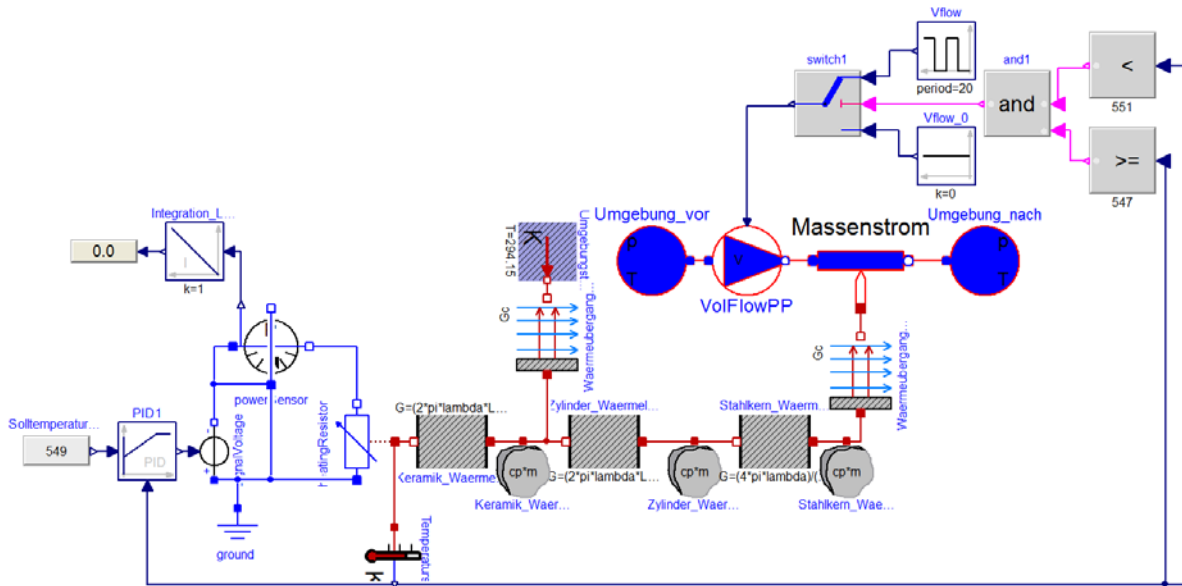


Abbildung VI-31: Übersicht Dymola®-Modell – Heizzone 1; Massenstrom 1, PP; Zykluszeit 1

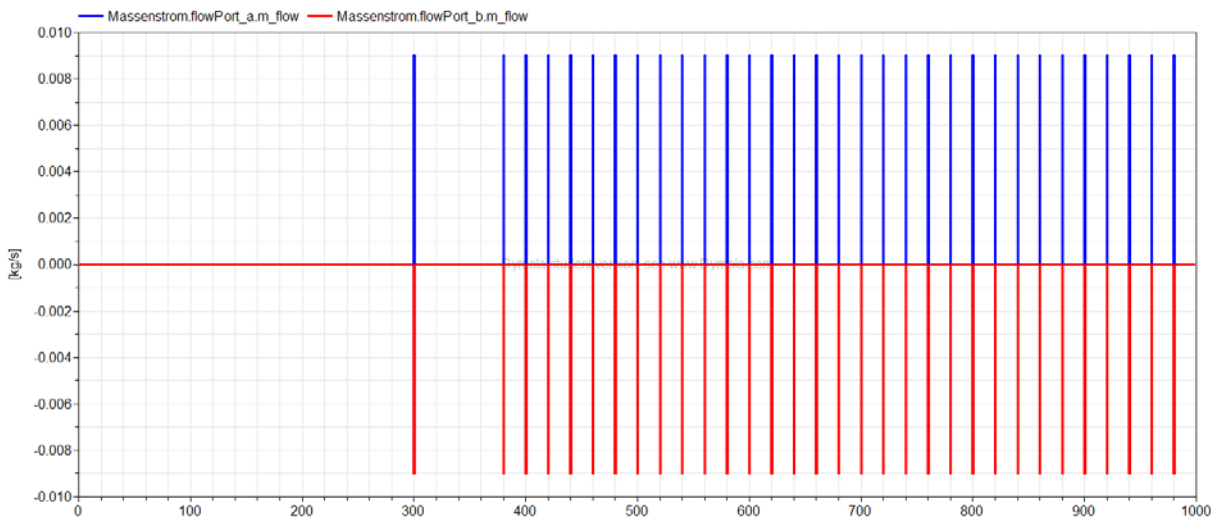


Abbildung VI-32: Massenstrom – Heizzone 1; Massenstrom 1, PP; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

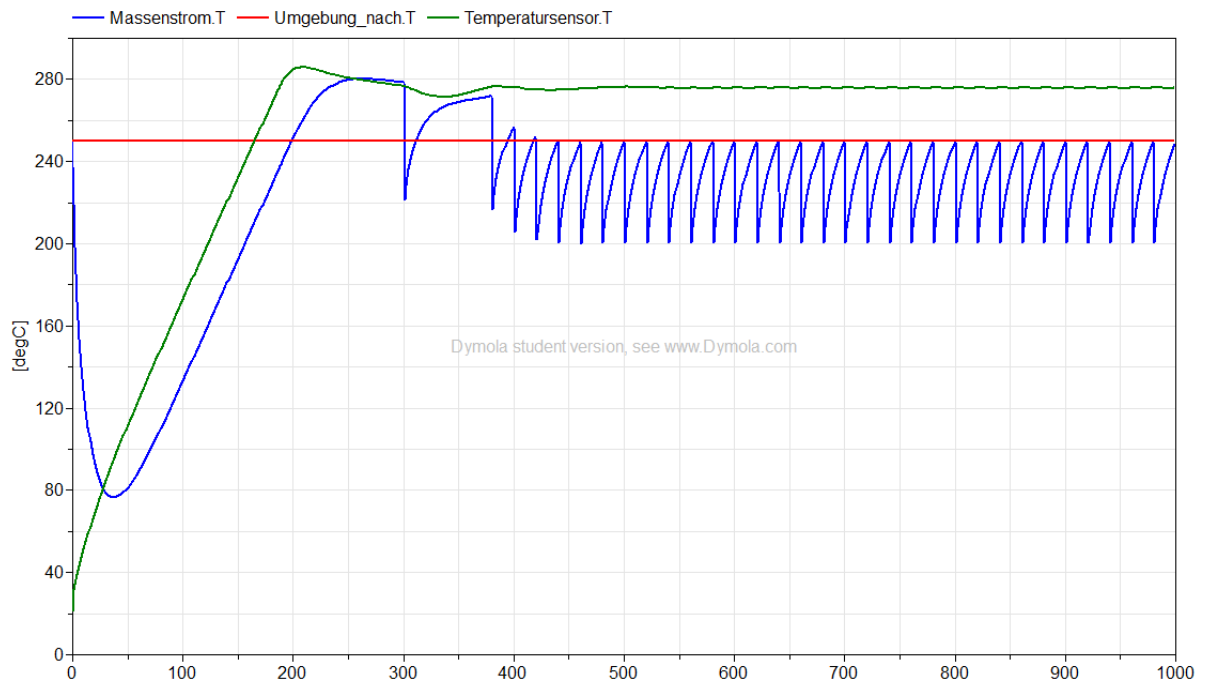


Abbildung VI-33: Temperaturen der Masse, Solltemperatur der Masse und Temperatur am Sensor– Heizzone 1; Massenstrom 1, PP; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

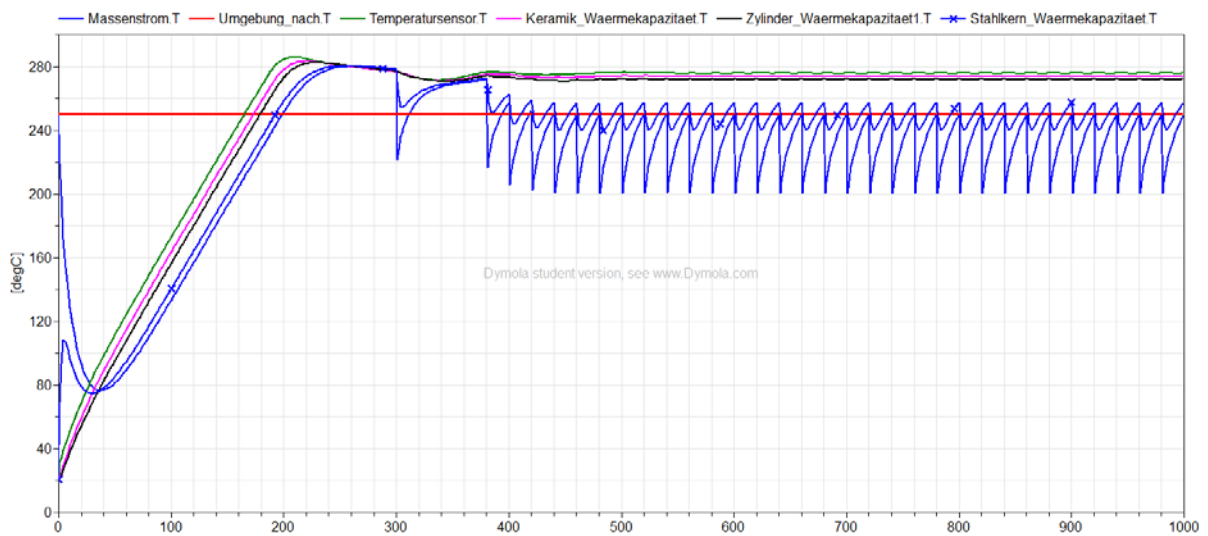


Abbildung VI-35: Temperaturen aller Komponenten sowie der Masse – Heizzone 1; Massenstrom 1, PP; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

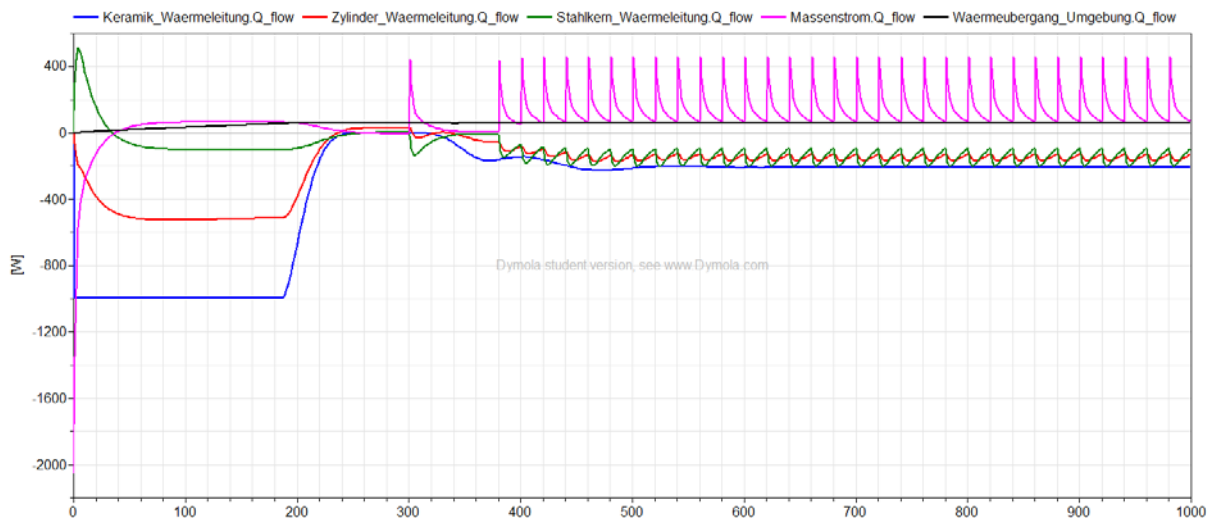


Abbildung VI-36: Wärmeleitung durch alle Komponenten sowie in die Masse und an die Umgebung – Heizzone 1; Massenstrom 1, PP; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

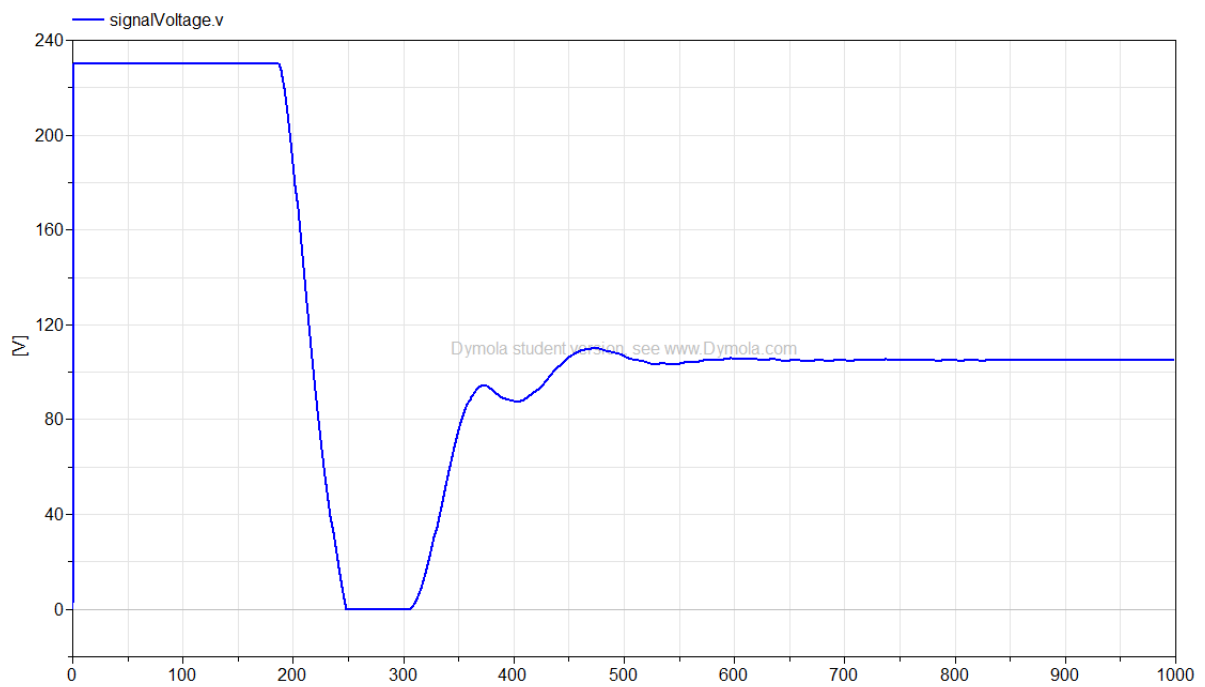


Abbildung VI-37: Spannungszufuhr an das System – Heizzone 1; Massenstrom 1, PP; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

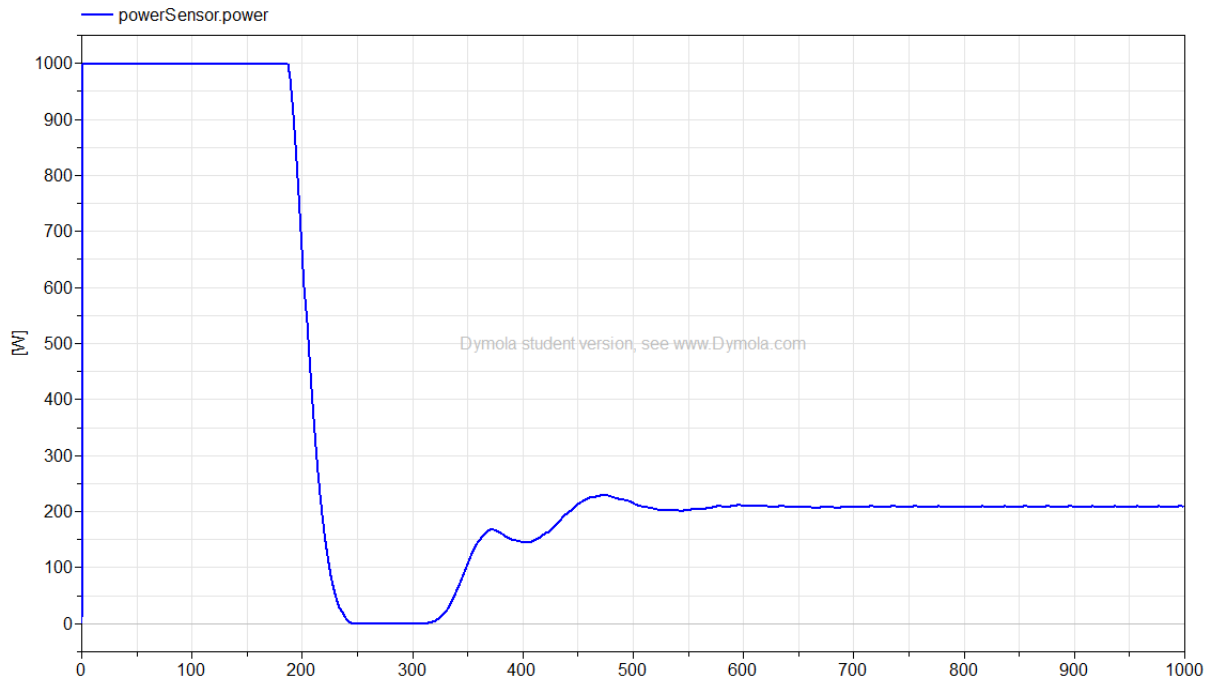


Abbildung VI-38: Leistungszufuhr an das System – Heizzone 1; Massenstrom 1, PP; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

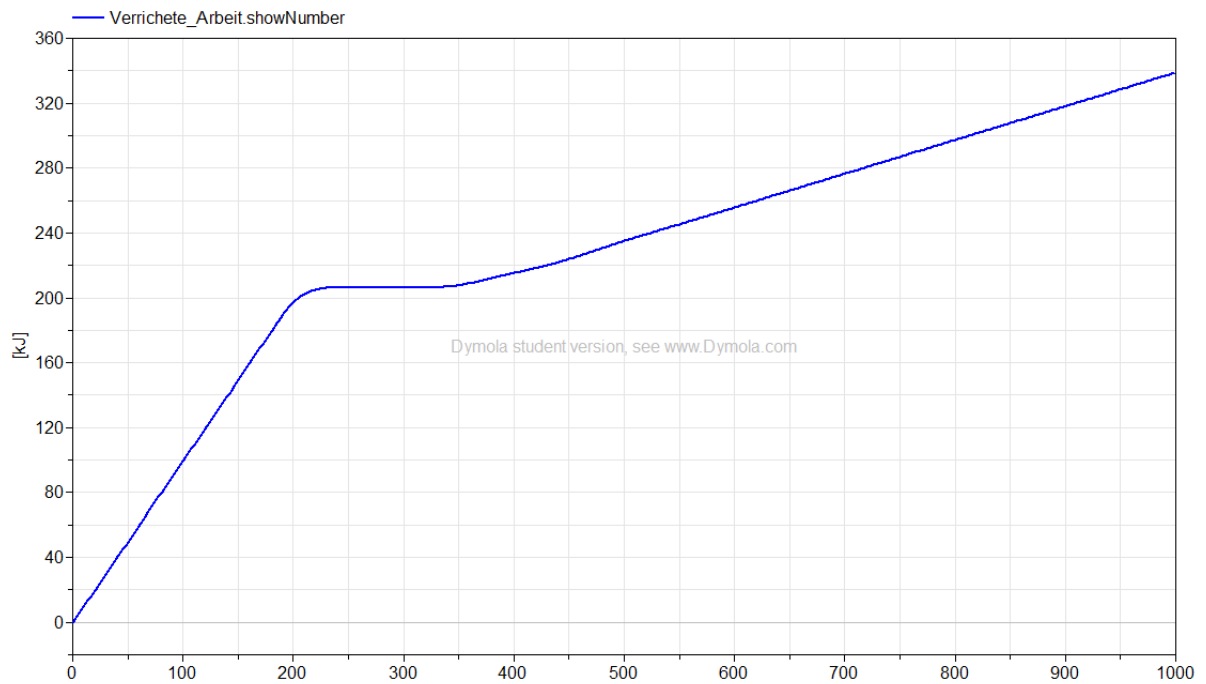


Abbildung VI-39: Energieeinsatz – Heizzone 1; Massenstrom 1, PP; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

Heizzone 2; PP; Massenstrom 1; Zykluszeit 1

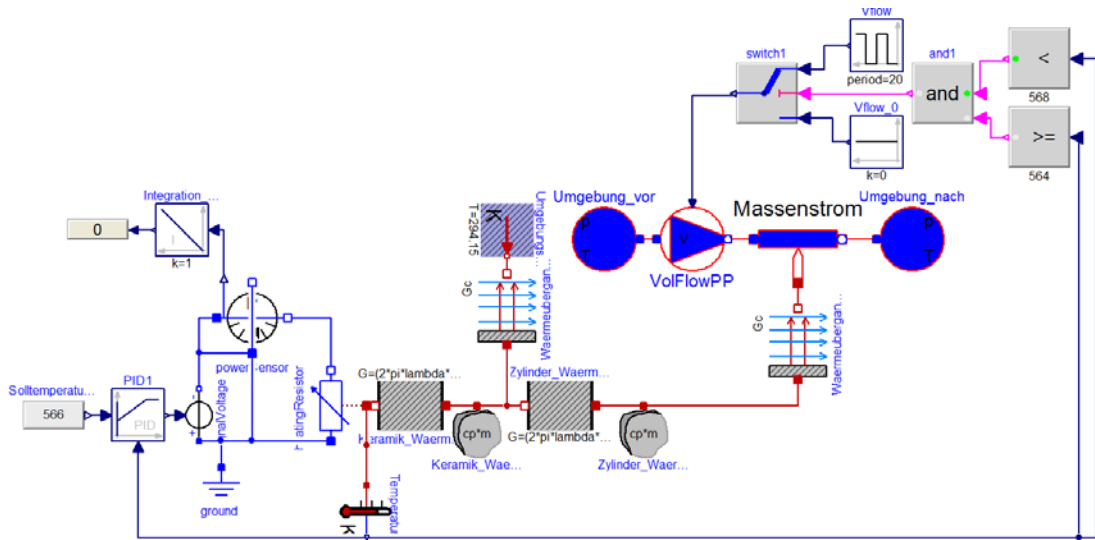


Abbildung VI-40: Übersicht Dymola®-Modell – Heizzone 2; Massenstrom 1, PP; Zykluszeit 1

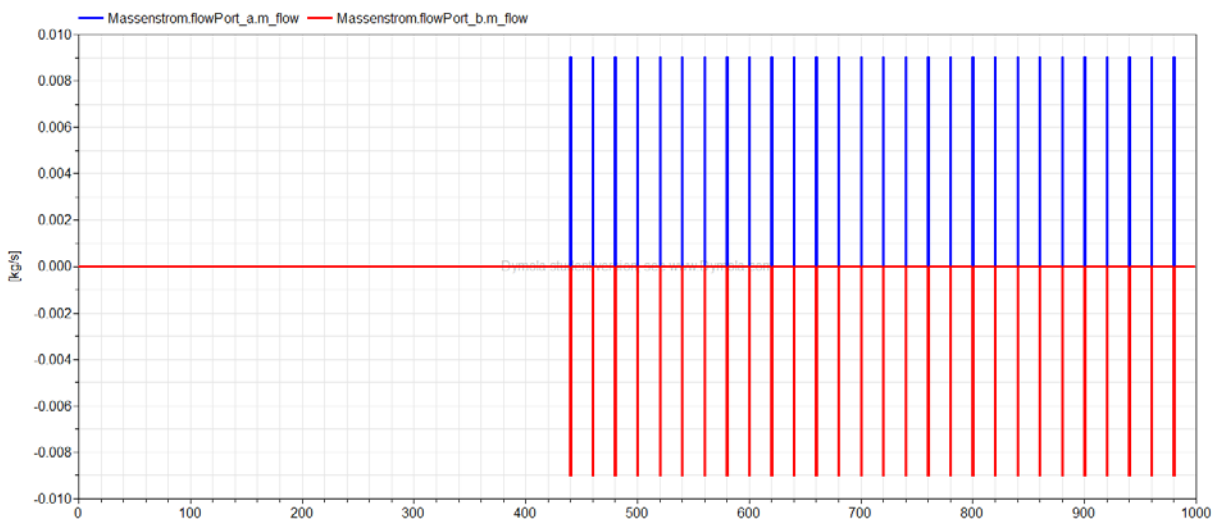


Abbildung VI-41: Massenstrom – Heizzone 2; Massenstrom 1, PP; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

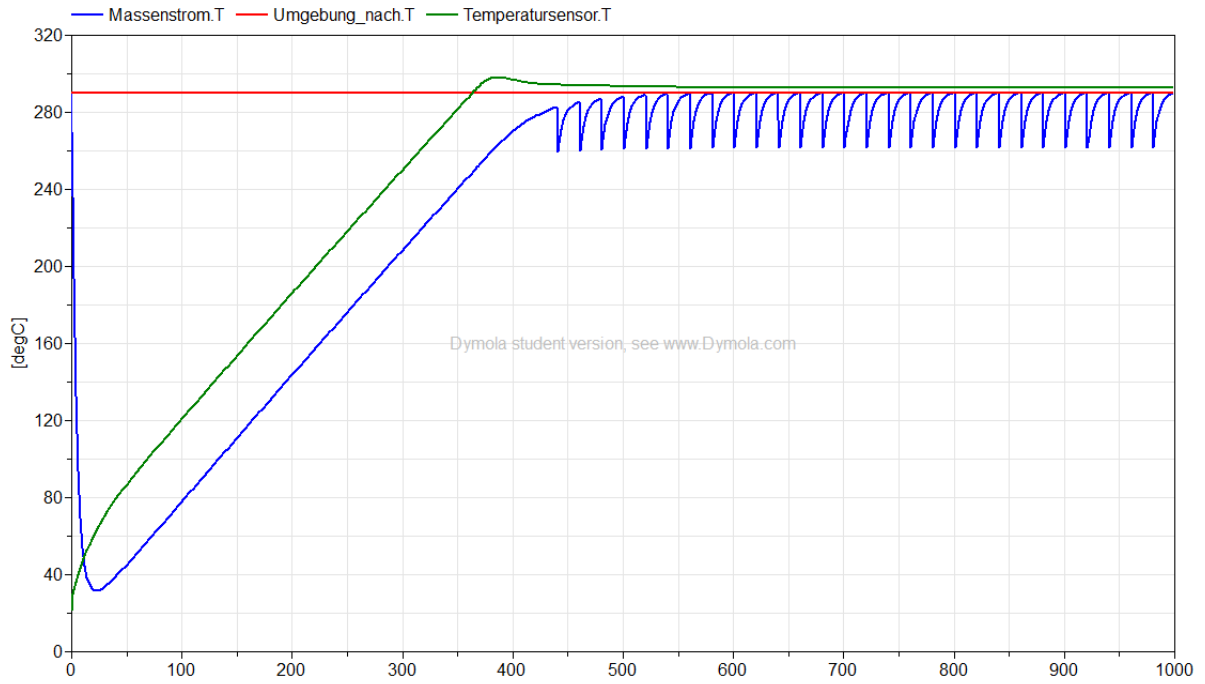


Abbildung VI-42: Temperaturen der Masse, Solltemperatur der Masse und Temperatur am Sensor– Heizzone 1; Massenstrom 2, PP; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

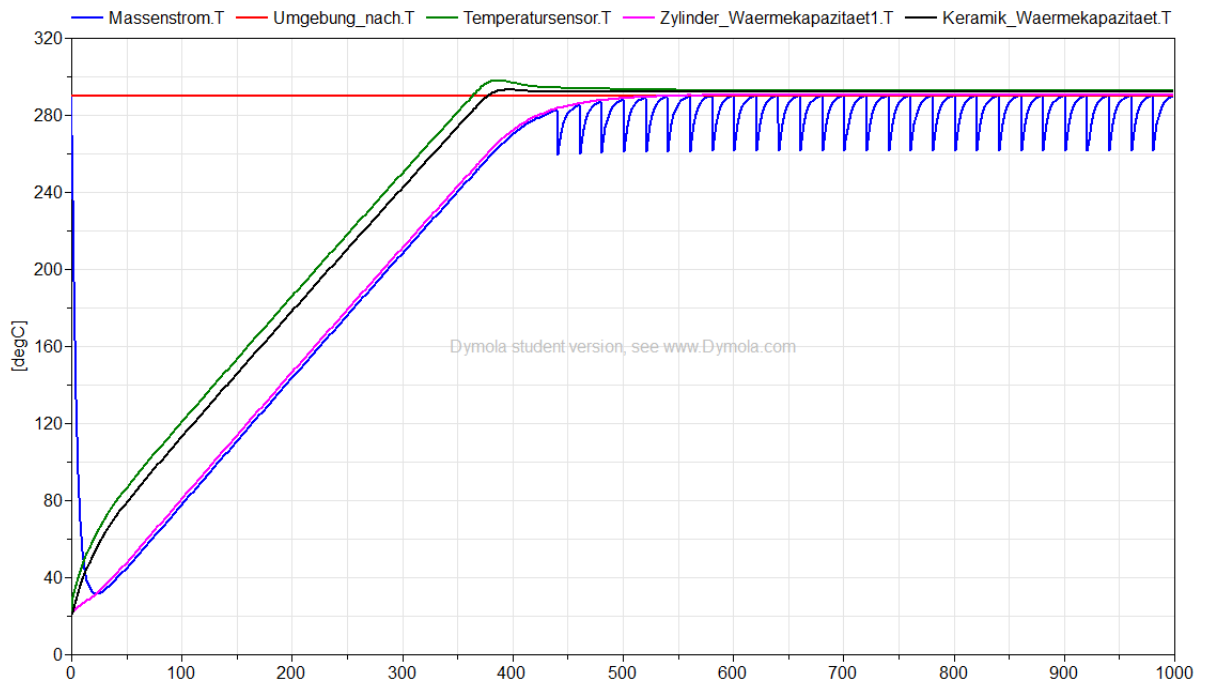


Abbildung VI-43: Temperaturen der Masse, Solltemperatur der Masse und Temperatur am Sensor– Heizzone 2; Massenstrom 2, PP; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

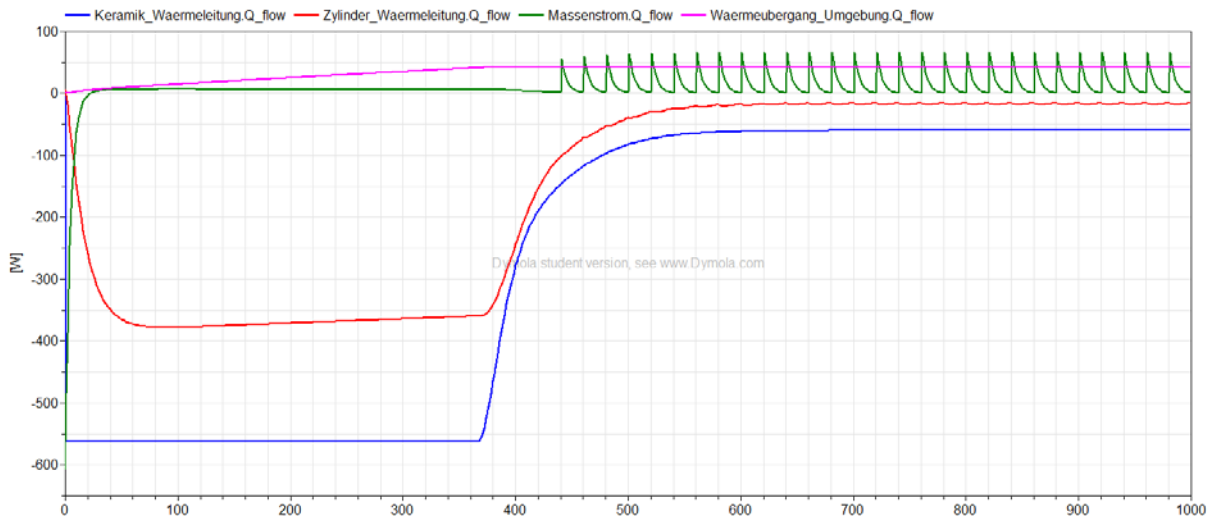


Abbildung VI-44: Wärmeleitung durch alle Komponenten sowie in die Masse und an die Umgebung – Heizzone 2; Massenstrom 1, PP; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

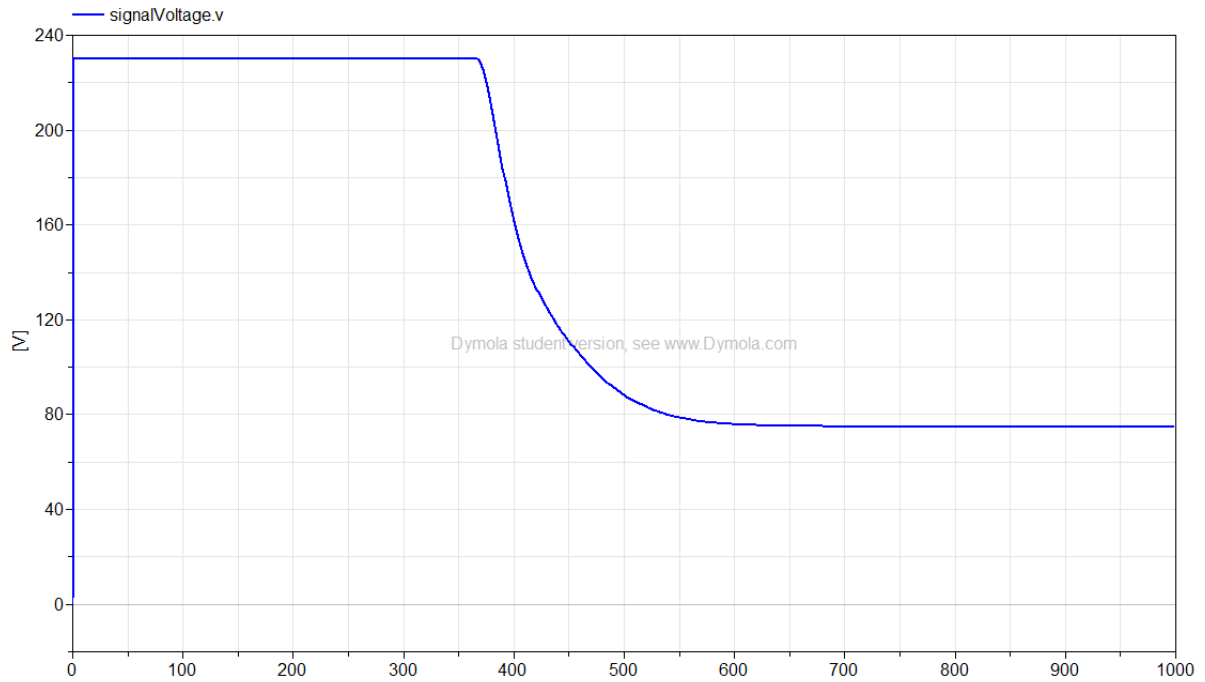


Abbildung VI-45: Spannungszufuhr an das System – Heizzone 2; Massenstrom 1, PP; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

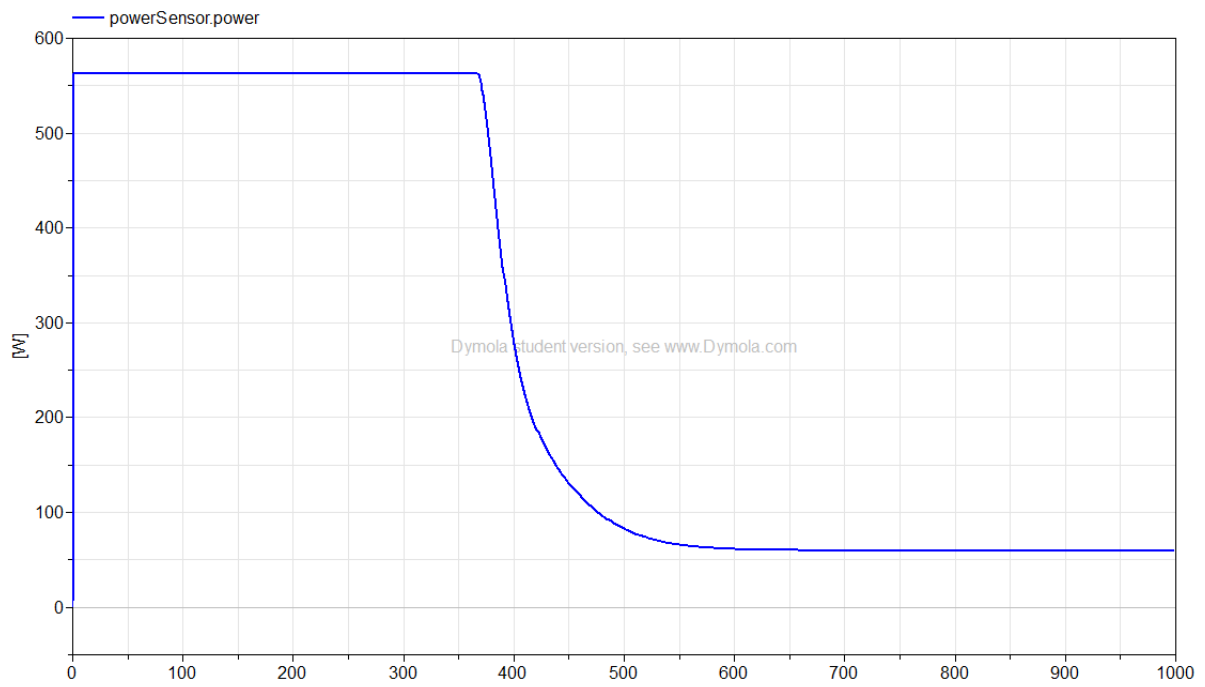


Abbildung VI-46: Leistungszufuhr an das System – Heizzone 2; Massenstrom 1, PP; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

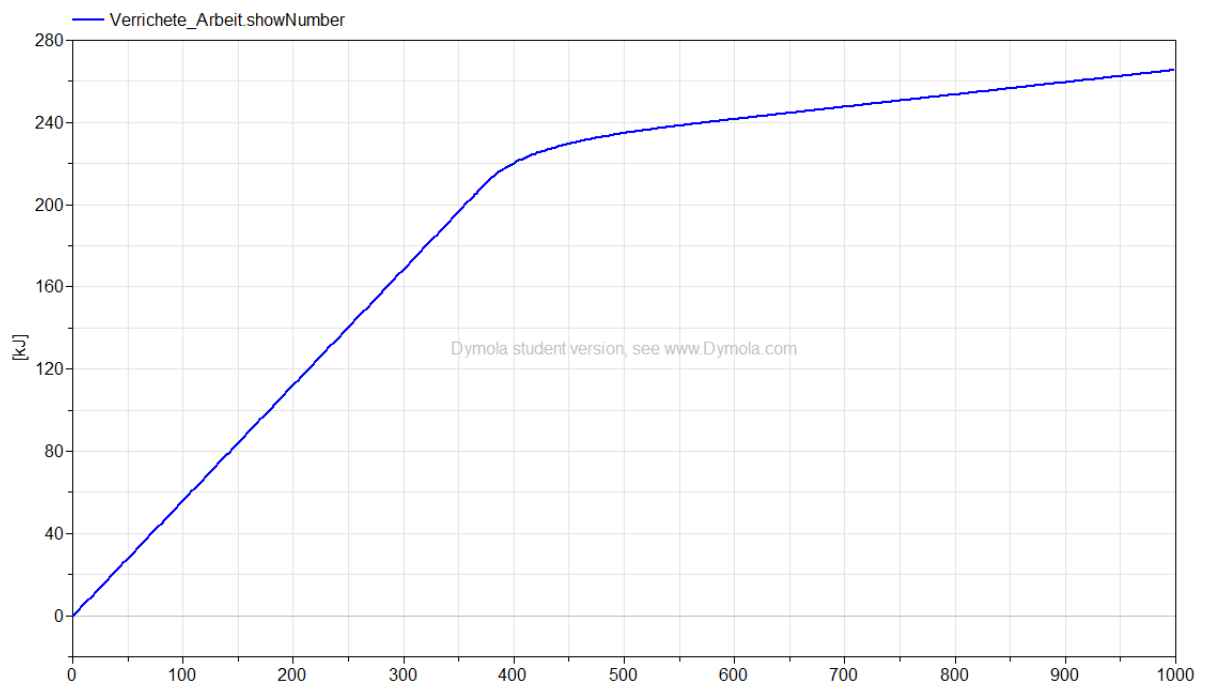


Abbildung VI-47: Energieeinsatz – Heizzone 2; Massenstrom 1, PP; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

Heizzone 3; PP; Massenstrom 1; Zykluszeit 1

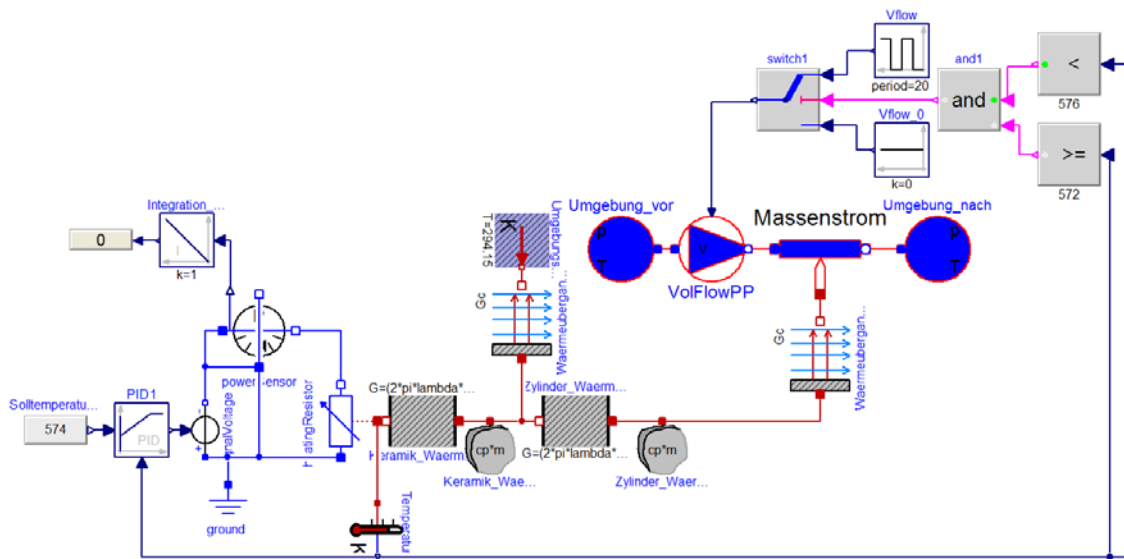


Abbildung VI-48: Übersicht Dymola®-Modell – Heizzone 3; Massenstrom 1, PP; Zykluszeit 1

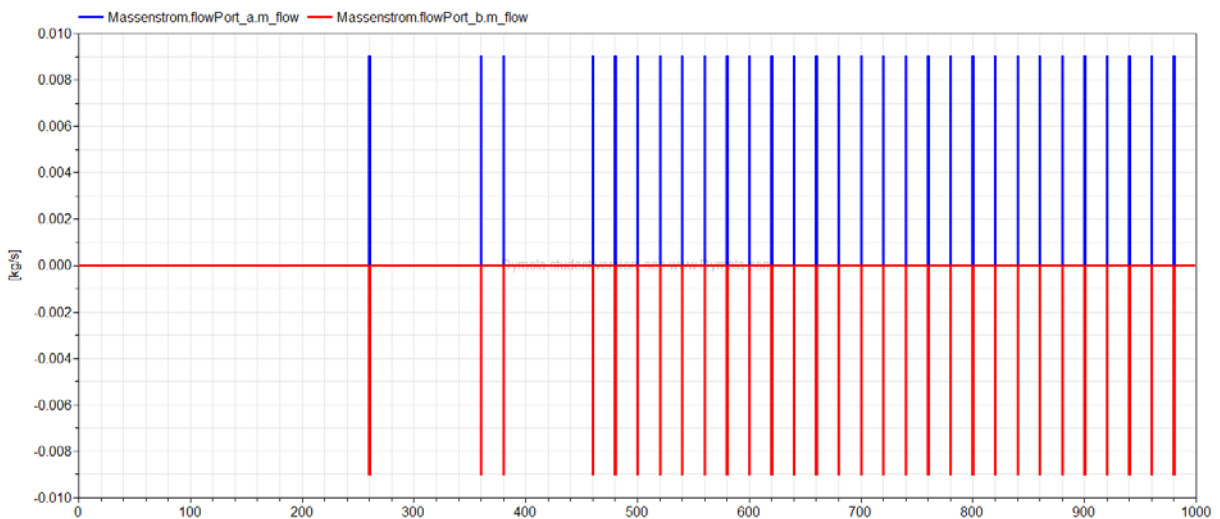


Abbildung VI-49: Massenstrom – Heizzone 3; Massenstrom 1, PP; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

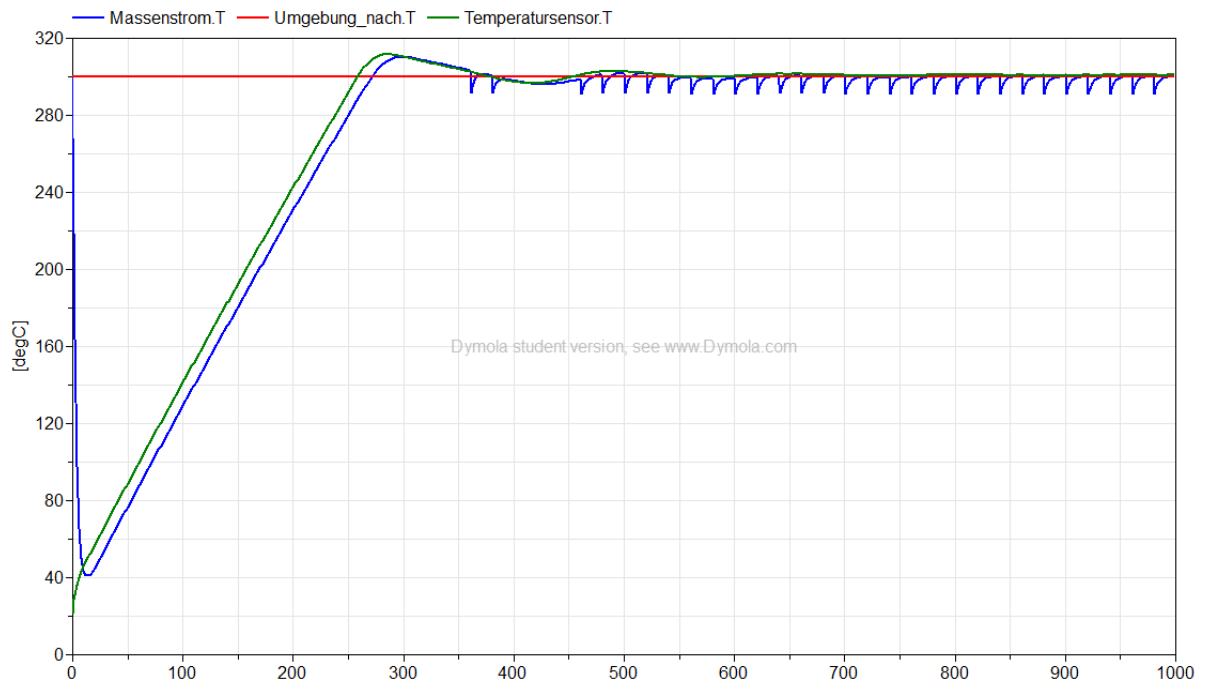


Abbildung VI-50: Temperaturen der Masse, Solltemperatur der Masse und Temperatur am Sensor– Heizzone 3; Massenstrom 1, PP; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

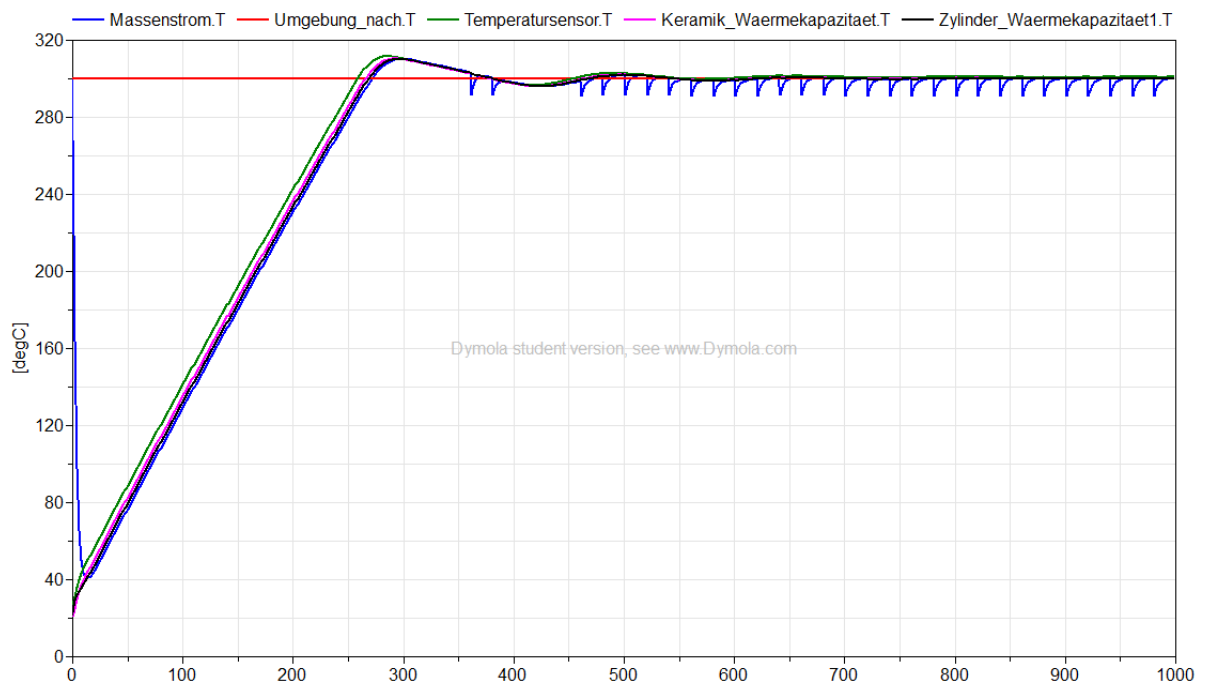


Abbildung VI-51: Temperaturen der Masse, Solltemperatur der Masse und Temperatur am Sensor– Heizzone 3; Massenstrom 2, PP; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

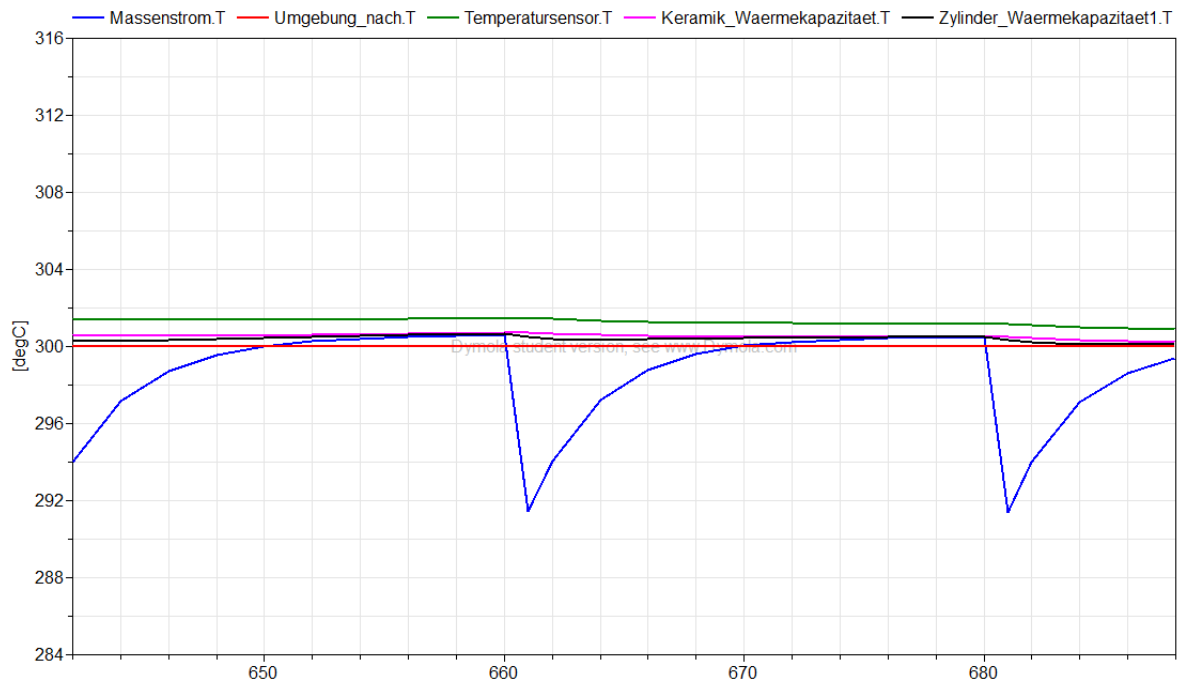


Abbildung VI-52: Detail - Temperaturen der Masse, Solltemperatur der Masse und Temperatur am Sensor-Heizzone 3; Massenstrom 2, PP; Zykluszeit 1

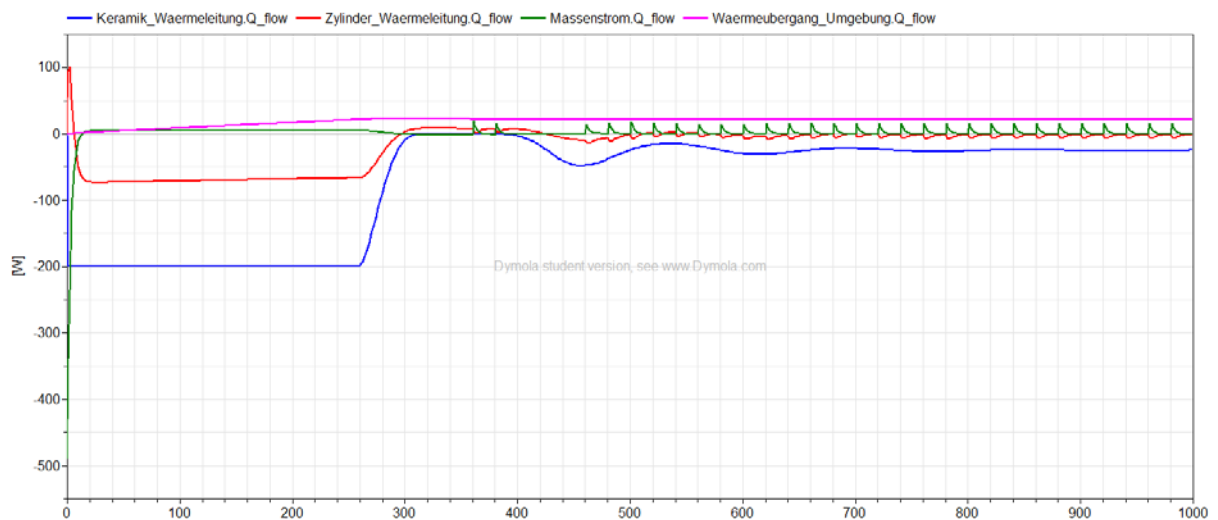


Abbildung VI-53: Wärmeleitung durch alle Komponenten sowie in die Masse und an die Umgebung – Heizzone 3; Massenstrom 1, PP; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

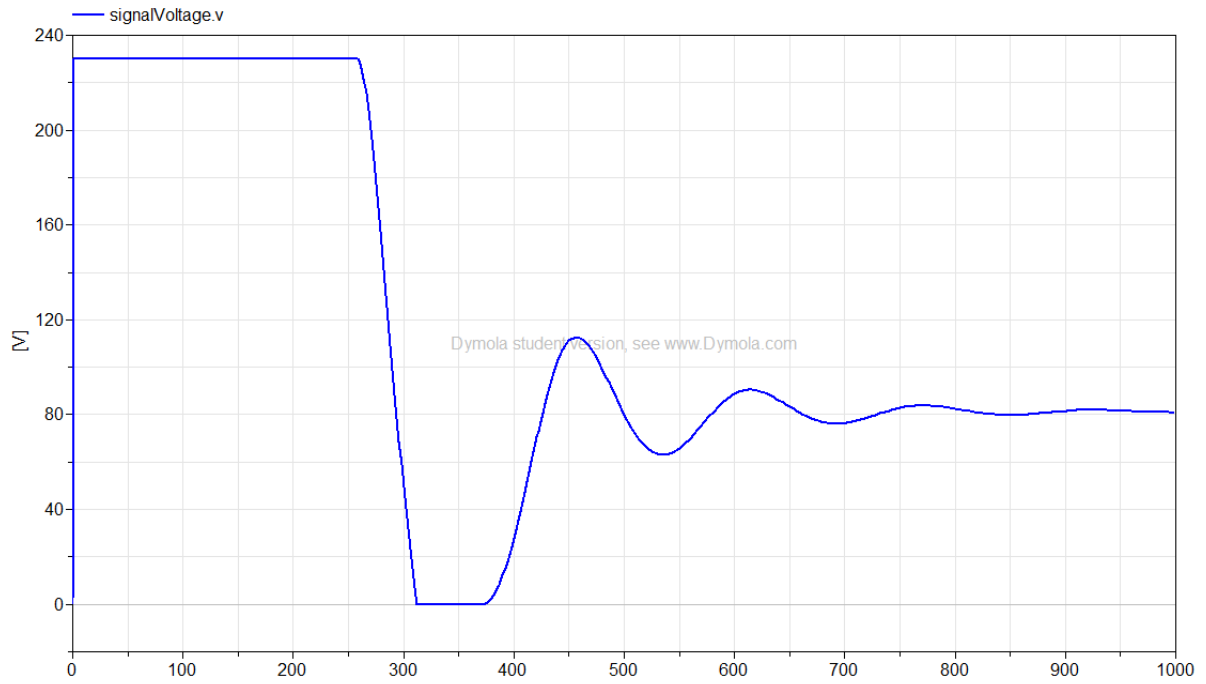


Abbildung VI-54: Spannungszufuhr an das System – Heizzone 3; Massenstrom 1, PP; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

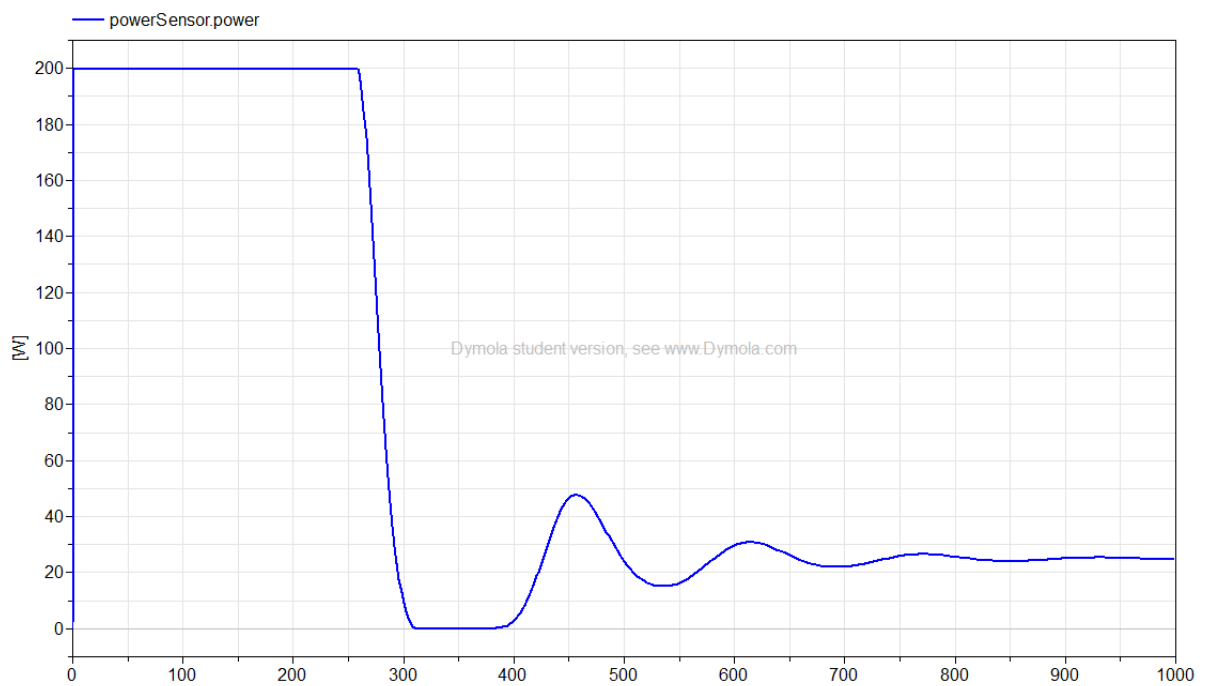


Abbildung VI-55: Leistungszufuhr an das System – Heizzone 3; Massenstrom 1, PP; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

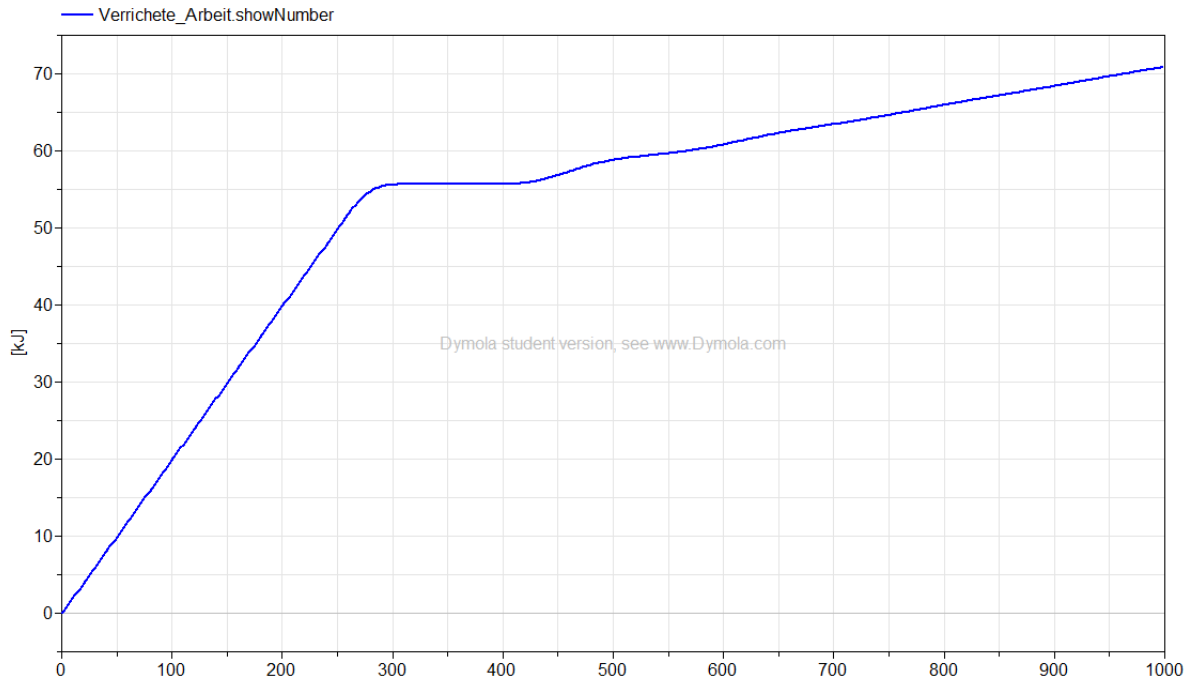


Abbildung VI-56: Energieeinsatz – Heizzone 3; Massenstrom 1, PP; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

VI.I.III PEEK, Massenstrom 2; Zykluszeit 1

Heizzone 1; PEEK; Massenstrom 2; Zykluszeit 1

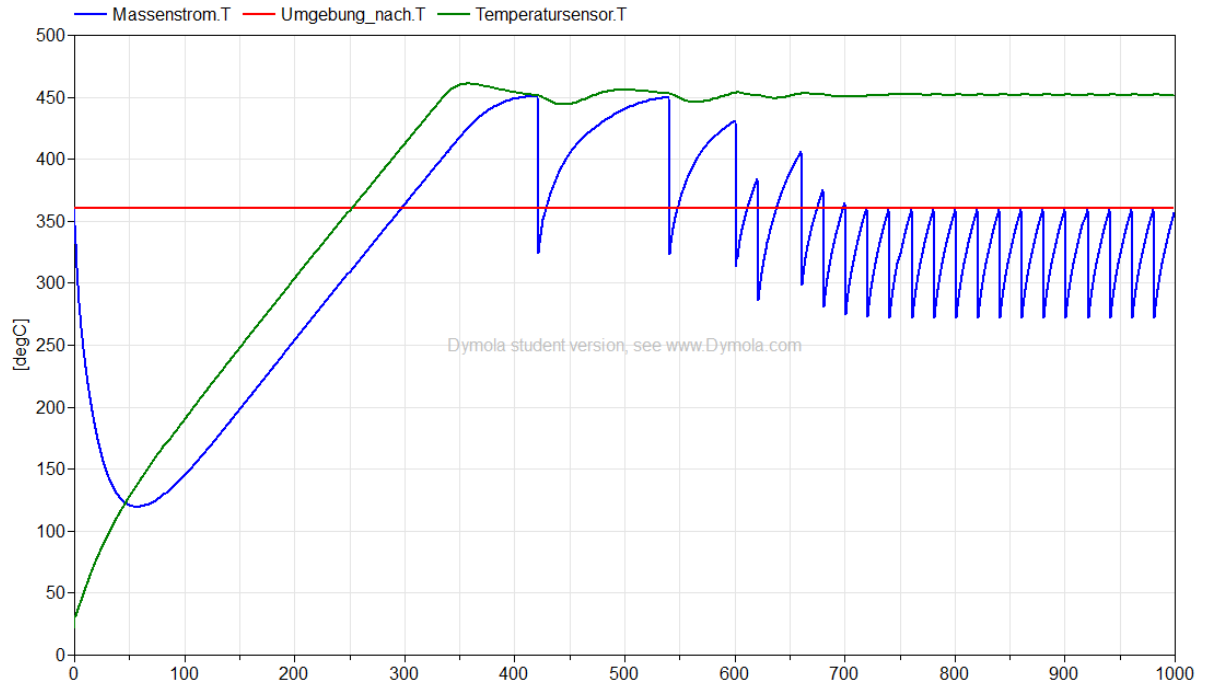


Abbildung VI-57: Temperatur der Masse, Solltemperatur der Masse und Temperatur am Sensor– Heizzone 1; PEEK; Massenstrom 2, Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

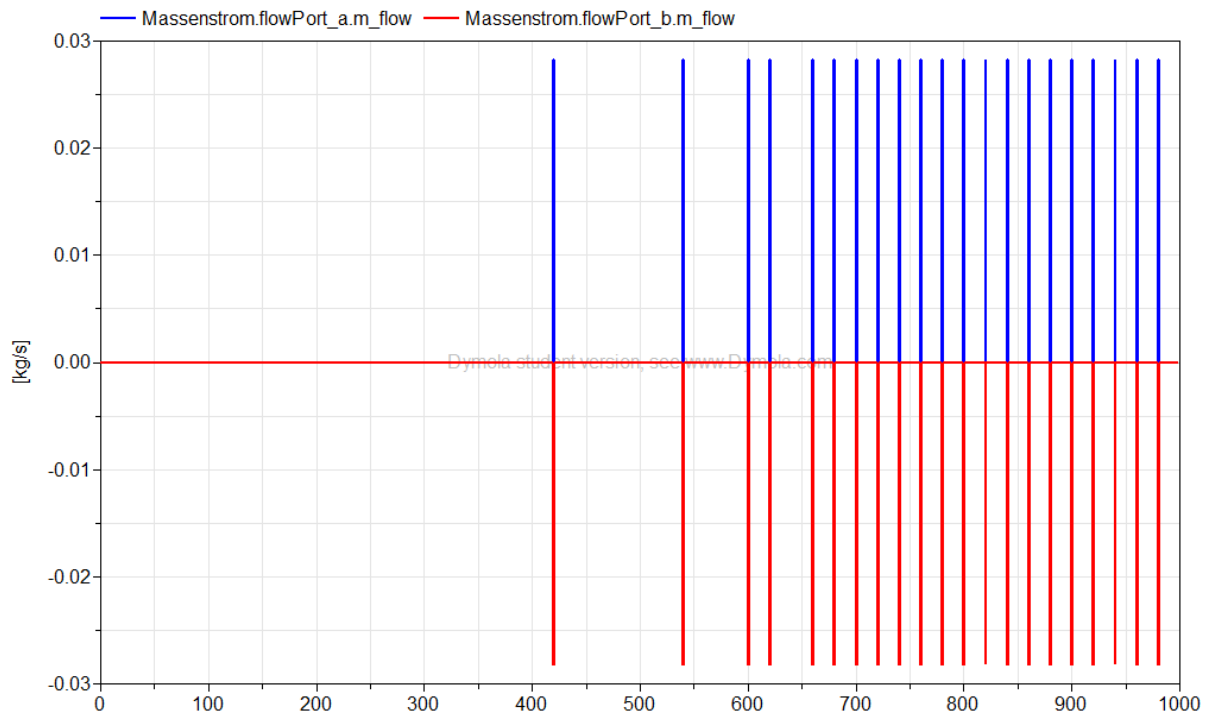


Abbildung VI-58: Massenstrom – Heizzone 1; PEEK; Massenstrom 2; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

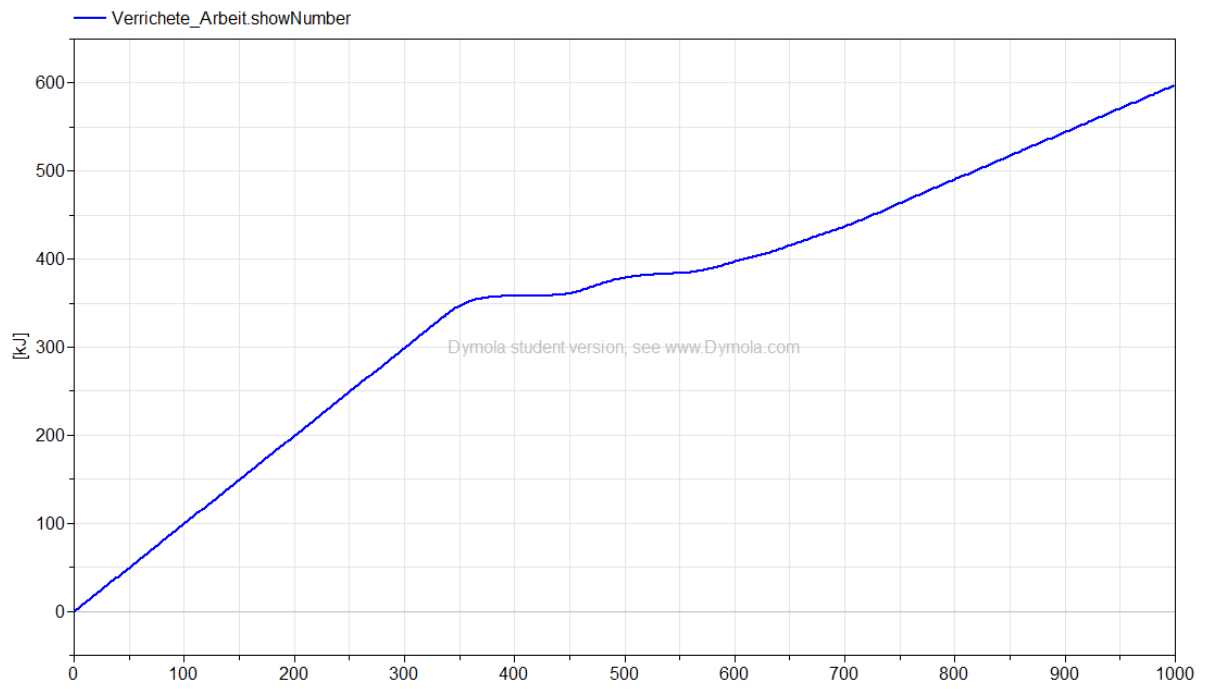


Abbildung VI-59: Energieeinsatz – Heizzone 1; PEEK; Massenstrom 2, Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

Heizzone 2; PEEK; Massenstrom 2; Zykluszeit 1

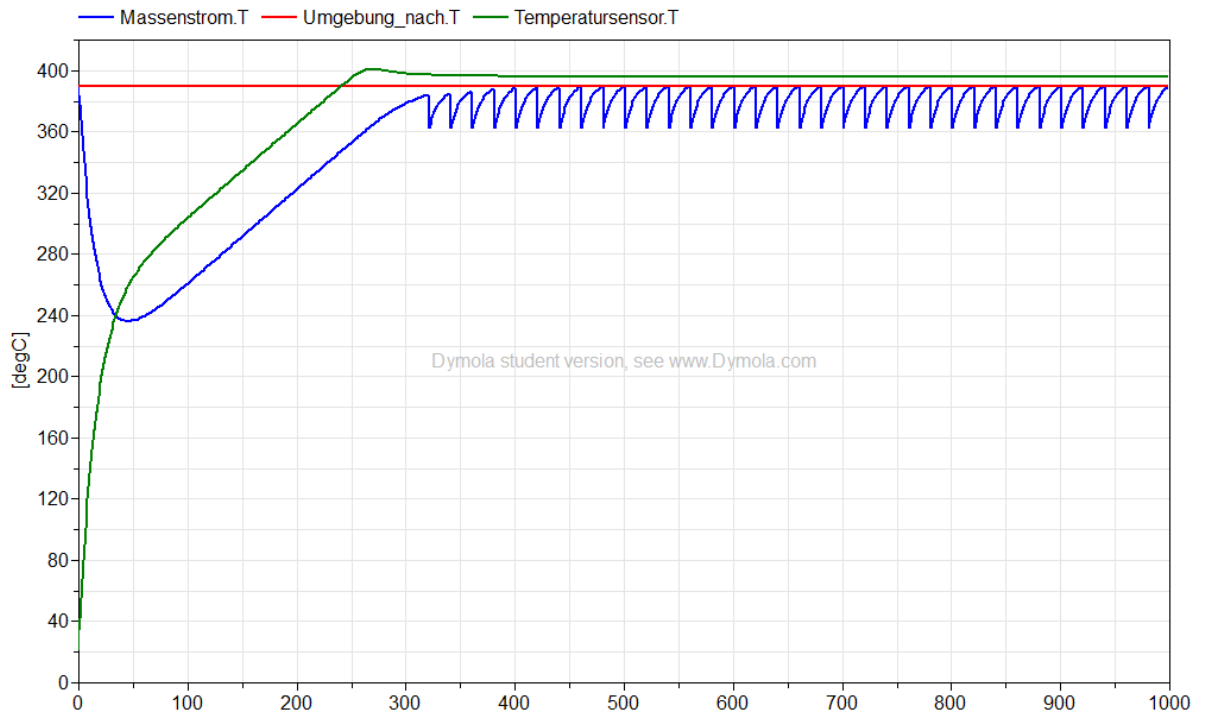


Abbildung VI-60: Temperatur der Masse, Solltemperatur der Masse und Temperatur am Sensor– Heizzone 2; PEEK; Massenstrom 2, Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

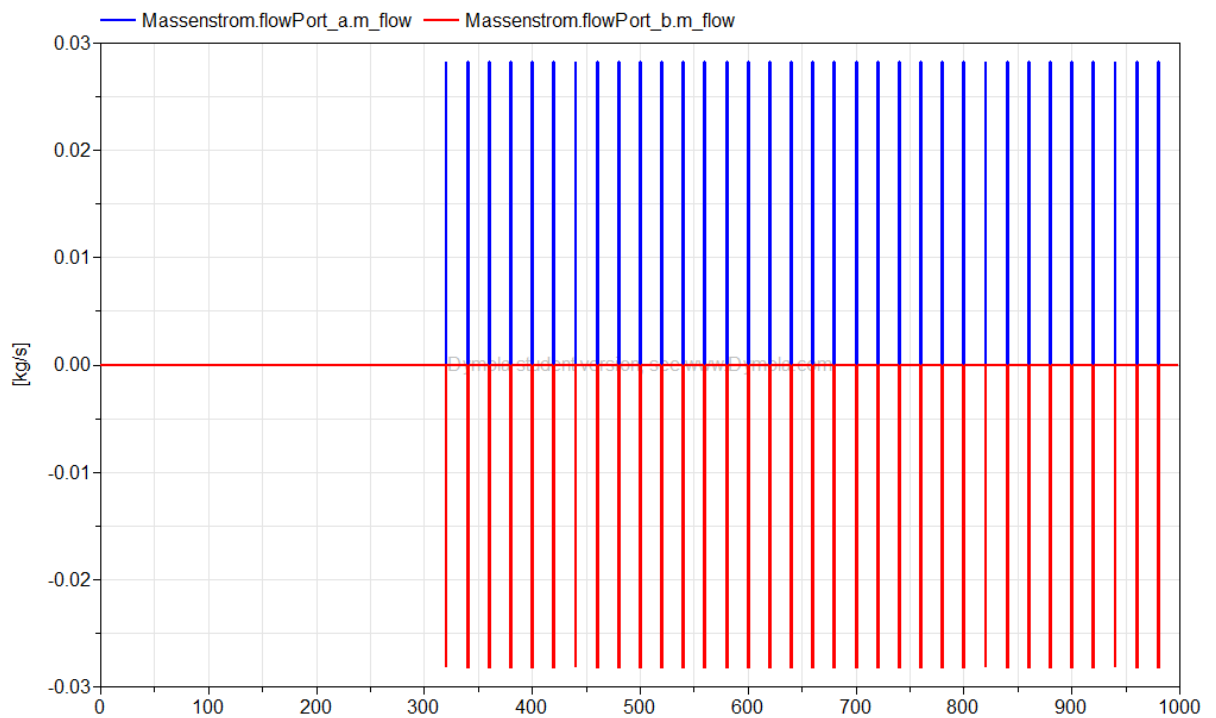


Abbildung VI-61: Massenstrom – Heizzone 2; PEEK; Massenstrom 2; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

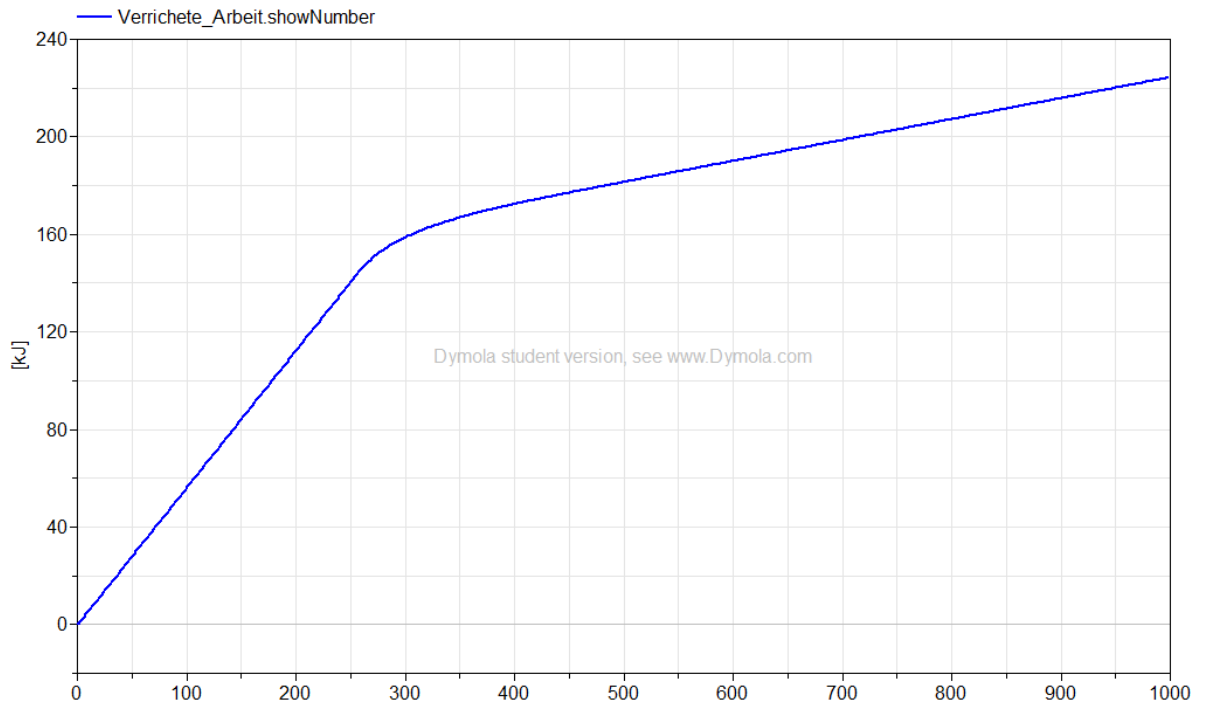


Abbildung VI-62: Energieeinsatz – Heizzone 2; PEEK; Massenstrom 2, Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

Heizzone 3; PEEK; Massenstrom 2; Zykluszeit 1

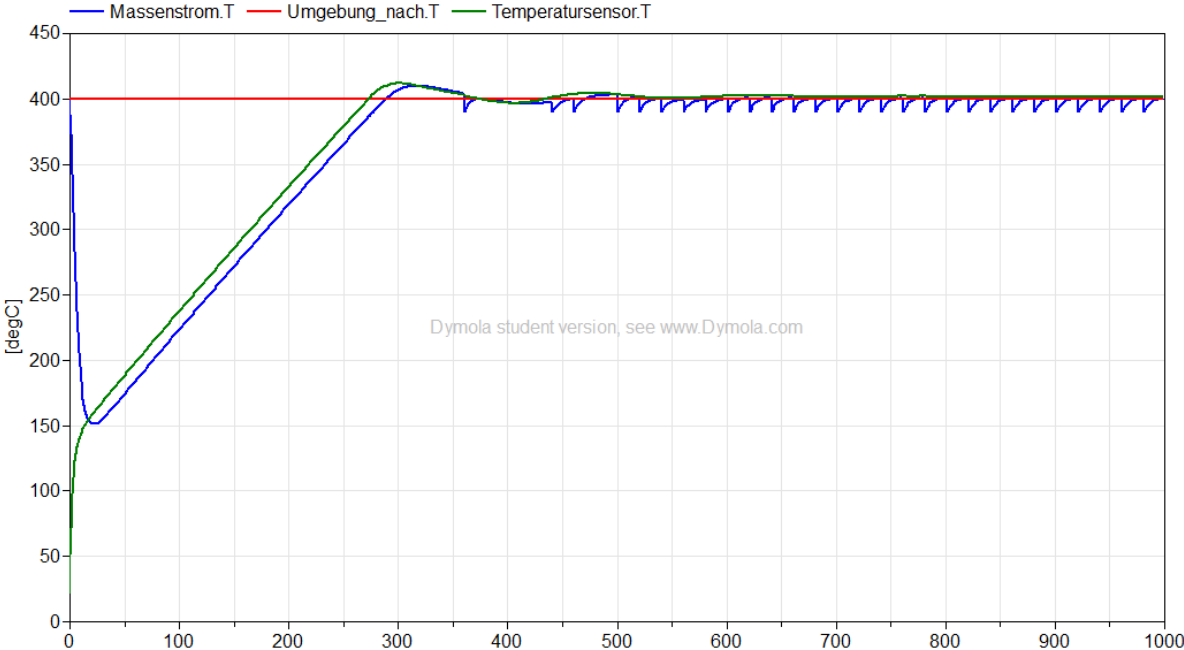


Abbildung VI-63: Temperatur der Masse, Solltemperatur der Masse und Temperatur am Sensor– Heizzone 3; PEEK; Massenstrom 2, Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

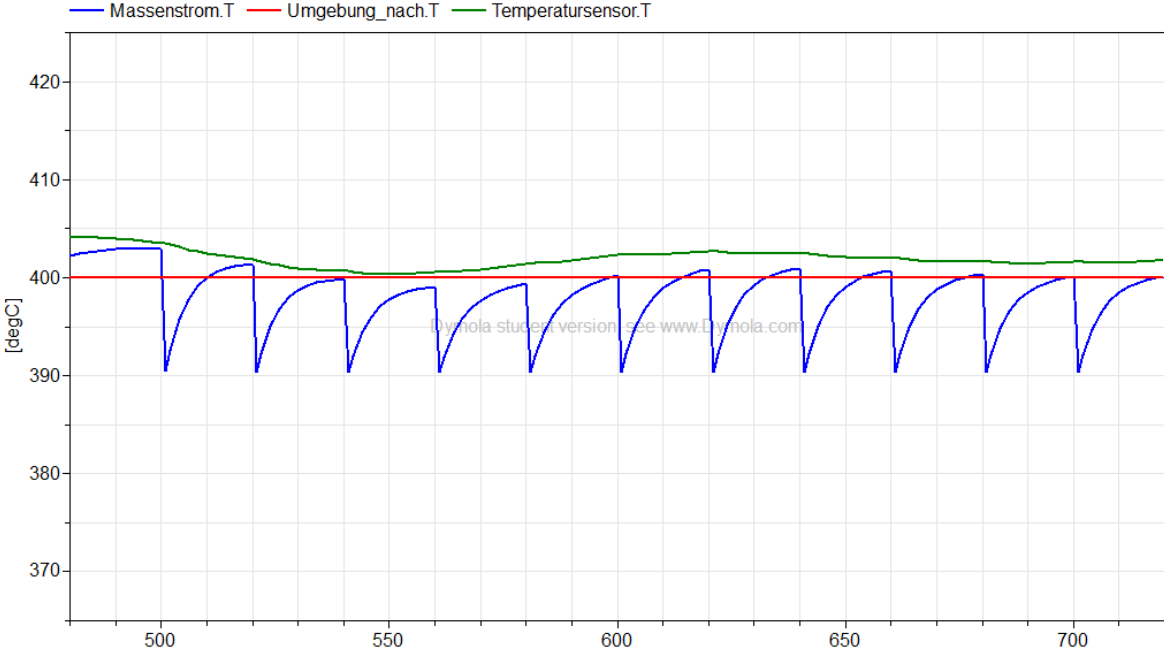


Abbildung VI-64: Detail - Temperatur der Masse, Solltemperatur der Masse und Temperatur am Sensor– Heizzone 3; PEEK; Massenstrom 2, Zykluszeit 1

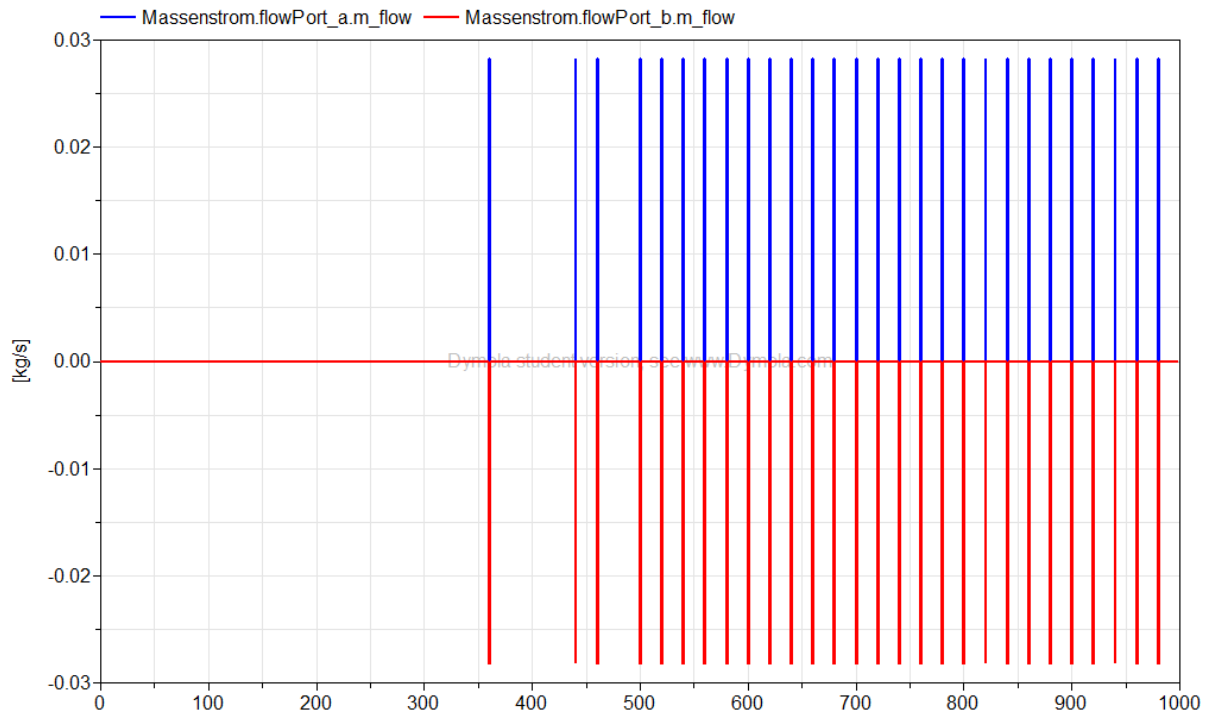


Abbildung VI-65: Massenstrom – Heizzone 3; PEEK; Massenstrom 2; Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

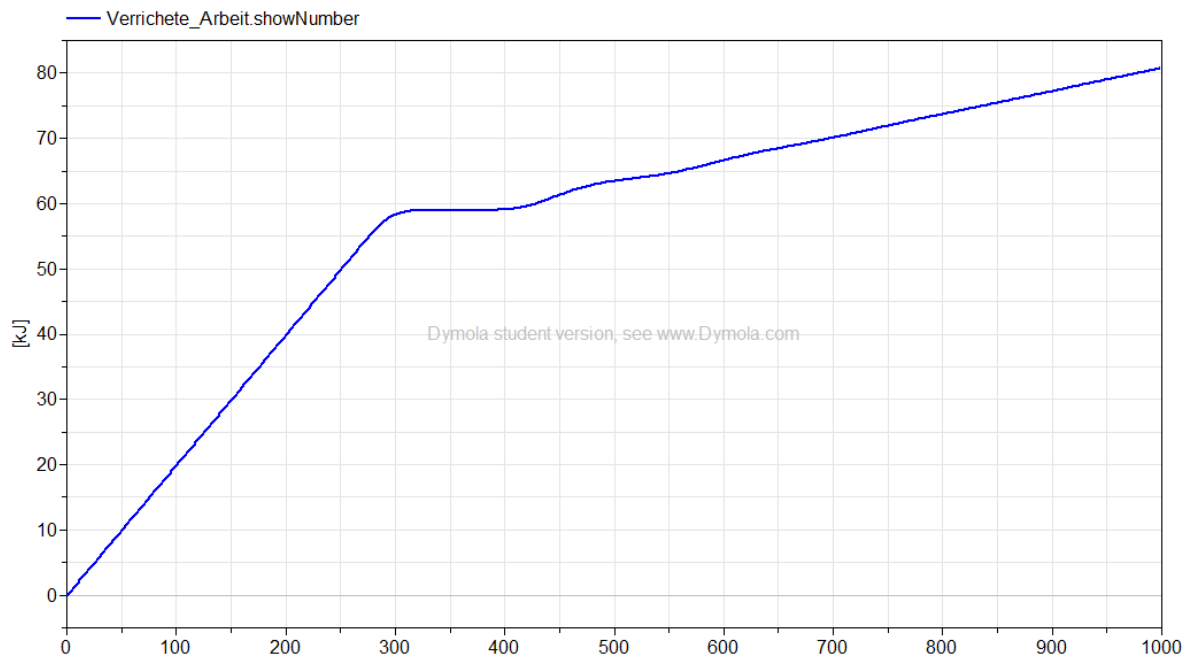


Abbildung VI-66: Energieeinsatz – Heizzone 1; PEEK; Massenstrom 3, Zykluszeit 1 (Simulationszeit 1000 s)

VI.I.IV PEEK; Massenstrom 1; Zykluszeit 2

Heizzone 1; PEEK, Massenstrom 1; Zykluszeit 2

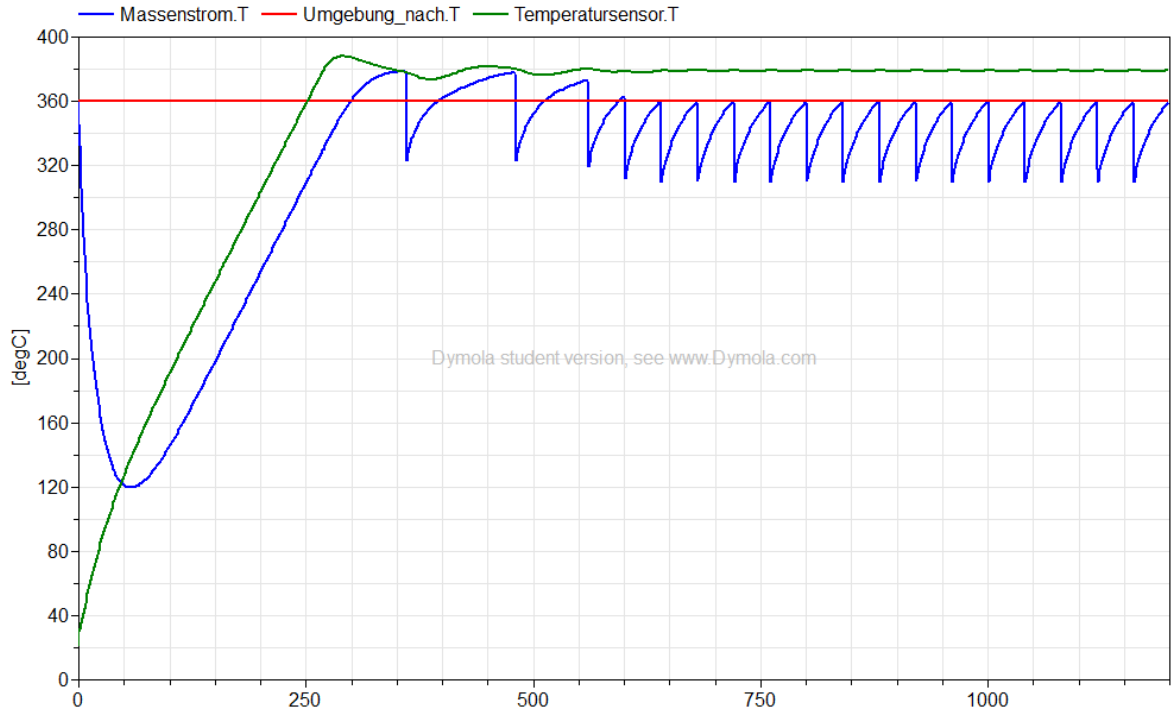


Abbildung VI-67: Temperatur der Masse, Solltemperatur der Masse und Temperatur am Sensor– Heizzone 1; PEEK; Massenstrom 1, Zykluszeit 2 (Simulationszeit 1200 s)

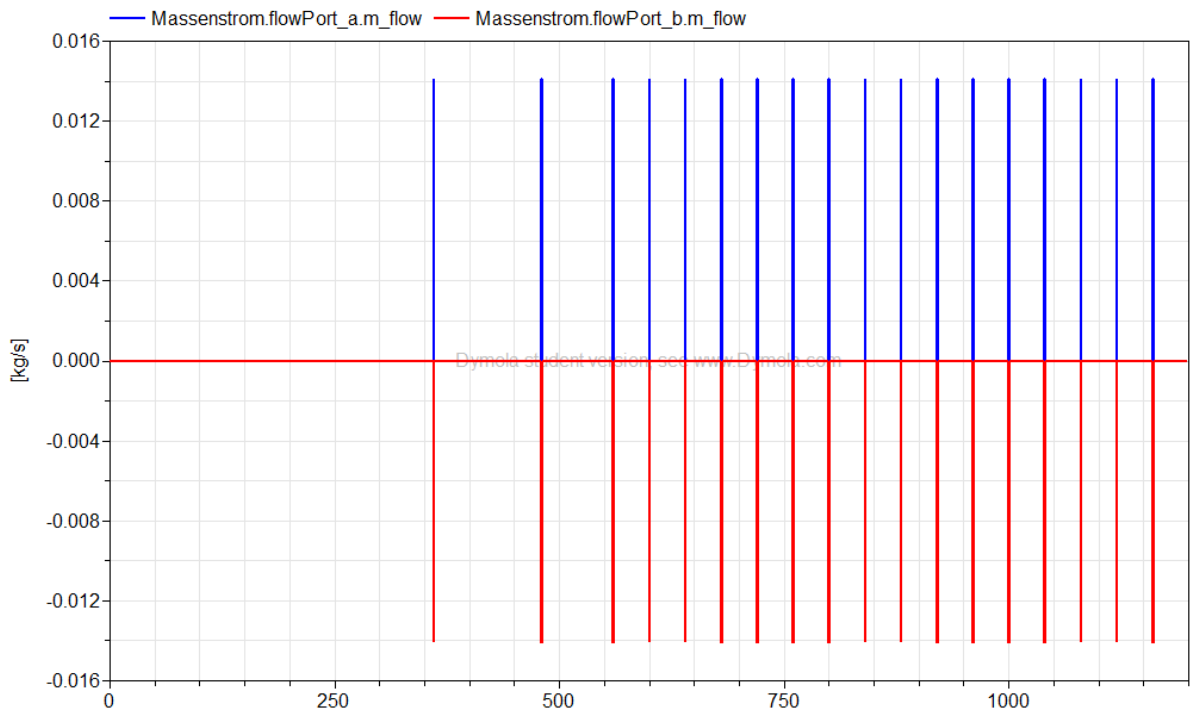


Abbildung VI-68: Massenstrom – Heizzone 1; PEEK; Massenstrom 1; Zykluszeit 2 (Simulationszeit 1200 s)

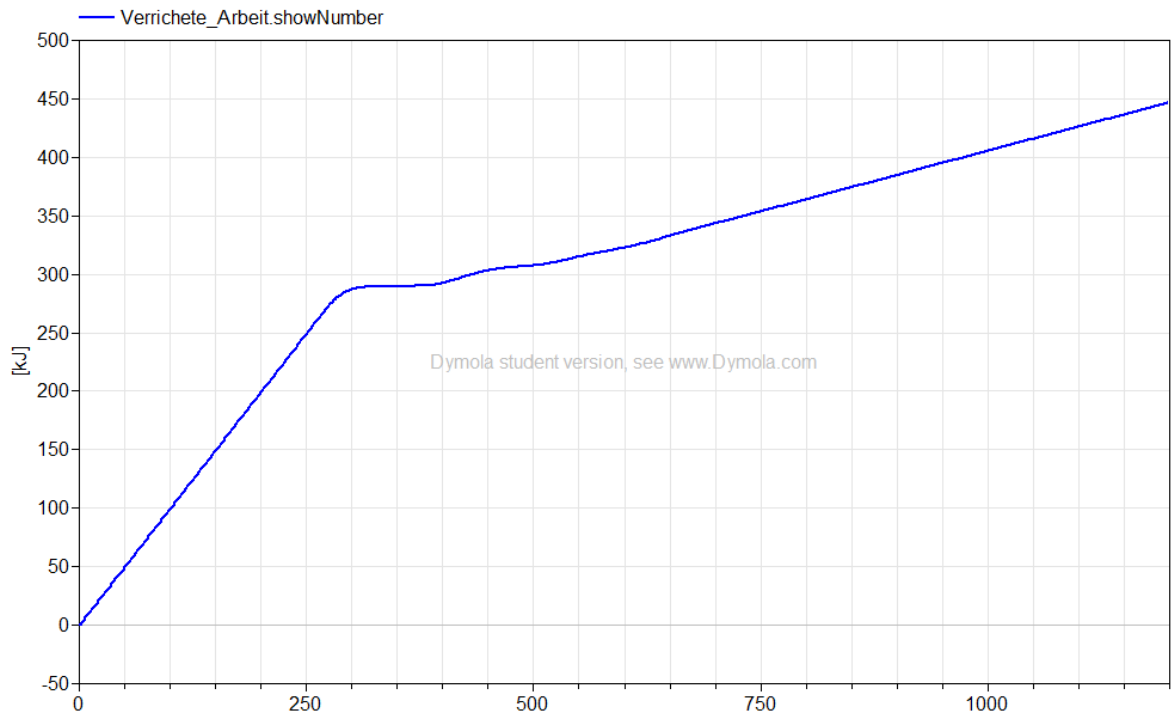


Abbildung VI-69: Energieeinsatz – Heizzone 1; PEEK; Massenstrom 1, Zykluszeit 2 (Simulationszeit 1000 s)

Heizzone 2; PEEK; Massenstrom 1; Zykluszeit 2

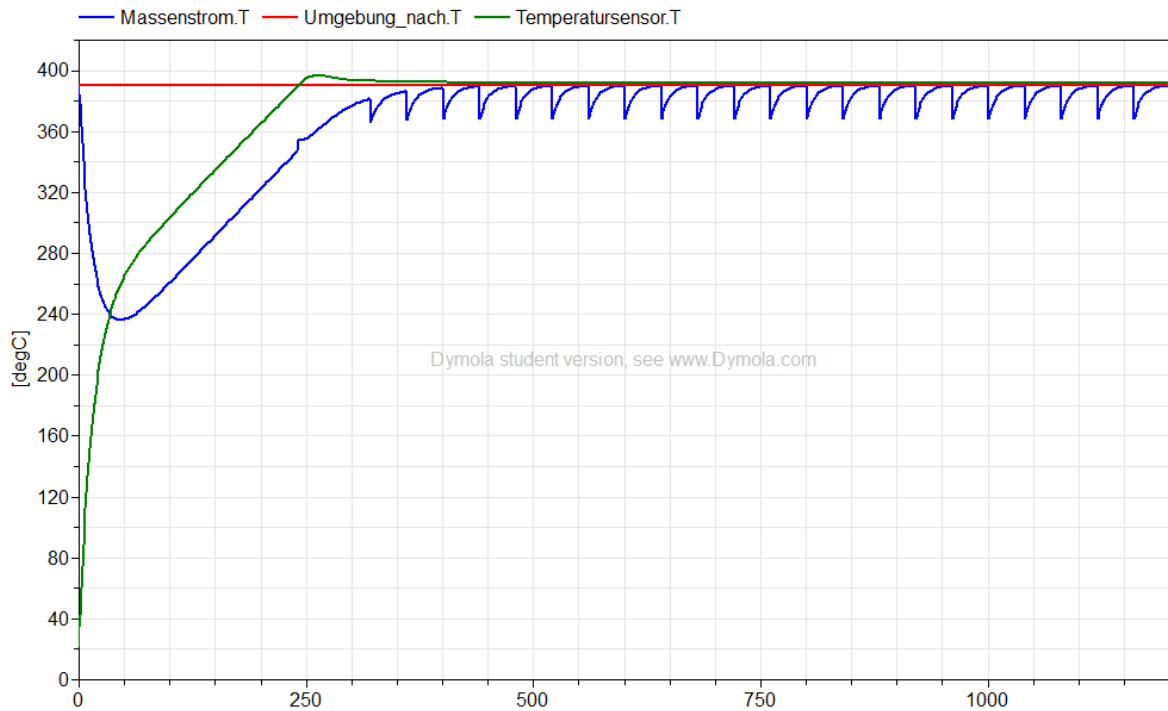


Abbildung VI-70: Temperatur der Masse, Solltemperatur der Masse und Temperatur am Sensor– Heizzone 2; PEEK; Massenstrom 1, Zykluszeit 2 (Simulationszeit 1200 s)

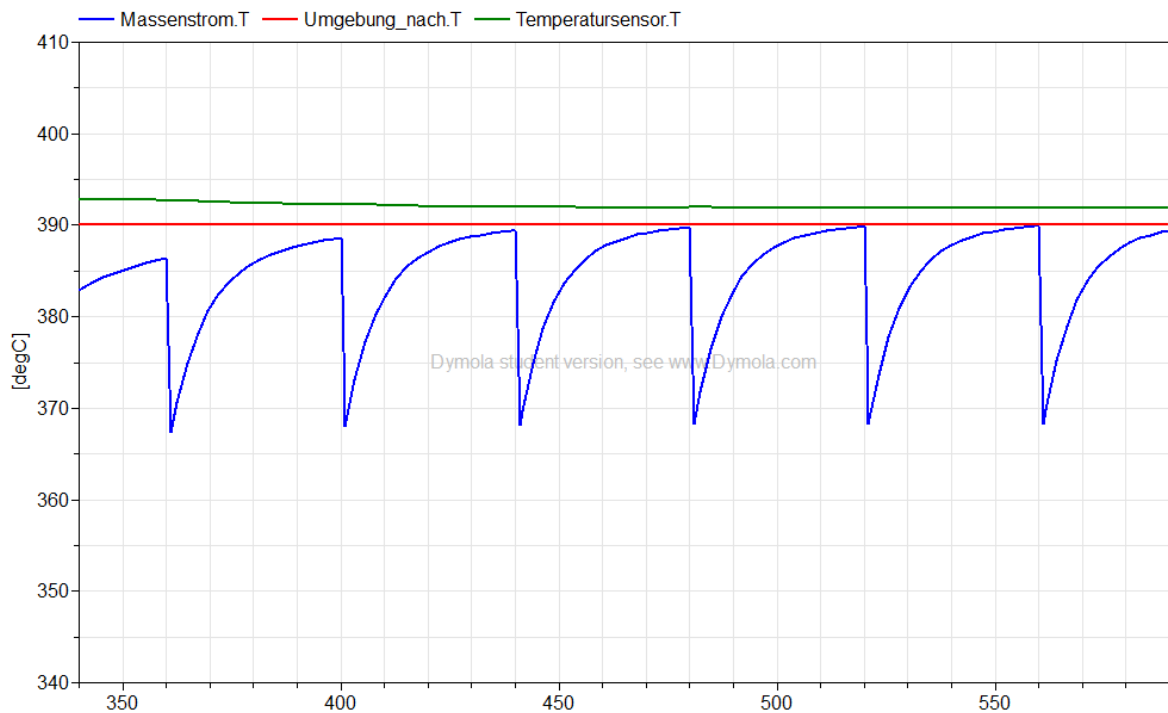


Abbildung VI-71: Detail - Temperatur der Masse, Solltemperatur der Masse und Temperatur am Sensor– Heizzone 2; PEEK; Massenstrom 1, Zykluszeit 2

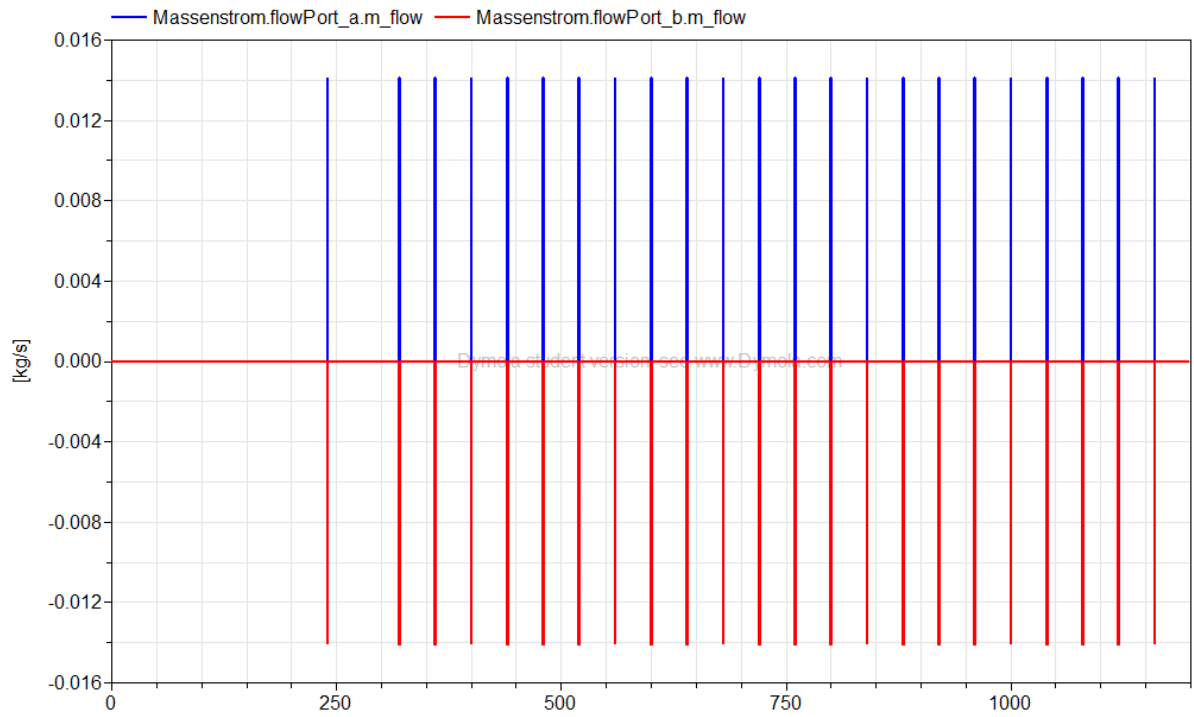


Abbildung VI-72: Massenstrom – Heizzone 2; PEEK; Massenstrom 1; Zykluszeit 2 (Simulationszeit 1200 s)

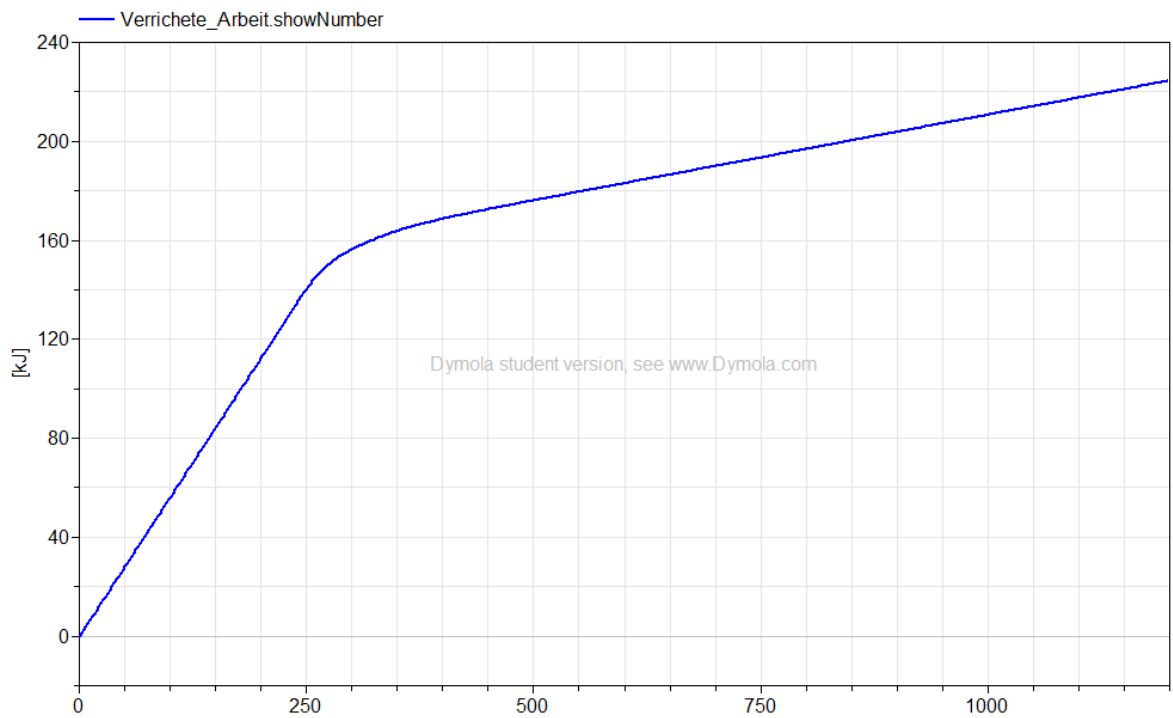


Abbildung VI-73: Energieeinsatz – Heizzone 2; PEEK; Massenstrom 1, Zykluszeit 2 (Simulationszeit 1000 s)

Heizzone 3; PEEK; Massenstrom 1; Zykluszeit 2

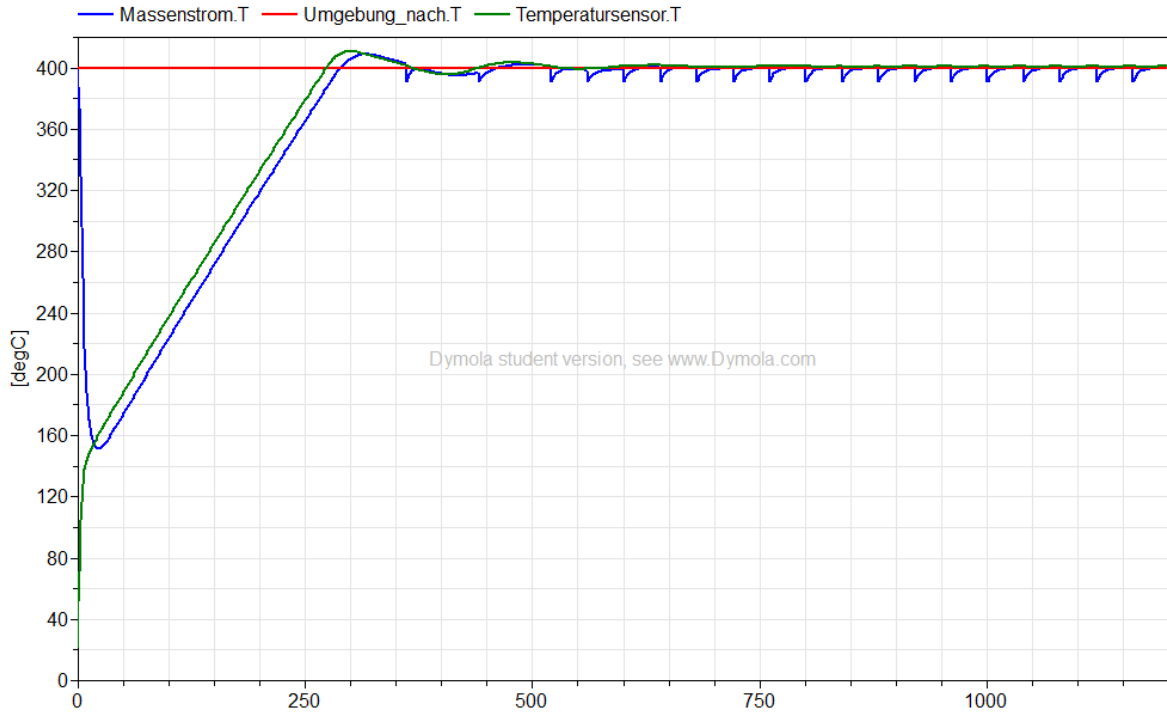


Abbildung VI-74: Temperatur der Masse, Solltemperatur der Masse und Temperatur am Sensor– Heizzone 3; PEEK; Massenstrom 1, Zykluszeit 2 (Simulationszeit 1200 s)

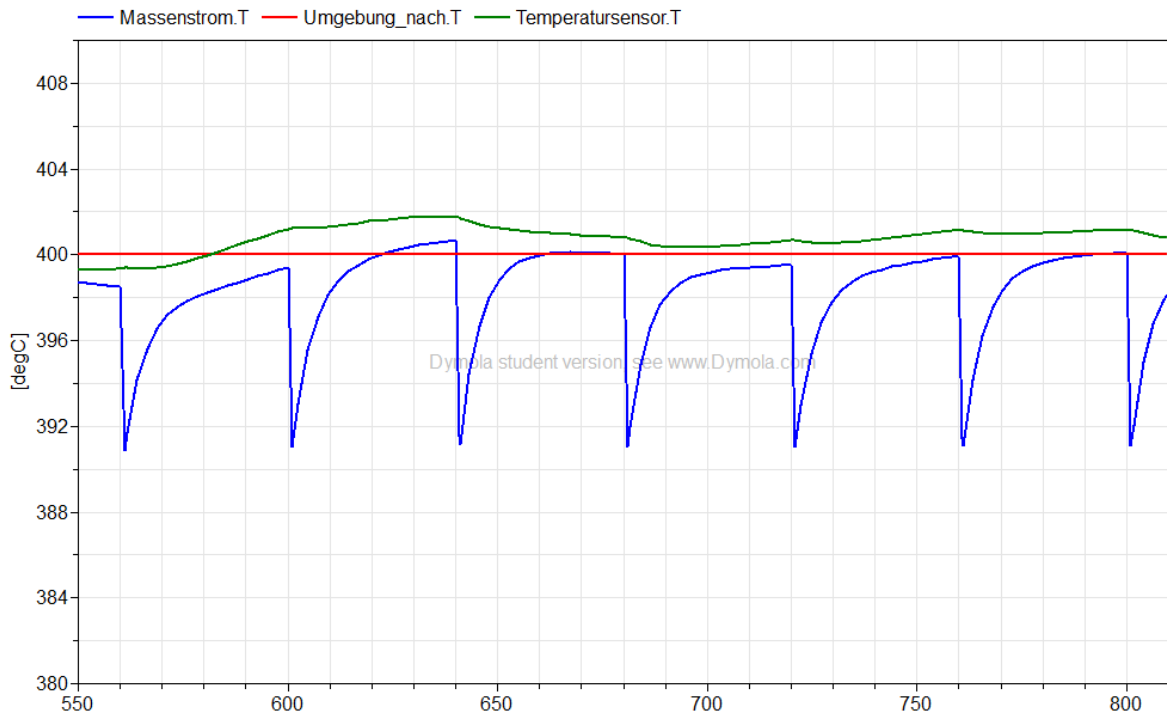


Abbildung VI-75: Detail - Temperatur der Masse, Solltemperatur der Masse und Temperatur am Sensor– Heizzone 3; PEEK; Massenstrom 1, Zykluszeit 2

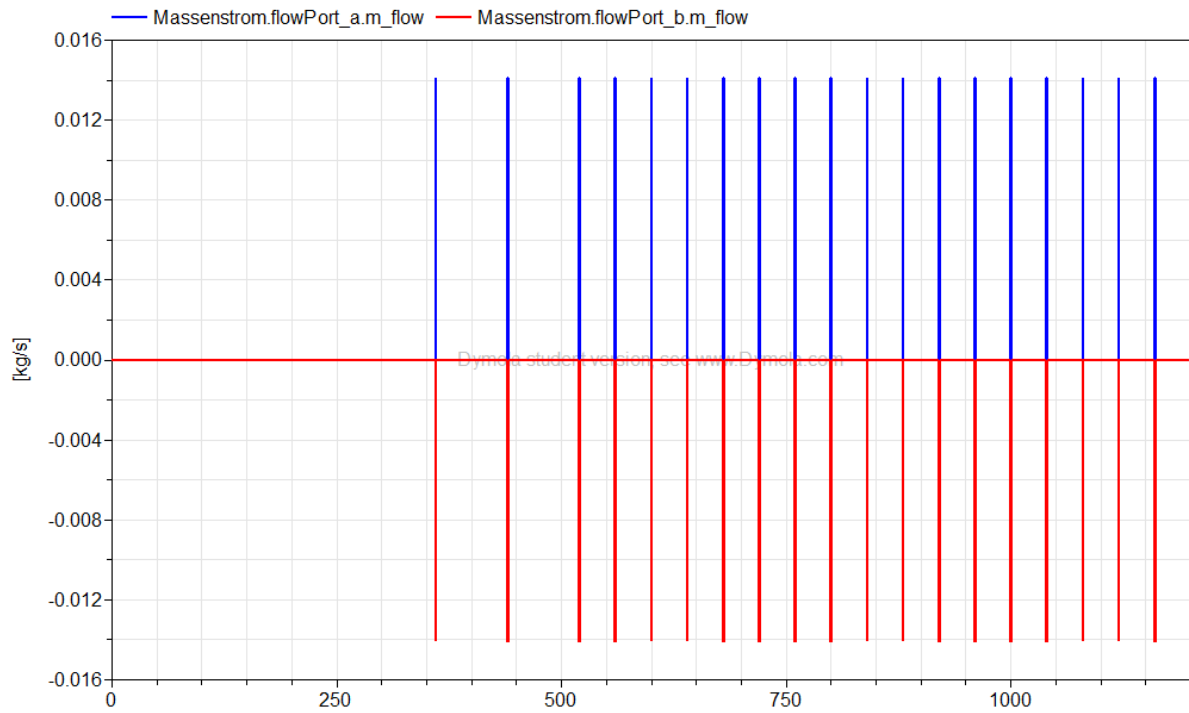


Abbildung VI-76: Massenstrom – Heizzone 3; PEEK; Massenstrom 1; Zykluszeit 2 (Simulationszeit 1200 s)

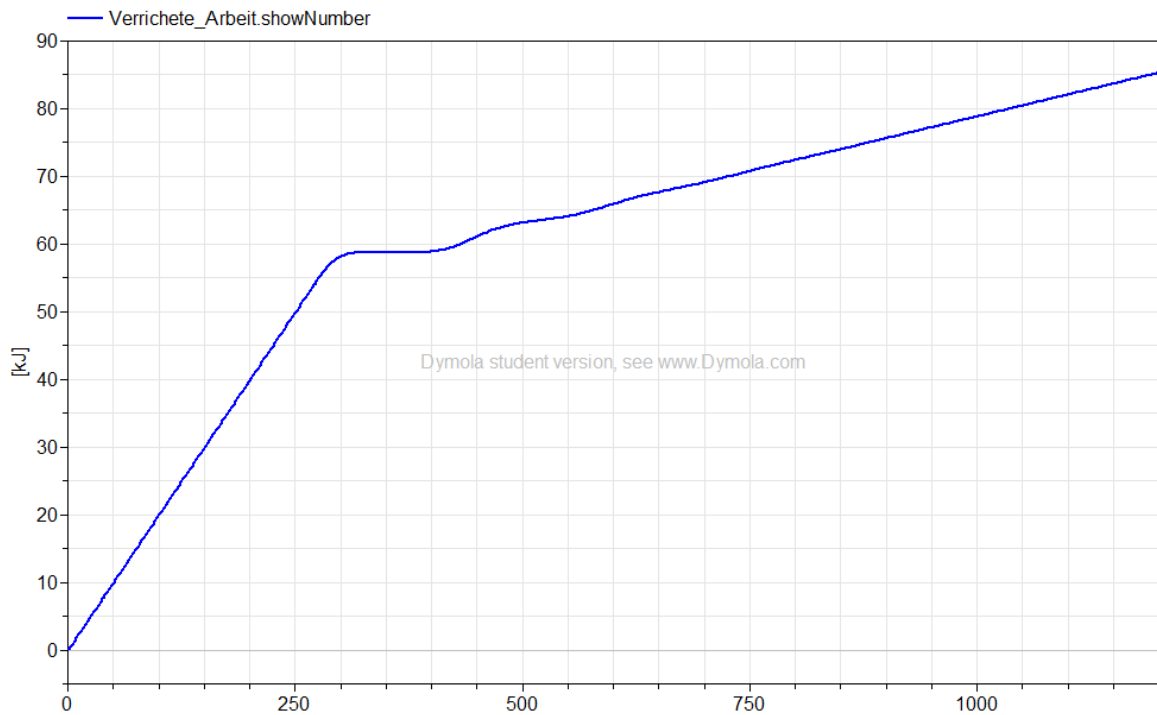


Abbildung VI-77: Energieeinsatz – Heizzone 3; PEEK; Massenstrom 1, Zykluszeit 2 (Simulationszeit 1000 s)

VI.II Heizzonentemperaturen in der Produktion

Tabelle VI-1: Produktionsparameter aus dem Datenstamm der IES GmbH – Teil1

Position	Artikel			Maschinentyp	Heizzonentemperatur in °C					
	Material	Typ	Artikelgewicht in g		Zone 0	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5
1	PEEK	KT880CF30	1,1967	Schnecken-SGM	80	360	370	380	390	-
2	PEEK	KT880CF30 / Luvocom 1105/CF/30/EM	2,35	Schnecken-SGM	80	360	375	390	420	420
3	PEEK	KT880CF30	0,013	Schnecken-SGM	71	380	390	400	410	-
4	PEEK	KT880CF30	0,715	Schnecken-SGM	80	380	390	400	400	-
5	PEEK	Victrex 150 CA 30			-	-	-	-	-	-
6	PEEK	KT880CF30	0,0881	Kolben-SGM	-	375	380	390	-	-
7	PEEK	Victrex 150 CA 30	0,3307	Schnecken-SGM	80	380	390	400	400	-
8	PEEK	KT880CF30	0,337	Kolben-SGM	-	385	390	390	-	-
9	PEEK	KT880CF30	8,02	Schnecken-SGM	80	390	400	410	410	-
10	PEEK	KT880CF30	3,5	Schnecken-SGM	80	400	410	415	415	-
11	PEEK	KT880CF30	4,05	Schnecken-SGM	80	400	400	410	415	-
12	PEEK	Victrex 150 CA 30	2,751	Schnecken-SGM	80	400	410	420	420	-
13	PEEK	KT880CF30	2,776	Schnecken-SGM	80	400	410	420	420	-
14	PEEK		2,1	Kolben-SGM	-	-	-	-	-	-
15	PEEK		1,19	Kolben-SGM	-	-	-	-	-	-
16	PEEK		2,75	Kolben-SGM	-	-	-	-	-	-
17	PEEK		0,3657	Kolben-SGM	-	-	-	-	-	-
18	PEEK	KT880NT	0,3657	Kolben-SGM	-	385	385	385	-	-
19	PP	PP Homo 20% GF grau	12,938	Schnecken-SGM	80	360	370	380	380	400

Tabelle VI-2: Produktionsparameter aus dem Datenstamm der IES GmbH – Teil2

Position	Artikel			Maschinentyp	Heizzonentemperatur in °C					
	Material	Typ	Artikelgewicht in g		Zone 0	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5
20	PP	HT-EIF PP 71025 LSM	9,26	Schnecken-SGM	80	360	370	380	380	390
21	PP	Repsol			-	-	-	-	-	-
22	PP	Repsol / Borealis HF 840 MO	0,736	Schnecken-SGM	30	200	215	230	230	230
23	PP	Repsol	0,381	Schnecken-SGM	30	200	215	225	235	240
24	PP	Repsol	1,38675	Schnecken-SGM	30	200	220	230	240	240
25	PP	Repsol	0,88675	Schnecken-SGM	35	200	220	230	240	240
26	PP	ISPLEN			-	-	-	-	-	-
27	PP			Kolben-SGM	-	-	-	-	-	-
28	PP			Kolben-SGM	-	-	-	-	-	-
29	PP		0,37	Kolben-SGM	-	-	-	-	-	-
30	PP			Kolben-SGM	-	-	-	-	-	-
31	PP	PP Treffert 71024 LSM	20,87		-	-	-	-	-	-
32	PP-Homo	Treffert HT-EIF PP 71010LSM Nr.: 001160307300	2,8	Schnecken-SGM	30	180	200	210	220	220
33	PP-Homo	Treffert PP grau RAL 7037	0,2916	Schnecken-SGM	30	200	210	220	230	-
34	PP-Homo	Treffert HT-EIF PP 71010LSM Nr.: 001160307300			-	-	-	-	-	-
35	PP-Homo	Treffert HT-EIF PP 71010LSM Nr.: 001160307300	0,382	Schnecken-SGM	40	210	220	225	230	
36	PP-Homo	Repsol	0,3704	Schnecken-SGM	40	210	220	225	230	230
37	PP-Homo	Treffert HT-EIF PP 71010LSM Nr.: 001160307300	8,602	Schnecken-SGM	35	220	230	240	240	240



Formblatt Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Masterthesis

Zur Erläuterung des Zweckes dieses Blattes:

§ 16 Abs. 5 der APSOTIBM lautet:

„Zusammen mit der Thesis ist eine schriftliche Erklärung abzugeben aus der hervorgeht, dass die Arbeit bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit (§18 Absatz 1) 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.“

Dieses Blatt mit der folgenden Erklärung ist nach Fertigstellung der Arbeit durch jede/n Kandidat/en/in auszufüllen und jeweils mit **Originalunterschrift als letztes Blatt des als Prüfungsexemplar der Masterthesis gekennzeichneten Exemplars einzubinden.**

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann - auch nachträglich - zur Ungültigkeit der Masterprüfung führen.

Erklärung

Hiermit versichere ich,

Name: Hautau

Vorname: Anja

dass ich die vorliegende Masterthesis mit dem Thema

Abbildung einer Produktionsstätte der Spritzgusstechnik mit Hilfe der Simulationssoftware Dymola[®]

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.

Ort

Datum

Unterschrift im Original