

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Medizintechnik

Erhöhung der Reproduzierbarkeit des Spritzgießprozesses durch verbesserte Plastifizierkonzepte

Dipl.-Ing. Univ. Jiqing Liu

Vollständiger Ausdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. Rafael Macián-Juan, Ph.D.

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. med., Dr.-Ing. habil. Erich Wintermantel

2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Die Dissertation wurde am 21.12.2009 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 26.03.2010 angenommen.

Überblick

Aufgrund des stets steigenden Wettbewerbs sind Spritzgießverarbeiter gezwungen, die Reproduzierbarkeit des Spritzgießprozesses kontinuierlich zu erhöhen. Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei Ansätze zur Erhöhung der Reproduzierbarkeit des Spritzgießprozesses vorgestellt. Um die Schwankung der in das Plastifiziersystem zuzuführenden Energie zu minimieren, soll die Dissipationsenergie während der Plastifizierphase geregelt werden. Die Schneckenantriebsleistung und die Plastifizierzeit werden nach den ermittelten Mustern separat geregelt, wodurch die Dissipationsenergie konstant bleibt. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Erhöhung der Reproduzierbarkeit durch Konstanthaltung der Dissipationsenergie erzielt werden kann. Darüber hinaus wird eine von Standardmaschinen adaptierbare Spritzeinheit für das Mikrospritzgießen entwickelt. Die Entwicklung der Mikrospritzeinheit basiert auf dem Prinzip "Schneckenvorplastifizierung und Kolbeneinspritzung". Aufgrund der Besonderheit der Adaptierbarkeit ist es erforderlich, dass eine Rückstromsperre im Einspritzkolben integriert werden soll. Durch eine neuartige Rückstromsperre kann der Durchmesser des Einspritzkolbens auf 6,5 mm reduziert werden, wodurch die Einspritzgenauigkeit deutlich erhöht wird. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass mit der entwickelten Mikrospritzeinheit eine hohe Reproduzierbarkeit für die Herstellung von Mikrobauteilen erzielt werden kann.

Abstract

Plastics processors are forced to continually increase the reproducibility of the injection molding process due to the permanently increasing competition. Two approaches are introduced in this work to increase the reproducibility of the injection molding. The dissipation energy should be controlled in order to reduce the fluctuation of system energy. The drive power of the screw and the plasticizing time are separately controlled according to the samples. The dissipation energy is consequently constant. The result of investigation shows, that the increase of the reproducibility can be achieved by constant keeping of the dissipation energy. In addition, an injection unit which is on standard machine adaptable was developed for the micro injection molding. The development of a micro injection unit bases on the principle "screw preplasticizing and piston injection". The diameter of the injector piston is reduced to 6.5 mm because of the novel non-return valve, which significantly increases the injection precision. The experiment shows that a high reproducibility can be achieved for the manufacture of micro components with the developed micro injection unit.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Medizintechnik (MedTech) an der Technischen Universität München in den Jahren 2006 bis 2009. Sie wurde von der Krauss-Maffei Technologies GmbH im Rahmen unterschiedlicher Forschungsprojekte gefördert.

Herrn Professor Dr. med. Dr.-Ing. habil. Erich Wintermantel, dem Leiter des Lehrstuhls, gilt mein ganz besonderer Dank für die wohlwollende Begleitung und Unterstützung der Arbeit, ohne die diese Dissertation nicht möglich gewesen wäre. Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh danke ich für die Übernahme des Co-Referates und Herrn Professor Dr. Rafael Macián-Juan für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfung.

An dieser Stelle möchte ich mich auch bei allen Kolleginnen und Kollegen, insbesondere bei Dr.-Ing. Daniel Ammer, für die vielen aufschlussreichen Gespräche bedanken. Mein herzlicher Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Ingo Jumpertz und Herrn Dipl.-Ing. Erhard Krampe für die ständige Hilfestellung und die sorgfältige Korrektur der Arbeit. Am Lehrstuhl für Medizintechnik habe ich ein offenes, angenehmes und kreatives Arbeitsklima gefunden. Ich danke für die schöne gemeinsame Zeit am MedTech.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Martin Würtele der Krauss-Maffei Technologies GmbH dafür, mir diese Arbeit ermöglicht, mich auf dem Weg zu ihrem Abschluss angeleitet und mir wertvolle Unterstützung geleistet zu haben.

Weiterhin ganz herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. K. Bauer, Herrn M. Eggendinger, Frau Dipl.-Ing. D. Frommel, Herrn Dipl.-Ing. F. Eilhardt, Herrn Dipl.-Ing. H. Haag, Herrn Dipl.-Ing. T. Hungerkamp, Herrn Dipl.-Ing. Huster, und Herrn Dipl.-Ing. P. Schweißstahl für die fachliche Unterstützung und die angenehme Zusammenarbeit.

Mein herzlicher Dank gilt den studentischen Hilfskräften Biyuan Chen, Nicole Garbers, Jian Ding, Johannes Neumayer, Huiquan Zhang und Xiaojin Zhang für den engagierten Arbeits-einsatz.

Ohne den Rückhalt und die stete Unterstützung meiner Frau Ruifen Geng und meiner Eltern hätte diese Arbeit nicht entstehen könnten. Bei ihnen möchte ich mich in ganz besonderem Maße bedanken.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
1.1	Einleitung.....	1
1.2	Zielsetzung	3
2	Grundlagen.....	4
2.1	Spritzgießprozess	4
2.2	Plastifizierung	5
2.3	Zustandsgröße: Massetemperatur	7
2.4	Dissipationsenergie	8
2.5	Einflüsse auf die Reproduzierbarkeit	10
2.5.1	Spritzeinheit	10
2.5.2	Prozessführung	12
2.5.3	Material und Umgebung	14
2.6	Erhöhung der Reproduzierbarkeit.....	15
2.7	Begriff des Mikrospritzgießens.....	17
2.8	Problematik des Mikrospritzgießens	18
2.9	Anlagentechnik für das Mikrospritzgießen	19
3	Plastifizierung mit konstanter Dissipationsenergie	25
3.1	Analyse der Energiebilanz beim Spritzgießen.....	25
3.2	Regelung der Dissipationsenergie	28
3.2.1	Regelung der Schneckenantriebsleistung	31
3.2.2	Regelung der Plastifizierzeit	34
3.3	Versuchseinrichtungen	37
3.4	Experimentelle Ermittlung der Regelparameter.....	39
3.4.1	Schneckendrehmoment und Regelparameter k_{Md}	40
3.4.2	Schneckenrücklaufgeschwindigkeit und Regelparameter k_{Vs}	41
3.5	Ermittlung der Referenzkurven	43
3.5.1	Referenzkurve der Schneckenantriebsleistung.....	44

3.5.2	Referenzkurve der Schneckenrücklaufgeschwindigkeit	46
3.6	Verifikation der Regelungsqualität	48
3.7	Zweistufige Plastifizierung	52
3.8	Steigerung der Prozessqualität durch Regelung der Dissipationsenergie ..	55
3.9	Fazit und Ausblick	58
4	Adaptierbare Plastifiziereinheit für das Mikrospritzgießen.....	61
4.1	Anforderungen an die Mikro-Spritzeinheit.....	61
4.2	Konzeptentwicklung.....	63
4.2.1	Spritzeinheiten mit konischer Schnecke	63
4.2.2	Spritzeinheiten mit zylindrischer Schnecke.....	73
4.2.3	Rückstromsperre	76
4.3	Konstruktion der Plastifizierschnecke	85
4.4	Funktionsüberprüfung der Mikro-Spritzeinheit an einem Prototyp	89
4.4.1	Plastifizierungsversuche	90
4.4.2	Spritzgießversuche.....	92
4.5	Thermische Optimierung der Spritzeinheit	100
4.6	Fazit	105
5	Zusammenfassung	107
	Literatur	109
	Formelzeichen	116
	Anhang.....	119

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Einleitung

Das Spritzgießverfahren dient der vollautomatischen Herstellung von Formteilen komplexer Geometrie. Der Werkstoff, meist Kunststoff, wird mit einer Spritzgießmaschine in einer Spritzeinheit plastifiziert und in ein Werkzeug eingespritzt. Gebrauchsfertige Formteile werden nach der Abkühlung entformt. Etwa 60 % aller Kunststoffverarbeitungsmaschinen sind Spritzgießmaschinen [133]. Auf ihnen werden Formteile mit sehr niedrigen Massen im mg-Bereich (Uhren-Industrie) bis hin zu großen Massen im zwei - zurzeit sogar auch dreistelligen kg-Bereich hergestellt [144].

Formteile mit zunehmender Komplexität und Funktionalität werden durch die stetige Weiterentwicklung der Maschinen- und der Verfahrenstechnik ermöglicht. Die Sonderverfahren, wie z. B. die Dünwandtechnik, das Mehrkomponentenspritzgießen und die Fluidinjektionstechnik vergrößern die Freiheit bei der Formteilgestaltung erheblich und führen zu neuen innovativen Produkten. Gleichzeitig ist jedoch zu beobachten, dass die Kunststoffverarbeiter manchmal an die Grenzen des derzeit Machbaren stoßen. Die extremen Leistungsanforderungen an die eingesetzte Maschinenteknik, die Komplexität der Produktionssysteme sowie die Informationsflüsse in der gesamten Fertigung können zu unkontrollierten Effekten führen, die zum Beispiel nicht erwartete hohe Ausschussquoten zur Folge haben [82]. Im Vordergrund steht das Bestreben, die Qualitätsschwankungen zu minimieren. Die Voraussetzung dafür ist die Steigerung der Reproduzierbarkeit der qualitätsrelevanten Prozessparameter und die Verbesserung der Maschinenteknik.

Obwohl moderne Spritzgießmaschinen heute voll geregelt sind, ist es häufig kaum möglich, mit konstanten Maschineneinstellungen, die bei der Prozessoptimierung ermittelt wurden, eine langzeitige Qualitätskonstanz zu erzielen. Das lässt sich darauf zurückführen, dass die Rohstoffeigenschaften, die Umgebungsbedingungen und das Maschinenverhalten teilweise sehr stark über die Zeit schwanken. Vorteilhaft ist, wenn die Maschinensteuerung diese Änderung erkennt und die Maschineneinstellung selbst anpassen kann, um die Qualität der Formteile konstant zu halten.

Für das Spritzgießverfahren spielt der Schmelzestand eine entscheidende Rolle. Eine Erhöhung der Massetemperatur führt zur Reduzierung der Viskosität. Dadurch ändert sich die Fließfähigkeit der Schmelze beim Einspritzen. Nach dem pVT-Diagramm [54,85,89,122] wird die Schmelzedichte von der Massetemperatur und vom Massedruck beeinflusst. Infolge

der Schwankung der Massetemperatur und des Massedrucks vergrößert sich die Streuung des Bauteilgewichts. Daher sind die Einflüsse des Schmelzezustands auf die Reproduzierbarkeit des Spritzgießprozesses vielseitig und ausschlaggebend. Der Schmelzezustand wird maßgeblich von der Plastifizierung beeinflusst. Standardmäßig werden dabei die Drehzahl, der Staudruck und der Dosierweg an der Maschine eingestellt. Die Methode liefert meistens gute Ergebnisse, jedoch kann der Schmelzezustand nicht konstant gehalten werden. In [132] wird berichtet, dass Massetemperaturunterschiede von 14 °C gemessen wurden. Um die Stabilität des Schmelzezustands zu erhöhen, ist eine verbesserte Regelung der Plastifizierung erforderlich.

Eine weitere Problematik beim Kunststoffspritzgießen zeigt sich im Bereich des Mikrospritzgießens. Um kleinste Bauteile im mg-Bereich herstellen zu können, stoßen herkömmliche Spritzgießmaschinen mit Schneckeneinspritzung schnell an ihre Grenzen. Ein Grund dafür liegt in der ungenauen Dosierung durch die großen Schneckendurchmesser. Eine Verringerung des Schneckenkerndurchmessers wäre eine einfache und schnelle Lösung. Jedoch lässt sich der Schneckendurchmesser aufgrund der mechanischen Festigkeit und des Einzugsverhaltens nicht beliebig reduzieren. Der geringste Schneckendurchmesser beträgt zurzeit etwa 14 mm (teilweise 12 mm) [58,69,76,118,130,150]. Der theoretische Dosierweg beim Einspritzen kleinster Schussgewichte lässt sich mit diesem Durchmesser kaum realisieren, da Antriebe und Positionssensorik keine adäquate Auflösung der Bewegungen mehr erlauben.

Um die Marktchance des ständig steigenden Bedarfs an Mikrobauteilen zu nutzen, haben die Spritzgießmaschinenhersteller in den letzten Jahren einige spezielle Mikrospritzgießmaschinen auf den Markt gebracht. Dabei wird ein Kolben statt einer Schnecke als Einspritzelement verwendet. Solche Maschinen wurden fast ausschließlich für Mikrospritzgießanwendungen entwickelt und sind deshalb für die Herstellung von Formteilen, deren Gewichte größer als ein Gramm sind, nur bedingt geeignet. Dies bedeutet für Spritzgießverarbeiter einerseits neue Investitionen und andererseits geringe Kapazitätsauslastungen der Maschinen. Vor diesem Hintergrund ist eine auf eine Standardspritzgießmaschine adaptierbare Spritzeinheit, die für die Fertigung von Mikroteilen geeignet ist, nützlich, da durch den einfachen Austausch der Spritzeinheit größere Investitionen für den Kunden vermieden werden. Um diese Idee zu realisieren, soll hier ein neuartiges Plastifizierkonzept entwickelt werden.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel der Arbeit ist eine Erhöhung der Reproduzierbarkeit des Spritzgießprozesses durch verbesserte Plastifizierkonzepte. Dies erfolgt in zwei Teilschritten:

- Plastifizierung mit konstanter Dissipationsenergie
- Neues Plastifizierkonzept für das Mikrospritzgießen.

Üblicherweise wird die Plastifizierung durch Maschineneinstellgrößen (Drehzahl, Staudruck und Dosierweg) gesteuert. Jede Einstellgröße wird separat geregelt. Die neue Regelung der Plastifizierung hat die Aufgabe, die Schwankungen des Schmelzestands zu reduzieren. Dabei werden die Schneckenantriebsleistung und die Plastifizierzeit geregelt, so dass eine konstante eingeführte Dissipationsenergie erzielt wird. Eine konstante Energiezufuhr führt zu einer konstanten Schmelztemperatur. Die Einstellgrößen (Drehzahl und Staudruck) bleiben dabei während der Plastifizierphase nicht mehr konstant, sondern werden je nach Betriebszustand ständig angepasst. Mit dieser Regelungsstrategie wird eine Steigerung der Reproduzierbarkeit erzielt. Die Ergebnisse werden in Kapitel 3 diskutiert.

Darüber hinaus soll eine auf Standardmaschinen adaptierbare Spritzeinheit für die Herstellung von Mikrobautteilen entwickelt werden. Durch einfachen Einbau der Mikro-Spritzeinheit auf Standardmaschinen soll die Herstellung von Mikrobautteilen ermöglicht werden. Das Plastifizierkonzept muss die hohe Anforderung an die Dosiergenauigkeit erfüllen. Gleichzeitig muss keine Anpassung in Bezug auf die Steuerung und der Antriebstechnik an der Spritzgießmaschine durchgeführt werden. Dies wird in Kapitel 4 erläutert.

2 Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Spritzgießprozess

Das Spritzgießen gehört zu den Urformverfahren und stellt bei der Herstellung von Kunststoffbauteilen eines der bedeutendsten Fertigungsverfahren dar. Die Vorteile dieser Technologie liegen vor allem in der vollautomatischen und wirtschaftlichen Herstellung von Kunststoffbauteilen. Sie ist daher prädestiniert für die Massenfertigung. Als typische thermoplastische Spritzgießbauteile sind medizinische Einmalartikel, Bauteile an Fahrzeugen, Getränkekisten oder auch die Compact Disc (CD) zu nennen.

Die Geschichte der Spritzgießmaschine reicht bis ins Jahr 1872 zurück [44]. Die anfangs übliche Kolbenspritzgießmaschine wurde ab 1956 durch Maschinen mit Schneckenplastifizierung und -einspritzung abgelöst [45]. Durch die damit verbundene außerordentliche Verbesserung der Arbeitsweise ist es möglich geworden, qualitativ bessere Formteile herzustellen und thermisch empfindlich Kunststoffe wie z. B. Polyvinylchlorid (PVC) durch Spritzgießen zu verarbeiten [38]. Durch kontinuierliche technische Weiterentwicklung ist das Spritzgießen ein wichtiges Fertigungsverfahren zur Herstellung von Kunststoffformteilen geworden.

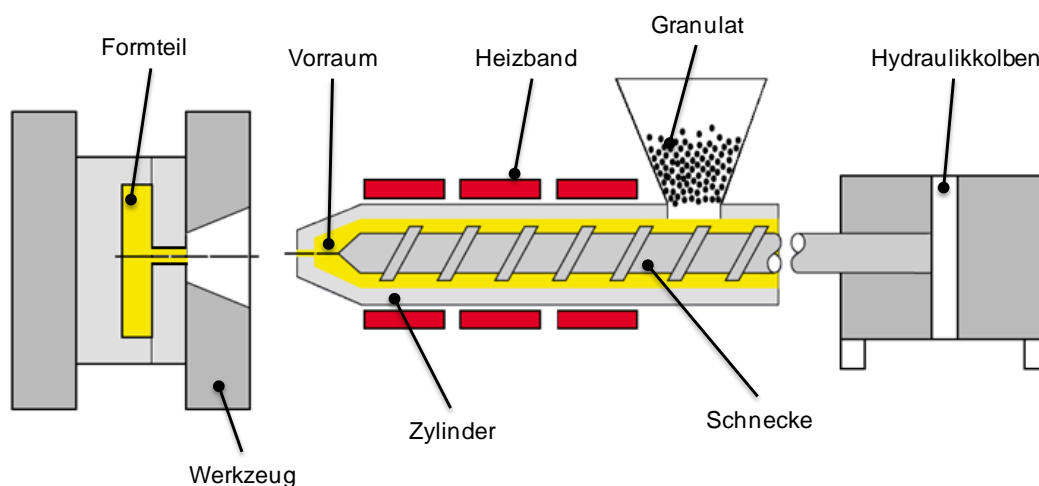


Abb. 1 Schematische Darstellung des Spritzgießprozesses

Das Kunststoffgranulat wird vom Plastifizierzylinder eingezogen und in Richtung Schneckenorraum gefördert. Der Kunststoff wird durch äußere Wärmezufuhr und Dissipationsenergie aufgeschmolzen und anschließend in die Werkzeugkavität eingespritzt. Nach der Kühlung wird das Formteil entformt (nach [100]).

Die beim Spritzgießen eingesetzten Maschinen arbeiten meist nach dem Schneckenprinzip. Abb. 1 veranschaulicht die Anordnung der prozessrelevanten Maschinenteile. Dabei wird das Kunststoffgranulat aus dem Trichter über eine Schnecke gefördert und durch äußere Wärmezufuhr sowie Dissipationsenergie aufgeschmolzen. Während der Plastifizierung sammelt sich die Kunststoffschmelze im Schneckenorraum, dadurch wird die Schnecke entgegen des Staudrucks zurück geschoben. Erreicht die Schnecke die definierte Position, ist die Dosierung beendet. Anschließend wird die dosierte Schmelze durch eine translatorische Schneckenbewegung in das temperierte Werkzeug eingespritzt. Nach der volumetrischen Füllung des Werkzeugs wird die Schmelze unter dem Nachdruck komprimiert. Dadurch wird die beim Abkühlen entstehende Volumenschwindung weitgehend ausgeglichen. Während der Restkühlzeit kühlt das Formteil im Werkzeug weiter ab, bis eine ausreichende Entformungsstabilität erreicht ist. Nach der Öffnung des Werkzeugs wird der Spritzling durch Auswerfer und Abstreifer entformt. Danach kühlt das Formteil außerhalb des Werkzeugs auf Umgebungstemperatur ab [55,90,120].

Um Automatisierungsgrad und Produktqualität zu erhöhen, wird in der Regel die Spritzgießproduktion noch durch zahlreiche Peripheriegeräte erweitert. Zu den bedeutsamsten Geräten gehören Materialvortrocknungs- und Fördereinrichtungen, Temperiergeräte zur Regelung der Werkzeugtemperatur, Entnahme- und Handlingsysteme für Formteile sowie Nachbearbeitungsmaschinen z. B. in Form von Bedruckung o.Ä. [2,42,56]. Um eine geringe Prozessschwankung zu erzielen, ist eine konstante Trocknung und Förderung des Rohmaterials wichtig, damit werden gleichbleibende Eingangsbedingungen für den Spritzgießprozess geschaffen wird.

2.2 Plastifizierung

Bei der Plastifizierung wird das Kunststoffgranulat durch die drehende Schnecke in die Spritzeinheit eingezogen und in Richtung des Schneckenorraums gefördert. Auf dem Weg nach vorne wird das Material durch die Drehung der Schnecke mit der heißen Zylinderwand in Berührung gebracht. Außerdem entsteht zusätzliche durch Friktion (Scherung in der Formmasse) erzeugte Wärme (Dissipationsenergie). Die in den Schneckenorraum transportierte Kunststoffschmelze schiebt die Schnecke mit zunehmender Füllung des Orraums immer weiter zurück, bis der eingestellte Dosierweg erreicht ist. Die Schmelze kann dann mit der Schnecke, die jetzt als Kolben wirkt, in die Werkzeugkavität gespritzt werden. Während der Abkühlung des Formteils kann mit dem Plastifizieren der Formmasse für den nächsten Schuss begonnen werden.

Die Plastifizierschnecke ist in einer Spritzgießmaschine die wesentliche Verfahreseinheit [46], da mit ihr der Kunststoff in eine spritzfähige, homogenisierte Masse überführt werden soll. Ein wesentlicher Vorteil der Schneckenplastifizierung gegenüber der Kolbenplastifizierung liegt darin, dass eine bessere Schmelzeshomogenität innerhalb einer kürzeren Verweilzeit erzielt wird. Unter der Verweilzeit versteht man die Zeit, die das Material von der Einführung in die Einzugszone bis zum Verlassen der Düse benötigt. Eine zu hohe Verweilzeit führt zu thermischer Überbeanspruchung des Materials und dadurch zum Abfall der mechanischen Festigkeit.

Obwohl jeder Kunststoff genau genommen ein speziell auf ihn zugeschnittenes Schneckenprofil erfordern würde, hat es sich in der Praxis gezeigt, dass man für die meisten Kunststoffe mit einer Standardschnecke auskommt [40,47,137]. Eine Standardschnecke wird in drei Zonen (Einzugszone, Kompressionszone und Meteringzone) aufgeteilt. In der Regel beträgt die Schneckenlänge $20D$ ($20 \times$ Durchmesser) [11,40,47,145]. Eine kürzere Schnecke weist eine große Streuung der Massetemperatur auf [11]. Eine längere Schnecke vergrößert die Verweilzeit, was zu Abbaureaktionen führen kann. Beim Plastifiziervorgang verschiebt sich die Schnecke unter dem Staudruck nach hinten (siehe Abb. 1). Somit nimmt die wirksame Schneckenlänge stetig ab. Das hat negativen Einfluss auf die Schmelzequalität und die Plastifizierleistung. Daher wird empfohlen, dass der Dosierweg zwischen $1D$ und $4D$ liegen soll [48]. Je nach Anforderungen werden spezielle Schnecken verwendet. Nennenswert ist hierbei die Barrierschnecke, welche die Mischwirkung und dadurch die Plastifizierleistung erheblich erhöhen kann [49,110].

Für den Plastifiziervorgang werden die Schneckendrehzahl, der Staudruck und der Dosierweg in der Maschinensteuerung eingestellt. Die Schneckendrehzahl ist für das thermische, mechanische und homogene Aufbereiten des Kunststoffs verantwortlich. Durch eine höhere Drehzahl kann die Plastifizierleistung erhöht werden. Jedoch führt eine zu hohe Drehzahl zu thermischer sowie mechanischer Schädigung des Materials und zu einer hohen Massetemperaturdifferenz über den Schneckenhub. Daher soll die Schneckendrehzahl und somit die Umfangsgeschwindigkeit der Schnecke eine bestimmte Grenze nicht überschreiten [6,13,50,67]. Ein erhöhter Staudruck verbessert die Schmelzeshomogenität. Zu hoher Staudruck führt jedoch zu Materialschädigung wegen zu starker Friktion, zu niedriger Plastifizierleistung und zu langer Plastifizierzeit. Um einerseits das Material möglichst schonend zu verarbeiten, und andererseits konstante Zykluszeit und Prozessführung zu erzielen, sollte die resultierende Plastifizierzeit ca. 10-20 % kürzer sein als die Kühlzeit.

2.3 Zustandsgröße: Massetemperatur

Die Massetemperatur beschreibt die Temperatur der Schmelze, die sich im Schnecken-
vorraum und im Düsenbereich befindet. Sie ist eine wichtige Zustandsgröße des Spritz-
gießens, da die Schmelzedichte, die Viskosität, das Fließverhalten beim Einspritzen und das
Kühlverhalten im Werkzeug maßgeblich von der Massetemperatur beeinflusst werden. Die
Massetemperatur ist stark von der Zylindertemperatur abhängig. Obwohl man in der Praxis
von einer konstanten Temperatur im Schneckenorraum ausgeht, entspricht die Zylinder-
temperatur im allgemeinen nicht der Massetemperatur [65]. Der Grund liegt darin, dass die
Verarbeitungsparameter (Staudruck, Drehzahl und Prozesszeiten) die Massetemperatur
erheblich beeinflussen können.

Da die effektive Schneckenlänge während der Plastifizierung kontinuierlich abnimmt, liegt
ein axiales Temperaturprofil (Abb. 2) im Vorraum vor. Das ist darauf zurückzuführen, dass
die zuletzt aufgeschmolzene Kunststoffschmelze wegen kürzerer Schneckenlänge eine
geringere Wärme von den Heizbänden und über die Dissipationsenergie aufnehmen kann.
Nach [72,84,129,147] entsteht auch ein radiales Temperaturprofil im Schneckenorraum.

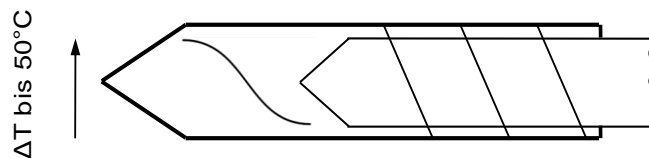


Abb. 2 **inhomogene Massetemperaturverteilung im Schneckenorraum**

Das Bild zeigt eine typische Massetemperaturverteilung im Schneckenorraum
(nach [64]).

Die Massetemperatur ist nicht nur innerhalb eines Spritzgießzyklus inhomogen, sondern weist
auch Schwankungen über die Zyklen auf. Nach dem pVT-Diagramm sinkt die Schmelzedichte
mit steigender Temperatur, da sich der Kunststoff mit steigender Temperatur ausdehnt. Die
Schmelzeviskosität wird ebenfalls von der Massetemperatur beeinflusst. Mit kleiner
werdender Massetemperatur steigt der Druckbedarf zur Werkzeugfüllung aufgrund
zunehmender Schmelzeviskosität. Gleichzeitig ist die erforderliche Kühlzeit kürzer. Daher
haben Schwankungen der Massetemperatur im Schneckenorraum Schwankungen des Füll-
und Abkühlvorgangs im Werkzeug zur Folge. In [32] wird beobachtet, dass die Erhöhung der
Massetemperatur zur Erhöhung des Bauteilgewichts führt. Aus diesen Gründen und um die
Reproduzierbarkeit des Spritzgießprozesses zu erhöhen, soll die Schwankung der Masse-
temperatur minimiert werden.

Abb. 3 zeigt, dass die Massetemperatur stark von der Schneckendrehzahl abhängig ist. Mit zunehmender Drehzahl verbleibt das Material kürzer im Plastifiziersystem. Da die durch die Heizbänder zugeführte Heizenergie proportional zur Verweilzeit ist, wird dem Kunststoff weniger Heizenergie zugeführt. Zugleich steigt das Schneckendrehmoment mit der Drehzahl, da die Schubspannung mit zunehmender Drehzahl ansteigt. Dadurch wird mehr Friktionswärme, die bei der Scherung des Kunststoffs zwischen Plastifizierschnecke und Zylinderwand entsteht, eingebracht.

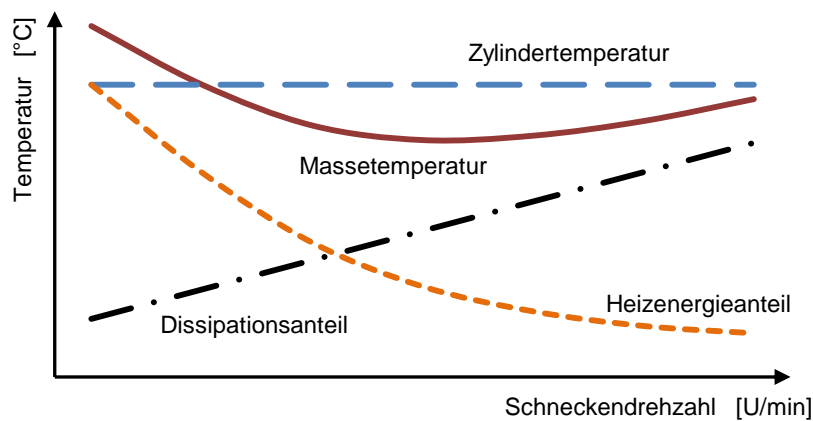


Abb. 3 **Massetemperatur in Abhängigkeit von der Schneckendrehzahl**

Die Massetemperatur entspricht nicht grundsätzlich der Zylindertemperatur. Sie wird auch stark von der Schneckendrehzahl beeinflusst (nach [91,151]).

2.4 Dissipationsenergie

Beim Spritzgießen werden die Granulatkörner mit der Schnecke in die Spritzeinheit eingezogen, nach vorne gefördert und dabei aufgeschmolzen. Da die Kunststoffschmelze viskos ist, treten Schubspannungen während der Schneckenrotation auf. Aufgrund der Schubspannung entsteht ein Widerstand entgegen der Rotationsrichtung. Um die Schneckendrehzahl auf den Sollwert zu regeln, muss der Schneckenantrieb Leistung bzw. auch Energie aufbringen. Diese Energie wird in Wärme umgewandelt und von der Schmelze aufgenommen. Diese Energie wird als Dissipationsenergie bezeichnet. Die Dissipationsenergie E_S ist das Produkt aus der Schneckenantriebsleistung und der Plastifizierzeit:

$$E_S = P_S \times t_p \quad \text{Gl. (2.1)}$$

wobei P_S die Schneckenantriebsleistung und t_p die Plastifizierzeit ist.

Bei einer konventionellen Schneckenplastifizierung werden die Schneckendrehzahl, der Staudruck, der Dosierweg und die Zylindertemperatur als Maschineneinstellgrößen in die Maschine eingegeben. Es ist auch möglich, eine mehrstufige Plastifizierung zu definieren. Dabei wird der Dosierweg in einige Abschnitte eingeteilt. In jedem Abschnitt können die Schneckendrehzahl und der Staudruck individuell eingestellt werden. Wie in Kapitel 2.3 erwähnt, ist die Massetemperatur im Schneckenorraum axial inhomogen. Da die resultierende Schneckenlänge immer kürzer wird, weist die schneckennahe Schmelze eine geringere Temperatur auf als die schneckenferne. Als Gegenmaßnahme kann man den Staudruck in der Endphase der Plastifizierung erhöhen, womit mehr Energie ins System eingebracht wird. Dadurch ist es möglich, die Schmelze homogenität axial auszugleichen.

Sobald die Maschineneinstellgrößen vom Maschinenbediener festgelegt sind, werden sie während der Plastifizierphase getrennt voneinander geregelt. Diese Methode hat sich in der Praxis bewährt. Bei robusten Prozessen können sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Da die Schmelze zähflüssig ist, muss die Schnecke während der Plastifizierung einen Widerstand überwinden. Da der Widerstand dabei nicht konstant bleibt, muss die Leistung des Schneckenantriebs ständig angepasst werden, um die Drehzahl konstant zu halten.

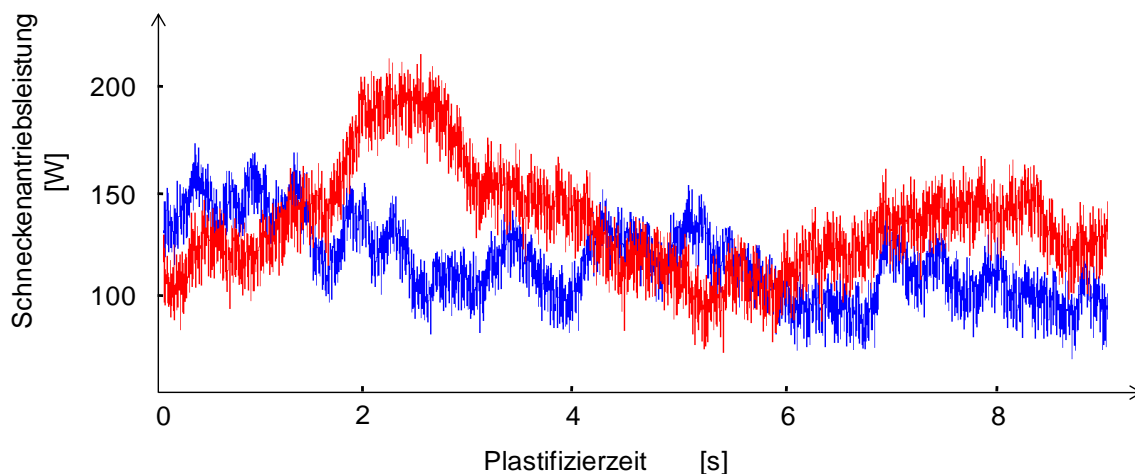


Abb. 4 **Schneckenantriebsleistung bei zwei nacheinander ablaufenden Zyklen**

Obwohl die Schneckendrehzahl unverändert bleibt, zeigen die zwei Leistungskurven eine deutliche Abweichung voneinander. Die Dissipationsenergie als der Hauptanteil der Energiezufuhr ist über die Zyklen nicht konstant.

Es wurden Versuche durchgeführt, bei denen die Schneckenantriebsleistung während der Plastifizierphase aufgezeichnet wurde. Abb. 4 zeigt die Leistungskurven von zwei nacheinander ablaufenden Prozesszyklen. Dabei wurde eine vollelektrische Spritzgießmaschine (Krauss-Maffei EX 80) verwendet. Die verwendete Schnecke hatte einen Durchmesser von 15 mm. Das verarbeitete Material war Polybutylenterephthalat (PBT Pocan B1505 von

LANXESS). Die Schneckendrehzahl betrug 60 U/min und die Verarbeitungstemperatur wurde in Höhe von 260 °C eingestellt. Es ist zu erkennen, dass der Leistungsunterschied von den beiden Kurven teilweise sehr groß ist, obwohl die Drehzahl während der Plastifizierung konstant gehalten wird. Das Aufschmelzen von Kunststoff ist auf die Enthalpieerhöhung der Formmasse zurückzuführen. Da die Dissipationsenergie einen hohen Anteil (65-85 %) [12,151] an der gesamten Enthalpieerhöhung beiträgt, sollte sich die Schwankung der Schneckenantriebsleistung auf die Stabilität der Massetemperatur negativ auswirken. Die Reproduzierbarkeit des Prozesses wird daher beeinträchtigt.

2.5 Einflüsse auf die Reproduzierbarkeit

Unter hohem Wettbewerbsdruck sind Spritzgießverarbeiter gezwungen, eine reproduzierbare Fertigung innerhalb enger Toleranzgrenzen zu erzielen. Die Reproduzierbarkeit von Spritzgießmaschinen wird im Wesentlichen durch die Genauigkeit der Maschine, durch die Steifigkeit des Systems "Maschine und Werkzeug" sowie durch die thermische und rheologische Auslegung des Werkzeugs bestimmt. Weiterhin beeinflusst der zeitlich bedingte Verschleiß die Reproduzierbarkeit der Maschine [43]. Die Bewertung der Reproduzierbarkeit erfolgt nach verschiedenen Kriterien. Im Wesentlichen sind hier Prozessgrößen, maschinenbezogene Kenngrößen und Qualitätsmerkmale am Bauteil zu nennen. Für den Spritzgießverarbeiter ist von besonderer Bedeutung, dass die relevanten Qualitätsmerkmale wie z. B. das Gewicht konstant bleiben. Im Folgenden werden die Einflüsse auf die Reproduzierbarkeit des Spritzgießens erläutert und diskutiert.

2.5.1 Spritzeinheit

Der Kunststoff wird in der Spritzeinheit aufgeschmolzen und in einen formgebenden Hohlraum eingespritzt. Entscheidend für eine hohe stoffliche und thermische Homogenität der Schmelze ist neben den Prozessparametern (Schneckendrehzahl, Staudruck und Zylindertemperatur) die Schneckengeometrie. Im Vergleich zu einer Standard-Drei-Zonen-Schnecke kann eine Barrierschnecke die Plastifizierleistung deutlich erhöhen, zugleich steigt die Homogenität der Schmelze [24]. Diese positive Eigenschaft begünstigt die Verbesserung der Reproduzierbarkeit.

Grundsätzlich entspricht die Massetemperatur nicht der Zylindertemperatur. In [132] wurden die Massetemperaturunterschiede der Schmelze beim Ausspritzen für unterschiedliche Schnecken bei gleicher Zykluszeit mit einem Infrarot-Sensor gemessen. Dabei werden eine Drei-Zonen-Schnecke und eine Barrierschnecke verwendet. Abb. 5 zeigt, dass die

Massetemperaturunterschiede bis zu einem Dosierhub von 2D bei beiden Schnecken sehr gering sind. Bei einem Dosierhub von 3D jedoch zeigt die Barrierschnecke ihren Vorteil gegenüber der Drei-Zonen-Schnecke deutlich. Hier werden bei der Drei-Zonen-Schnecke sehr große Temperaturunterschiede von ca. 14 °C gemessen, wohingegen bei der Barrierschnecke nur Temperaturunterschiede von etwa 2,5 °C auftreten.

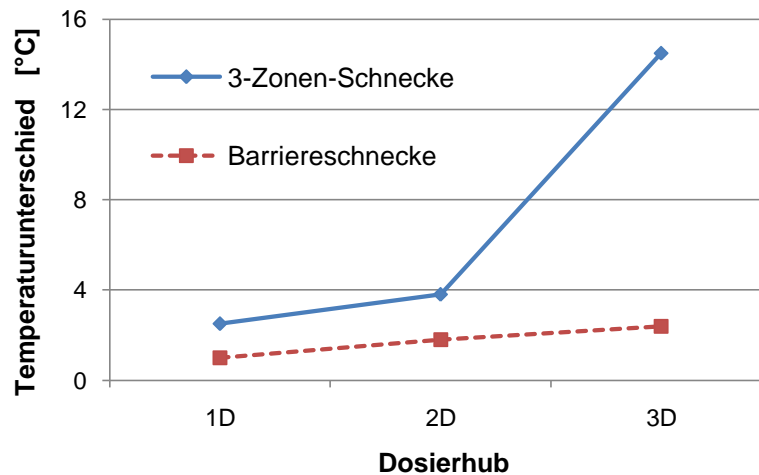


Abb. 5 **Massetemperaturunterschied in Abhängigkeit von dem Dosierhub und der Schneckengeometrien**

Die Schmelztemperatur beim Ausspritzen wurde mit einem Infrarot-Sensor gemessen. Die Schneckengeometrien und der Dosierhub können die thermische Homogenität der Schmelze entscheidend beeinflussen. Die thermisch homogenere Schmelze kann mit einer Barrierschnecke aufbereitet werden (nach [132]).

Neben der Schnecke ist die Rückstromsperre (RSP) ein wichtiges Funktionselement der Spritzeinheit. Sie verhindert den Rückfluss der Kunststoffschmelze beim Einspritzen und in der Nachdruckphase. Die Rückstromsperre sitzt an der Spitze der Schnecke und besteht meist aus Sperring, Druckring und Schneckenkopf. Von ihrer Funktion hängt die Qualität des Bauteils maßgeblich ab. Eine undichte Rückstromsperre kann die Plastifizierzeit und dadurch die Zykluszeit verlängern, und sie verschlechtert die Kontrolle der Verdichtung der eingespritzten Schmelze und der Maßtoleranzen. Eine zu hohe Schneckendrehzahl erhöht den Verschleiß an der Rückstromsperre. Bei einem hohen Verschleiß der Rückstromsperre wird das reproduzierbare Schließverhalten aufgrund schlechter Abdichtung beim Einspritzen beeinträchtigt [26,27]. In der Regel sollen Rückstromsperren so ausgelegt werden, dass der freie Strömungsquerschnitt größer als etwa 80 % der freien Ringspalfläche am Schneckenende ist [51].

Darüber hinaus spielt eine präzise Messwerterfassung eine wichtige Rolle zur Erhöhung der Reproduzierbarkeit beim Spritzgießen. Zur Erfassung der Zylindertemperatur werden Thermoelemente am häufigsten verwendet. Sie sind preiswert, einfach in Aufbau und Funktion, vielseitig einsetzbar, robust und kompakt. Jedoch liegt ihre Grenzabweichung nach Europäische Norm EN 60584-2 zwischen 1,5 und 2,5 °C. Dies führt dazu, dass die tatsächliche Zylindertemperatur von der eingestellten Temperatur abweichen kann, obwohl die an der Maschine angezeigte Temperatur konstant bleibt. Dies gilt auch für Wegaufnehmer, welche die Schneckenposition erfassen. Aus diesen Gründen können die Abweichungen der Messungen die Reproduzierbarkeit des Prozesses negativ beeinflussen.

2.5.2 Prozessführung

Da die Prozessführung einen wesentlichen Einfluss auf die Formteilqualität beim Spritzgießen hat, sollte man darauf ein besonderes Augenmerk legen. Beginnen sollte man mit der Optimierung in Bezug auf die Formteilqualität. Wichtig ist eine verbindliche Festlegung auf Qualitätsmerkmale und deren Grenzen. Anschließend sollte die Stabilität und die Güte des Prozesses anhand der Streuung und Verteilung optimiert werden. Erst dann erfolgt die Optimierung der Zykluszeit. In [8,9,30,33,36] werden verschiedene Möglichkeiten zur systematischen Optimierung des Betriebspunktes vorgestellt. Jedoch wird die Wahl eines geeigneten Betriebspunktes durch die Komplexität des Spritzgießprozesses erschwert [87]. Im Folgenden werden einige wichtige Einflüsse auf die Reproduzierbarkeit des Spritzgießens näher erläutert.

Umschalten

Der Umschaltpunkt von der geschwindigkeitsgeregelten Einspritzphase auf die druckgeregelte Nachdruckphase hat den größten Einfluss auf den Prozessverlauf. Bereits kleinste Verschiebungen des Umschaltpunktes haben einen gravierenden Einfluss auf den Druckverlauf im Werkzeug. In der Regel schwankt der maximale Einspritzdruck bei einem stabil laufenden Prozess um ca. +/- 30 bar [66]. Diese Schwankung ist auf die Funktion der Rückstromsperre zurückzuführen. Wird der Prozess mit einer wegabhängigen Umschaltung gefahren, wird nicht konstante Formmasse bis zum eingestellten Umschaltpunkt eingespritzt. Dieser Vorgang ist abhängig vom Schließverhalten der Rückstromsperre. Schließt die Rückstromsperre früher, gelangt mehr Schmelze in das Werkzeug. Bis zum Umschaltpunkt wird die Schmelze stärker verdichtet, dies erzeugt einen höheren Einspritzdruck. Bei einem späteren Schließzeitpunkt kann Formmasse zu Beginn des Einspritzens aus dem Schnecken-vorraum in Richtung Schnecke entweichen. Es wird weniger Schmelze bis zum Erreichen des Umschaltpunktes eingespritzt, deshalb ist der Einspritzdruck geringer.

Neben dem schwankenden Schließverhalten der Rückstromsperre führen eine Materialänderung und eine Änderung der Massetemperatur zur größeren Schwankung des Einspritzdrucks, wodurch sich das Fließverhalten und somit auch der Einspritzdruck ändern können. Solche Schwankungen beeinträchtigen die Qualitätskonstanz des Formteils. Idealerweise soll die Umschaltung exakt zum Zeitpunkt der volumetrischen Füllung der Kavität erfolgen. Dies ist nur mit dem werkzeuginnendruckabhängigen Umschaltverfahren [30,131] realisierbar. In Abb. 6 sind drei mögliche Druckverläufe prinzipiell beschrieben.

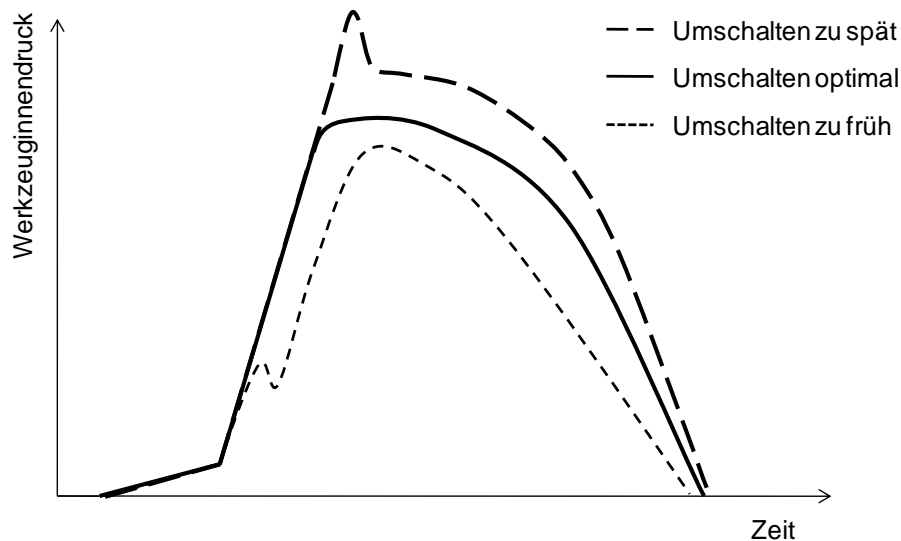


Abb. 6 Einfluss des Umschaltpunktes auf den Werkzeuginnendruckverlauf

Das Bild zeigt drei mögliche Umschaltungen von Einspritzen auf Nachdruck. Die zu frühe oder zu späte Umschaltung beeinträchtigt die Bauteilqualität (nach [101]).

Eine Umschaltung ist zu früh, wenn sie noch vor der volumetrischen Füllung der Kavität erfolgt. Dies kann man durch einen Einbruch im Werkzeuginnendrucksignal erkennen. Es besteht die Gefahr, dass das Formnest nicht vollständig gefüllt werden kann, weil der Nachdruck erheblich niedriger ist als erforderlich. Eine weitere Folge kann sein, dass sich feine Oberflächenstrukturen nicht exakt abbilden lassen, da der Druckaufbau unter Umständen zu spät erfolgt und der inzwischen erkaltende Kunststoff zu zäh geworden ist. Dadurch wird erschwert, die Schmelze in kleinste Oberflächenvertiefungen des Werkzeugs hinein zu pressen. Schaltet man zu spät um, entsteht ein Überspitzen, das auf Dauer zu Schäden an Werkzeug und Maschine führen kann. Hohes Überspitzen kann zu unvorteilhaften inneren Spannungen in den Bauteilen führen. Insbesondere bei teilkristallinen Kunststoffen kann es zu Störungen im Kristallitgefüge kommen. Weiterhin bewirkt das Überspitzen eine schlechte Entformbarkeit und Übermaße am Bauteil aufgrund erhöhter Werkzeugatmung [77].

Daher stellt eine hohe Reproduzierbarkeit hohe Anforderung an eine wiederholbare und rechtzeitige Umschaltung. Vorangegangene Studien beweisen, dass eine Spritzgießproduktion mit werkzeuginnendruckabhängiger Umschaltung gegenüber der wegabhängigen Umschaltung zu einer höheren Qualitätskonstanz führt [15,16,80,126,128].

Drehzahl und Staudruck

Die Reproduzierbarkeit des Spritzgießprozesses wird stark von der Schneckendrehzahl beeinflusst. Eine zu hohe Schneckendrehzahl führt zu einer hohen Massetemperaturdifferenz über den Schneckenhub. Außerdem wird der mechanische Verschleiß an der Schnecke und der Rückstromsperre erhöht, wodurch ein reproduzierbares Schließverhalten der Rückstromsperre beeinträchtigt werden kann. Grundsätzlich soll die Schneckendrehzahl so eingestellt werden, dass die resultierende Plastifizierzeit ca. 10-20 % kürzer ist als die Kühlzeit. Ist die Plastifizierzeit länger als die Kühlzeit, beginnt die Entformung der Bauteile unmittelbar nach der Plastifizierung statt der Kühlung. Da die Plastifizierzeit nicht konstant ist, ist die Zykluszeit nicht konstant und abhängig von der Plastifizierzeit.

Neben der Schneckendrehzahl ist der Staudruck eine wichtige Maschineneinstellgröße, um die Prozessführung zu optimieren. Der Staudruck ist der Schmelzedruck im Schnecken-vorraum, gegen den die Schnecke während des Plastifiziervorgangs fördern muss. Ein zu hoher Staudruck führt zur Materialschädigung durch zu starke Friktion, zu einer niedrigen Plastifizierleistung und zu einer langen Plastifizierzeit. Andererseits führt zu niedriger Staudruck zu mechanischer und thermischer Inhomogenität der Schmelze. Im Extremfall könnte Granulat sogar unaufgeschmolzen ins Werkzeug eingespritzt werden.

2.5.3 Material und Umgebung

Schwankende Materialeigenschaften beeinflussen sowohl den Verarbeitungsprozess als auch die Formteilqualität. Häufige Ursache für Schwankungen dieser Materialeigenschaften sind Chargenschwankungen, die bei der Produktion von Kunststoffen nicht vermeidbar sind [57]. Bei den Verarbeitungsprozessen, die häufig am Rand der Leistungsgrenze laufen, können auch leichte Chargenschwankungen große Einflüsse auf die Prozessstabilität und die Produktqualität haben [146].

Eine weitere Ursache für schwankende Materialeigenschaften ist der Feuchtigkeitsgehalt bei hygroskopischen Kunststoffen [135]. Solche Kunststoffe müssen in der Regel vor der Verarbeitung gemäß Angaben der Rohstoffhersteller vorgetrocknet werden. Die Materialfeuchtigkeit wirkt sich gravierend auf die mechanischen Eigenschaften des Bauteils aus

[10,17,111] und führt in vielen Fällen zu Oberflächenfehlern [112]. Hohe Materialfeuchtigkeit zeigt sich in einer Verminderung der Schmelzeviskosität. Der Einfluss der Viskositätsänderung auf den Prozess ist vielfältig. Sowohl die Plastifizierzeit als auch das Drehmoment der Schnecke sind während der Plastifizierung signifikanten Streuungen unterworfen. Darüber hinaus resultieren die durch Feuchtigkeit verursachten Viskositätsschwankungen in Maßabweichungen und Gewichtsstreuungen. Bei höherem Feuchtegehalt ist eine Zunahme der Masse zu registrieren, die im Wesentlichen auf die abnehmende Viskosität zurückzuführen ist [1]. Es ist auch zu beachten, dass die zur Materialtrocknung zugeführte Wärme den Spritzgießprozess beeinflusst. In der Regel kann man mit vorgewärmten Kunststoffen höhere Durchsätze erzielen.

Die Einflüsse der Umgebung auf die Prozessstabilität sind meist nicht vernachlässigbar. In [114] wird berichtet, dass die Maschinenbediener alle Maschineneinstellgrößen in der Nachtschicht aufgrund von Umgebungseinflüssen anpassen müssen, um eine gleiche Produktqualität wie in der Tagschicht zu erzielen. Am Morgen danach wird das Problem zwar gelöst, aber beim nächsten Mal sind die gleichen Anpassungen vorzunehmen.

2.6 Erhöhung der Reproduzierbarkeit

Seit Mitte der 1980er Jahre hat sich die Regelung zumindest der verfahrenstechnisch wichtigen Größen Einspritzgeschwindigkeit und Nachdruck durchgesetzt und so zu einer erheblichen Steigerung der Prozesssicherheit beigetragen [39,77,119]. Dies wurde durch die kontinuierlichen technischen Fortschritte in der Sensorik, der Regelung und der Antriebstechnik ermöglicht. Da die Sensoren die Maschineneinstellgrößen (Drehzahl, Staudruck, Temperatur etc.) und die Prozessgrößen (Einspritzdruck, Massepolster etc.) erfassen, sind ihre Genauigkeit und die Dynamik von Bedeutung. Mit der Regelung wird ein Vergleich des gemessenen Ist-Wertes mit dem vordefinierten Sollwert durchgeführt. Daraus wird das Stellsignal für den Antrieb bestimmt. Der Antrieb seinerseits bestimmt die Dynamik und die Bewegungsgenauigkeit der Maschine.

Neben der Regelung der Füll- und Nachdruckphase ist das präzise Umschalten zwischen beiden Stufen für die hohe Reproduzierbarkeit der Formteilqualität und des Prozessverlaufs von besonderer Bedeutung. Die wegabhängige Umschaltung ist die meistverwendete Methode. Sie ist einfach zu realisieren und liefert meist ausreichend konstante Ergebnisse. Durch die werkzeuginnendruckabhängige Umschaltung kann die Reproduzierbarkeit erheblich erhöht werden [4,30,95,131]. Dabei erfolgt die Umschaltung nicht über die Schneckenposition oder das eingespritzte Volumen, sondern über einen Schwellenwert des Werkzeuginnendrucks. So

werden Auswirkungen von Viskositäts- und Dosierschwankungen auf den Umschaltzeitpunkt minimiert. Diese Anwendung erfolgt bei höchsten Ansprüchen an die Produktionskonstanz.

In [5] wird vorgestellt, dass das Umschalten durch die Werkzeugwandtemperatur erfolgt. Im Gegensatz zu Werkzeuginnendruckensensoren detektieren Werkzeugwandtemperatursensoren, die kurz vor dem Fließwegende installiert werden, innerhalb weniger Millisekunden einen plötzlichen Temperaturanstieg und somit das Eintreffen der Schmelze an der Sensorposition. Dadurch ist das automatische Umschalten auf Nachdruck auch mit den Werkzeugtemperatursensoren realisierbar. Voraussetzung hierfür ist das sichere und schnelle Erkennen des Temperaturanstieges. Mit dieser Methode wird die Position der Schmelzefront immer genau erfasst, somit wird ein präzises Umschalten ermöglicht.

Ein weiterer Trend in der Entwicklung der Spritzgießmaschinen ist die zunehmende Ausrüstung mit elektrischen Antrieben. Die Vorteile des vollelektrischen Antriebskonzepts gegenüber dem hydraulischen System liegen nach Herstellerangaben in besserer Reproduzierbarkeit durch exaktere Regelbarkeit und hohe Dynamik, in geringerem Energieverbrauch durch höheren Wirkungsgrad und verminderter Geräuschemission. Jedoch ist eine Steigerung der Reproduzierbarkeit in Bezug auf Bauteilgewicht und Abmessung nicht nachweisbar [7,92,116,149].

Die pvT-Regelung und die pmT-Regelung stellen zwei Verfahren dar, um die Streuung des Formteilgewichts zu minimieren. Ziel einer pvT-Optimierung ist es, den Punkt des Erreichens der 1-bar Linie konstant zu halten [33,78,96]. Somit ist es möglich, Auswirkungen von Viskositäts- und Dosierschwankungen auf den Umschaltzeitpunkt zu minimieren. Die pmT-Regelung ist eine Weiterentwicklung der pvT-Regelung [78,79,83]. Als Stellgröße dient die isobare Nachdruckzeit, die im Allgemeinen durch Verschlussdüsen in Maschine oder Werkzeug einstellbar ist. Durch das Konzept wird in erster Linie das Formteilgewicht regelbar. Mit dem in der Lernphase gewonnenen Kennfeld ist ein Regler in der Lage, den Prozess entsprechend einer konstanten Masseeinbringung in die Kavität zu kontrollieren [43].

In [82,141] werden modellbasierte Ansätze zur Qualitätsregelung beim Spritzgießen vorgestellt. Eine Qualitätsregelung hat das Ziel, die mit den Qualitätsmerkmalen in Verbindung stehenden Maschineneinstellgrößen so nachzuführen, dass auch unter dem Einfluss von Störungen die Soll-Qualität wieder erreicht wird [94]. Während in [141] das Modell auf der Basis statistischer Verfahren erfasst wird, wird in [82] das Modell auf der Basis neuronaler Netzwerke [34,71,93,125,148] abgebildet. Gegenüber statistischen Verfahren sind neuronale Netzwerke in der Lage, komplexe Zusammenhänge durch Beispieldaten selbstständig zu lernen und mit hoher Genauigkeit abzubilden. Mittels dieses

Modells ist es möglich, die Qualität des Formteils zu prognostizieren. Entsprechend kann die Steuerung die Maschineneinstellgrößen während des Spritzgießprozesses anpassen. Somit können die Einflüsse der Störungen kompensiert und die Soll-Qualität eingehalten werden. In [32,142] wird diese Methode bei der Qualitätsüberwachung eingesetzt. Jedoch hat sie auch Grenzen, denn ein Modell gilt immer nur für den jeweiligen Betriebspunkt. Eine kleine Änderung, z. B. durch Farbwechsel, macht bereits einen erneuten Durchlauf des Versuchsplanes mit anschließender Analyse erforderlich [136].

In [73,74] wird ein Konzept vorgestellt, in dem das Drehmoment statt der Drehzahl der Schnecke während der Plastifizierung geregelt wird. Somit ist der Drehmomentverlauf bei jedem Plastifiziervorgang reproduziert. Außerdem wird der Massedruck durch Anpassung der Schneckengeschwindigkeit beim Einspritzvorgang geregelt. Die Referenzkurven von Drehmoment und Massedruck werden bei der Fertigung eines Gutteils aufgenommen. Laut Angabe des Herstellers ist die Abweichung des Formteilm Gewichts um 50 % reduziert. In [152] wird vorgeschlagen, den Drehmomentverlauf beim Plastifiziervorgang als die Zielgröße zu betrachten. Um einen reproduzierbaren Drehmomentverlauf zu realisieren, werden die Zylindertemperatur, die Schneckendrehzahl und der Staudruck als Stellgrößen angepasst.

In dieser Arbeit wird eine Methode beschrieben, in dem die Antriebsleistung der Schnecke während der Plastifizierung geregelt wird. Gleichzeitig wird die Plastifizierzeit konstant gehalten. Mit einer solchen Regelung kann die Reproduzierbarkeit sowohl des Formteilm Gewichts als auch der Prozesskenngrößen erhöht werden. Dies wird in Kapitel 3 ausführlich erläutert.

2.7 Begriff des Mikrospritzgießens

Die stets steigenden Anforderungen an Kunststoffbauteile führen dazu, dass eine Vielzahl von Aufgaben auf engstem Raum erfüllt werden müssen. Ein kleines Formteilmvolumen kann zum Beispiel in der Sensorik neue Möglichkeiten erschließen und somit hoch dynamische und kompakte Sensoren ermöglichen. Es besteht keine eindeutige Feststellung der Grenze zwischen Standard- und Mikrospritzgießen in der verfügbaren Literatur [2]. Nach [2,130] werden die Mikrobau teile beim Mikrospritzgießen in vier verschiedene Arten eingeteilt.

Zum einen werden Bauteile hergestellt, deren äußere Abmessungen im Millimeterbereich liegen. Das Gewicht einzelner Bauteile liegt im Milligrammbereich. In der Branche der Kunststofftechnik wird oft 100 mg als obere Grenze angegeben. Typische Anwendungsbeispiele hierfür sind Mikrozahnräder oder kleinste Gehäuse für Sensoren. Aufgrund der

extrem kleinen Formteilmolumina muss die Maschinenteknik gegenüber dem konventionellen Spritzgießen deutlich modifiziert werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden solche Formteile als Mikrobauteile oder Mikroformteile bezeichnet.

Zum anderen gibt es makroskopische, häufig flächig Bauteile, welche eine Mikrostruktur auf der Oberfläche aufweisen. Die Strukturtiefe und -breite bewegen sich im Bereich von ca. 10 bis 100 μm . Beispiel hierfür sind Compact Discs (CD). Außerdem werden mikrostrukturierte Bauteile [22,117,139], deren Oberflächenstrukturen Abmessungen im Bereich von Mikrometern aufweisen, hergestellt. Das Gewicht solcher Bauteile liegt im Grammbereich. Typische Bauteile sind hier Nanotiterplatten, Mikromischer und Mikropumpenbauteile. Darüber hinaus existieren noch diverse Präzisionsformteile, die bei größeren Hauptabmessungen ähnlich kleine Strukturen und enge Toleranzen aufweisen, aber vergleichbar niedrige Aspektverhältnisse in ihren Strukturen zeigen [124].

2.8 Problematik des Mikrospritzgießens

Um Mikrobauteile mit geringen Schussgewichten weit unter einem Gramm herstellen zu können, stoßen herkömmliche Spritzgießeinrichtungen mit Schneckeneinspritzung schnell an ihre Grenzen. Der Grund dafür liegt in der ungenauen Dosierung durch die großen Schneckendurchmesser. Darüber hinaus wird die zulässige Verweilzeit überschritten. Die Verweilzeit ist die Zeit, während der der Kunststoff aufgeschmolzen in der Plastifiziereinheit verweilt.

Eine Verringerung des Schneckenkerndurchmessers wäre eine einfache und schnelle Lösung für die Probleme. Jedoch ist der Schneckendurchmesser nicht beliebig reduzierbar. Der minimal mögliche Schneckendurchmesser ist zurzeit etwa 14 mm bzw. 12 mm. Dieser Durchmesser ergibt sich aus der minimal erforderlichen Gangtiefe zum Einzug von Standardgranulat und dem minimal erforderlichen Kerndurchmesser der Schnecke, der einen Schneckenbruch bei der auftretenden Torsionsbelastung verhindert. Der theoretische Dosierweg beim Einspritzen kleinster Mengen (etwa 0,325 mm bei einem Schneckendurchmesser von 14 mm, um ein Schussgewicht von ca. 50 mg einzuspritzen) lässt sich mit diesem Durchmesser jedoch kaum realisieren, da Antriebe und Wegsensorik keine adäquate Auflösung der Bewegungen mehr erlauben. Innerhalb dieses Dosierwegs muss die Schnecke auf Einspritzgeschwindigkeit beschleunigt sowie zum Ende des Einspritzens auf Nachdruck umgeschaltet und gebremst werden. Zusätzlich muss die Bewegung der Rückstromsperre berücksichtigt werden, die beim Einspritzvorgang reproduzierbar sein muss.

Um dennoch Mikrobauteile auf Standardmaschinen herstellen zu können, werden oft Mehrkavitätenwerkzeuge mit überdimensioniertem Angussverteiler verwendet. So wird der Dosierhub verlängert, wodurch die Reproduzierbarkeit der Fertigung erhöht werden kann. Jedoch führt diese Methode zu Nachteilen. Zum einen stellt der große Anguss im Fertigungsprozess einen wirtschaftlichen Nachteil dar. Zum anderen schafft der Einsatz von Mehrkavitätenwerkzeugen Probleme in der Prozessführung, da sich minimale und nicht beeinflussbare Disbalancen im Verteilersystem in einer inhomogenen Füllung der verschiedenen Kavitäten bemerkbar machen, wodurch eine einheitliche Bauteilqualität in Frage gestellt wird [2,28,69,75].

Aus diesen Gründen wurden in den letzten Jahren mehrere Maschinenkonzepte speziell für das Mikrospritzgießen entwickelt. Im Folgenden sollen verschiedene Lösungskonzepte näher erläutert und die Vor- und Nachteile diskutiert werden.

2.9 Anlagentechnik für das Mikrospritzgießen

Grundsätzlich gibt es drei Konzepte, um Kunststoff schonend zu plastifizieren sowie schnell und präzise einzuspritzen. Im Folgenden werden die bekannten Lösungsansätze und deren Einsatzgebiete für Mikrospritzgießanwendungen vorgestellt.

Kolbenvorplastifizierung und -einspritzung

Auf der Messe Fakuma 2006 wurde die Maschine „FormicaPlast“ [14] vorgestellt, die vom Kunststoff-Zentrum in Leipzig gGmbH (KuZ), Leipzig, Deutschland, entwickelt und von der Firma KLÖCKNER DESMA Schuhmaschinen GmbH, Achim, Deutschland in Serie überführt wurde. Das Funktionsprinzip der Maschine FormicaPlast wird in Abb. 7 dargestellt. Kunststoffgranulat wird durch einen 6 mm-Plastifizierkolben in den Einspritzzylinder gefördert. Ein 3 mm-Kolben übernimmt die Einspritzung. Nach Angaben vom KuZ kann die FormicaPlast alle gängigen Kunststoffgranulate verarbeiten. Mit der FormicaPlast können Schussgewichte von maximal 200 mg gespritzt werden. Das Maschinen- und Werkzeugkonzept ermöglicht sehr kleine Angussysteme, so dass Schussgewichte bis 10 mg möglich sind. Außerdem kann die Anlage optional 2K-Bauteile herstellen.

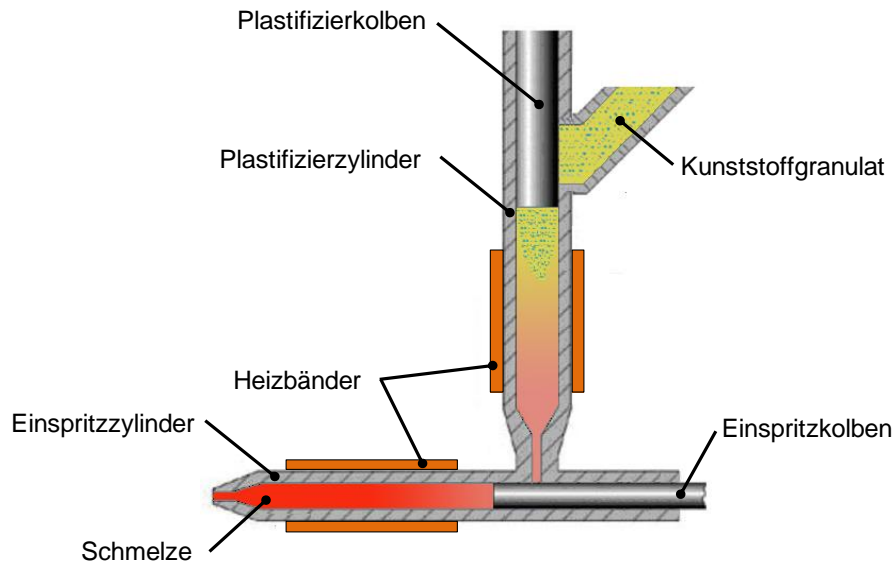


Abb. 7 Funktionsprinzip der FormicaPlast

Nach Angabe des Herstellers kann Standardgranulat verarbeitet werden. Die Verweilzeit des Materials ist nicht kritisch. Das Prinzip "First in First out" ist gewährleistet (nach [70]).

Spennemann [130] hat eine kompakte Mikrospritzgießmaschine entwickelt, die speziell an die Anforderungen von mikromechanischen Produktkomponenten angepasst ist. Der Plastifizierkolben hat einen Durchmesser von 5 mm. Ein 2 mm-Einspritzkolben ist in einem beheizten Zylinder zum Druckaufbau beim Dosieren und Einspritzen geführt. Das maximal mögliche Schussgewicht beträgt ca. 300 mg. Nachteilig an der Maschine ist, dass sie nur mit Pulver oder Mikrogranulat arbeiten kann, welche kostenspielig und von allem nur sehr begrenzt erhältlich sind. Die Zykluszeit konnte aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen nur auf 45 s nach der Prozessoptimierung gesenkt werden. Der Prozess ist nicht vollständig automatisiert, sondern läuft halbautomatisch und mit manueller Entformung ab.

Das Konzept der Kolbenplastifizierung ermöglicht es, eine geringe Schmelzemenge zu plastifizieren. Dadurch wird die Verweilzeit der Kunststoffe gegenüber der Schneckenplastifizierung wesentlich reduziert. Außerdem ist die Einspritzgenauigkeit durch Kolben einspritzung im Vergleich zur Schneckeneinspritzung wesentlich höher, da der Durchmesser des Einspritzkolbens deutlich kleiner als der Schneckendurchmesser ist. Andererseits ist die Homogenität der Kunststoffschmelze wegen fehlender Mischung nur bedingt zufrieden stellend.

Schneckenplastifizierung und -einspritzung

Dieses Konzept wird heutzutage als Standardlösung für universelle Spritzgießmaschinen verwendet. Durch weitere Reduzierung des Schneckendurchmessers ist es möglich, die Einspritzgenauigkeit zu erhöhen und zugleich die Verweilzeit zu senken. Um ausreichende mechanische Festigkeit und gutes Einzugsverhalten zu gewährleisten, wird die kleinste Schnecke mit einem Durchmesser von 12 mm spezifiziert. Die Maschine BOY 12A von der Firma Dr. Boy GmbH & Co. KG, Neustadt – Fernthal, ist mit einer 12 mm-Schnecke ausgestattet. Die Schneckengeometrie wird so optimiert, dass die Verweilzeit der Schmelze sich gegenüber Standard-12 mm-Schnecken um bis zu 50 % reduzieren lässt [106]. Kleinste Einspritzvolumina bis unter $0,1 \text{ cm}^3$ werden präzise dosiert [104]. Die BOY 12A ist ein volleregelter hydraulischer Schneckenkolben-Spritzgießautomat mit Zwei-Platten-Schließ-einheit. Nach Angaben von Dr. Boy kann ein minimierter Verlust an Angussmaterial oder gar der Entfall eines Angusses mit dieser Arbeitsweise erzielt werden.

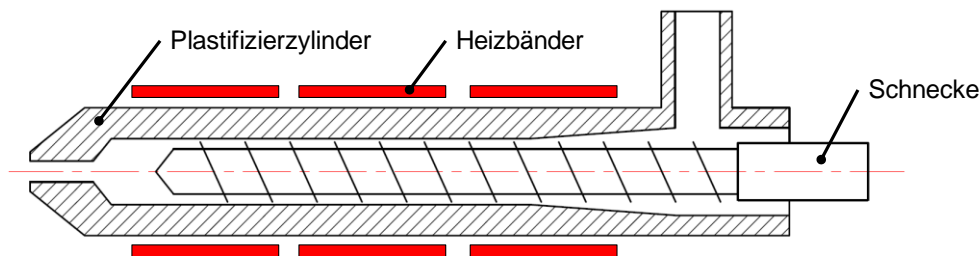


Abb. 8 **Konischer Innendurchmesser des Plastifizierzylinders**

Durch die verjüngte Zylinderinnenbohrung im Einzugsbereich ist es möglich, den Schneckendurchmesser auf 10 mm zu reduzieren. Standardgranulate können verarbeitet werden (nach [25]).

Um den Schneckendurchmesser weiter reduzieren zu können, wurde ein Patent [25] angemeldet (siehe Abb. 8). Der Innendurchmesser des Zylinders verjüngt sich in Plastifizier-richtung. Zugleich weist die Schnecke einen weitgehend konstanten Kerndurchmesser auf. Der Außendurchmesser ist weitgehend unverändert. Mit dieser Erfindung kann die Verweilzeit der Kunststoffmasse möglichst gering gehalten. Standardgranulate können ohne vorherige Zerkleinerung oder Abscherung an der Trichtervorderkante genutzt werden. Nach Angaben von [25] wurde eine Plastifiziereinheit mit einem Schneckendurchmesser von 10 mm mit dieser Konzeption realisiert, mit der handelsübliches Granulat (3-4 mm Korndurchmesser) verarbeitet werden konnte.

Das vollelektrische autonome Spritzaggregat SoloPlast wurde von Ratiomec GbR, Bahlingen, Deutschland, entwickelt, welches an Spritzgießmaschinen jeden Fabrikates nachrüstbar ist. SoloPlast verfügt über eigene Dosier- und Einspritzantriebe und wird deshalb als autonom

bezeichnet. Das maximale Schneckendrehmoment der 12 mm-Plastifizierschnecke beträgt 20 Nm. Aggregatbewegung und -anpressung erfolgen zentrisch mithilfe zweier Gewindestpindeln, Zahnriemen zur Synchronisation und Servomotor [97]. Aufgrund der voll-elektrischen Konzeption ist das Aggregat für Reinraumanwendungen geeignet.

Durch Schneckenplastifizierung können Kunststoffe sehr gut thermisch und stofflich homogen plastifiziert werden. Trotz der Bemühung, den Schneckendurchmesser möglichst klein zu halten, ist die Einspritzgenauigkeit beim Konzept Schneckeneinspritzung gegenüber Kolbeneinspritzung immer noch nicht hoch genug für Mikrospritzgießanwendungen [2,20,70,115].

Schneckenvorplastifizierung und Kolbeneinspritzung

Wie in den letzten zwei Kapiteln erwähnt, sorgt die Schneckenplastifizierung für eine hoch homogene Schmelze und die Kolbeneinspritzung mit reduziertem Kolbendurchmesser für eine hohe Einspritzgenauigkeit. Das Konzept „Schneckenvorplastifizierung und Kolbeneinspritzung“ kombiniert die beiden Vorteile.

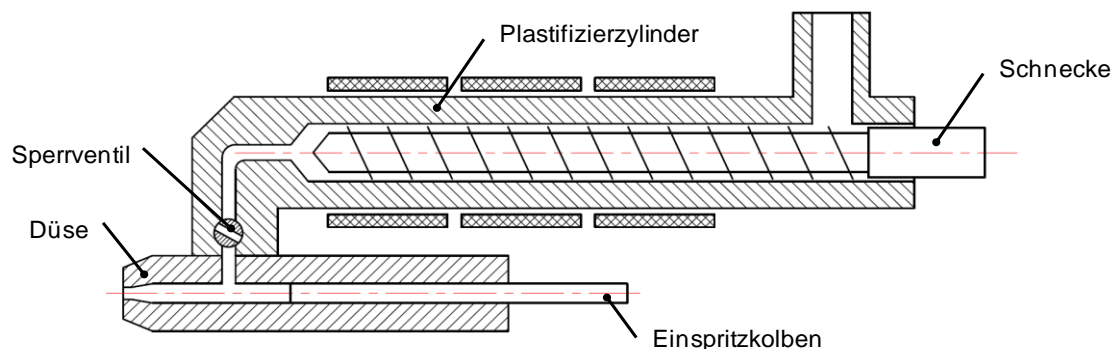


Abb. 9 **Spritzeinheit mit Schneckenvorplastifizierung und Kolbeneinspritzung**

Die Schnecke sorgt für problemlose Plastifizierung mit hoher Homogenität. Der separat bewegliche Einspritzkolben erlaubt eine hohe Einspritzgenauigkeit.

Das Grundprinzip „Schneckenvorplastifizierung und Kolbeneinspritzung“ wird in Abb. 9 dargestellt. Bei diesem Konzept werden die Funktion Plastifizierung vom Einspritzen getrennt. Das Konzept erlaubt eine problemlose Plastifizierung von Standardgranulat. Die Kunststoffschmelze wird durch die Schnecke über die Rückstromsperre (RSP) in den Vorraum gefördert. Der Einspritzkolben weist einen deutlich kleineren Durchmesser im Vergleich zur Plastifizierschnecke auf, damit die Einspritzgenauigkeit erhöht wird. Die Umsetzung des Prinzips ist unterschiedlich je nach Maschinenhersteller. Bei diesem Konzept besteht die Gefahr, dass eine Totwasserecke unmittelbar vor dem Einspritzkolben entsteht.

Um das Prinzip "FIFO" zu gewährleisten, muss die notwendige Umlenkung entsprechend fließtechnisch optimiert gestaltet werden.

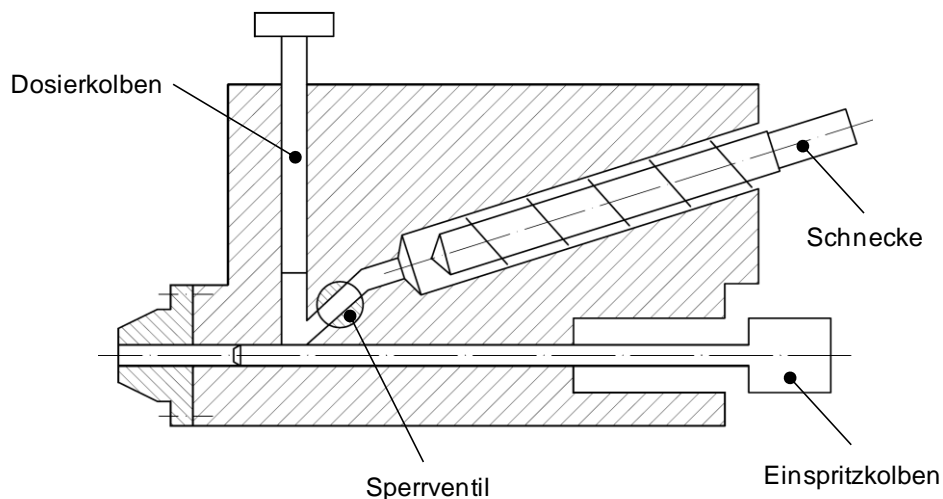


Abb. 10 Funktionsprinzip der Spritzeinheit im Battenfeld „Microsystem 50“

Mit dem dreistufigen Konzept ist es möglich, dass die Plastifizierung während der Einspritz- und Nachdruckphase stattfindet. Dadurch kann die Zykluszeit und somit die Verweilzeit weiter reduziert werden (nach [107]).

Das „Microsystem 50“ (siehe Abb. 10) von der Fa. Wittmann-Battenfeld GmbH, Kottlingbrunn, Österreich, wurde speziell zum Spritzen und Handhaben von Mikroteilen mit einem Schussvolumen von 12 mm^3 bis max. $1,1 \text{ cm}^3$ entwickelt [20]. Eine schräg angeordnete und axial nicht bewegliche Extruderschnecke (14 mm) fördert die Kunststoffschmelze in die Vordosierkammer. Nach der Dosierung einer definierten Schmelzemenge stoppt die Schneckendrehung. Gleichzeitig wird der horizontal angeordnete Einspritzkolben mit 5 mm Durchmesser zurückgezogen. Anschließend wird die Schmelze von dem Dosierkolben in den Vorraum des Einspritzkolbens geschoben. Der Einspritzvorgang erfolgt durch den Einspritzkolben, der bis in die Trennebene verfahren werden kann, sodass die Schmelze unter Druck direkt dort eingespritzt wird. Bei diesem Konzept wird der Anteil des Angusses und Massepolsters minimiert.

Die Firma Dr. Boy hat die Maschine BOY 12A micro auf der „K 98“ in Deutschland vorgestellt. Nach [81] wird ein nadelförmiges Kolbenelement in der Schnecke geführt. Die Rückstromsperre wird von der Spitze der Schnecke und einem entsprechend geformten Dichtsitz gebildet. Das nadelförmige Kolbenelement dient zur Dosierung und Einspritzung. Es lassen sich Formteile mit einem Gewicht in der Größenordnung von deutlich unter 0,1 g herstellen [81]. Die Maschine MTT 12/90 von der Firma MTT Technologies GmbH, Lübeck, [109] wurde nach dem gleichem Prinzip entwickelt. Der Schneckendurchmesser beträgt

16 mm. Besonders erwähnenswert ist die Schneckenlänge von 2D. Der Einspritzkolben hat einen Durchmesser von 10 mm. Laut Angabe von MTT können Bauteile vom Gewicht bis 0,02 g hergestellt werden. Ammer [2,143] hat im Rahmen seiner Promotion eine kompakte MikroSpritzgießmaschine entwickelt. Das Anlagenkonzept mit einer Schnecken-
vorplastifizierung bedient sich eines Linearantriebs und einer in Echtzeit geregelten Prozessführung, um eine gleich bleibende Bauteilqualität zu erreichen.

Zusammenfassung:

Um eine hohe Einspritzgenauigkeit und eine gute Schmelzehomogenität zu erzielen, wird das Konzept „Schnecken-
vorplastifizierung und Kolbeneinspritzung“ vorgesehen, da der Kolben als Einspritzelement einen geringeren Durchmesser gegenüber der Schnecke aufweist. Bei der Umsetzung des Konzepts in die Maschine erfordert die Betätigung des Einspritzkolbens einen zusätzlichen Motor, dementsprechend muss die Steuerung geändert werden. Deshalb wurden in den letzten Jahren mehrere spezielle komplette Spritzgießmaschinen für das Mikro-
spritzgießen entwickelt. Idealerweise ist die Lösung mit einer speziellen Spritzeinheit statt einer speziellen kompletten Maschine anzustreben. Diese Mikro-Spritzeinheit soll auf eine Standardspritzgießmaschine adaptiert werden, sodass Austausch der Spritzeinheit Mikro-
bauteile mit einer Standardmaschine hergestellt werden können. Dadurch wird eine hohe Investition wegen der Beschaffung einer neuen Maschine vermieden. Gleichzeitig steigt die Flexibilität der Fertigung. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine adaptierbare Mikro-
Spritzeinheit für das Mikrospritzgießen entwickelt. Dies wird in Kapitel 4 ausführlich erläutert.

3 Plastifizierung mit konstanter Dissipationsenergie

Die einzuspritzende Kunststoffschmelze wird durch den Plastifiziervorgang aufbereitet. Ein schwankender Schmelzestand wirkt sich auf die Prozessstabilität negativ aus. Um die Reproduzierbarkeit des Spritzgießprozesses zu erhöhen, soll die Schwankung der Plastifizierung verringert werden. Im folgenden Abschnitt wird zuerst die Energiebilanz des Spritzgießprozesses analysiert. Aus den Erkenntnissen der Energieanalyse wird abgeleitet, dass eine Konstanthaltung der Dissipationsenergie zu einer Erhöhung der Reproduzierbarkeit führen kann. Die Realisierung der Regelung der Dissipationsenergie wird in Kapitel 3.2 ausführlich beschrieben. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass eine höhere Reproduzierbarkeit des Prozesses durch Regelung der Dissipationsenergie erzielt werden kann.

3.1 Analyse der Energiebilanz beim Spritzgießen

Wie in Kapitel 2.3 erwähnt, ist die Massetemperatur für den Formbildungsprozess eine wichtige Zustandsgröße. Die Temperaturerhöhung des Kunststoffes ist auf die Erhöhung der Enthalpie zurückzuführen. Daher ist es wichtig, die Energiebilanz beim Spritzgießen zu analysieren. Die zugeführte thermische Energie besteht aus einerseits Heizenergie und andererseits Dissipationsenergie. Die Heizenergie wird dem Material durch Wärmeleitung und Konvektion vom Plastifizierzylinder zugeführt. Die Dissipationsenergie wird als mechanische Energie über das Drehmoment der Schnecke in das System eingebracht.

Gegenüber einem kontinuierlich arbeitenden Extrusionsprozess wird der diskontinuierlich ablaufende Spritzgießprozess in die drei Abschnitte Plastifizierung, Einspritzen und Nebenzeit unterteilt. Die jeweilige Energiebilanz wird in Abb. 11 aufgestellt. Unabhängig von dem Prozessabschnitt wird Wärme über die Oberfläche der Spritzeinheit in die Luft abgeleitet. Ebenso führt das Kühlwasser Wärme ab, um die gegenüber der hohen Zylindertemperatur deutlich niedrigere Flanschttemperatur konstant zu halten. Die Plastifizierarbeit ist ein Produkt aus der Schneckenantriebsleistung und der Plastifizierzeit. Die Heizenergie, die Plastifizierarbeit und die Einspritzarbeit führen dem System Energie zu. Während des Einspritzens wird Kunststoffschmelze unter hohem Druck aus der Düse ausgespritzt. Nach Grundsätzen der Fluidodynamik erfährt das System einen Enthalpieverlust in Höhe von $p_D V$.

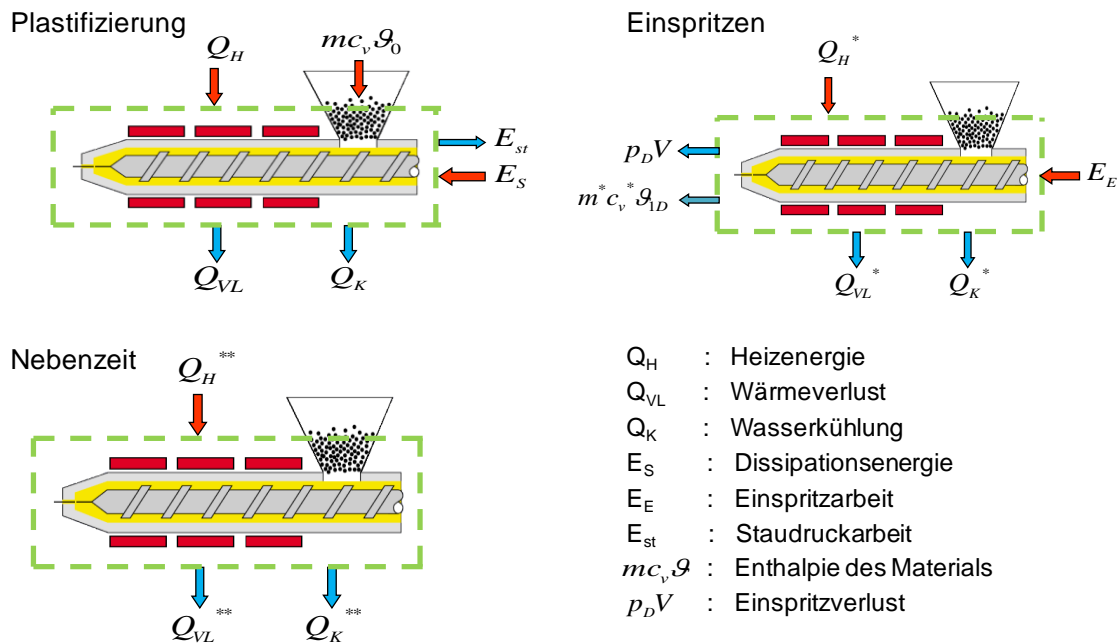


Abb. 11 Energiebilanzen des Spritzgießprozesses

Das einzelne Energieelement wird dargestellt, wobei die Enthalpieerhöhung des Materials hauptsächlich von der Heizenergie Q_H und Dissipationsenergie E_S beeinflusst wird.

Die Enthalpieänderungen des Systems in der Plastifizierphase, der Einspritzphase und der Nebenzeit werden mit den folgenden Gleichungen beschrieben:

$$\text{Plastifizierung:} \quad \Delta h_1 = Q_H + E_S + mc_v \vartheta_0 - Q_{VL} - Q_K - E_{st} \quad \text{Gl. (3.1)}$$

$$\text{Einspritzen:} \quad \Delta h_2 = Q_H^* + E_E - m^* c_v^* \vartheta_{1D} - Q_{VL}^* - Q_K^* - p_D V \quad \text{Gl. (3.2)}$$

$$\text{Nebenzeit:} \quad \Delta h_3 = Q_H^{**} - Q_{VL}^{**} - Q_K^{**} \quad \text{Gl. (3.3)}$$

$$\text{Energiebilanz:} \quad \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 = 0 \quad \text{Gl. (3.4)}$$

In [113] hat Potente die Kunststoffschmelze für nicht-isotherme behandelt, so dass die spezifische Wärmekapazität c_v des Kunststoffs unabhängig von der Temperatur T ist:

$$c_v^* = c_v. \quad \text{Gl. (3.5)}$$

Da die vom Trichter eingezogene Masse der Kunststoffgranulate gleich die aus die Düse gespritzte Masse ist, ergibt sich die folgende Beziehung

$$m^* = m \quad \text{Gl. (3.6)}$$

Anschließend kann die Temperaturerhöhung der Formmasse $\Delta\mathcal{G}$ mit Gl. (3.1) - Gl. (3.4) ermittelt werden:

$$\Delta\mathcal{G} = \mathcal{G}_{1D} - \mathcal{G}_0 = \frac{\sum Q_H + E_S + E_E - \sum Q_{VL} - \sum Q_K - E_{st} - p_D V}{mc_v} \quad \text{Gl. (3.7)}$$

mit
$$\sum Q_H = \sum Q_H + \sum Q_H^* + \sum Q_H^{**}, \quad \text{Gl. (3.8)}$$

$$\sum Q_{VL} = \sum Q_{VL} + \sum Q_{VL}^* + \sum Q_{VL}^{**}, \quad \text{Gl. (3.9)}$$

und
$$\sum Q_K = \sum Q_K + \sum Q_K^* + \sum Q_K^{**}, \quad \text{Gl. (3.10)}$$

Die durchschnittliche Massetemperatur berechnet sich durch:

$$\mathcal{G}_{1D} = \mathcal{G}_0 + \frac{\sum Q_H + E_S + E_E - \sum Q_{VL} - \sum Q_K - E_{st} - p_D V}{mc_v} \quad \text{Gl. (3.11)}$$

Wenn man in der Lage wäre, die einzelnen Größen obiger Gleichung zu erfassen und zu kontrollieren, könnte die Massetemperatur nach Prozessbedarf geregelt werden. Leider ist das in der Praxis kaum realisierbar. Der Grund liegt darin, dass keine Sicherheit bei der Erfassung der äußeren und inneren Einflüsse besteht [32]. Beispielweise kann die Heizenergie zwar durch einfache Messung von Strom und Spannung an dem Heizband berechnet werden. Es ist jedoch nicht klar, wie viel Wärme tatsächlich vom Plastifizierzylinder in die Schmelze transportiert wird. Es ist sehr schwierig bzw. auch mit hohem Aufwand nur bedingt möglich, den Wärmeverlust über die Zylinderoberfläche sowie den Kühlungsverlust am Trichterbereich zu erfassen. Um die Massetemperatur zu regeln, müssen noch Vereinfachungen getroffen werden.

Ziel der Energieanalyse ist die Konstanzhaltung der Schmelztemperatur. Wenn man in der Lage ist, die Schwankung der Summe von zugeführter und abgeführter Energie auf null zu reduzieren, wird die Schmelztemperatur konstant bleiben. Die folgende Analyse hat die Aufgabe, heraus zu finden, welche zugeführte und/oder abgeführte Energie aufgrund ihrer geringen Schwankung während des Spritzgießprozesses vernachlässigbar ist.

Da der Prozess während der Nebenzeit zeitlich konstant ist und sehr stationär verläuft, kann die Schwankung der Enthalpieerhöhung ($Q_H^{**} - Q_{VL}^{**} - Q_K^{**}$) während der Nebenzeit vernachlässigt werden. In der Einspritzphase wird die Einspritzarbeit E_E in das System

eingbracht, um die Schmelze gegen Widerstand (Einspritzverlust $p_d V$) in die Kavität fließen zu lassen. Daher kann hier angenommen werden, dass E_E gleich $p_d V$ ist. Die Temperatur der Schmelze, die aus der Düse tritt, wird durch Reibung bzw. Scherung im Kanal erhöht. Da die Einspritzzeit im Verhältnis zur Zykluszeit sehr kurz und konstant ist, kann die Schwankung der Heizenergie Q_H^* , des Wärmeverlusts Q_{VL}^* und der Wasserkühlung Q_K^* vernachlässigt werden. Daher kann die Enthalpieänderung während des Einspritzens vernachlässigt werden. Der Fokus zur Vereinfachung der Energiebilanz kann sich auf die Plastifizierphase richten.

In Abb. 11 (oben links) werden die zugeführten und abgeführten Energieanteile während der Plastifizierung dargestellt. Zu den abgeführten Energieanteilen zählen der Wärmeverlust über die Oberfläche, der Wärmeverlust über die Wasserkühlung des Trichterbereichs und die Staudruckarbeit. Die Heizenergie, die Dissipationsenergie und die Anfangsenthalpie des Materials stellen die Energiezufuhr dar. Bei einer modernen Produktion wird das Kunststoffgranulat möglichst unter konstanten Bedingungen (Temperatur und Feuchtigkeit) bereitgestellt. Somit kann die Schwankung der Enthalpie des eingezogenen Materials vernachlässigt werden. Da einerseits der Staudruck geregelt ist, andererseits die Plastifizierzeit quasi konstant ist, kann die Schwankung der Staudruckarbeit vernachlässigt werden. Die Schwankungen des Wärmeverlustes und der Kühlungsverlust können ebenfalls vernachlässigt werden. Da einerseits die Zylindertemperaturen auf den Sollwerten geregelt und dadurch konstant sind, andererseits die Heizenergie nicht der Hauptteil der Energiezufuhr (15-35 %) ist [12,151], wird dabei angenommen, dass die Schwankung der Heizenergie vernachlässigbar ist.

Nach den Vereinfachungen der Energiebilanz kann abgeleitet werden, dass die Dissipationsenergie konstant gehalten werden muss, um die Schwankung der Massetemperatur im Schneckenorraum zu minimieren. In den folgenden Abschnitten wird eine neue Plastifizierstrategie vorgestellt, in der die Dissipationsenergie konstant gehalten wird.

3.2 Regelung der Dissipationsenergie

Bevor die Dissipationsenergie geregelt wird, muss zuerst ermittelt werden, wie viel Dissipationsenergie dem System zugeführt werden soll. In der Praxis wird der Betriebspunkt der Maschine von den Maschinenbedienern optimiert. Die Kriterien eines optimalen Betriebspunkts sind eine hohe Prozessreproduzierbarkeit, um eine geringe Ausschussrate zu erreichen, eine kurze Zykluszeit für eine hohe Wirtschaftlichkeit und eine schonende Verarbeitung des Kunststoffes. Solange die Maschineneinstellung gute Produktionsergebnisse erzielt, kann die Dissipationsenergie dieses Betriebszustands als Referenz betrachtet werden. Die Referenzwerte der Schneckenantriebsleistung und der Plastifizierzeit bei dieser

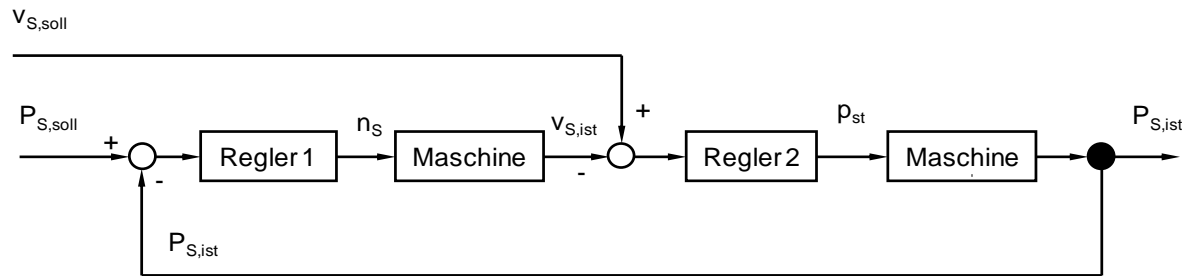
Produktion werden separat ermittelt. Da die Arbeit (Energie) das Produkt aus Leistung und Zeit ist, kann die Soll-Dissipationsenergie mittels einer einfachen Berechnung bestimmt werden.

Um die Dissipationsenergie zu regeln, gibt es zwei Strategien:

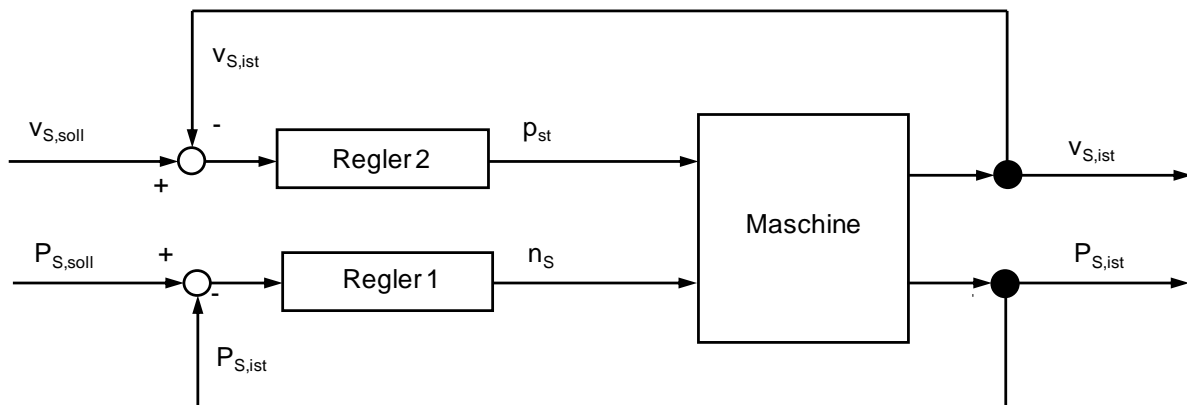
- I. Die Schneckenantriebsleistung und die Plastifizierzeit werden separat auf den jeweiligen Referenzwert geregelt. Dadurch wird die Ist-Dissipationsenergie auf den Sollwert geregelt.
- II. Es gibt keine Referenz für die Schneckenantriebsleistung und die Plastifizierzeit. Zur Regelung wird die Soll-Dissipationsenergie ermittelt. Die Antriebsleistung und die Plastifizierzeit müssen entsprechend geregelt werden, um die Ist-Dissipation bis zum Ende der Plastifizierphase stets an den Sollwert anzupassen.

Einerseits stellt die Strategie II hohe Anforderung an den Regelungsalgorithmus. Der Regler muss in der Lage sein, die Antriebsleistung und die Plastifizierzeit ständig neu zu berechnen und die Stellgrößen zurückzuführen. Dabei soll das Integral der Antriebsleistung über die Zeit innerhalb einer Plastifizierphase immer konstant bleiben. Andererseits ist das Resultat, dass die Plastifizierzeit der einzelnen Zyklen nicht konstant bleibt, für den Markt eventuell nicht akzeptabel. Bei der Spritzgießproduktion wird angestrebt, eine möglichst konstante Plastifizierzeit zu erzielen. In der Praxis müssen Maschinenbediener die Maschineneinstellgrößen ständig nachregeln, falls die Plastifizierzeit stark schwankt. Da die Strategie II zu einer großen Schwankung der Plastifizierzeit führt, werden die Maschinenbediener verunsichert, ob der Spritzgießprozess stabil ist. Daher wird die Strategie I zur Regelung der Dissipationsenergie verwendet.

Die Regelung der Plastifizierzeit wird durch die Regelung der Schneckenrücklaufgeschwindigkeit v_s realisiert. Ist die Ist-Schneckenrücklaufgeschwindigkeit auf den Sollwert geregelt, entspricht auch die Ist-Plastifizierzeit ihrem Sollwert. Nach dem Vergleich zwischen der Ist-Schneckenantriebsleistung $P_{S,ist}$ und dem Sollwert $P_{S,soll}$ wird die Stellgröße Schneckendrehzahl n_s vom Regler ermittelt und an die Maschine rückgeführt. Eine Änderung der Drehzahl führt zu einer Änderung der Antriebsleistung. Die Regelung der Schneckenrücklaufgeschwindigkeit erfolgt nach dem gleichen Prinzip. Dabei ist der Staudruck p_{st} die Stellgröße zur Regelung der Rücklaufgeschwindigkeit. Es wird der Effekt genutzt, dass ein höherer Staudruck den Schneckenrücklauf bremst. Soll die Schnecke schneller zurück laufen, muss der Staudruck gesenkt werden.



Sequentielle Regelung



Parallele Regelung

Abb. 12 Zwei mögliche Regelstrukturen

Oben: Sequentielle Regelung. Nach der Rückführung der Stellgröße Drehzahl wird die Schneckenrücklaufgeschwindigkeit auf den Sollwert geregelt.

Unten: Parallele Regelung. Die Schneckenantriebsleistung und die Schneckenrücklaufgeschwindigkeit werden unabhängig voneinander geregelt.

Zwei Regelstrukturen (siehe Abb. 12) können zur Regelung der Dissipationsenergie verwendet werden. Bei der sequentiellen Regelung (oben) wird zuerst die Stellgröße Drehzahl n_s nach dem Vergleich zwischen der Ist- und Soll-Antriebsleistung an die Maschine zurückgeführt. Mit der neuen Drehzahl ändert sich die Schneckengeschwindigkeit. Danach wird der Vergleich zwischen der Ist- und Soll-Schneckengeschwindigkeit durchgeführt. Anschließend wird die Stellgröße Staudruck an die Maschine zurückgeführt. Damit bleiben die Schneckenantriebsleistung und die Plastifizierzeit konstant. Bei der sequentiellen Regelstruktur muss die Regelung der Schneckenrücklaufgeschwindigkeit auf die Regelung der Antriebsleistung warten.

Im Gegensatz zur sequentiellen Regelung werden die Schneckenantriebsleistung und -rücklaufgeschwindigkeit bei der parallelen Regelung unabhängig voneinander geregelt. Die Regelung der zwei Größen findet gleichzeitig statt, wodurch die Anzahl der Rückführungen

der Stellgrößen pro Zeiteinheit im Vergleich zur sequentiellen Regelung verdoppelt werden kann. Daher ist die parallele Regelung regelungstechnisch gesehen vorteilhafter als die sequentielle Regelung. Die parallele Struktur wird bei der Realisierung der Regelung eingesetzt. In den folgenden Abschnitten wird die Regelung der Schneckenantriebsleistung und der Plastifizierzeit im Einzelnen näher erläutert. Zur Erhöhung der Reproduzierbarkeit des Prozesses wird die zweistufige Plastifizierung vorgestellt.

3.2.1 Regelung der Schneckenantriebsleistung

Um die Schneckenantriebsleistung zu regeln, müssen zuerst die Grundlagen betrachtet werden, wie die Schneckenantriebsleistung beim Spritzgießprozess berechnet wird. Generell gilt für die Leistung P_S einer Rotationsbewegung:

$$P_S = 2\pi \cdot M_d \cdot n_S, \quad \text{Gl. (3.12)}$$

wobei M_d das Drehmoment und n_S die Drehzahl ist.

Für das Schneckendrehmoment gilt nach [113,123]:

$$M_d = k \cdot n_S^n, \quad \text{Gl. (3.13)}$$

wobei n der Exponent des Potenzfließgesetzes ist. Der Faktor k ist abhängig von der Schneckengeometrie und der Schmelzeviskosität.

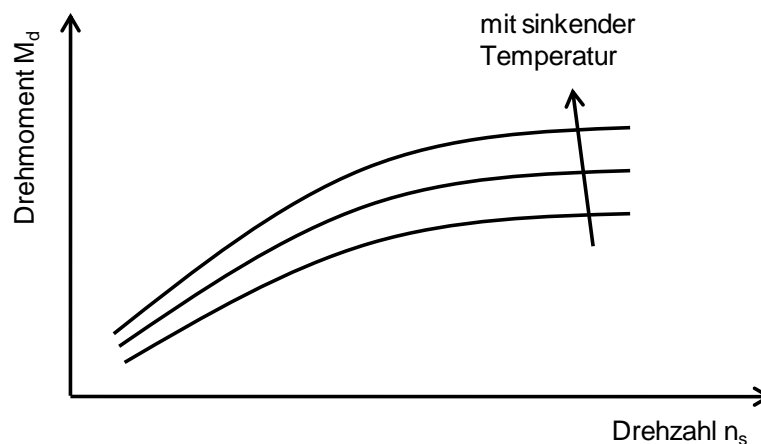


Abb. 13 Zusammenhang zwischen Drehmoment, Drehzahl und Temperatur

Das Schneckendrehmoment steigt mit steigender Drehzahl. Mit sinkender Temperatur wird die Schmelze viskoser, wodurch sich das Drehmoment erhöht.

Da Thermoplaste strukturviskos sind, nimmt die Schmelzeviskosität mit steigender Schergeschwindigkeit ab. Daher ist der Exponent des Potenzfließgesetzes n kleiner als 1 ($n < 1$) [59,86]. Der Faktor k ist nicht konstant und abhängig von der Schnecken­geometrie, dem verarbeiteten Material und der Verarbeitungstemperatur [113,123]. Abb. 13 zeigt einen typischen Verlauf des Schneckendrehmoments in Abhängigkeit von der Drehzahl und der Temperatur. Nach Gl. (3.13) steigt das Drehmoment mit erhöhter Drehzahl. Da der Exponent n kleiner als 1 ist, nimmt das Drehmoment degressiv über die Drehzahl zu. Eine sinkende Schmelzetemperatur führt zu einer Steigerung der Viskosität, dadurch erhöht sich das Drehmoment.

Nach dem Einsatz der Gl. (3.13) in Gl. (3.12) ergibt sich:

$$P_S = k_1 \cdot n_S^{n+1} \quad \text{Gl. (3.14)}$$

mit $k_1 = 2\pi \cdot k$. Gl. (3.15)

Die Stellgröße Drehzahl kann nach folgender Gleichung ermittelt werden:

$$n_S = \left(n_{S,ist}^{1+n} + \frac{P_{S,soll} - P_{S,ist}}{k_1} \right)^{\frac{1}{1+n}} . \quad \text{Gl. (3.16)}$$

Sind die Parameter k_1 und n bekannt, kann die Stellgröße Drehzahl zur Regelung der Schnecken­antriebsleistung erneut berechnet werden. Daher sind die Größen n und k_1 die Regelparameter.

Der Exponent des Potenzfließgesetzes n kann nach folgender Beziehung ermittelt werden.

$$n = \log \left(\frac{\tau}{K} \right) \quad \text{Gl. (3.17)}$$

wobei K der so genannte Fließgesetzkoeffizient, τ die Schubspannung und $\dot{\gamma}$ die Schergeschwindigkeit ist.

Der Fließgesetzkoeffizient K ist eine temperaturabhängige Größe und wird durch

$$K = K_{0T} \cdot e^{-\beta(T-T_0)} \quad \text{Gl. (3.18)}$$

beschrieben. Dabei beschreibt β die Temperaturabhängigkeit der Viskosität. Die Konstante K_{0T} entspricht der Viskosität bei der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma} = 1s^{-1}$ und der Bezugstemperatur $T_0 = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ [19].

In der kostenpflichtigen Werkstoffdatenbank M-Base von der Firma M-Base Engineering + Software GmbH, Aachen, kann der Exponent des Potenzfließgesetzes n für die meisten technischen Kunststoffe entnommen werden. Jedoch ist diese Größe n für Standardkunststoffe (Polyethylen, Polypropylen und Polystyrol) in der Datenbank nicht zu finden. Die Ermittlung der Größe n erfordert aufwendige experimentelle Versuche mit spezifischen Laborgeräten. Außerdem ist die genaue Ermittlung des Faktors k (siehe Gl. (3.13)) äußerst aufwendig, da dieser abhängig von der Spritzeinheit und dem eingesetzten Kunststoff ist. Daher ist die Regelung der Antriebsleistung mit bekannten Regelparametern n und k für den Einsatz in der Praxis nicht tauglich. Stattdessen soll ein praxisorientiertes Modell zur Regelung gefunden werden.

In der realen Produktion eines Produkts werden die Maschineneinstellgrößen vor der ersten Produktion vom Maschinenbediener optimiert und festgelegt. Diese Daten werden gespeichert und bei einer späteren Produktion wieder in die Maschinensteuerung geladen. Da sich das Maschinenverhalten (Verschleiß), die Umgebung (Temperatur) und die Kunststoffeigenschaften (Chargenschwankung) über die Zeit ändern können, werden die Maschineneinstellgrößen ggf. angepasst, um einen reproduzierbaren Prozess zu erzielen. Jedoch werden die Maschineneinstellgrößen, insbesondere die Drehzahl und die Zylindertemperatur, nur in einem kleinen Bereich geändert. Es genügt, wenn sich die Regelung der Antriebsleistung auf dieses kleine Betriebsfenster beschränkt. Das bedeutet, dass die Ermittlung des Zusammenhangs zwischen der Schneckenantriebsleistung und der Drehzahl für dieses Produkt nur für dieses Betriebsfenster erforderlich ist.

In Abb. 14 wird der Zusammenhang zwischen dem Drehmoment und der Drehzahl in einem begrenzten Regelbereich dargestellt. Die Detailansicht A (siehe Abb. 14 rechts) stellt den Zusammenhang dar zwischen dem Drehmoment und der Drehzahl in einem engen Drehzahlbereich. Dabei entspricht das Drehmoment M_{d0} dem Soll-Drehmoment. Für die Soll-Antriebsleistung $P_{S,soll}$ gilt:

$$P_{S,soll} = 2\pi \cdot n_{s0} \cdot M_{d0}. \quad \text{Gl. (3.19)}$$

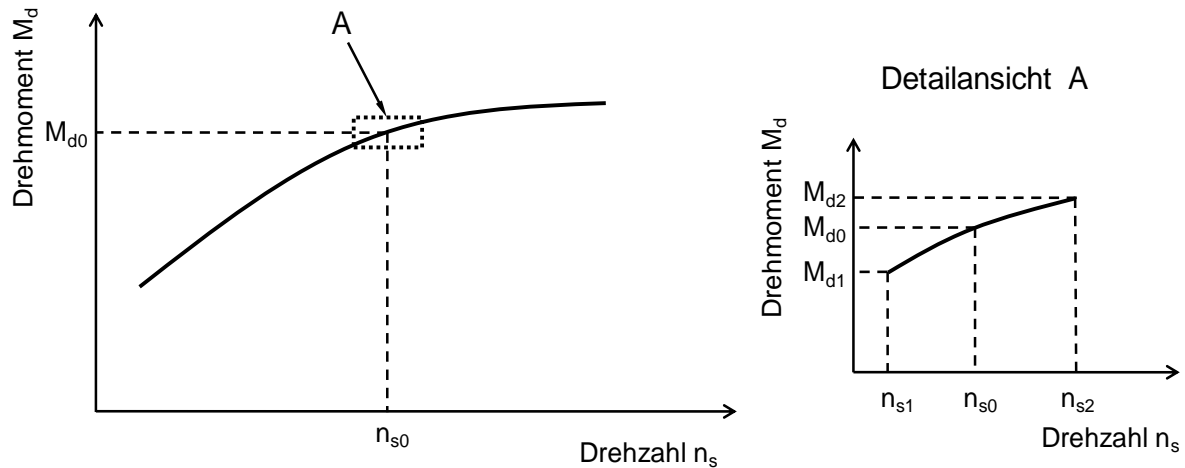


Abb. 14 **Verlauf des Drehmoments in einem kleinen Regelbereich**

Im kleinen Fenster der Drehzahl steigt das Drehmoment quasi linear. Dadurch kann ein linearer Zusammenhang zwischen dem Drehmoment und der Drehzahl erstellt werden.

Obwohl das Drehmoment über den gesamten Drehzahlbereich degressiv zunimmt, kann hier angenommen werden, dass der Verlauf des Drehmoments über die Drehzahl im kleinen Drehzahlfenster ein lineares Verhalten aufweist. Damit kann der Zusammenhang zwischen dem Drehmoment und der Drehzahl näherungsweise aufgestellt werden.

$$M_d = M_{d0} + k_{Md} \cdot (n_s - n_{s0}), \quad \text{Gl. (3.20)}$$

mit

$$k_{Md} = \frac{M_{d2} - M_{d1}}{n_{s2} - n_{s1}}. \quad \text{Gl. (3.21)}$$

Statt zwei Regelparameter n und k_1 wird hier nur ein Regelparameter k_{Md} benötigt. Ist die Einrichtung zur Messung des Drehmoments vorhanden, so kann die Ermittlung des Faktors k_{Md} leicht durchgeführt werden. Die Messeinrichtungen hinzu werden in Kapitel 3.3 näher erläutert. Zur Ermittlung der Stellgröße Drehzahl n_s wird folgende Beziehung verwendet:

$$n_s = n_{s,ist} + \sqrt{\frac{P_{S,soll} - P_{S,ist}}{2\pi \cdot k_{Md}}}. \quad \text{Gl. (3.22)}$$

3.2.2 Regelung der Plastifizierzeit

Die Regelung der Plastifizierzeit erfolgt durch die Regelung der Schneckenrücklaufgeschwindigkeit. Entspricht diese dem Sollwert, so ist die Plastifizierzeit konstant. Sie wird von vielen Faktoren, wie Drehzahl, Staudruck, Schnecken geometrie, etc., beeinflusst.

Für die mittlere Schneckenrücklaufgeschwindigkeit \bar{v}_s gilt:

$$\bar{v}_s = \frac{4G}{\pi \cdot D^2}, \quad \text{Gl. (3.23)}$$

wobei D der Schneckendurchmesser und G der Durchsatz ist.

Da der Schneckendurchmesser konstant ist, wird die mittlere Schneckenrücklaufgeschwindigkeit \bar{v}_s nach Gl. (3.23) nur vom Durchsatz bestimmt. Der Durchsatz bezeichnet die Menge, die innerhalb eines festgelegten Zeitraums von der Plastifiziereinheit aufgeschmolzen und in den Schneckenraum gefördert wird. Er wird auch als Plastifizierleistung bezeichnet. In [123] wird eine Gleichung zur Ermittlung des Durchsatzes vorgestellt:

$$G = k_2 \cdot n_s - k_3 \cdot p_{st}, \quad \text{Gl. (3.24)}$$

mit
$$k_2 = \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot h \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi}{2} \quad \text{Gl. (3.25)}$$

und
$$k_3 = \frac{\pi \cdot D \cdot h^3 \cdot \sin^2 \varphi}{12\eta \cdot l}. \quad \text{Gl. (3.26)}$$

D = Schneckendurchmesser

h = Gangtiefe

φ = Steigungswinkel

p_{st} = Staudruck

η = Viskosität

l = Schneckenlänge

Die genaue Maßbezeichnung der Schnecke befindet sich in Anhang B.

Es ist zu erkennen, dass der Durchsatz maßgeblich von der Schneckengeometrie abhängt. Bei einer vorhandenen Schnecke ist die Schneckengeometrie jedoch unveränderbar. Eine erhöhte Drehzahl führt zu einer Steigerung der Schergeschwindigkeit und dadurch zu einer Senkung der Viskosität der Schmelze. Der erste Term auf der rechten Seite der Gl. (3.24) nimmt mit steigender Drehzahl zu. Da die Schmelzeviskosität mit steigender Drehzahl abnimmt, steigt der Faktor k_3 und dadurch auch der zweite Term auf der rechten Seite der Gl. (3.24) an. Jedoch nimmt der resultierende Durchsatz mit steigender Drehzahl zu. Ein höherer Staudruck führt zu einem niedrigeren Durchsatz, da durch den erhöhten Staudruck die Schmelzeförderung erschwert wird.

Hierzu wurden Versuche durchgeführt, in denen die Schneckenrücklaufgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Drehzahl und dem Staudruck untersucht wurde. Eine hydraulische Spritzgießmaschine des Typs KM 125 C2 der Firma Krauss-Maffei Technologies GmbH,

München, wurde verwendet. Die Spritzeinheit verfügt eine Standardschnecke mit dem Durchmesser von 30 mm. Der Kunststoff PE-LD (Polyethylen – low density) des Typs Lupolen 3020K (Fa. LyondellBasell, Rotterdam Niederlande) wurde verarbeitet.

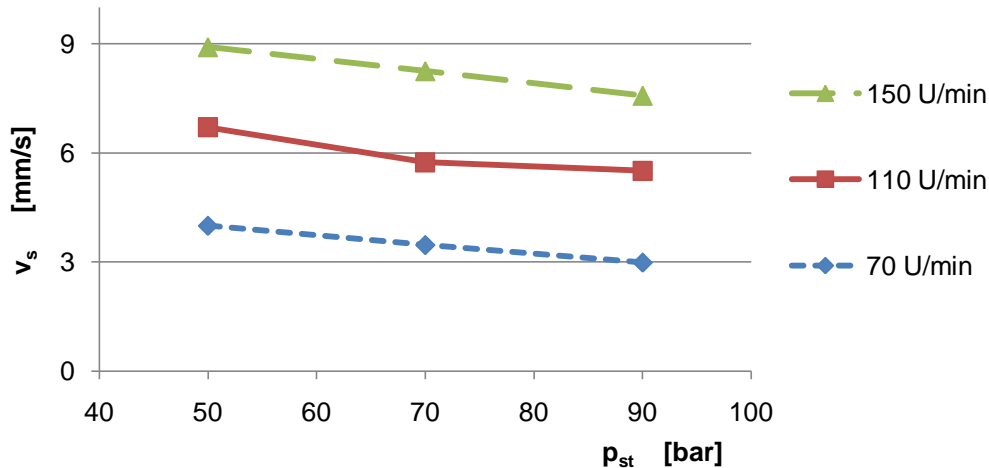


Abb. 15 **Schneckenrücklaufgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Drehzahl und dem Staudruck**

Mit erhöhter Drehzahl und sinkendem Staudruck p_{st} steigt die Schneckenrücklaufgeschwindigkeit v_s .

Die Ergebnisse (siehe Abb. 15) bestätigen, dass die Schneckenrücklaufgeschwindigkeit mit sinkendem Staudruck und erhöhter Drehzahl ansteigt. Zur Regelung der Schneckenantriebsleistung wird die Stellgröße Drehzahl n_s ständig angepasst. Die Schneckenrücklaufgeschwindigkeit v_s wird nach Gl. (3.24) aufgrund der geänderten Drehzahl vom Sollwert abweichen. Um die Schneckenrücklaufgeschwindigkeit zu regeln, wird der Staudruck als die anzupassende Stellgröße verwendet. Daher ist es erforderlich, die mathematische Beziehung zwischen der Schneckengeschwindigkeit und dem Staudruck zu ermitteln. Aus Gl. (3.23) und Gl. (3.24) ergibt sich:

$$\Delta \bar{v}_S = k_{vs} \cdot \Delta p_{st}, \quad \text{Gl. (3.27)}$$

mit

$$k_{vs} = -\frac{h^3 \cdot \sin^2 \varphi}{3 \cdot D \cdot \eta \cdot l}. \quad \text{Gl. (3.28)}$$

Zur Ermittlung des Regelparameters k_{vs} müssen die Schneckengeometrie und die Schmelzeviskosität bekannt sein. Während der Plastifizierungsphase befindet sich eine Mischung aus Kunststofffeststoff und -schmelze im Schneckenkanal. Die auftretende Schergeschwindigkeit in der Schmelze ist daher schwer physikalisch zu ermitteln. Da die Schmelzeviskosität von der Schergeschwindigkeit abhängig ist, ist die Ermittlung des Regelparameters k_{vs} mit

Gl. (3.28) nur schwer durchzuführen. Eine einfachere Methode dafür ist der experimentelle Versuch. Dabei wird die Spritzgießmaschine als Messgerät benutzt. Nach der Änderung des Staudrucks wird die neue Plastifizierzeit t_p auf dem Maschinendisplay angezeigt. Der Dosierhub h_p ist bekannt. Für die Schneckenrücklaufgeschwindigkeit \bar{v}_s gilt:

$$\bar{v}_s = \frac{h_p}{t_p}. \quad \text{Gl. (3.29)}$$

Für den Regelparameter k_{vs} gilt:

$$k_{vs} = \frac{\bar{v}_{s1} - \bar{v}_{s2}}{p_{st1} - p_{st2}}. \quad \text{Gl. (3.30)}$$

Zur Ermittlung der Stellgröße Staudruck p_{st} wird folgende Beziehung verwendet werden.

$$p_{st} = p_{st,ist} + \frac{v_{s,soll} - v_{s,ist}}{k_{vs}}. \quad \text{Gl. (3.31)}$$

3.3 Versuchseinrichtungen

Eine Voraussetzung für die Regelung der Dissipationsenergie ist die Erfassung der aktuellen Ist-Werte von Drehzahl, Staudruck, Schneckenposition und Schneckendrehmoment. Die Drehzahl wird mit einem Drehgeber erfasst, wobei die Frequenz des Signals ermittelt wird. Die Messung des Staudrucks erfolgt durch einen Druckaufnehmer. Taucht der Druckaufnehmer in den Schneckenorraum ein, besteht die Gefahr, dass sich schwarze Punkte aufgrund des schlechten Spülverhaltens innerhalb des Schneckenorraums in Kunststoffbauteilen bilden. Dies ist für optische Bauteile sehr kritisch zu bewerten. Daher wird der Druckaufnehmer in der Spritzgießmaschine nicht im Schneckenorraum, sondern im Hydraulikzylinder installiert. Der anliegende Staudruck wird über das Flächenverhältnis zwischen Schneckenquerschnitt und Kolbenquerschnitt berechnet. Aufgrund der Reibung zwischen der Schnecke und der Zylinderinnenbohrung kann der tatsächliche Staudruck im Schneckenorraum nicht exakt ermittelt werden. Dennoch stellt diese Konstellation einen guten Kompromiss dar. Die Schneckenposition wird mit einem Wegaufnehmer erfasst. Die Maschine verfügt über die entsprechenden Sensoren, um die oben genannten Werte direkt ermitteln zu können. Nur die Erfassung des Schneckendrehmoments muss in dieser Arbeit noch realisiert werden.

Die Messung des Drehmoments kann direkt oder indirekt erfolgen. Zur direkten Messung werden Drehmomentaufnehmer eingesetzt. Die meisten Drehmomentsensoren arbeiten mit Dehnungsmessstreifen (DMS). Neben den DMS gibt es auch Drehmomentaufnehmer, die nach dem piezoelektrischen, dem magnetoelastischen oder dem optischen Prinzip funktionieren. Da die Schnecke während der Plastifizierung rotiert, wird der Drehmomentaufnehmer mit einem Schleifring ausgestattet. Dabei verbindet der Drehmomentaufnehmer die beide Seiten (Schnecke und Antriebswelle). Da die Schnecke durch eine Keilverbindung mit der Antriebswelle der Maschine gekoppelt ist, gibt es keine Möglichkeit, den Drehmomentaufnehmer zu installieren, da sonst die Schnecke zum Zwecke der Installation des Drehmomentaufnehmers erneut gefertigt werden muss. Deshalb wurde eine indirekte Methode zur Drehmomentmessung entwickelt.

In dieser Arbeit wird eine hydraulische Spritzgießmaschine des Typs KM 125 C2 der Firma Krauss-Maffei Technologies GmbH, München, zur Regelung der Dissipationsenergie verwendet. Die Schnecke wird von einem hydraulischen Radialkolbenmotor angetrieben. Bei diesem Motortyp wird als Nenngröße "das spezifische Drehmoment" verwendet. Es beschreibt das Verhältnis zwischen dem Drehmoment und dem hydraulischen Öldruck. Für das Drehmoment gilt:

$$M_d = T_{spez} \cdot p_{\text{Öl}} \quad \text{Gl. (3.32)}$$

wobei T_{spez} das spezifische Drehmoment des Motors und $p_{\text{Öl}}$ der Öldruck ist.

Nach Angabe des Herstellers beträgt das spezifische Drehmoment beim hier verwendeten Motor des Typs M0300/250 von der Firma Pleiger, Witten, Deutschland, 4 Nm/bar. Ist der Öldruck bekannt, kann das Drehmoment nach einfacher Umrechnung ermittelt werden. Zur Messung des hydraulischen Öldrucks wird ein Druckaufnehmer am Motor installiert.

In Abb. 16 wird der Signalfluss der Regelung dargestellt. Da Messrechner nur digitale Signale verarbeiten können, werden hier ein AD-Wandler des Typs DT 9837A und ein DA-Wandler des Typs DT 9853 von der Firma Data Translation, Bietigheim, Deutschland, verwendet. Der AD-Wandler wandelt analoge Signale in digitale Signale um, umgekehrt wandelt der DA-Wandler digitale Signale in analoge um. Die von den Sensoren erfassten analogen Signale (Spannungen) sind in der Regel sehr gering und müssen noch mit einem Verstärker hochskaliert werden. In dem hier ausgewählten AD-Wandler ist dieser Verstärker bereits integriert.

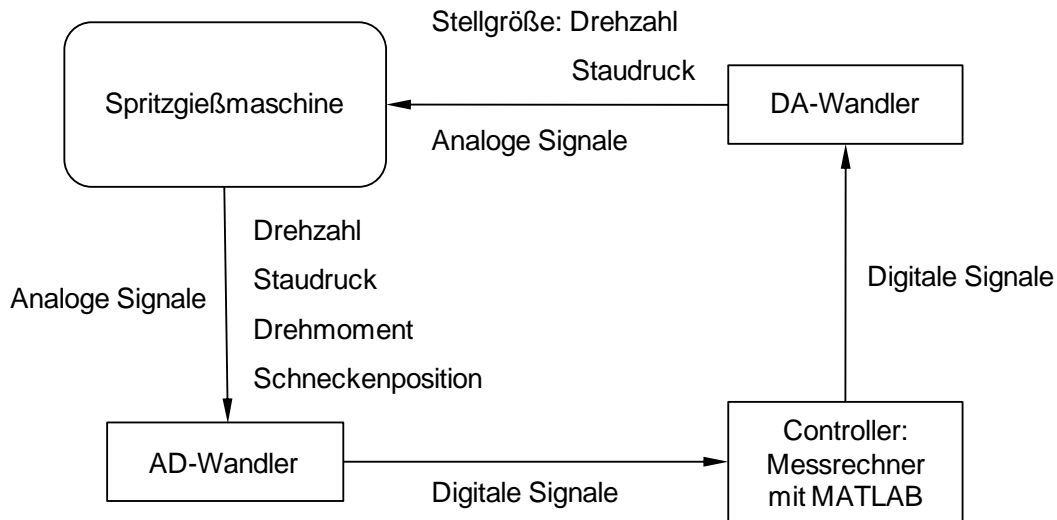


Abb. 16 **Schematische Darstellung des Signalfusses der Regelung**

Die analogen Signale des Ist-Zustands der Maschine werden durch einen AD-Wandler zum Messrechner geleitet. Das Regelungsprogramm verarbeitet die Eingangssignale und gibt die Stellgrößen aus. Die Signale werden vom DA-Wandler umgewandelt und auf die Maschinensteuerung rückgeführt. Das Programm wird mit MATLAB geschrieben.

Der Messrechner nimmt die digitalen Signale auf. Die Istwerte werden mit den Sollwerten verglichen. Die Stellgrößen Drehzahl und Staudruck können nach Gl. (3.22) und Gl. (3.31) ermittelt werden. Anschließend werden die Stellgrößen über einen DA-Wandler auf die Maschine rückgeführt. Dieser Vorgang wird mittels eines MATLAB-Programms realisiert. MATLAB R2008a von der Firma The MathWorks, Inc., Natick MA USA, verfügt über eine spezielle Toolbox "Data Akquisition". Diese enthält eine umfassende Sammlung von Werkzeugen, um analoge und digitale Ein- und Ausgaben mit einer Vielzahl PC-kompatibler Geräte zur Datenerfassung auszutauschen. Mit der Toolbox wird die Programmieraufgabe deutlich erleichtert. Die Spritzgießmaschine liest die analogen Signale der Stellgrößen ein und wandelt sie nach vordefinierten Beziehungen in reale physikalische Werte (Drehzahl in U/min und Staudruck in bar) um. Somit ist der Regelungskreis geschlossen.

3.4 Experimentelle Ermittlung der Regelparameter

Nachdem die Versuchsvorrichtungen vorbereitet wurden, können die ersten Prozessuntersuchungen durchgeführt werden. Dabei wurden die Schneckenrücklaufgeschwindigkeit, das Schneckendrehmoment untersucht. Der für die Regelung der Schneckenantriebsleistung zuständige Parameter k_{Md} und der für die Regelung der Plastifizierzeit zuständige Parameter k_{vs} sind von der Schnecken geometrie, der Drehzahl, der Verarbeitungstemperatur und der

Kunststoffviskosität abhängig. Ihre Ermittlung ist mittels der physikalischen Theorie nur schwer durchführbar. Jedoch können sie durch experimentelle Versuche für einen bestimmten Betriebszustand ermittelt werden.

3.4.1 Schneckendrehmoment und Regelparameter k_{Md}

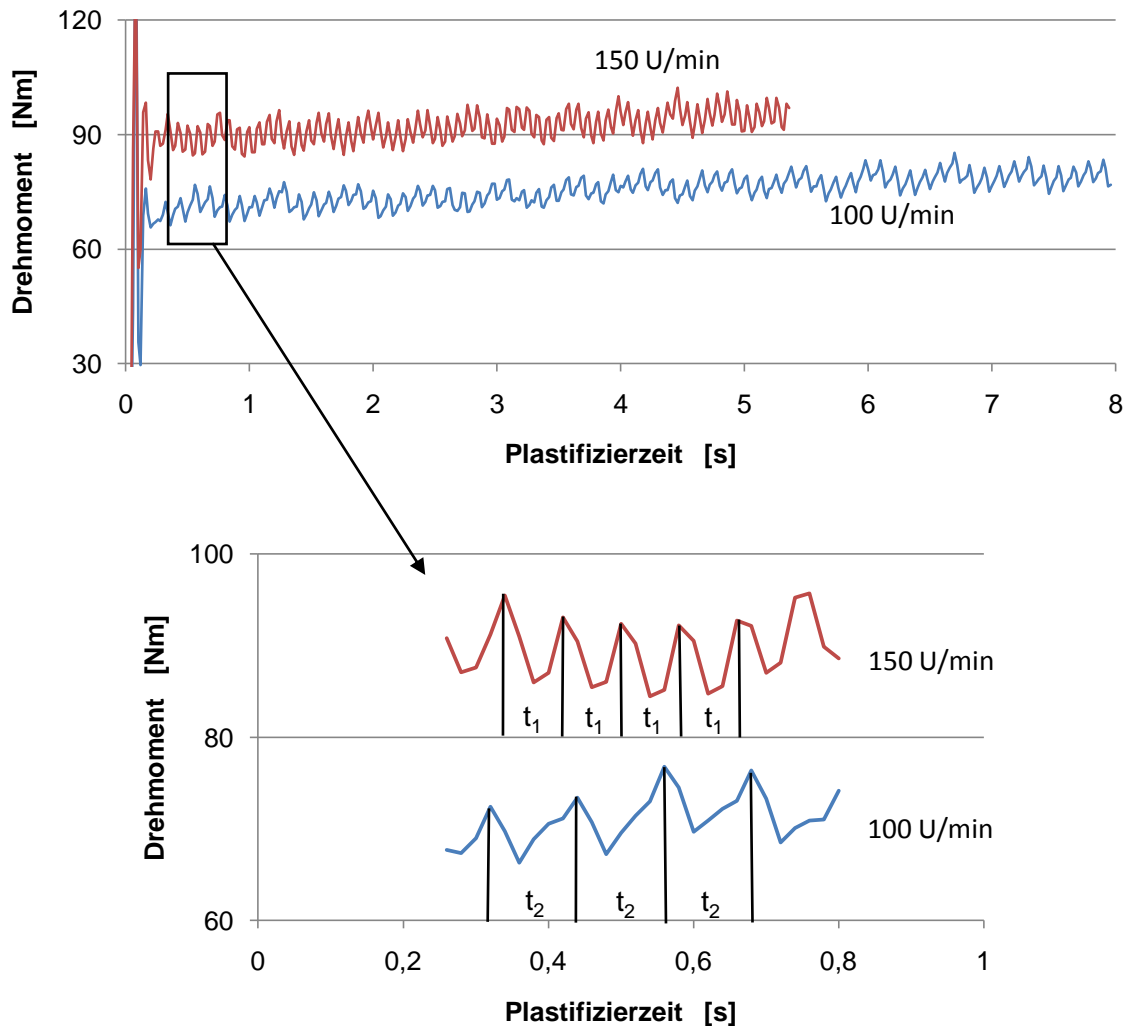


Abb. 17 **Drehmomentverlauf über Plastifizierzeit in Abhängigkeit von der Drehzahl**

Oben: Das Drehmoment weist einen pulsformigen Verlauf auf. Während die Plastifizierzeit mit höherer Drehzahl sinkt, steigt das Drehmoment.

Unten: Der markierte Bereich wird detaillierter dargestellt. Die Pulse bei gleicher Drehzahl weisen eine gleiche Frequenz auf.

In Abb. 17 oben werden Drehmomentverläufe mit der Drehzahl 100 U/min und 150 U/min dargestellt. Das Drehmoment steigt in der Anfangsphase der Plastifizierung sehr steil an und erreicht ein deutlich höheres Niveau als das durchschnittliche Drehmoment. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Schnecke aufgrund der Beschleunigung vom Ruhezustand auf die eingestellte Drehzahl mehr Drehmoment in der Anfangsphase benötigt. Da eine höhere

Drehzahl zu einer Steigerung des Durchsatzes führt, ist die Plastifizierzeit mit der Drehzahl 150 U/min kürzer als die mit der Drehzahl 100 U/min. Gleichzeitig führt die höhere Drehzahl zu einem höheren Drehmoment. Beide Drehmomentkurven weisen einen pulsartigen Verlauf auf.

Das untere Bild der Abb. 17 zeigt die detaillierte Ansicht des markierten Bereichs. Interessanterweise weisen die Pulse des Drehmomentverlaufs bei gleicher Drehzahl ein konstantes Intervall auf. Nach genauer Berechnung mit den Messwerten beträgt $t_1 = 80$ ms und $t_2 = 120$ ms. Dies ist auf die Arbeitsweise des hydraulischen Radialkolbenmotors zurückzuführen. Bei dieser Spritzgießmaschine wird ein hydraulischer Motor mit fünf Kolben eingesetzt. Die Arbeitskolben sind dabei radial um eine Kurbelwelle angeordnet. Zur Erzeugung der Rotationsbewegung treiben die fünf Kolben die Kurbelwelle nacheinander an, dies führt zu einer zyklischen Öldruckschwankung im Motor. Da das Drehmoment ein Produkt aus dem Öldruck und dem spezifischen Drehmoment ist, entsteht hierbei ein zyklisch schwankendes Drehmoment.

Die theoretische zyklische Zeit t_z kann nach folgender Gleichung ermittelt werden.

$$t_z = \frac{1}{\frac{n_s}{60} \cdot 5} = \frac{12}{n_s} \quad \text{Gl. (3.33)}$$

wobei die Einheit der Drehzahl [U/min] entspricht. Die mittels dieser Gleichung berechneten zyklischen Zeiten entsprechen den mit den Messdaten ermittelten Zeiten. Zur Ermittlung des Regelparameters k_{Md} wird die Gl. (3.21) verwendet. Dabei wird die Drehzahl variiert, anschließend werden die auftretenden Drehmomente protokolliert. Das Drehmoment bezieht sich auf den Durchschnitt der Messdaten. Nach einfacher Umrechnung erhält man den Regelparameter k_{Md} .

3.4.2 Schneckenrücklaufgeschwindigkeit und Regelparameter k_{vs}

Die Schneckenrücklaufgeschwindigkeit kann nicht direkt vom Sensor erfasst werden. Die Ermittlung der Geschwindigkeit erfolgt durch die Änderung der Schneckenposition und ihren Zeitbedarf:

$$v_s = \frac{\Delta x_s}{t}, \quad \text{Gl. (3.34)}$$

wobei Δx_s die Änderung der Schneckenposition und t der Zeitbedarf sind. Bei der Messung wird die Schneckenposition nach einer vordefinierten Frequenz abgetastet. Hierbei wird die

Abtastrate 1 kHz definiert. Das heißt, dass die Schneckenposition nach jeder Millisekunde abgetastet wird. Dividiert man die Positionsänderung durch die Zeit, erhält man die Schneckenrücklaufgeschwindigkeit.

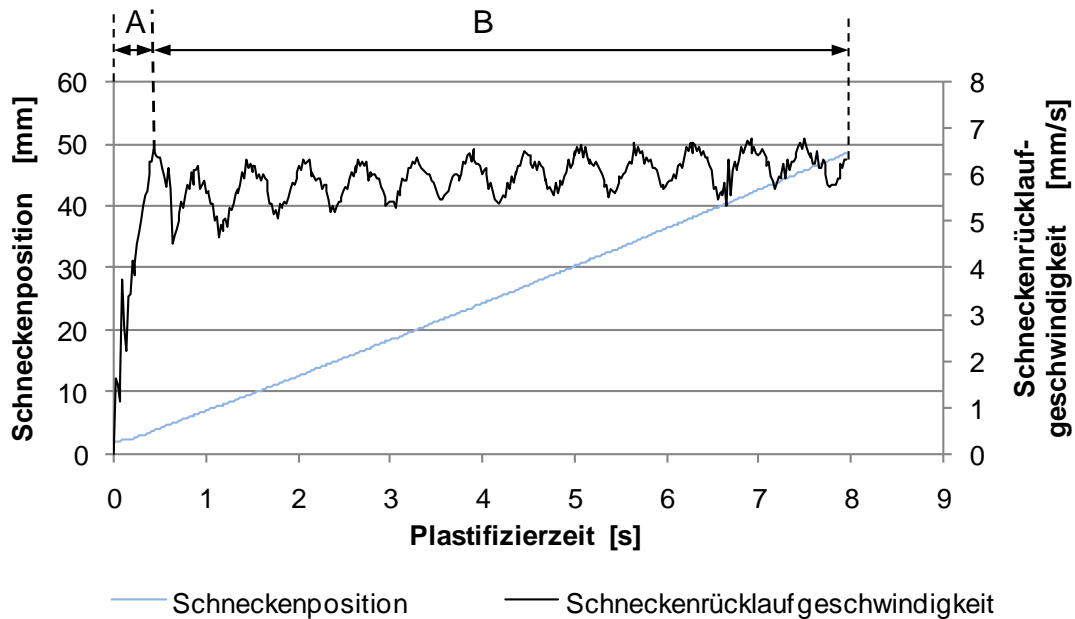


Abb. 18 **Darstellung der Schneckenposition und der Schneckenrücklaufgeschwindigkeit über der Plastifizierzeit an einer hydraulischen Spritzgießmaschine**

Die Plastifizierphase kann in zwei Phasen eingeteilt werden. In Phase A nimmt die Schneckenrücklaufgeschwindigkeit rasch zu. Die Schneckengeschwindigkeit verläuft in der Phase B nicht konstant und weist eine pulsartige Schwankung auf.

In Abb. 18 werden die Schneckenposition und die Schneckenrücklaufgeschwindigkeit über Plastifizierzeit dargestellt. Dabei wird eine Drehzahl von 100 U/min eingestellt. Die Plastifizierzeit beträgt 8 s. Obwohl die Schneckenposition augenscheinlich linear verläuft, weist die Schneckengeschwindigkeit große Schwankungen über der Zeit auf. Die Plastifizierung fängt unmittelbar nach der Nachdruckphase an. Die Schnecke beginnt zu rotieren. Zeitgleich schiebt der hohe Restdruck im Schneckenorraum die Schnecke kräftig zurück. Daher ist eine steile Steigung der Geschwindigkeit in der ersten Phase A zu erkennen. Danach verläuft die Schneckengeschwindigkeit jedoch nicht konstant. Sie weist eine regelmäßige pulsartige Schwankung in der zweiten Phase B auf. Nach einfacher Zählung werden ca. 13,3 Pulse in der Phase B ermittelt. Dies ist wiederum auf die Arbeitsweise des hydraulischen Motors zurückzuführen. Die Schneckendrehzahl ist zwar geregelt, jedoch ist sie innerhalb einer Umdrehung nicht konstant. Jede Umdrehung verursacht eine Drehzahlschwankung und somit auch eine Geschwindigkeitsschwankung. Die Anzahl der

Schneckenumdrehung bei diesem Betriebszustand (Drehzahl $n_s = 100$ U/min und Plastifizierzeit $t_p = 8,0$ s) kann ermittelt werden:

$$z = \frac{n_s}{60} \cdot t_p = \frac{100}{60} \cdot 8,0 = 13,33.$$

Die errechnete Anzahl der Pulse stimmt mit dem durch manuelle Aufzählung gewonnenen Ergebnis überein. Dieser Zusammenhang kann durch zahlreiche Versuche bestätigt werden. In der Phase B nimmt die Schneckenrücklaufgeschwindigkeit unabhängig von den Schwankungen tendenziell zu. Diese Tendenz kann nicht bei allen Betriebszuständen nachgewiesen werden. Für manche Prozesse mit anderen Kunststoffen und geänderten Maschineneinstellungen wurde auch eine abnehmende Tendenz festgestellt.

Zur Ermittlung des Regelparameters k_{vs} wurde die Spritzgießmaschine als Messgerät verwendet. Dabei wurde die neue Plastifizierzeit nach Variation des Staudrucks protokolliert. Die Plastifizierzeit kann man am Bildschirm der Spritzgießmaschine ablesen. Mit bekanntem Dosierhub kann die mittlere Schneckenrücklaufgeschwindigkeit ermittelt werden:

$$\bar{v}_s = \frac{h_p}{t_p}. \quad \text{Gl. (3.35)}$$

Für den Regelparameter k_{vs} gilt:

$$k_{vs} = \frac{\bar{v}_{s1} - \bar{v}_{s2}}{p_{st1} - p_{st2}}. \quad \text{Gl. (3.36)}$$

3.5 Ermittlung der Referenzkurven

Werden die Schneckenantriebsleistung und die Plastifizierzeit geregelt, so muss ständig ein Vergleich zwischen dem Sollwert und dem Istwert durchgeführt werden. Daher ist es erforderlich, die Sollwerte für die Antriebsleistung und die Plastifizierzeit zu ermitteln. Da das Drehmoment und die Schneckenrücklaufgeschwindigkeit während der Plastifizierung nicht konstant bleiben, ist es erforderlich, Referenzkurven für beide Prozessparameter zu ermitteln. Während der Regelung lässt sich der Sollwert für die aktuelle Schneckenposition anhand bereits ermittelter Referenzen bestimmen. In diesem Kapitel werden die Methoden zur Ermittlung der Referenzkurven erläutert.

3.5.1 Referenzkurve der Schneckenantriebsleistung

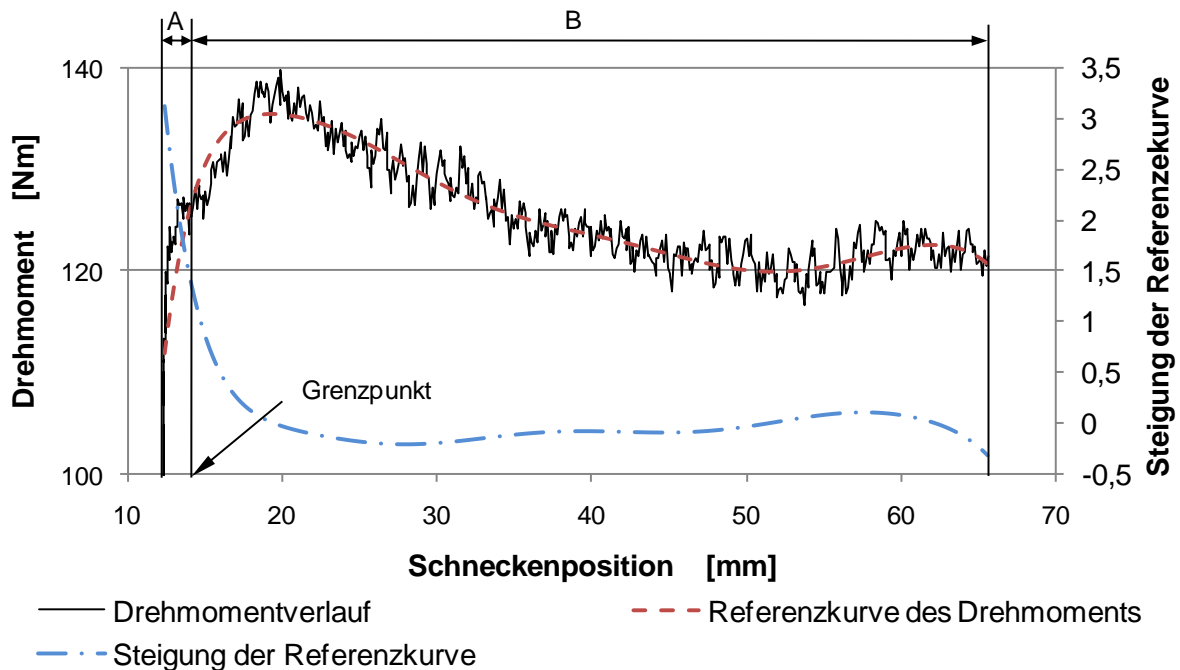


Abb. 19 **Darstellung einer Drehmomentverlaufskurve über die Schneckenposition**

Der Drehmomentverlauf kann in zwei Phasen eingeteilt werden. In der Phase A ist der Drehmomentverlauf sehr dynamisch. In dieser Phase wird keine Regelung der Antriebsleistung durchgeführt.

Die Ermittlung der Referenzkurven wird mit konventioneller Plastifizierung (keine Regelung der Dissipationsenergie) durchgeführt. Dabei werden die Drehzahl und der Staudruck vom Maschinenbediener festgelegt und bleiben konstant. Die Schneckenantriebsleistung kann mit dem Drehmoment und der Drehzahl mittels Gl. (3.12) berechnet werden. Da die Drehzahl bekannt und konstant ist, muss lediglich das Soll-Drehmoment ermittelt werden. Das Schneckendrehmoment (siehe Abb. 19) ist nicht konstant über den gesamten Dosierweg. Der Drehmomentverlauf kann in zwei Phasen eingeteilt werden. Gegenüber der Phase B nimmt das Drehmoment in der Phase A rasch zu. Da das Drehmoment mit hoher Dynamik ansteigt, ist die Regelung der Antriebsleistung in dieser Phase nicht sinnvoll. Die Regelung soll nur in Phase B erfolgen. Es ist daher erforderlich, die Schneckenposition zu ermitteln, ab der die Phase A beendet ist. Die Position, bei der die zwei Phasen A und B aneinander grenzen, wird in dieser Arbeit "Grenzpunkt" genannt.

Zur Ermittlung des Grenzpunkts muss zuerst die Referenzkurve des Drehmomentverlaufs mittels der polynomialen Regression bestimmt werden. Die polynomialen Regressionsanalyse ist ein statistisches Analyseverfahren, um die Beziehung zwischen Wertepaaren festzustellen [18,140]. Die mathematischen Grundlagen der polynomialen Regression befinden sich im

Anhang C. Ist die Referenzkurve ermittelt, kann die Steigung der Referenzkurve über die Schneckenposition nach einfacher Berechnung bestimmt werden. In Abb. 19 ist zu erkennen, dass die Steigung der Referenzkurve in der Phase A wesentlich größer ist als die Steigung in der Phase B. Hierbei wird definiert, dass die Phase A beendet ist, sobald die Steigung den Wert 1,5 unterschreitet.

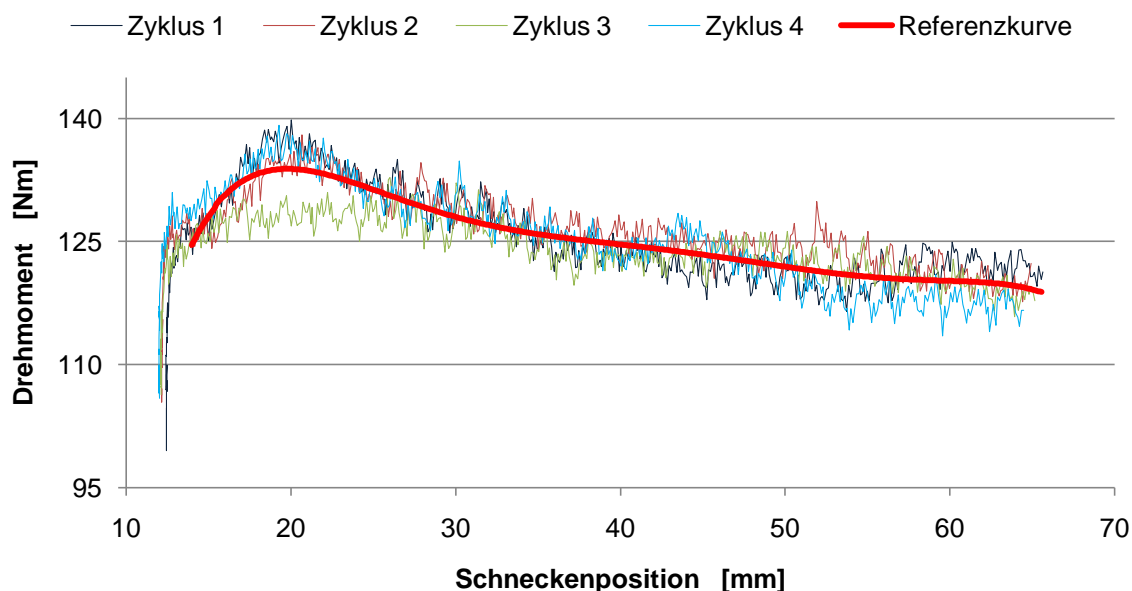


Abb. 20 **Drehmomentkurven von vier aufeinander folgende Zyklen und ihre Referenzkurve**

Die Drehmomentkurven von vier aufeinander folgenden Zyklen weisen große Abweichungen voneinander auf. Daher ist es empfehlenswert, mehrere Kurven zur Ermittlung der Referenz einzubeziehen.

Ist der Grenzpunkt bekannt, kann die Referenzkurve des Drehmoments ermittelt werden. In Abb. 20 werden die Drehmomentkurven von vier nacheinander ablaufenden Zyklen dargestellt. Die Kurven weisen große Abweichungen voneinander auf. Das bedeutet, dass die nur mit einer Drehmomentkurve ermittelte Referenz eventuell weit von der idealen Referenz abweichen könnte. Um diesen Fehler zu vermeiden, müssen mehrere Messkurven zur Ermittlung der Referenzkurve einbezogen werden, damit die ermittelte Referenz möglichst der idealen Referenz entspricht. Die experimentelle Untersuchung zeigt, dass die Aufnahme von acht bis zehn Drehmomentkurven gute Ergebnisse liefert. Ist die Referenzkurve des Drehmoments bekannt, kann die Referenzkurve der Schneckenantriebsleistung mit der polynomialen Regressionsanalyse ermittelt werden.

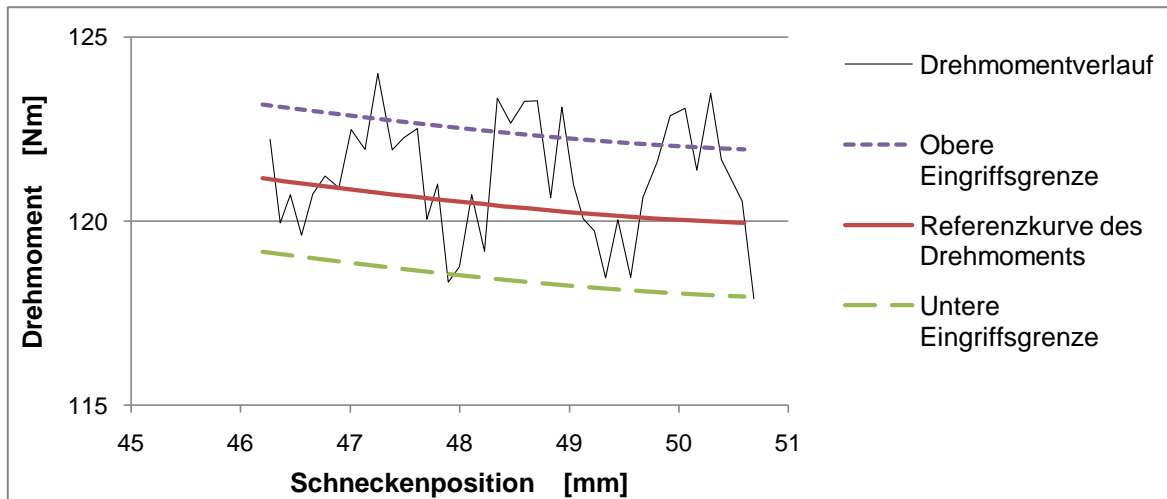


Abb. 21 **Obere und untere Grenze der Referenzkurve**

Liegt das Ist-Drehmoment außerhalb der oberen oder unteren Eingriffsgrenze, wird die Stellgröße Drehzahl an die Maschine zurückgeführt.

Aufgrund der Arbeitsweise des hydraulischen Kolbenmotors schwankt das Drehmoment zyklisch. Dieses Verhalten muss bei der Regelung der Antriebsleistung berücksichtigt werden. In Abb. 21 wird die obere und die untere Eingriffsgrenze der Referenzkurve dargestellt. Der Regelungsalgorithmus wird so definiert, dass die Stellgröße Drehzahl nur dann erneut berechnet und an die Maschine zurückgeführt wird, wenn das Ist-Drehmoment außerhalb der unteren oder oberen Eingriffsgrenze liegt. Die Kurven der Eingriffsgrenze sind parallel zur Referenz und weisen einen Unterschied in Höhe von 2 Nm auf. Es wurde ein Programm zur Ermittlung des Grenzpunktes und der Referenzkurve der Schneckenantriebsleistung in MATLAB geschrieben. So kann dieser Vorgang mittels Computer automatisch durchgeführt werden.

3.5.2 Referenzkurve der Schneckenrücklaufgeschwindigkeit

In dieser Arbeit wird der Begriff "resultierende Schneckenrücklaufgeschwindigkeit" eingeführt. In Abb. 22 wird die Methode zur Ermittlung der resultierenden Geschwindigkeit veranschaulicht. Zum Zeitpunkt t_0 wird mit der Plastifizierung begonnen. Die Anfangsschneckenposition befindet sich in x_{s0} . Zum Zeitpunkt t_1 hat die Schnecke die Position x_{s1} erreicht.

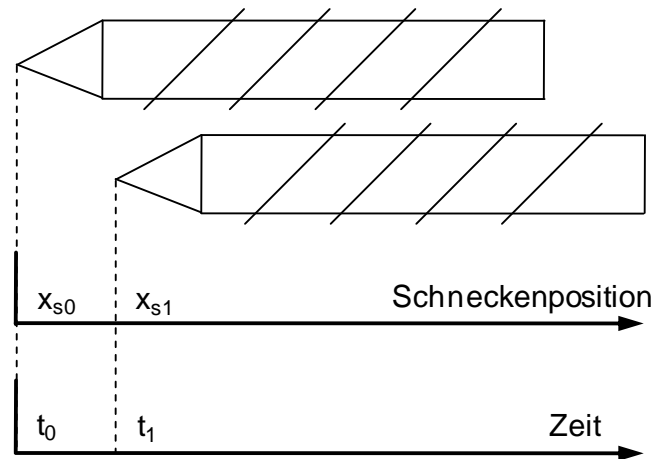


Abb. 22 **Ermittlung der resultierenden Schneckenrücklaufgeschwindigkeit**

Beim Zeitpunkt t_0 startet die Plastifizierung. Beim Zeitpunkt t_1 befindet sich die Schnecke in der Position x_{s1} .

Daraus erhält man die resultierende Schneckenrücklaufgeschwindigkeit nach folgender Beziehung:

$$v_{res} = \frac{x_{s1} - x_{s0}}{t_1 - t_0}. \quad \text{Gl. (3.37)}$$

Die resultierende Geschwindigkeit bezieht sich immer auf die Anfangsposition x_{s0} und den Anfangszeitpunkt t_0 der Plastifizierung. Im Prinzip ist die resultierende Geschwindigkeit eine mittlere Geschwindigkeit, mit der sich die Schnecke von Position x_{s0} zu x_{s1} bewegt.

In Abb. 23 werden zwei Arten von Schneckengeschwindigkeitsangaben über die Schneckenposition dargestellt. Die tatsächliche Schneckengeschwindigkeit ist die temporäre Geschwindigkeit, mit der sich die Schnecke tatsächlich bewegt. Wie in Kapitel 3.4.2 erwähnt, weist die tatsächliche Schneckengeschwindigkeit über die Zeit zyklische Schwankungen auf. Aufgrund dieser Eigenschaft ist die tatsächliche Geschwindigkeit nicht geeignet für die Ermittlung der Referenzkurve. Aufgrund der indirekten Kommunikation zwischen Maschine und PC mittels AD- und DA-Wandel ist hier der Regelungsprozess nicht echtzeitfähig. Es kann vorkommen, dass die in einer Schneckenposition ermittelte Stellgröße Staudruck von der Maschine umgesetzt wird, obwohl sich die Schnecke schon in einer anderen Position befindet, in der ein anderer Staudruck erforderlich ist. Da die Schwankung der tatsächlichen Geschwindigkeit nicht gering ist, wird ein falscher Staudruck zum falschen Zeitpunkt an die Maschine zurückgeführt und umgesetzt. Somit ist die Regelung der Plastifizierzeit kaum zu realisieren.

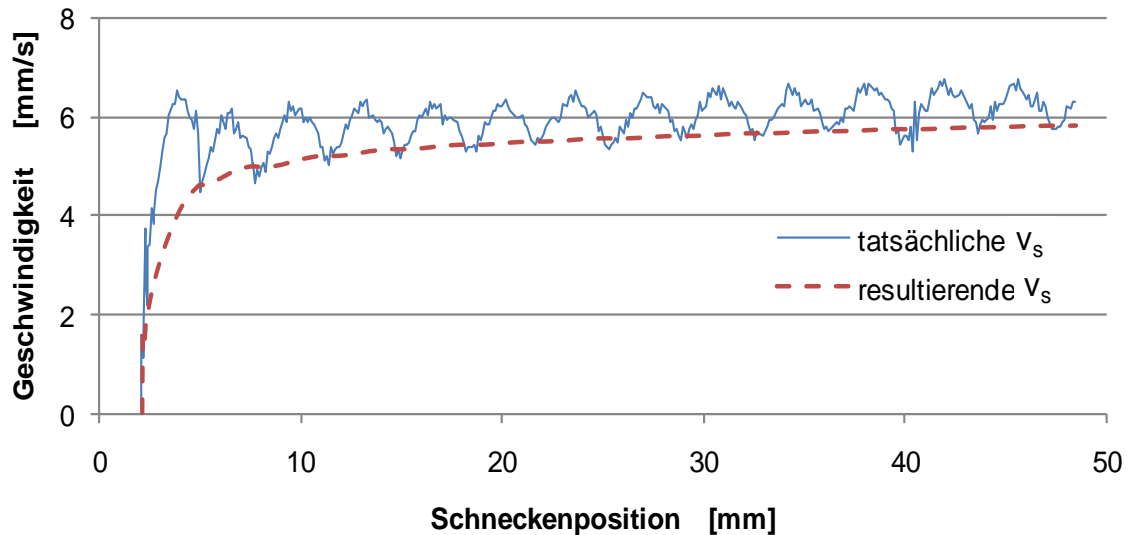


Abb. 23 **Zwei Arten der Schneckenrücklaufgeschwindigkeit**

Die tatsächliche Geschwindigkeit ist die temporäre Schneckengeschwindigkeit. Die resultierende Geschwindigkeit ist eine mittlere Geschwindigkeit, die sich immer auf die Anfangsposition x_{s0} und den Anfangszeitpunkt t_0 der Plastifizierung bezieht.

Im Gegensatz zur tatsächlichen Geschwindigkeit weist die resultierende Geschwindigkeit keine zyklische Schwankung über die Schneckenposition auf. Der Vorteil der Regelung der resultierenden Geschwindigkeit liegt darin, dass die durchschnittliche Geschwindigkeit über den gesamten Dosierweg bis zum Ende der Plastifizierphase konstant bleibt, und damit die Plastifizierzeit konstant ist. Daher wird die resultierende Schneckengeschwindigkeit zur Ermittlung der Referenzkurve verwendet. Um die Referenzkurve der Schneckenrücklaufgeschwindigkeit möglichst an die ideale Referenz anzunähern, sollten die Daten von acht bis zehn Zyklen aufgenommen werden. Nach der polynomialen Regressionsanalyse erhält man die Referenzkurve.

3.6 Verifikation der Regelungsqualität

Nachdem die Regelparameter und die Referenzkurven ermittelt wurden, können die Schneckenantriebsleistung und die Plastifizierzeit separat geregelt werden. Dadurch wird die Dissipationsenergie konstant gehalten. Bei den Versuchen wird zuerst eine Füllstudie durchgeführt, um das optimale Füllvolumen zu ermitteln. Danach werden die Prozessparameter optimiert. Anschließend wird gewartet, bis der Spritzgießprozess stabil läuft, damit der Prozess das neue Gleichgewicht erreichen kann. In der Regel sollte man mindestens zwanzig Spritzgießzyklen laufen lassen. Dies ist stark abhängig vom Dosierhub. Bei einem Prozess mit einem geringen Dosierhub muss die Wartezeit verlängert werden. Ist der Spritzgießprozess

stabil, können die Referenzkurven für die Antriebsleistung und die Schneckenrücklaufgeschwindigkeit mit dem bereits erstellten MATLAB-Programm ermittelt werden. Die Regelparameter können mit der in Kapitel 3.4 dargestellten Methode bestimmt werden.

Die Beurteilung der Regelungsqualität erfolgt in zwei Abschnitten. Zum einen soll sich die geregelte Schneckenantriebsleistung nahe an die idealen Referenzen annähern. Zum anderen soll die geregelte Plastifizierzeit der Referenz-Plastifizierzeit entsprechen. Um die Regelungsqualität zu beurteilen, wurden Versuche mit einer hydraulischen Maschine (KM 125 C2) der Firma Krauss-Maffei Technologies GmbH, München, durchgeführt. Die Spritzeinheit verfügt über eine Standarddreizonenschnecke mit einem Durchmesser von 30 mm. Die Schneckenlänge beträgt 20D. Zwei Kunststoffbauteile (siehe Tab. 1) aus drei Werkstoffen (siehe Tab. 2) wurden zur Prozessuntersuchung hergestellt.

Produktname	Füllvolumen	Kurzzeichen
Zugprüfstab	23,6 cm ³	Stab
Deckel	29,5 cm ³	Deckel

Tab. 1 **Zwei zum Zweck der Untersuchungen hergestellte Produkte**

Werkstoff	Bezeichnung	Hersteller	MFR (2,16 kg)	Kurzzeichen
Polyethylen	Lupolen 3020K	Basell	4 g/10 min (190 °C)	PE
Polypropylen	512MN10	Sabic	37 g/10 min (230 °C)	PP 1
Polypropylen	BJ356MO	Borealis	100 g/10 min (230 °C)	PP 2

Tab. 2 **Verwendete Werkstoffe**

Die drei Werkstoffe decken ein breites Spektrum an Viskositäten von Kunststoffen ab.

Bei der Wahl der Werkstoffe wird angestrebt, dass die Werkstoffe bezüglich der Schmelzviskosität ein breites Spektrum abdecken. Die Melt Flow Rate (MFR) dient zur Charakterisierung des Fließverhaltens eines Thermoplasten bei bestimmten Druck- und Temperaturbedingungen und ist ein Maß für die Viskosität der Kunststoffschmelze. Während PE 3020K hochviskos ist, ist PP BJ356MO sehr dünnflüssig. Die Viskosität von PP 512MN10 liegt zwischen den beiden.

Um die Reproduzierbarkeit des Spritzgießprozesses quantitativ zu analysieren, werden die Schwankungen der wichtigen Prozessparameter und des Bauteilgewichts bewertet. Zu den

wichtigen Prozessparametern zählen der Umschaltdruck, der maximale Einspritzdruck, das Massepolster, das Einspritzintegral und die Plastifizierzeit. Zur Ermittlung der Schwankung f eines Parameters wird folgende Beziehung benutzt:

$$f = \frac{s}{\bar{x}} \quad \text{Gl. (3.38)}$$

mit der Standardabweichung s

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Gl. (3.39)}$$

und dem arithmetischen Mittelwert \bar{x}

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Gl. (3.40)}$$

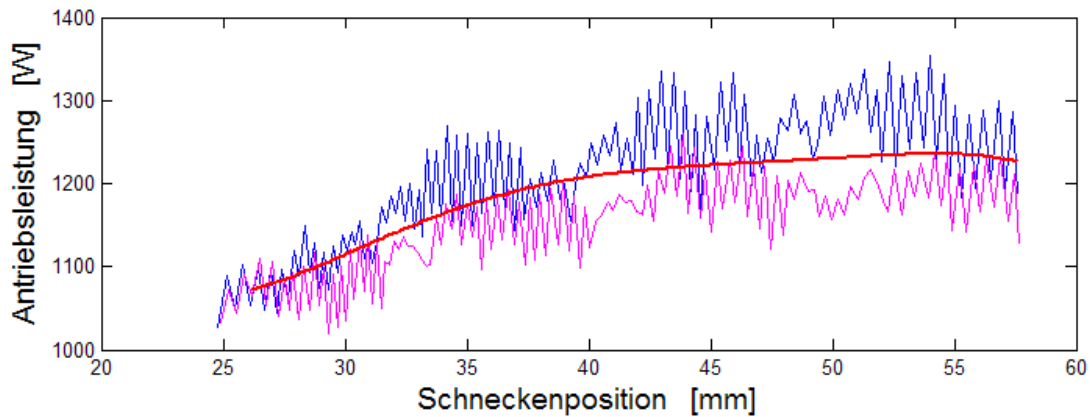
wobei n der Umfang der Stichproben ist.

Zur Beurteilung der Funktionsfähigkeit der Regelung der Schneckenantriebsleistung wurden Versuche mit den in Tab. 3 dargestellten Prozessdaten durchgeführt.

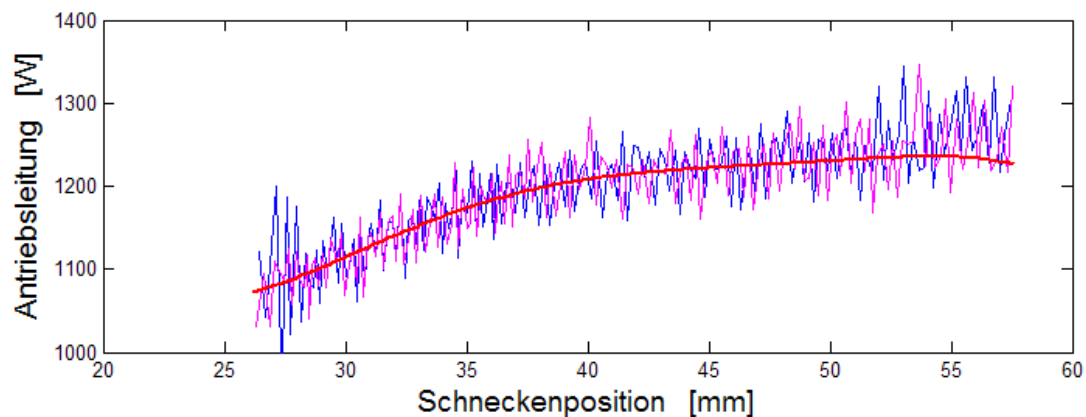
Kunststoff	Bauteil	Drehzahl	Staudruck	Verarbeitungstemperatur
PE	Stab	120 U/min	100 bar	180 °C

Tab. 3 **Prozessdaten**

Die Ergebnisse der Regelung der Schneckenantriebsleistung werden in Abb. 24 dargestellt. Für den Prozess ohne und mit Regelung wurden jeweils zwei Leistungskurven aufgezeichnet. Die durchgezogenen Kurven stellen die durch die polynomiale Regressionsanalyse ermittelten Referenzkurven dar. Beim Prozess ohne Regelung weisen die Messwerte große Abweichungen von der Referenzkurve auf. Beim Prozess mit Regelung verlaufen die Messwerte nah an der Referenzkurve, die Streuung ist viel geringer als beim Prozess ohne Regelung. Die Funktionsfähigkeit der Leistungsregelung wurde somit verifiziert.



Ohne Regelung der Schneckenantriebsleistung



Mit Regelung der Schneckenantriebsleistung

Abb. 24 Drehmomentverlauf bei den Prozessen ohne und mit Regelung der Antriebsleistung

Oben: Die Antriebsleistung wird nicht geregelt. Der Leistungsverlauf weist große Abweichungen von der Referenz auf.

Unten: Die Regelung der Antriebsleistung wird aktiviert. Der Leistungsverlauf nähert sich der Referenzkurve an.

Bei der Bewertung der Funktionsfähigkeit der Regelung der Plastifizierzeit werden die durchschnittliche Plastifizierzeit und deren Schwankung miteinbezogen. Dabei wurden Deckel aus dem Kunststoff PP 2 hergestellt; die Verarbeitungstemperatur betrug 180 °C. Der Umfang der Probe betrug 30 Stück, wobei zwei Betriebszustände (siehe Abb. 25) ausgewählt wurden. Während die langsame Plastifizierung (Drehzahl 80 U/min und Staudruck 100 bar) innerhalb von ca. 14,3 s erfolgt, beträgt die Plastifizierzeit der schnellen Plastifizierung (Drehzahl 150 U/min und Staudruck 80 bar) nur ca. 7,2 s. Die durchschnittliche Plastifizierzeit beim Prozess mit Regelung entspricht nahezu genau der Zeit des Prozesses ohne Regelung (siehe Abb. 25 links). Die Schwankung der Plastifizierzeit kann

durch die Regelung bei den beiden Betriebszuständen deutlich reduziert werden (siehe Abb. 25 rechts). Die Funktionsfähigkeit der Regelung der Plastifizierzeit wurde somit verifiziert.

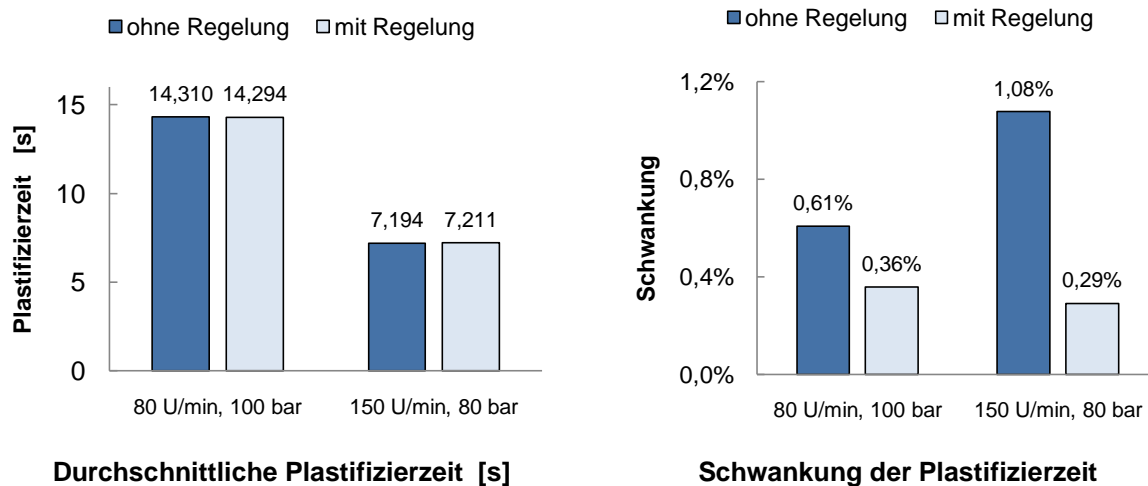


Abb. 25 **Durchschnittliche Plastifizierzeit und deren Schwankung**

Links: Die geregelte Plastifizierzeit entspricht der Plastifizierzeit beim Prozess ohne Regelung nahezu genau.

Rechts: Die Schwankung der Plastifizierzeit beim Prozess mit Regelung ist deutlich geringer als beim Prozess ohne Regelung.

3.7 Zweistufige Plastifizierung

Während der Regelung der Plastifizierzeit wird der Staudruck ständig angepasst. Der Schmelzedruck im Schneckenorraum ist somit nicht konstant. Neben der Schmelztemperatur ist der Schmelzedruck eine wichtige Schmelzestandsgröße. Gemäß dem pVT-Diagramm steigt die Schmelzedichte mit erhöhtem Schmelzedruck, da die Schmelze bei größerem Druck stärker komprimiert wird. Erfolgt die Regelung der Plastifizierzeit über die gesamte Plastifizierphase, wird die Stellgröße Staudruck bis zum Ende der Plastifizierung (Endstaudruck) in die Maschinensteuerung zurückgeführt. Dadurch wird der Schmelzedruck im Schneckenorraum am Ende der Plastifizierung schwanken. Ein schwankender Schmelzedruck führt zu einer schwankenden Schmelzedichte, worunter die Reproduzierbarkeit des Spritzgießprozesses leiden kann.

Um Schwankungen des Schmelzedrucks infolge eines schwankenden Endstaudrucks, welcher die Reproduzierbarkeit des Prozesses negativ beeinflussen kann, zu vermeiden, wird die Plastifizierung in zwei Phasen (Abb. 26) eingeteilt. In der ersten Stufe wird die Dissipationsenergie geregelt, dabei werden die Stellgrößen Drehzahl und Staudruck ständig angepasst.

Diese Phase ist im Bezug auf den Dosierhub viel länger als die zweite Phase. In der zweiten Stufe wird keine Regelung der Dissipationsenergie durchgeführt. Die Maschine arbeitet im normalen Zustand. Die Drehzahl und der Staudruck entsprechen den Maschineneinstellgrößen, welche die Maschinenbediener zuvor eingestellt haben. In dieser Phase wird der Schmelzedruck wieder auf den eingestellten Staudruck reguliert. Der Staudruck und dadurch auch der Endschmelzedruck bleiben konstant. So kann gewährleistet werden, dass die Schmelze stets mit gleichem Schmelzedruck im Schneckenorraum vor dem Einspritzen vorliegt.

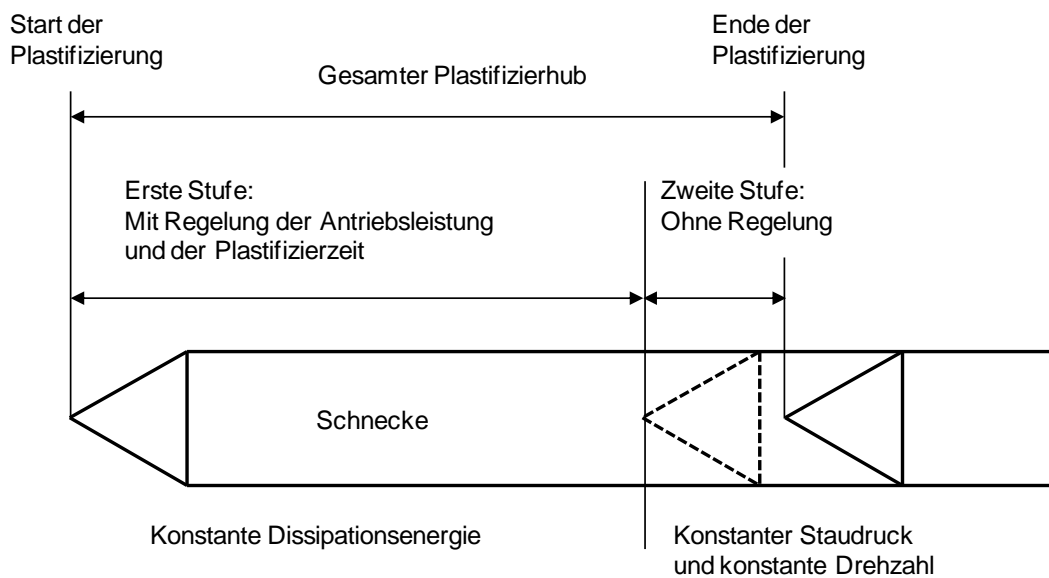


Abb. 26 **Prinzip der zweistufigen Plastifizierung**

Die Plastifizierung besteht aus zwei Phasen. In der ersten Stufe werden die Antriebsleistung und die Plastifizierzeit geregelt. In der zweiten Stufe wird die Regelung deaktiviert.

Betriebszustand 1	Stab, PE, 60 U/min, 80 bar, 200 °C
Betriebszustand 2	Stab, PE, 80 U/min, 100 bar, 200 °C

Tab. 4 **Eingestellte Betriebszustände**

Um die Einflüsse der ein- und zweistufigen Regelung der Dissipationsenergie auf den Spritzgießprozess zu ermitteln, wurden Spritzgießversuche durchgeführt. Dabei wurden Zugprüfstäbe aus PE (siehe Tab. 1 und Tab. 2) ohne Regelung, mit einstufiger Regelung und mit zweistufiger Regelung der Dissipationsenergie hergestellt. Die folgenden zwei Betriebszustände wurden eingestellt. Die Verarbeitungstemperatur betrug dabei 200 °C. Der Umfang

der Proben betrug 20 Stück. Die Gewichtsstreuung des Bauteils und die Schwankung der wichtigen Prozessparameter (siehe Abb. 27) wurden bewertet.

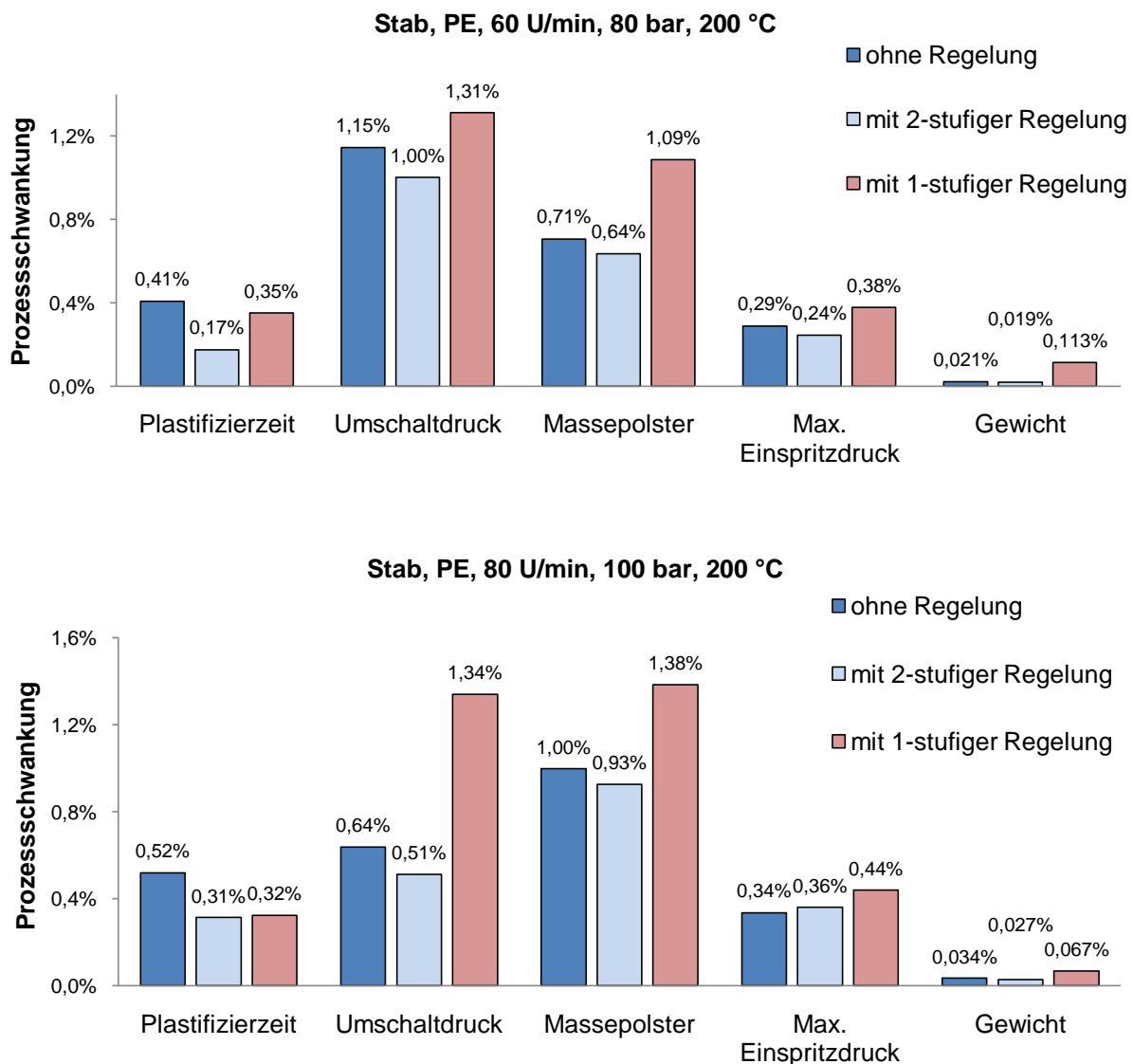


Abb. 27 Vergleich der Prozessschwankungen und der Gewichtsstreuung bei Prozessen ohne Regelung, mit zweistufiger Regelung und mit einstufiger Regelung der Dissipationsenergie

Bei den beiden Betriebszuständen weisen die Prozesse mit einstufiger Regelung der Dissipationsenergie insgesamt größere Schwankungen auf als die Prozesse ohne Regelung der Dissipationsenergie. Zugleich führt die zweistufige Regelung zu geringeren Prozessschwankungen.

Da die Plastifizierzeit geregelt ist, ist ihre Schwankung bei den beiden Betriebszuständen mit einstufiger Regelung geringer als beim Prozess ohne Regelung der Dissipationsenergie. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass alle Parameter außer der Plastifizierzeit beim Prozess mit einstufiger Regelung größere Schwankungen aufweisen. Dies lässt sich darauf zurück-

zuführen, dass der schwankende Endstaudruck zur schlechten Reproduzierbarkeit des Prozesses führt. Im Gegensatz zur einstufigen Regelung führt die zweistufige Regelung der Dissipationsenergie in den zwei Betriebszuständen zu geringeren Schwankungen der Prozessparameter sowie eine geringeren Streuung des Bauteilgewichts als ohne Regelung. Aus diesem Grund wird die Regelung der Dissipationsenergie während der Plastifizierphase in zwei Stufen eingeteilt. Bei späteren Versuchen wird ausschließlich die zweistufige Regelung der Dissipationsenergie während der Plastifizierphase zur Erhöhung der Reproduzierbarkeit realisiert.

3.8 Steigerung der Prozessqualität durch Regelung der Dissipationsenergie

Nachdem die Funktionsfähigkeit der Regelung der Dissipationsenergie verifiziert wurde, kann die Prozessuntersuchung durchgeführt werden. Ziel ist es, zu überprüfen, ob die Regelung der Dissipationsenergie zur Steigerung der Prozessqualität beitragen kann. In der Praxis werden die Prozessparameter während der Produktion ständig beobachtet. Bei großen Schwankungen der Prozessparameter wird die Anpassung der Maschineneinstellgrößen vom Maschinenbediener durchgeführt. Das Gewicht eines Formteils beim Spritzgießen ist ein aussagefähiger Parameter sowohl für die reproduzierbare Herstellung als auch für eine wirtschaftliche Qualitätskontrolle [32]. Daher soll die Prozessqualität durch die Schwankung der wichtigen Prozessparameter bewertet werden. Noch wichtiger, insbesondere für Spritzgießverarbeiter, ist die Streuung des Bauteilgewichts. Der Begriff Gewicht wird aufgrund seiner alten Herkunft mit verschiedenen Bedeutungen belegt [29] und sollte gemäß DIN 1305 vermieden werden, wenn Missverständnisse entstehen könnten. In der Branche des Spritzgießens wird jedoch der Begriff Bauteilgewicht statt Bauteilmasse verwendet [60,68,138].

In Abb. 28 werden die Schwankung der Prozessparameter und die Gewichtsstreuung bei den Prozessen ohne und mit Regelung der Dissipationsenergie dargestellt. Hergestellt wurde der Deckel mit Werkstoff PP 1. Die Drehzahl betrug 120 U/min und der Staudruck 80 bar. Die Verarbeitungstemperatur war 230 °C. Der Umfang der Proben betrug 20 Stück. Die Gewichtsstreuung beim Prozess mit Regelung kann im Vergleich zum Prozess ohne Regelung von 0,27 % auf 0,24 % reduziert werden, dadurch wird eine Verbesserung der Prozessqualität mit Regelung im Vergleich zu der ohne Regelung um 11,1 % erzielt. Die anderen Prozessparameter zeigen die gleiche Tendenz, nur das Einspritzdruckintegral weicht davon ab.

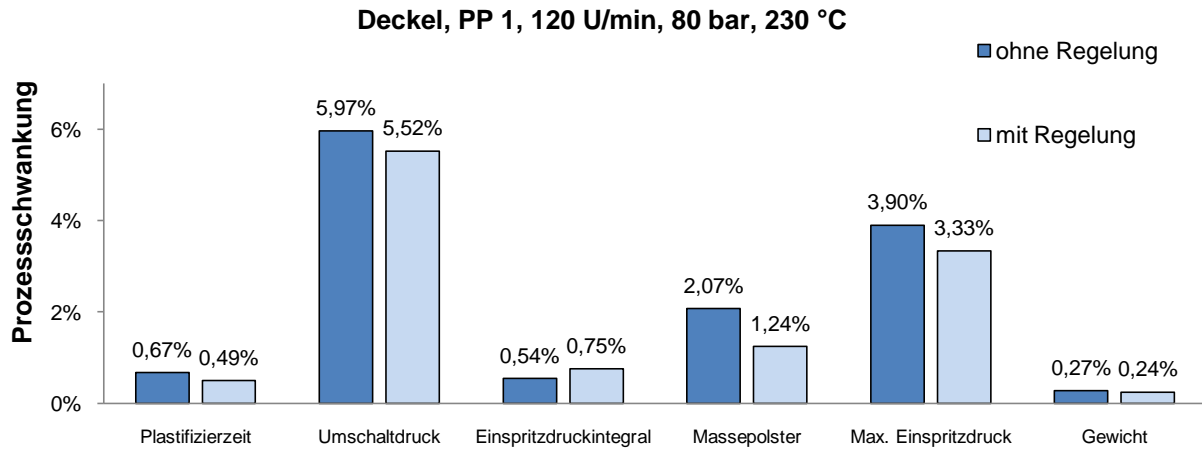


Abb. 28 **Vergleich der Prozessqualität**

Außer dem Einspritzdruckintegral weisen die Parameter beim Prozess mit Regelung der Dissipationsenergie geringere Schwankungen auf.

Um die Steigerung der Prozessqualität quantitativ zu bewerten, werden die Schwankungen der einzelnen Prozessparameter summiert. Sind die Summe der Prozessschwankungen und die Gewichtstreuung (aus Daten der Abb. 28) bekannt, kann die Steigerung der Prozessqualität quantifiziert werden. Für die Steigerung der Prozessqualität α gilt:

$$\alpha = \frac{s_{OR} - s_{MR}}{s_{OR}} \quad \text{Gl. (3.41)}$$

wobei s_{OR} die Schwankung beim Prozess ohne Regelung und s_{MR} die Schwankung beim Prozess mit Regelung ist. Die Summen der Schwankungen sind in Tab. 5 eingetragen.

	Summe der Prozessschwankungen	Gewichtstreuung
Ohne Regelung	$s_{OR} = 13,15 \%$	$s_{OR} = 0,27 \%$
Mit Regelung	$s_{MR} = 11,34 \%$	$s_{MR} = 0,24 \%$
Steigerung der Prozessqualität um	$\alpha = +13,8 \%$	$\alpha = +11,1 \%$

Tab. 5 **Steigerung der Prozessqualität durch die Regelung der Dissipationsenergie**

Die Schwankungen der Prozessparameter (aus Daten der Abb. 28) werden summiert. Nach einfacher mathematischer Berechnung kann die Steigerung der Prozessqualität quantifiziert werden. Bei diesem Betriebszustand kann die Regelung der Dissipationsenergie eine Steigerung der Prozessqualität bezüglich der Prozessschwankung und der Gewichtstreuung um jeweils 13,8 % und 11,1 % erzielen.

Wie in Tab. 5 dargestellt, können die Prozessqualitäten bezüglich der Prozessschwankung um 13,8 % und bezüglich der Gewichtsstreuung um 11,1 % verbessert werden.

Die Produktion wurde daraufhin mit verschiedenen Betriebszuständen (siehe Tab. 6) durchgeführt. Dabei wurden die Art des Formteils und des verwendeten Kunststoffes, die Drehzahl, der Staudruck und die Verarbeitungstemperatur variiert. Da die Anzahl der Variationsmöglichkeiten nahezu unbegrenzt ist, wurden einige Betriebszustände repräsentativ ausgewählt. Dabei wurden Deckel und Stab aus PP 1, PP 2 und PE (siehe Tab. 1 und Tab. 2) hergestellt. Die Schneckendrehzahl wurde jeweils auf 80, 100, 120, 150 und 180 U/min eingestellt. Der Staudruck variierte von 60 über 80 bis hin zu 100 bar. Der Umfang der Proben betrug je nach Prozess von 20 bis 50 Stück. Mit den Versuchsdaten können die Prozessschwankungen und die Gewichtsstreuung beim Prozess ohne und mit Regelung der Dissipationsenergie miteinander verglichen werden. Die Steigerungen der Prozessqualität werden in Abb. 30 dargestellt. Die detaillierten Ergebnisse befinden sich in Anhang D.

Betriebszustand						
	Bauteil	Kunststoff	Drehzahl	Staudruck	Temperatur	
A	Deckel	PP 2	120 U/min	60 bar	230 °C	A
B			150 U/min	80 bar		B
C		PP 1	100 U/min	60 bar	240 °C	C
D				80 U/min		100 bar
E			238 °C		E	
F			242 °C		F	
G	Stab		80 U/min	80 bar	240 °C	G
H		120 U/min				H
I		PE	180 U/min	60 bar	180 °C	I

Tab. 6 **Durchgeführte Betriebszustände zum Vergleich der Prozessqualität von Prozessen mit und ohne Regelung der Dissipationsenergie**

Auffallend ist die Verschlechterung der Gewichtsstreuung um 10,1 % beim Betriebszustand G. Die Prozessschwankung hingegen ist durch die Regelung der Dissipationsenergie um 11,6 % gesunken. Beim Betriebszustand D ist eine Verbesserung der Gewichtsstreuung um 31,9 % erzielt worden, obwohl die Schwankung nur um 1,5 % abnimmt. Beim Betriebszustand H

erreicht die Verbesserung der Gewichtsstreuung sogar 62 %, obwohl die Prozessschwankung eine Verbesserung von mittelmäßigen 20 % erzielt. Dies zeigt, dass eine Senkung der Prozessschwankung nicht unbedingt zur Reduzierung der Gewichtsstreuung führt. Dies ist auf die Einflüsse wie z. B. durch die Nachdruckphase usw., die in den Versuchen nicht berücksichtigt wurden, zurückzuführen. Insgesamt zeigen die Ergebnisse deutlich, dass die Prozessqualität durch die Regelung der Dissipationsenergie wesentlich verbessert werden kann. Dadurch wird die Reproduzierbarkeit des Spritzgießprozesses erhöht.

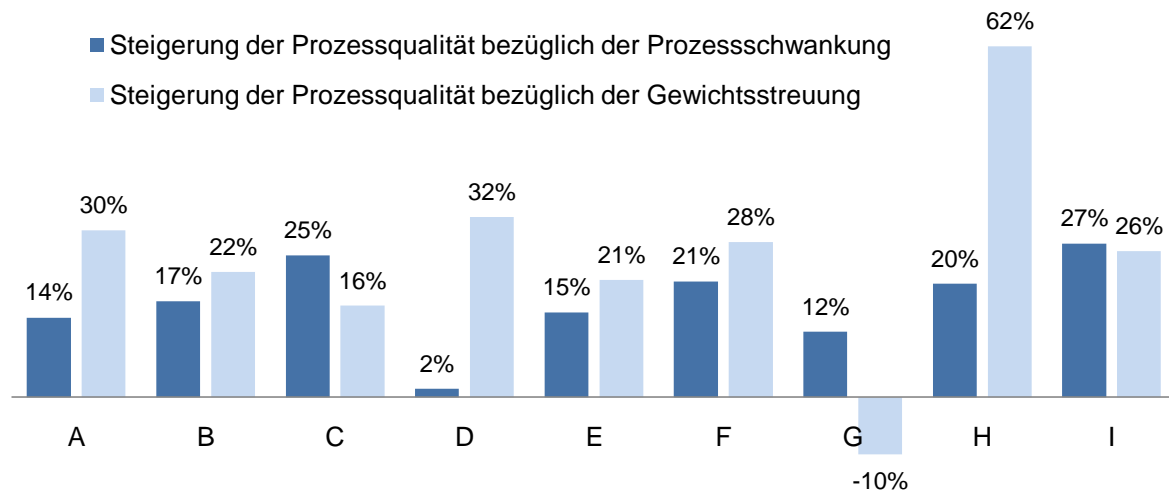


Abb. 29 **Prozentuale Steigerung der Prozessqualität bei verschiedenen Betriebszuständen**

Die Steigerung der Prozessqualität durch die Regelung wurde durch Versuche mit verschiedenen Betriebszuständen bestätigt.

3.9 Fazit und Ausblick

Die Reproduzierbarkeit des Spritzgießprozesses wird von vielen Faktoren beeinflusst. Ein Faktor davon ist die Schwankung der Massetemperatur. Eine schwankende Massetemperatur verändert das Fließverhalten und die Dichte der Kunststoffschmelze. Somit wird die Stabilität der wichtigen Prozessparameter z. B. des Umschaltdrucks und des Massepolsters, negativ beeinflusst.

Die Temperaturerhöhung des Materials ist auf die Erhöhung der Enthalpie zurückzuführen. Um die Massetemperatur konstant zu halten, soll die Schwankung der Systementhalpie möglichst gering sein. Die Enthalpieerhöhung ist die Summe aller ins System zugeführten und abgeführten Energien. Die abgeführte Energie, wie z. B. der Wärmeverlust über die Zylinderoberfläche, der Kühlungsverlust am Einzugsbereich usw., bleibt quasi stationär, somit kann deren Schwankung vernachlässigt werden. Die zugeführte Energie besteht haupt-

sächlich aus zwei Teilen, der Dissipationsenergie und der Heizenergie. Die Dissipationsenergie ist die mechanische Energie, die über die Schneckenrotation in das System eingebracht wird. Sie wird über den Plastifizierzylinder durch Reibung in thermische Energie umgewandelt. Die Heizenergie wird von Heizbändern durch die Zylinderwand der Kunststoffschmelze zugeführt. Die Dissipationsenergie ist der Hauptanteil der zugeführten Energie (etwa 65 % - 85 %). Da die Zylindertemperatur geregelt und konstant ist, bleibt die Wärmezufuhr von den Heizbändern an die Schmelze quasi konstant. Daher ist die Schwankung der Massetemperatur wesentlich auf die Schwankung der Dissipationsenergie zurückzuführen.

Bei einer konventionellen Plastifizierung werden die Drehzahl und der Staudruck separat geregelt. Während für die Plastifizierzeit mit dieser Methode eine gute Reproduzierbarkeit in der Praxis erzielt wird, ist die Schneckenantriebsleistung jedoch nicht konstant. Die Messungen zeigen, dass die Antriebsleistung über die Zyklen stark schwanken kann. Dies führt zu einer Schwankung der Massetemperatur. Um die Reproduzierbarkeit des Spritzgießprozesses zu erhöhen, muss ein neues Regelungskonzept für die Plastifizierung entwickelt werden. Dabei soll die Dissipationsenergie während der Plastifizierung konstant gehalten werden. Da die Dissipationsenergie ein Produkt aus der Schneckenantriebsleistung und der Plastifizierzeit ist, werden die Schneckenantriebsleistung und die Plastifizierzeit separat geregelt. Während die Regelung der Schneckenantriebsleistung durch die Anpassung der Drehzahl erfolgt, wird der Staudruck zur Regelung der Plastifizierzeit verwendet.

Zunächst wurde die Versuchseinrichtung vorbereitet. Die erforderliche Sensorik, abgesehen von der Drehmomentmessung, ist bereits in der Maschine vorhanden. Da das Drehmoment des in der Maschine installierten Motors proportional zum Öldruck ist, erfolgt die Erfassung des Schneckendrehmoments durch den hydraulischen Druck im Motor. Zur Kommunikation zwischen dem Controller (PC) und der Maschine werden AD- und DA-Wandler benötigt. Aufgrund der Datenumwandlung ist die Regelung nicht echtzeitfähig. Das Regelungsprogramm wurde mit MATLAB geschrieben.

Zur Regelung der Antriebsleistung und der Plastifizierzeit ist es erforderlich, die Regelparameter zu ermitteln. Die Regelparameter können anhand der komplexen physikalischen Zusammenhänge nur mit hohem Aufwand bestimmt werden. Eine vereinfachte experimentelle Methode wurde vorgestellt, wobei die Maschine als Messgerät verwendet wird. Somit ist der Aufwand zur Ermittlung der Regelparameter wesentlich geringer.

Die Referenzkurven der Antriebsleistung und der Schneckenrücklaufgeschwindigkeit wurden zur Regelung der Dissipationsenergie erstellt. Sie werden anhand gesammelter Messdaten

durch die polynomiale Regressionsanalyse approximiert. Zur Sammlung der Messdaten muss zuerst der Spritzgießprozess stabil laufen. Um die ermittelten Referenzkurven möglichst nah an die idealen Referenzen anzunähern, wurden mehrere Messkurven zur Approximation einbezogen.

Zur Verifikation des Regelungsprogramms wurden erste Untersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Ist-Schneckenantriebsleistung und die Ist-Plastifizierzeit durch die Regelung exakt den Sollwerten entsprechen. Die Schwankung der Plastifizierzeit kann durch die Regelung reduziert werden. Um zu beurteilen, ob die Regelung der Dissipationsenergie die Reproduzierbarkeit des Spritzgießprozesses erhöhen kann, wurde die Produktion von zwei Bauteilen aus drei unterschiedlichen Werkstoffen durchgeführt. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Steigerung der Prozessqualität bei nahezu allen Betriebszuständen erzielt werden kann. Daraus ist festzustellen, dass die Reproduzierbarkeit des Prozesses durch die Regelung der Dissipationsenergie erhöht wird.

Schwachstellen liegen in der Hardware. Die Erfassung des Drehmoments erfolgt durch die Messung des Öldrucks im Motor. Aufgrund der Arbeitsweise des hydraulischen Motors wird ein zyklisch schwankendes Drehmoment erfasst, obwohl die Drehzahl konstant bleibt. Ein Verbesserungspotential liegt darin, eine direkte Messung durch Drehmomentaufnehmer zu realisieren. Dadurch wird die Drehmomentmessung genauer. Um den Drehmomentaufnehmer auf die Schnecke adaptieren zu können, ist eine konstruktive Änderung an der Schnecke erforderlich. Dies muss man mit dem Maschinenhersteller absprechen. Andererseits wird die Regelungsqualität dadurch beeinträchtigt, dass sie nicht echtzeitfähig ist. Die Maschinendaten werden zuerst zum externen Controller geleitet und verarbeitet. Die Stellgrößen werden dann an die Maschine zurückgeführt. Dieser Vorgang kostet Zeit. Daher muss man mit dem Maschinenhersteller gemeinsam daran arbeiten, die Regelung der Dissipationsenergie in die Maschine zu integrieren. Dies schafft die Voraussetzung eine echtzeitfähige Regelung.

4 Adaptierbare Plastifiziereinheit für das Mikrospritzgießen

Im Rahmen dieser Arbeit soll eine adaptierbare Spritzeinheit für das Mikrospritzgießen entwickelt werden. Unter Adaptierbarkeit versteht man, dass diese Mikro-Spritzeinheit anstelle einer Standardspritzeinheit auf einer Spritzgießmaschine montiert werden kann. Der Maschinenbediener tauscht das Spritzaggregat routinemäßig aus, dann steht die Spritzgießmaschine für die Produktion von Mikrobautteilen bereit. Durch eine solche Mikro-Spritzeinheit wird das Einsatzgebiet einer Spritzgießmaschine erweitert. Für Spritzgießverarbeiter ist es nicht mehr nötig, eine komplett neue Mikrospritzgießmaschine zu beschaffen, um kleinste Bauteile zu produzieren. Bei der Mikro-Spritzeinheit wird vom Konzept „Schneckenvorplastifizierung und Kolbeneinspritzung“ ausgegangen, da dieses Konzept eine gute Schmelzeshomogenität und eine höhere Einspritzgenauigkeit aufweist [14,21]. In den folgenden Abschnitten werden zuerst die Anforderungen an die Spritzeinheit erläutert. Zur Realisierung dieser Anforderungen wurden mehrere Lösungen gefunden, welche in zwei Gruppen eingeteilt werden können. Die zwei Gruppen unterscheiden sich hauptsächlich durch die Form der Schnecke. Dabei werden konische und traditionelle zylindrische Schnecken verwendet. Nach der Bewertung der Konzepte wird ein Prototyp gebaut, mit Hilfe dessen das realisierte Konzept verifiziert werden soll.

4.1 Anforderungen an die Mikro-Spritzeinheit

Die Anforderungen an die zu entwickelnde Spritzeinheit sind im Folgenden allgemein formuliert. Die Mikro-Spritzeinheit

- soll für das Mikrospritzgießen geeignet sein;
- kann die gängigen Kunststoffe verarbeiten;
- soll auf eine Standardmaschine adaptiert werden können;
- erfordert keine Änderung an der Maschinensteuerung.

Beim Mikrospritzgießen werden sehr hohe Anforderungen an die optimale Abstimmung von Spritzgießmaschine, Werkzeug und Materialeigenschaften gestellt [21]. Das Kunststoffgranulat muss einwandfrei eingezogen werden. Die Kunststoffschmelze muss thermisch und stofflich homogenisiert werden. Die Kolbenplastifizierung kann diese Anforderung nicht erfüllen, da die Homogenität der Kunststoffschmelze wegen fehlender Durchmischung nur bedingt zufrieden stellend ist. Die Spritzgießmaschine muss auch in der Lage sein, definierte Kleinstmengen an Schmelze hoch genau zu dosieren bzw. einzuspritzen. Ein Kolbenspritzelement weist einen geringeren Durchmesser im Vergleich zu einem Schnecken-

spritzelement auf (siehe Kapitel 2.9). Daher wird das Prinzip "Schneckenvorplastifizierung und Kolbeneinspritzung" in dieser Arbeit zur Entwicklung der adaptierbaren Mikro-Spritzeinheit verwendet.

Der Kunststoff soll möglichst schonend verarbeitet werden, weshalb die Verweilzeit des Kunststoffs möglichst gering sein soll. Da die Plastifizierung durch die Schnecke erfolgt, spielt diese eine bedeutende Rolle. Sie muss das Kunststoffgranulat problemlos einziehen, es in Richtung der Düse fördern, plastifizieren und einen Schmelzedruck aufbauen. Während der Plastifizierung tritt ein hoher Widerstand auf. Deshalb muss die Schnecke eine ausreichende mechanische Festigkeit besitzen, damit sie nicht durch die Torsionsbelastung während der Plastifizierung bricht.

Kunststoffgranulat kann linsenförmig, zylindrisch, würfelförmig oder kugelförmig sein. Die Plastifizierschnecke muss diese unterschiedlich geformten Kunststoffgranulate einziehen können. Entsprechend muss die Gangtiefe der Einzugszone der Schnecke ausreichend spezifiziert werden. Die Verarbeitungsspektren von Kunststoffen bewegen sich in einem großen Bereich. Während die Masstemperatur von Polyoxymethylen (POM) bei etwa 200 °C liegen sollte, erfordert die Verarbeitung von hochtemperaturbeständigen Kunststoffen, wie z. B. Polyetheretherketon (PEEK) Schmelzetemperaturen von bis zu 400 °C [35]. Die Schmelzeviskositäten unterschiedlicher Kunststoffe unterscheiden sich ebenfalls sehr stark voneinander. Die notwendigen Einspritzdrücke können je nach Formteilgeometrie und Kunststoffeigenschaften ganz unterschiedlich ausfallen. Die Spritzgießmaschine muss daher in einem breiten Druckbereich arbeiten können. Wird die Spritzeinheit in einer Standardspritzgießmaschine installiert, steht ein großer Druckbereich bereits zur Verfügung. Allerdings muss das Spritzelement (Einspritzkolben) eine genügend hohe mechanische Festigkeit aufweisen.

Das zentrale Ziel des Entwicklungsvorhabens ist es, eine an einer Standardmaschine adaptierbare Mikro-Spritzeinheit zu entwickeln. Dadurch wird das Einsatzgebiet einer Standardspritzgießmaschine erweitert. Für Spritzgießverarbeiter ist es nicht mehr nötig, eine komplett neue Mikrospritzgießmaschine zu beschaffen, um kleinste Bauteile herzustellen. Bei einer Standardmaschine bildet die Motorwelle, die mit der Schnecke gekoppelt ist, den Übergang zur Spritzeinheit. Die Motorwelle und die Schnecke besitzen zwei Bewegungsfreiheiten. Während der Plastifizierung ist eine Drehung der Schnecke nötig. Beim Einspritzen wird die Schnecke axial verschoben. Die adaptierbare Mikro-Spritzeinheit soll wie eine Standardspritzeinheit die Motorwelle als einzigen Bewegungseingang nutzen, ohne zusätzliche Antriebe zu benötigen. Dadurch ist auch keine zusätzliche Änderung der

Maschinensteuerung erforderlich. Die Hauptschwierigkeit zur Entwicklung der Mikro-Spritzeinheit liegt in der Realisierung der Adaptierbarkeit. In den folgenden Abschnitten werden die verschiedenen Konzepte der adaptierbaren Mikro-Spritzeinheit und ihre Vor- und Nachteile vorgestellt und erläutert.

4.2 Konzeptentwicklung

In dieser Arbeit wurden mehrere Lösungen zur Realisierung der Adaptierbarkeit auf Standardmaschinen entwickelt. Im Folgenden werden Lösungen mit konischer und zylindrischer Schnecke aufgezeigt und diskutiert.

4.2.1 Spritzeinheiten mit konischer Schnecke

Auf dem Markt befindet sich derzeit noch keine Spritzgießmaschine, die eine konische Schnecke zur Plastifizierung verwendet. Für Standardmaschinen ist die konische Schnecke für das Konzept „Schneckenplastifizierung und -einspritzung“ nicht geeignet, da die Einspritzung durch eine axiale Verschiebung der Schnecke im Zylinder aufgrund der konischen Außenkontur der Schnecke nicht realisiert werden kann. Bei manchen Doppelschneckenextrudern werden konische Schnecken verwendet, dabei ist die axiale Verschiebung der Schnecke bei der Extrusion nicht nötig. Die Fertigung einer konischen Schnecke ist aufwendiger gegenüber der zylindrischen Schnecke. In dieser Arbeit wird eine Plastifizier- und Einspritzvorrichtung für das Mikrospritzgießen mit einer konisch ausgebildeten Schnecke sowie mit einer Kolbeneinspritzvorrichtung vorgestellt.

Bei einer konischen Schnecke ist der Durchmesser im Einzugsbereich größer als in der Meteringzone, dadurch kann die Gangtiefe im Einzugsbereich so tief ausgeführt werden, dass Standardgranulat einwandfrei eingezogen werden kann. Darüber hinaus kann der Kerndurchmesser im Einzugsbereich so groß gewählt werden, dass keine Schwierigkeiten bezüglich der mechanischen Festigkeit auch mit günstigen Standardwerkstoffen auftreten. Der Kerndurchmesser und der Schneckenaußendurchmesser können über den konischen Verlauf so stark reduziert werden, dass das gesamte Kanalvolumen der Schnecke das kritische Volumen bezüglich der Verweilzeit nicht überschreitet.

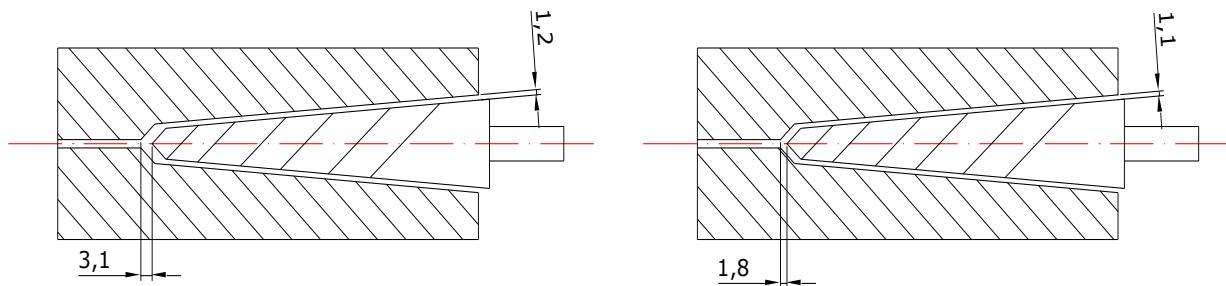
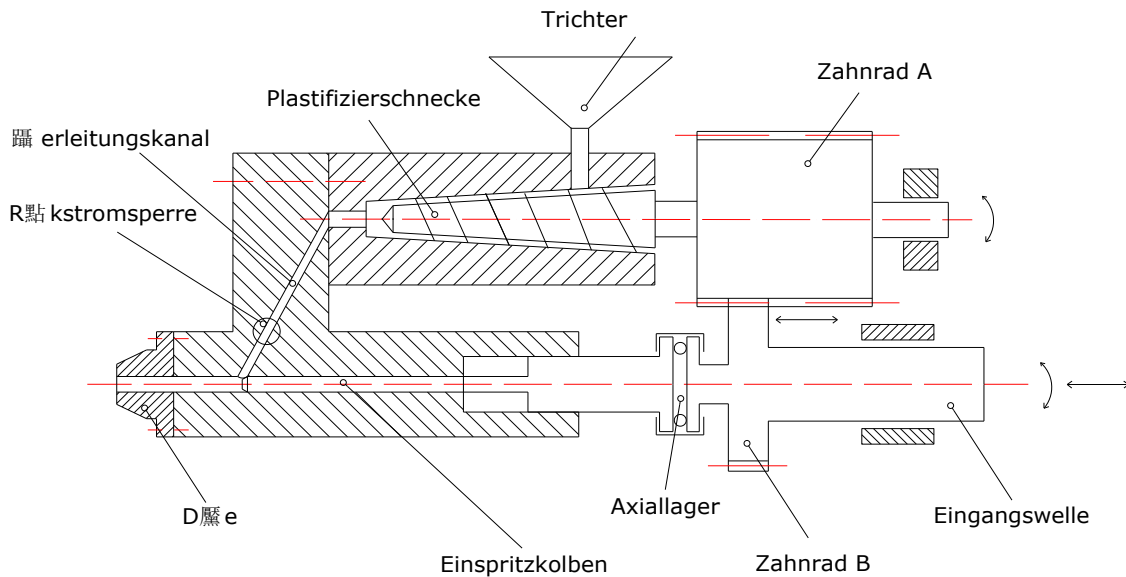


Abb. 30 **Änderung des Schneckenspiels durch axiale Verschiebung der Schnecke**

Durch axiale Verschiebung der Schnecke kann das Spiel zwischen der Schnecke und der Zylinderinnenbohrung vergrößert werden. Diese Eigenschaft kann für die Verarbeitung scherempfindlicher Kunststoffe von Vorteil sein.

Ein weiterer Vorteil der konischen Schnecken liegt darin, dass das Schneckenspiel (siehe Abb. 30) durch axiale Verschiebung der Schnecke geändert werden kann. Die Verarbeitung scherempfindlicher Kunststoffe benötigt erfahrungsgemäß ein größeres Schneckenspiel zwischen der Schneckenaußenkontur und der Zylinderinnenbohrung [150]. Dies kann durch eine axiale Verschiebung der Schnecke gegenüber dem Plastifizierzylinder realisiert werden. Mit der gleichen Schnecke können also scherunempfindliche Materialien ebenso wie scherempfindliche Materialien verarbeitet werden. Ein Schneckenwechsel ist nicht erforderlich. Außerdem kann über den variabel einstellbaren Spalt die Homogenität der Schmelze über die Scherrate beeinflusst werden.

Die konische Schnecke kann nicht als Einspritzelement verwendet werden. Beim Konzept „Schneckenvorplastifizierung und Kolbeneinspritzung“ ist eine konische Schnecke als Plastifizierelement sehr vorteilhaft. Die oben erwähnten Merkmale werden dadurch ausgenutzt. In diesem Kapitel wird bei der Konzeptentwicklung von einer konischen Schnecke ausgegangen. Da die Spritzeinheit an die vorhandene Kupplung der Spritzgießmaschine angeschlossen werden muss, liegt die Schwierigkeit bei der Umsetzung des Konzepts hauptsächlich in der Trennung der zwei Bewegungsfreiheiten von der Schnecke und dem Einspritzkolben. Die adaptierbare Mikro-Spritzeinheit muss in der Lage sein, einerseits die Drehung der Motorwelle bei der Plastifizierung zur Schnecke umzuleiten, andererseits die axiale Verschiebung der Motorwelle bei der Einspritzung zum Einspritzkolben umzuleiten. Die Schneckenplastifizierung und Kolbeneinspritzung sind getrennt. Im Folgenden werden verschiedene Varianten erläutert und diskutiert.

Konzept A – Zentrierung des Einspritzkolbens zur Eingangswelle**Abb. 31 Mikro-Spritzeinheit mit zwei Zahnrädern und Axiallager**

Die Drehung wird von der Eingangswelle durch das Zahnradpaar zur Schnecke umgeleitet. Während der Plastifizierung wird die Schmelze in den Vorraum des Einspritzkolbens gefördert. Durch das Axiallager wird die axiale Bewegung des Einspritzkolbens realisiert.

Bei dieser Lösung (siehe Abb. 31) wird die Trennung der Verschiebung und Drehung durch das Axiallager und das Zahnradpaar realisiert. Nachteilig ist der große Verschleiß zwischen den Zahnflanken. Um eine lange Lebensdauer der Spritzeinheit zu erreichen, müssen die zwei Zahnräder in einem Gehäuse montiert und geschmiert werden. Es ist zu berücksichtigen, dass die Eingangswelle entlang der Lagerung innerhalb des Gehäuses axial beweglich sein muss. Dies zu realisieren ist sehr aufwendig. Wegen des langen Dosierwegs muss die Zahnbreite von Zahnrad A entsprechend groß sein, da eine permanente Verzahnung zwischen beiden Zahnrädern trotz der Verschiebung von Zahnrad B erforderlich ist.

Eine Alternative ist in Abb. 32 dargestellt. Dabei übertragen die Führungssäulen das Drehmoment des Motors zum Zahnrad A. Durch die Zahnradpaarung wird das Drehmoment zum Zahnrad B sowie zur Schnecke weitergeleitet. Die Eingangswelle kann sich entlang der Führungssäulen ohne Beeinflussung der Schnecke axial verschieben. Durch Einsatz der Führungssäulen sind ein geringerer Verschleiß und eine genauere Führung erzielbar. Die Zahnbreite ist reduziert, da keine Verschiebung zwischen den Zahnrädern nötig ist. Die Ausstattung des Getriebegehäuses ist ebenfalls einfacher zu bewerkstelligen.

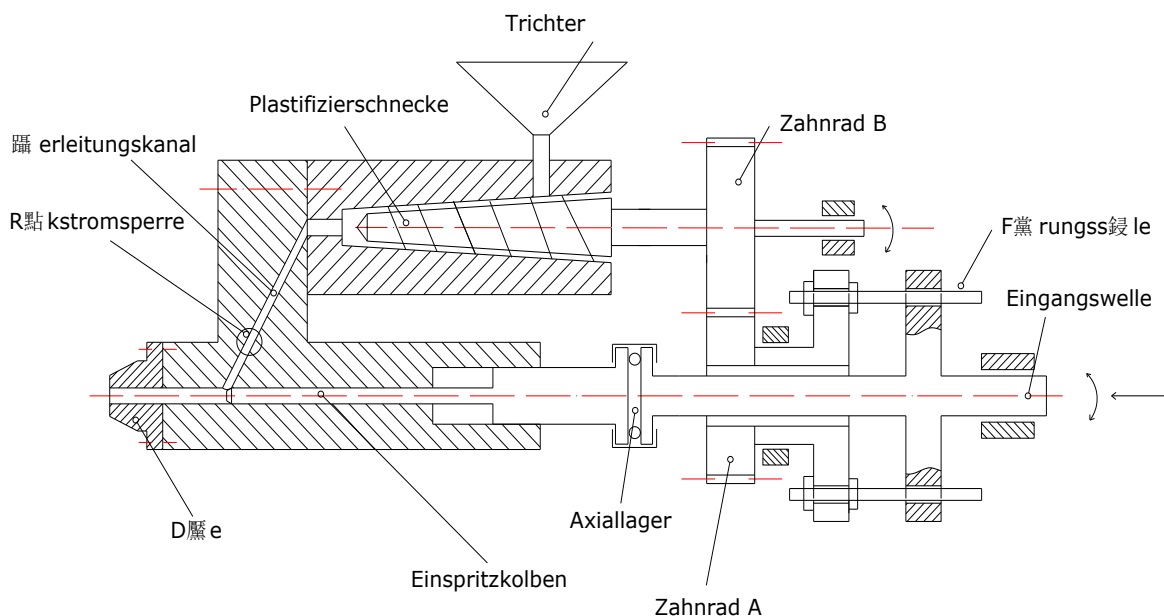


Abb. 32 **Mikro-Spritzeinheit mit Führungssäulen**

Die Verschiebung zwischen dem Zahnrad A und B kann durch die Führungssäule vermieden werden. Dadurch wird die Zahnradbreite reduziert.

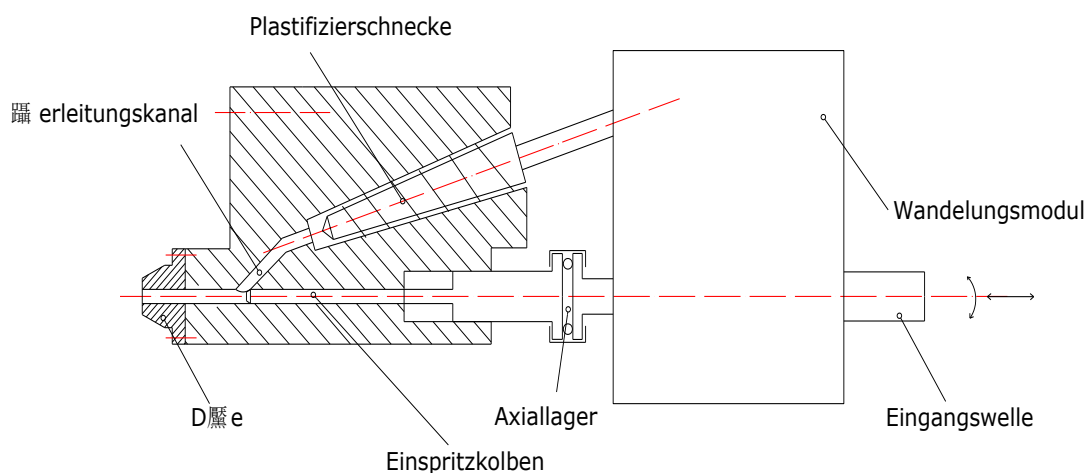


Abb. 33 **Mikro-Spritzeinheit mit einer schräg angeordneten Schnecke**

Durch die schräg angeordnete Schnecke kann die Länge des Überleitungschanals wesentlich reduziert werden. Dadurch ist eine kürzere Verweilzeit der Schmelze zu erzielen.

In Abb. 31 ist zu sehen, dass der Abstand zwischen der Schnecke und dem Einspritzkolben aufgrund des Platzbedarfs des Zahnrandpaares groß ist. Infolge des langen Überleitungschanals ist ein hoher Schmelzedruck zur Überwindung des Widerstands während des Fließens der Schmelze im Kanal erforderlich. Zugleich wird die Verweilzeit verlängert. Um den

Überleitungskanal und damit die Verweilzeit der Schmelze zu verkürzen, kann die Plastifizierschnecke schräg (siehe Abb. 33) angeordnet werden, damit die Schneckenspitze näher am Einspritzkolben angeordnet werden kann. Um den Drehrichtungsunterschied zwischen der Schnecke und der Eingangswelle zu überbrücken, wird ein Zahnradpaar mit Kegelzahnradern vorgesehen.

Konzept B – Zentrierung der Schnecke zur Eingangswelle

Abb. 34 zeigt das Funktionsprinzip einer Spritzeinheit, bei der die Plastifizierschnecke zur Eingangswelle zentriert ist. Die Führungssäulen übertragen das Drehmoment der Eingangswelle auf die Schnecke. Durch die Führungssäulen hat die Eingangswelle in der axialen Richtung keinen Einfluss auf die Plastifizierschnecke.

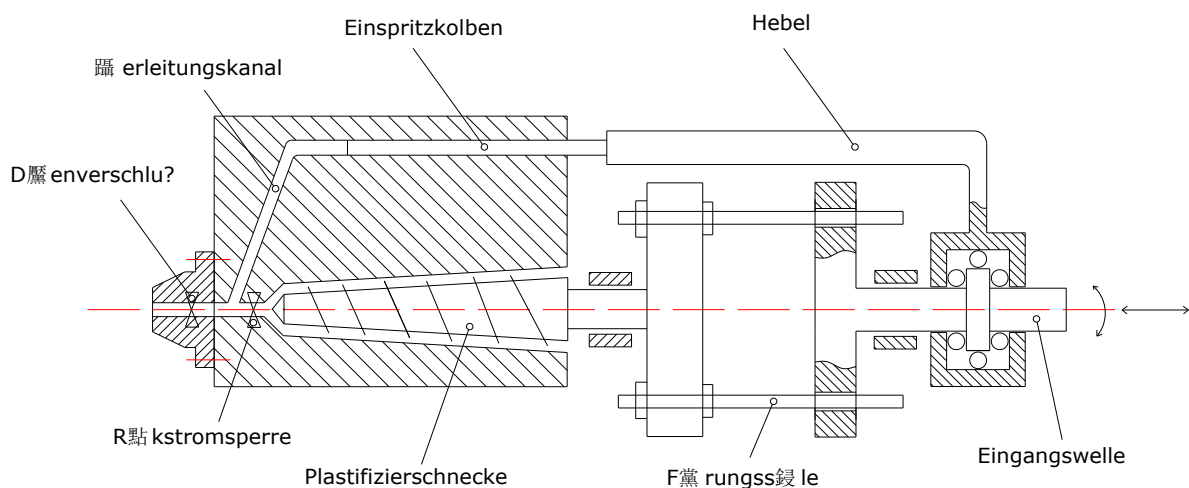


Abb. 34 **Mikro-Spritzeinheit ohne Zahnradpaar**

Die Schnecke und die Eingangswelle befinden sich auf der gleichen Achse. Bei diesem Konzept ist das Zahnradpaar nicht mehr nötig.

Wie in Abb. 34 dargestellt, ist der Einspritzkolben durch einen robusten Hebel mit dem Lagergehäuse verbunden. Die Eingangswelle ist in einem Lagergehäuse gelagert. Dies erlaubt eine relative Drehung zwischen der Eingangswelle und dem Lagergehäuse, aber keine relative axiale Verschiebung zwischen dem Einspritzkolben und der Eingangswelle. Beim Dosieren drehen die Eingangswelle sowie die Schnecke synchron. Die Schmelze wird über den Überleitungskanal in den Vorraum gefördert. Unter der Wirkung des sich aufbauenden Schmelzedrucks fahren der Einspritzkolben, der Hebel und somit auch die Eingangswelle zurück. Beim Einspritzen werden der Einspritzkolben und der Hebel mit der Eingangswelle nach vorne bewegt.

Diese Lösung ist konstruktiv einfacher als die in Abb. 32 und Abb. 33 dargestellten Lösungen. Die Verzahnung, das Zahnradgehäuse sowie die Schmierung sind nicht mehr nötig. Darüber hinaus ist der Abstand zwischen dem Einspritzkolben und der Plastifizierschnecke bei dieser Lösung aufgrund der Einsparung des Zahnradpaares geringer. Es könnte problematisch werden, dass die Verformung des Hebels beim Einspritzen die Einspritzgenauigkeit verschlechtert.

Ein weiterer Nachteil dieser Lösung liegt in dem langen Überleitungskanal, welcher die Verweilzeit der Schmelze vergrößern kann. Das Prinzip "First In – First Out" kann bei dieser Lösung nicht gewährleistet werden. Das Material, was sich im Überleitungskanal befindet, wird bei jedem Plastifiziervorgang Richtung Kolben gedrückt. Beim Einspritzen drückt der Einspritzkolben die Schmelze wieder zurück. Zum Schluss befindet sich das gleiche Material im Überleitungskanal. Die Totwasserecke bildet sich im Kanal, was zu thermischer Schädigung des Materials führt.

Konzept C – Mikro-Spritzeinheit in Teleskopbauform

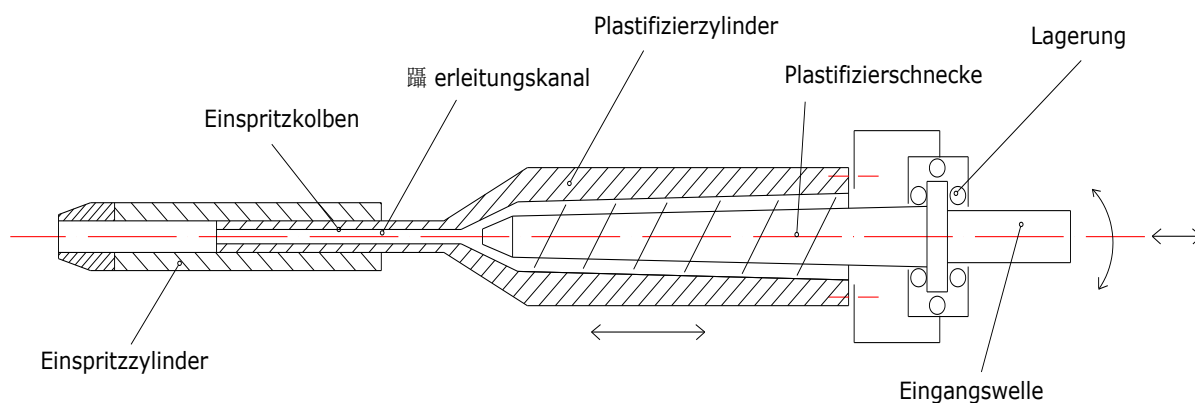


Abb. 35 Mikro-Spritzeinheit in Teleskopbauform

Bei diesem Konzept ist der Plastifizierzylinder gleichzeitig ein Einspritzkolben. Die Schmelze wird durch den Überleitungskanal in den Einspritzzylinder gefördert. Die Schnecke wird gelagert.

In Abb. 35 wird eine Mikro-Spritzeinheit in einer Teleskopbauform gezeigt. Der Plastifizierzylinder weist an seinem vorderen Ende ein als Einspritzkolben ausgebildetes Verlängerungsstück auf. Der Einspritzkolben ist in dem Einspritzzylinder axial verfahrbar. In der Lagerung ist die Plastifizierschnecke drehbar, aber axial unverschieblich gelagert, zugleich ist der Plastifizierzylinder drehfest mit dem Lagergehäuse verbunden. Bei der Dosierung wird die Kunststoffschmelze über den Überleitungskanal in den Vorraum gefördert. Bei der Einspritzung verfahren die Schnecke, die Lagerung, der Plastifizierzylinder und der Einspritzkolben einheitlich in die Richtung der Düse. Diese Konstruktion lässt sich an eine

Standardmaschine adaptieren. Die Spritzeinheit kommt ohne zusätzlichen Antrieb aus und gewährleistet das FIFO - Prinzip.

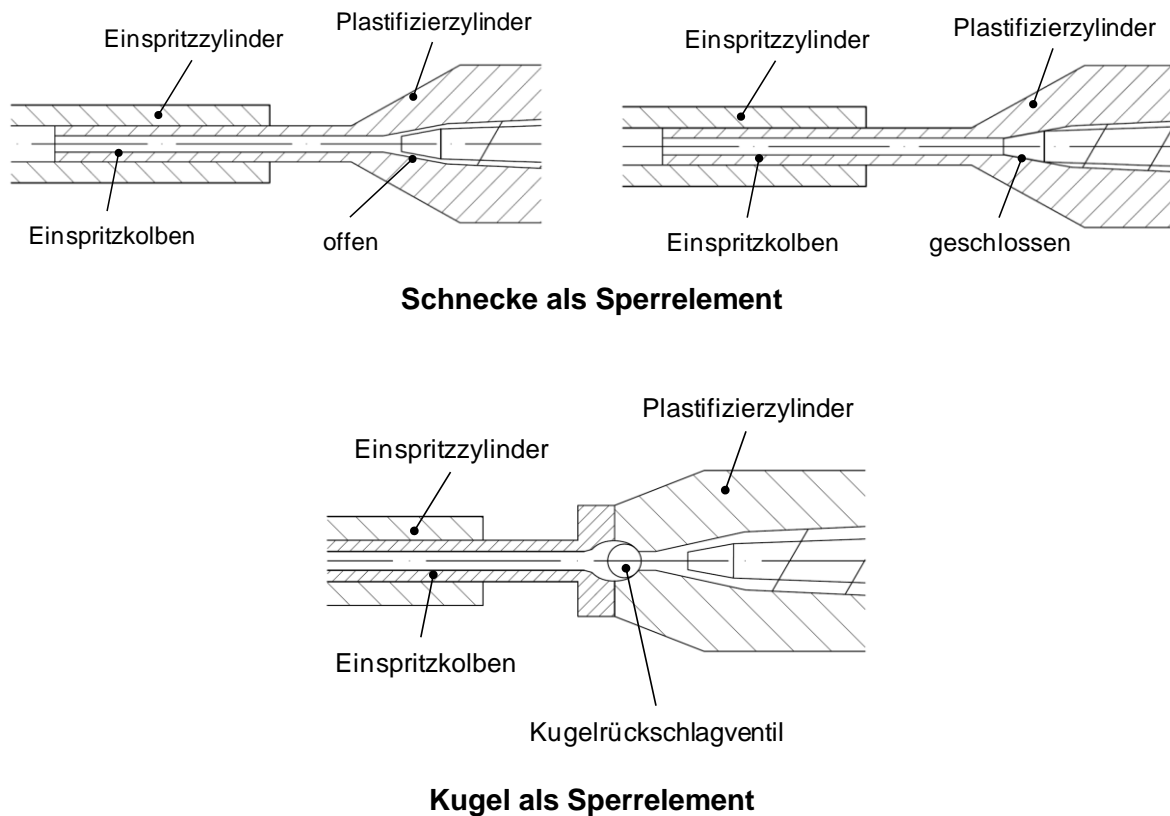


Abb. 36 **Zwei Arten der Rückstromsperre**

Oben: die Schneckenspitze bildet die Dichtung mit Pressung auf die Zylinderinnenbohrung.

Unten: Ein Kugelrückschlagventil dient zur Sperrung des Rückstroms.

Wenn eine geringe Axialbewegung zwischen Zylinder und Schnecke zugelassen wird, kann die Spitze der Schnecke als Rückstromsperre (siehe Abb. 36 oben) dienen. Sie wird als Ventilkörper ausgebildet, der mit der Innenwand des Zylinders abdichten kann. Da die Schmelze im Kanal kompressibel ist, kann dies die Einspritzgenauigkeit beeinträchtigen. Der Zylinder kann dabei durch Feder von der Lagerung weg vorgespannt sein oder zu der Lagerung hin. Die Schnecke kann sowohl zylindrisch als auch konisch ausgebildet sein. Die geringe Axialbewegung zwischen Zylinder und Schnecke kann durch mechanische und/oder hydraulische und/oder pneumatische Vorspannmittel realisiert werden. Die Rückstromsperre kann auch mit einem Kugelrückschlagventil realisiert werden (siehe Abb. 36 unten). Das Kugelrückschlagventil kann auch im vorderen Bereich des Einspritzkolbens angebracht werden. Dadurch wird ein geringerer Verlust aufgrund der Komprimierung der Schmelze erzielt. Um die Kugel in den vorderen Bereich des Kolbens zu integrieren, wird der Spielraum

zur Reduktion des Kolbendurchmessers eingeschränkt, da der Kugeldurchmesser nicht beliebig klein sein kann.

Das Konzept C ist konstruktiv einfacher als die Konzepte A und B. Bei diesem Konzept befinden sich die Eingangswelle, die Schnecke, der Plastifizierzylinder, der Einspritzkolben, der Einspritzzylinder und die Düse auf gleicher Achse. Das Prinzip „FIFO“ wird sichergestellt. Das Konzept C weist im Vergleich zu den beiden anderen Konzepten A und B einen wesentlich geringeren Bauaufwand auf.

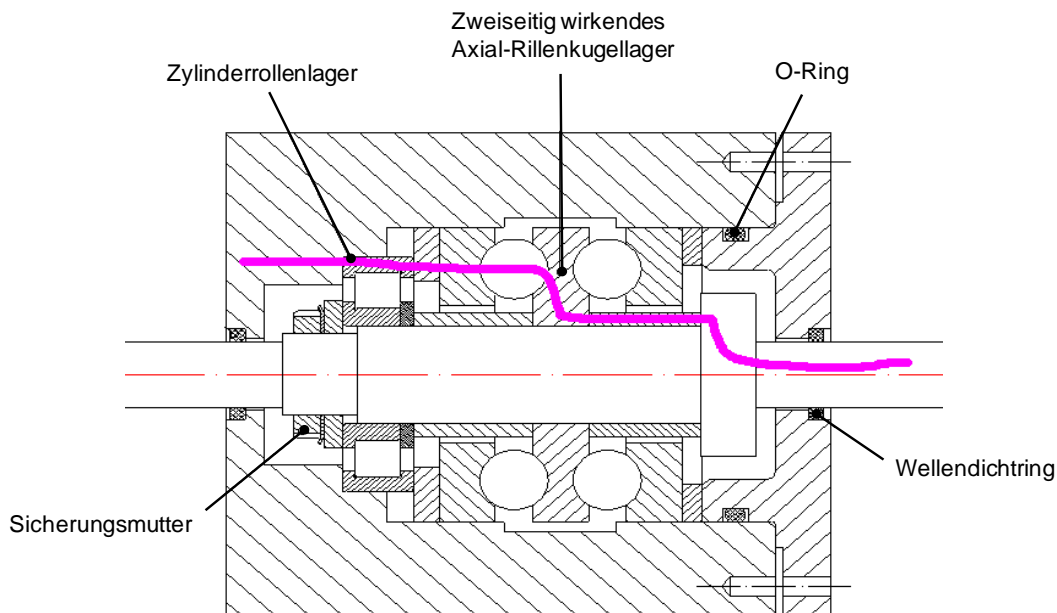


Abb. 37 **Konstruktive Ausführung der Lagerung**

Die Lagerung besteht aus einem zweiseitig wirkenden Axial-Rillenkugellager und einem Zylinderrollenlager. Die markierte Kurve zeichnet die Kraftübertragungsrichtung.

Ein Beispiel für eine konkrete Ausführung der Lagerung ist in Abb. 37 dargestellt. Ein zweiseitig wirkendes Axial-Rillenkugellager nimmt die axiale Last auf, während ein Zylinderrollenlager die radiale Last aufnimmt. Für einen sicheren Sitz der gesamten Lagerung sorgen mehrere Passringe, Lagerscheiben und eine Sicherungsmutter. Da eine Schmierung der Lagerung vorgesehen ist, müssen die Dichtringe ein Austreten von Schmieröl verhindern. Der Kraftfluss während der Einspritzung und Dosierung in der Lagerung ist als dicke Kurve eingezeichnet. Die Kraft wird über Wellenschulter, Passringe, Axial-Rillenkugellager und Zylinderrollenlager übertragen. Obwohl beim Konzept C kein Zahnradpaar nötig ist, ist die Ausführung der Lagerung noch relativ aufwendig. Zusätzlich ist eine Schmierung nötig.

Konzept D – Mikro-Spritzeinheit in Teleskopbauform ohne Lagerung

Eine weitere adaptierbare Spritzeinheit wird in Abb. 38 dargestellt. Diese Lösung ist eine Weiterentwicklung vom Konzept C. Beim Konzept D ist eine Lagerung nicht erforderlich, so dass die adaptierbare Spritzeinheit weiter vereinfacht wird.

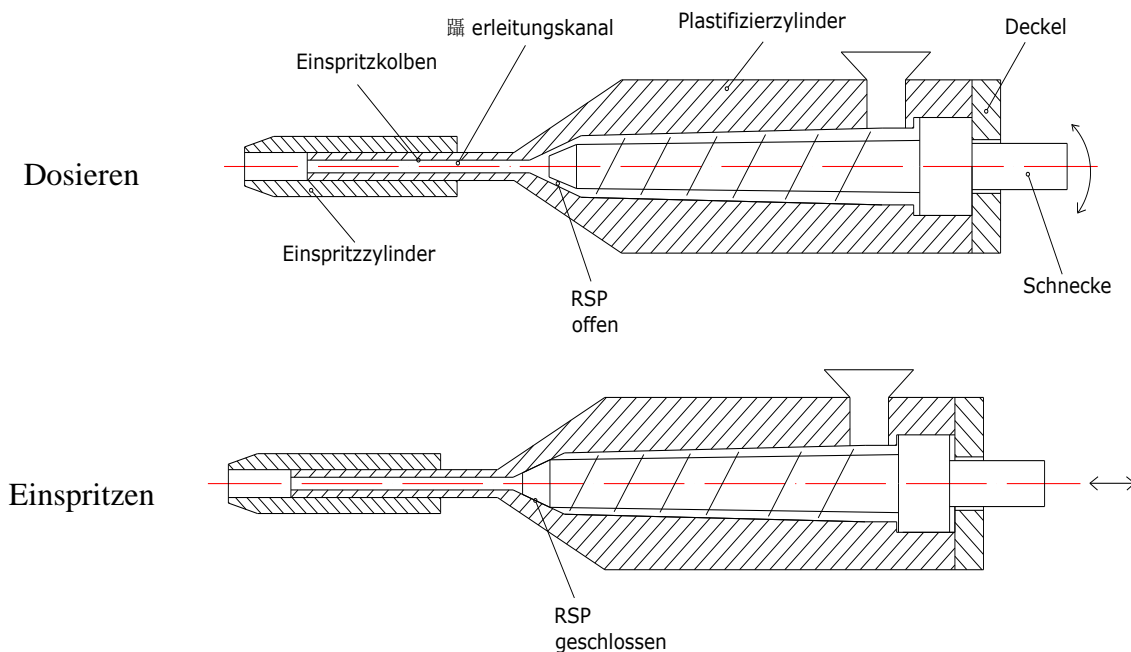


Abb. 38 **Mikro-Spritzeinheit in Teleskopform ohne Lagerung**

Oben: Während der Dosierung befindet sich die Schnecke in hinterer Position. Dabei wird die Schmelze über den Spalt zwischen Schneckenspitze und Zylinderinnenwand in den Vorraum gefördert.

Unten: Bei der Einspritzung presst die Schneckenspitze auf die Zylinderbohrung und fungiert somit als Rückstromsperre (RSP). Danach verfahren die Schnecke, der Plastifizierzylinder und der Einspritzkolben einheitlich nach links. Dies ist die Einspritzung.

Die axiale Position der Schnecke wird durch die Schneckenschulter und den Deckel eingeschränkt. Während der Dosierung befindet sich die Schnecke in der hinteren Position. Der Deckel begrenzt den weiteren Rückzug der Schnecke. Die aus der Schneckenspitze und der Zylinderinnenwand bestehende Rückstromsperre ist geöffnet, dadurch kann die Kunststoffschmelze in den Vorraum gefördert werden. Bei der Einspritzung wird die Schnecke in die Richtung der Düse geschoben. Die Rückstromsperre wird somit geschlossen. Anschließend bewegen sich der Plastifizierzylinder und die Schnecke einheitlich nach vorne. Am Anfang der Dosierung wird die Schmelze nach vorne gefördert. Der Schmelzedruck schiebt die Schnecke nach rechts bis zum Anschlag (Deckel). Die RSP ist somit geöffnet. Die Schmelze kann dann durch den Schmelzekanal in den Kolbenvorraum fließen. Dabei hat die Schnecke

eine axiale Bewegungsfreiheit in einem begrenzten Bereich. Während der Dosierung gibt es eine Rotationsbewegung zwischen der Schneckenschulter und dem Deckel. Um den Verschleiß zwischen den beiden Bauteilen zu vermindern, wird ein Axiallager, bspw. ein Axial-Rillenkugellager, zwischen der Schneckenschulter und dem Deckel (siehe Abb. 38) eingesetzt, welche konstruktiv einfach realisierbar ist. Ein Kugelrückschlagventil (siehe Abb. 36 unten) kann ebenfalls als Rückstromsperre verwendet werden.

Fazit:

Im Kapitel 4.2.1 werden die verschiedenen Entwicklungsstufen für eine Mikro-Spritzeinheit erläutert und diskutiert, die auf dem Konzept mit konischer Schnecke basieren. Mit einer konischen Plastifizierschnecke kann der Schneckendurchmesser im Einzugsbereich groß genug gewählt werden, um die mechanische Festigkeit der Schnecke gewährleisten zu können. Dies ermöglicht, die Gangtiefe im Einzugsbereich groß genug zu spezifizieren. Dadurch kann Kunststoffgranulat problemlos eingezogen werden. Der kleine Schneckendurchmesser in der Meteringzone sorgt für eine Reduzierung des Schneckenkanalvolumens und somit auch der Verweilzeit der Kunststoffschmelze. Durch axiale Verschiebung der Schnecke gegenüber dem Plastifizierzylinder wird das Schneckenspiel nach Bedarf geändert. Eine Vergrößerung des Schneckenspiels mildert die Scherbelastung, damit scherpempfindliches Material schonend verarbeitet werden kann. Außerdem kann über das variabel einstellbare Schneckenspiel die Schmelzehomogenität beeinflusst werden.

Im Gegenteil zum Konzept A und B befinden sich die Schnecke und der Einspritzkolben beim Konzept C und D in der gleichen Achse. Dadurch ist die Bauweise der Mikro-Spritzeinheit kompakter und ihr Bauaufwand geringer. Das Konzept D ist eine Weiterentwicklung des Konzepts C. Dabei wird die aufwändige Lagerung (siehe Abb. 35 und Abb. 37) eingespart, was ermöglicht, den Bauaufwand weiter zu reduzieren.

Aufgrund der konisch ausgebildeten Schnecke kann sich die Schnecke nur in einem kleinen Bereich (kleiner als 6 mm) gegenüber dem Plastifizierzylinder axial bewegen. Daher wird die Schnecke nicht als Einspritzelement verwendet. Die Einspritzung erfolgt durch einen Einspritzkolben. Beim Konzept C und D ist die Schnecke mit dem Plastifizierzylinder fest verbunden, wobei der vordere Teil des Zylinders den Einspritzkolben bildet. Beim Einspritzen bewegt sich die Schnecke nach vorne. Durch den mechanischen Kontakt zwischen der Schnecke und dem Plastifizierzylinder wird die axiale Bewegung des Einspritzkolbens realisiert. Deshalb muss der Plastifizierzylinder axial frei beweglich sein. Andererseits muss der Plastifizierzylinder drehfest gesichert werden, da während der Plastifizierung ein

Drehmoment auf den Zylinder wirkt. Die Düse und der Einspritzzylinder müssen auch befestigt werden. Dementsprechend wird der Bauaufwand erhöht.

4.2.2 Spritzeinheiten mit zylindrischer Schnecke

Wie oben erwähnt, hat eine konische Schnecke mehrere Vorteile beim Mikrospritzgießen. Jedoch ist der Bauaufwand entsprechend hoch. In diesem Kapitel geht die Konzeptentwicklung von einer zylindrischen Schnecke aus.

Um die Einspritzgenauigkeit zu erhöhen, soll die Einspritzung durch einen Einspritzkolben erfolgen. Der Vorteil einer zylindrischen Schnecke gegenüber einer konischen Schnecke liegt darin, dass die zylindrische Schnecke als Einspritzelement, oder zumindest als ein Teil des Einspritzelements dienen kann, während sich eine konische Schnecke in der axialen Richtung der Zylinderbohrung nicht frei bewegen kann. Im Folgenden werden Konzepte von Spritzeinheiten mit einer zylindrischen Schnecke und einem Einspritzkolben näher erläutert und diskutiert.

Konzept E – Mikro-Spritzeinheit mit drehendem Einspritzkolben

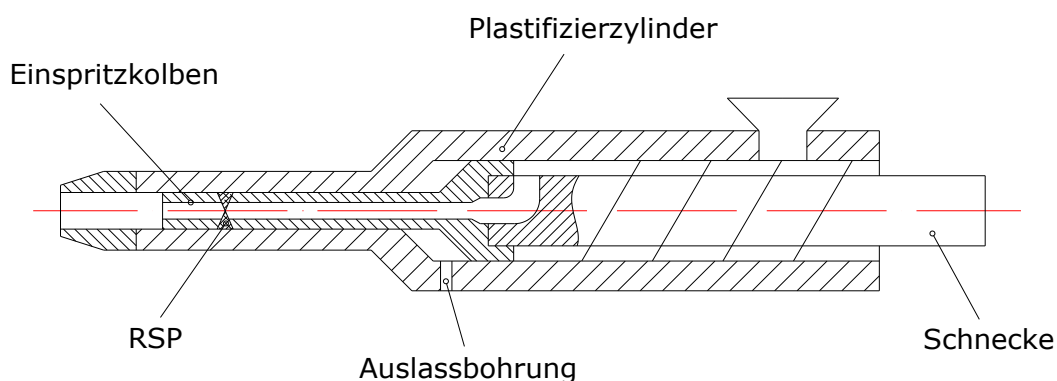


Abb. 39 Mikro-Spritzeinheit mit einem drehenden Einspritzkolben

Der Einspritzkolben und die Plastifizierschnecke befinden sich auf der gleichen axialen Achse und werden durch Gewinde verbunden. Der Einspritzkolben weist eine Innenbohrung auf, durch die die Schmelze zum Vorraum des Einspritzkolbens gefördert wird (nach [31]).

Abb. 39 zeigt eine Mikro-Spritzeinheit mit einem drehenden Einspritzkolben. Eine zylindrische Plastifizierschnecke befindet sich im Plastifizierzylinder. Ein Einspritzkolben kann mit der Schnecke beispielweise durch ein Gewinde fest verbunden werden. Somit dreht der Einspritzkolben synchron zur Schnecke während der Plastifizierung. Am vorderen Ende der Schnecke befindet sich eine Umlenkbohrung, durch die die Kunststoffschmelze entlang des Einspritzkolbens in den Einspritzvorraum gefördert wird. Der Einspritzkolben ist im

Plastifizierzylinder geführt. Der vordere Teil des Einspritzkolbens mit kleinem Durchmesser dient zur hoch genauen Einspritzung. Der hintere Teil mit großem Durchmesser, der in der Innenbohrung des Plastifizierzylinders geführt ist, unterstützt die Abdichtung der Schmelze. Eine Rückstromsperre kann im vorderen oder hinteren Teil des Einspritzkolbens positioniert werden, um eine Leckströmung während des Einspritzvorganges und der Nachdruckzeit zu verhindern. Das Thema der Rückstromsperre wird in Kapitel 4.2.3 noch detaillierter diskutiert.

Bei dieser Lösung ist die Gestaltung des Plastifizierzylinders erheblich einfacher im Vergleich zu den in Kapitel 4.2.1 dargestellten Lösungen. Der Plastifizierzylinder benötigt keine Bewegungsfreiheit, kann daher wie eine Standardspritzeinheit auf der Spritzgießmaschine befestigt werden. Die Schnecke und der Einspritzkolben befinden sich auf der gleichen axialen Achse. Das Prinzip „FIFO“ wird gewährleistet. Der Einspritzkolben ist an zwei Flächen im Zylinder geführt. So wird sichergestellt, dass der vordere Teil des Einspritzkolbens während der Plastifizier- und Einspritzphase immer gut geführt wird. Wie in Abb. 39 gezeigt, sind die Schnecke und der Einspritzkolben durch Gewinde miteinander fest verbunden. Das hintere Ende der Schnecke wird mit der Motorwelle fest verbunden. Während der Plastifizierung kommt es zu Verschleiß an der Kontaktstelle zwischen Kolben und Zylinder. Bei hoher Schneckendrehzahl kann der Verschleiß hoch sein, was zu einer Leckage zwischen Kolben und Zylinder führen wird. Mit zunehmendem Verschleiß erhöht sich auch die Leckage. Die Auslassbohrungen sind erforderlich, um die Leckage nach außen zu leiten. Es könnte sein, dass der Kolben nach einer gewissen Zeit getauscht werden muss, um die Leckagemenge gering zu halten.

Konzept F – Mikro-Spritzeinheit mit nicht drehendem Einspritzkolben

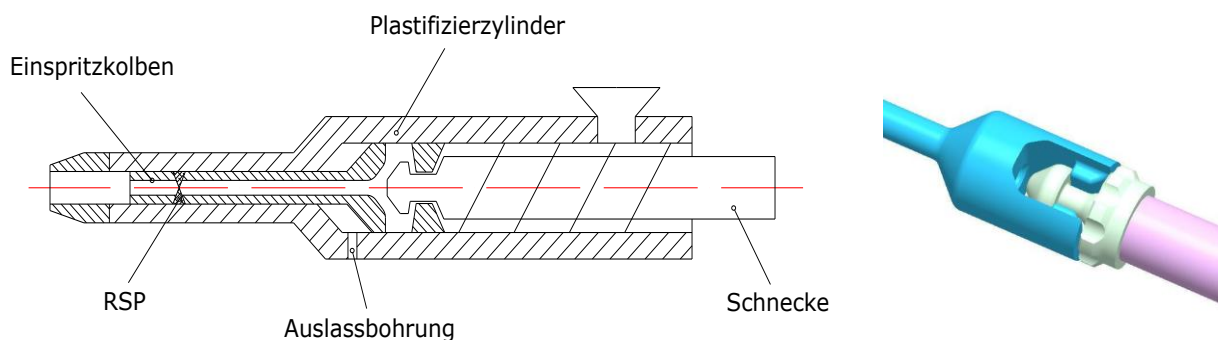


Abb. 40 **Mikro-Spritzeinheit mit einem nicht drehenden Einspritzkolben**

Der Einspritzkolben und die Plastifizierschnecke befinden sich auf der gleichen axialen Achse. Der Schneckenkopf liegt in der Nut des Einspritzkolbens. Dadurch dreht sich der Einspritzkolben während der Plastifizierung nicht.

Wie oben erwähnt, weist ein drehender Einspritzkolben Nachteile auf. In Abb. 40 (links) wird eine Mikro-Spritzeinheit mit einem nicht mitdrehenden Einspritzkolben dargestellt. Die von der Schnecke plastifizierte Schmelze wird durch den Kolbenkanal in den Vorraum des Einspritzkolbens gefördert. Die Einspritzung erfolgt durch axiale Verschiebung des Schnecken-Kolben-Verbundes.

Während beim Konzept E der Einspritzkolben und die Plastifizierschnecke durch Gewinde miteinander fest verbunden sind, wird die Schnecke in der in Abb. 40 (rechts) gezeigten Art mit dem Einspritzkolben gekoppelt. Das Kupplungsstück des Einspritzkolbens wird mit einer Nut versehen. Somit kann der Schneckenkopf in die Nut eingelegt werden. Die relative axiale Bewegung des Schneckenkopfs gegenüber dem Einspritzkolben wird durch die Nutschulter und die Schneckenkopfschulter begrenzt. Dadurch wird erreicht, dass sich der Einspritzkolben bei der Plastifizierung nicht mitdreht. Während der Plastifizierung wird der Einspritzkolben drehfrei vom Schneckenkopf zurückgezogen. Das axiale Spiel zwischen beiden Bauteilen soll möglichst gering gewählt werden, um den negativen Einfluss auf die Genauigkeit von Plastifizierung und Einspritzung gering zu halten.

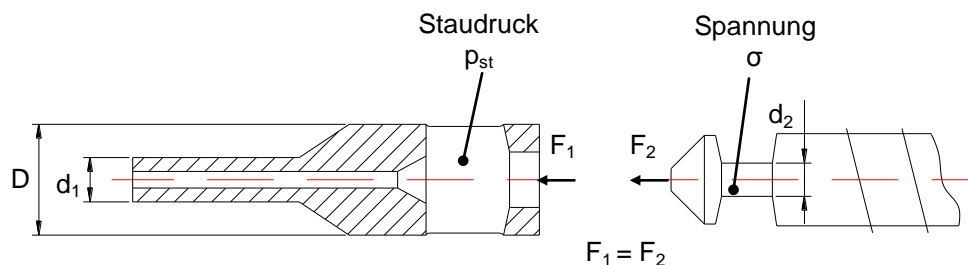


Abb. 41 **Darstellung der Spannung σ auf den Schneckenkopf**

Die Spannung σ an dem Hals des Schneckenkopfs könnte kritisch sein.

Bei dem Konzept könnten hohe Spannungen am Hals des Schneckenkopfs auftreten. Während der Plastifizierung wird der Staudruck im Nutraum (siehe Abb. 41 links) aufgebaut. So wirkt eine resultierende Kraft F_1 in Richtung links auf den Kolben.

$$F_1 = p_{st} \cdot \pi \cdot \left[\left(\frac{D}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_1}{2} \right)^2 \right] \quad \text{Gl. (4.1)}$$

Die Kraft F_1 muss vom Schneckenkopf aufgenommen werden (siehe Abb. 41 rechts). Der Schneckenkopf weist eine Halskontur auf. Auf diese verengerte Querschnittsfläche wirkt die Zugkraft F_2 .

$$F_2 = F_1 \quad \text{Gl. (4.2)}$$

Für die Spannung σ gilt:

$$\sigma = \frac{F_2}{\pi \cdot \left(\frac{d_2}{2}\right)^2} = p_{st} \cdot \frac{D^2 - d_1^2}{d_2^2} \quad \text{Gl. (4.3)}$$

Beispielsweise kann der Einspritzkolben mit folgender Geometrie ausgelegt werden:

D	d ₁	d ₂
20 mm	6,5 mm	5 mm

Tab. 7 Eine mögliche Geometrie des Einspritzkolbens

Fall der Staudruck 150 bar beträgt, kann die auftretende Spannung nach Gl. (4.3) berechnet werden.

$$\sigma = 150 \cdot \frac{20^2 - 6,5^2}{5^2} = 2146,5 \quad [\text{bar}]$$

Wenn man das Verhältnis von Kolben- und Halsdurchmesser berücksichtigt, kann eine hohe Spannung σ im Halsbereich des Schneckenkopfs auftreten.

Der Einspritzkolben ist wie bei Konzept E mit zwei Kontaktflächen im Plastifizierzylinder geführt, womit zwei Leckagestellen entstehen. Da der Einspritzkolben drehungslos arbeitet, ist der Verschleiß zwischen dem Kolben und dem Zylinder deutlich geringer als beim Konzept E. Vermutlich bildet sich an der Ecke der Nut des Kolbens eine tote Ecke. Eventuell kann die in der toten Ecke gesammelte Schmelze als Leckage entlang der Kontaktfläche zwischen dem Kolben und dem Zylinder ins Freie fließen, dadurch kann das Problem mit der toten Ecke entschärft werden.

4.2.3 Rückstromsperre

Die Rückstromsperre (RSP) ist ein wichtiges Bauteil der Spritzgießmaschine. Sie verhindert ein Zurückfließen der Kunststoffschmelze in die Schneckengänge während des Einspritz- und Nachdruckvorgangs. Bei der Plastifizierung ermöglicht sie die Schmelzeförderung vom Schneckenraum in den Schneckenorraum. Bei einer Standardspritzeinheit besteht die Rückstromsperre aus Sperring, Schneckenspitze und Druckring und sitzt an der Spritze der Plastifizierschnecke. Eine Rückstromsperre dieser Art ist nicht für die zu entwickelnde adaptierbare Mikro-Spritzeinheit geeignet, da statt der Schnecke ein Kolben als Einspritz-

element benutzt wird. Daher ist der Entwurf der Rückstromsperre ein sehr wichtiger Teil dieser Arbeit.

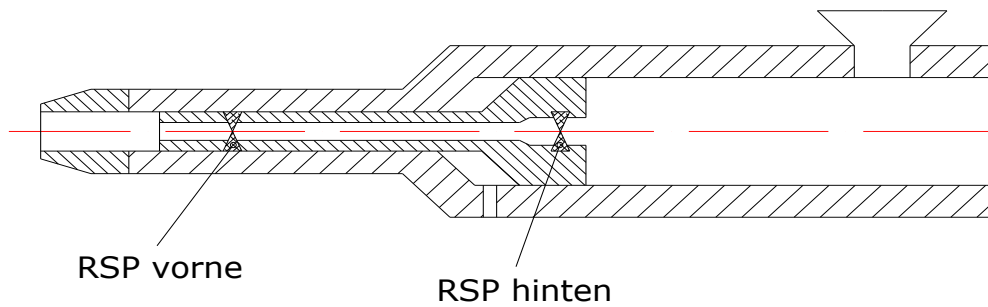


Abb. 42 **Zwei mögliche Stellen der Rückstromsperre**

RSP vorne: In diesem Fall muss die Rückstromsperre eine sehr kompakte Bauweise besitzen.

RSP hinten: Solch eine Rückstromsperre ist konstruktiv einfacher zu realisieren, da mehr Raum zur Verfügung steht.

Prinzipiell gibt es zwei Möglichkeiten (siehe Abb. 42), die Rückstromsperre in die Spritzeinheit zu integrieren. Die Rückstromsperre kann entweder am vorderen oder am hinteren Teil des Einspritzkolbens positioniert sein. Der hintere Teil des Einspritzkolbens weist einen größeren Durchmesser als der vordere Teil auf und bietet mehr räumliche Flexibilität zur Gestaltung der Rückstromsperre. Daher ist es konstruktiv einfacher, die Rückstromsperre an hinterer als an vorderer Stelle anzubringen. Ein Beispiel für eine Rückstromsperre ist das Kugelrückschlagventil (siehe Abb. 36 unten).

Der Einspritzkolben muss auch bei hohem Einspritzdruck ausreichende mechanische Festigkeit aufweisen. Beim Einspritzen wirkt der Einspritzdruck nicht nur auf die vordere Stirnfläche sondern auch auf die Innenbohrung des Einspritzkolbens. Wird die Rückstromsperre am hinteren Teil des Kolbens angebracht (siehe Abb. 43 unten), wirkt der Einspritzdruck auf den Bereich B und C, wobei der Bereich B nicht vom Zylinder geführt ist. Daher kann eine kritische Spannung im Bereich B des Einspritzkolbens erreicht werden, wenn die Rückstromsperre im hinteren Bereich des Einspritzkolbens positioniert ist. Soll die mechanische Festigkeit des Einspritzkolbens trotzdem gewährleistet werden, muss der Kolbenaußendurchmesser entsprechend größer spezifiziert werden. Dies führt aber zu einer Verschlechterung der Einspritzgenauigkeit. Befindet sich die Rückstromsperre im vorderen Bereich des Einspritzkolbens, wird der Einspritzdruck nur auf den Bereich A (siehe Abb. 43 oben). Da der Bereich A des Einspritzkolbens vom Zylinder geführt ist, ist die Spannung am Einspritzkolben wesentlich geringer als beim Fall, dass die Rückstromsperre hinten liegt. Außerdem ist die Einspritzgenauigkeit bei der Anordnung RSP hinten aufgrund der

kompressiblen Schmelze im Kanal des Kolbens schlechter als bei der Konstellation mit der RSP vorne.

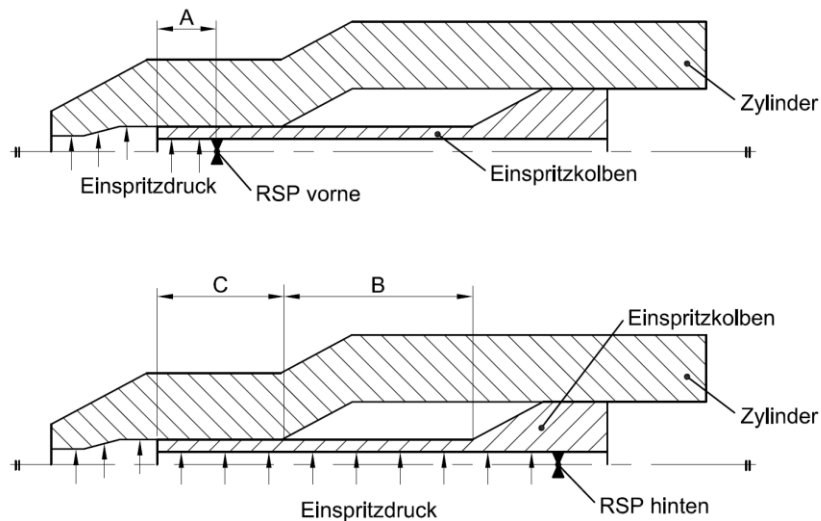


Abb. 43 **Darstellung der mechanischen Belastung beim Einspritzen**

Oben: RSP wird in vorderem Bereich des Einspritzkolbens positioniert. Der Einspritzdruck wirkt auf den Bereich A des Einspritzkolbens. Der Bereich A ist vom Zylinder geführt.

Unten: RSP befindet sich in hinterem Bereich des Einspritzkolbens. Der Einspritzdruck wirkt auf den Bereich B und C, wobei der Bereich B nicht vom Zylinder geführt. Dies verursacht eine kritische Spannung am Einspritzkolben im Bereich B.

Um die auftretende Spannung beim Fall RSP hinten zu ermitteln, wurde eine FEM-Berechnung durchgeführt. Die Last hierbei ist der maximale Einspritzdruck. Der Einspritzdruck ist eine der wichtigsten Leistungsgrößen einer Spritzeinheit [61], der in den technischen Daten der Spritzgießmaschine vom Hersteller angegeben wird. Nach Recherche der technischen Daten der gängigen Spritzgießmaschinen beträgt der maximale Einspritzdruck bis 250 MPa. Obwohl ein Einspritzdruck in Höhe von 250 MPa bei Mikrospritzgießanwendungen selten auftritt, sollte man bei der Auslegung des Kolbens den Einspritzdruck von 250 MPa zu Grunde legen.

Die maximale zulässige Spannung des Einspritzkolbens hängt stark von dem Materialtyp und der Verarbeitungstemperatur ab. In der Regel wird ein hoch beanspruchtes Bauteil wie z. B. die Schnecke aus Stahl 1.2379 (X155CrVMo12.1) gefertigt. Da die Verarbeitungstemperatur von Polyetheretherketon (PEEK) bis 400 °C [121] beträgt, soll die Dehngrenze bei einer Temperatur von 400 °C ermittelt werden. Die 0,2 %-Dehngrenze $R_{p0.2}$ vom Stahl 1.2379 bei der Temperatur von 400 °C beträgt 1673 MPa. Ist die Sicherheit 3, beträgt die maximale zulässige Spannung

$$\sigma_{zul} = \frac{1673 \text{ MPa}}{3} = 557,7 \text{ MPa}.$$

Die Randbedingungen der Simulation entsprechen dem Fall von Abb. 43 unten. Während der Bereich C und der Kolbenkopf im Zylinder geführt werden, wird der Bereich B als nicht geführt in der Simulation definiert.

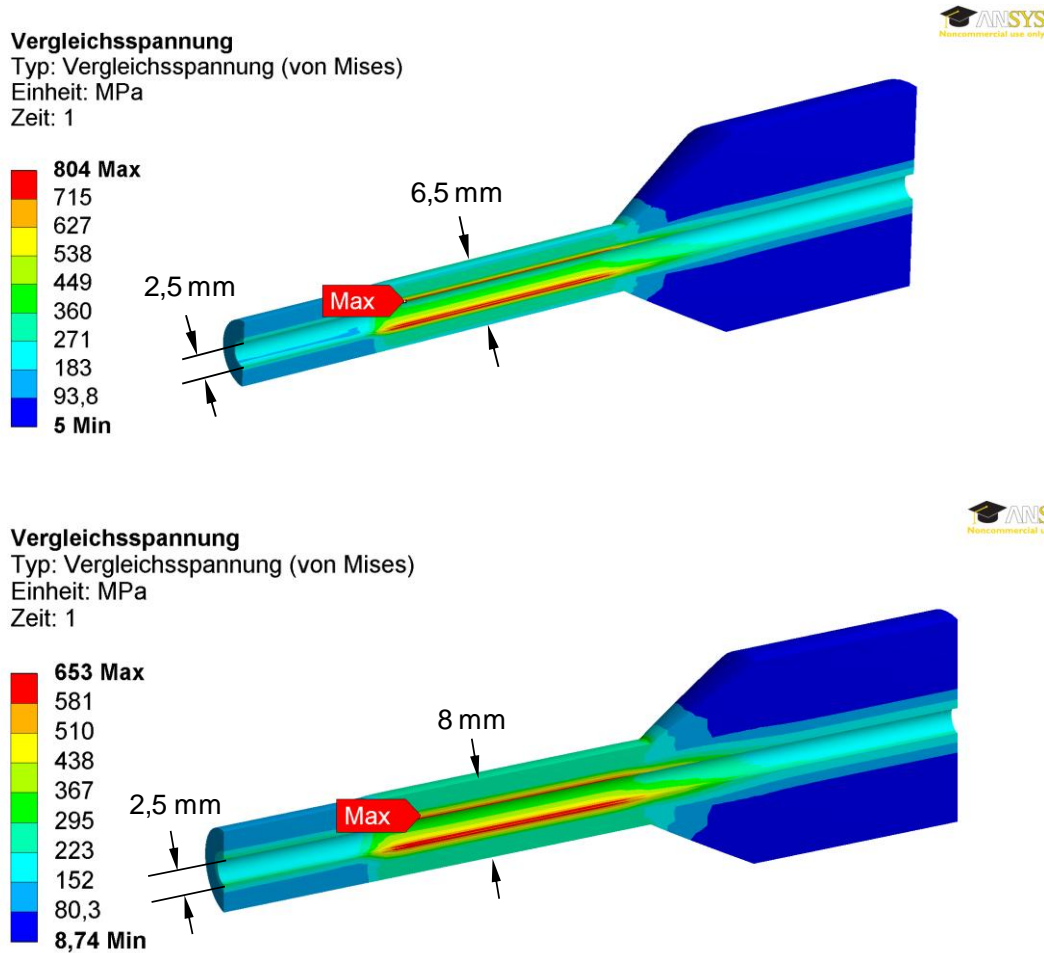


Abb. 44 **Mechanische Belastung beim Einspritzen (RSP hinten)**

Im vorliegenden Konzept ist die Rückstromsperre im hinteren Bereich des Einspritzkolbens positioniert. Der Einspritzdruck von 250 MPa wirkt auf die Stirnfläche und die Innenbohrung des Einspritzkolbens. Oben: Der Kolbenaußendurchmesser beträgt 6,5 mm. Unten: Der Kolbenaußendurchmesser beträgt 8 mm.

Die Berechnung wurde in der Umgebung ANSYS 11 Workbench anhand von zwei Varianten durchgeführt. Während der Kolbenaußen- und Kolbeninnendurchmesser bei der Variante A jeweils 6,5 mm und 2,5 mm (siehe Abb. 44 oben) beträgt, beträgt der Außen- und Innendurchmesser bei der Variante B jeweils 8 mm und 2,5 mm (siehe Abb. 44 unten). Für die Variante A beträgt die maximale Spannung bei einem Einspritzdruck in Höhe von 250 MPa an der kritischen Stelle bis zu 804 MPa, die jedoch die zulässige Spannung von 557,7 MPa

überschreitet. Es ist auch zu beobachten, dass die auftretende Spannung des Bereichs C aufgrund der Führung im Zylinder recht gering ist. Eine weitere Vergrößerung des Kolbenaußendurchmessers ist daher erforderlich. Die Ergebnisse der FEM-Simulation mit dem Kolbendurchmesser von 8 mm (siehe Abb. 44 unten) zeigen, dass die maximale Spannung bis zu 653 MPa beträgt, die die zulässige Spannung von 557,7 MPa weiterhin überschreitet. Eine weitere Vergrößerung des Kolbendurchmessers ist nicht empfehlenswert, da die Einspritzgenauigkeit aufgrund des vergrößerten Kolbendurchmessers beeinträchtigt wird.

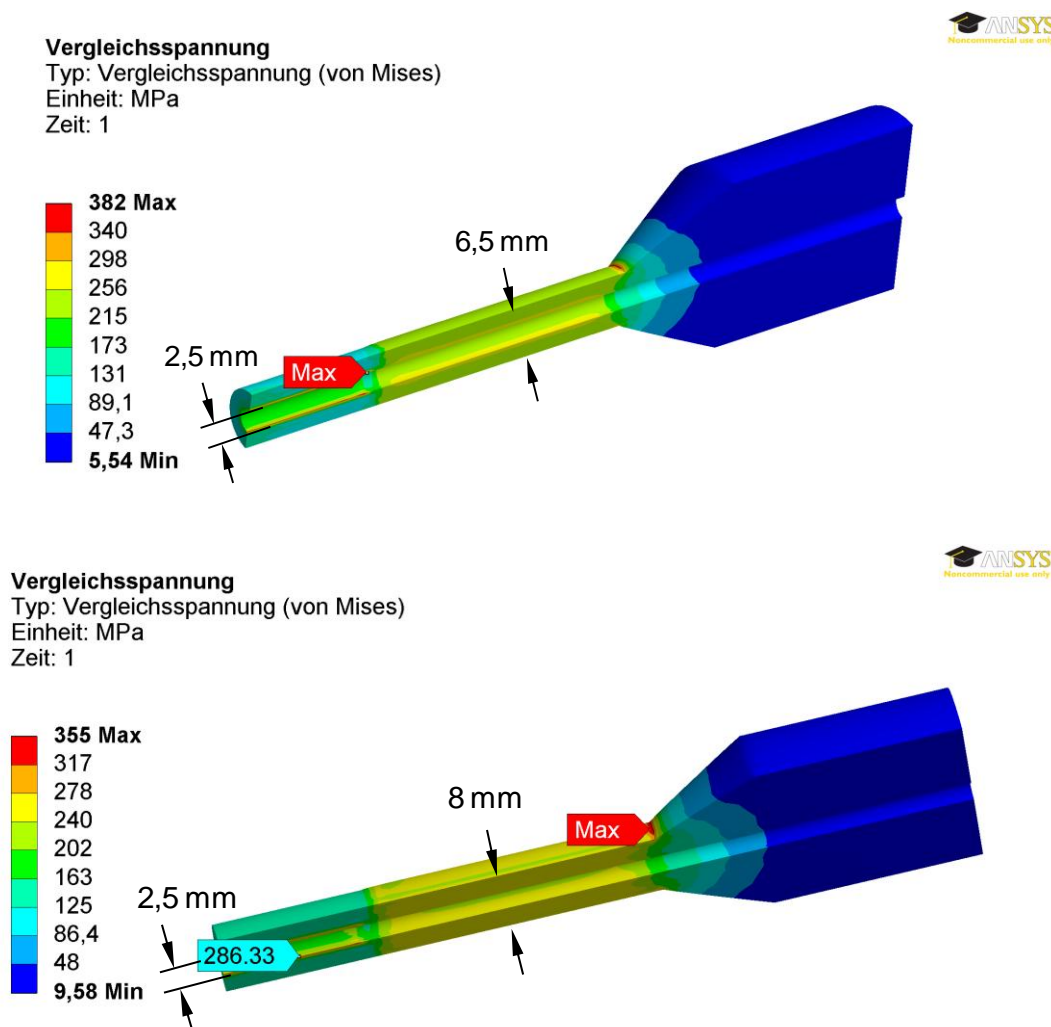


Abb. 45 **Mechanische Belastung beim Einspritzen (RSP vorne)**

Im vorliegenden Konzept ist die Rückstromsperre im vorderen Bereich des Einspritzkolbens positioniert. Der Einspritzdruck von 250 MPa wirkt auf die Stirnfläche und die Innenbohrung des Einspritzkolbens. Oben: Der Kolbenaußendurchmesser beträgt 6,5 mm. Unten: Der Kolbenaußendurchmesser beträgt 8 mm.

Im Vergleich zum Fall RSP hinten ist die mechanische Belastung (siehe Abb. 45) beim Einspritzen mit einer im vorderen Bereich des Kolbens positionierten Rückstromsperre

deutlich geringer. Die maximale Spannung beträgt beim 8 mm-Kolben bzw. 6,5 mm-Kolben 355 MPa bzw. 382 MPa. Mit der vorderen Rückstromsperre ist die zulässige Spannung von 557,7 MPa nicht überschritten. Daher soll eine am vorderen Kolbenteil angebrachte Rückstromsperre bevorzugt werden.

Da der Einspritzkolben sehr hohe axiale Spannung beim Einspritzen aufnehmen muss, ist es notwendig, die Knickgefahr des Kolbens zu überprüfen. Abb. 46 stellt den Knickfall bei dieser Konstellation dar.

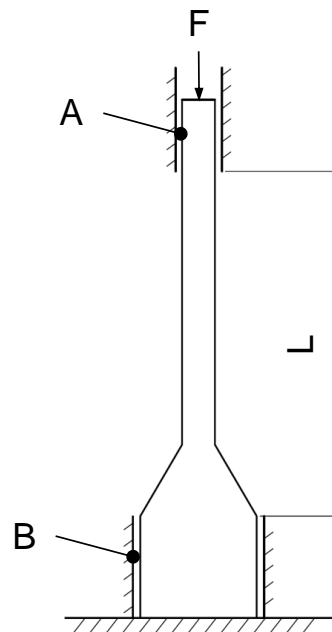


Abb. 46 Darstellung der freien Knicklänge L des Einspritzkolbens

Der Einspritzkolben wird an der Stelle von A und B im Zylinder geführt. Die verschraubte Befestigung an der Schnecke stellt eine feste Einspannung unten dar.

Da einerseits der dargestellte Knickfall keinem der vier Eulerfälle [3] entspricht, andererseits der Querschnitt des Kolbens über die axiale Richtung nicht einheitlich ist, kann die Überprüfung der Knickgefahr mittels der eulerschen Methode nicht möglich sein. Daher wurde eine FEM-Berechnung anhand eines 6,5 mm-Kolbens durchgeführt, um die Knickgefahr des Kolbens beim Einspritzen zu überprüfen. Der Durchmesser des Schneckenkopfs bzw. die freie Knicklänge L beträgt 20 mm bzw. 42 mm. In der Simulation beträgt der maximale Einspritzdruck weiterhin 250 MPa. Mit dem Programm ANSYS Workbench 11 kann die Eigenwertbeulenanalyse durchgeführt werden. Als Ergebnis ergibt sich der Lastmultiplikator (Abb. 48 oben links), der die Sicherheit gegen Knickgefahr darstellt. Das Ergebnis zeigt, dass ein Knicken des Einspritzkolbens mit einer Sicherheit von 256,05 ausgeschlossen ist.

Gesamtverformung

Typ: Gesamtverformung
 Lastmultiplikator: 256,05
 Einheit: mm

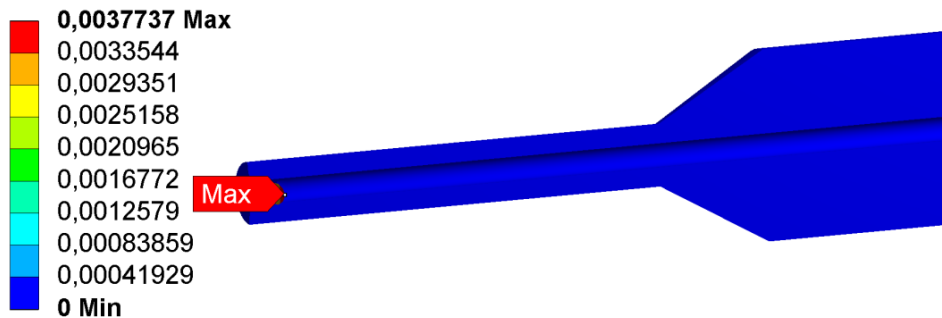


Abb. 47 **Ergebnisse der Knickberechnung**

Der Lastmultiplikator (Bild oben links) beträgt 256,05. Eine ausreichende Sicherheit gegen Knicken ist gewährleistet.

Wird die Rückstromsperre am vorderen Teil des Einspritzkolbens realisiert, ist die Lösung mit dem Kugelrückschlagventil nur begrenzt geeignet. Um die Funktionalität und die mechanische Festigkeit des Kugelventils zu gewährleisten, muss der Kugeldurchmesser ausreichend groß dimensioniert sein. Es ist deshalb schwierig, ein Kugelventil am vorderen Teil des Kolbens zu integrieren, da der Kolbendurchmesser des vorderen Teils zur Erhöhung der Einspritzgenauigkeit sehr klein gewählt werden muss.

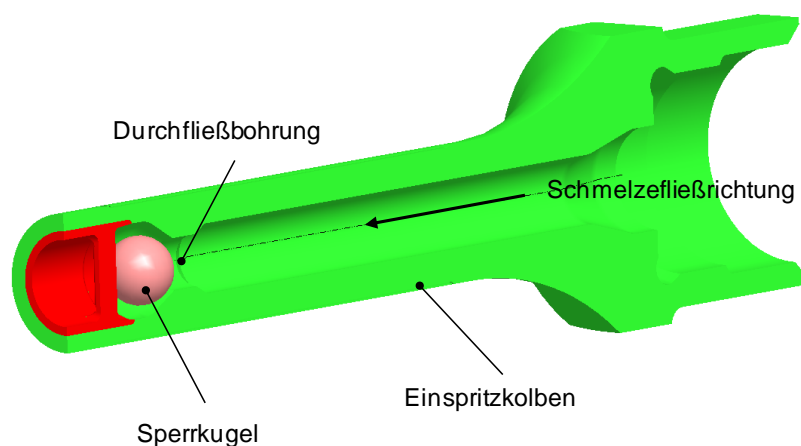


Abb. 48 **Kugelrückschlagventil im vorderen Bereich des Einspritzkolbens**

Eine Sperrkugel ist im Einspritzkolben integriert. Der Kugel weist einen Durchmesser von 4 mm auf. Der Kolbenaußendurchmesser beträgt 8 mm.

Es wurde eine experimentelle Untersuchung durchgeführt, dabei wird eine Sperrkugel mit dem Durchmesser 4 mm (siehe Abb. 48) verwendet. Die Kugel befindet sich im Kanal des

Einspritzkolbens, dementsprechend beträgt der minimale Kolbenaußendurchmesser 8 mm. Da die Kugel einerseits die Durchfließbohrung zudecken, andererseits eine ausreichende mechanische Festigkeit nachweisen soll, kann der Durchmesser der Kugel nicht beliebig reduziert werden. Die Untersuchungen zeigen, dass das Kugelrückschlagventil keine hohe Schließreproduzierbarkeit erzielt. Es ist daher notwendig, eine bessere Lösung für die Rückstromsperre zu finden. Die Rückstromsperre soll einerseits im Vergleich zu dem Kugelventil eine bessere Festigkeit besitzen, andererseits einen geringeren Durchmesser des Einspritzkolbens ermöglichen, damit die Einspritzgenauigkeit noch erhöht wird. Zugleich soll die Rückstromsperre tote Ecke vermeiden.

Die Rückstromsperre muss die folgenden Anforderungen erfüllen:

- ausreichende mechanische Festigkeit,
- Vermeidung toter Ecke und
- geringer Fertigungsaufwand.

Der Einspritzkolben nimmt beim Einspritzen sehr hohen Druck (bis 2500 bar) auf. Da der Kolbendurchmesser recht klein ist, muss das Sperrelement möglichst spannungsneutral ausgelegt werden. Es soll keine toten Ecke im Schmelzkanal bilden. Hoher Fertigungsaufwand soll vermieden werden.

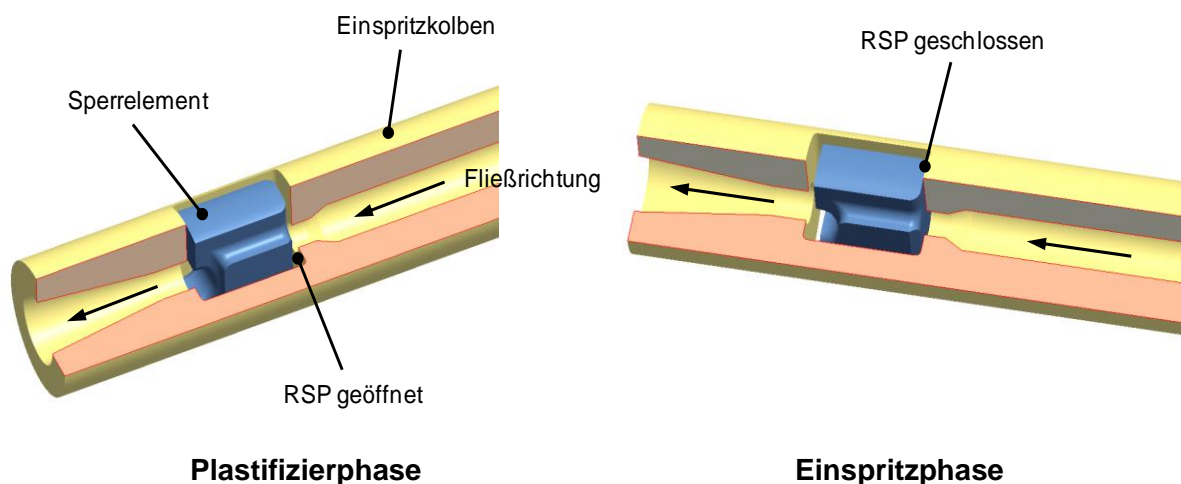


Abb. 49 Rückstromsperre mit einem klotzförmigen Sperrelement

Während der Plastifizierung wird das Sperrelement nach vorne gedrückt, damit die Schmelze durch die Kanäle zum Vorräum gefördert werden kann. Beim Einspritzen schließt das Sperrelement die Kolbeninnenbohrung, dadurch ist der Rückfluss der Schmelze verhindert.

Eine neuartige Rückstromsperre wird in Abb. 49 gezeigt. Ein klotzförmiges Sperrelement befindet sich in der durchgängigen Nut des Einspritzkolbens. Das Sperrelement kann sich in

der Nut axial gegenüber dem Einspritzkolben bewegen. Die Nut verbindet die Schmelzefließkanäle. Die Außenkontur des Sperrelements wird so gestaltet, dass die Kunststoffschmelze durch die von dem Sperrelement und der Nut gebildeten Kanäle fließen kann. Beim Plastifiziervorgang wird das Sperrelement durch den Schmelzedruck nach links gedrückt (siehe Abb. 49 links), dadurch kann die Schmelze durch die Kanäle in den Kolbenvorraum gefördert werden. Beim Einspritzvorgang wird das Sperrelement durch den Einspritzdruck zurück geschoben und deckt somit den Fließkanal ab (siehe Abb. 49 rechts).

Eine FEM-Berechnung wird zur Überprüfung der mechanischen Festigkeit des Kolbens in der Umgebung ANSYS 11 Workbench durchgeführt. Um den Berechnungsaufwand zu reduzieren, wird nur eine Hälfte der symmetrischen Kolbengeometrie in der Simulation betrachtet. Der kritische Zustand tritt beim Einspritzvorgang auf. Der Einspritzdruck in Höhe von 250 MPa wird als maximaler Wert in der Berechnung verwendet. Die Zielsetzung der FEM-Berechnung ist, nicht nur eine ausreichende Festigkeit des Bauteils nachzuweisen, sondern auch die Auslegung des Einspritzkolbens so zu optimieren, dass die auftretende mechanische Belastung möglichst gering ist. In der Simulation wird der Einspritzdruck von 250 MPa als Last definiert. Die Kolbenaußenfläche wird von der Zylinderinnenbohrung geführt.

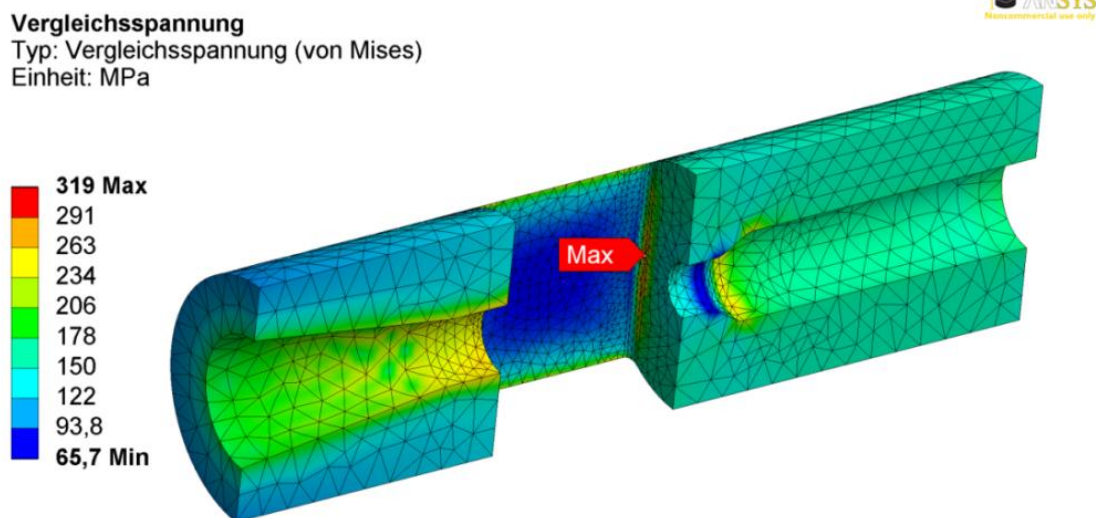


Abb. 50 **Berechnungsergebnis des optimierten Einspritzkolbens**

Die maximale Spannung beträgt 319 MPa.

In Abb. 50 wird die Vergleichsspannung (von Mises) des optimierten Einspritzkolbens gezeigt. Die maximale Spannung beträgt 319 MPa und tritt an der Stelle der Nutkante auf. Daher ist die mechanische Festigkeit des Kolbens mit Sicherheitsfaktor vier gewährleistet. Nach der Optimierung kann der Kolbendurchmesser auf 6,5 mm reduziert werden, wodurch

eine höhere Einspritzgenauigkeit realisierbar wird. Zugleich kann diese Rückstromsperre auch in den Konzepten mit konischer Schnecke (siehe Kapitel 4.2.1) integriert werden.

Fazit:

In diesem Kapitel werden zwei Konzepte mit zylindrischer Schnecke vorgestellt und diskutiert. Dabei benötigt der Plastifizierzylinder keine Bewegungsfreiheit, kann daher wie bei einer Standardspritzeinheit auf der Maschine befestigt werden. Dadurch kann der Bauaufwand der für das Mikrospritzgießen geeigneten adaptierbaren Spritzeinheit wesentlich reduziert werden. Bei beiden vorgestellten Konzepten sind die Plastifizierschnecke, der Einspritzkolben und der Plastifizierzylinder in der gleichen Achse ausgerichtet.

Die beiden Konzepte können durch die Art der Verbindung zwischen Einspritzkolben und Schnecke unterschieden werden. Während beim Konzept E der Einspritzkolben drehfest mit der Schnecke verbunden ist, arbeitet der Einspritzkolben beim Konzept F drehungslos. Daher ist der Verschleiß zwischen dem Kolben und der Zylinderinnenbohrung beim Konzept F geringer als beim Konzept E. Jedoch entsteht noch Verschleiß zwischen dem Schneckenkopf und der Kolbennut. Die tote Ecke kann beim Konzept F nicht ganz vermieden werden. Außerdem kann eine kritische Spannung im Halsbereich des Schneckenkopfs auftreten. Aus diesen Gründen wird das Konzept E als die beste Lösung betrachtet. Um eine hohe mechanische Belastung des Einspritzkolbens zu vermeiden, muss eine Rückstromsperre an dem Einspritzkolben angebracht werden. Eine neuartige Rückstromsperre mit einem klotzförmigen Sperrelement wurde entwickelt. Nach der Optimierung des Einspritzkolbens mit Hilfe der FEM-Berechnung kann der Kolbendurchmesser auf 6,5 mm reduziert werden.

Durch die ständige Verbesserung der Konzepte werden immer einfachere und zuverlässigere Lösungen gefunden. Die Konzepte mit zylindrischer Schnecke sind zu bevorzugen, da ihr Bauaufwand wesentlich geringer ist als der mit konischer Schnecke. Ein Prototyp wurde nach Konzept E gebaut. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen werden in Kapitel 4.4 diskutiert.

4.3 Konstruktion der Plastifizierschnecke

Der konstruktiven Ausbildung der Schnecke muss besondere Beachtung geschenkt werden, da mit ihr der Kunststoff in eine spritzfähige, homogen aufgeschmolzene Masse überführt werden soll. In der Praxis hat es sich gezeigt, dass man für die meisten Kunststoffe mit einer Universalschnecke auskommt. Man muss sich jedoch darüber klar sein, dass mit dieser

Einheits- oder Universalschnecke nicht immer optimale Ergebnisse erzielt werden können [40,52,134].

Eine der gebräuchlichsten Schneckenformen ist die so genannte Dreizonenschnecke. Sie setzt sich aus Einzugszone, Kompressionszone und Meteringzone zusammen. In der Einzugszone wird Kunststoffgranulat aus dem Trichter in den Plastifizierzylinder eingezogen und gefördert. Die Kompressionszone verdichtet das von der Einzugszone geförderte Material und plastifiziert es. In der Meteringzone wird die Schmelze homogenisiert und auf die gewünschte Temperatur gebracht [41,53,137]. Um die Homogenität noch zu steigern, wird die Schnecke mit Scher- und Mischteilen ausgestaltet. Jedoch verlängert sich die Verweilzeit erheblich, da Scher- und Mischteile in der Regel eine Länge von $4D$ aufweisen. Aufgrund der langen Verweilzeit werden Scher- und Mischteile nicht bei der Auslegung der Mikro-Spritzeinheit verwendet.

Barrierschnecken können die spezifische Plastifizierleistung erhöhen. Hierzu wird die Schnecke im Anschluss an die Einzugszone zweigängig ausgeführt, wobei je ein Feststoff- und ein Schmelzekanal entstehen [49,88]. Die Fertigungskosten der Barrierschnecke sind entsprechend höher als die der Standardschnecke. Beim Mikrospritzgießen spielt eine hohe Plastifizierleistung keine große Rolle, da die zu plastifizierende Schmelzmenge deutlich weniger als ein Gramm beträgt. Um die Verweilzeit der Schmelze zu reduzieren, soll die Kanalbreite der Schnecke für das Mikrospritzgießen möglichst klein spezifiziert werden. Jedoch erlauben Barrierschnecken aufgrund des zweigängigen Kanals keinen schmalen Schneckenkanal. Daher ist eine Barrierschnecke nicht für Mikrospritzgießenwendungen geeignet. Aus diesen Gründen wird die Drei-Zonen-Schnecke bevorzugt.

Zur Überprüfung der mechanischen Festigkeit der Schnecke wird das Flächenträgheitsmoment herangezogen. Zur Berechnung des Flächenträgheitsmoments wird der Querschnitt der Schnecke in den kreisförmigen, vollkommen symmetrischen Kern und das Stegsegment zerlegt. Dabei werden Fasen und Radien des Stegs vernachlässigt.

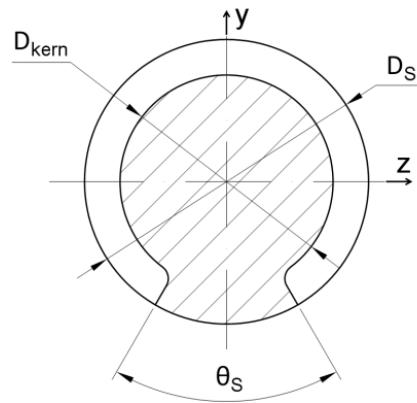


Abb. 51 Querschnitt einer eingängigen Schnecke

Für den Schneckenkern (siehe Abb. 51) ergibt sich folgendes Flächenträgheitsmoment:

$$I_{Ky} = I_{Kz} = \frac{\pi \cdot D_{\text{kern}}^4}{64} \quad \text{Gl. (4.4)}$$

Da der Kern als vollkommen symmetrisch betrachtet wird, ist das Flächenträgheitsmoment um die y- und z-Achse gleich.

Für das Flächenträgheitsmoment I_{sz} des Stegsegments um die z-Achse und das Flächenträgheitsmoment I_{sy} des Stegsegments um die y-Achse gilt:

$$I_{sz} = I_{sy} = \frac{\theta_s}{2\pi} \cdot \frac{\pi \cdot (D_s^4 - D_{\text{kern}}^4)}{64} \quad \text{Gl. (4.5)}$$

Für den Winkel θ_s gilt:

$$\theta_s = \frac{2 \cdot e}{D_s} \cot \varphi \quad \text{Gl. (4.6)}$$

Wobei e die Stegbreite ist. Das polare Flächenträgheitsmoment des Querschnitts der Schnecke setzt sich aus den beiden Flächenträgheitsmomenten I_y und I_z aus den Gl. (4.4) und Gl. (4.5) zusammen:

$$I_P = I_y + I_z = \frac{\theta_s}{64} D_s^4 + \frac{D_{\text{kern}}^4}{64} (2\pi - \theta_s) \quad \text{Gl. (4.7)}$$

Die maximale Torsionsschubspannung τ_{max} der Schnecke ergibt sich aus:

$$\tau_{t\max} = \frac{M}{I_p} \cdot \frac{D_s}{2} \quad \text{Gl. (4.8)}$$

Bei Nachprüfungen konstruktiv festgelegter Querschnittsabmessungen von Bauteilen ist nachzuweisen, dass die vorhandene Spannung $\tau_{t\max}$ die folgende Beziehung erfüllen muss.

$$\tau_{t\max} \leq \tau_{zul} \quad \text{Gl. (4.9)}$$

Für Bauteile aus Stahl sowie legiertem Stahl geht man von der 0,2 %-Dehngrenze $R_{p0,2}$ aus und erhält als zulässige Torsionsschubspannung:

$$\tau_{zul} = \frac{R_{p0,2}}{\nu} \quad \text{Gl. (4.10)}$$

wobei ν ein Sicherheitsfaktor ist. Die mechanische Festigkeit und das Schneckenkanalvolumen werden maßgeblich von der Schneckengeometrie bestimmt.

Für das Schneckenkanalvolumen gilt:

$$V_{sch} = \iint dZdA \quad \text{Gl. (4.11)}$$

wobei Z die abgewickelte Kanallänge und A die Querschnittfläche ist.

Eine Vergrößerung der Stegbreite e führt zu höherer Festigkeit, geringerem Kanalvolumen, aber auch größerer auftretender Drehmomentbelastung. Im Gegensatz zur Steigbreite e kann eine Reduktion der Kanalbreite b gleichzeitig alle drei Aspekte begünstigen. Eine Erhöhung der Steigung führt zu größerem Durchsatz, jedoch schlechterer Homogenität. In der Praxis ist eine Steigung von $1D$ gut bewährt [62]. Beim Mikrospritzgießen ist die zu plastifizierende Schmelzemenge sehr gering, so spielt der hohe Durchsatz keine wichtige Rolle. Deshalb ist die Reduzierung der Steigung t ($t < D_s$) vorgesehen. Dadurch kann ein geringeres Kanalvolumen, eine robustere Ausführung sowie eine geringere auftretende Drehmomentbelastung erzielt werden.

Nun soll die Schnecke unter der Zielsetzung von hoher mechanischer Festigkeit, guter Schmelzehomogenität und niedriger Schmelzeverweilzeit konstruiert werden. Um eine hohe Festigkeit der Schnecke zu gewährleisten, beträgt der Schneckendurchmesser 20 mm. Die Gangtiefe soll so ausgelegt werden, dass mindestens ein Granulat Korn hineinfallen können muss. In [63] ist vorgeschlagen, dass die Gangtiefe mindestens 4 mm sein sollte. Bezüglich

der mechanischen Festigkeit erlaubt die 20 mm-Schnecke eine Gangtiefe von 4 mm. Jedoch soll die Gangtiefe weiter reduziert werden, um das Kanalvolumen und damit die Verweilzeit der Schmelze zu reduzieren. Nach [20] kann die Spritzgießmaschine Battenfeld Microsystem 50 von der Fa. Wittmann-Battenfeld GmbH, Kottlingbrunn, Österreich, mit einer Gangtiefe von 3 mm nahezu alle gängigen Standardgranulate verarbeiten, wobei die Gangtiefe von 3 mm das durch Vermessen der vorhandenen Maschine gewonnene Ergebnis ist. Erfahrung, die während der Produktion mit dieser Maschine gesammelt wurde, kann diese Aussage bestätigen.

Um mehr gängige Kunststoffe verarbeiten zu können, wird die Gangtiefe der Einzugszone der zu entwickelnden Mikro-Spritzeinheit auf 3,5 mm spezifiziert. Das Kanalvolumen soll trotz des großen Schneckendurchmessers möglichst gering gehalten werden. Es gibt beim Mikrospritzgießen noch Spielraum, die Schneckenlänge zu reduzieren, da die Verweilzeit der Schmelze mit einer Schneckenlänge von 20D (Standardausführung) zu lang ist. Dabei wird die Schneckenlänge statt standardmäßige 20D auf 10D gekürzt. Die abgewinkelte Kanallänge entspricht einer 14 mm-Schnecke mit einer Länge von 15D. Mit dieser abgewinkelten Kanallänge haben Kunststoffgranulate genügend Zeit, während der Förderung vom Trichter bis zum Schneckenraum homogen aufgeschmolzen zu werden. Eine hohe Homogenität der Schmelze könnte dadurch sichergestellt werden. Dies muss jedoch anhand eines Prototyps überprüft werden. Um das Kanalvolumen und dadurch die Schmelzeverweilzeit weiter zu reduzieren, wird die Stegbreite der Schnecke auf 10 mm spezifiziert. Diese Maßnahme erhöht zugleich die mechanische Festigkeit der Schnecke.

4.4 Funktionsüberprüfung der Mikro-Spritzeinheit an einem Prototyp

Die Detailkonstruktion der Mikro-Spritzeinheit wurde nach dem Konzept E (siehe Abb. 39) weiter geführt, daraus wurde ein Prototyp (siehe Abb. 52) gebaut, um erste Funktionstests durchzuführen und anschließend die Konstruktion zu optimieren. Bei dem Prototyp wird ein klotzförmiges Sperrelement (siehe Abb. 49) im Einspritzkolben integriert. Dadurch ist es möglich, dass der Durchmesser des Einspritzkolbens auf 6,5 mm reduziert werden kann, was wiederum eine sehr hohe Dosiergenauigkeit erlaubt.

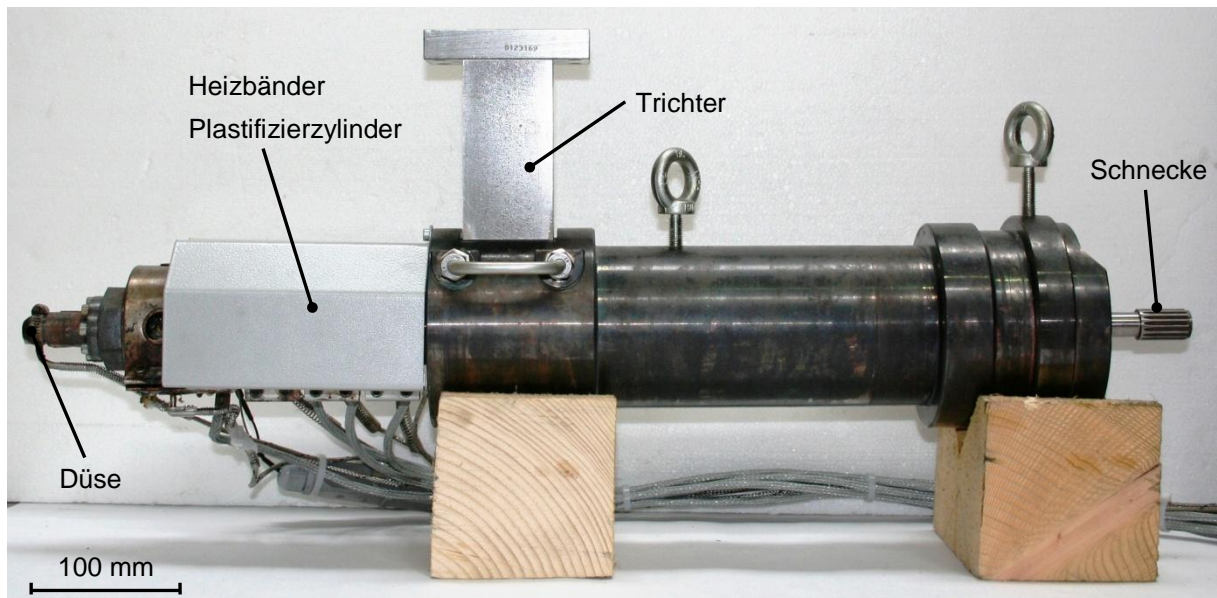


Abb. 52 **Prototyp der Mikro-Spritzeinheit nach Konzept E**

Die Mikro-Spritzeinheit ist auf eine Standardmaschine KM-EX von der Fa. Krauss Maffei Technologies GmbH, München, adaptierbar. Das Prinzip der Adaptierbarkeit ist auf andere Standardmaschinen übertragbar. Sie weist eine sehr kompakte Bauweise auf, welche für Mikrospritzgießanwendungen geeignet ist.

4.4.1 Plastifizierungsversuche

Standardschnecken weisen eine Länge von $20D$ auf. Dies zeigt in der Praxis ein sehr gutes Betriebsverhalten [43,47,64]. Die in diesem Versuch verwendete Schnecke besitzt eine Länge von $10D$ und ist somit wesentlich kürzer als üblich. Diese Länge stellt einen Kompromiss zwischen hoher Homogenität und kurzer Verweilzeit dar. Eine Schnecke mit einer Länge von $10D$ wird jedoch noch nicht in Spritzgießmaschinen eingesetzt. Daher fehlen Erfahrungswerte mit solchen kurzen Schnecken. Ziel der Plastifizierungsversuche ist es, die Funktionalität der kürzeren Schnecke zu überprüfen, wobei die Mikro-Spritzeinheit folgende Anforderungen erfüllen muss:

- Alle gängigen Kunststoffgranulate müssen verarbeitbar sein.
- Eine hohe Schmelzehomogenität muss gewährleistet werden.

Es ist wichtig, dass die zu entwickelnde Mikro-Spritzeinheit Standardgranulate problemlos einziehen kann und gleichzeitig die Schmelze gut homogenisiert. Trotz der kurzen Schneckenlänge von $10D$ darf somit keine Inhomogenität der Schmelze auftreten. Diese Anforderungskriterien werden anhand der Plastifizierungsversuche überprüft.



Abb. 53 **Verwendete Kunststoffe für die Plastifizierungsversuche**

Die ausgewählten Kunststoffe decken ein breites Spektrum in Bezug auf die Granulatform, -größe und Anwendungsgebiete ab.

Für die Plastifizierungsversuche werden die zu verarbeitenden Materialien ausgewählt. Kunststoffe können in Standardkunststoffe und technische Kunststoffe eingeteilt werden. Um die Versuchsergebnisse auf ein möglichst breites Anwendungsfeld beziehen zu können, den Umfang der Experimente jedoch nicht zu sprengen, werden dazu repräsentative Sorten ausgewählt (siehe Abb. 53). Dazu werden Kunststoffe mit kugelförmiger und zylindrischer Granulatform ausgewählt. Auch die Granulatgrößen decken ein breites Spektrum ab. Beispielsweise beträgt der Durchmesser des PA6.6-Granulats ca. 3 mm, der Durchmesser von PPS bis ca. 6 mm, wobei die Granulate von PPS keinen zylindrischen sondern ellipsoiden Querschnitt aufweisen. Die genauen Angaben zu den Granulaten befinden sich im Anhang A. Die technischen Kunststoffe müssen nach Herstellerangaben vorgetrocknet werden. Nach der Vortrocknung können die Kunststoffgranulate von der Mikro-Spritzeinheit plastifiziert werden. Diese arbeitete dabei wie ein Extruder. Ein kompletter Spritzgießprozess wurde nicht gefahren. Die Schmelzehomogenität und die Blasenbildung in der Schmelze können mit dem Auge beobachtet werden.

Zur Beurteilung des Einzugsverhaltens wurde die Durchsatzmessung mit den Kunststoffen PPS, POM und PE durchgeführt, die Information über Fördermenge pro Zeiteinheit liefert. Die Drehzahl wurde für die Experimente von 40 U/min bis 130 U/min jeweils in Schritten von 30 U/min gesteigert. In Abb. 54 ist der Durchsatz in Abhängigkeit von der Drehzahl dargestellt. Der Haupteinfluss auf den Durchsatz ist die Drehzahl, wobei ein grob linearer Zusammenhang besteht. Dies verdeutlicht zugleich, dass die Materialförderung kontinuierlich ohne Einzugsprobleme verläuft. Ansonsten würden Einbrüche am Graphen zu sehen sein. Die unterschiedlichen Steigungen der Kurven sind auf die unterschiedlichen Dichten der Materialien zurückzuführen. Die Versuche bestätigen, dass der Kunststoff PPS mit dem großen Granulat Korn (Durchmesser bis 6 mm) problemlos mit der Mikro-Spritzeinheit plastifiziert werden kann.

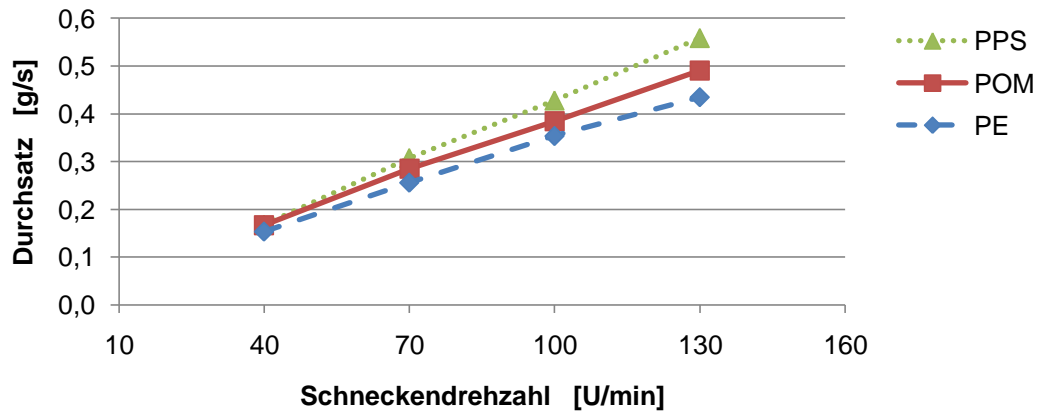


Abb. 54 **Durchsatz in Abhängigkeit von der Schneckendrehzahl**

Das Bild zeigt einen linearen Zusammenhang zwischen dem Durchsatz und der Drehzahl. Dies verdeutlicht, dass die Mikro-Spritzeinheit ein gutes Einzugsverhalten aufweist. Ansonsten würden sich Einbrüche im Diagramm zeigen.

Abb. 54 zeigt auch, dass der Durchsatz bei einer Drehzahl von 40 U/min ca. 0,16 g/s beträgt. Nach der einfachen Umrechnung beträgt die Plastifizierzeit für ein Schmelzegewicht von 200 mg bei der Drehzahl von 40 U/min ca. 1,25 s. Durch Erhöhung der Drehzahl kann die Plastifizierzeit noch reduziert werden. Somit ist eine kurze Plastifizierzeit für das Mikrospritzgießen gewährleistet, da das Gewicht des Mikrobauteils meistens geringer als 500 mg ist.

Die Ergebnisse der Plastifizierversuche können im Folgenden zusammengefasst werden:

- Die ausgewählten Kunststoffgranulate werden einwandfrei eingezogen.
- Bei hoher Schneckendrehzahl wurde kein Einbruch des Durchsatzes beobachtet.
- Kein Kunststoff zeigt Blasenbildung.
- Die Kunststoffe werden gut plastifiziert und homogenisiert.
- Es wurde ein ausreichender Durchsatz für Mikrospritzgießanwendungen erreicht.

Die Plastifizierversuche zeigen, dass alle Anforderungen mit der kurzen Schneckenlänge erfüllt werden können.

4.4.2 Spritzgießversuche

Nach der Untersuchung des Plastifizierverhaltens der Mikro-Spritzeinheit werden die ersten Spritzgießversuche durchgeführt. Dazu wird ein Einkavitäten-Werkzeug mit einem Heißkanal eingesetzt. Die Heißkanaltechnik wird zur Herstellung der Mikroformteile eingesetzt, um das Formteil angusslos zu fertigen. Dadurch wird der Materialverlust reduziert. Mit Hilfe von

austauschbaren Werkzeugseinsätzen können Formteile mit verschiedenen Schussvolumen produziert werden. Um eine hohe Einspritzgenauigkeit und Reproduzierbarkeit zu gewährleisten, wird eine vollelektrische Spritzgießmaschine (Krass-Maffei EX80) verwendet, da die vollelektrischen Maschinen hohe Bewegungspräzision und Dynamik ermöglichen können. Bei den Spritzgießversuchen werden Mikrobauteile (siehe Abb. 55) mit Schussvolumen 30 mm^3 und 100 mm^3 aus Polypropylen produziert.

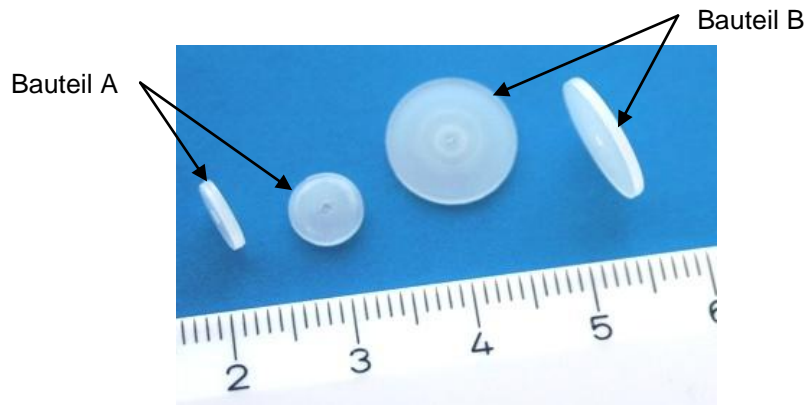


Abb. 55 **Mikrobauteile mit einem Schussvolumen von 30 mm^3 und 100 mm^3**

Das Schussvolumen (angusslos) des Bauteils A beträgt 30 mm^3 . Das Bauteil B besitzt ein Schussvolumen von 100 mm^3 .

Für den theoretischen Dosierhub h_{theo} gilt:

$$h_{theo} = \frac{V_{Schuss}}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad \text{Gl. (4.12)}$$

wobei V_{Schuss} das Schussvolumen und D der Durchmesser des Einspritzelements ist.

Für einen Einspritzkolben mit 6,5 mm Durchmesser und ein Schussvolumen von 30 mm^3 ergibt sich folgender theoretischer Dosierhub h_{theo} :

$$h_{theo} = \frac{30 \text{ mm}^3}{\pi \cdot \left(\frac{6,5 \text{ mm}}{2}\right)^2} = 0,905 \text{ mm}$$

Mit der gleichen Methode kann der theoretische Dosierhub für Schussvolumen von 100 mm^3 ermittelt werden (siehe Tab. 8).

Schussvolumen	Theoretischer Dosierhub mit 6,5mm-Kolben
30 mm ³	0,905 mm
100 mm ³	3,014 mm

Tab. 8 Theoretischen Dosierhübe für zwei Schussvolumen

Bei den Spritzgießversuchen wurde jedoch ein größerer Dosierhub als der berechnete theoretische Dosierhub benötigt. Nach einer Prozessoptimierung beträgt der tatsächliche Dosierhub 2 mm. Dies ist auf die Bewegung der Rückstromsperre und die Kompression der Schmelze zurückzuführen. Die Rückstromsperre benötigt einen Verfahrweg, um sich schließen zu können. Der Verfahrweg beträgt laut Konstruktion der Mikro-Spritzeinheit 0,6 mm. Des Weiteren muss ein ausreichender Schmelzedruck aufgebaut werden, damit die Schmelze gegen den Fließwiderstand in die Kavität eingespritzt werden kann. Dies führt zur Kompression der Kunststoffschmelze, was wiederum einen größeren Dosierhub als den theoretischen zur Folge hat.

Zur Ermittlung des realen Dosierhubs beim Mikrospritzgießen wird eine andere Methode verwendet als bei der Produktion von Standardbauteilen, bei denen in der Regel der Dosierhub schrittweise erhöht wird, bis eine nahezu komplette Formfüllung erreicht wird. Danach werden Nachdruck und Nachdruckzeit eingestellt. Mit dieser Methode werden die Überfüllung der Werkzeugkavität und eine daraus resultierende Schädigung des Werkzeugs vermieden. Jedoch ist diese Standardmethode für die Ermittlung des benötigten Dosierhubs bei der Mikro-Spritzeinheit nicht geeignet.

In diesem Fall muss die Ermittlung des Dosierhubs zügig durchgeführt werden, da ansonsten die kritische Schmelzeverweilzeit überschritten und die Kunststoffschmelze thermisch geschädigt wird. Dadurch werden die Formteile unbrauchbar. Aufgrund der sehr kleinen Werkzeugkavität ist auch die Entformung der Formteile bei unvollständiger Formfüllung problematisch. Das Formteil muss manuell entformt werden, was wiederum die Verweilzeit erhöht. Beginnt man nun mit einem kleineren als dem theoretischen Dosierhub, so ist die Kavität nicht vollständig gefüllt und eine manuelle Entformung ist erforderlich. Wiederholt man diese Vorgänge mehrmals, so wird die kritische Verweilzeit überschritten. Die sich im Plastifizierzylinder befindliche Schmelze muss entfernt werden, damit frische Kunststoffschmelze aufbereitet werden kann. Deshalb sollte bei der Ermittlung des Dosierhubs bei diesem Versuch mit einem deutlich größeren als dem theoretischen Dosierhub begonnen werden, sodass die Kavität vollständig gefüllt wird. Dadurch wird eine problemlose Entformung ermöglicht. Da das Verhältnis von der einzuspritzenden Schmelzemenge zur sich

im Heißkanal befindlichen Schmelzemenge sehr klein ist, ist die leichte Überfüllung der Kavität bei dem verwendeten Werkzeug nicht kritisch. Die Versuche zeigen, dass ein erhöhter Dosierhub eine Steigerung des maximalen Einspritzdrucks von 50 bis 100 bar verursacht, wodurch die Schmelze etwa stärker komprimiert wird. Jedoch ist diese Vorgehensweise nicht für die Herstellung der mikrostrukturierten Bauteile geeignet, da die feine Mikrostruktur der Kavität bei hohem Druck beschädigt werden kann. Ist eine vollständige Formfüllung mit einem absichtlich erhöhten Dosierhub erreicht, wird der Dosierhub Schritt für Schritt reduziert, bis der optimale Dosierhub eingestellt ist.

Ist der benötigte Dosierhub ermittelt, werden Nachdruck und Nachdruckzeit eingestellt. Die beiden Parameter werden so justiert, dass ein maximales Bauteilgewicht erreicht wird. Hierzu wird eine Analysewaage eingesetzt. Da das Bauteilgewicht im Mikrogramm-Bereich liegt, ist eine Analysewaage mit hoher Genauigkeit (min. 0,1 mg) erforderlich. Die Nachdruckzeit soll nur so lange wie notwendig sein, da sonst die Verweilzeit wiederum unnötig verlängert wird. Im Anschluss an die Füllstudie soll die Werkzeugbewegung optimiert werden. Im Vordergrund stehen dabei die Schließ- und Öffnungszeit des Werkzeugs, da diese die Zykluszeit maßgeblich beeinflussen. Um Zeit zu sparen, wird der Öffnungshub des Werkzeugs reduziert und zugleich die Geschwindigkeit der Werkzeugbewegung erhöht.

Die Spritzgießversuche zeigen, dass keine Anpassung bzw. Änderung der Maschinensteuerung nötig ist, um die Mikrobauteile zu fertigen. Obwohl sich das Funktionsprinzip der Mikro-Spritzeinheit von einer Standardspritzeinheit unterscheidet, kann die Maschine wie gewohnt bedient werden. Es muss lediglich der Schneckendurchmesser eingestellt werden, um den korrekten Massedruck zu ermitteln. Massedruck oder Staudruck ist der Schmelzedruck, der direkt auf das Einspritzelement, Schnecke oder Einspritzkolben, wirkt. Obwohl bei der Mikro-Spritzeinheit eine Schnecke mit einem Durchmesser von 20 mm verwendet wird, wird hier der Schneckendurchmesser in der Schneckencodierung mit dem Wert 6,5 mm eingegeben, da der Massedruck auf den Einspritzkolben mit einem Durchmesser von 6,5 mm wirkt.

Durch die Prozessoptimierung kann die Zykluszeit auf 4,4 s reduziert werden, was zur Reduzierung der Schmelzeverweilzeit beiträgt. Der Prozess läuft vollautomatisch und stabil, die Mikrobauteile können einwandfrei entformt werden. Die Prozessparameter sowie das Bauteilgewicht weisen dabei nur sehr geringe Streuungen auf. Zur Beurteilung der Gewichtsschwankung wurden fünfzig Proben vermessen, die Abweichung der Bauteilgewichte beträgt nur 0,13 %. Die Bauteilgewichte sind in Abb. 56 dargestellt. Auch die

Herstellung der Bauteile B mit einem Schussvolumen von 100 mm^3 konnte erfolgreich realisiert werden. Die Gewichtsverteilung des Bauteils B befindet sich in Anhang E.

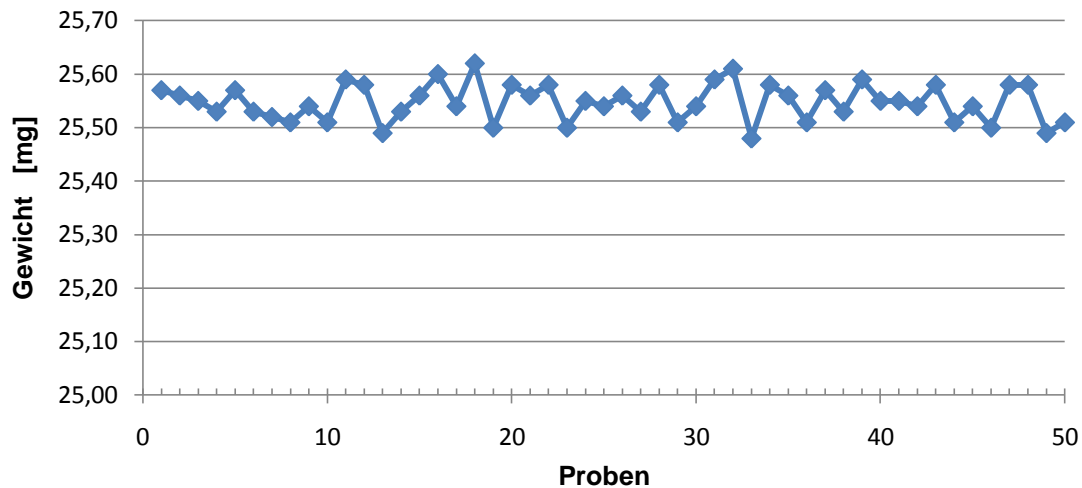
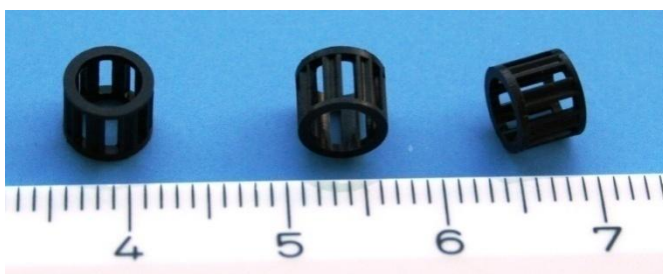


Abb. 56 Gewichtsverteilung des Bauteils A

Als industriell eingesetzte Testbauteile wurden Nadellagerkäfige (siehe Abb. 57) mit Hilfe der Mikro-Spritzeinheit hergestellt. Das mittlere Bauteilgewicht beträgt dabei 40,05 mg. Die Versuchsreihe weist eine stabile Produktion von Nadellagerkäfigen auf. Um gleiche Randbedingungen wie bei der Massenfertigung in der Industrie zu realisieren, wurde auch in dieser Versuchsreihe Regranulat verwendet. Regranulate sind Granulate, die zum Recycling der Kunststoffe wieder aufgeschmolzen und anschließend granuliert werden, was jedoch die Prozessstabilität beeinträchtigen kann.



Produkt: Nadellagerkäfig
 Material: PA12 GF 25 % mit Regranulat
 Mittleres Bauteilgewicht: 40,05 mg
 Gewichtsschwankung: 0,11 %

Abb. 57 Nadellagerkäfig aus PA12 (Glasfaser 25 %) mit einem mittleren Bauteilgewicht von 40,05 mg

Der Käfig wird zur Sicherung der Position der Nadeln im Nadellager verwendet. Um eine hohe Festigkeit zu erreichen, wird ein Kunststoff mit einem Glasfaseranteil von 25 % verwendet.

Trotz der Zumischung des Regranulats kann eine sehr hohe Prozessstabilität mit der Mikro-Spritzeinheit zur Herstellung der Nadellagerkäfige erzielt werden. Die Schwankungen der

Prozessparameter sowie des Bauteilgewichts werden in Tab. 9 dargestellt. Dabei werden 120 Proben hergestellt und vermessen. Aufgrund der Zumischung der Regranulate ist die Stabilität der Prozessparameter beeinträchtigt, insbesondere beträgt die Schwankung der Plastifizierzeit 7,67 %. Die Streuung des Bauteilgewichts ist dadurch jedoch kaum beeinflusst und beträgt nur 0,11 %. Die Gewichtsverteilung des Nadellagerkäfigs ist in Abb. 58 dargestellt.

Nadellagerkäfig	Max. Massedruck	Massepolster	Plastifizierzeit	Gewicht
Schwankung	5.58 %	4.28 %	7.67 %	0,11 %

Tab. 9 **Schwankung wichtiger Prozessparameter und des Bauteilgewichts bei der Herstellung der Nadellagerkäfige**

Die Schwankungen der Prozessparameter wurden durch die Zumischung der Regranulate leicht beeinträchtigt. Das Bauteilgewicht ist dadurch jedoch kaum beeinflusst und weist nur eine sehr geringe Streuung auf.

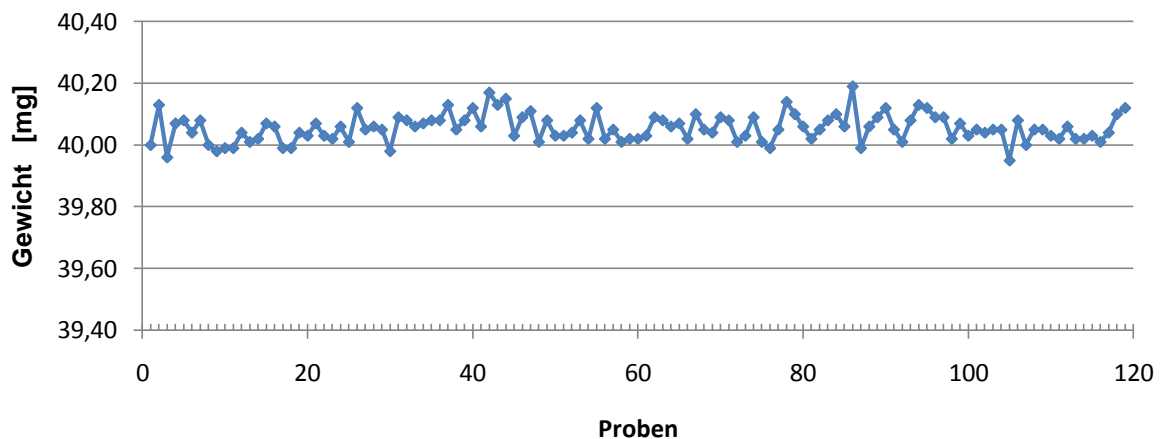


Abb. 58 **Gewichtsverteilung des Nadellagerkäfiges**



Produkt: Spannbolzenführung
 Material: Polypropylen (512MN10 Sabcic)
 Mittleres Bauteilgewicht: 43,52 mg
 Gewichtsschwankung: 0,16 %

Abb. 59 **Spannbolzenführung mit einem mittleren Bauteilgewicht von 43,52 mg**

Die Spannbolzenführung für eine Einstechhilfe wird in der LifeScience Branche eingesetzt.

Auf der Hausmesse der Krauss-Maffei Technologies GmbH im Mai 2009 wurde die Spannbolzenführung (siehe Abb. 59) zu Demonstrationszwecken hergestellt. Das Formteilgewicht beträgt 43,52 mg. Das Werkzeug ist mit einem Heißkanal ausgestattet, damit das Formteil angusslos ist. Der verarbeitete Kunststoff ist Polypropylen.

Die Schwankungen der Prozessparameter sowie des Bauteilgewichts werden in Tab. 10 dargestellt. Die Gewichtsverteilung der Spannbolzenführung befindet sich in Anhang E. Die Anzahl der Proben beträgt fünfzig. Im Vergleich zur Herstellung der Nadellagerkäfige kann die Produktion der Spannbolzenführungen geringere Prozessschwankungen aufweisen. Dies ist auf eine bessere Werkzeugtechnik sowie darauf zurückzuführen, dass keine Regranulate zugemischt wurden.

Spannbolzenführung	Max. Massedruck	Massepolster	Plastifizierzeit	Gewicht
Schwankung	2,40 %	1,43 %	2,03 %	0,16 %

Tab. 10 **Schwankungen der Prozessparameter und des Bauteilgewichts der Spannbolzenführung**

Die Produktion der Spannbolzenführung weist sehr geringe Schwankung auf. Die Streuung des Bauteilgewichts beträgt 0,16 %.

Durch die Produktion vier verschiedener Mikrobauteile kann gezeigt werden, dass die Mikro-Spritzeinheit eine hohe Reproduzierbarkeit realisieren kann. Die Streuung des Bauteilgewichts ist sehr gering. Die Mikro-Spritzeinheit kann direkt anstelle einer Standard-spritzeinheit in passende Spritzgießmaschinen eingebaut werden. Es ist keine Anpassung bzw. Änderung der Maschinensteuerung erforderlich. Der Maschinenbediener kann die Maschine wie gewohnt ohne zusätzliche Schulung bedienen.

Anschließend soll ein Vergleich der Gewichtsschwankung der mit der Mikro-Spritzeinheit hergestellten Bauteile mit Literaturwerten erfolgen. In Tab. 11 sind die Gewichtsschwankung, das mittlere Bauteilgewicht, der Umfang der Stichproben, die Maschinenart und die Quelle eingetragen. Die Ergebnisse stammen aus sowohl Produktbroschüren von Spritzgießmaschinenherstellern als auch Forschungsberichten. Die Bauteile wurden mit modernen Spritzgießmaschinen hergestellt. Daher stellen die Ergebnisse den aktuellen Stand der Maschinenteknik dar. Es ist nicht überraschend, dass die Angaben aus den Veröffentlichungen von Maschinenherstellern generell geringer sind als die Ergebnisse aus Forschungsberichten.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Gewichtsschwankungen im Bereich von 0,0094 % bis 0,19 % liegen. Sowohl hydraulische Maschinen als auch elektrische Maschinen können sehr geringe Schwankungen des Bauteilgewichts aufweisen. Ein eindeutiger Unterschied hinsichtlich der Reproduzierbarkeit des Spritzgießprozesses zwischen hydraulischer und elektrischer Maschinenart ist in Tab. 11 nicht zu erkennen. Für Hybrid-Maschinen wurde nur eine Quelle, die aus einem Forschungsbericht stammt, gefunden, deren Schwankung den grössten Wert in den Ergebnissen aufweist. Dies bedeutet jedoch nicht, dass hybride Maschinen generell schlechter sind als hydraulische und elektrische Maschinen.

Maschinenart	Umfang der Stichproben	Mittleres Bauteilgewicht	Gewichtsschwankung	Quelle
hydraulisch	100	21,59 g	0,013 %	[105]
hydraulisch	nicht bekannt	16 g	0,065 %	[23]
hydraulisch	50	10 g	0,18 %	[7]
hydraulisch	50	10 g	0,027 %	[7]
hydraulisch	50	10 g	0,012 %	[7]
elektrisch	50	1,135 g	0,05 %	[108]
elektrisch	200	51,9 g	0,115 %	[102]
elektrisch	50	16,17 g	0,0094 %	[98]
elektrisch	40	237,9 g	0,04 %	[99]
elektrisch	50	10 g	0,014 %	[7]
elektrisch	93	4,467 g	0,02 %	[103]
hybrid	nicht bekannt	15,7 g	0,19 %	[37]

Tab. 11 **Vergleich von Gewichtsschwankung verschiedener Messreihen**

Die Schwankungen des Bauteilgewichts aus verschiedenen Quellen liegen im Bereich von 0,0094 % bis 0,19 %.

Die Bauteile, die mit der Mikro-Spritzeinheit hergestellt wurden, weisen Gewichtsschwankung von 0,11 % bis 0,16 % auf. Sie liegen damit im unteren Bereich der Ergebnisse, die in Tab. 11 dargestellt sind. Es ist zu erwarten, dass die Reproduzierbarkeit des Mikrospritzgießens etwas schlechter als das Spritzgießen von Standardbauteilen (Gewicht > 1 g) ist.

Die in dieser Arbeit entwickelte Mikro-Spritzeinheit weist eine mit modernen Maschinen vergleichbare hohe Reproduzierbarkeit auf.

4.5 Thermische Optimierung der Spritzeinheit

Die Spritzgießversuche zeigen, dass die Ist-Temperatur der Einzugszone die eingestellte Soll-Temperatur bei hohen Verarbeitungstemperaturen nicht erreichen kann. Abb. 60 zeigt die Position der Heizbänder und der Temperaturfühler der Mikro-Spritzeinheit.

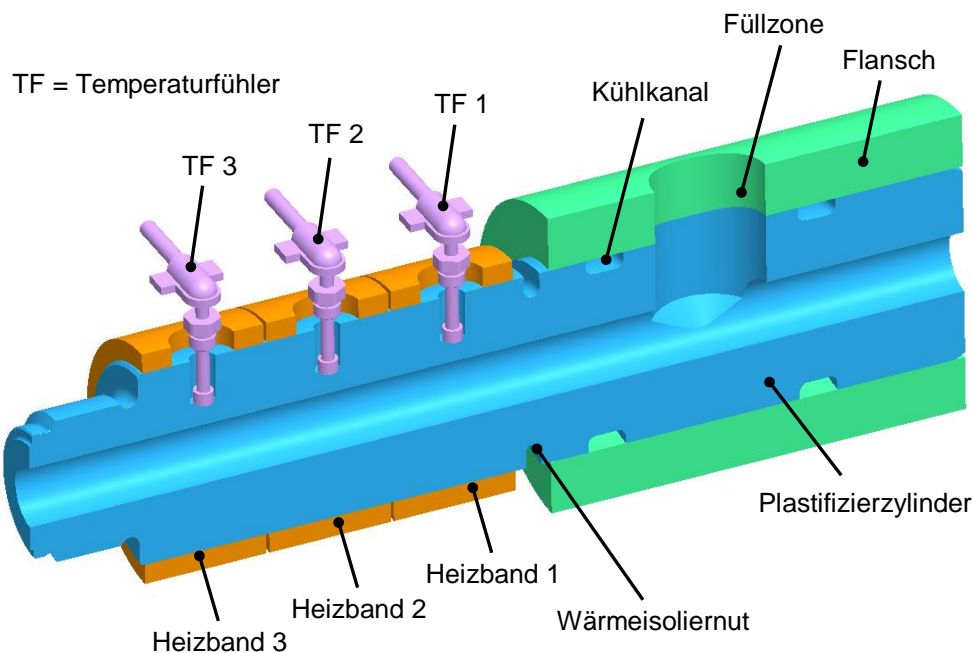


Abb. 60 Schematische Darstellung der Mikro-Spritzeinheit

Die Spritzeinheit besteht aus dem Flansch, dem Plastifizierzylinder, der Schnecke (nicht dargestellt), den Heizbändern und den Temperaturfühlern.

Thermoelemente erfassen die Ist-Temperaturen der verschiedenen Heizzonen des Zylinders. Sie sind preiswert, einfach in Aufbau und Funktion, vielseitig einsetzbar, robust und kompakt. Der Flansch wird auf den Plastifizierzylinder aufgespresst und besitzt einen Kühlkanal. Die starke Übermaßpassung sorgt dabei für die Dichtung des Kühlwasserkanals. Es ist erforderlich, den Trichterbereich zu kühlen, da ansonsten Kunststoffgranulate bereits im Einzugsloch aufgeschmolzen würden und es zu einer Verstopfung am Materialeinzug kommen kann. Dies ist jedoch problematisch, da einerseits die Füllzone gekühlt werden soll, andererseits die Ist-Temperatur der Einzugszone auch eine hohe Temperatur für die Verarbeitung hochtemperaturbeständiger Kunststoffe erreichen soll. Da das Heizband 1 sehr nah an dem Kühlkanal liegt, besteht ein intensiver Wärmeaustausch zwischen diesen. Die

Wärmeisoliernut (siehe Abb. 60) dient dazu, den Wärmeaustausch und den Energieverbrauch zu reduzieren. Trotz dieser Maßnahme kann die Soll-Temperatur der Einzugszone nur bedingt erreicht werden.

Zur Untersuchung der Ist-Temperaturen werden die Soll-Temperaturen nach Tab. 12 eingestellt. Während die Ist-Temperaturen der Heizzonen 2 und 3 problemlos die Sollwerte erreichen, besitzt die Einzugszone lediglich eine Ist-Temperatur von 245 °C, also 35 °C niedriger als der Sollwert.

	Heizzone 3 (Meteringzone)	Heizzone 2 (Kompressionszone)	Heizzone 1 (Einzugszone)
Soll-Temperatur	320	300	280
Erreichbare Ist-Temperatur	320	300	245

Tab. 12 **Vergleich der Soll- und Ist-Temperaturen der verschiedenen Heizzonen**

Es ist zu erkennen, dass die Ist-Temperatur der Heizzone 1 (Einzugszone) nicht die Soll-Temperatur von 280 °C erreicht.

Um die Soll-Temperatur der Einzugszone zu erreichen, ist es erforderlich, die Spritzeinheit thermisch zu optimieren. Ein Lösungsansatz dafür ist die Erhöhung der Heizleistung des Heizbands 1. Ein wichtiger Kennwert dabei ist die Leistungsdichte der Heizbänder, die vom Hersteller vorgegeben ist. Diese gibt die Leistung pro Flächeneinheit an. Mit größerer Leistungsdichte des Heizbands kann die erreichbare Temperatur der Heizzone 1 erhöht werden. Die Leistungsdichte des beim Prototyp eingesetzten Heizbands beträgt 6,7 W/cm². Gemäß dem Vorschlag vom Industriepartner könnten Heizbänder mit einer Leistungsdichte von 11 W/cm² eingesetzt werden. Bevor neue Heizbänder auf den Zylinder installiert werden, ist es sinnvoll, die erreichbare Temperatur der Heizzone 1 mit den neuen Heizbändern (11 W/cm²) mittels FEM zu untersuchen, um dadurch Zeit und Kosten zu sparen. Die folgenden Simulationsberechnungen wurden mit ANSYS Workbench 11 durchgeführt.

In Abb. 61 ist das Simulationsmodell zur Berechnung des thermischen Verhaltens der Mikrospritzeinheit dargestellt. Um den Rechenaufwand zu minimieren, wurde eine halbe rotationssymmetrische Zylindergeometrie betrachtet. Eine thermisch-stationäre Simulation wird durchgeführt. Das bedeutet, dass die Berechnungsergebnisse dem Zustand entsprechen, bei dem sich das Simulationsmodell thermisch im Gleichgewicht befindet. Bei der Festlegung der Randbedingungen der Konvektionen werden die von ANSYS für diesen Anwendungsfall vorgeschlagenen Wärmeübertragungskoeffizienten in der Simulation eingegeben.

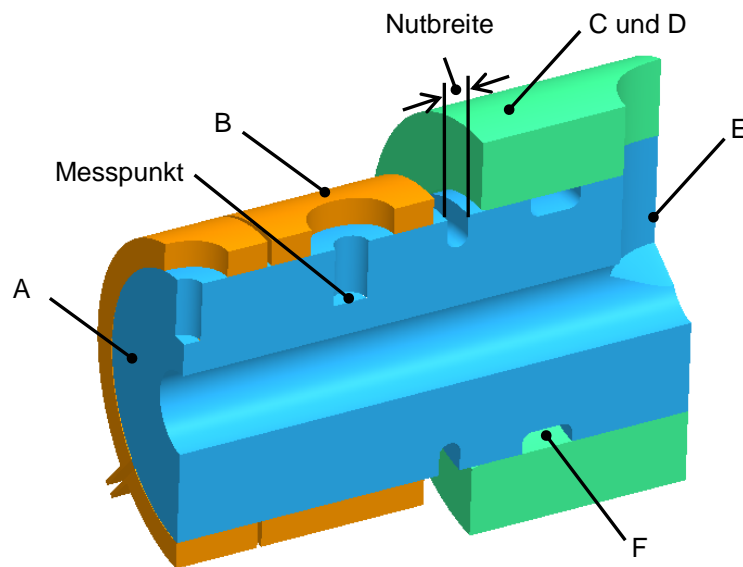


Abb. 61 **Simulationsmodell zur Berechnung des thermischen Verhaltens**

Der Messpunkt entspricht der Sensorposition des Temperaturfühlers 1 aus Abb. 60.

Für die Simulation werden folgende Randbedingungen festgelegt (siehe dazu auch Abb. 61):

- A: Isotherme Fläche mit einer Temperatur von 300 °C
- B: Heizleistung der Heizbänder: 225 W
- C: Konvektion an allen Außenflächen, Umgebungstemperatur: 22 °C, Wärmeübertragungskoeffizient: $8,3e - 6 \frac{W}{mm^2 \cdot ^\circ C}$
- D: Strahlung an allen Außenflächen, Umgebungstemperatur: 22 °C, Emissionsvermögen: 1
- E: Isotherme Fläche mit einer Temperatur von 50 °C
- F: Konvektion durch das Kühlsystem, Wassertemperatur: 22 °C, Wärmeübertragungskoeffizient: $1,2e - 3 \frac{W}{mm^2 \cdot ^\circ C}$

Zur Verifikation der Simulation wird zunächst eine Berechnung mit der Leistungsdichte $6,7 \text{ W/cm}^2$ durchgeführt. Die Berechnungsergebnisse sind in Abb. 62 oben dargestellt. Die berechnete Temperatur des Messpunkts beträgt 247,13 °C und entspricht näherungsweise der tatsächlich gemessenen Ist-Temperatur (siehe Tab. 12). Die Gültigkeit der FEM-Simulation ist damit verifiziert. Die Berechnung der Ist-Temperatur mit der erhöhten Leistungsdichte (11 W/cm^2) zeigt im Messpunkt eine Temperatur von 267,19 °C an (siehe Abb. 62 unten). Die Soll-Temperatur von 280 °C wird ebenfalls nicht erreicht. Daher ist die Erhöhung der Ist-Temperatur nur durch einen Wechsel zu einem leistungsfähigeren Heizelement nicht möglich.

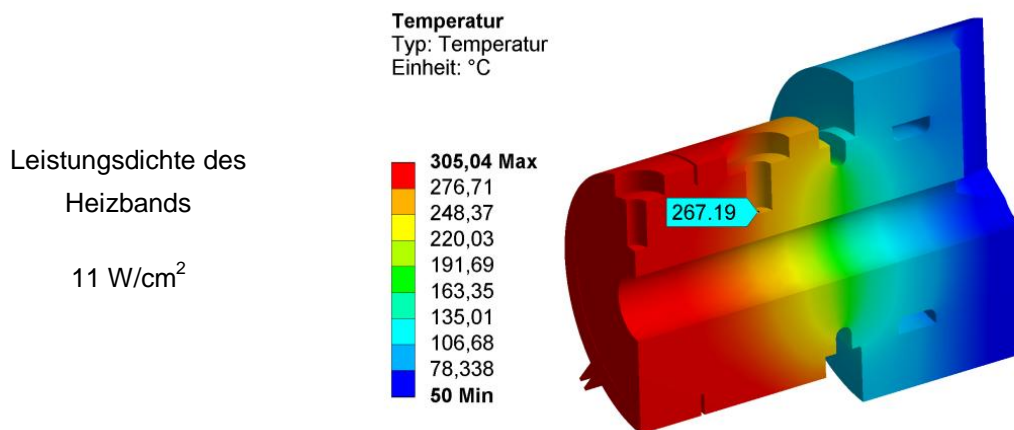
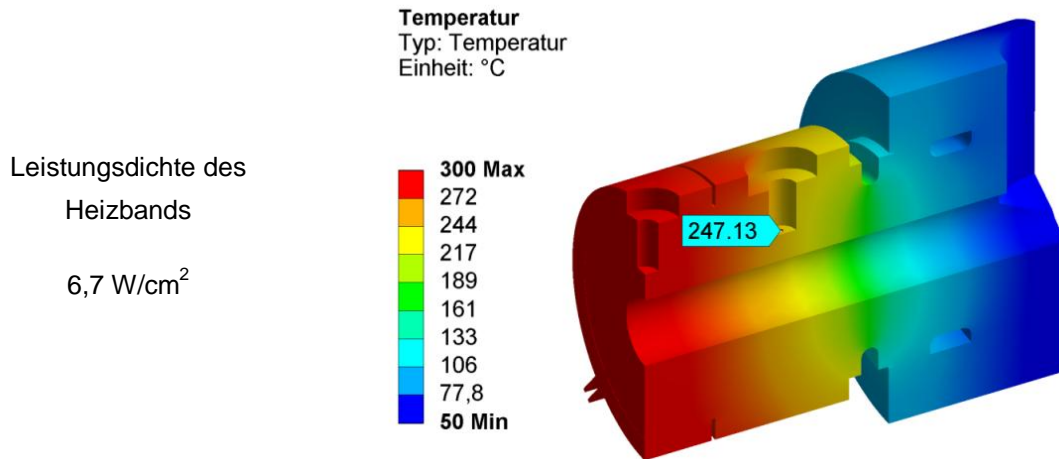


Abb. 62 **Simulationsergebnisse bei zwei unterschiedlichen Leistungsdichte der Heizbänder**

Oben: Leistungsdichte = 6,7 W/cm². Die berechnete Ist-Temperatur des Messpunkts beträgt 247,13 °C, welche ungefähr der tatsächlich gemessenen Ist-Temperatur entspricht (vgl. Tab. 12).

Unten: Leistungsdichte = 11 W/cm². Die berechnete Temperatur beträgt am Messpunkt 267,19 °C.

Ein weiterer Ansatz zur Erhöhung der Ist-Temperatur der Einzugszone ist die Vergrößerung der Breite und der Tiefe der Wärmeisoliernut. Durch diese Maßnahme kann der Wärmeaustausch zwischen der Einzugszone und der Füllzone gedämpft werden. Da die Spritzeinheit eine hohe Düsenanlagekraft (bis zu 40 kN) aufnehmen soll, ist eine Vergrößerung der Nuttiefe jedoch nicht vorgesehen. Die Düsenanlagekraft wird während des Einspritzens aufgebaut, dabei wird die Düse an die Angussbuchse des Werkzeugs gepresst, um eine Leckage zu verhindern.

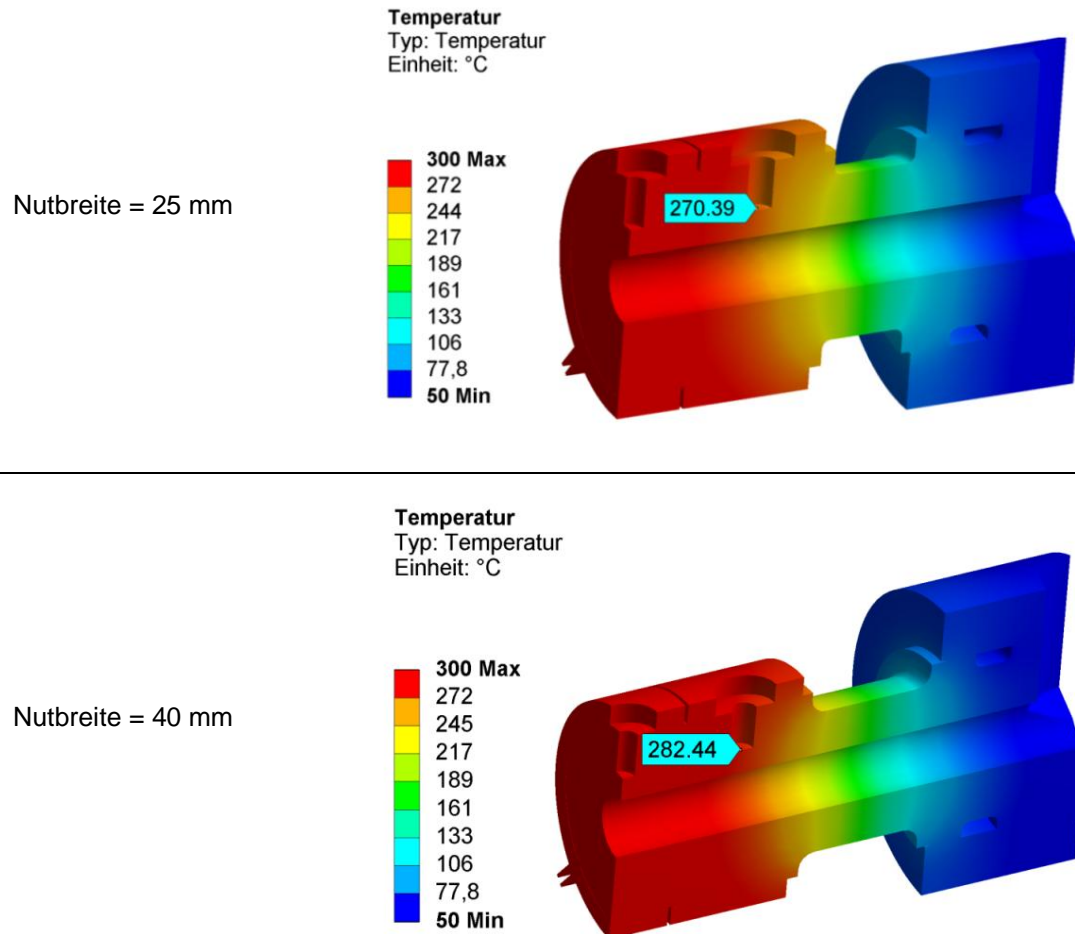


Abb. 63 **Simulationsergebnisse von verschiedenen Nutbreiten**

Oben: Nutbreite = 25 mm. Die berechnete Temperatur beträgt am Messpunkt 270,39 °C.

Unten: Nutbreite = 40 mm. Mit der vergrößerten Nutbreite kann die Zieltemperatur von 280 °C erreicht werden.

Die tatsächliche Nutbreite des Prototyps beträgt 5 mm und wird in der Simulation schrittweise erhöht, bis die Temperatur des Messpunkts 280 °C erreicht. Die Berechnung der Ist-Temperatur bei Vergrößerung der Nut auf 25 mm zeigt im Messpunkt eine Temperatur von 270,30 °C an (siehe Abb. 63 oben). Um die Zieltemperatur von 280 °C zu erreichen, ist eine weitere Vergrößerung der Nut auf 40 mm notwendig (siehe Abb. 63 unten). Die experimentellen Versuche zeigen, dass die Ist-Temperatur der Einzugszone bei einer Nutbreite von 40 mm die gewünschte Temperatur erreicht.

4.6 Fazit

In Rahmen dieser Arbeit wurde eine an eine Standardspritzgießmaschine adaptierbare Spritzeinheit entwickelt, die zur Herstellung von Mikrobauteilen geeignet ist. Dabei sollen keine Änderungen an der Maschinenkonstruktion und der Steuerung vorgenommen werden.

Die Konzeptentwicklung geht vom Prinzip "Schneckenvorplastifizierung und Kolbeneinspritzung" aus. Mit der Schneckenplastifizierung kann eine hohe Schmelzeshomogenität gewährleistet werden. Die Kolbeneinspritzung sorgt für eine hohe Einspritzgenauigkeit, da der Kolben als Einspritzelement deutlich geringere Durchmesser gegenüber einer Schnecke aufweist. Um die Adaptierbarkeit der Mikro-Spritzeinheit auf Standardmaschinen zu realisieren, ist es notwendig, den Antrieb und die Steuerung des Kolbens in der Maschine ohne zusätzliche Änderungen integrieren zu können. Hierzu wurden mehrere Lösungskonzepte mit konischen sowie zylindrischen Schnecken entwickelt. Da Mikro-Spritzeinheiten mit konischen Schnecken einen höheren Bauaufwand aufweisen, werden die Konzepte mit zylindrischen Schnecken verwendet.

Die weiteren Entwicklungsschwerpunkte lagen in der Konstruktion der Rückstromsperre und der Plastifizierschnecke. Ein klotzförmiges Sperrelement wurde entwickelt, das im Einspritzkolben integriert ist. Durch Einsatz des neuartigen Sperrelements konnte der Durchmesser des Einspritzkolbens auf 6,5 mm reduziert werden. Dies ermöglicht eine sehr hohe Einspritzgenauigkeit. Bei der Konstruktion der Schnecke musste ein Kompromiss zwischen der mechanischen Festigkeit, dem Kanalvolumen und gutem Einzugsverhalten getroffen werden. Ein Prototyp der Mikro-Spritzeinheit wurde gebaut.

Aufgrund der sehr kurzen Ausführung der Schnecke wurden zuerst Plastifizierungsversuche durchgeführt, um deren Funktionalität zu überprüfen. Die Auswahl der Versuchsmaterialien bezieht sich dabei auf ein möglichst breites Anwendungsspektrum. Die Versuche lieferten sehr gute Ergebnisse: die Granulate können problemlos eingezogen und mit hoher Homogenität plastifiziert werden. Es wurde keine Blasenbildung festgestellt und der Durchsatz der Mikro-Spritzeinheit ist für Mikrospritzgießanwendungen ausreichend.

Im Anschluss an die erfolgreichen Plastifizierungsversuche wurden Einspritzversuche durchgeführt. Um die hohe Anforderung an die Präzision zu erfüllen, wurde hierzu eine vollelektrische Maschine verwendet. Der Einbau der Mikro-Spritzeinheit kann, wie bei einer Standardspritzeinheit, routinemäßig durchgeführt werden. Nach Eingabe des Schnecken durchmessers in die Maschinensteuerung steht die Maschine für die Produktion zur Verfügung. Die Produktion diverser Mikrobauteile zeigte eine sehr hohe Reproduzierbarkeit.

Die Streuungen der Bauteilgewichte bewegen sich im Bereich von 0,11 bis 0,16 %. Ein Vergleich der Gewichtsschwankung der mit der Mikro-Spritzeinheit hergestellten Bauteile mit Literaturwerten zeigt, dass die Mikro-Spritzeinheit eine mit modernen Standardmaschinen vergleichbare hohe Reproduzierbarkeit aufweist. Die Entwicklung der Mikro-Spritzeinheit war somit erfolgreich.

Bei Versuchen mit dem Prototyp wurde festgestellt, dass die Ist-Temperatur der Einzugszone nicht die erforderliche Temperatur erreicht. Um dies zu verbessern, wurde die Breite der Wärmeisoliernut vergrößert. Die Wärmeisoliernut mindert den Wärmeaustausch zwischen der Heizzone 1 und dem Kühlkanal. Die Berechnung der erforderlichen Nutbreite erfolgte durch eine FEM-Simulation. Die Nutbreite wurde auf 40 mm spezifiziert, was die experimentellen Versuche und die Simulationsergebnisse bestätigen.

5 Zusammenfassung

Aufgrund der ständig wachsenden Herausforderungen sind Spritzgießverarbeiter gezwungen, die Reproduzierbarkeit des Spritzgießprozesses kontinuierlich zu steigern. Entsprechend müssen Maschinenhersteller die Maschinenteknik ständig verbessern, um den Marktbedarf zu erfüllen. Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei Ansätze zur Erhöhung der Reproduzierbarkeit des Spritzgießprozesses dargestellt:

- Plastifizierung mit konstanter Dissipationsenergie
- Neues adaptierbares Plastifizierkonzept für das Mikrospritzgießen.

Das Fließverhalten und die Dichte der Kunststoffschmelze sind stark von der Masstemperatur abhängig. Um die Reproduzierbarkeit des Prozesses zu erhöhen, soll die Schwankung der Masstemperatur minimiert werden. Die Temperaturerhöhung ist dabei auf die Enthalpieerhöhung zurückzuführen. Bei der konventionellen Plastifizierung werden die Drehzahl und der Staudruck separat geregelt. Die Versuche zeigen, dass der Hauptanteil der gesamten Energiezufuhr - die Dissipationsenergie - über die Zyklen stark schwanken kann. Es besteht somit Entwicklungsbedarf, die Plastifizierung mit einer konstanten Dissipationsenergie zu realisieren.

Um die Dissipationsenergie zu regeln, soll zuerst der Ist-Zustand des Spritzgießprozesses über entsprechende Messvorrichtung zum Controller (Laptop) geführt werden. Der Controller verarbeitet die Daten und leitet die Korrektur (Stellgrößen) an die Maschine zurück. Um den Regelungskreis zu schließen, werden die erforderlichen Versuchseinrichtungen vorbereitet. Die Kommunikation zwischen Maschine und PC erfolgt durch AD- und DA-Wandler. Zur Erfassung des Schneckendrehmoments wird ein zusätzlicher Sensor installiert und anschließend das Regelungskonzept ausgelegt. Die Schneckenantriebsleistung und die Plastifizierzeit werden separat nach Referenzen geregelt. Die Referenzkurven können nach dem bereits stabil laufenden Prozess mit Hilfe der polynomialen Regressionsanalyse ermittelt werden. Erwähnenswert dabei ist, dass die Plastifizierzeit durch die Regelung der Schneckenrücklaufgeschwindigkeit konstant gehalten wird. Zur Bestimmung der Stellgrößen (Drehzahl und Staudruck) werden die Regelparameter benötigt, welche durch einfache Experimente mit der Spritzgießmaschine ermittelt werden.

Erste Regelungsuntersuchungen zeigen, dass die Ist-Schneckenantriebsleistung und die Ist-Plastifizierzeit auf die Sollwerte geregelt werden können. Die Schwankung der Plastifizierzeit kann durch die Regelung im Vergleich zum Standardprozess reduziert werden. Nach der Verifikation der Regelungsqualität werden weitere Prozessuntersuchungen durchgeführt. Ziel

ist es, zu beurteilen, ob die Regelung der Dissipationsenergie zur Erhöhung der Prozessreproduzierbarkeit beitragen kann. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Schwankungen der wichtigen Prozessparameter und die Gewichtstreuung des Bauteils mit Hilfe der Regelung deutlich geringer sind. Daher ist die Erhöhung der Reproduzierbarkeit durch Konstanthaltung der Dissipationsenergie erreicht worden.

Ein weiterer Entwicklungsbedarf besteht im Bereich des Mikrospritzgießens. Aufgrund des großen Schneckendurchmessers sind Standardmaschinen nicht für das Mikrospritzgießen geeignet. Auf dem Markt werden zwar Mikro-Spritzgießmaschinen angeboten, jedoch sind sie oft nur für die Fertigung von Mikrobauteilen geeignet. Dies führt meist zu einer neuen Investition und geringer Maschinenauslastung für den Spritzgießverarbeiter. In dieser Arbeit wird eine Mikro-Spritzeinheit entwickelt, die auf eine Standardmaschine adaptiert werden kann. Die Herstellung der Mikrobauteile kann durch einen routinemäßigen Einbau der Mikro-Spritzeinheit auf eine Standardmaschine realisiert werden.

Die Entwicklung der Mikro-Spritzeinheit geht vom Prinzip "Schneckenvorplastifizierung und Kolbeneinspritzung" aus. Die Schneckenvorplastifizierung gewährleistet eine hohe Schmelzhomogenität. Mit dem Kolben kann die Dosiergenauigkeit erheblich erhöht werden. Hierzu wurden mehrere Konzepte entwickelt. Während die Konzepte, die mit einer konischen Schnecke ausgestattet sind, einen hohen Bauaufwand aufweisen, ermöglicht die zylindrische Schnecke eine kompakte Bau- und zuverlässige Arbeitsweise. Nach der Auswahl der Konzepte und der Detailkonstruktion wurde ein Prototyp gebaut. Versuche mit dem Prototyp liefern sehr gute Ergebnisse. Die Mikro-Spritzeinheit kann von der Maschine adaptiert werden und fordert keine zusätzlichen Änderungen an der Maschinensteuerung. Die Mikro-Spritzeinheit kann alle gängigen Werkstoffe problemlos verarbeiten. Mikrobauteile mit einem Volumen bis 30 mm^3 können mit hoher Reproduzierbarkeit (Gewichtstreuung bis zu 0,11 %) hergestellt werden.

Literatur

- [1] Al-Haj Mustafa, M., Modellbasierte Ansätze zur Qualitätsregelung beim Kunststoffspritzgießen, Lehrstuhl für Konstruktionslehre und Kunststoffmaschinen, Universität-Gesamthochschule Essen, 2000
- [2] Ammer, D., Mikrospritzgießanlage u-Jet mit Linearantrieb - Entwicklung und Validierung, Lehrstuhl für Medizintechnik (MedTech), TU München, München, 2008
- [3] Assmann, B., Selke, P., Technische Mechanik, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2006, S. 241
- [4] Bader, C., Das kleine Einmaleins der Werkzeug-Sensorik. Kunststoffe, 96(6), 2006, S. 114-117
- [5] Bader, C., Und sie bewegt sich doch. Kunststoffe, 98(6), 2008, S. 60-66
- [6] Bichler, M., Jaeger, A., Gottschild, R., Seibold, G., Spritzgießen - kurz und bündig, Schwaig, 1996
- [7] Bleier, H., Kosthorst, T., In der Präzision nahezu gleichauf. Kunststoffe, 94(1), 2004, S. 38-42
- [8] Bongardt, W., Verbesserte Prozessführung beim Spritzgießen durch selbststellende Regelungen, Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) an der RWTH, Aachen, 1982
- [9] Bourdon, R., Zur Optimierung der Prozessrobustheit beim Spritzgießen, Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, 1994
- [10] Buchhold, R., Nakladal, A., Gerlach, G., Influence of Moisture-Uptake on Mechanical Properties of Polymer Used in Microelectronics. Materials Research Society Symposium Proceedings, 511, 1998,
- [11] Bürkle, E., Verbesserte Kenntnis des Plastifiziersystems an Spritzgießmaschine, Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) an der RWTH, Aachen, 1988
- [12] Bürkle, E., Würtele, M., Plastifizieren in Grenzbereichen. Kunststoffe, 92(3), 2002, S. 38-44
- [13] Domininghaus, H., Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2008, S. 869
- [14] Dormann, B., Jüttner, G., Hochpräzise Miniaturen. Kunststoffe, 99(2), 2009, S. 34-37
- [15] Dubay, R., Predictive Control of Cavity Pressure during Injection Filling. Society of Plastics Engineers, ANTEC, Dallas, USA, 2001
- [16] Edwards, R., Diao, L., Thomas, C.L., A Comparison of Position, Cavity Pressure and Ultrasound Sensors for Switch/Over Control in Injection Molding. Society of Plastics Engineers ANTEC, Nashville, USA, 2003
- [17] Ehrenstein, G.W., Mit Kunststoffen konstruieren, Hanser Verlag, München Wien, 2007, S. 15
- [18] Fahrmeir, L., Kneib, T., Lang, S., Regression: Modelle, Methoden und Anwendungen, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2007
- [19] Fornefeld, A., Ermittlung notwendiger Materialkennndaten. Plastverarbeiter, 36, 1985, S. 82-88
- [20] Ganz, M., Erfolgreich Mikrospritzgießen von hochpräzisen Mikroteilen. Mikrospritzgießen - Handling von Mikroteilen, Würzburg, 2004
- [21] Ganz, M., Spritzgießen von Mikro- und Präzisionsteilen. Mikrospritzguss und Mikroformenbau zum Anfassen, Würzburg, 2005

- [22] Gärtner, R., Analyse der Prozesskette zur Herstellung mikrostrukturierter Bauteile durch Spritzgießen, Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), RWTH Aachen, Aachen, 2005
- [23] Gießauf, J., Knoll, K., Dünn und dekorativ obendrein. Kunststoffe, 92(5), 2002, S. 54-58
- [24] Gornik, B., Gut gemischt? - Vergleich der Mischwirkung von Drei-Zonen-Schnecken und Mischteilschnecken. Kunststoffe, 92(1), 2002, S. 38-40
- [25] Gornik, C., Plastifiziereinheit, ADCURAM Maschinenbauholding GmbH, DE102006004899A1, 102006004899.7, 2006
- [26] Gornik, C., Bleier, H., Roth, W., Arbeit an der Spitze. Kunststoffe, 91(6), 2001, S. 72-74
- [27] Gornik, C., Bleier, H., Roth, W., Die Spitze entscheidet - Verschleiß vermeiden bei Rückstromsperren. Kunststoffe, 91(1), 2001, S. 64-67
- [28] Götz, W., Virtuoses Spiel: Mikrospritzgießen mit Standardmaschinen. Plastverarbeiter, 53(7), 2002, S. 18-21
- [29] Grimm, J., Grimm, W., Deutsches Wörterbuch, S. Hirzel, 1862
- [30] Gruber, J.-M., Prozessführung beim Thermoplastspritzgießen auf Basis des Werkzeugsinnendrucks, Institut für Kunststoffverarbeitung an der RWTH, Aachen, 2005
- [31] Hahn, C., Interne Studienarbeit der Firma Krauss-Maffei Technologies GmbH, 2007
- [32] Haman, S., Prozessnahes Qualitätsmanagement beim Spritzgießen, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, TU Chemnitz, Chemnitz, 2004
- [33] Haupte, M., Betriebspunktoptimierung kunststoffverarbeitender Prozesse, Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) an der RWTH, Aachen, 1989
- [34] Häußler, J., Eine Qualitätssicherungsstrategie für die Kunststoffverarbeitung auf der Basis künstlicher neuronaler Netzwerke, Institut für Kunststofftechnik, Universität Paderborn, 1994
- [35] Hellerich, W., Harsch, G., Haenle, S., Werkstoffführer Kunststoffe: Eigenschaften, Prüfungen, Kennwerte, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 158
- [36] Hengesbach, J.A., Verbesserung der Prozessführung beim Spritzgießen durch Prozessüberwachung, Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), RWTH Aachen, Aachen, 1976
- [37] Jaeger, A., Hybridmaschine auf dem Prüfstand - Kombiniertes Antriebssystem beim Spritzgießen. Kunststoffe, 90(9), 2000, S. 40-45
- [38] Johannaber, F., Untersuchungen zum Fließverhalten plastifizierter thermoplastische Formmassen beim Spritzgießen durch enge Düsen, Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), RWTH, Aachen, 1967
- [39] Johannaber, F., Spritzgießmaschinen. Kunststoffe, 85(12), 1995, S. 2080-2088
- [40] Johannaber, F., Kunststoff Maschinen Führer, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2003, S. 59
- [41] Johannaber, F., Kunststoff Maschinen Führer, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2003, S. 333
- [42] Johannaber, F., Kunststoff Maschinen Führer, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2003, S. 717-749
- [43] Johannaber, F., Michaeli, W., Handbuch Spritzgießen, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2004, S. 984

-
- [44] Johannaber, F., Michaeli, W., Handbuch Spritzgießen, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 659
- [45] Johannaber, F., Michaeli, W., Handbuch Spritzgießen, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 20
- [46] Johannaber, F., Michaeli, W., Handbuch Spritzgießen, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 721
- [47] Johannaber, F., Michaeli, W., Handbuch Spritzgießen, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 730
- [48] Johannaber, F., Michaeli, W., Handbuch Spritzgießen, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 716
- [49] Johannaber, F., Michaeli, W., Handbuch Spritzgießen, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 750
- [50] Johannaber, F., Michaeli, W., Handbuch Spritzgießen, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 708
- [51] Johannaber, F., Michaeli, W., Handbuch Spritzgießen, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 767
- [52] Johannaber, F., Michaeli, W., Handbuch Spritzgießen, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 725
- [53] Johannaber, F., Michaeli, W., Handbuch Spritzgießen, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 726
- [54] Johannaber, F., Michaeli, W., Handbuch Spritzgießen, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 190
- [55] Johannaber, F., Michaeli, W., Handbuch Spritzgießen, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 300
- [56] Johannaber, F., Michaeli, W., Handbuch Spritzgießen, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 1210-1259
- [57] Johannaber, F., Michaeli, W., Handbuch Spritzgießen, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 39
- [58] Johannaber, F., Michaeli, W., Handbuch Spritzgießen, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 626
- [59] Johannaber, F., Michaeli, W., Handbuch Spritzgießen, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 181
- [60] Johannaber, F., Michaeli, W., Handbuch Spritzgießen, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 382
- [61] Johannaber, F., Michaeli, W., Handbuch Spritzgießen, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 703
- [62] Johannaber, F., Michaeli, W., Handbuch Spritzgießen, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 728
- [63] Johannaber, F., Michaeli, W., Handbuch Spritzgießen, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 727
- [64] Joroschek, C., Spritzgießen für Praktiker. 2 ed, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2008, S. 14
- [65] Joroschek, C., Spritzgießen für Praktiker. 2 ed, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2008, S. 12
- [66] Joroschek, C., Spritzgießen für Praktiker. 2 ed, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2008, S. 139

- [67] Joroschek, C., Spritzgießen für Praktiker, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2008, S. 19
- [68] Joroschek, C., Spritzgießen für Praktiker, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2008, S. 8
- [69] Jüttner, G., Mikrospritzgießen mit Kolbenplastifiziereinheiten. Technomer 2003, Chemnitz Deutschland, 2003
- [70] Jüttner, G., Plastifiziereinheiten für kleinste Schussgewicht. Kunststoffe, 94(1), 2004, S. 53-55
- [71] Kazmer, D., Petrova, T., Development of a Hybrid Neural Netzwerk for Quality Control of Injection Molding. SPE-ANTEC, Atlanta/USA, 1998
- [72] Kelly, A.L., Brown, E.C., Coates, P.D., The Effect of Screw Geometry on Melt Temperature Profile in Single Screw Extrusion. Polymer Engineering and Science, 2006, S. 1706-1714
- [73] Kerber, M., Regelungsfunktionen mit künstlicher Intelligenz. Kunststoffe, 92(12), 2002, S. 34-37
- [74] Kerber, M., Vollelektrisch in den Präzisions- und Mikrospritzguss. SKZ: Mikrospritzguss und Mikroformenbau zum Anfassen, Würzburg, 2005
- [75] Kleinbramm, M., Präzisions-Spritzgussteile auf kleinen Spritzgießmaschinen. Kunststoffe, 88(1), 1998, S. 41-44
- [76] Kleinebrahm, Miniatur- und Mikrospritzguss Fertigungslösungen mit Schneckenkolben- Spritzgießmaschinen. Mikrospritzguss und Mikroformenbau zum Anfassen, Würzburg, 2005
- [77] Kudlik, N., Reproduzierbarkeit des Kunststoffspritzgießprozesses, Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), RWTH Aachen, Aachen Deutschland, 1998
- [78] Lauterbach, M., Ein Steuerungskonzept zur Flexibilisierung des Thermoplast-Spritzgießprozesses, Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) an der RWTH, Aachen, 1989
- [79] Lauterbach, M., Verfahren zur Steuerung der Nachdruckphase beim Spritzgießen thermoplastischer Kunststoffe, DE 3927995 A1, 1990
- [80] Lee, S., Lee, D., Kim, M., et al., Plastic Injection Mold with Cavity Pressure/Temperature Sensors. 22nd Annual Meeting of the Polymer Processing Society PPS, Yamagata, Japan, 2006
- [81] Lühl, R., Plastifizier- und Einspritzeinheit für eine Spritzgießmaschine, Dr. Boy GmbH, Neustadt, DE 19801412C2, 19801412.0-16, 1999
- [82] Mahmud, A.-H., Modellbasierte Ansätze zur Qualitätsregelung beim Kunststoffspritzgießen, Lehrstuhl für Konstruktionslehre und Kunststoffmaschinen, Universität-Gesamthochschule Essen, 2000
- [83] Marinow, S., Berechnungsgrundlagen und Verfahren zur rechnergestützten Steuerung der Nachdruckphase beim Spritzgießen nach dem pmT-Konzept. Plaste und Kautschuk, 37, 1990, S. 163-169
- [84] McCullough, T.W., Hilton, B.T., Predicting Melt Temperatures Using an Adjustable Exposed Tip Thermocouple. ANTEC, Society of Plastics Engineers, 1992, S. 927-930
- [85] Menges, G., Werkstoffkunde Kunststoffe, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 137
- [86] Menges, G., Werkstoffkunde Kunststoffe, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 89

- [87] Menges, G., Bourdon, K., Entwicklung von Methoden zur Vorausbestimmung von optimalen Maschineneinstellparameter, Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), Aachen, 1987
- [88] Michaeli, W., Einführung in die Kunststoffverarbeitung. 5. ed, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2006, S. 91
- [89] Michaeli, W., Einführung in die Kunststoffverarbeitung, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2006, S. 21
- [90] Michaeli, W., Einführung in die Kunststoffverarbeitung, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2006, S. 111
- [91] Michaeli, W., Prozessinnovationen mit Potenzial. Kunststoffe, 99(2), 2009, S. 93-97
- [92] Michaeli, W., Spritzgießmaschinen auf dem Prüfstand. Kunststoffe, 99(4), 2009, S. 38-42
- [93] Michaeli, W., Franke, M., Schmidt, G., Extrusions-Blasformen: Neuronale Netze zur Qualitätssicherung. Plastics-Special, 6, 1996, S. 34-37
- [94] Michaeli, W., Hohenauer, K., Vaculik, R., Bluhm, R., Konstante Formteilqualität durch modellgestützte Regelung. Plaste und Kautschuk, 41, 1994, S. 237-244
- [95] Michaeli, W., Hopmann, Ch., Gruber, J., Prozessregelung beim Spritzgießen. Kunststoffe, 94(1), 2004, S. 20-24
- [96] Michaeli, W., Schreiber, A., Aller guten Dinger sind drei. Kunststoffe, 98(12), 2008, S. 59-63
- [97] N.N., Das vollelektrische Kleinspritzaggregat - SoloPlast 13 und 15, in Firmenschrift Ratiomec GbR, Bahlingen
- [98] N.N., SE-DUZ Series, Zero-molding - Sumitomo all electric injection molding maschine, in Produktbroschüre, Sumitomo Heavy Industries, Ltd., Tokyo, Japan
- [99] N.N., SE-HDZ und SE-HSZ Series, Zero Molding - Sumitomo all electric injection moding Maschine, in Produktbroschüre, Simutomo Heavy Industries, Ltd., Tokyo, Japan
- [100] N.N., Spritzgießen von Qualitätsformteilen - Verarbeitungsdaten und -hinweise, in Firmenschrift Bayer, 2000
- [101] N.N., Fundamentals Cavity Pressure., in Information der Kistler Instrumente AG, Witerthur, Schweiz, 2005
- [102] N.N., Boy-Spritzgießautomaten mit servomotorischen Pumpenantrieb, in Produktbroschüre, Dr. Boy GmbH & Co. KG, Neustadt-Fernthal, 2007
- [103] N.N., Engel e-motion, Elektrisch Spritzgießen - die effiziente Art präzise Teile herzustellen, in Produktbroschüre, Engel Austria GmbH, Schwertberg, Österreich, 2007
- [104] N.N., Kompakte Qualität, Dr. Boy GmbH & Co. KG., Neustadt-Fernthal, 2007
- [105] N.N., Kompakte Qualität, in Produktbroschüre, Dr. Boy GmbH & Co. KG, Meustadt-Fernthal, 2007
- [106] N.N., Kurze Verweilzeit. Kunststoffe, 97(6), 2007, S. 34
- [107] N.N., Microsystem 50, Produktkatalog der Firma Wittmann Battenfeld GmbH, Köttingbrunn, 2008
- [108] N.N., Spritzgießmaschinen der EX-Baureihe, in Produktbroschüre, Krauss Maffei Technologies GmbH, München, 2008
- [109] N.N., Ein System für geringe Schussgewichte. Kunststoffe, 99(2), 2009, S. 98

- [110] Pahlke, S., Schimmel, D., Mehler, C., Jaeger, A., Was Barrierschnecken bringen. *Kunststoffe*, 90(5), 2000, S. 54-58
- [111] Petrova, T., Kazmer, D., Development of a Hybrid Neural Network for Quality Control of Injection Molding. SPE-ANTEC, Atlanta, USA, 1998
- [112] Poppe, A., Die Top Ten der Spritzgießprobleme, Firmenschrift Du Pont, Bad Homburg, 1996
- [113] Potente, H., Approximationsgleichungen für Schmelzeextruder. *Rheologica Acta*, 22, 1983, S. 387-395
- [114] Radig, G., Unter Beobachtung. *Plastverarbeiter*, 57(1), 2006, S. 42-43
- [115] Reichl, M., Niedrige Schussgewichte beim Mikrospritzguss. *Kunststoffberater*, (2), 2006, S. 33-34
- [116] Robers, T.F., Analyse des Betriebsverhaltens von vollelektrischen gegen über hydraulisch angetriebenen Spritzgießmaschinen basierend auf Vergleichsmessungen, Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) an der RWTH, Aachen, 1994
- [117] Rogalla, A., Analyse des Spritzgießens mikrostrukturierter Bauteile aus Thermoplasten, Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), RWTH Aachen, Aachen, 1998
- [118] Rogalla, A., Mikrospritzguss - Herausforderungen und Chancen für Kunststoffverarbeiter. *Spritzgießen 2006*, Baden-Baden Deutschland, 2006
- [119] Rothe, J., Steuerung und Regelung an Spritzgießmaschinen. *Kunststoffe*, 76(4), 1986, S. 307-317
- [120] Saechtling, H., *Kunststoff Taschenbuch*, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 288
- [121] Saechtling, H., *Kunststoff Taschenbuch*, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 515
- [122] Saechtling, H., *Kunststoffe Taschenbuch*, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 135
- [123] Schenkel, G., *Kunststoff Extrudertechnik*. 2. ed, Hanser Verlag, München, 1963, S. 125
- [124] Schinköthe, W., Temperierkonzepte für das Mikrospritzgießen im Vergleich. *Stuttgarter Kunststoff-Kolloquium*, Stuttgart, 2003
- [125] Schmidberger, E., Gutbrod, O., Heinzelmann, F., Ohngemach, D., Neuronale Netzwerke beim Spritzgießen. *Kunststoffe*, 85(5), 1995, S. 620-626
- [126] Schnerr, O., System bringt Transparenz. *Plastverarbeiter*, 57(5), 2006, S. 64-65
- [127] Schwarz, H.R., Köckler, N., *Numerische Mathematik*, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2009
- [128] Sheth, B., Barry, C., Schott, N., Improved Part Quality Using Cavity Pressure Switchcover. Society of Plastics Enngineers ANTEC, Dallas, USA, 2001
- [129] Sombatsompop, N., Chaiwattanpipat, W., Temperature Distributions of Molten Polypropylene During Injection Molding. *Advances in Polymer Technology*, 19, 1999, S. 79-96
- [130] Spannemann, A., Eine neue Maschinen- und Verfahrenstechnik zum Spritzgießen von Mikrobauteilen, Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), RWTH Aachen, Aachen Deutschland, 2000
- [131] Stahl, J., Koch, F., Der Werkzeuginnendruckverlauf muss stimmen. *Kunststoffe*, 95(9), 2005, S. 133-137

- [132] Steinbichler, G.W., H., Ein Schuss wie der andere? *Kunststoffe*, 96(9), 2006, S. 129-135
- [133] Stitz, S., Keller, W., *Spritzgießtechnik*. 2 ed, Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 19
- [134] Stitz, S., Keller, W., *Spritzgießtechnik*. 2 ed, Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 262
- [135] Stitz, S., Keller, W., *Spritzgießtechnik*. 2 ed, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 42
- [136] Stitz, S., Keller, W., *Spritzgießtechnik*. 2 ed, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 161
- [137] Stitz, S., Keller, W., *Spritzgießtechnik*. 2 ed, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 264
- [138] Stitz, S., Keller, W., *Spritzgießtechnik*. 2. ed, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2004, S. 98
- [139] Tietz, W., Modelle zur rechnerischen Vorhersage der Mikrostrukturausbildung in thermoplastischen Spritzgussteilen, Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), RWTH Aachen, Aachen, 1994
- [140] Urban, D., Mayerl, J., *Regressionsanalyse: Theorie, Technik und Anwendung*. 2 ed, VS Verlag, Wiesbaden, 2006
- [141] Vaculik, R., Regelung der Formteilqualität beim Spritzgießen auf der Basis statistischer Prozessmodelle, Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), RWTH, Aachen, 1996
- [142] Walter, A., Methoden des prozessnahen Qualitätsmanagements in der Kunststoffverarbeitung, Lehrstuhl für Konstruktionslehre und Kunststoffmaschinen (KKM) der Universität-GH Essen, 2000
- [143] Wintermantel, E., Ammer, Daniel, Kosthorst, Thomas, Mit Echtzeitregelung zur Mikropräzision. *Kunststoffe*, 98(6), 2008, S. 70-74
- [144] Wintermantel, E., Ha, S.W., *Medizintechnik, Life Science Engineering*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2008, S. 557
- [145] Wintermantel, E., Ha, S.W., *Medizintechnik, Life Science Engineering*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2008, S. 214
- [146] Wintermantel, E., Ha, S.W., *Medizintechnik, Life Science Engineering*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2008, S. 490
- [147] Wortberg, J., Überwachung des Schmelzezustands bei der Verarbeitung von Plastomeren, Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), RWTH Aachen, Aachen, 1978
- [148] Wortberg, J., Häßler, J., Walter, A., Al-Haj Mustafa, M., *Quality oriented Process Analysis. SPE-ANTEC*, Toronto/Kanada, 1997
- [149] Wortberg, J., Kamps, T., *Antriebstechnik im Vergleich*. *Kunststoffe*, 93(10), 2003, S. 70-75
- [150] Würtele, M., Bürkle, E., Liu, J., *Plastifizier- und Einspritzvorrichtung für das Mikrospritzgießen*, DE102006026818A1, 102006026818.0, 2006
- [151] Würtele, M., Lang, Ch., Hungerkamp, T., *Plastifizieren in kürzester Zeit*. *Kunststoffe*, 94(6), 2004, S. 96-99
- [152] Zhang, G., *Closed Loop Control for an Injection Unit*, WO 2009026673 A1, 2009

Formelzeichen

Lateinische Abkürzung

a	Temperaturleitfähigkeit
a_{eff}	effektive Temperaturleitfähigkeit
c_v	spezifische Wärmekapazität
D	Durchmesser
E_E	Einspritzarbeit
E_S	Dissipationsenergie
E_{st}	Staudruckarbeit
e	Stegbreite, Exponentialfunktion
F	Kraft
G	Durchsatz
h	Enthalpie
h	Gangtiefe
h_p	Dosierhub
I_{K_y}	Flächenträgheitsmoment für den Schneckenkern um y-Achse
I_{K_z}	Flächenträgheitsmoment des Schneckenkerns um z-Achse
I_P	polares Flächenträgheitsmoment
I_y	Flächenträgheitsmoment um y-Achse
I_z	Flächenträgheitsmoment um z-Achse
I_{S_y}	Flächenträgheitsmoment des Schneckenschnitts um y-Achse
I_{S_z}	Flächenträgheitsmoment des Schneckenschnitts um z-Achse
K	Fließgesetzkoeffizient
k	Faktor
M_d	Drehmoment
l	Länge
m	Masse

n	Exponent des Potenzfließgesetzes
n_s	Drehzahl
P_s	Schneckenantriebsleistung
p	Druck
p_D	Einspritzdruck
p_{st}	Staudruck
Q_H	Heizenergie
Q_K	Wasserkühlung
Q_{VL}	Wärmeverlust
s	Standardabweichung
SMR	Schwankung beim Prozess mit Regelung
SOR	Schwankung beim Prozess ohne Regelung
T	Temperatur
T_{spez}	spezifisches Drehmoment
t	Zeit
t_p	Plastifizierzeit
V	Volumen
v_s	Schneckenrücklaufgeschwindigkeit
\bar{x}	Mittelwert

Griechische Symbole

α	Steigerung der Prozessqualität
β	Temperaturkoeffizient des Fließgesetzes
θ_s	einschließender Winkel des Schneckenstegs
$\dot{\phi}$	Wärmequelle
φ	Gangsteigungswinkel
λ	Wärmeleitfähigkeit

v	Massetemperatur
ρ	Dichte
σ	Spannung
τ	Schubspannung
$\dot{\gamma}$	Schergeschwindigkeit
η	Viskosität

Anhang

Anhang A: Verwendete Kunststoffgranulate für die Plastifizierungsversuche

Anhang B: Maßbezeichnung der Schnecke

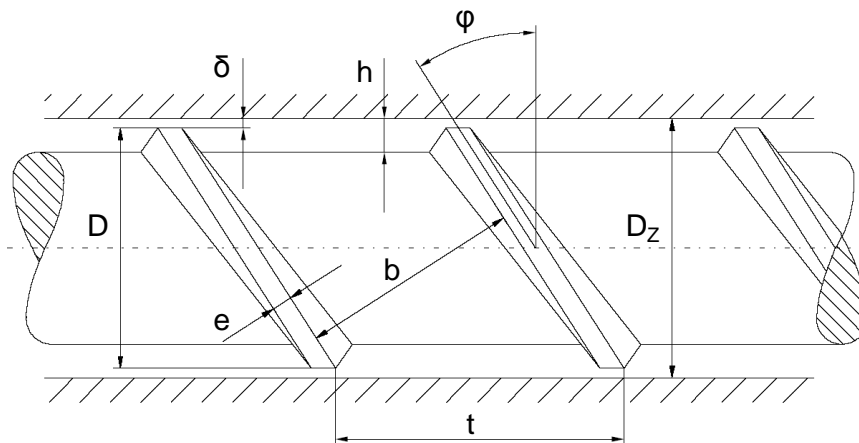
Anhang C: Polynomiale Regression

Anhang D: Vergleich der Prozessqualität

Anhang E: Gewichtsverteilung des Bauteils B und der Spannbolzenführung

Anhang A: **Verwendete Kunststoffgranulate für die Plastifizierungsversuche**

Kunststoff	Materialtyp	Bezeichnung	Hersteller
Standard-Kunststoffe	PE	Lupolen 3020K	Basell
	PP	512 MN 10	Sabic
Technische Kunststoffe	PPS	Fortron 1131 L4	Ticona
	POM	Delrin100 NC 10 Natur	DUPONT
	PA6.6 GF30	Ultradur A3 WG5	BASF
	PBT GF20	Ultradur B4300 G4	BASF

Anhang B: **Maßbezeichnung der Schnecke**

D: Schneckenaußendurchmesser

 D_z : Zylinderinnendurchmesser

e: Stegbreite

b: Kanalbreite

h: Gangtiefe

 δ : Schneckenspiel φ : Gangsteigungswinkel

Anhang C: Polynomiale Regression [127]

Gegeben: $(m + 1)$ Wertepaare $(x_i, y_i), i = 0, \dots, m$

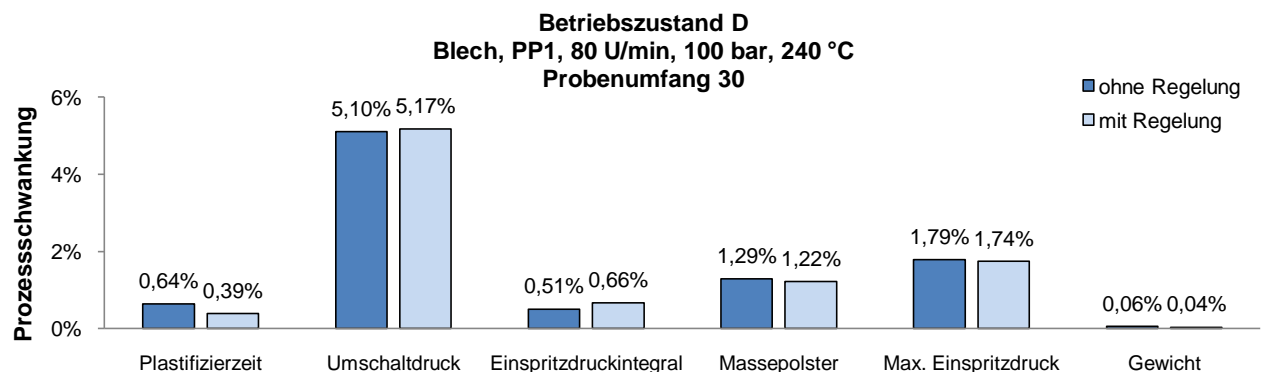
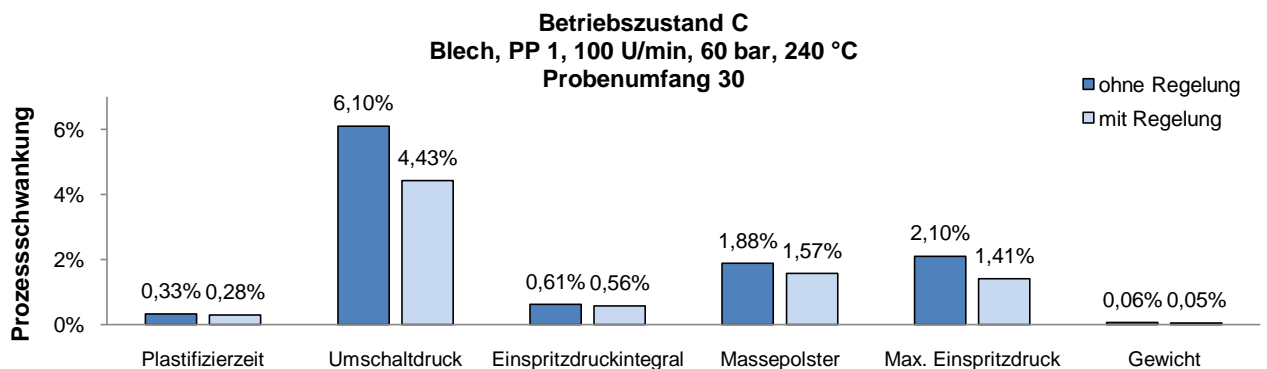
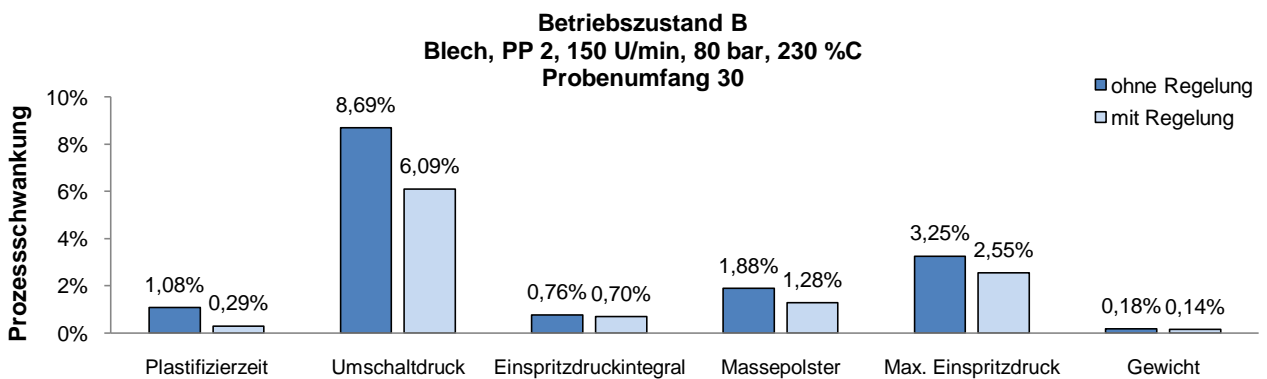
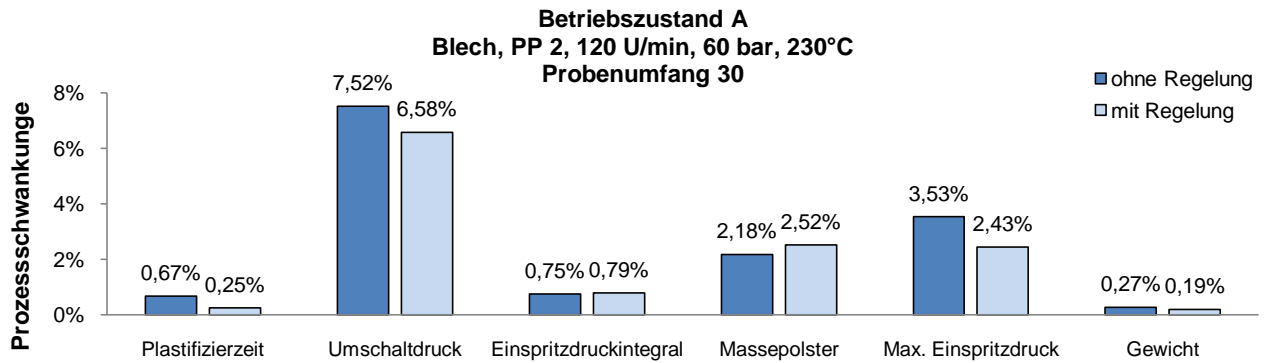
Gesucht: $p(x)$, ein Polynom n -ten Grades, $n < m$, so dass die Summe der Fehlerquadrate

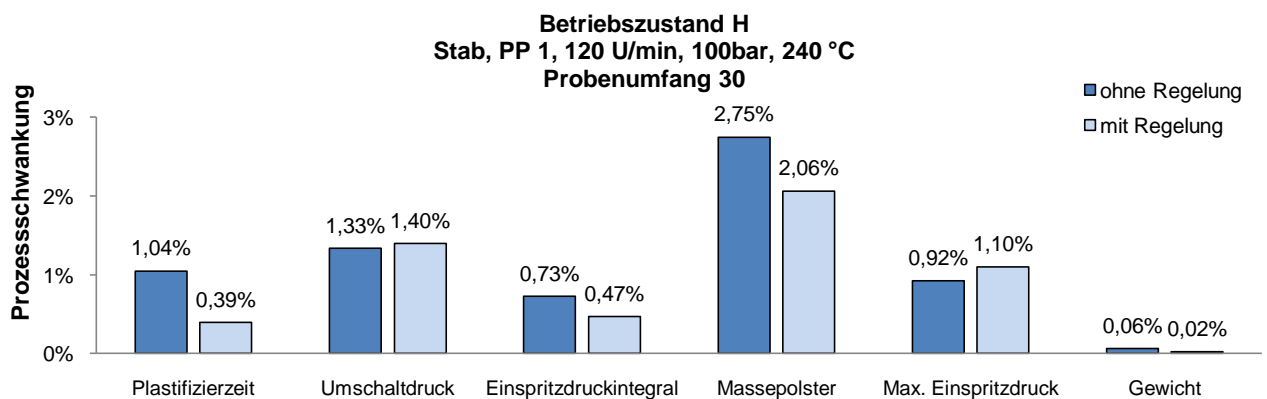
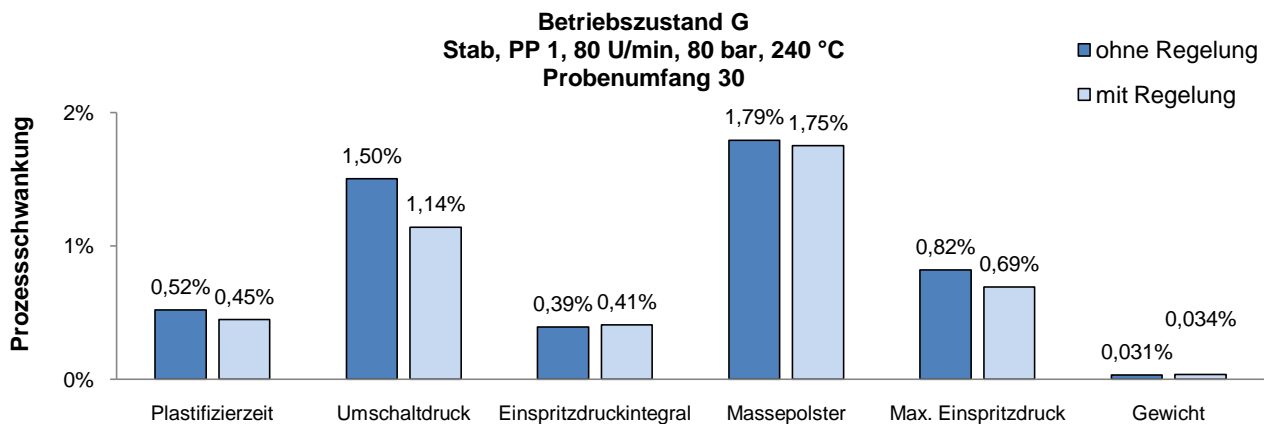
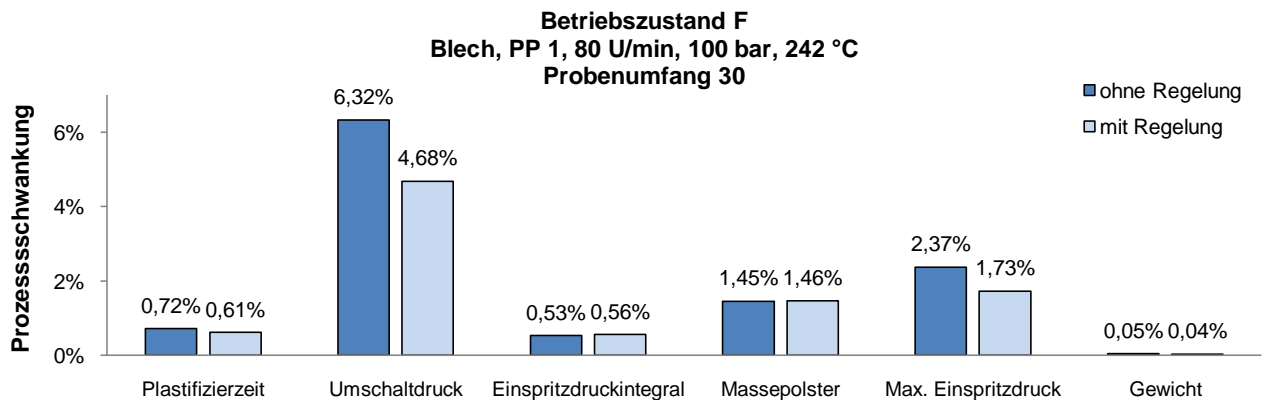
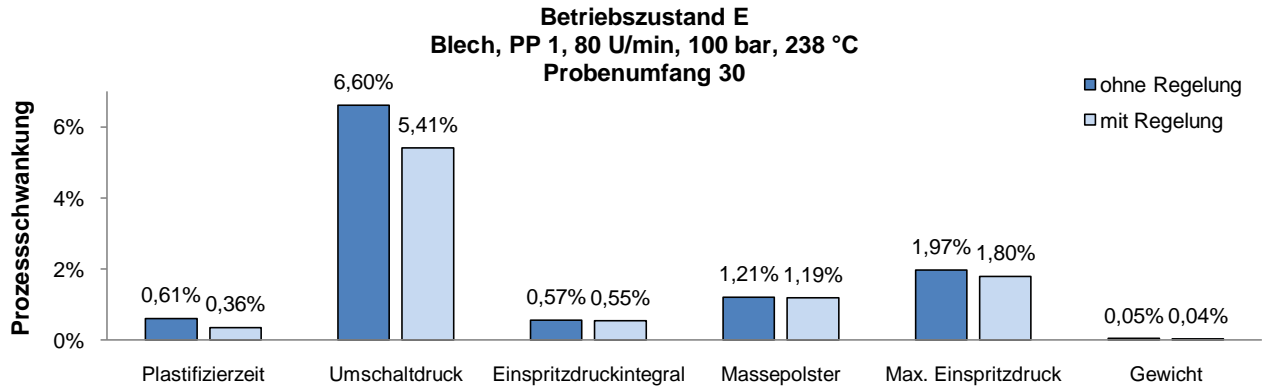
$$\sum_{i=0}^m (p(x_i) - y_i)^2$$

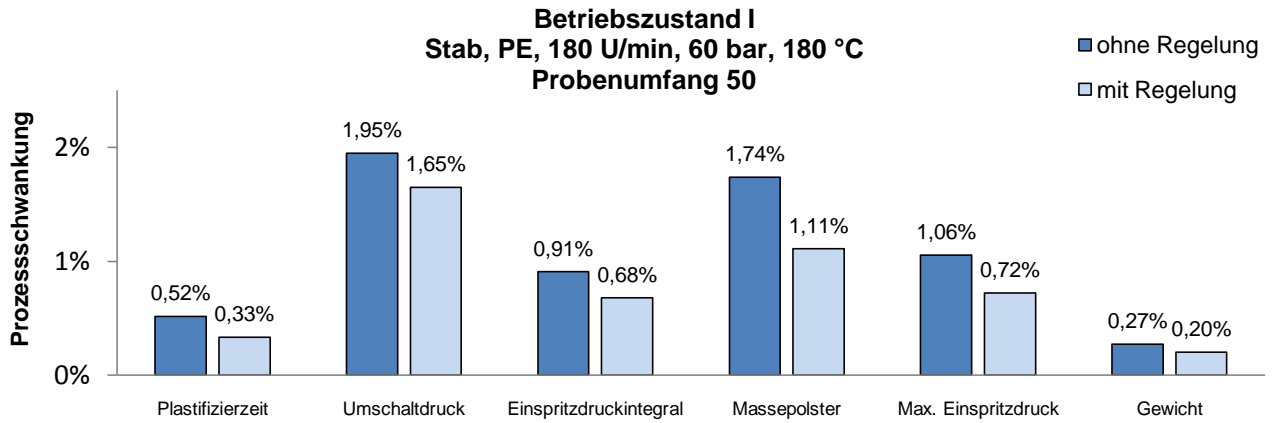
minimal wird.

Salopp formuliert: $y = p(x_i)$ approximiert m öglichst gut die Datenpunkte.

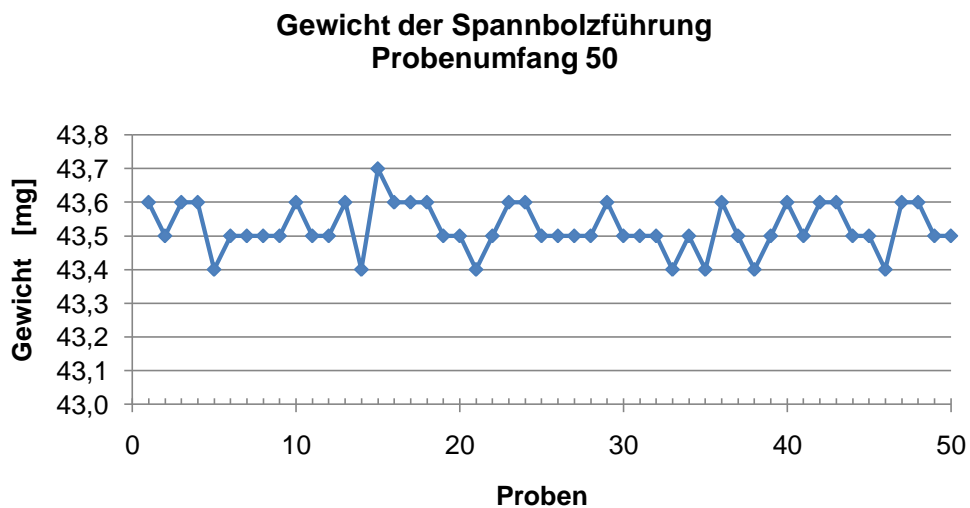
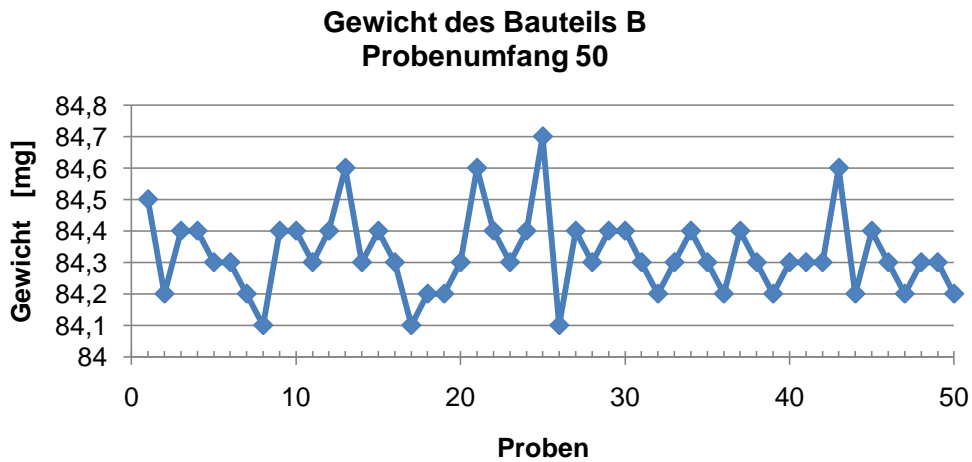
Anhang D: Vergleich der Prozessqualität







Anhang E: Gewichtsverteilung des Bauteils B und der Spannbolzenführung



Ich versichere, dass ich die Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen verwendet habe.