



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Mark Dedelow

Zeitliche Simulation eines Spritzgießprozesses

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

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

Mark Dedelow

**Zeitliche Simulation eines
Spritzgießprozesses**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau/ Produktionstechnik
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:
IES GmbH – Innovative-Erodier-Systeme
Abteilung Kunststoffverarbeitung
Großer Kamp 3a
22885 Barsbüttel

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

Abgabedatum: Datum

Mark Dedelow

Thema der Bachelorthesis

Zeitliche Simulation eines Spritzgießprozesses

Stichworte

Spritzgießprozess, Spritzgießmaschine, Simulation, Modellieren, Dymola, Prozessablauf, Systemanalyse, Prozessparameter, Plastifizieren, Kunststoff

Kurzzusammenfassung

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wird der Energieverbrauch eines Spritzgießprozesses untersucht. Hierzu wird in dieser Thesis der zeitliche Ablauf eines Spritzgießprozesses und die Prozessparameter die diesen zeitlichen Ablauf beeinflussen, analysiert. Darauf Aufbauend wird ein Simulationsmodell mit der Software Dymola erstellt, welches den zeitlichen Ablauf des Spritzgießprozesses in Bezug auf die veränderbaren und nicht veränderbaren Prozessparameter und aller im Spritzgießzyklus beteiligten Elemente und Systeme analysiert und abbildet. Es ist das Ziel mit Hilfe des Simulationsmodells, den zeitlichen Ablauf untersuchen und optimieren zu können, um somit die Effizienz und den Energieverbrauch zu verbessern. Die benötigten Messdaten werden von einem kooperierenden Unternehmen zur Verfügung gestellt.

Mark Dedelow

Title of the paper

Temporal simulation of an injection molding process

Keywords

injection molding process, injection molding machine, simulation, modeling, Dymola, process sequence, system analysis, process parameters, plastics, plastic

Abstract

Within the framework of a research project, the energy consumption during the injection molding process is researched. In this thesis, is the timing of an injection molding process and the process parameters influencing this temporal sequence are analysed. Based on this, a simulation model is created with the software Dymola, which analyzes and depicts the temporal sequence of the injection molding process with regard to the variable and non-variable process parameters and all elements and systems involved in the injection molding cycle. The target is to use the simulation model to investigate and optimize the timing, thereby improving efficiency and energy consumption. The required measurement data are provided by a cooperating company.

End of text

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen, Indizes	V
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VII
1 EINLEITUNG	1
1.1 AUFGABENSTELLUNG UND ZIELSETZUNG	1
1.2 INHALT UND VORGEHENSWEISE	2
2 TECHNISCHE GRUNDLAGEN	3
2.1 GRUNDLAGEN DER SPRITZGIEßTECHNIK	3
2.2 WERKSTOFFE	3
2.2.1 Duroplaste und Elastomere	6
2.2.2 Thermoplaste	6
2.2.2.1 Amorphe Thermoplaste	8
2.2.2.2 Teilkristalline Thermoplaste	9
2.2.3 Wiederverwendbarkeit der Thermoplaste	10
2.2.4 Zuschlagstoffe	11
2.3 AUFBAU DER SPRITZGIEßMASCHINE	11
2.3.1 Plastifizier- und Einspritzeinheit	11
2.3.2 Werkzeugeinheit	15
2.3.3 Schließeinheit	17
2.4 ZEITLICHER ABLAUF DES SPRITZGIEßPROZESS	19
2.5 VERFAHRENSABLAUF DER PROZESSSCHRITTE	22
2.5.1 Plastifizieren und Dosieren	22
2.5.2 Einspritzen und Nachdrücken	22
2.5.3 Entformung des Bauteils	23
2.6 SIMULATION	23
2.6.1 Grundlagen der Simulation	23
2.6.2 Einführung Dymola®	25
2.6.3 Softwaregrundlagen	25
3 ANALYSE DES ZEITLICHEN ABLAUFES EINES SPRITZGIEßPROZESSES	29
3.1 KENNGRÖßEN, PARAMETER UND VARIABLEN	29
3.1.1 Allgemeine Prozessgrößen	29
3.1.2 Maschinenkenngrößen	32
3.1.3 Einstellparameter	33
3.2 ZUSAMMENHANG DER PROZESSSCHRITTE UND DER EINSTELLPARAMETER	38
3.3 BERECHNUNG DER ZEITEN DER PROZESSSCHRITTE	42
4 MODELLIERUNG DES ZEITLICHEN ABLAUFES MITTELS DYMOLA®	46
4.1 AUFBAU DES SIMULATIONSMODELLS	46
4.2 AUFBAU UND ANPASSUNG DER KOMPONENTEN	49
4.3 MODELLIERUNG DER PROZESSSCHRITTE	52
4.4 MODELLIERUNG PROZESSABLAUF	56
5 DURCHFÜHRUNG UND AUSWERTUNG DER SIMULATION	58
6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	64
Literaturverzeichnis	VIII
Anhang	IX
Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Abschlussarbeit	X

Formelzeichen, Indizes

Verwendete und erwähnte Formelzeichen

Größe	Einheit	Bedeutung
A	m ²	Fläche
d	mm	Durchmesser
n	--	Anzahl
l	mm	Länge
m	kg	Masse
m	g	Masse
s	mm	Strecke
t	s	Zeit
v	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit
V	m ³	Volumen
ν	1/ρ	spezifisches Volumen
ε	%	Dehnung
ρ	kg/m ³	Dichte
θ	°C	Temperatur
θ	k	Temperatur
η	Pas	Viskosität
σ	N/mm ²	Zugfestigkeit

Indizes

Indize	Bedeutung
a	Auswerferhöhe
A	Aggregat
av	Verzögerung, Aggregatbewegungszeit
AB	Aggregatbewegung
b	back
Ba	Bauteilvolumen
D	Dosierweg
Dv	Dosierverzögerung
Do	Dosieren
DG	Gesamtzeit, Dosieren
e	Einspritzeinheit
G	Gebrauchsbereich
GA	Gesamtzeit, Auswerfen
H	Höhe, Anzahl
h	Hub
k	Kühlzeit
ko	Kolbendurchmesser
n	Nachdruckzeit
o	out
oe	öffnen
pz	Pause Zyklusende
pa	pause Auswerfen
bl	Blasluft
rk	Restkühlzeit
S	Schließaggregat
s	Schließen
s1	Schließgeschwindigkeit 1
s2	Schließgeschwindigkeit 2
u	Umschaltpunkt
GZy	Gesamt, Zykluszeit

Abbildungsverzeichnis

2.1: vom Monomer zum Polymer [MIC01].....	4
2.2: Hauptvalenzbindungen (links) und Nebervalenzbindungen (rechts) [MIC01]	5
2.3: Ordnungszustand der Kunststoffarten [MIC01].....	7
2.4: Einteilung der Thermoplaste [WAK].....	7
2.5: schematisches pvT-Verhalten von Kunststoffen,.....	8
2.6: Zustandsbereich amorphe Kunststoffe [IKV]	9
2.7: Zustandsbereich teilkristalline Kunststoffe [IKV]	10
2.8: Spritzgießmaschine mit Schneckenkolbenspritzeinheit [OHL15].....	12
2.9: Schneckenplastifizierung mit Kolbenspritzeinheit [WIT15]	12
2.10: Kolbenspritzeinheit ohne Schneckenplastifizierung [BACR]	13
2.11: Dreizonenschnecke [OHL15]	13
2.12: Ring-Rückstromsperre (schematisch) [OHL15]	14
2.13: Werkzeug geschlossen (links) und geöffnet (rechts) [OHL15]	16
2.14: Schieberelemente zur Fertigung von Hinterschneidungen [MIC01].....	17
2.15: vollhydraulische Schließeinheit [OHL15].....	18
2.16: mechanische Schließeinheit; Einfachkniehebelsystem [OHL15].....	19
2.17: Zeitlicher Ablauf des Spritzgießzyklus [MGKE].....	20
2.18: Benutzeroberfläche der Modellerstellung in Dymola®	26
2.19: Info-Ansicht einer Federkomponente	27
2.20: Nutzeroberfläche der Simulationsebene	28
3.1: Geschwindigkeitsverlauf der Schließeinheit beim Schließvorgang [BACR].....	34
3.2: Kreisdiagramm Spritzgießzyklus [MIC15].....	38
3.3: Diagramm der Einstellparameter	42
4.1: Aufbau und Struktur des Simulationsmodells.....	47
4.2: Benutzeroberfläche zur Parameteränderung	48
4.3: Diagramm in der Benutzeroberfläche eines Modellblocks	49
4.4: Parameteränderung in Text-Datei.....	50
4.5: Zusätzliche Connectoren	51
4.6: Text-Datei des IntegerConstant-Blockes	52
4.7: Modellierung des Schließvorgangs.....	53
4.8: Modellierung Aggregatbewegung.....	54
4.9: Modellierung Einspritz-, Nachdrück- und Gesamtkühlzeit	54
4.10: Modellierung des Dosierens.....	55
4.11: Modellierung des Entformens.....	55
4.12: Dateneingabefenster der Steuerung.....	56
4.13: Modell des Prozessablaufes	57
5.1: Blockdiagramm.....	58
5.2: Stufendiagramm zeitlicher Prozessablauf	59
5.3: Änderung der Nachdrückzeit.....	60
5.4: Änderung der Gesamtkühlzeit	61
5.5: Schließzeit.....	61
5.6: Keine Dosiervverzögerung	62
5.7: Dosiervverzögerung von zwei Sekunden	62
5.8: Dosiervverzögerung von 4 Sekunden.....	63
5.9: Stufendiagramm (fahren mit anliegender Düse)	63

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Unterteilung der verschiedenen Kunststoffe [MIC01]	4
Tabelle 3.1: Einstellparameter in der Simulation	37
Tabelle 5.1: Legende zum Stufendiagramm	59

1 Einleitung

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wird der Energieverbrauch einer Spritzgießmaschine und dem Werkzeug beim Ablauf eines vollständigen Spritzgießprozesses untersucht. Hierbei soll der Energiebedarf innerhalb eines gesamten Spritzgießzyklus berechnet und bewertet werden. Es werden hierfür die auf den zeitlichen Ablauf des Prozesses einflussnehmenden Parameter identifiziert und analysiert. Anhand der ermittelten Daten wird eine Simulation mit der Software Dymola® erstellt, die den zeitlichen Prozessablauf des Spritzgießprozesses in Abhängigkeit der verschiedenen Parameter darstellt. Bei der Spritzgießmaschine, welche in diesem Forschungsprojekt untersucht wird, handelt es sich um eine Maschine mit der Bezeichnung Babyplast der Firma CHRISTMANN Kunststofftechnik GmbH. Die benötigten Daten werden von der Firma IES (Innovative Erodier Systeme), mit der dieses Projekt in Zusammenarbeit durchgeführt wird, zur Verfügung gestellt. Dieses Unternehmen hat seinen Sitz in Barsbüttel und ist spezialisiert auf Erodier- und Spritzgießverfahren.

1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Diese Arbeit soll einen Beitrag zu dem eingangs erwähnten Forschungsprojekt leisten, in welchem der Energieverbrauch und die Energieeffizienz des Spritzgießprozesses untersucht wird. Das Ziel ist es die Effizienz des Spritzgießverfahrens zu optimieren, in dem ein Produktionsprozess so abgebildet wird, dass er hinsichtlich des Energieverbrauchs analysiert werden kann. Ganz speziell wird innerhalb dieser Bachelorarbeit der zeitliche Ablauf des Spritzgießprozesses in Abhängigkeit der einzelnen veränderbaren und nicht veränderbaren Prozessparameter, sowie der Zusammenhang mit den Maschinen- und Werkzeugkomponenten untersucht und abgebildet. Es gilt die Prozessparameter, welche den zeitlichen Ablauf des Spritzgießprozesses beeinflussen, zu identifizieren. Um den Energieverbrauch der Spritzgießmaschine bestimmen zu können, ist es notwendig zu wissen in welchem Zeitraum die verschiedenen Verbraucher aktiv sind. Ebenfalls ist es notwendig zu bestimmen, ab welchem Zeitpunkt ein bestimmter Verbraucher aktiv wird, um dessen Energieverbrauch bestimmen zu können. Weiterhin soll der Einfluss der identifizierten Prozessparameter qualitativ dargestellt werden. Es erfolgt eine quantitative Abbildung des zeitlichen Ablaufes des Spritzgießprozesses aufbauend auf einem vorhandenen Simulationsmodell. Die gewonnenen Erkenntnisse werden validiert, in Schriftform dargestellt und dokumentiert. Im Anschluss daran werden die Erkenntnisse und die Ergebnisse einer kritischen Bewertung unterzogen.

1.2 Inhalt und Vorgehensweise

Es sind Grundkenntnisse über das Produktionsverfahren des Spritzgießens notwendig, um diesen plausibel abbilden und simulieren zu können. In dem ersten Kapitel wird auf den Aufbau, die technischen Grundlagen und der Funktion der Spritzgießmaschine sowie den gesamten Spritzgießprozess und die einzelnen Prozessparameter eingegangen um ein besseres Verständnis für die nachfolgenden Kapitel innerhalb dieser Arbeit aufzubauen. Auf die am häufigsten in der Kunststoffverarbeitung eingesetzten Materialien wird ebenfalls eingegangen. Hierbei werden jedoch die Thermoplaste deutlich hervorgehoben. Denn bei dem Prozess der im Folgenden in dieser Arbeit beschrieben wird, finden ausschließlich Thermoplaste Verwendung. Ebenso wird eine Grundlage in dem Bereich Simulation geschaffen und auf die Bedeutung von Simulationen für die Planung von Prozessen und Anlagensystemen eingegangen. Die Software Dymola® wird separat vorgestellt und erläutert.

Nach den Grundlagen im ersten Abschnitt befasst sich der zweite Teil dieser Arbeit mit der Prozessanalyse. Hier wird der zeitliche Ablauf des vollständigen Spritzgießprozesses analysiert. Die einstellbaren Prozessparameter werden ebenfalls in diesem Zusammenhang untersucht unter weiterer Betrachtung der beteiligten Maschinen- und Werkzeugkomponenten. Im Anschluss daran wird der gesamte Prozesszyklus mit der Simulationssoftware Dymola® simuliert und abgebildet. Die Veränderung des Energiebedarfs ergibt sich hier aus der zeitlichen Veränderung des Prozessablaufes und wird sich somit indirekt an der Simulation ablesen lassen. Die zeitlichen Veränderungen ergeben sich aus den Veränderungen der einzelnen Prozessparameter die untersucht und analysiert werden. Diese Veränderungen sollen in der Simulation mit Hilfe von Diagrammen dargestellt werden.

In der Bibliothek der Simulationssoftware Dymola® befinden sich Grundmodelle deren Parameter für die hier vorgenommene Prozesssimulation angepasst werden müssen um das Modell simulieren zu können. Zu den Grundformeln der einzelnen vorgefertigten Simulationsmodelle, der Bibliothek aus der Simulationssoftware, werden vorwiegend Erweiterungen in Form von veränderbaren Prozessparametern zugefügt. Dieses Vorgehen wird beschrieben und veranschaulicht abgebildet. Schließlich erfolgt die Simulation des Modells zur Berechnung und zur Auswertung des zeitlichen Ablaufs des vollständigen Spritzgießprozesses in Abhängigkeit der Veränderbaren Prozessparameter.

Zum Abschluss folgt eine Zusammenfassung der Simulationsergebnisse und eine Zusammenfassung der wichtigsten Kernaussagen. Die gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse sollen validiert werden. Im Anschluss daran folgt in den letzten Kapiteln die kritische Bewertung der Erkenntnisse und Ergebnisse.

2 Technische Grundlagen

Der Spritzgießprozess ist ein komplexer Zyklus, welcher im Vorfeld vor Beginn der Produktion eines Artikels exakt analysiert und vorbereitet werden sollte, um ein Produkt mit hoher Bauteilqualität herstellen zu können. Im folgenden Kapitel sollen Grundlagen zum Verständnis des Spritzgießprozesses geschaffen werden. Die wichtigsten Maschinenkomponenten, welche einen direkten Einfluss auf den zeitlichen Ablauf des Spritzgießprozesses und die Bauteilqualität des zu fertigenden Artikels nehmen, sollen erläutert werden. Ebenso wird auf die meist verwendeten Kunststoffmaterialien eingegangen.

Mit Hilfe der Simulationssoftware Dymola® wird die Simulation des Prozesses umgesetzt. Eine digitale Simulation verfügt über einige wichtige Vorteile in Bezug auf die Vorbereitung und Optimierung des gesamten Spritzgießprozesses in Hinsicht auf die zeitliche Effizienz sowie die Bauteilqualität. Der hintere Abschnitt des folgenden Kapitels beschreibt wichtige Grundlagen der Simulation sowie eine Einführung in die, für diese Arbeit verwendete Software Dymola®.

2.1 Grundlagen der Spritzgießtechnik

Das Spritzgießverfahren ist ein Urformverfahren und wird zum größten Teil in der Kunststoffverarbeitung eingesetzt. Ausgehend von pulver- oder granulatförmigen Kunststoffen werden bei diesem Verfahren Formteile gefertigt. Der Kunststoff wird in einen plastifizierten (verflüssigten) Zustand gebracht und unter Druck in die Form des Spritzgießwerkzeuges gespritzt. Im Anschluss daran erstarrt das Spritzgießteil in dem Werkzeug. Danach erfolgt das Auswerfen des Gießteils. Mittlerweile sind etwa zwei Drittel aller kunststoffverarbeitenden Maschinen Spritzgießmaschinen. Die fertigen Formteile können ein Gewicht von unter 10mg, bis zu einem Gewicht von deutlich über 100kg aufweisen. Die größten Vorteile des Verfahrens sind die direkte Umsetzung vom Rohstoff zum Fertigteil, die sehr geringe erforderliche Nacharbeit bei gut konstruierten Werkzeugen sowie die Vollautomatisierbarkeit des Verfahrens. Ebenfalls soll hier die hohe Reproduziergenauigkeit als großer Vorteil hervorgehoben werden [JOH01; OHL15]. Dieses Verfahren selbst zählt zu der Gruppe des Urformens aus dem plastischen Zustand (DIN 8580).


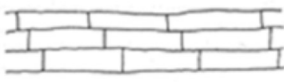

2.2 Werkstoffe

Im Spritzgießverfahren können eine Vielzahl verschiedener Materialien verwendet werden. Größtenteils finden verschiedene Kunststoffe Verwendung im Spritzgießen, jedoch gibt es Anwendungen in denen Metalle zum Einsatz kommen. In dieser Arbeit wird jedoch ausschließlich auf die Kunststoffmaterialien eingegangen, da diese ein deutlich höheres weltweites Aufkommen in den Spritzgießanwendungen aufweisen.

Im Vergleich zu den Metallen haben Kunststoffe mit der geringeren Dichte, der guten Zähigkeit und der relativ geringen Verarbeitungstemperatur, erhebliche Vorteile zur Verarbeitung mit der Spritzgießtechnik gegenüber den Metallen vorzuweisen. Die Dichte von Kunststoffen ist sehr stark von Temperatur und Druck abhängig. Es gilt, dass die Dichte bei steigender Temperatur sinkt und bei steigendem Druck steigt [OHL15].

Die Spritzgießmaschine, mit der die für diese Arbeit erforderlichen Daten erhoben worden sind, ist eine Maschine mit der ausschließlich die Herstellung von Kleinteilen aus Kunststoff möglich ist. Die Kunststoffe werden aufgrund ihres Ordnungszustandes im Molekülverband, ihrer Bindungsart und ihren mechanisch-thermischen Eigenschaften in Thermoplaste, Elastomere und Duroplaste unterteilt (Tab.2.1).

Tabelle 2.1: Unterteilung der verschiedenen Kunststoffe [MIC01]

	Thermoplaste	Elastomere	Duroplaste
Ordnungszustand Molekularverband	Regellose bis parallele Anordnung	Weitmaschiges Raumnetz	Engmaschiges Raumnetz
Bindungsart	Nebervalenzbindung (physikalische Bindung)	Chemische Bindungen	Chemische Bindungen
Eigenschaften	Schmelzbar 	Nicht Schmelzbar 	Nicht Schmelzbar 

Die Makromolekülketten, aus denen diese verschiedenen Kunststoffe bestehen, sind chemische Verbindungen aus vielen Molekülen (Monomer) die sich zu Kettenmolekülen (Polymer) vereinigen (vgl. Abb. 2.1). Diese Bindungen zwischen den Atomen bzw. den Molekülen werden als Primärbindung oder Hauptvalenzbindung bezeichnet [OHL15].

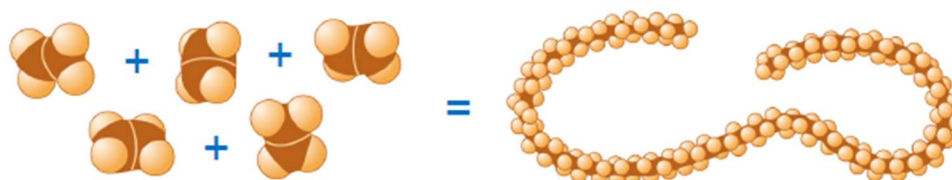


Abbildung 2.1: vom Monomer zum Polymer [MIC01]

Eine Art der Verbindungen der Moleküle ist die Elektronenpaarbindung (auch kovalente Bindung oder Atombindung genannt). Hierbei besitzen zwei benachbarte Atome ein gemeinsames Elektronenpaar. Die Ladung der Elektronenpaare ist negativ, wodurch die Atomkerne aneinander gezogen werden, bis sich die Anziehung mit der Abstoßung der positiven Kerne in Waage hält. Somit entsteht eine besonders starke Bindung. Neben den Elektronenpaarbindungen, den chemischen Bindungen, existieren die Nebervalenzbindungen (vgl. Abb. 2.2). Diese physikalischen Bindungen zwischen den Makromolekülketten basieren auf elektrostatischen Anziehungskräften und können übergeordnet in Dispersionskräfte, in Dipol-Dipol-Kräfte und Wasserstoffbrückenkräfte eingeteilt werden. Dispersionskräfte beruhen auf Wechselwirkungen der sich ständig bewegenden Elektronen zwischen denen schwache Anziehungskräfte existieren. Dipol-Dipol-Kräfte treten auf, wenn Molekülelemente mit einem starken elektronegativen Charakter, im Vergleich zu anderen Elementen, existieren [JOH01; OHL15].

Hierbei entstehen ebenfalls Anziehungskräfte, diese erweisen sich als stärker gegenüber den Dispersionskräften. Zusammenfassend werden diese Kräfte als Van-der-Waals Kräfte bezeichnet. Die Wasserstoffbrückenkräfte resultieren aus der Wechselwirkung eines im Molekül gebundenem Wasserstoffatom mit einem stark elektronegativen Atom. Diese Kräfte gelten als stärkste Nebervalenzkräfte, ca. zehnmals stärker als Dispersionskräfte, jedoch etwa hundertmal schwächer als die primären chemischen Bindungen. Bei mechanischer Verformung lösen sich daher erst die sekundären Bindungen. Hierbei gleiten die Moleküle aneinander ab und reißen nicht durch [OHL15].



Abbildung 2.2: Hauptvalenzbindungen (links) und Nebervalenzbindungen (rechts) [MIC01]

Nebervalenzbindungen sind weniger temperaturbeständig als Hauptvalenzbindungen. Bei steigenden Temperaturen, werden Nebervalenzbindungen zunehmend schwächer und verschwinden beim Erreichen einer bestimmten Temperatur letztendlich vollständig. Der Grund hierfür liegt in der stetig mit der Temperatur steigenden Bewegungsenergie und der damit verbundenen Unwahrscheinlichkeit des Aneinanderreihens der Moleküle [OHL15].

2.2.1 Duroplaste und Elastomere

Die Zustandsform der Duroplaste lässt sich als sehr hart und spröde beschreiben. Die Bindungskräfte, der hier vorhandenen chemischen Bindungen, sind sehr groß. Beim Urformen vernetzen sich die Makromoleküle sehr engmaschig und lassen sich nach dem Erstarren und dem Abkühlen, nicht durch erneutes Erhitzen aufschmelzen (vgl. Tab. 2.1). Dieser Kunststoff bleibt bis zum Erreichen einer Temperatur die im Zersetzungsbereich liegt, hart und spröde. Somit ist dieser Prozess irreversibel und ein Umformen ist wegen der vernetzten Struktur und der starken chemischen Bindungen nicht mehr möglich [JOH01; OHL15].

Bei den Elastomeren lässt sich die Zustandsform, im Gegensatz zu den Duroplasten, als hart-elastisch oder als gummielastisch beschreiben. Die Vernetzung beim Urformen der Makromolekülketten der Elastomere ist weitmaschig und die Bindungskräfte, der hier ebenfalls chemischen Bindungen, sind sehr groß (vgl. Tab. 2.1). Auch die Elastomere lassen sich nicht, ähnlich wie die Duroplasten, beliebig aufschmelzen, sondern beginnen ab einer bestimmten Temperatur sich zu zersetzen. Beim Urformen werden die Makromoleküle miteinander vernetzt, vulkanisiert. Somit ist ein Umformen wiederum nicht möglich [JOH01; OHL15].

2.2.2 Thermoplaste

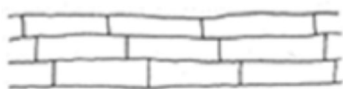
Der Ordnungszustand des Makromolekülverbandes der Thermoplaste ist, im Gegensatz zu den Duroplasten und Elastomeren, nicht quervernetzt, sondern regellos bis maximal parallel aneinander liegend angeordnet (vgl. Abb. 2.3). Bei Kunststoffen wie den Thermoplasten werden die Makromolekülketten ausschließlich von Nebervalenzbindungen/ Sekundärbindungen zusammengehalten. Diese physikalischen Bindungen sind deutlich schwächer als die Kräfte der chemischen Bindungen. Aufgrund dieser Gegebenheiten lassen sich Thermoplaste wiederaufschmelzen, lösen, warmumformen und schweißen. Die Temperatur wird hierzu soweit erhöht bis die Nebervalenzkräfte nachlassen. Nach dem Abkühlen bauen sich diese Sekundärkräfte wieder auf und der Thermoplast nimmt wieder eine feste Form ein. Dieser Vorgang ist somit reversibel. Theoretisch kann dieser Vorgang beliebig oft wiederholt werden, sofern keine thermische Zersetzung durch Überhitzung stattfindet. In der Praxis, ganz speziell in der Anwendung die in dieser Arbeit im Folgenden thematisiert wird, werden Thermoplaste jedoch oft nicht häufiger als zweimal wiederaufgeschmolzen da sich die mechanischen Eigenschaften, die für die Werkstoffqualität von Bedeutung sind, bei jedem Einschmelzvorgang geringfügig verschlechtern. Somit kann eine gleichbleibende Qualität, nach einer Vielzahl von Einschmelzvorgängen nicht Gewährleistet werden. Grundlegend verändern Thermoplaste ihre Viskosität in Abhängigkeit mit der Temperatur, denn bei einer Erhöhung der Temperatur erhöht sich ebenfalls die Schergeschwindigkeit. Dieses strukturviskose Verhalten tritt besonders bei Thermoplasten auf und spielt bei der Verarbeitung eine übergeordnete Rolle.

Die verschiedenen möglichen Ausrichtungen der Makromolekülketten innerhalb des Thermoplasts, wirken sich auf die thermodynamischen Eigenschaften des Stoffes aus, sodass eine Unterteilung je nach Anordnung des Molekülverbandes vorgenommen wird.

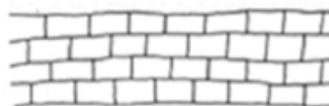
Bei einer parallelen Anordnung erweisen sich die Bindungskräfte stärker als bei einer vollständig regellosen und gekreuzten Anordnung [JOH01; OHL15].



a) Regellose bis parallel Anordnung



b) weitmaschiges Raumnetz



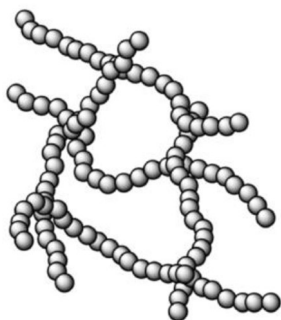
c) engmaschiges Raumnetz

Abbildung 2.3: Ordnungszustand der Kunststoffarten [MIC01]

Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften und des unterschiedlichen thermodynamischen Verhaltens verschiedener nicht vernetzter Kunststoffe, werden Thermoplaste in amorphe und teilkristalline Thermoplaste unterteilt (vgl. Abb.: 2.4). Sobald der Kunststoffschmelze Wärme entzogen wird, verringert sich die Beweglichkeit der Makromolekülketten. Bei einem sehr gleichmäßigen und wenig verzweigten Aufbau des Thermoplasts, sind die Ketten beim Abkühlen in der Lage einen sehr hohen Ordnungszustand einzunehmen. Dieser Vorgang wird Kristallisation genannt. Hierbei verringert sich das spezifische Volumen des Kunststoffs deutlich. In der Realität weisen die Kunststoffe jedoch nur eine begrenzte (teilkristallin) oder gar keine (amorphe) Kristallisation auf. Diese Unterschiede sind von großer Bedeutung hinsichtlich der Verarbeitung innerhalb der Spritzgießprozesses da hierdurch die Verarbeitungsschwindigkeit im großen Maße beeinflusst wird [JOH01; OHL15].

Amorphe Thermoplaste

regellose Anordnung



Teilkristalline Thermoplaste

teilweise parallele Anordnung

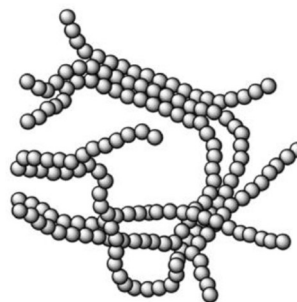


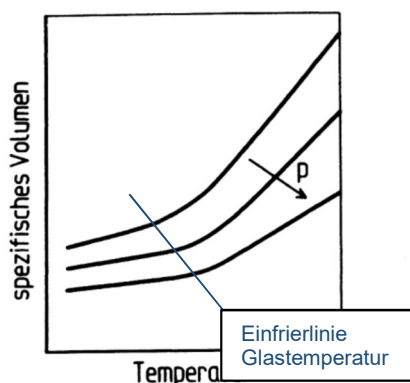
Abbildung 2.4: Einteilung der Thermoplaste [WAK]

Als **Schwindung** bezeichnet man die Reduzierung des Volumens eines Körpers beim Abkühlen. Der Übergang vom flüssigen in den festen Aggregatzustand passiert bei Thermoplasten beim Unterschreiten der druckabhängigen Erstarrungstemperatur.

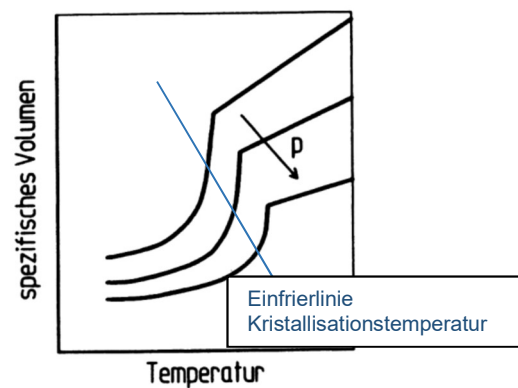
Während der Abkühlung wird das freie Volumen zwischen den Molekülen linear reduziert bis die Schmelze ihre Einfriertemperatur erreicht hat. Liegt ein günstiger Aufbau der Makromolekülketten vor, gelangen die Ketten sehr dicht aneinander und kristallisieren, die Nebervalenzkräfte erstarken plötzlich.

Amorphe Thermoplasten enthalten nach dem Abkühlen nur noch sehr wenig freies Volumen. Aus diesem Grund findet dann keine weitere Schwindung mehr statt. Die Schwindung bei amorphen Thermoplasten beträgt 0,4 - 0,8%. Teilkristalline Thermoplasten erstarren in einem sehr engen Temperaturbereich, der Kristallisationstemperatur. Durch die Kristallisation wird das Volumen sprunghaft reduziert. Beim weiteren Abkühlen wird das freie Volumen der noch weichen amorphen Bereiche weiter reduziert. Dieser Prozess wird als Nachschwindung bezeichnet und führt dazu, dass teilkristalline Thermoplasten eine deutlich größere Gesamtschwindung von 1% bis zu 2% aufweisen. An der Abbildung 2.5 lässt sich der Unterschied, ganz speziell das sprunghafte Erstarren der teilkristallinen Thermoplaste, deutlich erkennen [JOH01, OHL15].

Amorphe Thermoplaste



Teilkristalline Thermoplaste



$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1.1)$$

Abbildung 2.5: schematisches pVT-Verhalten von Kunststoffen,
Quelle modifiziert [OHL15]

2.2.2.1 Amorphe Thermoplaste

Die Anordnung des Makromolekülverbandes der amorphen Thermoplaste ist vollständig regellos und verknäult. Bei Raumtemperatur liegt dieser Kunststoff in einem hart-spröden Zustand vor und hat ein markantes transparentes Erscheinungsbild. Dieser Zustand wird ähnlich wie bei den Duroplasten und Elastomeren als Glaszustand beschrieben (vgl. 2.6.). Auf dem Diagramm der Zustandsbereiche lässt sich erkennen wie der Kunststoff seinen Zustand beim Erreichen der Glasübergangstemperatur bedeutend verändert. Hier findet ein Übergang vom hart-spröden in den weich-elastischen Zustand statt. In diesem Zustand kann der Werkstoff in einem Umformprozess bearbeitet werden. Die Festigkeit des Werkstoffes nimmt ab, bei gleichzeitiger Zunahme der Dehnbarkeit.

Die makromolekulare Struktur ist in diesem Bereich noch weitgehend regellos und verknäult, jedoch erhöht sich die Beweglichkeit der Moleküle zunehmend. In diesem Temperaturfenster, dem thermoelastischen Bereich, sind die Bindungskräfte noch nicht vollständig aufgehoben aber dennoch sehr gering. In dem Bereich ab der Fließtemperatur bis zu dem Zersetzungsbereich, dem thermoplastischen Bereich des amorphen Thermoplasts, ist die Viskosität, sowie die Zugfestigkeit des Materials soweit gesunken, dass dieser in einem umformenden Prozess wie dem Spritzgießen bearbeitet werden kann. In diesem Temperaturfenster sind die Makromolekülketten bereits gegeneinander verschiebbar und die Bindungskräfte sind weitgehend aufgehoben. Neben dem Umformen kann der amorphe Thermoplast in diesem Bereich geschweißt werden. Dies stellt ein Alleinstellungsmerkmal im Vergleich mit den Duroplasten und den Elastomeren dar. Eine weitere Erhöhung über die Zersetzungstemperatur hat eine Zersetzung des Kunststoffes zur Folge was den Prozess irreversibel macht [JOH01; OHL15].

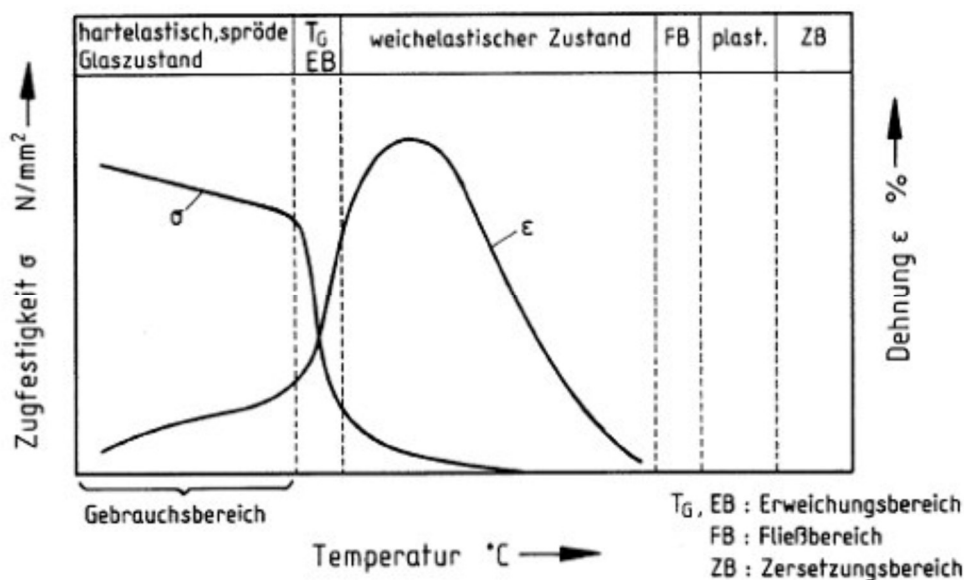


Abbildung 2.6: Zustandsbereich amorphe Kunststoffe [IKV]

2.2.2.2 Teilkristalline Thermoplaste

Bei den teilkristallinen Thermoplasten sind die Makromolekülketten teilweise regellos und teilweise parallel angeordnet. Dieser Werkstoff ist bei Raumtemperatur, im Gebrauchsbereich, weich-zäh bis hart-zäh und weist eine opake, lichtundurchlässige und somit nicht transparente Erscheinung auf. Erreicht das Material einen Bereich von unterhalb der Glasübergangstemperatur, wird dieser sehr hart und stark spröde. In diesem Temperaturfenster ist dieser Kunststoff für praktische Anwendungen nicht verwendbar (vgl. 2.7.). Ab dem Temperaturbereich oberhalb der Glasübergangstemperatur verändert der Kunststoff seinen Zustand von hart-spröde bis zu hart-zäh zunehmend, da die Beweglichkeit der amorphen Bereiche zunimmt. Die kristallinen Phasen innerhalb des Kunststoffes bleiben auf Grund ihrer höheren Nebervalenzbindungen noch unbeweglich. Kurz vor dem Übergang der Temperatur in den Fließtemperaturbereich ist die Zugfestigkeit des Stoffes bereits soweit gesunken, dass dieser Kunststoff in einem umformenden Prozess bearbeitet werden kann. Die kristallinen Bereiche sind weitgehend aufgelöst, die Dehnbarkeit ist gestiegen während die Festigkeit gesunken ist.

Es liegt nun ein amorpher Zustand vor. Ist die für den Spritzgießprozess relevante Kristallitschmelztemperatur überschritten, kann das Material in einem urformenden Prozess wie dem Spritzgießen bearbeitet werden, da die Viskosität erheblich abgenommen hat. Die Bindungskräfte sind in diesem Temperaturfenster weitgehend aufgehoben was dazu führt, dass die Makromolekülketten gegeneinander verschiebbar werden. Die meist verwendeten Thermoplaste nehmen bereits bei geringer Überschreitung der Kristallitschmelztemperatur einen niedrigviskosen Zustand ein und können daher bereits knapp oberhalb ihrer Schmelztemperatur verarbeitet werden. Ab dem Erreichen der Zersetzungstemperatur verhalten sich die kristallinen Thermoplaste analog zu den amorphen Kunststoffen und beginnen sich zu zersetzen. Somit wird der Prozess des Aufschmelzens irreversibel [JOH01; OHL15].

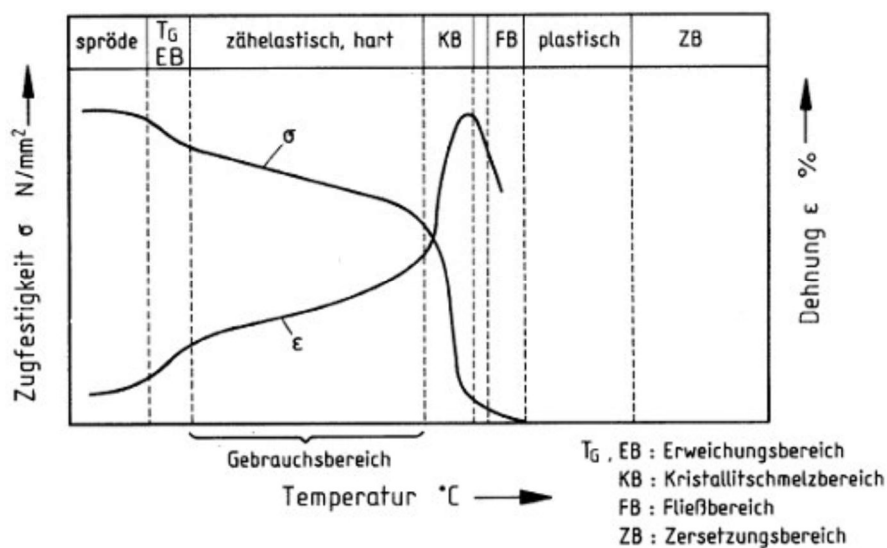


Abbildung 2.7: Zustandsbereich teilkristalline Kunststoffe [IKV]

2.2.3 Wiederverwendbarkeit der Thermoplaste

Wie zu Beginn beschrieben, ist einer der wesentlichen Vorteile der Thermoplaste die Möglichkeit der Wiederverwendung/ des Recyclings. Reste aus der Produktion wie zum Beispiel der Anguss, können und werden in der Praxis der neu eingefüllten Kunststoffmasse zugeführt. Dies geschieht zur Einsparung von Produktionskosten. Die wiederverwendeten Kunststoffe werden als Regranulat bezeichnet. Die Wiederverwendung der Kunststoffe findet seine Grenze in den geforderten Bauteilqualitäten. Werden die Bauteilqualitäten durch mehrfaches Recycling beeinträchtigt, wird das Material nicht weiterverwendet. In der Regel geben die Hersteller des Kunststoffes an, wieviel recycelter Kunststoff dem neu eingefüllten Kunststoff zugeführt werden sollte und wie oft das Material recycelt werden kann, ohne die Folge von Qualitätseinbußen [JOH01].

2.2.4 Zuschlagstoffe

Alle Kunststoffgruppen lassen sich durch Verwendung von Zuschlagstoffen in ihren physikalischen, mechanischen und optischen Eigenschaften stark verändern und optimieren. Die Hauptgründe für den Einsatz von Zuschlagstoffen sind Verbesserungen der Materialeigenschaften und die Senkung des Materialpreises. Zur leichteren Ausformung des Bauteils aus dem Werkzeug werden sogenannte Gleit- oder Trennmittel hinzugefügt. Kosten werden durch die Zugabe von Füllmitteln gesenkt da so weniger Kunststoffmaterial benötigt wird. Verstärkungsmittel sorgen für eine Verbesserung der mechanischen und thermischen Eigenschaften. Die Zuschlagstoffe rufen jedoch auch negative Nebeneffekte hervor. Es kann eine Verschlechterung der Fließfähigkeit des Materials auftreten sowie ein höherer Verschleiß an der Maschine. Es gilt hierbei den richtigen Kompromiss aus den geforderten Bauteilqualitäten und den Prozesskosten zu finden [JOH01; OHL15].

2.3 Aufbau der Spritzgießmaschine

Im Folgenden werden die wichtigsten Bauteilelemente der Spritzgießmaschine beschrieben. Die Bauteile sollen hier in der nachvollziehbaren Reihenfolge beschrieben werden, in der das Kunststoffmaterial seinen Weg durch die Maschine vom einfüllen in den Trichter, bis hin zum Ausformen beschreitet. Der Kunststoff wird in den Trichter eingefüllt welcher sich auf dem Plastifizieraggregat befindet. Vom Trichter aus gelangt das Material in das Plastifizieraggregat und im weiteren Verlauf in die Einspritzeinheit. Der nun bereits durch mechanische Reibung und zusätzliche Aufheizung verflüssigte Kunststoff, wird zum Ende eines Spritzgießzyklus in das formgebende Werkzeug eingespritzt und ausgeformt. Die beteiligten Maschinenkomponenten werden im Folgenden ausführlich beschrieben und mit Hilfe von Bildmaterial erläutert.

2.3.1 Plastifizier- und Einspritzeinheit

Das meist in Form von Granulat vorliegende Kunststoffmaterial wird in den Trichter eingefüllt und durch diesen dem Plastifizierzylinder zugeführt (vgl. Abb. 2.8). Der Trichter sollte im Optimalfall eine runde Form aufweisen um einen gleichmäßigeren Auslauf zu gewährleisten. Zur Verbesserung des Prozessablaufes kann ein Trichter mit vielen technischen Funktionen und Erweiterungen ausgestattet werden.

Bei der Verwendung von Regranulaten, werden Rührwerke im Trichter installiert um eine bessere Durchmischung zu gewährleisten. Verwendung finden meist Metallabsorbierende oder ausscheidende Einrichtungen, um Verunreinigungen des Granulats durch Splitter und Metallstaub, aus den vorigen Herstellungsprozessen zu entfernen, da es sonst zu Schäden an der Spritzgießmaschine führen kann. Das Granulat enthält Feuchtigkeit die wiederum mit Hilfe von Trocknungseinrichtungen verringert wird. Zur gezielten Trockenhaltung des Kunststoffmaterials wird der Trichter in doppelwandiger Ausführung verwendet[JOH01].

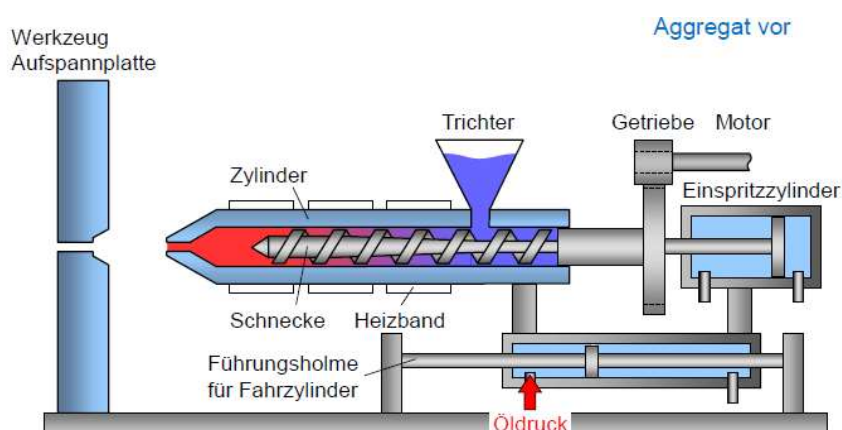


Abbildung 2.8: Spritzgießmaschine mit Schneckenkolbenspritzeinheit [Ohl15]

Die übergeordneten Aufgaben des **Plastifizieraggregats** bestehen aus dem Einziehen des Kunststoffs aus dem Trichter, dem Aufschmelzen (Plastifizieren), dem Fördern, Mischen und Dosieren des Materials sowie dem Speichern und schlussendlich dem Einspritzen des plastifizierten Kunststoffs. Nach dem Einspritzen erfolgt das Nachdrücken.

Es finden verschiedene technische Ausführungen der Spritzeinheit Verwendung. Eine Variante dieser Ausführungen ist die Kolbenspritzeinheit mit Schneckenplastifizierung. Hierbei wird das Material in einem beheizten Zylinder und mit Hilfe der Schneckenplastifizierung aufgeschmolzen und im Anschluss daran mit einem separaten Hydraulikzylinder in das Werkzeug eingespritzt (vgl. Abb.2.9).

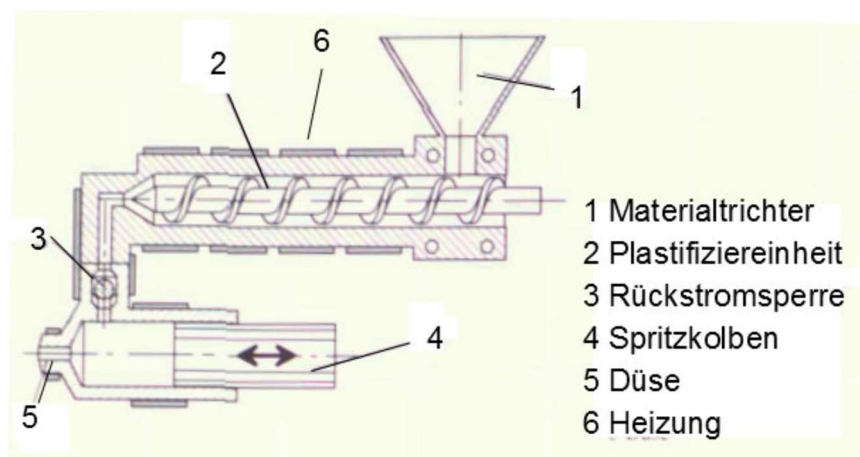


Abbildung 2.9: Schneckenplastifizierung mit Kolbenspritzeinheit [WIT15]

Die in der Abbildung 2.8. aufgezeigte Variante der Spritzgießmaschine ist die Variante mit einer Schneckenkolbenspritzeinheit. Hier wird das Material nicht über einen separaten Kolben, sondern über einen Kolbenstempel der mit der Plastifizierschnecke verbunden ist, eingespritzt. Die dritte Variante ist eine Kolbenspritzeinheit **ohne** Schneckenplastifizierung. In der Abbildung 2.10 ist diese Variante veranschaulicht dargestellt. Die Schnecke ist bei dieser Variante durch einen zusätzlichen Hydraulikzylinder ersetzt.

Hierbei wird das Kunststoffmaterial in einem Hydraulikzylinder zum größten Teil durch die Heizung aufgeschmolzen und dann mit dem separaten Kolben eingespritzt [JOH01].

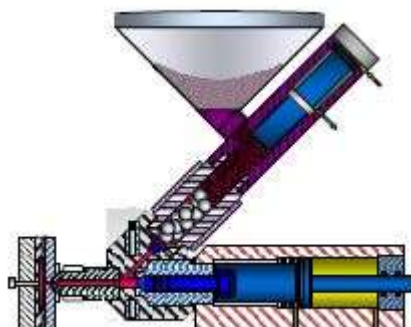


Abbildung 2.10: Kolbenspritzeinheit ohne Schneckenplastifizierung [BACR]

Der Antrieb der Kolbenspritzeinheit und der Schnecke kann über eine Hydraulik, einen Elektromotor oder über eine Hybridversion ermöglicht werden. Diese Variante kommt in der Babyplastmaschine zu Einsatz.

In Spritzgießmaschinen, deren Plastifiziereinheit mit einer Schnecke zum plastifizieren betrieben wird (vgl. Abb.: 2.8), kommt beim Spritzen von Thermoplasten in den meisten Fällen eine Dreizonenschnecke zum Einsatz (vgl. Abb. 2.11). Die Homogenität der Schmelze ist entscheidend für die Qualität der Spritzgießteile und wird durch die **Schnecke** erheblich beeinflusst. Das Plastifizieraggregat ähnelt in den Grundzügen einem Extruder mit dem wesentlichen Unterschied der axialen Beweglichkeit der Schnecke [JOH01; OHL15]. Die Schnecke liegt im Innenraum der Plastifiziereinheit und ist für Erfüllung der meisten, eingangs erwähnten Aufgaben, der Plastifiziereinheit verantwortlich.

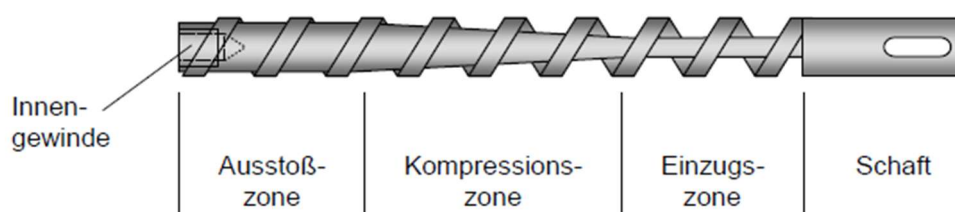


Abbildung 2.11: Dreizonenschnecke [OHL15]

Auf der Abbildung 2.8 ist schematisch die Heizung des Plastifizieraggregats eingezeichnet. In diesem Falle ist die Heizung in Form von Heizbändern um den Plastifizierzylinder konstruiert da dort das Material plastifiziert wird. Die Düsen können ebenfalls von Heizungen beheizt werden. Die Beheizung der Spritzeinheit wird in mehrere verschiedene Heizzonen unterteilt um ein optimales Temperaturprofil zu erzeugen.

Jede Zone wird dabei unabhängig von den anderen Zonen gesteuert um optimal auf die Verschiedenen Kunststoffe und Gegebenheiten der verschiedenen Bauteile eingestellt werden zu können. Hierbei wird die Temperatur beginnend beim Einzug am Trichter bis hin zur Spitze des Plastifizierzylinders ansteigend gesteuert. Es wird so eine Verstopfung des Einzugs durch zu weiches kunststoffmaterial verhindert.

Beheizte Düsen werden eingesetzt um ein zu frühes Erstarren des Kunststoffes in der Düse zu verhindern da die Düse unter diesen Umständen frühzeitiger Verschleißerscheinungen aufzeigen würde [JAR13; OHL15].

Die **Ring-Rückstromsperre** wird bei Spritzgießmaschinen mit Schneckenkolbenspritzeinheit häufig am vorderen Ende der Schnecke an einem Gewinde verschraubt (vgl. Abb. 2.11). Bei anderen Ausführungen der Spritzeinheit befindet sich die Rückstromsperre zwischen dem Einspritzzylinder und dem Plastifizierzylinder (vgl. Abb. 2.9). Ihre Aufgabe ist es beim Einspritzen dafür zu sorgen, dass die Kunststoffschmelze über die Düse in das Werkzeug geführt wird und nicht über die Schneckengänge zurück in den hinteren Bereich der Plastifiziereinheit/ Schnecke gelangt. Eine Verbesserung der Kolbenwirkung wird ebenfalls durch die Verwendung von Rückstromsperrern erzielt. Es gibt grundlegend zwei Bauarten der Rückstromsperre, die sich in ihrem Verschlusssystem unterscheiden. Dies ist zum einem die Rückstromsperre mit Absperrdichtring und die Rückstromsperre mit Kugeln. Die Variante mit dem Absperrdichtring wird in den meisten Fällen verwendet. Auf der Abbildung 2.12 ist die schematische funktionsweise der Ring-Rückstromsperre zu erkennen. Sollte die Kunststoffschmelze in Richtung des hinteren Bereichs der Schnecke fließen, schiebt sich der axial bewegliche Sperring gegen den Stauring und verhindert somit den Durchfluss [JAR13; OHL15].

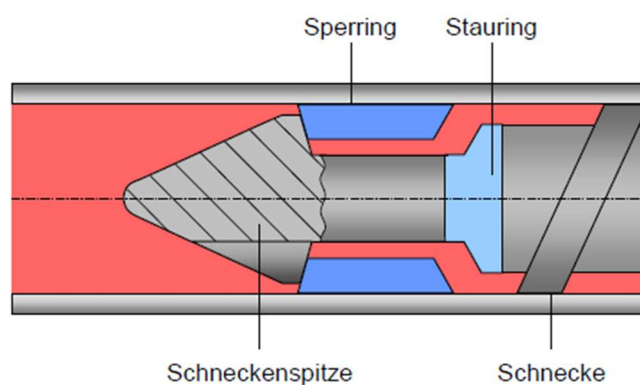


Abbildung 2.12: Ring-Rückstromsperre (schematisch) [OHL15]

Die **Düse** befindet sich im vorderen Teil des Zylinders und bildet die Verbindung vom Plastifizierzylinder zum Werkzeug. Der Radius der Düse ist geringfügig kleiner als der der Angussbuchse. Die Auslassbohrung ist ebenfalls etwas kleiner, um eine bessere Entformung des erkaltenden Kunststoffes in der Angussbuchse zu gewährleisten. Innerhalb der Düse befindet sich ein Fleißkanal durch den die Kunststoffschmelze hindurch dringt. Dieser Fleißkanal muss möglichst strömungsgünstig konstruiert sein. Eine Funktion der Düse ist es den Innendurchmesser der Einspritzeinheit auf den Eingangsdurchmesser des Werkzeuges zu bringen. Ebenfalls soll sie den Übergang zwischen der Spritzeinheit und dem Werkzeug, während des gesamten Spritzgießzyklus inklusive dem Nachdrücken und dem Dosieren, abdichten. Zum Abdichten während des gesamten Prozesses gehört es zu verhindern, dass die Kunststoffschmelze nach dem Abheben des Werkzeuges aus der Düse austritt.

Bei der noch Folgenden Beschreibung des Werkzeuges wird noch auf den Anguss eingegangen, jedoch soll hier im Vorfeld die Verhinderung der Fadenbildung bei der Trennung des Angusses von der Schmelze, als eine der wesentlichen Aufgaben der Düse genannt werden. Die Düse soll des Weiteren die Kunststoffschmelze ohne große Druckverluste in das Werkzeug führen und eine Rückstandsbildung verhindern [JAR13; OHL15].

Es werden je nach Anwendungsfall verschiedene Düsen eingesetzt und daher in offene und verschlossene Düsen unterteilt. **Offene Düsen** werden verwendet, wenn die Kunststoffmasse besonders Zäh ist und somit keine Schmelze aus der Düse austritt oder die Düse nicht abgehoben wird. Die konstruktionsweise der offenen Düsen sorgt dafür, dass der erstarrende Anguss von der Kunststoffschmelze getrennt wird. Dies passiert jedoch nur bei besonders Zäher Formmasse. Bei sehr dünnflüssiger Schmelze könnten sich unter der Verwendung von offenen Düsen Fäden bilden und Schmelze austreten. Diese Art von Düsen wird erst nach dem Plastifizieren vom Werkzeug abgefahren da sonst wiederum Schmelze Aufgrund des offenen Zustandes der Düse austreten könnte. Es kommt bei diesen Düsen nur zu geringen Druckverlusten während des Prozesses, was als ein großer Vorteil betrachtet werden kann. Als Nachteile dieser Variante sind mögliche Leckagen und Scherbelastungen zu beachten, sollte die Düse nicht exakt eingestellt sein und die „offene“ Position nicht vollständig erreicht werden. **Verschlussdüsen** werden für die Verarbeitung von dünnflüssiger Schmelze, die trotz Dekompression nach dem Abheben ausfließen würde, verwendet. Die verschiedenen Ausführungen dieser Variante sind die Nadelverschlussdüsen, Schiebeverschlussdüsen und die Bolzenverschlussdüsen. Bei Verwendung dieser Düsen kann mit abgefahrener Spritzeinheit plastifiziert werden, da sie beim Abfahren verschließt. Dies ist einer der wesentlichen Vorzüge dieser Variante. Verschlussdüsen sind oft federbetätigt und öffnen dann mit dem Schmelzdruck gegen den Federdruck oder sie können auch über eine Hydraulik/ Pneumatik zwangsbetätigt werden. Die meist verwendete Düse ist jedoch die offene Variante [JAR13].

2.3.2 Werkzeugeinheit

Die zentrale Baugruppe beim Spritzgießen ist das Werkzeug. Es ist kein fester Bestandteil der Maschine, sondern wird für jeden zu fertigenden Artikel speziell entworfen. Die mögliche Anzahl der verschiedenen Konstruktionsvarianten ist Aufgrund der Vielzahl der unterschiedlichen Spritzgießteile nicht überschaubar. Ein Werkzeug erfüllt im Wesentlichen konstruktive und technologische Aufgaben. Zu den konstruktiven Aufgaben gehört das Aufnehmen der Kräfte, die Bewegungsübertragung sowie die Führung der Werkzeugteile. Die wichtigsten technologischen Aufgaben des Werkzeuges sind die Aufnahme der Kunststoffschmelze und die Ausformung der Schmelze zur geforderten Artikelgestalt. Die Abkühlung der Schmelze sowie die Entformung gehören ebenso zu den technologischen Aufgaben des Werkzeuges. Das Werkzeug besteht aus zwei Hälften. Aus der Auswerferseite wird das fertige Bauteil entfernt und im Gegensatz dazu liegt die Düsenseite an der Düse der Spritzeinheit (vgl. Abb.: 2.13). Die Düsenseite wird auch als feste Seite bezeichnet, da diese Seite in der Regel nicht beweglich konstruiert ist. Zwischen den beiden Werkzeughälften befindet sich die Kavität welche die Formnester beinhaltet. Die Auswerferseite ist üblicherweise die bewegliche Werkzeugseite und wird somit während des Öffnungsvorganges bewegt.

Die Kavität ist für die Formgebung des Bauteils verantwortlich und wird, wie eingangs erwähnt, für jeden zu fertigenden Artikel und passend zur jeweilige Spritzgießmaschine konstruiert. Beim Befüllen der Kavität muss die Luft entweichen können, da sonst die Luft komprimiert wird und sich in Folge dessen erhitzt. Hierbei könnte das Bauteil verbrennen. Die Entlüftungsmöglichkeiten richten sich dabei nach der Geometrie des Bauteils und der Lage des Anschnitts. Die Entlüftung ist unter anderem durch eine bestimmte Oberflächenrauheit oder einen Luftspalt in der

Trennebene (vgl. Abb.: 2.13) zu ermöglichen. Sollte die Entlüftung zu groß ausfallen, bilden sich Grate am Spritzgießbauteil. Bei Verwendung von Thermoplasten sollten die Luftspalte ungefähr $< 0,02$ mm sein. In der Kavität können unter Verwendung von mehreren Formnestern, mehrere Bauteile gleichzeitig während eines Zyklus geformt werden [JAR13; OHL15].

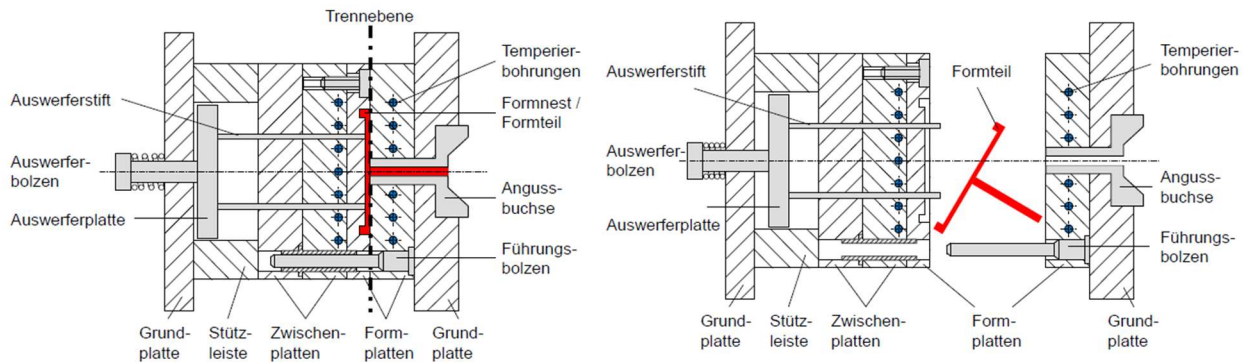


Abbildung 2.13: Werkzeug geschlossen (links) und geöffnet (rechts) [OHL15]

Ein **Angussystem** wird benötigt um die Kunststoffschmelze von der Düse in die Nester zu transportieren. Da es Bauartbedingt in den meisten Fällen nicht möglich ist die Kavität direkt an der Düse anzulegen, ist ein Angussystem von Nöten. Aus Gründen der Effizienz, sollte der Anguss so klein wie möglich gestaltet werden, da dieser als Abfall gilt und weiterbearbeitet werden muss, falls die Absicht besteht diesen wiederzuverwenden. Der Anschnitt ist der Punkt an dem die Schmelze in die Kavität fließt. Ist der Anschnitt erstarrt, hat der Nachdruck keinen Einfluss mehr auf das Formteil. Die Schmelze erstarrt an den Wänden zuerst und aus diesem Grund muss der Anschnitt so gestaltet werden, dass die plastische Seele so lang wie möglich erhalten bleibt. Der Zeitpunkt an dem der Anschnitt versiegelt ist, wird Siegelpunkt genannt und kann über das Teilgewicht ermittelt werden [JAR13; OHL15].

Spritzgießwerkzeuge können durch verschiedene Kriterien unterschieden werden. Ein Unterscheidungskriterium ist die Art des Angusses. Man unterscheidet nach erstarrenden und nicht erstarrenden Anguss (Heißkanalsystem). Die Anzahl der Kavitäten ist ein weiteres Unterscheidungsmerkmal. Es existieren Einfach- und Mehrfachwerkzeuge. Bei der Art der Entformung des Bauteils aus dem Werkzeug wird zwischen dem Standardwerkzeug, dem Backenwerkzeug (bei Hinterschneidungen) (vgl. Abb.: 2.14) und dem Ausschraubwerkzeug (bei Gewinden) unterschieden [OHL15].

Die Temperierung des Werkzeuges erfolgt meist über einen Wärmetauscher, welcher mit Wasser oder Öl betrieben werden kann. Hierbei wird die Flüssigkeit zur Temperierung, je nach Herstellungsverfahren zur Ab- oder Zufuhr von Wärme, durch das Werkzeug geleitet.

In der Abbildung 2.13 ist der **Auswerfermechanismus** angedeutet. Der Auswerfer ist ein axialer Bolzen der durch die Mitte der beweglichen Werkzeugaufspannplatte bewegt wird und dieser hat die Aufgabe das fertige Spritzgießteil aus dem Werkzeug zu drücken. Bei Maschinen mit kleiner Schließkraft wird meist ein einzelner zentraler Auswerfer verbaut während hingegen an größeren Maschinen die Auswerferbewegung mit einer Auswerfertraverse durchgeführt wird, um ein Verkannten zu vermeiden. Die Auswerfertraverse ist eine zusätzliche Platte hinter der beweglichen Werkzeugaufspannplatte.

Hierbei werden mehrere Auswerferbolzen gleichzeitig betätigt. Bauartbedingt können die Auswerfer über eine Hydraulik oder einen Elektromotor angetrieben werden. Andernfalls kann der Auswerfer mit dem Betätigungsbolzen der Maschine über eine Auswerferkupplung fest verbunden sein. Ebenso ist es möglich den Auswerfer mit einer Feder oder mit Rückdrückstiften wieder in seine hintere Lage zu bewegen. Gegebenenfalls werden die Auswerferstifte mit Auswerferhülsen geführt. Bei der Fertigung von Bauteilen mit einem größeren Hohlraum, wie beispielsweise einem Rohr, wird ein sogenannter **Schieber** eingesetzt. In diesem Fall wird der Schieber in die Kavität geschoben, damit dieser Bereich nicht mit Schmelze gefüllt werden kann. Nach dem Einspritzen und vor dem Auswerfen wird der Schieber dann aus dem Werkzeug gezogen, womit der geforderte Hohlraum entsteht. Bei großflächigen und außenliegenden Hinterschneidungen liegt die zu fertigende Kontur der Bauteile in seitlich verfahrbaren Backen (vgl. Abb.: 2.14), auch Schieberelement genannt [JAR13; OHL15].

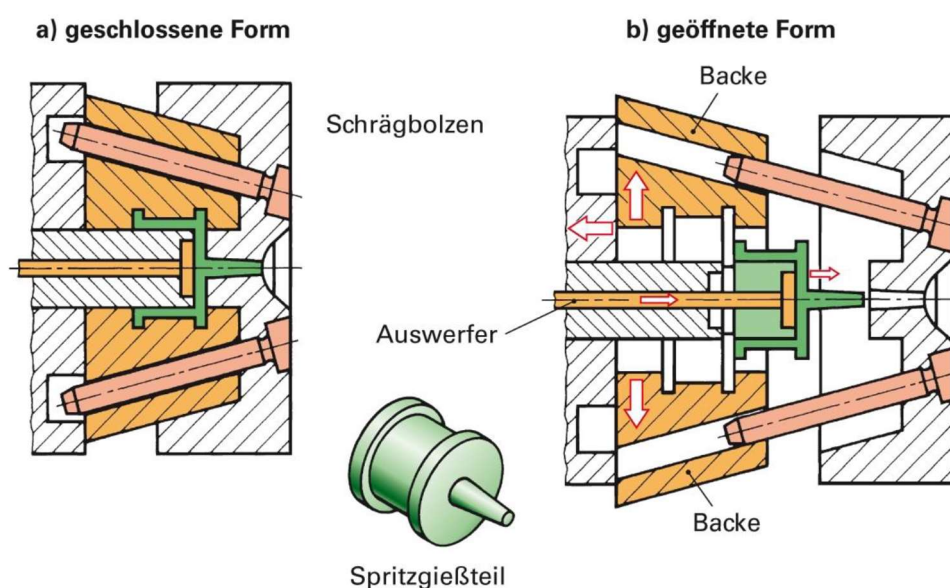


Abbildung 2.14: Schieberelemente zur Fertigung von Hinterschneidungen [MIC01]

2.3.3 Schließeinheit

Eine der wesentlichen Baugruppen der Maschine ist die Schließeinheit, welche mit Hilfe von hydraulischen oder elektrischen Systemen die Werkzeughälften öffnet und schließt. Die Schließeinheit nimmt das Werkzeug, den Auswerfer und andere Hilfsvorrichtungen auf. Das Aufbringen der Schließkraft während der Einspritz- und Nachdruckphase zählt auch zu den Aufgaben der Schließeinheit. Der Vorteil der Hydraulik ist die preiswertere Konstruktion und Umsetzung. Die allgemeinen Vorteile bei elektrisch aufgebrachtener Fahrenergie innerhalb der Maschine sind insbesondere die präziseren Wiederholgenauigkeiten, die Energieeffizienz, die schnelleren Werkzeugbewegungen sowie die Reinraumtauglichkeit und die geringere Geräusentwicklung im Vergleich zur hydraulisch aufgebrachtener Fahrenergie. Die Schmelze wird unter sehr hohem Druck in das Werkzeug eingespritzt [JAR13; OHL15].

Es muss gewährleistet sein, dass das Werkzeug nicht aufgedrückt wird und dass die Kunststoffschmelze nicht in die Trennebene eindringen kann. Da die Schließkraft sehr bedeutend ist, wird diese für Größenbezeichnungen der Maschinen herangezogen. Im Dauerbetrieb einer Spritzgießmaschine sollte die jeweilige Schließkraft für das Werkzeug nicht größer sein als 80% der maximal möglichen Schließkraft. Um die nötige Schließkraft für das Werkzeug zu berechnen, wird die projizierte Spritzteilfläche mit dem Werkzeuginnendruck multipliziert. Das Dosiervolumen kann auch zur Einteilung der Maschinen betrachtet werden. Dieses berechnet sich aus dem Schneckendurchmesser und dem maximalen Dosierweg, also der maximalen axialen Bewegung der Schnecke oder dem Kolben. Eine weitere Aufgabe der Schließeinheit ist der Schutz des Werkzeuges. Hierzu zählen die exakte Zentrierung und eine möglichst parallele Führung der Werkzeughälften während der Schließ- und Öffnungsbewegung. Sollte die Führung nicht ausreichend parallel sein, verschleißt das Werkzeug übermäßig an der Trennebene [JAR13; OHL15].

Schließeinheiten unterscheiden sich zunächst über die Antriebstechnik und über die Baulänge. Die hydraulischen Systeme bewegen sich mit Hilfe von Zylinder-Kolbensystemen. Der große Hauptzylinder soll die geforderte Schließkraft aufbringen. Meist gibt es neben dem Hauptzylinder noch einen kleineren Schnellfahrzylinder, mit welchen die geforderten hohen Bewegungsgeschwindigkeiten beim Öffnen und Schließen realisiert werden (vgl. Abb.: 2.15). Diese Systeme sind langsamer als die mechanischen Systeme mit einem Kniehebel, da zum Aufbringen der Schließkraft die Ölsäule komprimiert werden muss. Aus energetischer Sicht sind die vollhydraulischen Systeme ebenfalls ein Nachteil, da große Ölmengen transportiert werden und zur Kompression eine große Energiemenge benötigt wird. Bei kleineren Schließkräften bis zu 500 kN sind diese Systeme kostengünstiger zu konstruieren und herzustellen. Weiterhin lassen sich vollhydraulische Schließeinheiten beim Werkzeugwechsel schneller an unterschiedliche Einbauhöhen anpassen [JAR13; OHL15].

Schließkraft aufbringen

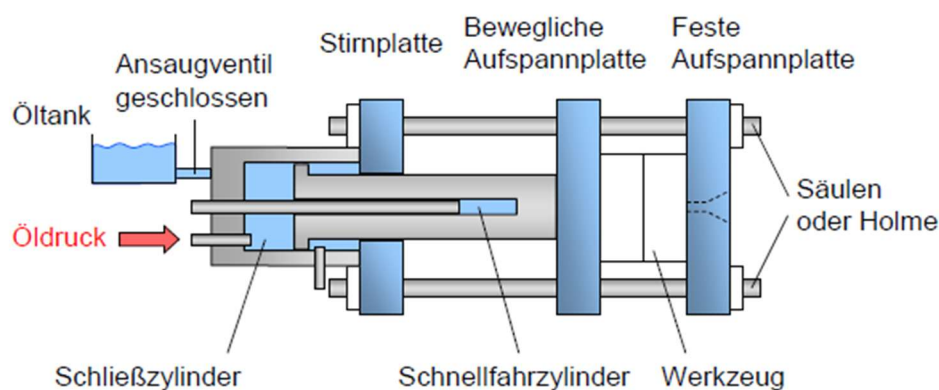


Abbildung 2.15: vollhydraulische Schließeinheit [OHL15]

Mechanische Systeme werden über ein Kniehebelsystem bewegt. Diese werden in einfacher und in doppelter Ausführung verwendet (vgl. Abb.: 2.16). Ein wesentlicher Vorteil dieser Bauweise ist die Kraft-/Geschwindigkeitscharakteristik. Es werden allein aufgrund der geometrischen Verhältnisse hohe Bewegungsgeschwindigkeiten der Werkzeughälfte, bis kurz vor dem Schließen, bei konstanter Fahrgeschwindigkeit des Antriebszylinders erreicht.

Bauartbedingt sinkt die Bewegungsgeschwindigkeit also kurz vor dem vollständigen Schließen ab, womit die erreichbare Kraft stark ansteigt, so dass mit einem relativ kleinen Zylinder große Schließkräfte erreicht werden können. Ist das Werkzeug vollständig geschlossen, muss keine Energie mehr aufgebracht werden, um die Zuhaltkraft während der Füll- und Nachdruckphase zu realisieren. Die Fahrbewegung und auch der Kraftaufbau, werden von einem einzigen Hydraulikzylinder ermöglicht. Dies ist ein weiterer Grund für die hohen Bewegungsgeschwindigkeiten. Kniehebelsysteme sind grundsätzlich aufwändiger im Aufbau. Weitere Nachteile sind die bauartbedingten kleineren Öffnungswege und die aufwändige Regelung der thermischen Säulendehnung welche die Schließkraft maßgeblich beeinflusst. Einfachkniehebel werden bis zu einer Schließkraft bis 1000 kN eingesetzt. Bei höheren Schließkräften bis 10000 kN werden Doppelkniehebel eingesetzt. Mit der Entwicklung der elektromotorischen Antriebe ist ein mechanisches Kniehebelsystem zwingend notwendig. [JAR13; OHL15]

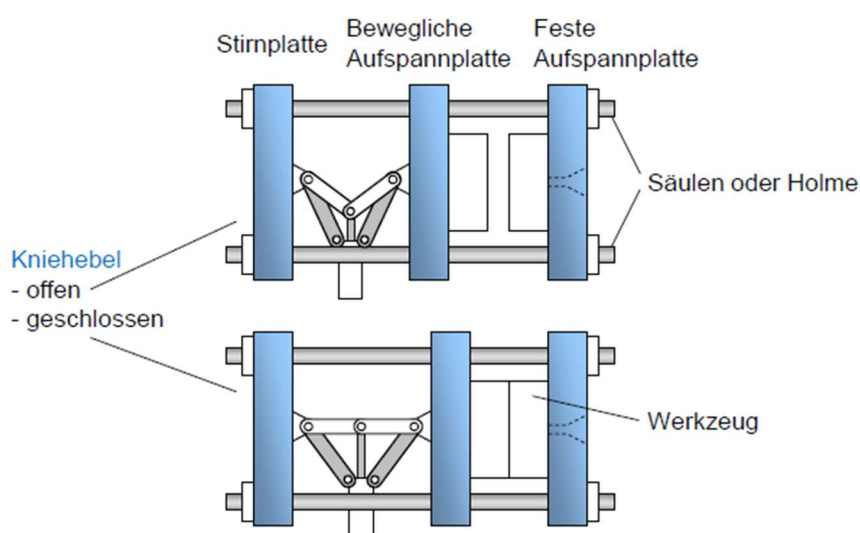


Abbildung 2.16: mechanische Schließeinheit; Einfachkniehebelsystem [OHL15]

2.4 Zeitlicher Ablauf des Spritzgießprozess

Ein erheblicher Einflussfaktor auf die Effizienz und den Energiebedarf eines technischen Prozesses wie dem des Spritzgießens, ist der zeitliche Ablauf eines solchen Zyklus. Es gilt also den zeitlichen Ablauf des Spritzgießprozesses genau zu analysieren.

Dies ist von Bedeutung insofern eine Verkürzung der Prozesszeit in Hinsicht auf die Effizienz umgesetzt werden soll. Der Spritzgießprozess ist ein technisch-physikalischer Wirkungsablauf. Dieser Prozess umfasst mehrere Prozessschritte, welche im folgenden Teil des zweiten Kapitels, erläutert werden. Der gesamte Prozess des Spritzgießens wiederholt sich laufend in der Form eines Zyklus. Das Kunststoffgranulat wird über den Einfülltrichter der Schnecke oder dem Einspritzkolben zugeführt. Die Drehbewegung der Schnecke oder die axiale Bewegung des Kolbens, fördert das Material in den vorderen Bereich des Plastifizierzylinders.

Hier wird das Kunststoffgranulat durch die Reibungswärme und der zusätzlichen Heizungen aufgeschmolzen (plastifiziert) und dann in den Hohlraum (Formnest, Kavität) des Werkzeuges durch eine Düse eingespritzt. Die Schmelze erstarrt durch Abkühlung und wird im Anschluss daran entformt. [JOH01].

Die einzelnen Schritte des Prozesses laufen teilweise nacheinander und teilweise zeitlich überlappend ab (vgl. Abb.: 2.17). Die Kühlzeit startet beispielsweise mit dem Beginn des Einspritzvorgangs. Ferner beinhaltet sie die vollständige Phase des Nachdrückens und endet mit dem Öffnungshub des Werkzeuges zur Entformung des gefertigten Spritzgießteils.



Abbildung 2.17: Zeitlicher Ablauf des Spritzgießzyklus [MGKE]

Die Steuereinrichtung einer Spritzgießmaschine gewährleistet einen koordinierten Ablauf der in dem Kreisdiagramm der Abbildung 2.17 veranschaulichten Verfahrensschritte. Weiterhin laufen weitere Funktionen zusätzlich zu den oben genannten Verfahrensschritten ab. Dies können die Betätigung von Schiebern, das Einsprühen der Werkzeugkavität mit Trennmitteln oder ähnliches sein. Jedoch ändern diese nichts am grundsätzlichen Verfahrensablauf [JOH01].

Im Hinblick auf die folgende Simulation des Spritzgießprozesses und dessen Gliederung innerhalb der Simulation, ist der gesamte Zyklus hier in neun verschiedene Prozessschritte unterteilt worden. Auf diese neun Schritte wird im weiteren Verlauf Bezug genommen. Diese Unterteilung ist im allgemeinen Fall eines Spritzgießprozesses gültig und kann daher in dieser Form angewendet und auf jeden realen Prozess übertragen werden. Als Anfang eines Spritzgießzyklus wird in der Regel der Zeitpunkt bezeichnet, an dem das Werkzeug mit der Schließbewegung beginnt (*Prozessschritt 1*) (vgl. Abb.: 2.17). An diesem Zeitpunkt soll hier mit der Erläuterung des Prozesses begonnen werden. Es befindet sich in diesem Moment kein Formteil in dem Werkzeug. Die Auswerfer sind zurückgezogen und das Werkzeug ist auf die materialspezifische Temperatur vorgeheizt. Mit Hilfe eines Hydraulikzylinders schließen die Werkzeughälften nun vollständig. [JOH01; JOH04].

Zu diesem Zeitpunkt befindet sich schon die korrekt dosierte und benötigte Menge des plastifizierten Kunststoffmaterials im Vorraum der Schnecke/ des Hydraulikzylinders um eingespritzt zu werden. Diese wurde durch den Trichter in das Plastifizieraggregat geführt und dort durch Scherwärme, die durch Reibung entsteht und durch die aufgebrachtten Heizbänder erhitzt und auf diesem Wege plastifiziert. Jedoch zählt dieser Prozessschritt nicht als Anfang des Zyklus auch wenn es anfänglich als logisch erscheinen mag, dass der Zyklus mit dem Plastifizieren und dem Schritt des Dosierens beginnt. Dieser Zusammenhang wird ebenfalls in der Abbildung 2.17 verdeutlicht.

Das Plastifizieraggregat beginnt mit der Bewegung sobald die Werkzeughälften vollständig geschlossen sind und mit der vordefinierten Schließkraft geschlossen gehalten werden. Das Aggregat fährt dann (*Prozessschritt 2*) mit der Düse an die feste Werkzeughälfte heran, sofern nicht mit anliegender Düse gefahren wird. Sobald das Plastifizieraggregat die endgültige Position erreicht hat, beginnt der Einspritzvorgang (*Prozessschritt 3*). Während des Einspritzens finden keine anderen Prozessschritte statt. Die Einspritzzeit nimmt nur einen sehr kleinen Teil der Gesamtzykluszeit in Anspruch ist aber sehr komplex zu ermitteln und relativ kompliziert zu berechnen. Darauf soll in einem nachfolgenden Kapitel noch eingegangen werden. Die Umschaltphase ist der Übergang von der Einspritzphase in die Phase des Nachdrückens. Beim Nachdrücken kommt es nur noch darauf an einen bestimmten Druck für eine bestimmte Zeit zu halten (*Prozessschritt 4*). Während die Einspritzphase im Normalfall geschwindigkeitsgeregelt wird, ist die Nachdruckphase druckgeregelt. Dies bedeutet eine vollautomatische Spritzdruckverstellung durch die Steuerung der Maschine, um die voreingestellten Werte der Einspritzgeschwindigkeit zu halten. Die Umschaltphase ist also die Veränderung der dynamischen Füllphase zur quasistatischen Nachdruckphase [JOH01; JOH04].

Nach der voreingestellten Nachdruckzeit fährt das Aggregat zurück in die Ausgangsposition (*Prozessschritt 5*). Während der Restkühlzeit (*Prozessschritt 6*), welche ebenfalls direkt im Anschluss an die Nachdruckphase beginnt, kühlt das Formteil in der Kavität soweit herunter bis es die nötige Formstabilität erreicht hat. Hier könnte dann mit dem Entformen begonnen werden. Die Restkühlzeit läuft demnach zum Teil während der Aggregatbewegung, zurück in dessen Ausgangsposition, ab. Die Phase des Plastifizierens und Dosierens (*Prozessschritt 7*) der erforderlichen Menge des Kunststoffmaterials für den nächsten Zyklus beginnt sobald das Plastifizieraggregat wieder zurück in die Ausgangsposition gefahren ist. Es ist möglich den Schritt des Dosierens innerhalb des Zeitfensters vom Eintreffen des Aggregats in der Ausgangsposition bis hin zu dem Zeitpunkt an dem sich das Werkzeug öffnet, zu verschieben. Jedoch muss sichergestellt sein, dass vor dem Öffnen des Werkzeuges die nötige Menge des plastifizierten Kunststoffes dosiert wurde. Unter gewissen Umständen kann es sogar von Nöten sein, den Schritt des Dosierens so spät wie möglich zu beginnen damit dieser erst kurz vor der Öffnung des Werkzeuges abgeschlossen ist. Ein möglicher Umstand der diese Maßnahme erfordert, ist die Absicht die Verweildauer der Kunststoffmasse in dem Schneckenorraum/ dem Hydraulikzylinder zu verringern, um möglicherweise die Bauteilqualität zu optimieren [JOH01; JOH04]. Dies wird in der Abbildung 2.17 sehr deutlich veranschaulicht. Hier findet das Dosieren direkt im Anschluss an die Bewegung des Aggregates in die Ausgangsposition statt. Somit entsteht eine Lücke im Zeitfenster zwischen Dosieren und dem Öffnen des Werkzeuges und dem Auswerfen.

Diese Lücke kann durch das Verschieben der Dosierphase verkürzt oder vollständig geschlossen werden. Es existiert also ein gewisser Spielraum innerhalb dessen die Dosierphase angesetzt werden kann.

Nach dem Ablauf der Restkühlzeit öffnet sich das Werkzeug vollständig (*Prozessschritt 8*) und der Auswerfermechanismus beginnt mit dem Entformen (*Prozessschritt 9*) des fertiggestellten und ausreichend abgekühlten Bauteils [JOH01; JOH04].

Das Ende findet der vollständige Spritzgießzyklus sobald das Werkzeug vollständig ausgeformt wurde und die bewegliche Werkzeughälfte mit der Schließbewegung beginnt. Hier ist ebenfalls der Start des neuen Zyklus.

2.5 Verfahrensablauf der Prozessschritte

2.5.1 Plastifizieren und Dosieren

Beim Plastifizieren wird dem Kunststoffmaterial Wärme durch mechanische Reibung und den angebrachten Heizungen zugeführt bis die Formmasse den Fließbereich erreicht (Plastifizierung). Die Temperatur wird so gewählt, dass die Kunststoffschmelze sich nicht durch zu hohe Temperatur zersetzt. Ist die Temperatur zu niedrig gewählt, erkaltet der Kunststoff zu früh oder dieser ist nicht einspritzbar. Ist die Düse noch geschlossen, sammelt sich die Schmelze im vorderen Bereich der Schnecke (Schneckenvorraum) oder dem Zylinder und drückt diese/ diesen zurück. Das nötige Dosiervolumen wird mit Hilfe eines Wegmesssystems über den Rücklauf der Schnecke bestimmt und sammelt sich im Schneckenvorraum. Der gesamte Dosiervorgang wird somit unter Festlegung des Dosiervolumens, der Drehzahl, dem Staudruck und dem Schneckenrückzug an der Maschine eingestellt. Beim Plastifizieren ohne Verwendung einer Schnecke, wie es bei der Babyplastmaschine der Fall ist, wird das geschmolzene Kunststoffmaterial in der gewünschten Dosiermenge, durch einen Hydraulikzylinder, in die Spritzeinheit gedrückt und somit dosiert. Es muss mehr Kunststoffmasse dosiert werden als für das fertige Bauteil nötig ist. Ein Grund dafür ist ein Massepolster welches zwischen Schneckenspitze/ Einspritzkolben und der Düse vorliegen muss, um ein effektives Nachdrücken gewährleisten zu können. Ohne dieses Polster könnte keine Kraft auf die Schmelze, nach dem Einspritzen, ausgeübt werden, da Düse und Kolben dann aneinander lägen. Teilkristallines Material nimmt bei Schmelztemperatur 15% mehr Volumen ein als bei Raumtemperatur, dementsprechend muss 15% mehr Schmelze dosiert werden. Bei amorphen Material sind dies in etwa 10%. Dies ist ein weiterer Grund für die Dosierung des Volumens oberhalb des eigentlich benötigten Bauteilvolumens [JAR13; JOH01].

2.5.2 Einspritzen und Nachdrücken

Bei heutigen Spritzgießmaschinen ist der Einspritzvorgang im Normalfall geschwindigkeitsgeregelt. Hierbei wird die Einspritzgeschwindigkeit auf den eingestellten Werten gehalten und der Spritzdruck vollautomatisch verstellt. Im Gegensatz dazu wird in der Nachdruckphase der Druck geregelt woraus sich dann die Restgeschwindigkeit ergibt.

Die Geschwindigkeit des Einspritzvorgangs wird durch die Vorlaufgeschwindigkeit der Schnecke/ des Einspritzkolbens bestimmt. Die dosierte Kunststoffschmelze wird durch den Antrieb der Schnecke oder des Hydraulikkolbens unter hohem Druck, durch die Düse und dem Anguss in die Werkzeugkavität gedrückt. Die Zeit die für das Einspritzen benötigt wird, ergibt sich aus den eingestellten Geschwindigkeiten und Wegen [JAR13]. Diese Zeit wird meist nur als Überwachungszeit eingestellt. Die Maschine unterbricht den Prozess, sollte die benötigte Zeit des Einspritzvorgangs die voreingestellte Zeit überschreiten. In der Umschaltphase wird von der dynamischen Füllphase zu einem quasistatischen Nachdruckvorgang umgeschaltet. Vor dem Umschalten muss die optimale Füllung der Kavität gewährleistet sein. Dies ist der Wegpunkt an dem das Bauteil vollständig gefüllt aber noch nicht ausgeprägt ist.

Ebenso müssen große Druckschwankungen während des Umschaltens vermieden werden, um die Bauteilqualität nicht zu beeinträchtigen. In der Nachdruckphase wird die Verringerung des Volumens des Bauteils verhindert. Das Volumen verringert sich durch Abkühlung des Teils. Um diese Schrumpfung zu vermeiden, wird weiter Kunststoffmasse in das Werkzeug gedrückt. Wie zu Beginn erwähnt, geschieht dies unter konstantem Druck [JAR13; JOH01].

In der Kühlphase wird nicht weiter nachgedrückt. Das Teil kühlt ab, bis es einen Aggregatzustand annimmt in dem es Formstabil bleibt. Während der Abkühlung beginnt im Normalfall bereits die Plastifizierung für den nächsten Spritzgießzyklus [JOH01].

2.5.3 Entformung des Bauteils

Sobald das Spritzgießteil erstarrt ist, wird es dem Werkzeug entnommen um Platz für das nächste Formteil zu schaffen. Dieser Vorgang wird als Entformung bezeichnet. Das fertige Formteil löst sich im Normalfall nicht von allein aus dem Werkzeug, da es aufgrund der Volumenschwindung fest in dem Werkzeug sitzt. Hinterschneidungen führen ebenfalls dazu, dass das Formteil nicht von selbst aus dem Werkzeug fällt. Bei diesem Prozessschritt fahren die Düsenseite und die Auswerferseite des Werkzeugs auseinander. Der Schieber fährt aus dem Werkzeug heraus. Im Anschluss daran werden die Werkzeughälften geschlossen und der Schieber, sofern dieser vorhanden ist, in die Kavität gefahren. Während des Schließvorgangs befindet sich die Plastifiziereinheit, je nach Dauer der einzelnen Phasen, bereits in der Phase des Plastifizierens[JOH01].

2.6 Simulation

2.6.1 Grundlagen der Simulation

Der Hauptteil dieser Arbeit besteht darin den zeitlichen Ablauf des Spritzgießprozesses in einer Simulationssoftware zu simulieren und somit digital abzubilden, um den Prozess analysieren und bewerten zu können. Hierbei geht es speziell um die Analyse der Effizienz im Rahmen des im ersten Kapitel erwähnten Forschungsprojektes.

Aus der zeitlichen Komponente, die in dieser Arbeit untersucht und abgebildet wird, und der Leistung der Verbraucher ergibt sich im weiteren Verlauf dieses Projektes der Energieverbrauch und die Effizienz des Spritzgießprozesses.

Deshalb wird einleitend auf den Begriff Simulation und die allgemeine Anwendung in der Produktion in diesem Kapitel eingegangen. Im Anschluss daran wird die Simulationssoftware Dymola® vorgestellt. Diese wird hier innerhalb dieser Arbeit für die Simulation des Spritzgießprozesses verwendet.

In der VDI Richtlinie 3633 werden Simulationen von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen beschrieben. In dem Beiblatt 1 dieser Richtlinie wird der Begriff 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.“ [VDI3633]

In einer Simulation werden geplante oder reale Systeme durch ein Modell dargestellt. Diese Modelle können analog, oder wie im Fall dieser Arbeit, digital sein. Analoge Modelle bestehen aus mechanischen oder elektrisch-hydraulischen Systemen während digitale Simulationen auf grafischen und mathematischen Systemen basieren. In den digital erstellten Modellen können unter Eingabe der Parameter Experimente durchgeführt werden, deren Ergebnisse und die Auswertung und Interpretation dieser Ergebnisse, direkt auf das reale System übertragen werden können. Aus vielfältigen Beispielen aus allen Bereichen der Technik und klassischen Physik zeigt sich, wie Systeme gebildet und durch Simulation getestet und optimiert werden können. So werden frühzeitig Fehler erkannt, die in der Realität nur ungleich schwerer zu korrigieren wären. Die Grenzen des zu modellierten Systems müssen vor der Modellerstellung bekannt sein. Dies bedeutet eine klare Definition der Systemgrenzen, um feststellen zu können welche relevanten Elemente sich innerhalb dieses Systems befinden und welche Verbindungen zur Umgebung des Systems vorhanden sind. Diese Elemente werden in der Simulation mit geometrischen oder physikalischen Kennwerten belegt. Die Schnittstellen zur Umgebung können Daten aus Materialfluss, Energiefluss und Informationsfluss in das bzw. aus dem System darstellen und diese Daten beeinflussen das System maßgeblich. Die notwendigen Daten zur Modellierung des Systems und dessen Ein- und Ausgangsparametern müssen im Vorfeld vorhanden sein. Die Daten die im Rahmen dieser Arbeit zur Anwendung kommen, werden von der Firma IES erhoben und bereitgestellt. Ein simuliertes System stellt nur eine Abstraktion dar und somit wird mit Vereinfachungen und Annahmen modelliert. Wenn alle notwendigen Daten vorliegen, kann das System modelliert werden. Schließlich werden verschiedene Simulationsversuche und Simulationsvarianten durchgeführt. Aus der Auswertung der mit der Simulation ermittelten Ergebnissen, kann das Modell optimiert oder in der praktischen realen Umsetzung verwirklicht werden [KÜH06, ROS16].

Der Einsatz von Simulationen zur Erstellung und Anpassung von realen Systemen beinhaltet erhebliche Vorteile. Reale Systeme sind zu komplex, um diese „per Hand“ vollständig zu berechnen. In der Simulation werden die Systeme in überschaubare Elemente zerlegt. Diese Einzelelemente sowie das Gesamtsystem werden von der Simulation berechnet. Simulationen können schneller geändert werden als reale Systeme. Mit Hilfe von Simulationsprogrammen können Systeme abgebildet werden, die real nicht existieren.

Die Simulation erlaubt es, Prozesse zu verändern und zu analysieren ohne in den realen Prozess eingreifen zu müssen. Ein Systemverhalten über einen sehr langen, unüberschaubaren Zeitraum, kann mit einer Simulation über Zeiträffer schneller und direkter analysiert werden. Zustände, welche im realen System zu einem Schaden oder Fehler führen würden, können simuliert und somit im Vorfeld genauer untersucht werden. Dies führt bei der Analyse eines realen Systems zu einer frühzeitigen Fehlererkennung und Fehlervermeidung und stellt somit einen der erheblichsten Vorteile der Simulation von realen Systemen dar [KÜH06, ROS16].

Insgesamt betrachtet ergeben sich hieraus Vorteile der Kostenersparnis durch weniger Ausschuss, geringere Prozesszeiten und geringeren Energiebedarf. Ebenfalls ergibt sich ein besseres Systemverständnis und eine höhere Prozesssicherheit [KÜH06].

In dieser Arbeit wird der zeitliche Ablauf eines vollständigen Spritzgießzyklus abgebildet und analysiert. Der Spritzgießprozess wird hierzu in einem grafisch-mathematischen Modell abgebildet. Dieses Modell ermöglicht eine Darstellung der Zusammenhänge der Prozessgrößen und eine mathematische Auswertung des simulierten Systems.

2.6.2 Einführung Dymola®

Dymola® bildet eine Simulations- und Modellierungsumgebung auf der Basis der Modelica Modelliersprache zur Abbildung von Simulationen, Systemen und Prozessen. Das dynamische Verhalten eines Systems wird mit Hilfe von mathematischen Gleichungen beschrieben. Es existieren viele ähnliche Programme auf dem Markt zur Modellierung von Systemen wie beispielsweise Matlab/ Simulink® und SimulationX®. In dieser Arbeit werden die Modellierungen und Simulationen mit der Software Dymola® vorgenommen.

2.6.3 Softwaregrundlagen

Der Name Dymola® leitet sich aus den Worten Dynamic Modeling Laboratory ab. Mit diesem Programm können mechanische, elektrische, thermische, pneumatische und hydraulische technische Systeme simuliert und abgebildet werden. Die Systemsprache der Software ist Englisch. Es ist ebenfalls möglich mehrere Arten der verschiedenen Systeme in Kombination zu simulieren. Dymola® bildet die Modellierungs- und Simulationsumgebung auf der Basis der Modelica® Modellierungssprache ab.

Technische Komponenten werden durch grafische Symbole veranschaulicht dargestellt. Es ist ebenfalls möglich, nicht in der Bibliothek vorhandene technische Komponenten nachträglich einzufügen und diese grafisch zu veranschaulichen. Die Steuerung und Regelung der Systeme kann hierbei durchaus durchgeführt werden. Den Modellen können mathematische und physikalische Eigenschaften und Zusammenhänge definiert und zugewiesen werden, um die gewünschten Parameter für den jeweiligen Systemaufbau analysieren und bewerten können.

In der Benutzeroberfläche kann in zwei verschiedenen Ebenen gearbeitet werden. In der Modellierungsebene und in der Simulationsebene. Die Modellierungsebene dient zur Erstellung des Modells eines Systems. Im Anschluss daran wird in der Simulationsebene das zuvor erstellte Modell simuliert und berechnet.

Die Dymola® Standardbibliothek enthält vordefinierte Komponenten verschiedenster technischer Systeme. Wie eingangs erwähnt, kann die Bibliothek mit Komponenten erweitert werden. In der Abbildung 2.18 ist die Benutzeroberfläche der Software zu sehen. In der unteren rechten Ecke des Fensters befinden sich die Reiter zur Umstellung der Ebenen von Modellierung auf Simulation (rotes Kästchen). Im linken Bereich befindet sich der Package Browser, also die Dymola® Bibliothek in der die verschiedenen Systemarten und Komponenten enthalten sind. Hier können einzelne Komponenten oder vollständige vorgefertigte Systeme ausgewählt werden. Die Komponenten können in vier verschiedenen Ebenen betrachtet werden. Diese Ebenen sind im oberen Bereich der Modellierungsoberfläche umzuschalten (vgl. Abb.: 2.18; schwarzes Rechteck). In der Icon-Ebene ist es möglich die Komponente umzubenennen oder umzugestalten. Die Informationsansicht stellt verschiedenste Informationen über die angewählte Komponente bereit. An einem Beispiel sollen nun im Folgenden die Grundfunktionen des Programms erklärt werden.

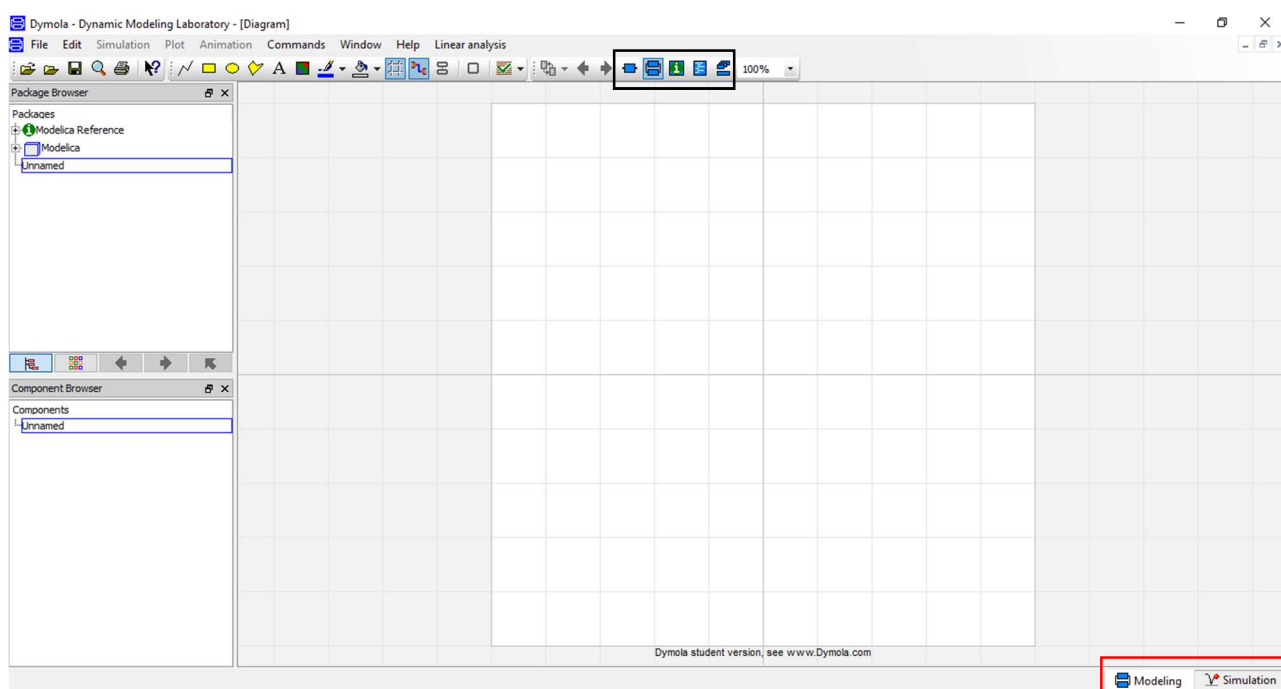


Abbildung 2.18: Benutzeroberfläche der Modellerstellung in Dymola®

Im abgebildeten Beispiel der Informationsansicht, handelt es sich um die Komponente einer Feder (vgl. Abb.: 2.19). Diese Komponente ist der Bibliothek der mechanischen Elemente, ganz speziell aus der Unterkategorie der translatorischen Elemente, entnommen. In der Systemsprache wird diese Komponente als `spring` bezeichnet. Hier wird zunächst erklärt, um was für eine Komponente es sich handelt und was diese Komponente physikalisch in der Software abbildet. Die Parameter (Parameters) und die dazugehörigen Variablen sind hier ebenfalls zu entnehmen. In diesem Fall handelt es sich um die Federkonstante, welche die Auslenkung der Feder mit der daraus resultierenden Kraft verbindet. Bei einer linearen Feder ist der Kraftanstieg als konstante zu betrachten. Die Länge der Feder ohne Auslenkung muss ebenfalls angegeben werden ebenso wie die tatsächliche initiierte Länge der Feder, die diese tatsächlich innerhalb des Systems zu Beginn des Prozesses aufweist. Der Benutzer muss den Parametern bestimmte Werte zuordnen. Aus der Informationsansicht ist weiterhin zu entnehmen welche Anschlüsse (Connectors) an der Komponente vorgesehen sind.

In dem abgebildeten Beispiel handelt es sich dabei um mechanische Anschlüsse (flange) an denen Bewegungen und Kräfte übertragen werden können. An diesen Anschlüssen können weitere Komponenten angebunden werden. In der Informationsansicht ist beschrieben wie die Komponente in Modelica®-Text definiert wird. Aus der Ebene der Textansicht ist die ausführliche Definition der Komponente zu entnehmen. Hier sind sämtliche Gleichungen, die für Bildung der mathematischen und physikalischen Zusammenhänge nötig sind, hinterlegt. Diese Gleichungen ermöglichen erst die Simulation der Komponente in einem System. Alle in der Bibliothek enthaltenden Komponenten sind auf diese Weise beschrieben und definiert. Es besteht die Möglichkeit vorhandene Komponenten zu verändern. Es ist möglich verschiedene Komponenten der gleichen technischen Bibliothekskategorie zu einem Modell zusammenzufügen.

Linear 1D translational spring

Information

A *linear 1D translational spring*. The component can be connected either between two sliding masses, or between a sliding mass and the housing (model Fixed), to describe a coupling of the sliding mass with the housing via a spring. Extends from [Translational.Interfaces.PartialCompliant](#) (Compliant connection of two translational 1D flanges).

Parameters

Type	Name	Default	Description
TranslationalSpringConstant	c		Spring constant [N/m]
Distance	s_rel0	0	Unstretched spring length [m]
Initialization			
Distance	s_rel.start	0	Relative distance (= flange_b.s - flange_a.s) [m]

Connectors

Type	Name	Description
Flange_a	flange_a	Left flange of compliant 1-dim. translational component
Flange_b	flange_b	Right flange of compliant 1-dim. translational component

Name: Spring
 Path: Modelica.Mechanics.Translational.Components.Spring
 Filename: C:/Program Files (x86)/Dymola 2014/Modelica/Library/Modelica 3.2/Mechanics/Translational.mo
 Version: 3.2, 2010-10-25, build 9 (2012-02-09 11:32:00Z)
 Uses:Complex (version="1.0"), ModelicaServices (version="1.2")

Abbildung 2.19: Info-Ansicht einer Federkomponente

In dem Folgenden beschriebenen System sind beispielhaft drei Komponenten zusammengefügt. Es handelt sich um eine Feder und um zwei unterschiedliche Massen. Ein modelliertes System kann aus beliebig vielen Komponenten bestehen. Dieses hier erstellte System soll die Nutzeroberfläche und die Simulationsebene veranschaulicht darstellen. Die Sinnhaftigkeit dieses Aufbaus ist nicht vordergründig. Eine der beiden Massen soll angestoßen werden. Daraufhin beginnt die Feder zu schwingen und die Bewegungsenergie auf die andere, zu dem Zeitpunkt noch in Ruhe befindliche Masse, zu übertragen. Die Körper werden aufgrund ihrer unterschiedlichen Massen, unterschiedlich schnell schwingen. Diese Geschwindigkeiten sowie die wirkenden Kräfte, lassen sich in Diagrammen anzeigen (vgl. Abb.: 2.20).

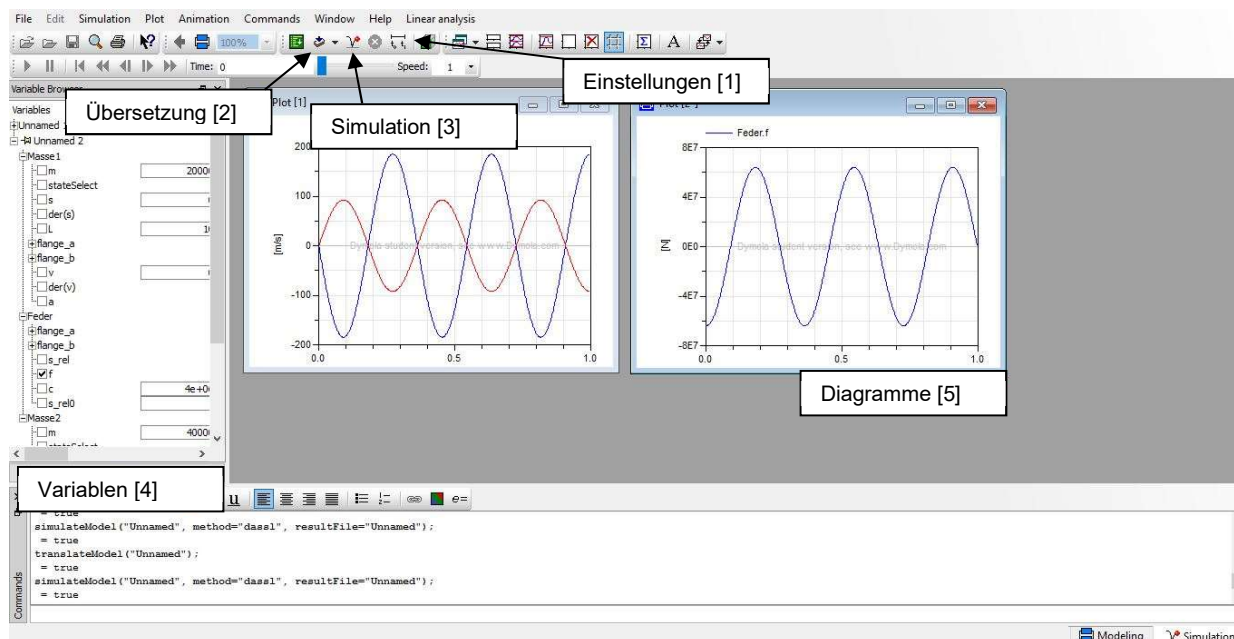


Abbildung 2.20: Nutzeroberfläche der Simulationsebene

Um das in der Modellierungsebene modellierte Modell simulieren zu können, gilt es in die Simulationsebene zu wechseln. Hier sind im ersten Schritt die Simulationsparameter [1] einzustellen. In diesen Einstellungen sind Parameter wie die Zeit die simuliert werden soll oder das Intervall festzulegen. Eine Übersetzung [2] des Modells muss erfolgen bevor mit der eigentlichen Simulation [3] begonnen werden kann. Bevor das Programm mit der Simulation beginnt, weist es auf mathematische und physikalische Fehler sowie auf unlogische Verbindung hin. Über den Variable Browser [4] lassen sich bestimmte Variablen der einzelnen Komponenten, wie etwa die Geschwindigkeit, anwählen und im Diagrammfenster [5] anzeigen. Das Beispielmmodell ist so aufgebaut, dass die beiden Massen unterschiedlich schwingen. Dieser Unterschied soll die Diagramme veranschaulichen in denen die unterschiedlichen Geschwindigkeiten der beiden ungleich schweren Körper deutlich sichtbar auftreten. (linkes Diagramm in Abbildung 4.1). In diesen Diagrammfenstern können nun verschiedenste Variablen und deren Werte in Bezug auf den zeitlichen Ablauf miteinander verglichen und analysiert werden. Die Kraft der Feder ist im rechten Diagramm veranschaulicht. Während der Simulation wird das Verhalten der angewählten Variablen in Abhängigkeit der Eigenschaften und in Abhängigkeit des gewählten Zeitraums simuliert. Dieses Verhalten wird im Diagrammfenster zur Anzeige gebracht.

3 Analyse des zeitlichen Ablaufes eines Spritzgießprozesses

Damit der zeitliche Ablauf des Spritzgießprozesses der Babyplastmaschine relativ genau in der Simulation abgebildet werden kann, ist es notwendig im Vorfeld alle relevanten Parameter, welche Einfluss auf den zeitlichen Ablauf ausüben, zu identifizieren. Weiterhin sind alle Parameter, die in der Steuerung der Maschine eingegeben werden um den Prozess starten können, zu identifizieren und den betreffenden Prozessabschnitten zu zuordnen. Zu Beginn soll jedoch im ersten Abschnitt auf die verschiedenen allgemeinen Parameter und Variablen eingegangen werden, welche in jedem Prozess des Spritzgießens eine entscheidende Rolle einnehmen und diesen somit maßgebliche in seinem zeitlichen Ablauf beeinflussen.

3.1 Kenngrößen, Parameter und Variablen

3.1.1 Allgemeine Prozessgrößen

Prozessparameter/ Prozessvariablen im Allgemeinen

Als Prozessvariablen/ Prozessparameter können zum Teil die im Vorfeld der Produktion festgelegten Einflussgrößen wie beispielsweise die Wanddicke des Formteils. Die Gesamtgröße des Bauteils und die Werkzeugauslegung bezeichnet werden. Diese genannten Größen sind häufig entscheidend für die Wirtschaftlichkeit und Qualität, können aber nicht mehr verändert werden sobald das Werkzeug einmal auf der Maschine installiert ist. Zur Untersuchung des zeitlichen Ablaufs wird in dieser Arbeit der Fokus auf die veränderlichen Größen des Verfahrens gelegt. Ebenfalls werden alle anderen Parameter und Variablen analysiert und identifiziert, die Einfluss auf den Faktor Zeit nehmen. Im Sinn einer mathematischen Formulierung des Prozesses in einem Modell sind die Eingangsgrößen die unabhängigen Variablen und die Ausgangsgrößen die Abhängigen Variablen [STI04].

Eingangs- Ausgangs- und Zielgrößen

Einige bestimmte **Eingangsgrößen** werden auch als Störgrößen bezeichnet. Diese werden oft nicht erfasst oder gemessen und sind nur aufgrund ihrer Auswirkung auf die Ausgangsgrößen des Prozesses zu erkennen. Diese sind zum Beispiel die Umgebungstemperatur, Zugluft, Toleranzen und Verschleißerscheinung und Alterung der Maschinenkomponenten und bilden in der Einteilung zusammen mit den Einstellgrößen die Eingangsgrößen [STI04]. Diese Größen werden in der Simulation nicht berücksichtigt sollen dennoch hier Erwähnung finden.

Bei den **Ausgangsgrößen** handelt es sich um Variablen welche vom Gesamtprozess abhängig sind. Sie bringen das Verhalten des Gesamtprozesses zum Ausdruck und ergeben sich als Folge der Prozesseigenheiten und sämtlicher Einflussgrößen. Somit geben diese Größen über die Qualität des entstehenden Produktes Aufschluss [STI04].

Zielgrößen bewerten den Ablauf der Produktion aus wirtschaftlicher Sicht. Somit bilden diese Größen die Basis jeder Optimierung. Sie lassen sich weiterhin in zwei Gruppen unterteilen, wovon die eine das Ergebnis der Produktion und die andere den Aufwand enthält. Der von der Prozessführung zu beeinflussende Aufwand setzt sich im wesentlichen Teil aus Zeit- und Energieaufwand sowie aus Materialverlusten zusammen. Materialverluste können durch Ausschussteile entstehen [STI04]. Die Zykluszeit spielt eine übergeordnete Rolle in Hinsicht auf die Bewertung des Prozessablaufes und dessen Wirtschaftlichkeit, dessen Energieverbrauch und somit schließlich auf die Effizienz eines solchen Prozesses.

Kühlzeit

Die Kühlzeit nimmt, sowohl in der Simulation als auch in dem real stattfindenden Prozess, einen erhebliche großen Teil der gesamten Zykluszeit ein und soll daher im folgenden Abschnitt genauer betrachtet und analysiert werden. Etwa zwei Drittel der gesamten Zykluszeit besteht aus der Kühlzeit eines spritzgegossenen Formteils. Im vorherigen Abschnitt ist bereits erwähnt, dass die Kühlzeit unmittelbar mit dem Eintritt der Schmelze in die Kavität des Werkzeuges beginnt. Die gesamte Kühlzeit beinhaltet neben der Einspritzzeit auch die Nachdruckphase. In der Regel jedoch erstreckt sich die Kühlzeit sogar über die Nachdruckphase hinaus (die so genannte Restkühlzeit), da das Formteil bis zum Ende der Nachdruckphase im Normalfall noch nicht ausreichend angekühlt ist und somit die erforderliche Formstabilität zur Entformung nicht gegeben ist. Sie endet mit dem Öffnungshub des Werkzeuges. Die Kühlzeit kann demnach im Allgemeinen in folgende Abschnitte unterteilt werden [JOH01].

- Einspritzzeit
- Nachdruckzeit
- Restkühlzeit

Beim Spritzgießen beträgt die **Einspritzzeit** im Allgemeinen meist nur wenige Zehntelsekunden bis höchstens etwas eine Sekunde. Durch die Bestimmung der Siegelzeit lässt sich die benötigte **Nachdruckzeit** im Vorfeld abschätzen. Als Siegelzeit wird der Zeitpunkt betrachtet, bis zu dem das Material mittels Nachdruck in die Werkzeugkavität geschoben werden kann, bis der Anschnitt/ der Anguss des Formteils erstarrt ist. Es ist nach dem Erreichen der Siegelzeit nicht mehr möglich und nicht sinnvoll den Nachdruck in voller Wirkung aufrecht zu erhalten. Die Nachdruckzeit dient überwiegend dazu, Einfallstellen und Lunker infolge der Schwindung (Volumenkontraktion) während der Abkühlphase zu vermeiden. Die Dosierphase ist nicht zwingend vor dem Ende der Kühlphase beendet und kann somit über die Restkühlzeit hinaus andauern. Dies ist speziell bei dünnwandigen Formteilen der Fall. Allgemein kann festgehalten werden, dass die Ausmaße des Bauteils einen erheblichen Einfluss auf die Zykluszeit nehmen. Ein thermoplastisches Bauteil kann erst auf einem bestimmten Temperaturniveau entformt werden. Das Formteil verweilt also eine gewisse Zeit in der Werkzeugkavität zur Abkühlung. Diese erforderliche Verweilzeit des eingespritzten Formteils in dem Werkzeug wird **Restkühlzeit** genannt. Die Restkühlzeit ergibt sich also aus der gesamten Kühlzeit abzüglich der Einspritz- und Nachdruckzeiten und beginnt direkt nach dem Nachdrücken.

In Normalfall ist jedoch die gesamte Kühlzeit sowie die Nachdruckzeit an der Maschine einzustellen woraus sich dann die Restkühlzeit ergibt. Ist es also das Ziel die Wirtschaftlichkeit des Prozesses zu analysieren und zu erhöhen, muss geklärt werden ob der Spritzgießzyklus Zeitreserven bietet. Ein möglicher Ansatzpunkt zur Ermittlung von Zeitreserven innerhalb der Fertigung bietet in erste Linie die Kühlzeit da diese den größten Teil des Gesamtzyklus einnimmt. Das Formteil muss formstabil entformt werden und dies ist somit das wichtigste Kriterium. Wird die Kühlzeit verlängert, verringern sich im Allgemeinen die Schwindungswerte. Die Minimierung der Zykluszeit ist nicht zwangsläufig die oberste Priorität der Spritzgießfertigung. Es sollte vielmehr ein wirtschaftlicher Kompromiss zwischen minimal möglicher Kühlzeit und den optimalen Eigenschaften des Bauteils eingegangen werden [JOH01].

Bestimmte Maschineneinstellparameter beeinflussen die Kühlzeit maßgeblich. Dazu gehören unter anderem die Temperatur der Formmasse beim Einspritzen, die Werkzeugtemperatur, die Einspritzzeit und der Nachdruck. Ebenso nimmt die Geometrie des Formteils Einfluss auf die Kühlzeit. Durch Verwendung von Material mit bestimmten Füllstoffen ist es möglich eine Reduzierung der Kühlzeit zu erreichen [JOH01].

Pausenzeit

Die Werkzeug- und Auswerferbewegungen müssen ablaufen können, ohne dass das Formteil von dem schließenden Werkzeughälften eine Beschädigung erfährt. Dieses kann mit einer Pausenzeit gewährleistet werden. Die Werkzeugschließsicherungszeit muss knapp über dem Wert der tatsächlichen für das Schließen der Form benötigten Zeit liegen. Die Entformung des Spritzgießteils muss sichergestellt sein. Dementsprechend ist die Pausenzeit einzustellen [JOH01].

Zykluszeit

Bei den meisten Spritzgießmaschinen lässt sich eine bestimmte Zykluszeit einstellen. Die Prozessschritte sollten ordnungsgemäß innerhalb dieses Zeitfensters ablaufen. Sollte dies nicht der Fall sein und die voreingestellte Zykluszeit überschritten, so zeigt die Maschine im Regelfall eine Störung an [JOH01].

Zunächst wird also die gesamte Zykluszeit von der Geometrie und der Größe des zu fertigenden Bauteils bestimmt. Eine weitere Rolle spielt das verwendete Material, welches im Rahmen dieses Forschungsprojektes ausschließlich Thermoplast sein wird. Die Maschineneinstellparameter besitzen ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die Kühlzeit und somit auf die erreichbare Zykluszeit. Diese Parameter können zum Beispiel die Zylinder- und Werkzeugtemperatur sein. Die Abkühlzeit bis zur Entformbarkeit ist meist bestimmend für die gesamte Zykluszeit [JOH01].

Sobald der Prozess stabil abläuft und alle geforderten Qualitätsmerkmale des Formteils gegeben sind, kann mit der Optimierung des Zyklus gestartet werden. Durch die Veränderung bestimmter Parameter lässt sich die Ablaufzeit verändern [JOH01]. Im folgenden Abschnitt sollen sämtliche Parameter, welchen direkten oder indirekten Einfluss auf den zeitlichen Ablauf nehmen, identifiziert erläutert werden.

3.1.2 Maschinenkenngößen

Bestimmte Kenngrößen der Babyplastspritzgießmaschine beeinflussen den zeitlichen Ablauf des gesamten Spritzgießprozesses, können jedoch nicht geändert werden. Es handelt sich dabei um typenspezifische Maschinenkenngößen. Je nach Maschinentyp unterscheiden sich diese Kenngrößen voneinander. Nach Rücksprache mit der Firma babyplast-Christmann® sind die im folgenden genannten Kenngrößen, in Form von mehreren Datenblättern zur Bearbeitung dieser Arbeit übermittelt worden. Aus den überlieferten Datenblättern zur verwendeten Babyplast-Spritzgießmaschine, sind hier ausschließlich Kenngrößen aufgeführt, die einen Einfluss auf den zeitlichen Ablauf ausüben.

Diese relevanten Kenngrößen sind

- die maximale Schließ- und Öffnungsgeschwindigkeit v_s :	315mm/s
- die maximale Aggregatgeschwindigkeit v_A :	140mm/s
- die maximale Geschwindigkeit Spritzeinheit v_E :	50mm/s
- die Auswerfergeschwindigkeit 1 (out) v_o :	140mm/s
- die Auswerfergeschwindigkeit 2 (back) v_b :	310mm/s
- die maximale Anzahl der Auswerferhübe n_a :	10
- der Kolbendurchmesser der Spritzeinheit in mm:	10 – 18
- Der maximale Dosierhub:	60mm

Die Schließ- und Öffnungsgeschwindigkeiten beschreibt die Geschwindigkeit mit der das Werkzeug geschlossen wird. Die Aggregatgeschwindigkeit beschreibt die Bewegungsgeschwindigkeit des Spritzaggregates. Als maximale Spritzgeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit bezeichnet mit der maximal eingespritzt werden kann. Es gibt für die Auswerfergeschwindigkeit zwei feste Maschinenkennwerte. Jeweils einen Wert für die Bewegung des Auswerfers nach außen (zum Auswerfen) und einen für die Bewegung des Auswerfers nach innen zurück in die Ausgangsposition. Die Geschwindigkeit der Auswerfer zurück in die Ausgangsposition hat ein höheres Maximum als die Ausfahrsgeschwindigkeit. Zu den Auswerferhüben sei gesagt, dass immer mindestens ein Hub eingestellt sein muss, um das Formteil optimal auswerfen zu können. Die Einstellung von zehn Auswerferhüben ist unüblich. Der Kolbendurchmesser der Spritzeinheit kann auf verschiedene Größen umgebaut werden. Die Größenverstellung ist in Schritten von zwei Millimetern möglich. Da sich die Einspritzgeschwindigkeit nicht verändert, benötigt die Spritzeinheit bei unterschiedlichen Kolbendurchmessern und gleichbleibenden Bauteilvolumen unterschiedlich viel Zeit. Der gleiche Effekt tritt beim Dosieren auf. Allerdings spielen beim Einspritzen andere Faktoren welche die Zeit des Einspritzens beeinflussen. Aus diesem Grund, wird für das Einspritzen in der Simulation eine Zeit angenommen. Darauf soll später noch Bezug genommen werden. Das Plastifizieren hat in der Regel keinen Einfluss auf die gesamte Zykluszeit, da hierbei ausschließlich das Kunststoffmaterial aufgeschmolzen wird. Sobald die Maschine vorgeheizt und die Betriebstemperatur erreicht hat, ist während des gesamten Betriebes ausreichend plastifiziertes Kunststoffmaterial in der Maschine vorhanden.

3.1.3 Einstellparameter

Im vorangegangenen Abschnitt sind die Kenngrößen der Maschine identifiziert worden. Diese sind unbedingt zur Berechnung der Zeiten der einzelnen Prozessschritte von Nöten. Jedoch sind diese Werte fest vorgegeben und sind demnach nicht direkt in der Steuerung der Simulation zu ändern. Im folgenden Abschnitt sind die Prozessparameter identifiziert, welche in die Benutzeroberfläche der Steuerung, sowohl an der Maschine als auch in der Simulation eingegeben werden. Diese Parameter beeinflussen den zeitlichen Ablauf des Spritzgießprozesses direkt. Die einzustellenden Parameter sind hier in die Bereiche der einzelnen Baugruppen unterteilt. In einem späteren Kapitelabschnitt werden die Parametern dann den in Kapitel 2 aufgezählten Prozessschritten zugeordnet.

Schließeinheit

Der Öffnungshub der Maschine kann verstellt werden. Aus der Länge des Öffnungshubes und der eingestellten Schließgeschwindigkeit ergibt sich eine bestimmte Zeit, die vergeht bis das Werkzeug vollständig geschlossen ist. Die Länge des Hubes gibt an wie weit sich die bewegliche Seite der Werkzeughälfte von der festen Werkzeughälfte beim Öffnen wegbewegt. Bei der Babyplastmaschine wird dieser Wert in Millimetern [mm] angegeben und hängt direkt mit der Einbauhöhe des verwendeten Werkzeuges zusammen. Die Einbauhöhe beschreibt die Breite des Werkzeuges von der Bedienerseite der Maschine aus betrachtet. Die Einbauhöhe zusammengefasst mit der Öffnungsweite zum sicheren Entformen des Spritzgießteils bestimmen den für die Maschine notwendigen Plattenabstand [JAR13]. Je länger dieser Weg, desto größer der Zeitraum der beim Schließen, unter der Betrachtung, dass die Werte für die Geschwindigkeiten nicht verändert werden, benötigt wird.

Während des gesamten Schließweges bewegt sich das Werkzeug mit zwei unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Zur Sicherung des Werkzeuges, bewegt sich dieses kurz vor dem vollständigen Schließen, deutlich langsamer als es auf dem restlichen Weg bis zur vollständigen Schließung der Werkzeughälften der Fall ist. Diesen Punkt der Geschwindigkeitsänderung wird als Werkzeugsicherung oder auch als Umschaltpunkt bezeichnet und ist ebenfalls einstellbar. Wird ab diesem Punkt der voreingestellte Werkzeugsicherungsdruck überschritten, geht die Maschine auf Störung über und beendet sofort die Werkzeugbewegung. Diese Sicherung dient zum Schutz des Bedieners und auch zum Schutz des Werkzeuges zum Beispiel bei nicht korrekt entformten, eingeklemmten Formteilen. Der Umschaltpunkt wird in Millimetern [mm] eingestellt und beschreibt nach welchem zurückgelegten Werkzeughub das Schließaggregat von der Schließgeschwindigkeit 1 auf die Schließgeschwindigkeit 2 umschaltet.

Somit sind heutzutage üblicherweise zwei verschiedene Geschwindigkeiten an den Maschinen einzustellen. Oft sind die Geschwindigkeiten innerhalb der Maschinensteuerung in Prozent angegeben.

Diese Angaben beziehen sich dann jedoch auf die maximal mögliche Geschwindigkeit, welche als hundert Prozent zu betrachten ist. Geschwindigkeit v ist der Quotient aus dem Weg s und der Zeit t .

$$v = \frac{s}{t} \quad (3.1)$$

In Bezug auf die technischen Daten der Maschine hat die Geschwindigkeit bei Einstellung von 50 Prozent also einen Betrag von 157,5 mm/sec. Aus diesem Zusammenhang lässt sich die gesamte Zeit des Schließvorgangs ermitteln.

Der Geschwindigkeitsverlauf der Schließeinheit ist im folgenden Diagramm dargestellt (vgl. Abb.: 3.1). Hierbei ist die Veränderung der Geschwindigkeit kurz vor dem vollständigen Schließen, verdeutlicht.

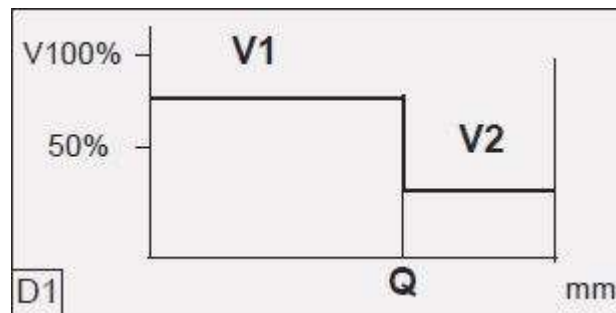


Abbildung 3.1: Geschwindigkeitsverlauf der Schließeinheit beim Schließvorgang [BACR]

Nach dem Ablauf der Kühlzeit wird das Werkzeug wieder geöffnet. Hierfür wird eine, während des gesamten Öffnungsvorgangs gleichbleibende, Geschwindigkeit der Schließeinheit eingestellt. Diese ist wieder in Prozent angegeben und wird im Normalfall höher eingestellt als die Geschwindigkeit des Schließvorgangs des Werkzeuges. Die Geschwindigkeit des Öffnungsvorganges wirkt sich auf die Gesamtzykluszeit aus. Je schneller das Werkzeug öffnet, desto kürzer die Gesamtzeit und desto frühzeitiger kann mit dem nächsten Zyklus begonnen werden.

Die Entformung des Bauteils und somit auch die Bewegung der Auswerfer, finden bei der Babyplastmaschine direkt nach dem Öffnungsvorgang statt. Bei diesem Vorgang sind mehrere Parameter einzustellen, welche direkten Einfluss auf die Gesamtzykluszeit nehmen. Die Geschwindigkeit mit der sich der Auswerfer bewegt, lässt sich wiederum unter Angabe in Prozent an der Maschine und in der Simulation einstellen. Während der Bewegung des Auswerfers zurück in die Ausgangsposition, kann dieser eine höhere Geschwindigkeit als beim Herausfahren einnehmen. Diese kann jedoch nicht getrennt von der Herausfahrgeschwindigkeit eingestellt werden. Wird ein Prozentwert für die Geschwindigkeit der Auswerferstifte voreingestellt, so bezieht sich diese Prozentangabe je nach Bewegungsrichtung auf einen anderen maximal möglichen Höchstwert. Es ist oft von Nöten, dass der Auswerfer mehrere Hübe ausführen muss um das fertige Formteil korrekt zu entformen.

Je mehr Auswerferhübe zu vollziehen sind, desto mehr Zeit benötigt dieser Vorgang und desto mehr Zeit nimmt der gesamte Zyklus in Anspruch. Es sind maximal zehn Auswerferhübe an der Babyplastmaschine einzustellen. Bei der Fertigung eines sehr komplexen Bauteils, welches zudem mehrere Hinterschneidungen aufweist, ist eine hohe Anzahl von Auswerferhüben unbedingt notwendig zur korrekten Entformung des Formteils ohne Beschädigungen. Indirekt beeinflusst die Form des Bauteils also auch in diesem Verfahrensschritt die Gesamtzykluszeit.

Weiterhin sind die maximalen Ausfahr- und Zurückfahrwege des Auswerfermechanismus zu beeinflussen. Diese können nicht direkt eingestellt werden. Hierbei gilt es an der Maschine und in der Simulation die exakte Zeit zu definieren in welcher sich der Auswerfer entweder vor oder zurückbewegt. Aus der voreingestellten Geschwindigkeit in Prozent und der vordefinierten Bewegungszeit des Auswerfers ist der Weg der Auswerferstifte, den diese bei der Vorwärts- und Rückwärtsbewegung vollziehen, vorgegeben. Diese einstellbare Zeit für die Bewegungen des Auswerfers beeinflussen direkt die gesamte Zykluszeit. Der maximale Auswerferweg beträgt 45 Millimeter. Darüber hinaus sind noch weitere Parameter für den Auswerfermechanismus zu definieren. Unter Umständen kann es notwendig sein, eine zeitliche Pause einzustellen. Diese beeinflusst den Beginn der Auswerferbewegung. Eine solche Pause kann auch für das Zyklusende direkt nach dem Auswerfen vordefiniert werden, Diese Pausen sind als Zeit in Sekunden einzustellen und wirken sich somit auf den zeitlichen Gesamtablauf des Zyklus aus. Üblicherweise sind diese Zeiten mit einem Wert von null Sekunden eingestellt. Optional ist die Zufuhr von Blasluft zu Unterstützung der Auswerfer einzustellen. Es lässt sich hierbei die Dauer der Blasluftzufuhr direkt vordefinieren was sich direkt auf den zeitlichen Ablauf niederschlägt.

Spritzeinheit

Im Folgenden gilt es die Parameter des Einspritzaggregates zu ermitteln, welche sich auf die Zeit des Prozesses auswirken. Hier kann die Aggregathubzeit angepasst und verändert werden. Durch Einstellen der Aggregathubzeit beeinflusst der Bediener den Weg, den die Düse von dem Werkzeug abgefahren wird. Ebenso kann die Aggregathubgeschwindigkeit in Prozent beeinflusst werden. Die Prozentangabe bezieht sich wiederum auf die maximalen Maschinenkennwerte. Es kann also nicht direkt der Weg des Aggregats beeinflusst werden, sondern ausschließlich der Zeitraum in dem sich das Aggregat mit einer Bestimmten Geschwindigkeit bewegt woraus sich dann der zurückgelegte Weg ergibt. Weiterhin kann in an der Maschine und in der Simulation eine Aggregatverzögerung eingestellt werden. Diese hat einen verzögerten Beginn der Aggregatrückbewegung zur Folge jedoch nicht auf die Bewegung des Aggregates Richtung Werkzeug. Die Einstellungen nehmen somit direkten Einfluss auf die Zykluszeit.

Im nächsten Prozessschritt wird die Kunststoffmasse eingespritzt. Dieser Vorgang nimmt nur einen sehr kurzen Zeitabschnitt ein, dieser ist jedoch nur sehr aufwendig im Voraus zu berechnen. Ist das benötigte Volumen des Formteils im Vorfeld bekannt, kann somit die Zeit des Einspritzens relativ genau abgeschätzt und in der Simulation eingestellt werden. Die Einspritzzeit wird meist nur als Überwachungszeit eingestellt und entspricht nicht der tatsächlich benötigten Einspritzzeit. Hiermit soll der Prozess beobachtet und überwacht werden. Nach Überschreitung dieser voreingestellten Zeit, ohne Beendigung des Einspritzens, unterbricht die Maschine den Prozess [JAR13]. Mehrere Faktoren beeinflussen die Einspritzzeit. Dazu gehört das Volumen des Bauteils, die Vorlaufgeschwindigkeit sowie der Durchmesser des Kolbens und darüber hinaus die Art und Anzahl der Angüsse, die Form des Bauteils, die Temperatur der beim Einspritzen beteiligten Bauteile und der ausgewählte Kunststoff und dessen Viskosität welche vom Material und ebenfalls von der Temperatur abhängig ist.

Für die Nachdruckphase ist an der Maschine ein bestimmter Druck, der auf das Formteil wirken soll, exakt einzustellen. Eine genaue Zeit für das Nachdrücken in der der voreingestellte Druck zur Wirkung kommen soll, ist ebenfalls an der Maschine und auch in der Simulation einzustellen. Auf die Einstellung des Druckes während der Nachdruckphase, wurde in der Simulation verzichtet, da dieser Nachdruck keine Auswirkungen auf die Gesamtzeit des Prozesses nimmt. Der Umschaltzeitpunkt ist ein voreingestellter Wegpunkt der angibt, nach wieviel Millimeter Verfahrweg das Aggregat vom Einspritzen zum Nachdrücken übergeht. Die Zeit die während des Umschaltvorganges vergeht bis die voreingestellten Werte für die Nachdruckphase von der Maschine eingestellt sind, ist nicht einzustellen. Dieser Zeitabschnitt ist in der eingestellten Zeit für die Dauer des Nachdruckes mit inbegriffen und muss somit in Hinsicht auf die Gesamtzykluszeit nicht getrennt betrachtet werden.

Diese Kühlzeit ist exakt vor dem Beginn des Prozesses einzustellen und sollte, wie bereits erwähnt, länger andauern als die Zeit des Dosierens. Laut den Vorgaben der Babyplastmaschine sollte im Normalfall die Kühlzeit mindestens eine Sekunde länger eingestellt sein, als die Zeit die für das Dosieren benötigt wird. Die Kühlzeit ist in der Einheit Sekunde einzustellen und nimmt somit direkten Einfluss auf die gesamte Zykluszeit des Spritzgießprozesses. Die Restkühlzeit ist an der Babyplastmaschine nicht direkt einstellbar, sondern ergibt sich aus dem eingestellten Wert für die gesamte Kühlzeit, abzüglich des Zeitwertes des Nachdrückens.

Das Aggregat fährt nach der Beendigung der eingestellten Nachdruckzeit wieder zurück in die Ausgangstellung. Der zurückgelegte Weg des Aggregates ergibt sich aus der an der Maschine eingestellten Geschwindigkeit und der Aggregatbewegungszeit. Nach Veränderung des Wertes für die Aggregatbewegungszeit, ergibt sich auch eine Veränderung der gesamten Zykluszeit. Die Geschwindigkeit des Aggregates ist in der Simulation nicht einstellbar, da diese keinen Einfluss auf die Gesamtzeit hat.

Das Dosieren findet parallel zur Restkühlzeit statt. An der Babyplastmaschine ist hierbei der Dosierweg einzustellen. Aus dem zurückgelegten Weg des Hydraulikkolbens und dem Zylinderdurchmesser lässt sich die Dosiermenge im Vorfeld genau bestimmen. In der Simulation können das Bauteilvolumen und der Kolbendurchmesser eingegeben werden. Aus diesen Werten errechnet die Simulation relativ genau den benötigten Dosierweg. Aus der maximalen Geschwindigkeit in Zusammenhang mit dem Dosierweg wird dann die Dosierzeit berechnet. Weiterhin ist in der Simulation eine Dosierverzögerung einzustellen. Dieser Wert ist ebenfalls in der Einheit Sekunde einzugeben. Da das Dosieren jedoch zwingendermaßen innerhalb der Kühlzeit beendet sein sollte, nimmt die Dosierzeit keinen direkten Einfluss auf die gesamte Zykluszeit. Unter Umständen kann jedoch trotzdem der Fall eintreten, dass das Dosieren die Gesamtzeit beeinflusst. Ist die Kühlzeit zu kurz und der Dosierweg zu lang und somit die Zeit des Dosierens zu lang gewählt, so beginnt der Werkzeugöffnungsvorgang erst nach der Beendigung der Dosierung, obwohl die Restkühlzeit bereits vor dem Dosieren abgelaufen ist. In der Regel tritt dieser Fall allerdings nur selten auf. Zu diesem speziellen Fall wird in einem späteren Kapitel Bezug genommen. Die Geschwindigkeit des Dosierens kann nicht direkt beeinflusst werden, allerdings ist die Zeit umso kürzer, je kürzer der Dosierweg ist.

Zur Veranschaulichung aller Zahlenwerte der zeitrelevanten Prozessparameter die in die Simulation einzugeben sind, ist folgende Tabelle aufgelistet.

Tabelle 3.1: Einstellparameter in der Simulation

Einstellparameter	Einheit
Schließgeschwindigkeit 1 (v_{s1})	% (von v_s)
Schließgeschwindigkeit 2 (v_{s2})	% (von v_s)
Werkzeughub (s_h)	mm
Umschaltpunkt (s_u)	mm
Verzögerung Aggregatfahrzeit (t_{av})	s
Aggregatfahrzeit (t_a)	s
Einspritzzeit (t_e)	s
Nachdruckzeit (t_n)	s
Kühlzeit (t_k)	s
Öffnungsgeschwindigkeit (v_{oe})	%(von v_s)
Kolbendurchmesser (d_{ko})	mm
Bauteilvolumen (V_{Ba})	mm ³
Auswerferbewegung (raus) (t_o)	s
Auswerferbewegung (rein) (t_b)	s
Anzahl der Auswerferhübe (n_H)	n
Pause vor Zyklusende (t_{pz})	s
Pause vor Auswerfen (t_{pa})	s
Blasluft (t_{bl})	s
Dosierverzögerung (t_{Dv})	s

3.2 Zusammenhang der Prozessschritte und der Einstellparameter

Die identifizierten Parameter, welche den zeitlichen Ablauf beeinflussen, sind nun mit den in Kapitel 2.4 erwähnten neun Prozessschritten in Verbindung zu bringen. Die Parameter beziehen sich immer auf einen bestimmten Abschnitt im Spritzgießprozess. Jeder Prozessschritt steht in direktem Zusammenhang mit dem vorherig abgelaufenen Prozessschritt. Die Arbeitsgänge müssen von der Maschine gesteuert und in der vorgegebenen Zeit und Reihenfolge ausgeführt werden [JOH01; JOH04]. In der Simulation sind die Arbeitsgänge von dem Programm gesteuert. Die Prozessschritte und deren Zusammenhänge mit den Einstellparametern werden im unteren Abschnitt in der Reihenfolge beschrieben, in der diese im simulierten Zyklus aktiv sind. Die Maschinenkennwerte, die auch in die Simulation mit eingehen, sollen hier nicht beachtet werden. Diese finden Erwähnung bei der Erläuterung der Berechnung innerhalb der einzelnen Prozessschritte. In der Abbildung 3.2 ist der zeitliche Verfahrensablauf nochmals etwas detaillierter, schematisch in einem Kreisdiagramm veranschaulicht.

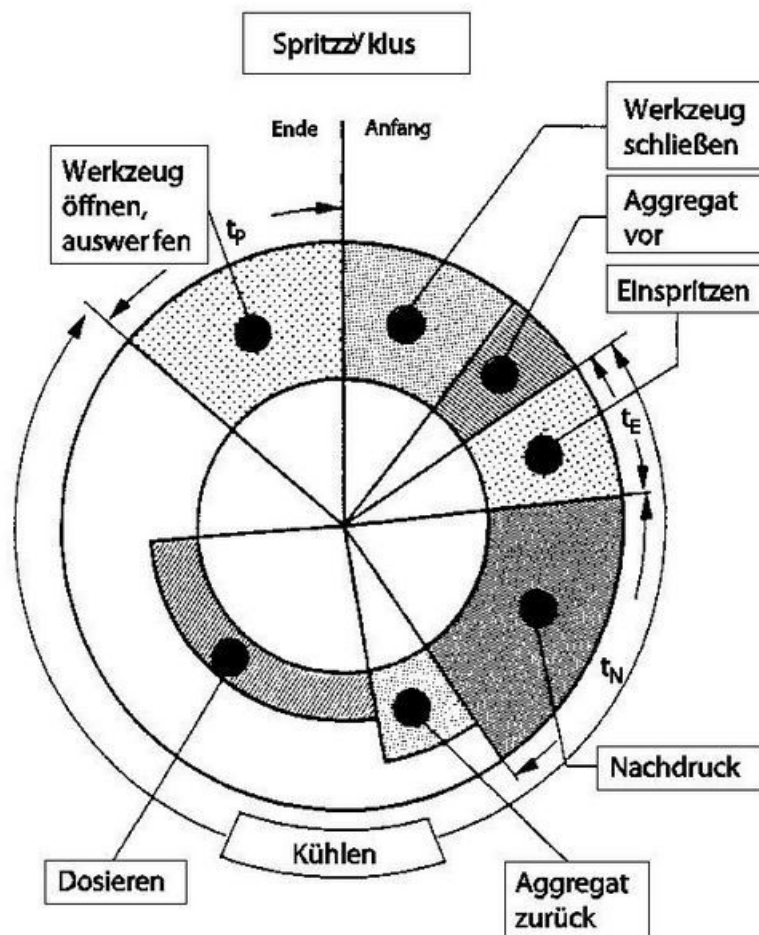


Abbildung 3.2: Kreisdiagramm Spritzgießzyklus [MIC15]

Dem Diagramm (vgl.: Abb.: 3.2) ist wiederum zu entnehmen welche Verfahrensschritte parallel und welche Schritte nacheinander und isoliert voneinander ablaufen. Die abgebildeten Blöcke, welche den Zeitraum des jeweiligen Abschnittes darstellen, entsprechen in etwa den zeitlichen Proportionen zur Gesamtzeit während eines realen Spritzgießzyklus.

Die Bewegungen der Babyplast-Spritzgießmaschine erfolgen mit der Zuhilfenahme von fünf verschiedenen Hydraulikzylindern. Das betrifft die Werkzeugbewegungen sowie die Bewegungen der Plastifiziereinheit inklusive des Dosiervorgangs und die Auswerferbewegungen. Die Babyplastmaschine ermöglicht nicht die Bewegung von zwei Hydraulikzylindern gleichzeitig.

Wie bereits in Kapitel 2.4 beschrieben, beginnt der Prozess mit dem Schließvorgang des Werkzeuges. In der Simulation ist dies ebenfalls der erste Prozessschritt mit dem der zeitliche Ablauf beginnt. Zur Berechnung des ersten Prozessschrittes sind folgende Einstellparameter aus der Tabelle 3.1 in die Simulation einbezogen.

Prozessschritt 1, Werkzeugschließvorgang:

- Schließgeschwindigkeit 1 in % (v_{s1})
- Schließgeschwindigkeit 2 in % (v_{s2})
- Werkzeughub in mm (s_h)
- Umschaltpunkt in mm (s_u)

Es sei nochmal betont, dass die Angabe des Umschaltpunktes den Weg beschreibt, den das Schließaggregat mit der ersten und damit schnelleren Geschwindigkeit zurücklegt, bevor es auf die zweite Geschwindigkeit umschaltet.

Der zweite Prozessschritt in dem Diagramm und auch in der Simulation ist die Aggregatfahrbewegung (vgl. Abb.: 3.2). In die Berechnung des zeitlichen Bedarfs der Aggregatbewegung fließt nur einer der in der Tabelle 3.1 aufgezählten Einstellparameter mit ein. Es handelt sich hierbei um die Zeit der Auswerferbewegung.

Prozessschritt 2, Aggregatbewegung:

- Aggregatfahrzeit in Sekunden (t_a)

Sollte eine Aggregatfahrbewegungszeit von 0.0 Sekunden eingestellt werden, wird das Betreiben der Maschine mit anliegender Düse simuliert. Sollte eine Aggregatbewegungszeit eingestellt sein, kann diese erst nach dem vollständigen Schließen des Werkzeuges stattfinden.

Nach dem die Aggregatbewegung abgeschlossen ist, wird das Kunststoffmaterial eingespritzt. Wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben, wird an der Maschine eine Überwachungszeit bezüglich des Einspritzens eingestellt. Es ist im Vorfeld eines Prozesses nicht exakt möglich die Einspritzzeit zu ermitteln da diese von vielen Faktoren abhängt. Dies Faktoren sind zum Beispiel die Eigenschaften des verwendeten Kunststoffs, die Form und Komplexität des Bauteils, die Werkzeugbeschaffenheit und die Art der Angüsse. Im realen Betrieb ergibt sich also die Einspritzzeit aus den gesamten Gegebenheiten des Prozesses. Hier in der Simulation ist ein konstanter Zeitwert einzutragen, der einem realen Zeitwert des Einspritzens entspricht. Dieser lässt sich im Vorfeld über das Bauteilvolumen, der Einspritzgeschwindigkeit und dem Kolbendurchmesser abschätzen. Die Einspritzzeit nimmt nur einen sehr geringen Teil der Zykluszeit ein. Daher können geringe Abweichungen in der Simulation bezüglich der Einspritzzeit als nicht bedeutend betrachtet werden. Somit ist in der Simulation nur ein Parameter in die Steuerung einzupflegen.

Prozessschritt 3, Einspritzen:

- Einspritzzeit in Sekunden (t_e)

Nach dem Einspritzen beginnt die Nachdruckphase. In der Simulation und an der Maschine im realen Betrieb, ist hier eine exakt definierte Zeit einzutragen. Diese Zeit gibt an, wie lange ein bestimmter Druck gehalten werden soll. Da der Druck keinerlei Auswirkungen auf den zeitlichen Ablauf hat, ist dieser in der Simulation des zeitlichen Ablaufs nicht berücksichtigt worden. Es ist demnach ein Parameter bezüglich des vierten Abschnittes in der Simulation einzustellen.

Prozessschritt 4, Nachdruckphase:

- Nachdruckzeit in Sekunden (t_n)

Sobald das Nachdrücken beendet ist, sollte das Aggregat zurück in die Ausgangsposition fahren. Wird mit anliegender Düse gefahren, finden keine Aggregatbewegungen statt. Hier greift die Simulation auf die bereits in Prozessschritt 2 eingegebene Aggregatfahrzeit zurück. Es gibt in dieser Phase des Prozesses allerdings die Möglichkeit den Beginn der Aggregatfahrbewegung an der Maschine zu verzögern. Diese Verzögerung lässt sich auch in der Simulation einprogrammieren.

Prozessschritt 5, Aggregatfahrbewegung:

- Verzögerung Aggregatfahrzeit in Sekunden (t_{av})
- Aggregatfahrzeit in Sekunden (gleicher Wert wie in Prozessschritt 2) (t_a)

Zeitgleich mit dem Beginn der Aggregatfahrbewegung, beginnt direkt nach der Nachdruckphase die Restkühlzeit. Diese ist nicht direkt einstellbar, sondern ergibt sich aus der Einspritzzeit und der Nachdruckzeit und der vorher eingestellten Gesamtkühlzeit. In der Regel ist an heutigen Maschinen die Gesamtkühlzeit einzustellen und dies ist auch in der Simulation der Fall. Somit sind folgende Parameter aus der Tabelle in 3.1.3 bezüglich des sechsten Prozessschrittes in der Simulation des zeitlichen Ablaufs zu berücksichtigen.

Prozessschritt 6, Restkühlen:

- Gesamtkühlzeit in Sekunden (t_k)
- Einspritzzeit in Sekunden (t_e)
- Nachdruckzeit in Sekunden (t_n)

Ist die Aggregatfahrbewegung beendet, beginnt das Dosieren. Die exakte Dosierzeit ergibt sich aus dem Durchmesser des Kolbens, der Geschwindigkeit und dem Bauteilvolumen. Hiermit kann diese Zeit relativ genau berechnet werden. Ebenfalls ist es möglich das Dosieren zu verzögern und diesen Schritt somit weiter an den zeitlichen Beginn der nachfolgenden Schritte heranzuschieben. Dies wird in der Abbildung 3.2 deutlich. Auf die Zeitberechnung der einzelnen Schritte, wird im nachfolgenden Kapitelabschnitt tiefer eingegangen. Folgende Parameter gehen beim Dosieren in die Simulation mit hinein.

Prozessschritt 7, Dosieren:

- Kolbendurchmesser in mm (d_{Ko})
- Bauteilvolumen in mm (V_{Ba})
- Dosierverzögerung in Sekunden (t_{Dv})

Der nächste Prozessschritt kann erst begonnen werden, sobald das Dosieren beendet ist. Hierbei handelt es sich um den Öffnungsvorgang des Werkzeuges. Es ist nur ein Einstellparameter in der Simulation diesbezüglich einzustellen.

Prozessschritt 8, Öffnungsvorgang Werkzeug:

- Öffnungsgeschwindigkeit in Prozent (v_{oe})

Mit dem Entformen wird direkt im Anschluss an die Öffnung des Werkzeuges begonnen. Hierbei sind mehrere Einstellparameter in der Simulation einzustellen. Hinzukommend zu den Bewegungszeiten der Auswerfer und der Anzahl der Hübe, sind einige Pausenzeiten innerhalb dieses Prozessschrittes einzustellen

Prozessschritt 9, Auswerfen:

- Auswerferbewegung (raus) in Sekunden (t_o)
- Auswerferbewegung (rein) in Sekunden (t_b)
- Anzahl der Hübe (n_H)
- Pause vor dem Auswerfen in Sekunden (t_{pz})
- Pause vor Zyklusende in Sekunden (t_{pa})
- Blasluft in Sekunden (t_{bl})

Zur Übersicht sind hier alle Einstellparameter und Maschinenkenngößen und dessen Bezug auf die einzelnen Prozessschritte in folgendem Diagramm dargestellt.

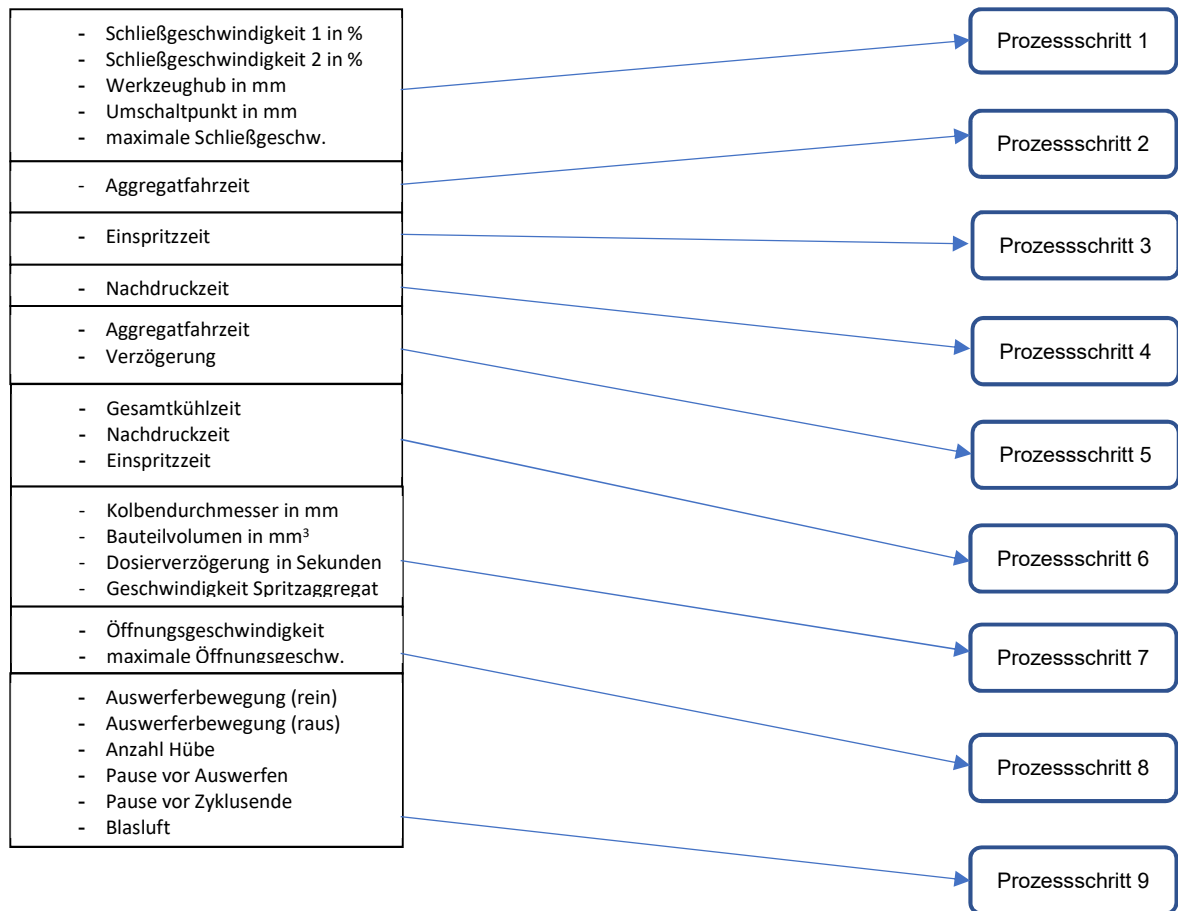


Abbildung 3.3: Diagramm der Einstellparameter

3.3 Berechnung der Zeiten der Prozessschritte

Das Simulationsprogramm berechnet in dem modellierten Modell des Spritzgießprozesses den zeitlichen Bedarf jedes Prozessschrittes. Auf die Modellierung der einzelnen Schritte innerhalb der Simulation soll im vierten Kapitel eingegangen werden. In dem folgenden Abschnitt sind jedoch zunächst die Berechnungen innerhalb der Steuerung erläutert.

Zur ersten Durchführung der Simulation sind häufig verwendete Standardwerte für die einzelnen Schritte eingestellt worden. Diese sind der Bedienungsanleitung entnommen und entsprechen durchaus den Werten eines real ablaufenden Spritzgießprozesses.

Für den ersten Prozessschritt sind folgende Werte eingestellt worden:

Prozessschritt 1, Schließbewegung:

- Maximale Geschwindigkeit Schließaggregat: 315mm/s
- Schließgeschwindigkeit V1: 70%
- Schließgeschwindigkeit V2: 20%
- Werkzeughub: 55mm
- Umschaltunkt: 30mm

Die Simulationssoftware rechnet, über die in dem Prozessschritt des Schließvorganges eingesetzten Blöcke zur Modellierung, im Hintergrund folgende Rechnung zur Ermittlung des zeitlichen Bedarfs.

$$\frac{s_u}{\frac{v_{s1}}{100} \cdot v_s} + \frac{s_h - s_u}{\frac{v_{s2}}{100} \cdot v_s} = t_s = \frac{30mm}{\frac{70}{100} \cdot 315mm/s} + \frac{(55 - 30)mm}{\frac{20}{100} \cdot 315mm/s} \approx 0,53288s \quad (3.2)$$

Der Wert 315mm/s für die maximale Geschwindigkeit des Schließaggregates ist, wie im vorigen Kapitelabschnitt erwähnt, ein festgelegter Maschinenkennwert. Über die beiden Geschwindigkeiten und dem Werkzeughub sowie dem Umschaltunkt, lässt sich der zeitliche Ablauf des Schließvorganges ändern und im Vorfeld überprüfen. Es ergibt sich mit diesen Werten also eine Zeit des Schließvorgangs von 0,53288 Sekunden.

Der zweite Prozessschritt ergibt sich aus einer Konstante. Es handelt sich dabei um die Eingabe der Aggregatbewegungszeit. Dieser Wert ist in der Steuerung einzustellen.

Prozessschritt 2, Aggregatfahrzeit:

Beispielwert: $t_a=0,6$ s

Das gleiche wie für die Aggregatfahrbewegung, trifft auf die Einspritzzeit und die Nachdruckzeit zu.

Prozessschritt 3, Einspritzzeit:

Beispielwert: $t_e= 0,5$ Sekunden

Prozessschritt 4, Nachdruckphase:

Beispielwert: $t_n= 2,0$ Sekunden

Beim fünften Prozessschritt existiert die Möglichkeit eine Verzögerung einzufügen. Somit ist dieser Schritt wie folgt in der Simulation berechnet.

Prozessschritt 5, Aggregatbewegung (zurück):

- Aggregatfahrbewegung 0,6 s
- Verzögerung Aggregatbewegung 1s

$$t_a + t_{av} = t_{AB} = 0,6s + 1s = 1,6s \quad (3.3)$$

Für den fünften Prozessschritt ergibt sich somit aus diesen Werten eine Zeit von 1,6 Sekunden.

Der sechste Prozessschritt (Restkühlzeit) steht in Zusammenhang mit der Einspritzzeit, der Nachdruckzeit und der eingestellten Gesamtkühlzeit. Die Restkühlzeit beginnt direkt nach der Nachdruckphase.

Prozessschritt 6, Restkühlen:

- Einspritzzeit 0,5 s
- Nachdruckzeit 2,5 s
- Gesamtkühlzeit 6,5 s

$$t_k - (t_n + t_e) = t_{rk} = 6,5s - (2,0s + 0,5s) = 4s \quad (3.4)$$

Es ergibt sich eine Restkühlzeit von 4 Sekunden bei diesen eingestellten Werten.

Der siebte Prozessschritt ist das Dosieren. Da nicht genau erfasst werden konnte, mit welcher Geschwindigkeit der Dosierzylinder arbeitet, ist für diesen Wert die maximal mögliche Geschwindigkeit des Einspritzzylinders angenommen worden. Somit gehen folgende Werte zur Berechnung der Dosierzeit ein.

Prozessschritt 7, Dosieren:

- Geschwindigkeit Spritzeinheit 50mm/s
- Kolbendurchmesser 10mm
- Bauteilvolumen 2800mm³
- Dosierverzögerung 1s

$$\frac{V_{Ba}}{\frac{\pi}{4} \cdot (d_{Ko})^2} \div v_E = t_{Do} = \frac{2800mm^3}{\frac{\pi}{4} \cdot (10mm)^2} \div 50mm/s = 0,713s \quad (3.5)$$

Für die Dosierzeit ergibt sich in der Simulation unter Eingabe der oben aufgeführten Werte, eine Zeit von 0,713 Sekunden. Durch die zusätzlich eingestellte Dosierverzögerung, ergibt sich ein zeitlicher Bedarf für das Dosieren von 1,713 Sekunden.

$$t_{Dv} + t_{Do} = t_{DG} = 1s + 0,713s = 1,713s \quad (3.6)$$

Der achte Prozessschritt startet sobald das Dosieren beendet ist. Beim Öffnen wird nur eine gleichbleibende Geschwindigkeit eingestellt.

Prozessschritt 8, Öffnungsvorgang:

- Maximal Geschwindigkeit Schließaggregat 315mm/s
- Öffnungsgeschwindigkeit 80 %
- Werkzeughub 55mm

$$\frac{s_h}{\frac{v_{oe}}{100} \cdot v_s} = t_{oe} = \frac{55mm}{\frac{80}{100} \cdot 315mm/s} = 0,21825 s \quad (3.7)$$

Für den Öffnungsvorgang ergibt sich hiermit ein theoretischer Zeitwert von 0,21825 s.

Zum Schluss des Zyklus wird das fertige Formteil Entformt.

Prozessschritt 9, Auswerfen:

- Bewegungszeit Auswerfer (raus) 0,2s
- Bewegungszeit Auswerfer (rein) 0,25s
- Anzahl der Hübe 10
- Pause vor dem Zyklusende 0s
- Pause vor dem Auswerfen 0s
- Blasluft 0s

$$(t_o + t_b) \cdot n_H + t_{pz} + t_{pz} + t_{bl} = t_{GA} = (0,2s + 0,25s) \cdot 10 = 4,5s \quad (3.8)$$

Mit den eingestellten Werten ergibt sich eine Gesamtzeit für das Auswerfen von 4,5s.

Bei diesen eingestellten Werten ergibt sich folgende Gesamtzykluszeit.

$$t_s + t_a + t_e + t_n + t_{rk} + t_{oe} + t_{GA} = t_{GZy} \quad (3.9)$$

$$0,53288s + 0,6s + 0,5s + 2,0s + 4s + 0,21825s + 4,5s = 12,3511s$$

Die Prozessschritt 5 und 7 haben in diesem hier dargestellten Regelfall des zeitlichen Ablaufes eines Spritzgießprozesses, keinen Einfluss auf die Gesamtzykluszeit. Diese Schritte sind in der Regel, vor dem Ende der Restkühlzeit beendet. Prozessschritt 5 beginnt zusammen mit dem Nachdrücken und ist vorzeitiger als diese beendet. Prozessschritt folgt direkt an Schritt 5. Darauf wird in Kapitel 5 weiterer Bezug genommen.

4 Modellierung des zeitlichen Ablaufes mittels Dymola®

Aufbauend auf den Simulationsmodellen vorangegangener Ausarbeitungen bezüglich dieses Forschungsprojektes, soll nun im folgenden Kapitel die Simulation des zeitlichen Ablaufes des Spritzgießprozesses dargestellt werden. Prinzipiell handelt es sich dabei um die Simulation einer Steuerung des Spritzgießprozesses in welche im Vorfeld die Prozessrelevanten Daten einzustellen sind. Diese Prozesssteuerung ermöglicht es, alle zeitrelevanten Parameter einzustellen und den gesamten Prozess im Anschluss daran zu simulieren. Hiermit ist es im Vorfeld eines real ablaufenden Prozesses möglich, den zeitlichen Ablauf dieses Prozesses zu überprüfen. Unter anderem kann festgestellt werden, wie sich bestimmte Veränderungen der Parameter auf die Gesamtzykluszeit auswirken, ohne den Prozess in der Realität starten zu müssen. Der Zeitbedarf, sowie die zeitlichen Veränderungen, sind nach der Simulation mit den eingegebenen Daten exakt abzulesen und auszuwerten.

Die im Folgenden aufgezeigten Parameter beziehen sich auf die in Kapitel 3 hergeleitet identifizierten Parameter. Simuliert wird der eingeschränkte Bereich welcher sich auf den Prozess der Maschine bezieht. Manuelle Tätigkeiten die möglicherweise im Vorfeld des Prozesses getan werden müssen, wie zum Beispiel das Einfüllen des Kunststoffmaterials oder des Entgratens des fertigen Formteils nach dem Auswerfen, finden keine Beachtung. Die Simulation berücksichtigt ebenfalls nicht das Vorheizen der Maschine auf Betriebstemperatur, sondern ausschließlich den Prozessbeginn ausgehend von einer Betriebsbereiten Maschine.

4.1 Aufbau des Simulationsmodells

Ziel ist es eine hierarchische Aufbauweise des gesamten Simulationsmodells zu entwickeln. In der oberen Ebene, der Steuerungsebene, sind alle relevanten Daten und Prozessparameter des Spritzgießprozesses zur Berechnung des zeitlichen Ablaufes einzustellen. Die modellierte Steuerung des Prozesses soll im Anschluss daran an die Simulationen der vorangegangenen Arbeiten, bezüglich dieses Forschungsprojektes angebunden werden. In der unteren Ebene sind die einzelnen Prozessschritte modelliert. Hier finden die eigentlichen Berechnungen und Verknüpfungen der einzelnen Prozessschritte statt. Um den Überblick während den ersten Simulationsschritten zu vereinfachen, ist zu Beginn der Modellierung des Prozessablaufes jedoch nur in einer Ebene gearbeitet worden. Jeder modellierte Prozessschritt besteht aus mehreren verknüpften Blöcken welche den zeitlichen Ablauf und die Dauer des Prozessschrittes aus den in die Steuerung eingepflegten Daten, berechnen. Die verwendeten Einzelkomponenten stammen fast ausschließlich aus der Modelica-Standardbibliothek und sind zum Teil umprogrammiert worden damit die erforderlichen Berechnungen erfolgen konnten. Die Umprogrammierungen sind im Anschluss erläutert. Zu Beginn sind die einzupflegenden Prozessdaten als Konstanten in die Simulation eingeflossen. Diese sollen später in einer höher gestellten Ebene in die Steuerung eingehen.

So besteht beispielsweise der Prozessschritt des Werkzeugschließvorgangs aus den der Modelica-Standardbibliothek entnommen Blöcken Constant, MultiSum, MultiProdukt, Feedback und Division. Mit Hilfe dieser Blöcke ist es nach Eingabe der relevanten Prozessdaten möglich, den zeitlichen Ablauf des Prozessschrittes zu errechnen und diesen Ablauf in einer Grafik zu veranschaulichen.

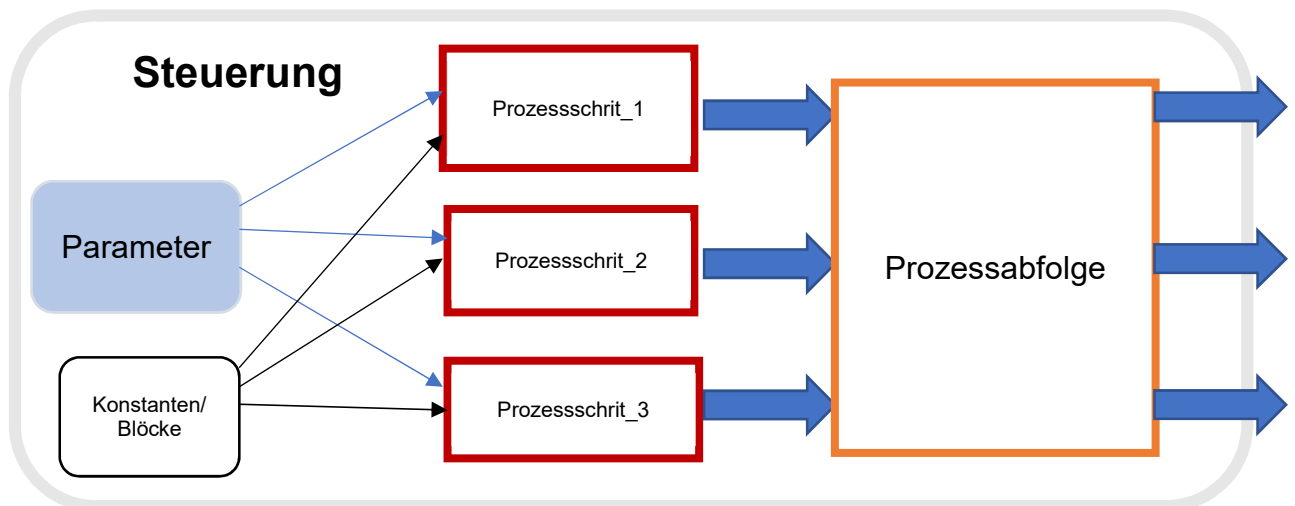


Abbildung 4.1: Aufbau und Struktur des Simulationsmodells

In der Abbildung 4.1 ist der Datenaustausch der verschiedenen Komponenten verdeutlicht. Die Pfeile deuten die einzelnen Verbindungen der Komponenten untereinander an. So werden die Daten aus der Steuerung an die einzelnen Prozessschritte weitergegeben. Für die vollständige Simulation des gesamten zeitlichen Ablaufes des Spritzgießprozesses, ist es von Bedeutung, dass bestimmte Informationen der einzelnen Prozessschritte an die Prozessabfolge weitergegeben werden um den nächsten Prozessschritt einleiten zu können. Zu diesen Informationen gehört der Startzeitpunkt sowie die Dauer des Prozessschrittes und der Zeitpunkt an dem der jeweilige Schritt beendet ist. Am Ende eines Prozessschrittes, soll in der Prozessabfolge der erste Schritt erneut einleitet werden um somit den Prozess wiederholt beginnen zu lassen. Hierbei ist es nicht zwingend notwendig jedem Schritt innerhalb des Prozesses sämtliche Informationen über die anderen Prozessschritte zu zuführen.

Die Übergabe von Daten von einem Block zum nächsten erfolgt in Dymola® unter der Verwendung von Connectoren, welche entweder bereits an den Blöcken zu Verfügung stehen oder nachträglich an diese angefügt werden müssen, sollten nicht ausreichend Connectoren an einem Block vorhanden sein. Es existieren in der Dymola-Bibliothek Connectoren welche reale Werte wie Zeiten oder Drücke an andere Blöcke weitergeben und Connectoren welche ausschließlich ein Signal weitergeben welches besagt, ob ein bestimmter Block derzeit aktiv oder inaktiv geschaltet ist.

Die Modellblöcke der Bibliothek beinhalten nur einige wenige Parameter welche voreingestellt werden können. Oft sind jedoch zusätzliche Parameter von Nöten welche in die vorhandenen Standardblöcke einzufügen sind. Es ist ebenfalls oft sehr hilfreich, bestimmte Parameter die für eine Simulation nicht gebraucht werden, zu entfernen. Hiermit kann der Überblick vereinfacht werden.

Das Hinzufügen und das Herauslösen der Parameter soll in einem späteren Abschnitt noch Erwähnung finden. Es geht hier zunächst um die Eingabe bestimmter Daten in die Benutzeroberfläche eines Modellblocks.

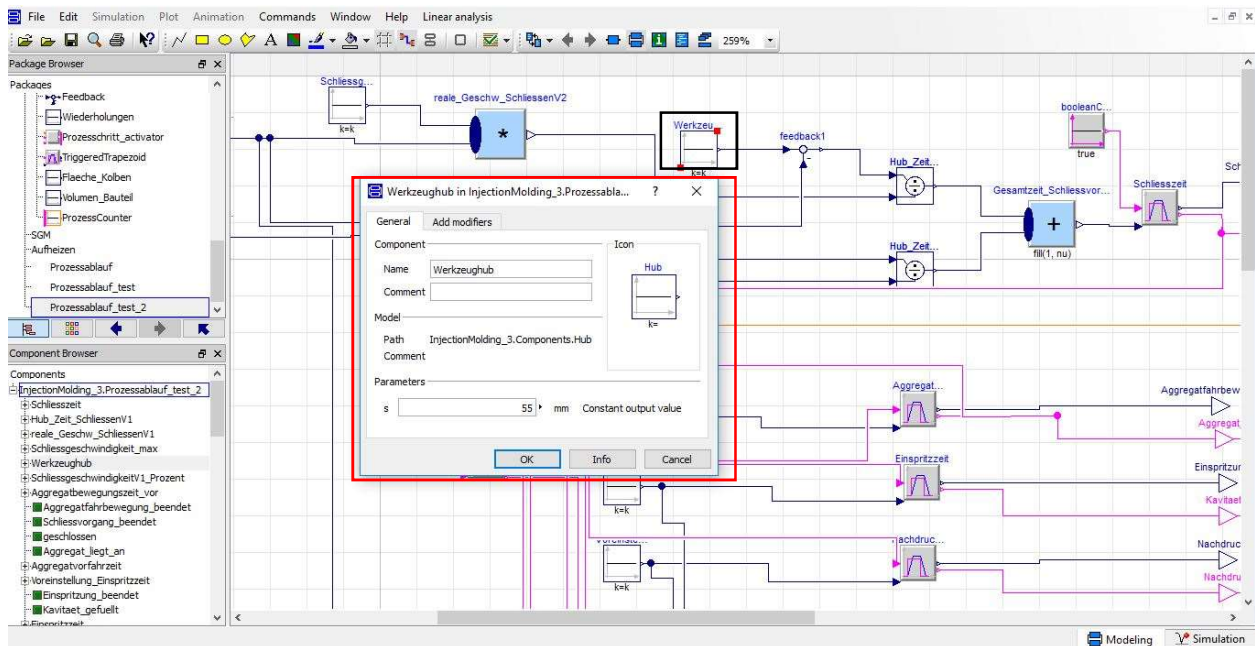


Abbildung 4.2: Benutzeroberfläche zur Parameteränderung

Im Abbild 4.2 ist veranschaulicht dargestellt, wie die Parameter einzustellen sind. Es ist im ersten Schritt jenes Modell aus der Bibliothek auszuwählen, welches den Block enthält in dem der Parameter verändert werden soll. Anschließend ist der gesuchte Block anzuklicken.

Hierbei handelt es sich beispielhaft um eine Konstante (in der Abbildung 4.2 schwarz umrandet). Diese gibt ausschließlich einen festen, nicht veränderlichen Wert an den nächsten Block weiter. Dabei handelt es sich in diesem Beispiel um den Gesamtweg des Werkzeugs während des Schließvorganges, welcher im Vorfeld zur genauen Berechnung des zeitlichen Ablaufes des Schließvorganges eingestellt werden muss. Nachdem dieser Block nun angeklickt wurde, öffnet sich das Eingabefenster (in der Abbildung 4.2 rot umrandet). Hier ist nun der gewünschte Wert einzustellen. Es besteht jedoch in der Standardausführung dieses Blocks nicht die Möglichkeit eine Eingabe von Millimetern durchzuführen. Hier wurden bereits im Vorfeld einige Veränderung der Parameter einprogrammiert um den gewünschten Wert in der passenden Einheit einpflegen zu können. Im Anschluss daran sind die geänderten Parameter noch zu speichern. Wie eingangs in diesem Kapitel erwähnt, werden die Daten über Connectoren weitergegeben. Im Falle der Konstante existiert an diesem Block ausschließlichen ein Connector (vgl. Abb.: 4.3).

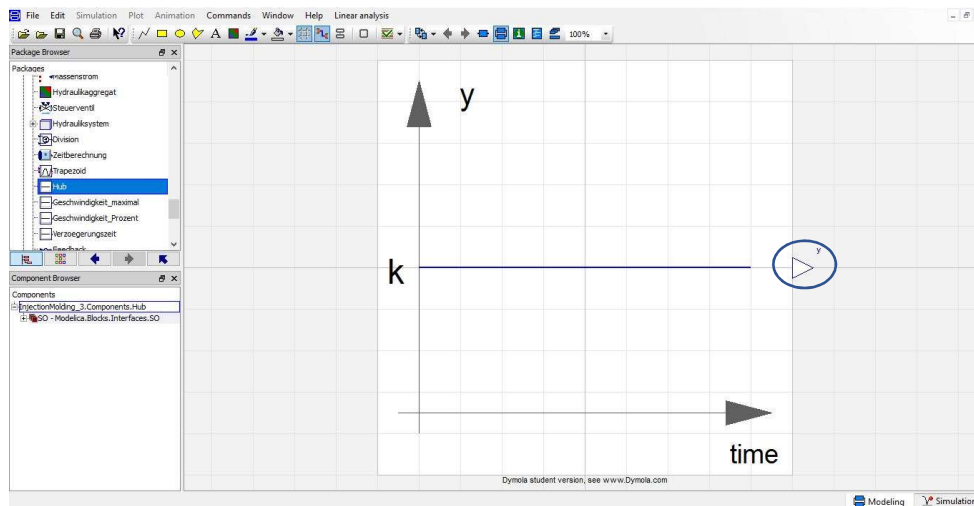


Abbildung 4.3: Diagramm in der Benutzeroberfläche eines Modellblocks

Die Abbildung verdeutlicht den einzigen Connector dieses Blockes. Es handelt sich hierbei um einen Real-Output-Connector. Dieser gibt einen realen Wert an den nächsten Block weiter. Im Falle dieser Konstante ist es nicht sinnvoll weitere Connectoren an diesen Block anzufügen, da mehrere Verbindungen zu anderen Blöcken von dem einen Connectoren geknüpft werden können. Es wird stetig nur ein nicht veränderlicher Wert an andere Blöcke weitergegeben. Ebenso könnten Input-Connectoren an diesen Block angebunden werden um ein Signal von außenstehenden Blöcken zuzuführen, wie beispielsweise ein Startsignal oder ein Signal, dass der Konstante vorschreibt für welchen Zeitraum diese ihre Werte weitergibt. Das Anbringen von Connectoren wird in einem folgenden Abschnitt an einem komplexeren Beispiel näher erläutert. Der Abbildung 4.3 sind ebenfalls die Grenzen eines Blocks oder eines vollständigen Modells zu entnehmen. Die weiß markierte Fläche beschreibt den inneren Bereich und die Linie zwischen der weißen und blauen Fläche bildet eine Grenze nach außen bzw. innen. Connectoren können über diese Grenzen gezogen werden, damit die Weitergabe von Daten an übergeordnete oder untergeordnete Blöcke oder Modelle ermöglicht werden kann.

4.2 Aufbau und Anpassung der Komponenten

Im ersten Schritt galt es die korrekten Werte und Einheiten als einstellbare Parameter in den verfügbaren Blöcken mit dem Namen Konstante einzupflegen. In der Modellierung der einzelnen Prozessschritte innerhalb der Steuerung sind dann alle konstanten Werte zur Berechnung des zeitlichen Ablaufes einzupflegen.

Parameter sind in der Modelica-Textebene einer Komponente einzuprogrammieren. Diese werden dann in der Benutzeroberfläche nach anklicken der betreffenden Komponente angezeigt. In der Abbildung 4.4 ist dieser Schritt einmal veranschaulicht dargestellt.

Bevor eine Text-Datei einer Komponente jedoch geändert werden kann, ist diese in das Modell in welchem es im Anschluss verwendet werden soll, zu duplizieren. Dazu muss mit der rechten Maustaste die Komponente angeklickt und das Feld *new* angewählt werden.

Hier wird nun auf duplicate class geklickt und die gewünschte Zieldatei ausgewählt in welcher diese Komponente dupliziert werden muss.

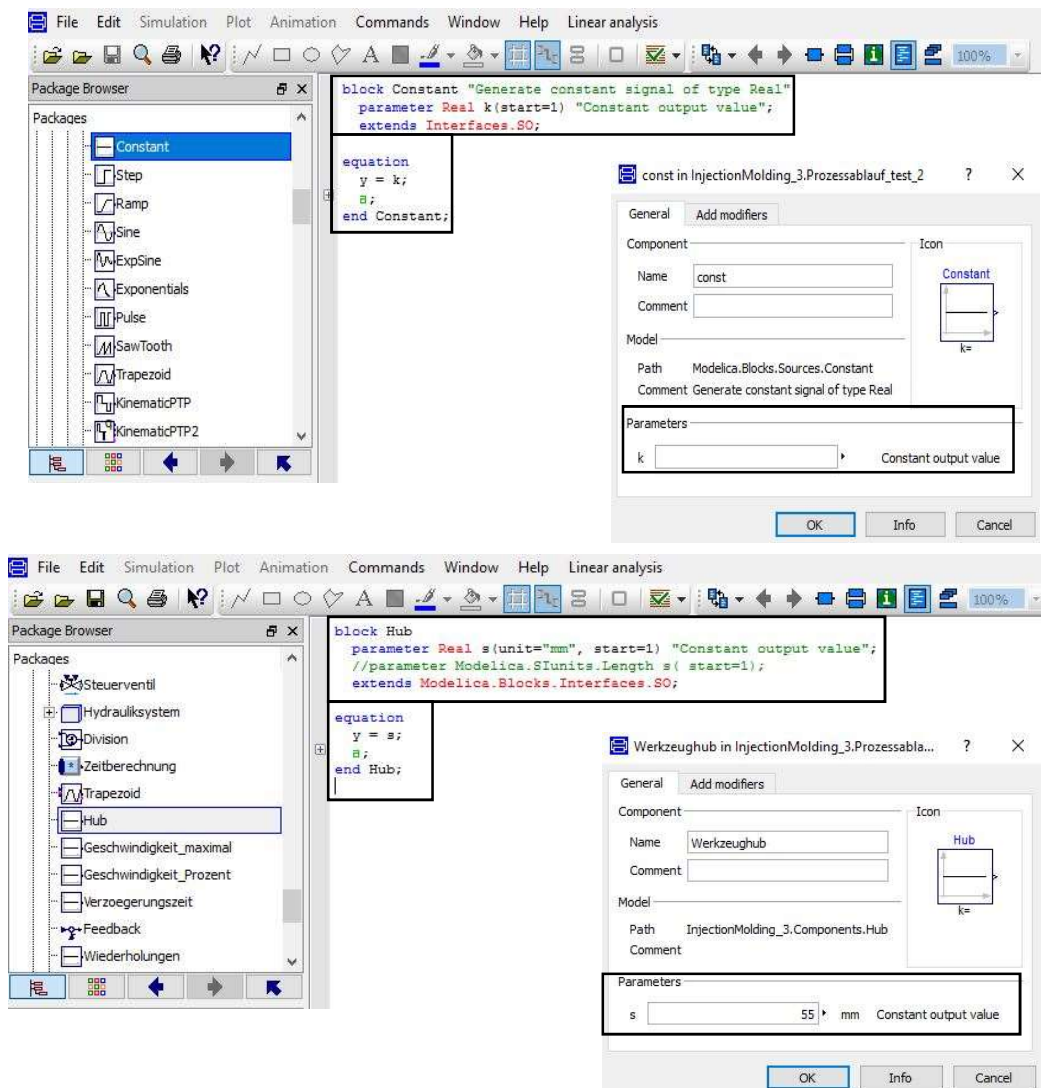


Abbildung 4.4: Parameteränderung in Text-Datei

Im oberen Teil der Abbildung 4.4 ist zu erkennen wie diese Standardkomponente aufgebaut und in der Text-Datei beschrieben ist. Hier ist in der Parametereingabe ein k als Ausgabewert angegeben (siehe schwarze Kästchen). In der unteren Hälfte der Abbildung ist verdeutlicht wie die Text-Datei abzuändern ist, damit der geforderte Parameter eingegeben werden kann. Nach der Veränderung ist nun eine Längenangabe in der Einheit Millimeter, statt dem Wert k , in die Benutzeroberfläche dieser Komponente einzugeben. Auf diesem Wege sind sämtliche Parameteränderungen durchzuführen. Ebenfalls sind so vorhandene aber ungenutzte Parameter raus zu löschen in dem die gesamte Text-Datei diesbezüglich entfernt wird.

Zusätzliche Connectoren sind in der Bibliothek auszuwählen und der Komponente in der Diagramm-Dateiebene zuzuordnen. Hierzu ist im Vorfeld genau zu unterscheiden welcher der unterschiedlichen Connectoren zu welchem Zweck und zu welcher bestimmten Art der Daten, welche weitergegeben werden sollen, zu verwenden ist.

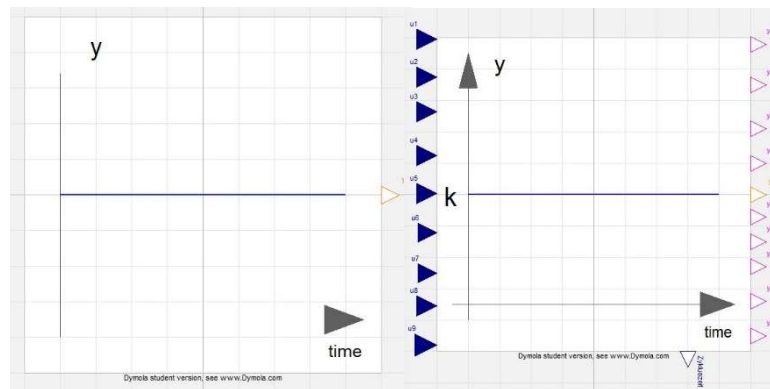


Abbildung 4.5: Zusätzliche Connectoren

In dem Beispiel aus der Abbildung 4.5 ist der Block `IntegerConstant` dargestellt. Auf der linken Seite der Abbildung ist der Block so abgebildet wie er in seiner Standardversion aus der Dymola®-Bibliothek zu entnehmen ist. Hier ist kein Connector für ein Eingangssignal und ein Connector für ein Ausgangssignal vorhanden. Dieser Block ist in das Simulationsmodell dupliziert und dort bearbeitet worden. Auf der rechten Seite der Abbildung sind die nachträglich eingefügten, zusätzlichen Connectoren dargestellt. Hinzugefügt wurden mehrere Real-Input-Connectoren, die dem Block reale Zeitwerte übergeben sollen, welche zuvor aus anderen Daten und Komponenten der Prozessschritte berechnet wurden. Bei den hinzugefügten Ausgangs-Connectoren handelt es sich um Boolean-Output-Connectoren. Diese geben ein Signal in Form von *true* oder *false* an den nächsten Block weiter. Für die zeitliche Simulation des Spritzgießprozesses war es von Bedeutung, dass die einzelnen programmierten Prozessschritte ein konkretes Startsignal erhalten, sobald der vorangegangene Schritt beendet ist. Der Modelica-Block `IntegerConstant` nimmt eine wichtige Position für den optimalen Verlauf der Simulation ein. Im folgenden Abschnitt soll daher auf die Anpassung dieses Blocks eingegangen werden.

Der Block `IntegerConstant` erhält aus den einzelnen Prozessschritten die errechneten Zeitwerte und lässt diese nacheinander oder teilweise parallel nebeneinander ablaufen. Ist der Zyklus vollständig durchlaufen, startet der Block den Zyklus erneut. Die gesamte Zykluszeit wird ebenfalls von diesem Block berechnet und kann ausgegeben und ausgewertet werden. Um dies mit diesem Block zu ermöglichen, ist neben den zusätzlich eingefügten Connectoren auch die Text-Datei umgeschrieben worden.

Die Text-Datei des Blockes aus der Abbildung 4.6 enthält in ihrem Ursprungszustand, wie dieser aus der Dymola®-Bibliothek zu entnehmen ist, nur einige wenige Zeilen. Hier sind nun, passend zur den zusätzlichen Aus- und Eingängen weitere Formeln hinzugefügt. Der Block ist hinzukommend, passend zur seiner Aufgabe, in `ProcessCounter` umbenannt worden. Die zusätzlich einprogrammierten Zeilen (in Abbildung 4.6 mit schwarzem Kasten markiert) stellen die Bedingungen dar, zu welchem Zeitpunkt ein Ausgang auf *true* oder auf *false* von dem Block gesetzt und somit aktiv oder inaktiv wird. So darf beispielsweise der vierte Prozessschritt erst gestartet und somit auf *true* gesetzt werden, sobald die Schritte eins bis drei vollständig beendet sind. Weiterhin ist dem Block eine Formel, in der Abbildung 4.6 mit dem englischen Wort `equation` benannt, hinzugefügt, welche den Prozess nach einem vollständigen Durchlauf in weiteren Simulationen ablaufen lässt. Über den bereits vorhandenen Integer-Output des Blockes soll während der Simulation ein Stufendiagramm ausgegeben werden.

Dieses Diagramm zeigt auf, welcher Prozessschritt zu welchem Zeitpunkt der Simulation gestartet wurde und wie lange dieser andauerte. Darauf soll in einem folgenden Kapitelabschnitt in einer Auswertung noch genauer eingegangen werden. Hierzu ist eine gesonderte Zeile in der Text-Datei programmiert worden. Diese Zeile beschreibt wann und in welcher Reihenfolge die Daten der einzelnen Prozessschritte abgerufen und angezeigt werden. Die ausgegebenen Daten dieses Blockes sollen dann im weiteren Verlauf des gesamten Forschungsprojektes an die simulierten Maschinenelemente anderer Simulationen angeknüpft werden, wie zum Beispiel dem Schließzylinder. Diesem werden dann ein Startsignal und eine zeitliche Dauer übermittelt.

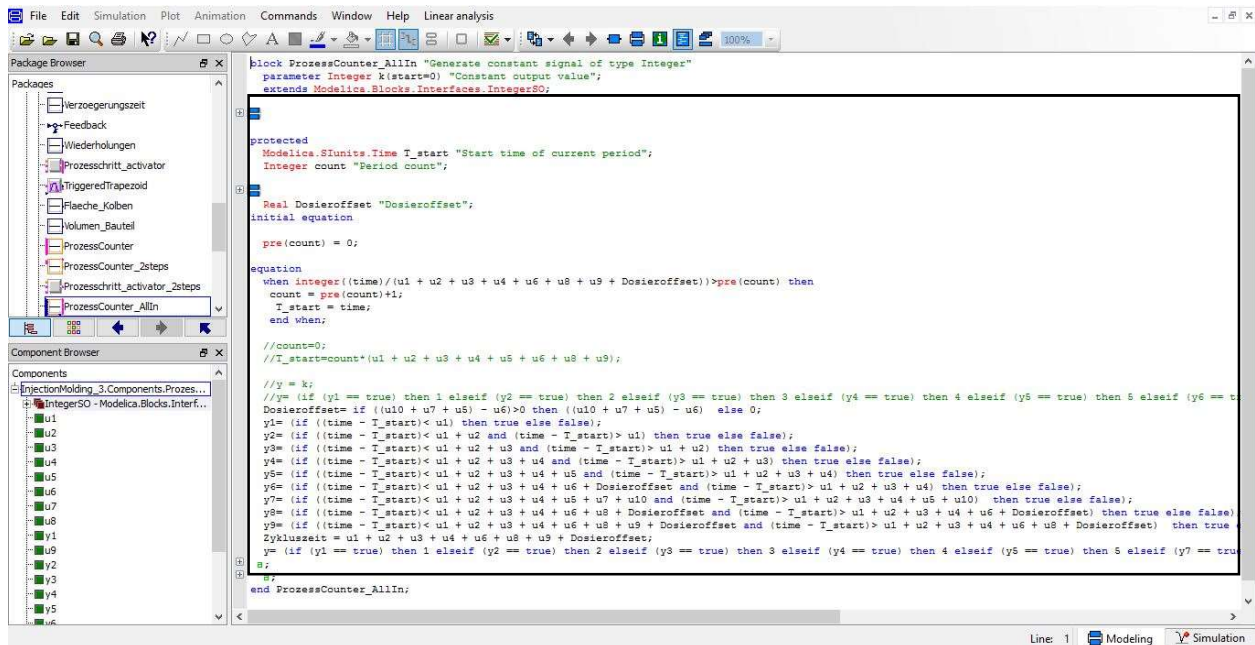


Abbildung 4.6: Text-Datei des IntegerConstant-Blockes

Die in der Text-Datei eingefügte Konstante mit dem Namen *Dosieroffset*, hat eine wichtige Funktion. Diese macht es in der Simulation umsetzbar, dass die Prozessschritte 8 und 9 erst nach dem Dosieren sattfinden, sollten diese über die errechnete Restkühlzeit hinaus andauern. Infolge dessen, verlängert sich die Restkühlzeit automatisch und endet hierbei gleichzeitig mit dem Schritt des Dosierens. Weiterhin verlängert sich in diesem Falle die Gesamtzykluszeit. Hierzu ist die Konstante *Dosieroffset* an die programmierten Zeilen der betreffenden Prozessschritte, sowie der Gesamtzykluszeit, hinzugefügt worden. Endet das Dosieren vor der Restkühlzeit, wird der *Dosieroffset* nicht berücksichtigt. Ohne diese Konstante wäre eine Simulation des Falles der hinausgezögerten Dosierung, nicht umsetzbar. Der Block enthält einen zusätzlichen zehnten Eingang, obwohl nur neun Prozessschritte definiert wurden. Über diesen zusätzlichen Eingang, geht die einzustellende Dosierverzögerung in den Block zur Verarbeitung über.

4.3 Modellierung der Prozessschritte

Die Gesamtzeit eines Prozessabschnittes setzt sich oft aus mehreren Teilabschnitten zusammen. Jeder Schritt ist unabhängig von den anderen Schritten zu modellieren und somit in seiner zeitlichen Dauer zu berechnen und zu simulieren. Die in die Steuerung eingegebenen Werte sind von dem Programm für die Berechnung der zeitlichen Dauer eines jeden Abschnittes einzusetzen.

Prozessschritt 1 und 8, Schließ- und Öffnungsbewegung:

Bei der Modellierung zur korrekten Simulation des Schließvorganges des Werkzeuges ist darauf zu achten, dass dieser mit zwei unterschiedlichen Geschwindigkeiten stattfindet. Der Grund für diese Verringerung der Geschwindigkeit ist in dem Kapitel 2 näher beschrieben.

Wie in Kapitel 3 erwähnt, können an der Maschinensteuerung nicht direkt die Geschwindigkeiten, sondern nur Prozentangaben bezüglich des Schließvorgangs eingegeben werden. Diese Werte sind dann umzurechnen um den zeitlichen Bedarf des Schließvorgangs bestimmen zu können. Da die maximal mögliche Geschwindigkeit des Schließaggregats bekannt ist, kann die Geschwindigkeit mit der das Aggregat tatsächlich betrieben wird, über die Prozentangabe bestimmt werden. An der Maschine ist ebenfalls der Umschaltzeitpunkt mit der Angabe in Millimetern einzustellen. Hierbei ist der Weg einzustellen nachdem das Aggregat von der Schließgeschwindigkeit 1 auf die Schließgeschwindigkeit 2 umschaltet.

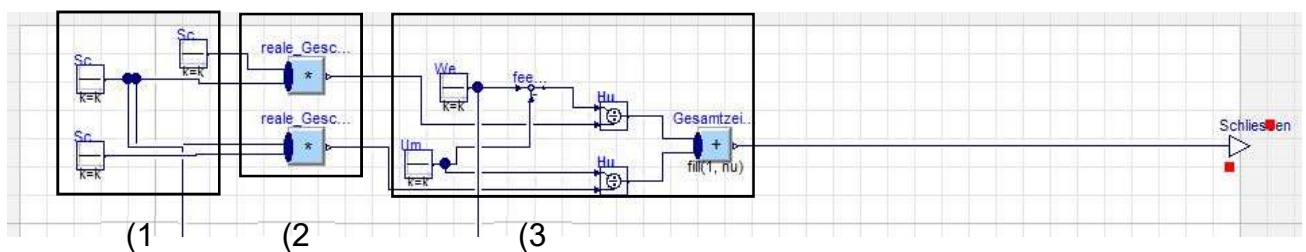


Abbildung 4.7: Modellierung des Schließvorgangs

Die maximale Geschwindigkeit sowie die Prozentangaben der tatsächlichen Geschwindigkeiten gehen über die Steuerung als Konstanten in die Modellierung ein (1). In den MultiProduct Blöcken (2) wird aus der maximalen Geschwindigkeit des Schließvorgangs und der Prozentangabe der Geschwindigkeiten 1 und 2, die tatsächliche Geschwindigkeit berechnet in dem diese Werte multipliziert werden. Der maximale Werkzeughub sowie der Umschaltzeitpunkt, sind in die Steuerung einzugeben und gehen in Form von Konstanten zur Berechnung der Zeit in den modellierten Prozessschritt über (3). Mit Hilfe des Weg-Zeit-Gesetzes wird dann im folgenden Abschnitt der Modellierung die benötigte Zeit für den gesamten Schließvorgang berechnet und ausgegeben. Die berechnete Zeit wird dann über einen Real-Output-Connector innerhalb der Steuerung an den Block ProzessCounter weitergeben, in dem dann der zeitliche Ablauf des gesamten Zyklus, unter der Betrachtung aller Prozessabschnitte, simuliert und abgebildet wird. Der Öffnungsvorgang ist auf die gleiche Weise modelliert worden. Hierbei ist jedoch nur eine Geschwindigkeit zu beachten.

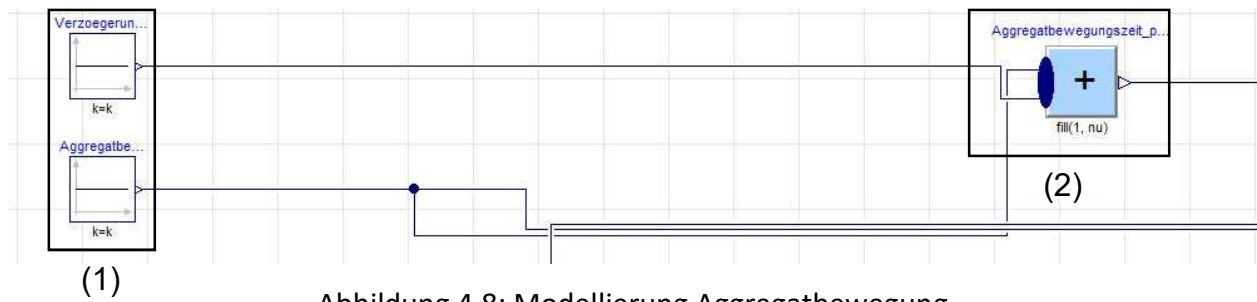
Prozessschritt 2 und 5, Aggregatbewegung:

Abbildung 4.8: Modellierung Aggregatbewegung

In der Abbildung zu den Prozessschritten der Aggregatbewegung sind die Blöcke dargestellt in denen die Konstanten Zeitwerte über die Steuerung einzustellen sind (1). Beim Prozessschritt 5, kann zur der Aggregatbewegungszeit noch eine Verzögerungszeit eingestellt werden. Diese Zeiten werden dann in dem MultiSum Block (2) zusammengefasst. Zu dem zweiten Prozessschritt ist keine Einstellung einer Verzögerung möglich.

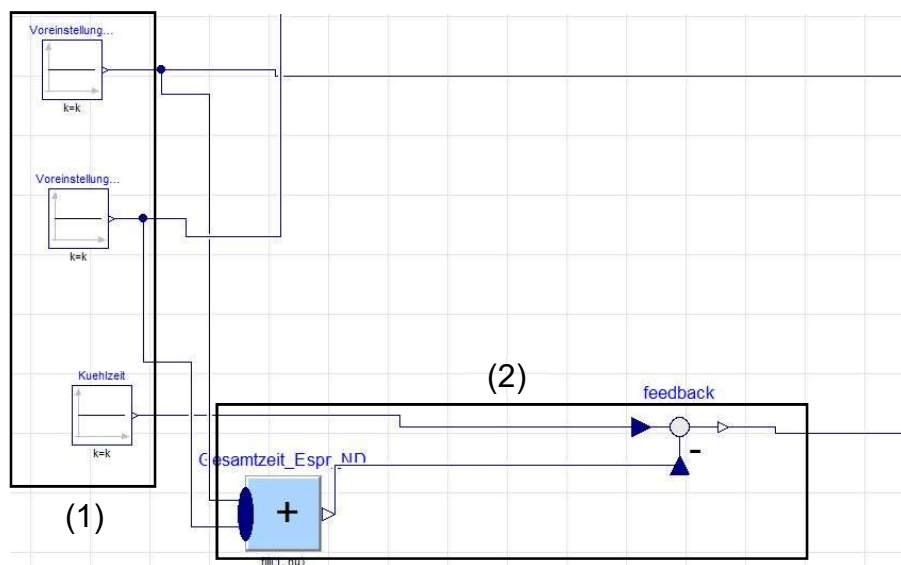
Prozessschritt 3, 4 und 6, Einspritz-, Nachdruck- und Restkühlzeit:

Abbildung 4.9: Modellierung Einspritz-, Nachdruck- und Gesamtkühlzeit

Die Zeiten des Einspritzens (Prozessschritt 3), des Nachdrückens (Prozessschritt 4) und der Gesamtkühlzeit, sind wiederum als Konstanten in den Blöcken einzustellen (1). Die Restkühlzeit ergibt sich aus den voreingestellten Werten der Einspritz-, Nachdruck- und Gesamtkühlzeit. Diese werden in den Blöcken MultiSum und feedback (2) verrechnet und ergeben dann die korrekte Restkühlzeit (Prozessschritt 6).

Prozessschritt 7, Dosieren:

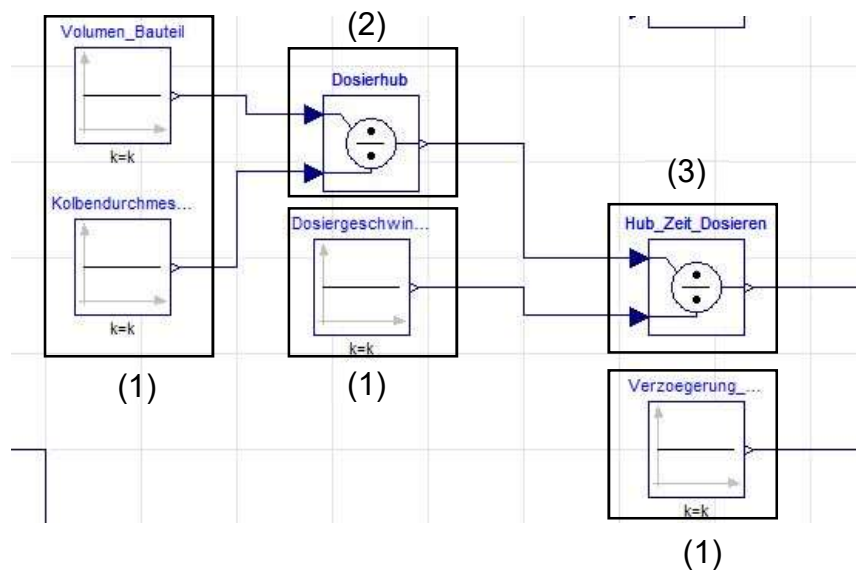


Abbildung 4.10: Modellierung des Dosierens

In die Steuerung sind die Werte für das Bauteilvolumen, den Kolbendurchmesser, die Dosierverzögerung und die Geschwindigkeit einzustellen. Diese Werte gehen dann als Konstanten in den Prozessschritt ein (1). Aus dem Bauteilvolumen und dem Kolbendurchmesser wird dann in dem Block Division (2), der erforderliche Hub zur korrektem Dosierung berechnet. Sobald der Hub bestimmt worden ist, wird aus diesem errechneten Hub und der Geschwindigkeit die Zeit für das Dosieren berechnet (3). Die Verzögerung geht erst in dem ProzessCounter in die Berechnung mit hinein, sollte diese eingestellt sein.

Prozessschritt 9, Auswerfen:

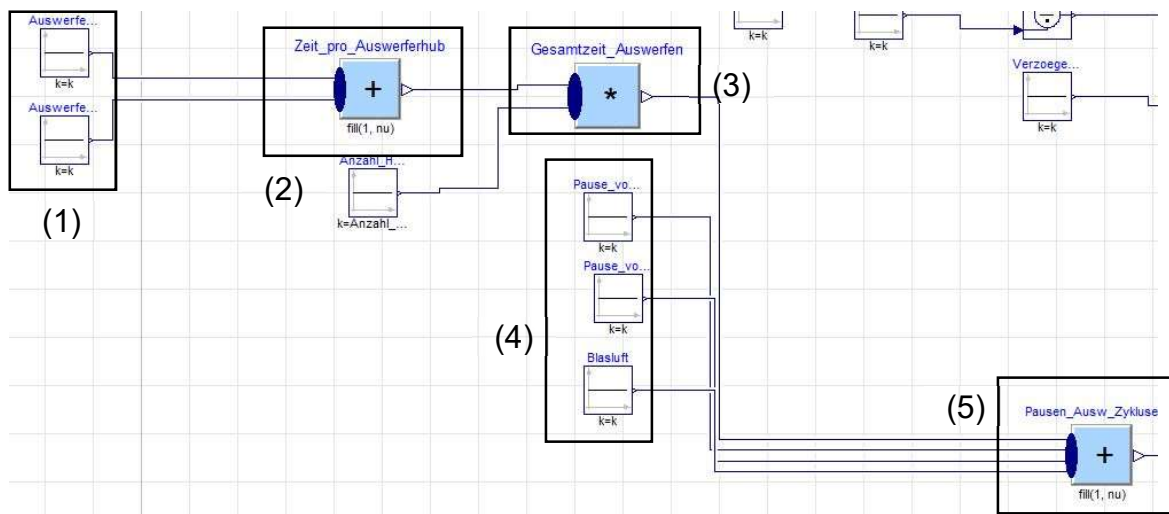


Abbildung 4.11: Modellierung des Entformens

Die Zeiten der Auswerferbewegungen gehen von der Eingabe in die Steuerung in den modellierten Prozessschritt als Konstanten über (1) und werden dort zusammengefasst (2). Bei Einstellung von mehr als einem Hub, wird die errechnete Zeit eines vollständigen Auswerferhubes (Bewegung raus und rein) mit der Anzahl der Hübe in dem Block MultiProdukt multipliziert (3). Sollten konstante Zeitwerte für die Pausenzeiten und die Blasluft eingestellt sein (4), werden diese in dem Block MultiSum (5) zu der vorher errechneten Gesamtzeit des Auswerfens dazu addiert.

4.4 Modellierung Prozessablauf

In die Steuerung des Prozessablaufes sind die Einstellparameter einzugeben. Nach dem der Block *Steuerung_Prozessablauf* angeklickt wurde, öffnet sich das Fenster zur Eingabe der Zahlenwerte (vgl. Abb.: 4.12). Hier sind nun alle relevanten Zahlenwerte für die Parameter einzustellen. Die in grau hinterlegten Zahlen in den Eingabefenstern, entsprechen in dem Prozessablauf vordefinierten Werte. Die Vordefinierten Werte sind beim Hinzufügen der Parameter in die Steuerungsoberfläche mit anzugeben. Diese können so übernommen oder auch geändert werden. Es ist ebenfalls möglich einige der Parameter auf den Wert 0.0 zu setzen. Die Veränderung der Parameter und die daraus resultierenden Auswirkungen auf den zeitlichen Ablauf des Prozesses sind dann in den Diagrammen sichtbar. Die Einstellwerte werden dann von der Steuerung an die betreffenden Prozessschritte weiter. Dort findet dann die Berechnung der Zeiten statt. Sämtliche Parameter sind der Steuerung, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, hinzugefügt worden. Die Blöcke zur Modellierung der Prozessschritte wurden dann mit den Parametern aus der Steuerung verknüpft.

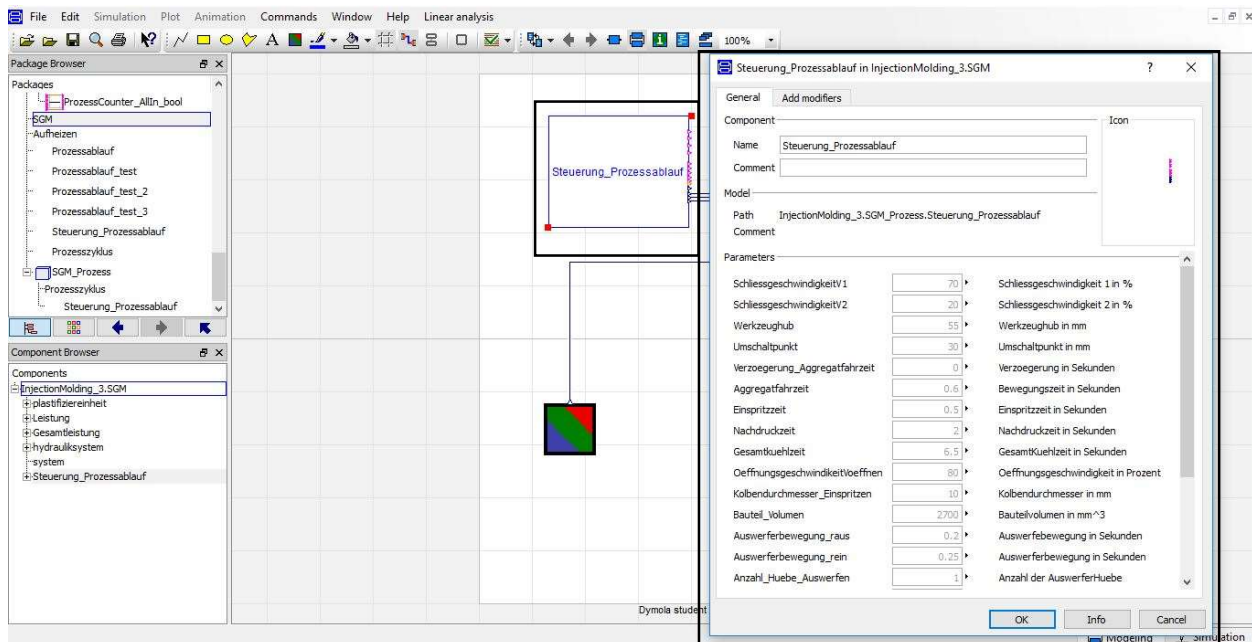


Abbildung 4.12: Dateneingabefenster der Steuerung

Der modellierte Prozessablauf beinhaltet alle Prozessschritte zur Berechnung der gesamten Zykluszeit (vgl. Abb.: 4.13). Jeder einzelne Prozessschritt gibt die errechneten Zeitwerte an den Block *ProzessCounter* weiter. Hier werden die Prozessschritte in der korrekten Reihenfolge aktiviert. Die Anpassung des Blockes *ProzessCounter* zur Umsetzung der erforderlichen Aufgaben, ist in Kapitel 4.2 beschrieben. Sämtliche Prozessschritte sind über die Connectoren mit Block *ProzessCounter* verbunden. Dieser Block gibt dann die Zeitwerte zur Auswertung der Daten aus. Darüber hinaus soll der Block die Daten über hinzugefügte Connectoren, an ein anderes modelliertes Modell innerhalb des in Kapitel 1 erwähnten Forschungsprojektes, weitergeben. Weiterhin gibt dieser Block an, zu welchem Zeitpunkt des Prozesses ein bestimmter Prozessabschnitt stattgefunden hat. Diese Daten werden wiederum über Connectoren weitergegeben. Für die Auswertung der Simulation ist der Output-Connector mit dem Namen *Prozessabfolge* von gesonderter Bedeutung worauf im folgenden Kapitel eingegangen werden soll.

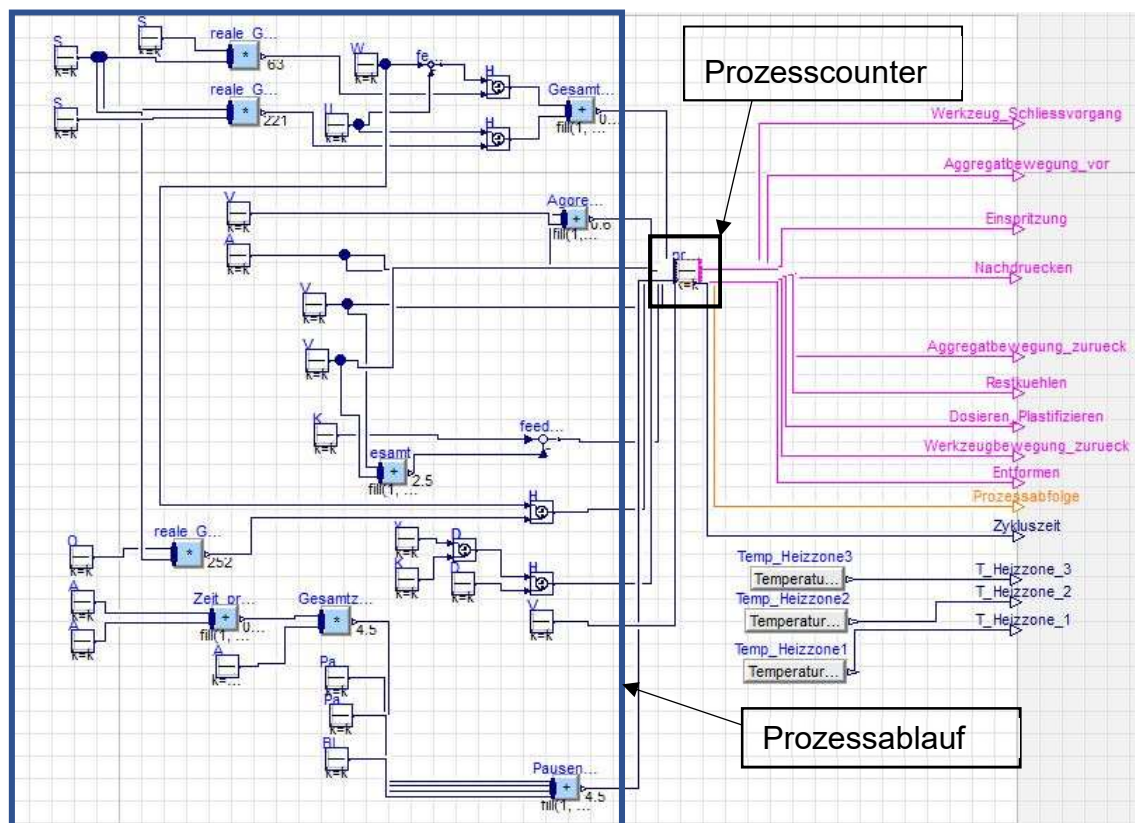


Abbildung 4.13: Modell des Prozessablaufes

Der *ProzessCounter* bildet hier den wichtigsten Block zur Simulation des zusammenhängenden Prozessablaufes. In der unteren Rechten Ecke der Abbildung 4.13 sind drei Blöcke zu erkennen in denen Temperaturen eingestellt werden können. Diese sind bereits aufbauend an ein bereits vorhandenes Simulationsmodell angeknüpft worden. Der *ProzessCounter* bildet zusammen mit dem *Prozessablauf* die eigentliche Steuerung.

5 Durchführung und Auswertung der Simulation

Die Simulation des zeitlichen Prozessablaufes ist in ersten Durchführung mit den gleichen Zahlenwerten für die Einstellparameter aus dem Kapitel 3.3 durchgeführt worden. In der Abbildung 5.1 sind alle Prozessschritte separat untereinander, jedoch auf der gleichen Zeitachse veranschaulicht. Es sind 25 Sekunden Simulationszeit eingestellt worden, um zwei volle Zyklen abbilden zu können. Es ist der Abbildung zu entnehmen welcher Prozessschritt von anderen Schritten abhängig ist und erst aktiv wird sobald ein anderer Schritt beendet ist. Die Simulation, welche in dieser Abbildung dargestellt ist, fand ohne Dosier- und Aggregatverzögerung statt. Hier ist der im Regelfall gleichzeitige Beginn der Aggregatabfahrbewegung und der Restkühlzeit deutlich sichtbar. Ebenso ist zu erkennen, dass das Auswerfen bei der Babyplastmaschine erst nach der vollständigen Öffnung des Werkzeuges passiert. Deutlich veranschaulicht ist auch der Beginn des Dosierens welcher von dem Ende der Aggregatrückfahrbewegung und nicht von der Nachdruckphase oder des Restkühlens abhängig ist. Das Werkzeug öffnet nach Beendigung der Restkühlzeit und wird nach rechts auf der Zeitachse verschoben, sobald die Restkühlzeit aus den im vorigen Abschnitt erwähnten Gründen verlängert werden sollte. Die Restkühlzeit beginnt immer mit dem Ende der Nachdruckphase. Nach dem Ablauf des neunten Prozessschrittes beginnt der gesamte Zyklus von vorne.

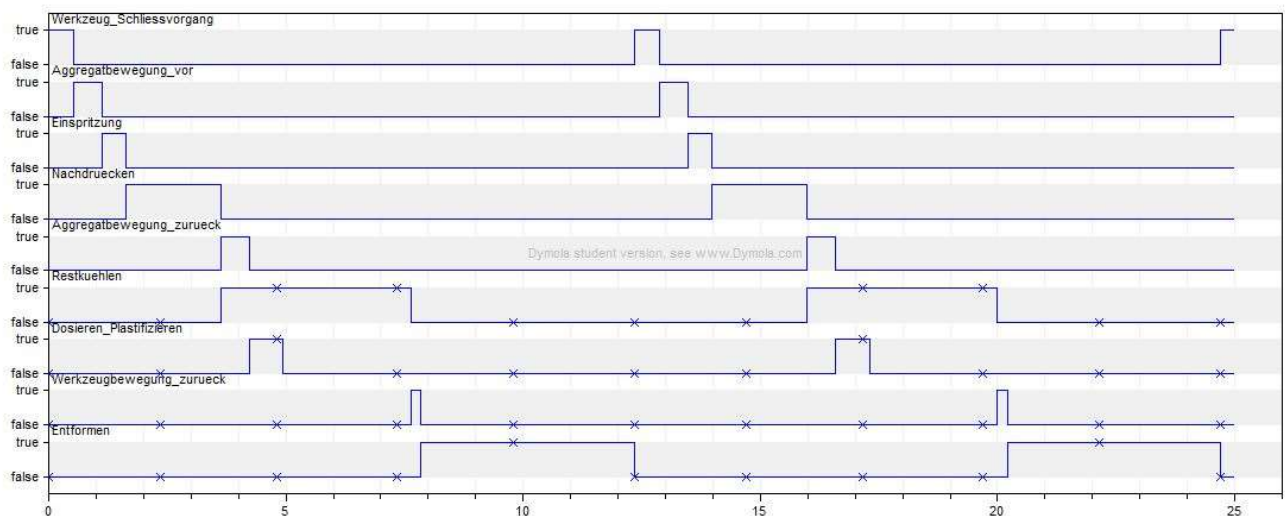


Abbildung 5.1: Blockdiagramm

So können die Ergebnisse zur Erprobung des zeitlichen Bedarfs des gesamten Zyklus überprüft werden bevor der Prozess im realen Betrieb durchgeführt werden muss. Zudem muss darauf geachtet werden, dass die Geschwindigkeiten der einzelnen Aggregate erst in einer Beschleunigungsphase erreicht werden können. Die Beschleunigungsphase geht jedoch nicht in die Berechnung der einzelnen Prozessschritte mit ein. Aus diesem Grund ist die Simulation nicht vollumfänglich realitätsgetreu. Es muss also im realen Betrieb, bei gleichen Parametern in Bezug auf die Simulation, mit einer etwas längeren Gesamtzeit des Zyklus, sowie mit längeren Zeiten einiger Prozessschritte gerechnet werden.

Die Simulation zeigt jedoch eine relativ genaue Tendenz zum realen Prozess und dessen Veränderungen bei Veränderung von Prozessparametern auf.

Bei der Verwendung des Simulationsmodells ist auf die korrekte Eingabe der Einheiten der Zahlenwerte zu achten. Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt erwähnt, ist für die Einspritzzeit ein realistischer Zahlenwert angenommen worden, damit die Simulation durchführbar ist.

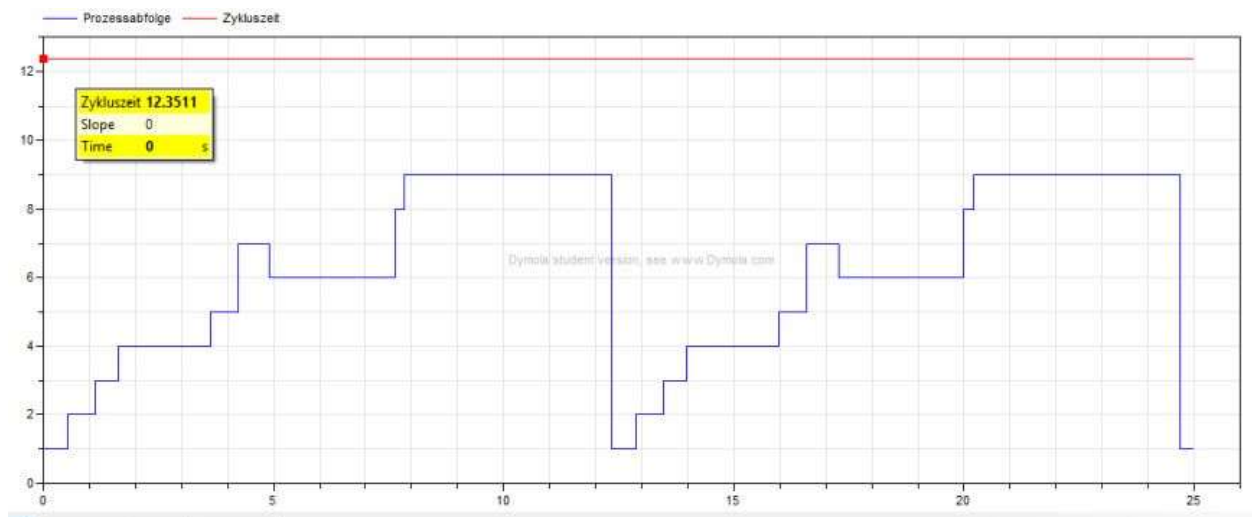


Abbildung 5.2: Stufendiagramm zeitlicher Prozessablauf

Tabelle 5.1: Legende zum Stufendiagramm

1: Schließvorgang	4: Nachdrücken	7: Dosieren
2: Aggregatfahrbewegung	5: Aggregatrückfahrbewegung	8: Öffnungsvorgang
3: Einspritzen	6: Restkühlen	9: Auswerfen

In der Abbildung 5.2 ist die erste Simulation des erstellten Modells in einem Stufendiagramm veranschaulicht. Die Simulationszeit ist wieder mit 25 Sekunden angegeben worden um mindestens zwei vollständige Zyklen abbilden zu können. Auf der horizontalen Achse des Diagramms der Abbildung 5.4 ist die Zeit abgebildet. Die vertikale Achse bildet die Prozessschritte ab. So ist dem Diagramm zu entnehmen zu welchem Zeitpunkt des Zyklus welcher Prozessschritt aktiv ist. Die Gesamtzykluszeit lässt sich ebenfalls in diesem Diagramm anzeigen und beträgt in der ersten Simulation mit den dazugehörigen Zahlenwerten 12,3511 Sekunden. Jede der einzelnen Stufen ist die Abbildung eines Prozessschrittes zur einer bestimmten Zeit im Verlauf eines gesamten Zyklus. So kann abgelesen werden wann ein bestimmter Prozessschritt beginnt und wie lange dieser andauert. Es ist möglich, dass die Schritte zwei und fünf vollständig wegfallen, wenn der Spritzgießprozess mit anliegender Düse gefahren wird. Dadurch verkürzt sich der gesamte Prozessschritt.

Auffällig in dem Stufendiagramm ist der relativ große Zeitbedarf des Auswerfens. Der Grund hierfür liegt in der Einstellung der Anzahl der Auswerferhübe. In der ersten durchgeführten Simulation ist die Anzahl der Hübe auf das Maximum der Babyplastmaschine von zehn Hüben eingestellt worden.

In der Regel ist jedoch nur ein Hub nötig um das fertige Kunststoffteil zu entformen. Auf die Ausschaltung der Aggregatbewegung soll im späteren Verlauf noch eingegangen werden ebenso wie auf die Veränderung des Diagramms und der Zeitwerte bei Veränderung der Prozessdaten.

Um die grundlegenden Zusammenhänge der Simulation zu verdeutlichen, ist in der Abbildung 5.3 zur Prozesssimulation die Nachdrückzeit geändert worden. Hierbei sollte sich die Gesamtzykluszeit nicht verändern. Genau dieser Umstand wird in dem Stufendiagramm deutlich und zeigt die korrekte Abbildung des Prozesses. Hier ist die Nachdrückzeit von zwei auf vier Sekunden angehoben. Die Gesamtzykluszeit ist auf dem gleichen Wert wie in Abbildung 5.2 Die Restkühlzeit hat sich jedoch deutlich verkürzt.

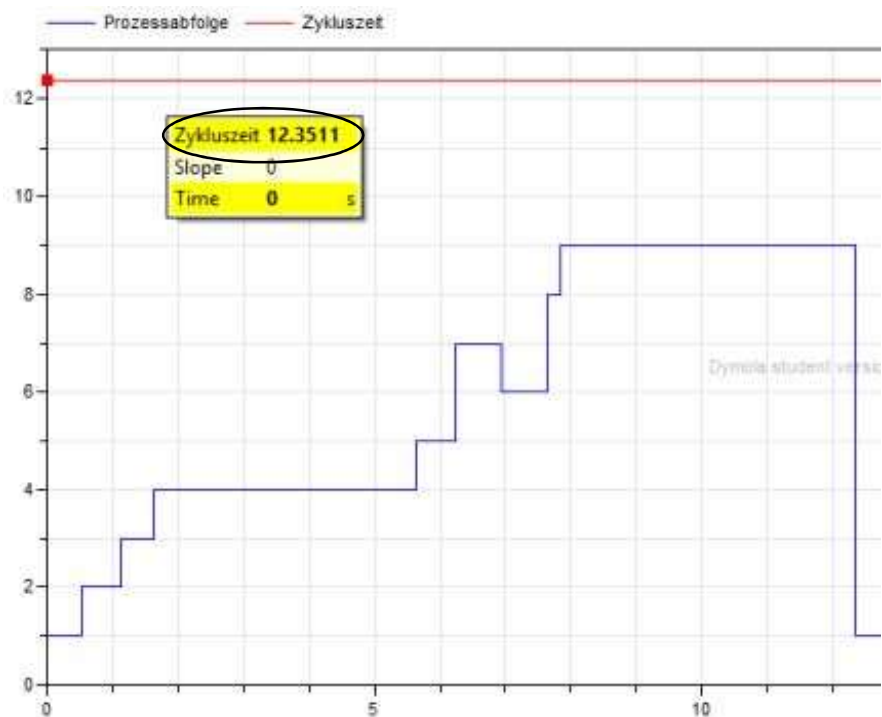


Abbildung 5.3: Änderung der Nachdrückzeit

Sollte jedoch die Gesamtkühlzeit geändert werden, so muss sich auch die gesamte Zykluszeit verändern. In dem Diagramm der Abbildung 5.4 ist die Gesamtkühlzeit von 6,5 Sekunden auf 8,5 Sekunden angehoben worden. Daraus resultiert eine Verlängerung der gesamten Zykluszeit um zwei Sekunden. Dem Diagramm ist weiterhin zu entnehmen wie sich die Restkühlzeit durch die Verlängerung der Gesamtkühlzeit geändert hat.

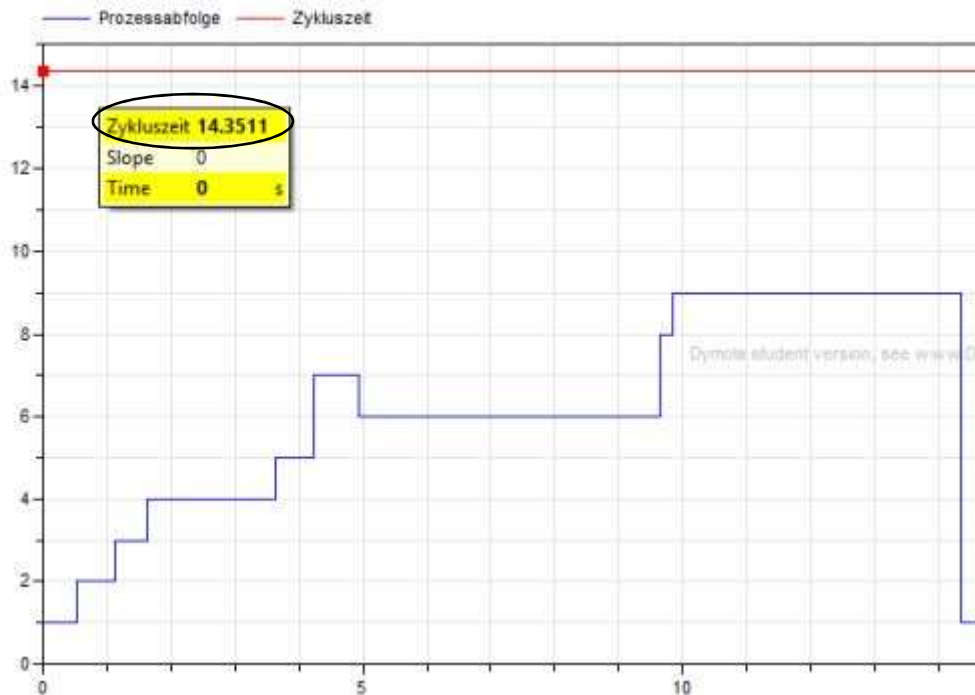


Abbildung 5.4: Änderung der Gesamtkühlzeit

Die Zeiten der einzelnen Prozessschritte sind dem Diagramm aus der Abbildung 5.2 zwar zu entnehmen, jedoch lassen sich die einzelnen Prozessschritte auch separat anzeigen und somit genauer ablesen und auswerten (vgl. Abb.: 5.5). In der unteren Abbildung ist die Zeit abzulesen welche der erste Prozessschritt, der Schritt des Werkzeugschließvorganges, benötigt. Die Zeit resultiert aus den eingegebenen Werten. In dieser Form lässt sich jeder Prozessschritt analysieren.

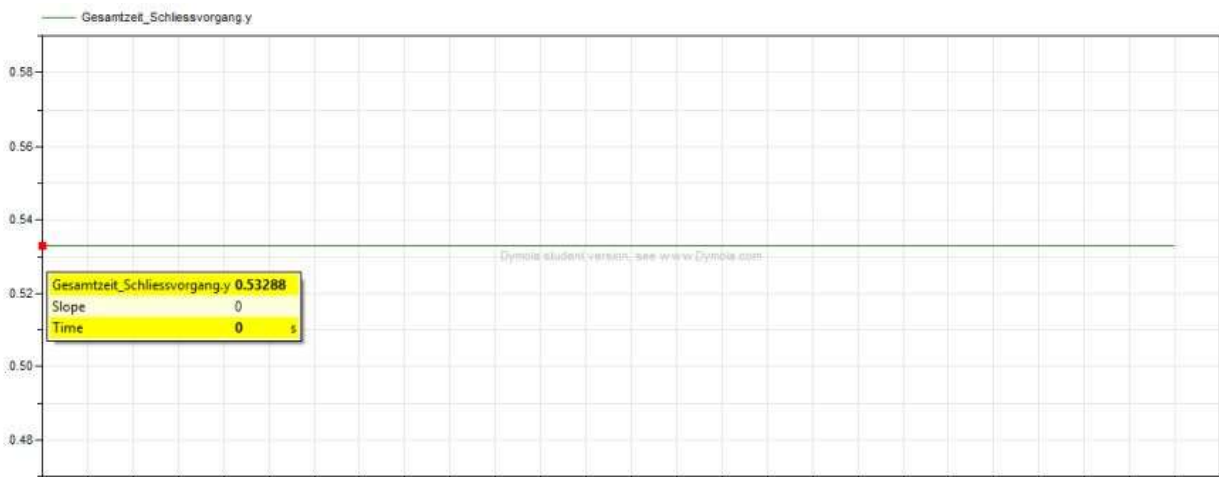


Abbildung 5.5: Schließzeit

Anhand der Dosierverzögerung, die eingestellt wird zur Verkürzung der Verweilzeit des Kunststoffes, soll im Folgenden veranschaulicht werden, wie sich das Stufendiagramm und der darin abgebildete zeitliche Ablauf des Prozesses verändert, sobald dieser Parameter angepasst wird. Ohne eine Dosierverzögerung beginnt der Prozessschritt sieben direkt nach der Aggregatabfahrbewegung (Prozessschritt fünf) (vgl. Abb.: 5.6, rote Markierung).

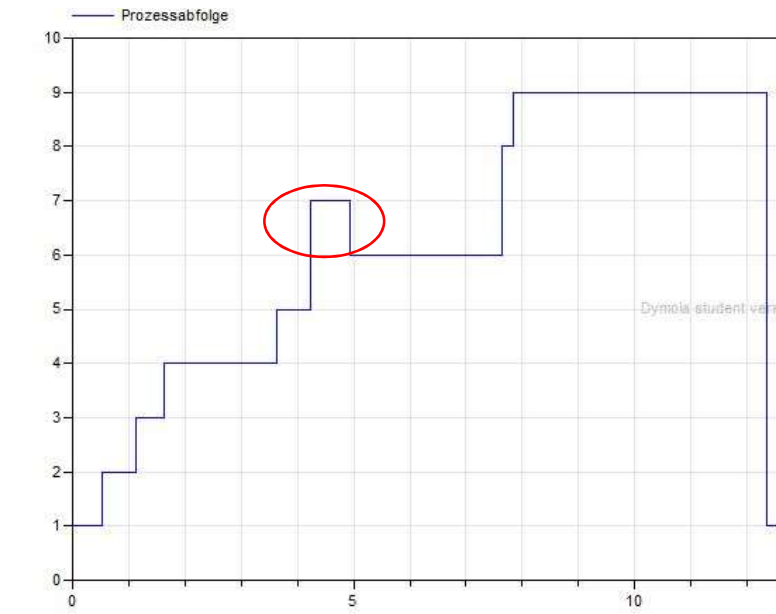


Abbildung 5.6: Keine Dosiervverzögerung

Sobald eine Verzögerung in die Steuerung eingegeben worden ist, beginnt das Dosieren zu einem späteren Zeitpunkt im Prozesszyklus und rückt somit im Stufendiagramm weiter nach rechts (vgl. Abb.: 5.7, rote Markierung). In der Abbildung ist eine Dosiervverzögerung von zwei Sekunden veranschaulicht. Hier ist noch keine Veränderung der Gesamtzykluszeit abgebildet im Vergleich zur Simulation ohne Dosiervverzögerung. In den Abbildungen 5.6 und 5.7 ist zu erkennen, dass der Prozessschritt des Restkühlens noch nach dem Dosieren weiterläuft. Erst wenn dieser beendet ist, wird das Werkzeug geöffnet und das Formteil ausgeworfen.

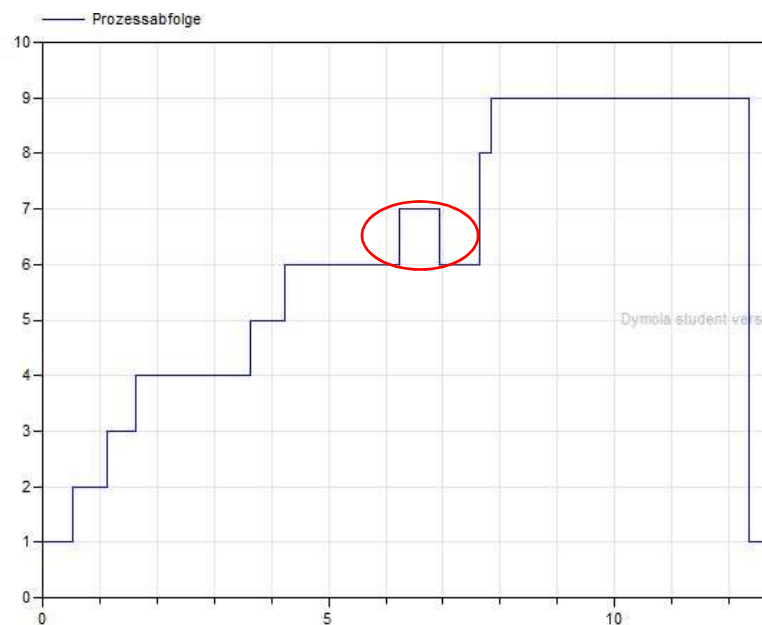


Abbildung 5.7: Dosiervverzögerung von zwei Sekunden

Verändert man die Dosiervverzögerung soweit dahingehen, dass dieser Schritt des Dosierens erst nach der voreingestellten Kühlzeit und der daraus resultierenden Restkühlzeit beendet wäre,

so muss sich die Restkühlzeit automatisch verlängern. Der Öffnungsvorgang sowie das Auswerfen beginnen dann ebenfalls erst später (vgl. Abb.: 5.8, rote Markierung). In Abbildung 5.8 ist eine Dosierverzögerung von vier Sekunden eingestellt worden. Der Schritt verlagert sich weiter nach rechts in dem Diagramm und die Restkühlzeit dauert länger an als ohne diese eingestellte Dosierverzögerung. Somit verlängert der zeitliche Ablauf des gesamten Prozesszyklus. Dies stellt den Ausnahmezustand dar, in dem das Dosieren den zeitlichen Ablauf des gesamten Prozesses beeinflusst. Dies ist in der Regel nicht der Fall.

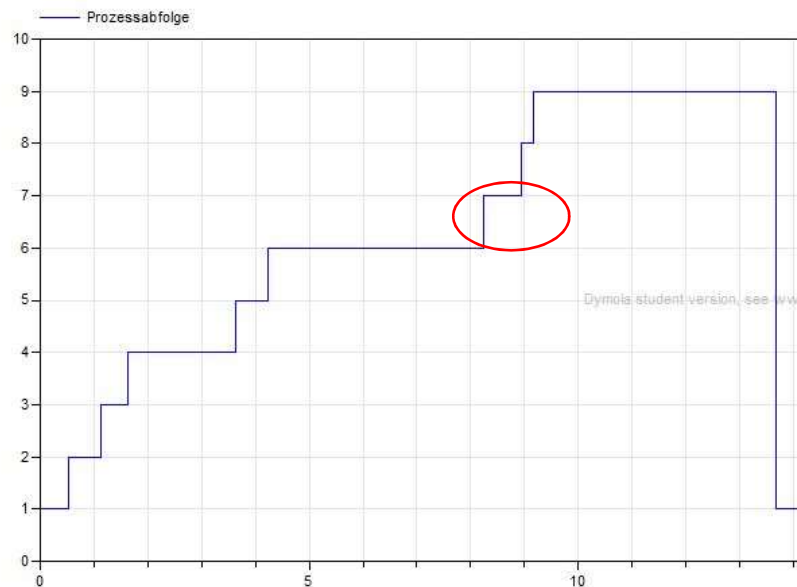


Abbildung 5.8: Dosierverzögerung von 4 Sekunden

Eine Maßnahme welche durchaus häufiger im praktischen Betrieb bei der Verwendung von Spritzgießmaschinen angewendet wird, ist das fahren mit anliegender Düse. Da hierbei die Aggregatfahrbewegung wegfällt, verkürzt sich die Gesamtzykluszeit. In der Abbildung 5.9 ist zu erkennen, wie Aufgrund der nicht stattfindenden Aggregatbewegungen, die Prozessschritte zwei und fünf vollständig wegfallen (mit schwarzen Ellipsen markiert) und die Zykluszeit verkürzt wird.

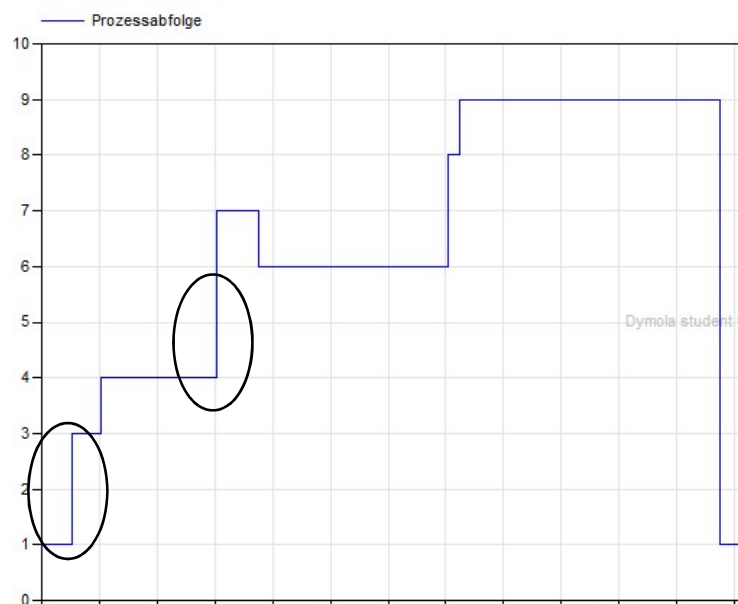


Abbildung 5.9: Stufendiagramm (fahren mit anliegender Düse)

Anhand der Diagramme die von der Software ausgegeben werden, ist zu erkennen welche Prozessschritte die gesamte Zykluszeit in welchem Maße beeinflussen. Es wird weiterhin aufgezeigt welche Prozessschritte von anderen Prozessschritten beeinflusst werden oder von diesen abhängig sind. So ist im Regelfall die Restkühlzeit nicht von der Aggregatabfahrbewegung abhängig. Dies ist nur der Fall, sollte die Aggregatverzögerung eingestellt werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Thesis wurde der zeitliche Ablauf eines Spritzgießprozesses und im speziellen eines Prozesses der mit einer Mikrospritzgießmaschine, der Firma CHRISTMANN Kunststofftechnik GmbH, analysiert. Weiterhin ist dieser Prozess mithilfe der Simulationssoftware Dymola® simuliert und abgebildet worden. Zu Beginn sollten hierfür die Grundlagen des Spritzgießens und die technischen Grundlagen der Spritzgießmaschine erarbeitet werden. Nur wenn ein grundlegendes Verständnis für die mechanischen und technischen Vorgänge geschaffen worden sind, ist es möglich den Spritzgießprozess plausibel zu modellieren und abzubilden. Weiterhin mussten zunächst Grundlagen zum Thema Simulationsprogramme und Simulationen geschaffen werden. Hier war es von Bedeutung, zu verstehen wie komplex Simulationsprogramme im Hintergrund arbeiten. Zuerst musste bezüglich des Prozesses das Verständnis erlangt werden, welche Parameter sich auf die Zeit des gesamten Ablaufes auswirken und in welchem Teil der Maschine, welche Parameter und technischen Gegebenheiten zum Ausdruck kommen. Die Simulation des gesamten Prozessablaufes stellte eine komplexe Aufgabe dar. Deshalb war es im ersten Schritt wichtig die Prozessschritte einzeln und getrennt von den anderen zu betrachten um diese besser verstehen und modellieren zu können. Im Anschluss daran galt es die Prozessschritte zu verbinden zu einem vollständigen System. Die Verbindung der einzelnen Prozessschritte zu dem vollständigen Prozessablauf stellte sich ebenfalls als sehr komplex heraus. Die Arbeitsweise des Programmes musste erst genau erarbeitet und Verstanden werden, bevor es möglich den zusammenhängenden Prozess korrekt abzubilden und zu simulieren. Dazu waren mehrere Modellierungsversuche mit den verschiedensten Blöcken aus der Dymola®-Bibliothek nötig, bevor sich letztendlich der IntegerConstant Block als der Block erwies, mit dem der gewünschte Effekt zu erzielen war. Bei den Modellierungen des gesamten Prozessablaufes mit anderen Blöcken, wie zum Beispiel einem TriggeredTrapezoid, stellte sich bei der Simulation heraus, dass nur einige der gewünschten Simulationseffekte eintrafen und andere wiederum nicht zu ermöglichen waren. Aus diesem Grund musste die Modellierung erneut mehrfach umgestaltet werden. Ebenfalls war es wichtig eine sinnvoll geordnete Struktur des Modells zu schaffen, um die Übersichtlichkeit zu gewähren. Bei der Modellierung der Prozessschritte wurde Wert darauf gelegt, dass diese möglichst nahe den Bedingungen an der Babyplastspritzgießmaschine entsprechen, um so die zeitlichen Gegebenheiten realitätsgetreu darstellen zu können.

Die erstellten Simulationsmodelle erzeugten plausible und nachvollziehbare Ergebnisse. Die Gesamtzykluszeiten entsprachen den Erwartungen und konnten mit den Daten der Babyplastmaschine durchaus verglichen werden. Jedoch sei erwähnt, dass die eingestellten Geschwindigkeiten der einzelnen Aggregate in der Realität in einer Beschleunigungsphase erst erreicht werden müssten. Da diese daraus resultierenden Zeitabweichungen bei gesamten

Zykluszeit, belaufen sich nur auf einige wenige Hundertstel einer Sekunde pro bewegliches Aggregat. Ein weiteres Problem würde auftreten sobald die Gesamtkühlzeit kleiner eingestellt wird als die Summe aus Nachdruckzeit und Einspritzzeit. Dies wird jedoch in der Regel im realen Betrieb der Maschine, nicht auf diese Weise eingestellt. Diese Einstellung ist nicht sinnvoll.

Sollte dies allerdings in der Simulation eingestellt werden, ist mit unplausiblen Ergebnissen zu rechnen. Ein weiterer Punkt ist die Zeit der Auswerferbewegung zurück in die Ausgangsposition. Diese Zeit ist nach Empfehlung aus den Datenblättern, größer als die Auswerferbewegung nach außen einzustellen. Dies ist jedoch unplausibel da beim Zurückfahren eine größere Geschwindigkeit möglich ist. Dieser Umstand konnte nicht in Erfahrung gebracht werden. Insgesamt ist aufgezeigt worden, dass die Simulation des zeitlichen Bedarfs des Spritzgießprozesses in Dymola® möglich ist und zu realistischen Ergebnissen führt. Der zeitliche Bedarf lässt sich hiermit im Vorfeld bestimmen und optimieren.

Um den zeitlichen Ablauf noch exakter abbilden zu können, ist das Simulationsmodell dahingehend zu erweitern, dass sich die Einspritzzeit von selbst aus dem Prozess ergibt. Weiterhin sind die einzelnen Drücke der jeweiligen Prozessschritte mit anzufügen. Diese beeinflussen sicher durch veränderliche Reibwerte in den Hydraulikzylindern den zeitlichen Ablauf. Temperaturen sind zusätzlich ebenfalls noch anzufügen, um den zeitlichen Ablauf exakter simulieren zu können. Die Art und Gegebenheiten des Kunststoffes in der Verwendung, beeinflusst auch in einigen Prozessschritten den zeitlichen Ablauf und sollte somit in die Berechnung einfließen.

Im nächsten Schritt ist die Simulation des zeitlichen Ablaufs an die Simulation der Verbraucher anzufügen. Denn nur aus den Werten für die Leistung der Verbraucher und den Werten der Zeit, ergibt sich ein Gesamtbild des Energieverbrauches des gesamten Spritzgießprozesses. So kann insgesamt der Energieverbrauch der Maschine im Vorfeld genau bestimmt und optimiert werden was zur einer optimierten Auslastung führt.

Literaturverzeichnis

- [BACR] Babyplast Christmann Firmenkontakt; <http://www.babyplast.de/>
- [IKV] Institut für Kunststoffverarbeitung
Aachen, <http://www.ikv-aachen.de>
- [JAR13] Joraschek, Christoph: *Spritzgießen für Praktiker, Verarbeitung- Maschine-Peripheri*
Hanser Verlag, München, 3. Auflage, 2013
- [JM01] Johannaber, Friedrich/ Michaeli Walter: *Handbuch Spritzgießen*
Hanser Verlag, München, 1. Auflage, 2001
- [JOH04] Johannaber, Friedrich: *Kunststoffmaschinenführer.*
Hanser Verlag, München, 4. Auflage, 2004
- [KÜH06] Kühn, Wolfgang: *Digitale Fabrik, Fabriksimulation für Produktionsplaner*
Hanser Verlag, München, 1. Auflage 2006
- [MGKE2009] MICHAELI, WALTER / GREIF, HELMUT / KRETSCHMER, GERNOT / EH-RING, FRANK (2009): *Technologie des Spritzgießens. Lern- und Arbeits-buch.* 3. Auflage, München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
- [MIC01] Michaeli, Walter: *Europa Lehrmittel: Kunststofftechnik*
Europa Lehrmittel Nourney, Vollmer GmbH & Co KG
Haan- Gruiten, 2001
- [MIC15] Michaeli, Walter/ Hopmann: *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*
Hanser Verlag, München, 1, Auflage 2015
- [OHL15] Ohlendorf, Friedrich: *Vorlesung Kunststoffverarbeitung*
Hochschulen für Angewandte Wissenschaften, Hamburg, 2015
- [ROS16] Rossmann, Axel: *Strukturbildung und Simulation technischer Systeme*
Band 1: Die statischen Grundlagen der Simulation
Springer Vieweg Verlag, Berlin Heidelberg, 1. Auflage 2016
- [SK04] Stitz, Siegfried/ Keller, Walter: *Spritzgießtechnik*
Hanser Verlag, München, 2. Auflage, 2004
- [Tee15] TEETZEN, KENNETH: *Energieeffizienz in der Spritzgussproduktion.*
Masterprojekt, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2015
- [Wit15] WITT, JONAS: *Energieströme in der Spritzgussproduktion.* Bachelorarbeit,
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2015
- [WAK] Wissenschaftlicher Arbeitskreis der Universitäts- Professor der
Kunststofftechnik, <http://www.wak-kunststofftechnik.de/>

TECHNISCHE DATEN - Maschinen



babyplast
CHRISTMANN

Schließeinheit	HORIZONTAL		VERTIKAL
	Einheit	babyplast 6/10 PT	babyplast 6/10 VPT
Schließkraft	kN	61,7	61,7
Öffnungskraft	kN	4	4
Holmabstand (H x V)	mm	122 x 122	holmlos
Plattenabstand min.	mm	30 (5S)	119
Plattenabstand max.	mm	140 (16S)	119 + 110
Schließgeschwindigkeit max.	mm/s	315	315
Auswerferkraft	kN	7,5	9,2
Auswerferweg (nicht einstellbar)	mm	45	50
Auswerfergeschwindigkeit max.	mm/s	140	110
zul. Werkzeuggewicht DS / AS	kg	3 / 5	3 / 8
Trockenlaufzahl	s - mm	2,1 - 110	2,4 - 110

allgemeine Daten	
Elektrischer Anschluss (Vorsicherung)	3*400V 50/60 Hz 16A 3*400V 50/60 Hz 16A
Anschlussleistung	kW 2,75 2,75
Maschinenabmaße (L x B x H)	m 1,1 x 0,6 x 0,75 1,1 x 0,6 x 1,35
Nettogewicht	kg 130 350
Öltankfüllung (HLP 46 feinstgefiltert)	l 16 16
Systemdruck Hydraulik	bar 130 130
Ø spezifischer Energieverbrauch	kWh/kg < 0,2 < 0,2
Geräuschpegel ca.	dB (A) < 70 < 70

TECHNISCHE DATEN - Spritzaggregate



babyplast
CHRISTMANN

Spritzeinheit	Einheit	Standard											PLUS	
		10	12	14	16	18	18	20	22	24	24	24	24	
Kolbendurchmesser	mm	10	12	14	16	18	18	20	22	24	24	24	24	
Dosierhub max.	mm	4,7	6,8	9,2	12,1	15,3	20,4	25,1	30,4	36,2	36,2	36,2		
Hubvolumen max.	cm³	2090	1850	1340	3090	815	1585	1250	960	830	680	680		
Einspritzdruck max.	bar	3,95	3,40	7,70	10,00	12,72	6,76	6,52	10,52	12,78	13,16	13,16		
Einspritzgeschwindigkeit max.	mm/s	3,95	3,40	7,70	10,00	12,72	6,76	6,52	10,52	12,78	13,16	13,16		
Einspritzstrom max.	cm³/s	3,95	3,40	7,70	10,00	12,72	6,76	6,52	10,52	12,78	13,16	13,16		
Plattfließenleistung für PP bei 12 10S	g/s	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80		
max. Plattendickeleistung	kg/h	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94		
Aggregatdruck	mm	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75		
Dosenanlegekraft	kN	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5		
Anzahl Heitzonen	Stück	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3		
Installierte Heizleistung	kW	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3		
Nutzvolumen Materialbrichter	l	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5		

Anhang

TECHNICAL DATA - BABYPLAST, UAI & VERTICAL MACHINE.

	10	12	14	16	18	16*	18*	20*	22	24*
Piston diameter (mm)	4	6,5	9	12	15	16*	20*	25*	30	36*
Volume (cm³)	2.650	1.830	1.340	1.030	815	1.535*	1.250*	983*	830	680*
Injection pressure (bar)	4	5,7	7,8	10,2	12,9	6,8*	8,5*	10,7*	12,7	15,2*
g (cm³/sec)										

*Only for the AUGMENTED UAI version

	BABYPLAST 6/10P	VERTIKAL	UAI	AUGMENTED UAI
Dimensions	1100x500x70 mm	700x1150x1700mm	500x790x1030mm only control unit	500x790x1030mm only control unit
Clamp force	61,7 kN	61,7 kN	-	-
Max. clamp speed	315 mm/sec	315 mm/sec	-	-
Opening force	4 kN	4 kN	-	-
Opening stroke	30 - 110 mm	30 - 110 mm	-	-
Ejector force	7,5 kN	9,2 kN	-	-
Ejector stroke	45 mm	45 mm	-	-
Injection carriage force	7,5 kN	7,5 kN	7,5 kN	7,5 kN
Injection carriage speed	140 mm/sec	140 mm/sec	140 mm/sec	140 mm/sec
Hydraulic pressure	130 bar	130 bar	130 bar	130 bar
Oil tank capacity	12 l	12 l	12 l	12 l
Dry cycle	2,1 sec	2,4 sec	2,1 sec	2,1 sec
Purification rate (PP)	1,8 g/sec	1,8 g/sec	1,8 g/sec	1,8 g/sec
Injection speed	50 mm/sec	50 mm/sec	50 mm/sec	33,5 mm/sec
Ejector speed out	140 mm/sec	110 mm/sec	-	-
Ejector speed back	310 mm/sec	175 mm/sec	-	-
Hopper capacity	3 litres	3 litres	3 litres	3 litres
Power	3 Kw	3 Kw	3 Kw	3 Kw
Heater capacity - Plast.	1000 W	1000 W	1000 W	1100 W
Heater capacity - Cham.	460 W	460 W	460 W	460 W
Heater capacity - Nozzle	150 W	150 W	150 W	150 W
Weight	150 Kg	350 Kg	Control unit 105Kg + G.I. 25Kg	Control unit 105Kg + G.I. 37 Kg



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

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

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

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

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

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Dedelow

Vorname: Mark

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

Zeitliche Simulation eines Spritzgießprozesses

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

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

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

Hamburg

Ort

17.04.2017

Datum

Unterschrift im Original