

Johannes Eben

Identifikation und Reduzierung realer Schwankungen
durch praxistaugliche Prozessführungsmethoden beim
Spritzgießen

Johannes Eben

**Identifikation und Reduzierung realer
Schwankungen durch praxistaugliche
Prozessführungsmethoden beim
Spritzgießen**



**TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ**

Universitätsverlag Chemnitz

2014

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2014

Technische Universität Chemnitz/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Chemnitz

09107 Chemnitz

<http://www.tu-chemnitz.de/ub/univerlag>

Herstellung und Auslieferung

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

<http://www.mv-verlag.de>

ISBN 978-3-944640-37-2

<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-156619>

Identifikation und Reduzierung realer Schwankungen durch praxistaugliche Prozessführungsmethoden beim Spritzgießen

Von der Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Chemnitz
genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)**

vorgelegt von

Dipl.-Ing. (FH) Johannes Eben, M.B.A.+Eng.

geboren am 18.03.1983 in Landau an der Isar

Tag der Einreichung: 03.03.2014

Tag der Verteidigung: 07.11.2014

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Michael Gehde (TU Chemnitz)

2. Gutachter: Prof. Peter Karlinger (Hochschule Rosenheim)

*„Wir haben die Erde nicht von unseren Eltern geerbt,
sondern von unseren Kindern geliehen“*

Altes indianisches Sprichwort

Bibliografische Beschreibung

Eben, Johannes

Identifikation und Reduzierung realer Schwankungen durch praxistaugliche Prozessführungsmethoden beim Spritzgießen

Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz, Professur Kunststoffe, Chemnitz, 2014

167 Seiten, 68 Abbildungen, 9 Tabellen, 165 Literaturzitate

Referat

Eine stetig gleichbleibende hohe Qualität zu fertigen, ist erklärtes Ziel des Spritzgießgewerbes. Aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen ist es jedoch nicht möglich, für konstante Produktionsrahmenbedingungen zu sorgen. Die effizienteste Methode ist, die Schwankungen über die Wahl der richtigen Prozessführungsmethode auszugleichen.

Im ersten Teil der Arbeit konnte herausgefunden werden, welche praxisrelevanten Störgrößen einen Einfluss auf den Spritzgießprozess haben und wie sie sich auswirken. Bei den Materialparametern sind Änderungen der Viskosität (15 %) und der Einfriertemperatur des Materials (4 °C) am Einzug festzustellen. Zusätzlich veränderte sich das Messverhalten der Drucksensoren, wodurch ein Drift von 5 bar entstand. Störgrößenbedingt änderten sich auch die Prozesstemperaturen um 1 °C.

Im zweiten Teil der Arbeit werden diverse, während der Arbeit entwickelte, Prozessführungsmethoden miteinander verglichen. Aufgabe war es, die im ersten Teil gefundenen realen störgrößenbedingten Einflüsse zu kompensieren. Es stellte sich heraus, dass sich lediglich die materialbedingten Schwankungen nicht ausgleichen lassen. Zumindest können deren Auswirkungen durch eine Regelung der werkstoffnahen Parameter abgeschwächt werden.

Schlagworte

Spritzgießen, Qualität, Störgrößen, Qualitätsschwankungen, Prozessregelmethoden, Ausschuss, Regelung, Steuerung, Umschaltverfahren, Methodenvergleich

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der Stabsstelle F&E an der Hochschule Rosenheim in den Jahren 2009 bis 2013.

Mein erster Dank gilt Herrn Prof. Peter Karlinger, Professor im Studiengang Kunststofftechnik an der Hochschule Rosenheim. Ihm möchte ich besonders für die intensive Förderung, die fachkundige Beratung und das in mich gesetzte Vertrauen sowie für die Betreuung der Dissertation danken.

Prof. Dr.-Ing. Michael Gehde, Leiter der Professur Kunststoffe, danke ich recht herzlich für seine stets große Unterstützung und die Aufnahme und Betreuung des Promotionsverfahrens. Außerdem möchte ich Prof. Dr.-Ing. Michael Schemme für die lehrreichen Diskussionen und die Übernahme der Zweitprüfung danken.

Ebenso gilt mein Dank allen weiteren an der Hochschule Rosenheim berufenen Professoren, die mich mit Ihrem Fach- und Erfahrungsschatz unterstützten. Besonders möchte ich die Unterstützung hervorheben, die ich von den Mitarbeitern der Hochschule und den zahlreichen Studenten erhalten habe. Diese machten das Gelingen dieser Arbeit erst möglich. Über das alltäglich hervorragende Arbeitsklima an der Hochschule Rosenheim war ich sehr froh.

Meinen Dank möchte ich auch an die Firmen und Institutionen richten, die mich im Laufe meiner Arbeit unterstützt haben. Dies geschah stets kostenlos in Form von Rohstoffen, externen Prüfmöglichkeiten, diverser an der Hochschule Rosenheim zur Verfügung gestellten Anlagentechnik und der Bereitschaft zu intensiven und anregenden fachlichen Diskussionen. Diese Rahmenbedingungen ermöglichten erst die Realisierung dieser Arbeit. Zudem möchte ich mich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Finanzierung dieser Arbeit bedanken.

Rosenheim 2014

Johannes Eben

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	13
1.1	Einleitung	13
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise	15
2	Stand der Technik und Wissenschaft	17
2.1	Das Spritzgießen	17
2.1.1	Physikalischer und verfahrenstechnischer Prozessablauf	17
2.1.2	Einflüsse auf den Prozess und die Qualität	19
2.1.3	Ursache für Schwankungen	20
2.1.4	Zusammenfassung der Prozessbetrachtung	20
2.2	Maßnahmen zur gesteigerten Reproduzierbarkeit beim Spritzgießen.....	22
2.2.1	Prozesseinstellung – Arbeitspunktbestimmung	22
2.2.2	Verschiedene Prozessführungsmethoden für den Spritzgießprozess	23
2.2.3	Qualitätskontrolle	34
2.3	Zusammenfassende Bewertung	37
3	Verwendete Betriebsmittel und Programme	41
3.1	Versuchsanlage, Werkzeug und Bauteile	42
3.2	Sensorik, Messinstrumente und Analysegeräte	44
3.2.1	Analysegeräte zum Bestimmen der Materialeigenschaften	44
3.2.2	Wichtige Sensorik im Fertigungsumfeld.....	44
3.2.3	Messmittel zum Untersuchen der Bauteilqualität	46
3.3	Messsystem und Auswertungssoftware	47
3.4	Versuchsmaterialien und Zykluseinstellungen.....	50
4	Bewertung der Prozesszustände durch Kennzahlen	53
4.1	Grundlagen	53
4.2	Vorstellung wichtiger Kennzahlen.....	56
4.2.1	Aufschmelzen.....	56
4.2.2	Formgeben	60

4.2.3 Abkühlen	61
4.3 Absicherung der Prozessfähigkeit und der Kennzahlen	64
5 Rahmenbedingungen für die Entwicklung und Bewertung neuer Prozessführungsmethoden	67
5.1 Einflüsse auf Prozess- und Qualitätsschwankungen	67
5.1.1 Maschine	67
5.1.2 Mitwelt/Umgebung.....	71
5.1.3 Material.....	83
5.1.4 Sonstige Untersuchungen	100
5.2 Bewertung der auftretenden Störgrößen und deren Auswirkung.....	100
5.3 Störgrößenaufbringung und -bewertung	101
6 Entwicklung und Validierung neuartiger Prozessführungsmethoden.....	107
6.1 Prozessphasen-Steuerungen-Formgeben	107
6.1.1 Verwendete Prozessphasen-Steuerungen-Formgeben	108
6.1.2 Umschalten unter der Beachtung der Vorkompression im Schneckenorraum	110
6.1.3 Auswahl eines geeigneten Filters zum kompressionsabhängigen Umschalten mit dem Werkzeuginnendrucksignal	112
6.1.4 Reproduktionsvermögen der einzelnen Umschaltverfahren.....	116
6.1.5 Auswirkungen deterministischer Störgrößen auf die Bauteilqualität	117
6.2 Vergleich verschiedener Prozessphasen-Regelungen	120
6.2.1 Standard-Spritzgießprozess (SGM)	120
6.2.2 Schmelzezustandsregelung (SZR).....	121
6.2.3 Werkzeuginnendruckregelung (p_{WzG}).....	123
6.2.4 Druck-Temperatur-Führung (pT)	124
6.2.5 Reaktion der Prozessführungsmethoden auf Störgrößen	126
7 Bewertung der Untersuchungsergebnisse.....	129
7.1 Bewertung der auftretenden Störgrößen.....	129
7.2 Bewertung der Qualitätsschwankungen bei den Umschaltverfahren.....	129
7.3 Bewertung der Qualitätsschwankungen bei alternativen Prozessregelmethoden .	132
7.3.1 Rekristallisationstemperatur (T_{Rek})	133

7.3.2 Viskosität (η)	134
8 Zusammenfassung und Ausblick	139
Quellenverzeichnis	141
Abbildungsverzeichnis	150
Tabellenverzeichnis.....	153
Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen	154
Abkürzungen.....	154
Formelzeichen	156
Indizes	157
Anhang	158
A.1 Einfluss der Einfrierzeit auf das Prozessgeschehen.....	158
A.2 Kurvenverläufe für wichtige Kennzahlen	160
A.3 Kennwerte aus den Chargenuntersuchungen	161
A.4 Genauere Untersuchungen der inneren Vorgänge bei variablem Restfeuchtegehalt.....	162
A.5 Sonstige Untersuchung zum Thema Störgrößeneinfluss	164

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Einleitung

Das Spritzgießverfahren ist das wichtigste Verarbeitungsverfahren, wenn Produkte aus polymeren Werkstoffen herzustellen sind. Dieser Prozess erlaubt es, auf besonders wirtschaftliche Weise hochkomplexe Teile in fast beliebiger Größe herzustellen. Im 21. Jahrhundert ist es nahezu allen Volkswirtschaften möglich, diese Fertigungstechnologie einzusetzen oder die nötige Maschinenteknologie bereitzustellen. Durch die anhaltende Globalisierung verschärft sich der Wettbewerb für die heimischen Spritzgießverarbeiter und Maschinenbauer. Um auf dem Markt langfristig zu bestehen, eröffnen sich nach Porter drei generische Strategien zum Erlangen eines Wettbewerbsvorteils [Por99]:

- Differenzierung,
- Kostenführerschaft,
- Fokussierung.

Bauteile die über das Spritzgießverfahren hergestellt werden, sind nahezu prädestiniert dafür, dem Kunden einen Zusatznutzen zu liefern und somit eine Differenzierung zu schaffen. Das Urformverfahren birgt das Potenzial, durch anspruchsvolle Werkzeugtechnik an einem Bauteil eine sehr hohe Dichte an Funktionsmerkmalen zu schaffen. Durch konstruktive Maßnahmen lassen sich dabei Befestigungselemente wie Schnapphaken oder Dome, Durchbrüche und weitere Funktionselemente wie Filmscharniere in ein Bauteil implementieren. Als Weiterentwicklung zum normalen Spritzgießverfahren entstanden diverse Sonderverfahren, die neue Wege bei der Funktionsintegration ermöglichen. An dieser Stelle seien das Mehrkomponentenspritzgießen, das Inmould-Labeling, die Gasinjektionstechnik usw. genannt.

Die hier aufgezählten Möglichkeiten bestehen bei den heimischen Maschinenherstellern und Verarbeitern. Sie eröffnen es durch Funktionsintegration einen Zusatznutzen zu erzielen und somit eine Differenzierung zu schaffen. In den Fällen, in denen dies nicht möglich ist, gilt es die Kostenführerschaft anzustreben.

Momentaner Entwicklungstrend ist es, zusätzliche Verfahrensschritte in den Spritzgießfertigungsprozess zu integrieren und somit Kosten in der Verfahrens-/Wertschöpfungskette einzusparen. Über den Zusammenschluss von Einzelarbeitsschritten in einen Arbeitsgang werden Schnittstellen abgebaut und aufwendige nachfolgende Fertigungsprozesse lassen sich einfacher gestalten. Dadurch können direkt werkzeugfallende Bauteile mit multiplen Werk-

stoff- und Eigenschaftsbildern produziert werden. So ist es z. B. durch das „Color-Form-Verfahren“ [Kra10] möglich, ein Spritzgießbauteil unmittelbar im Werkzeug mit einem multifunktionalen Polyurethanlack zu beschichten. Durch diese Vorwärtsintegration kann ein bisher dem Prozess nachfolgender Schritt, nämlich das Lackieren, in den Bauteilentstehungsprozess eingegliedert werden.

Im umgekehrten Fall werden rückwärtige Verfahrensschritte mit dem Spritzgießprozess vereint. Dadurch ist es vor allem möglich, die Materialgrund- und Materialaufbereitungskosten zu reduzieren. Der Einsatz einer Entgasungsschnecke erlaubt es, den energieintensiven Trocknungsprozess einzusparen. Dabei wird der Plastifizierschritt zur Materialaufbereitung genutzt. Mit Standard- oder Mischschnecken kann die Einfärbung oder zusätzliche Additivierung erfolgen, sodass der Verarbeiter die nötigen Materialeinzelkomponenten erwirbt und somit die Compoundierungskosten vermeidet. Für komplexere Materialkombinationen stehen Spritzgießcompounder zur Verfügung, mit denen hochwertige langfaserverstärkte Schmelzen oder hochgefüllte Polymerschmelzen bereitgestellt werden können.

Ein weiterer Weg zur Kostenreduktion ist es den Prozess effektiver, effizienter und flexibler zu gestalten. Das bedeutet, den Ausstoß zur richtigen Zeit mit minimalem Einsatz an Mitteln zu einem Maximum zu treiben. Die Rüstzeiten bei Großmaschinen ließen sich in der Vergangenheit durch Standardisierung und Automatisierung auf wenige Minuten reduzieren, um mit der Produktion kurzfristig auf Anfragen zu reagieren. Generell konnte der Standardspritzgießprozess zu diesem Zweck durch verbesserte Maschinen, Werkstoff- und Werkzeugtechnik an seine physikalischen Grenzen getrieben werden. Vor allem ein optimiertes Werkzeugtemperiersystem verkürzt die Kühlzeit deutlich und hilft dabei, die Produktivität zu steigern. Auch die kritische Betrachtung der Energiebilanzen in der Spritzgießfertigungszelle [EKG11] erbrachte weitere Optimierungsschritte, mit denen sich die Energiekosten im Verfahren senken lassen.

Der wohl ineffektivste und kostenintensivste Prozesszustand beim Spritzgießen liegt vor, wenn die produzierten Bauteileigenschaften die Toleranzen verlassen. Neben dem Aufwand zur Fertigung entstehen zusätzliche Kosten zum Beseitigen der Fehler. Deswegen werden in der Produktion verschiedenste Maßnahmen durchgeführt, damit die Qualität während des Produktionsprozesses eingehalten oder durch eine Qualitätssicherungsmaßnahme gewährleistet werden kann. Die hier anfallenden Kosten werden als nicht wertschöpfende Qualitätskosten bezeichnet, da sie keinen Mehrwert am Produkt erzeugen. Sie sind notwendig, um Qualitätsschwankungen zu verhindern, ihren Kostenanteil gilt es jedoch zu minimieren.

Schwankungen in der Qualität werden durch wechselnde Produktionsrahmenbedingungen verursacht, die vermieden oder ausgeglichen werden müssen. Oft ist es jedoch technisch oder wirtschaftlich nicht möglich, bspw. Materialschwankungen, Verschleiß oder Änderungen im Raumklima zu entgehen. Die wirkungsvollste Vorgehensweise ist es daher, wechselnde Rahmenbedingungen mittels der Prozessführung zu kompensieren.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, anhand der Wahl neuer Prozessparameter oder neuer Algorithmen neuartige Prozessführungsmethoden zu entwickeln, mit denen die Reproduzierbarkeit und das Qualitätsniveau des Spritzgießprozesses gesteigert werden können. Es gilt, möglichst alle in der Realität auftretenden Ursachen für Schwankungen unter minimalem Einsatz von Kosten und Zeit unter der Verwendung von vorhandenen Mitteln in einer Prozessführungsmethode auszuregeln.

Bisherige Arbeiten hielten zur Umsetzung einer neuen Prozessführungsmethode einen, der Erfahrung nach wichtigen, Prozessparameter (z. B. Dosierzeit, Schneckenraumdruck) durch einen Regelalgorithmus konstant. Zum Testen der neu entwickelten Prozessführungsmethoden ist immer nur eine Störgröße, wie z. B. die Viskosität, die Schmelztemperatur oder das Material, verändert und betrachtet worden. Der Schwankungsbereich der einen Störgröße lag dabei weit oberhalb des in der Praxis zu erwartenden Bereichs.¹ Durch diese bislang übliche Betrachtungsweise ist nicht gewährleistet, ob die Methode, die in der Realität auftretenden Störungen erkennen und ausregeln kann. Zudem kann es vorkommen, dass sich zwar die Auswirkungen der einen Störgröße verringern, dafür aber andere im Produktionsumfeld einwirkende Störungen verstärken. Dadurch kann ganzheitlich betrachtet eine schlechtere Qualität entstehen.

Die vorliegende Arbeit grenzt sich von vorhergehenden dadurch ab, dass die Zielgrößen die die Prozessführungsmethoden betrachten und die Störgrößen, mit denen diese verifiziert werden, keinen Annahmen entstammen, sondern systematisch analysiert werden. Dies ermöglicht es, die entwickelten Methoden für möglichst alle praxisrelevanten Störgrößen im real auftretenden Streubereich zu untersuchen. Durch diese globale praxisrelevante Untersuchung soll der Verarbeiter Erkenntnisse darüber erhalten, mit welcher Methode er am effektivsten eine oder alle im Produktionsumfeld auftretenden Störungen kompensieren kann.

¹ Schwankungen in den temperaturführenden Komponenten sind mit Änderungen im Bereich von ± 10 °C untersucht worden. Viskositätsänderungen lagen durch einen Materialwechsel weit über 150 %.

2 Stand der Technik und Wissenschaft

2.1 Das Spritzgießen

2.1.1 Physikalischer und verfahrenstechnischer Prozessablauf

Der Spritzgießprozess ist ein Urformverfahren, bei welchem unter dem Einwirken von Druck und Temperatur aus dem Rohstoff ein Bauteil entsteht. Den zeitlichen Verlauf der für das Spritzgießverfahren wichtigen Zustandsgrößen illustriert Abbildung 2-1 rechts. Die dabei ablaufenden physikalischen Prozesse lassen sich anschaulich in einem p v T -Diagramm darstellen (Abbildung 2-1 links). Im p v T -Diagramm sind die Parameter nicht mehr über die Zeit aufgetragen, sondern über die Temperatur. Diese Darstellungsweise bezieht außerdem das Bauteilvolumen auf die Masseneinheit, wodurch das spezifische Volumen entsteht. Mithilfe dieser Darstellungsform kann der während des Spritzgießens ablaufende thermodynamische Arbeitsvorgang besonders anschaulich erklärt werden.

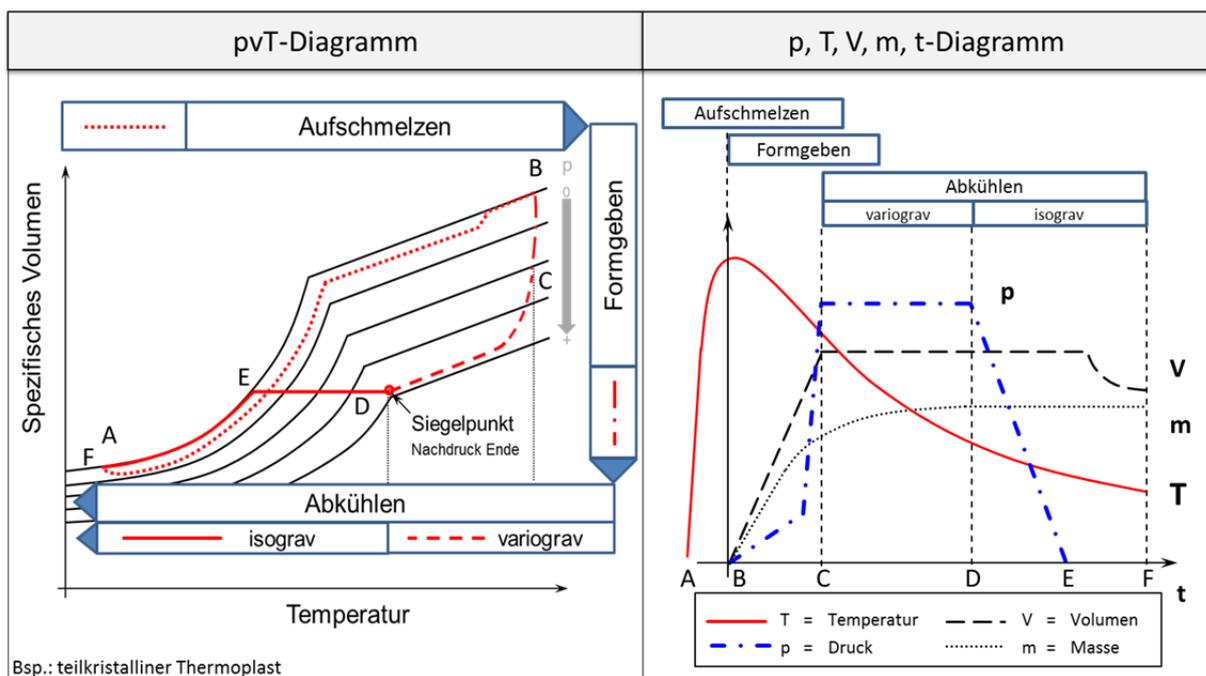


Abbildung 2-1: Vereinfachter thermodynamischer Ablauf beim Spritzgießen über die Temperatur (links) und über die Zeit (rechts)

Zu Beginn des Prozesses muss der Rohstoff fließfähig gemacht werden. Hierzu wird das Polymer beim *Aufschmelzen* (A–B) erwärmt. Ist der Werkstoff fließfähig, lässt er sich während des *Formgebens* (B–C) durch das Aufbringen von Druck in seine Endkontur überführen.

Damit der Werkstoff diese Form beibehält, muss er noch in der Kavität abkühlen. Dies geschieht von außen nach innen. Solange der Werkstoff über den Querschnitt fließfähig ist, kann sein Gewicht beeinflusst werden, um z. B. den Volumenschwund auszugleichen. Dieser Zustand wird aufgrund des veränderbaren Gewichts in dieser Arbeit „*Abkühlen variograv*“ (C–D) genannt. Ist der Werkstoff nicht mehr fließfähig, bleibt das Bauteilgewicht konstant – hier als „*Abkühlen isograv*“ bezeichnet. Anfangs kompensiert der Druckabbau in der isograven Abkühlphase den Volumenschwund (D–E). Der Prozess ist somit isochor. Ist der Druck im Werkstoff vollständig abgebaut, sinkt das spezifische Volumen bei weiterem Abkühlen isobar (E–F) und das Bauteil schwindet. Um diesen thermodynamischen Arbeitsprozess maschinell durchführen zu können, hat der Spritzgieß-Maschinenbau den Verfahrensablauf in mehrere Prozessphasen unterteilt. Die ablaufenden physikalischen Prozesse (Aufschmelzen, Formgeben und Abkühlen) lassen sich gemäß Abbildung 2-2 den bekannten Zyklusschritten der maschinentechnischen Umsetzung zuordnen. So ist zum Ausführen des Formgebungsvorgangs die Einspritzphase angedacht. Abgegrenzt werden die beiden Phasen dadurch, dass der Formgebungsprozess mit dem Zeitpunkt endet, an dem die spätere Geometrie erstmals durch den Werkstoff abgebildet wird. Der Einspritzvorgang hingegen endet dann, wenn von der Geschwindigkeits- zur Druckregelung umgeschaltet wird. Im Idealzustand sind beide Phasen deckungsgleich, können aber auch infolge eines schlecht gewählten Arbeitspunkts oder aufgrund wechselnder Rahmenbedingungen voneinander abweichen. Neben den physikalisch für den Urformprozess notwendigen Phasen sind zum maschinellen Verfahrensablauf weitere Peripherie-Phasen notwendig, wie z. B. die Verfahrbewegung der Schließeinheit zum Entformen des Bauteils.

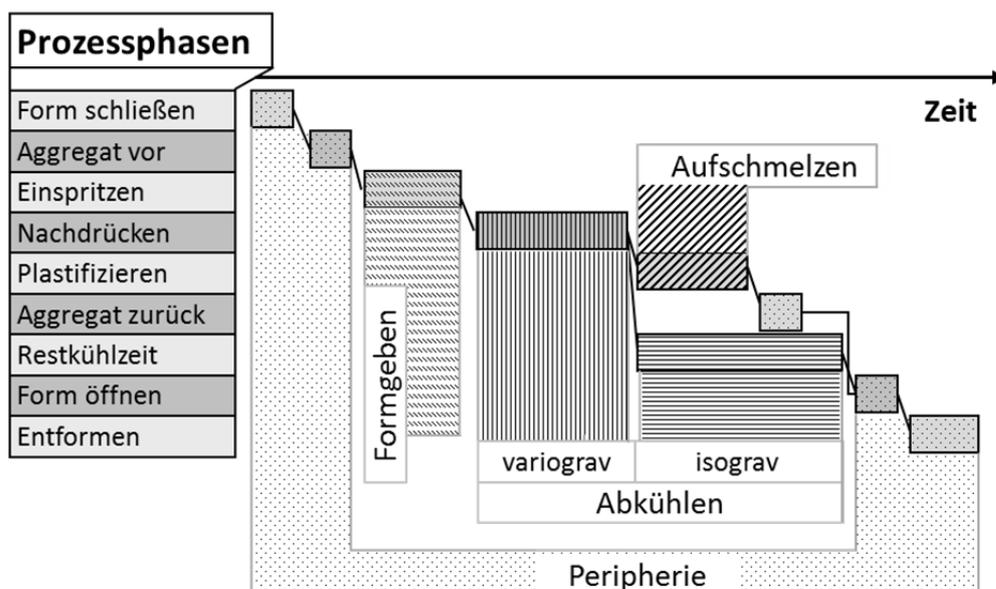


Abbildung 2-2: Verfahrenstechnische und maschinelle Unterteilung des Spritzgießzyklus

2.1.2 Einflüsse auf den Prozess und die Qualität

Der Ablauf in den einzelnen Prozessphasen – unter den gegebenen Rahmenbedingungen (Verschleißzustand, Restfeuchtegehalt, Temperaturhaushalt usw.) und Betriebsmitteln (Material, Werkzeugkonzept usw.) – bestimmt das Ergebnis des Produktionsprozesses². Diese Einflussgrößen, die über das Resultat eines Produktionsprozesses entscheiden, fasst Karuo Ishikawa in den folgenden fünf Kategorien zusammen [Ish86]: Mensch, Mitwelt, Material, Maschine und Methode. Vor allem die Faktoren der Kategorien Maschine und Methode sind zur Durchführung des Verfahrens bedeutsam.

Unter der Eingangsgröße Maschine sind dabei alle Gerätschaften zusammengefasst, die zum Fertigen des Produkts notwendig sind. Neben der Spritzgießmaschine zählen dazu z. B. auch das Werkzeug und dessen Temperierung. Das Verhalten der beteiligten Gerätschaften kann über die Prozessführungsmethode aktiv im Prozess gesteuert werden, sodass die in Abbildung 2-2 gezeigten Phasen durchlaufen werden. Bei der vierten Eingangsgröße (Methode) ist also in Bezug auf den Spritzgießprozess die Art der Prozessausführung zu verstehen. Sie entscheidet darüber, wann, wie und wo welche Information erfasst und wie diese Information weiterverarbeitet und als Befehl zu den Aktuatoren der Maschine weitergegeben wird. Bei den heute über Mikroprozessoren automatisierten Spritzgießanlagen und den dazugehörigen Gerätschaften übernimmt diese Aufgabe das Automationssystem (Autosys).

Das Automationssystem teilt den Prozess hierzu in die in Abbildung 2-2 abgebildeten Prozessphasen ein. In jeder Phase wird mindestens eine primär wichtige Aufgabe über einen Regler umgesetzt.³ Dies geschieht so lange, bis über das Erreichen eines Zustands durch die Prozessphasen-Steuerung zur nächsten Prozessphase umgeschaltet wird.⁴ Das Automationssystem des Spritzgießprozesses setzt sich dementsprechend aus mehreren Prozessphasen-Steuerungen und ihren Prozessphasen-Regelungen zusammen. Zum Durchführen dieser einzelnen Regelungs- und Steuerungsschritte nutzt das Automationssystem Informationen, die im Umfeld der Maschine, des Prozesses oder direkt aus den Qualitätsgrößen abgeleitet werden. Diese verarbeitet ein Algorithmus dementsprechend, dass der gewünschte Zielzustand eintritt.

Projiziert man diese Betrachtungsweise auf den vollautomatisch ablaufenden Spritzgießprozess, kann von den fünf Kategorien der Mensch ausgeklammert werden, da er in diesem Sinne lediglich bei der Initialisierung des Fertigungsverfahrens insofern eine Rolle spielt, als

² Als Ergebnis ist z. B. der Ressourcenverbrauch an Energie oder die erzeugte Produktqualität zu verstehen.

³ Beispielhaft läuft in der Einspritzphase die Regelung der Schneckenvorlaufgeschwindigkeit.

⁴ Für die Einspritzphase wäre dies z. B. das Unterschreiten eines Wegpunkts in der Schneckenposition.

er z. B. die Prozessparameter oder Produktionsrahmenbedingungen vorgibt. Es bleiben die in Abbildung 2-3 (1) aufgeführten Punkte, die zunächst in den Prozess eingehen. In Abhängigkeit der eingehenden Größen bilden sich Prozesszustände, wie z. B. ein Druck- oder Temperaturverlauf am Polymer aus. Diese sich ergebenden Prozesszustände und deren Eingangspunkte sind bestimmend für die resultierende Produktqualität. Der sich daraus einstellende Gesamtprozessablauf ist letztendlich wesentlich für das Produktionsergebnis verantwortlich.

2.1.3 Ursache für Schwankungen

Die in dieser Arbeit speziell betrachteten Schwankungen werden von den einwirkenden Störgrößen verursacht. Die Störgrößen verändern unkontrolliert die Produktionsrahmenbedingungen und können aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht verhindert werden. Sie wirken, wie Abbildung 2-3 (5) verdeutlicht, auf den gesamten Produktentstehungsprozess ein und beeinflussen die Zustände während der Fertigung. Resultierend verändern sich die Gegebenheiten in den Eingangsgrößen, die Prozessverläufe und letztendlich auch das Produktionsergebnis in Form der Qualität. Für den Verarbeiter gilt es, anhand der Prozesseinstellung, der Prozessführungsmethode und der Qualitätssicherungsmaßnahme die Auswirkungen der Störgrößen zu minimieren.

2.1.4 Zusammenfassung der Prozessbetrachtung

Abbildung 2-3 fasst die für diese Arbeit geltende Betrachtungsweise für das Spritzgießverfahren zusammen. Die wichtigsten Inhalte sind gemäß der Nummerierung im Anschluss erläutert.

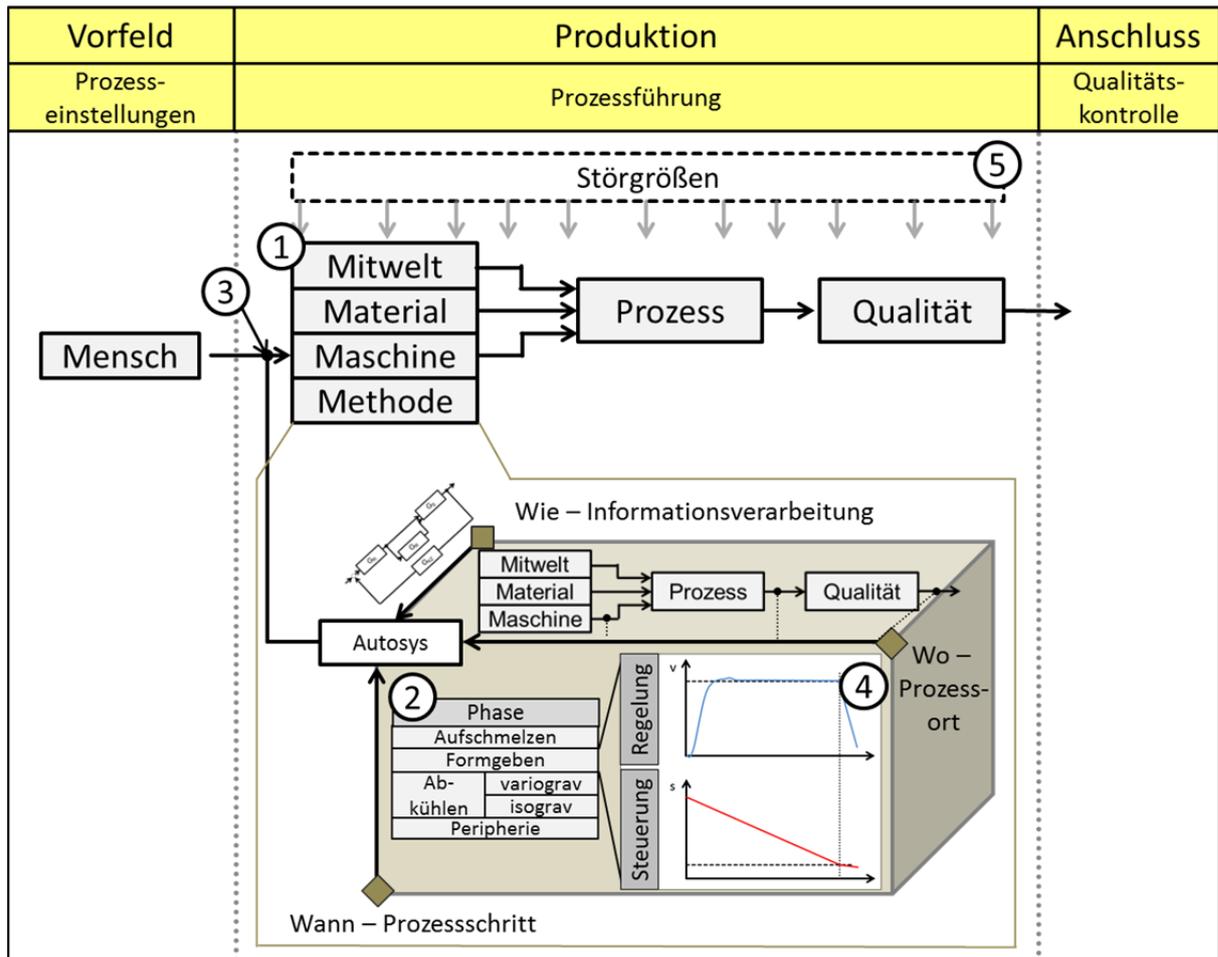


Abbildung 2-3: Wirkungsplan für den Spritzgießprozess

- ① Einflussgrößen aus den Kategorien Material, Mitwelt, Maschine und Methode bestimmen das Produktionsergebnis des vollautomatischen Spritzgießprozesses.
- ② Einteilen lässt sich der Urformprozess in die Arbeitsschritte Aufschmelzen, Formgeben und das variograve und isograve Abkühlen.
- ③ Zum Durchführen dieser Arbeitsschritte werden die Maschinenkomponenten über die Prozessführungsmethode gelenkt.
- ④ Hierzu laufen in jeder Produktionsphase eine Prozessphasen-Steuerung und eine Prozessphasen-Regelung.
- ⑤ Ursache für eine Änderung im Produktionsergebnis sind Störgrößen, die auf das Gesamtgeschehen einwirken.

2.2 Maßnahmen zur gesteigerten Reproduzierbarkeit beim Spritzgießen

Zum Erreichen des geforderten Qualitätsniveaus und zu dessen Sicherung wurden in der Vergangenheit mehrere Strategien entwickelt. Diese reichen aus produktionsnaher Seite gemäß Abbildung 2-3 von der Wahl der Prozesseinstellung im Vorfeld über die Art der Prozessführung, bis zum Verfahren der Qualitätskontrolle und -sicherung. Dieser chronologischen Gliederung folgend sind im Anschluss die in Wissenschaft und Industrie vorgeschlagenen und praktizierten Methoden aufgeführt.

2.2.1 Prozesseinstellung – Arbeitspunktbestimmung

In der Regel erfolgt die Ersteinstellung des Betriebspunkts bei der Abmusterung an der Produktionsmaschine. Der Einrichter nutzt zum erstmaligen Einrichten für gewöhnlich die in Materialdatenblättern oder anderen Leitfäden [Ste07, Bic08, Dem96, Lan04, Bay08, Kar07b] empfohlenen Grundeinstellungen. Werte wie die Schließkraft oder die Einspritzgeschwindigkeiten können über Näherungsformeln berechnet oder ggf. aus im Vorfeld durchgeführten Prozesssimulationen übernommen werden [Kar07c, CAD12]. Rein werkzeugabhängige Prozesseinstellungen, wie Umschaltzeitpunkt oder Nachdruckzeit und -profil, lassen sich über in der Literatur [Dem96, Jar08, Fei13, Kar07b] beschriebene Verfahren, wie z. B. das der Füllstudie, bestimmen. Die getroffenen Grundeinstellungen werden während des Einrichtungsprozesses anschließend vom Maschinenbediener iterativ auf die gewünschten Produkteigenschaften hin optimiert. Unterstützend können bei der Einrichtung oder Problembehebung Expertensysteme wie [URL13c, Bur99, URL13d] herangezogen werden. Der Vorgang und dessen Erfolg sind aber meistens überwiegend von der Erfahrung des Einstellers abhängig.

Es besteht weiterhin die Möglichkeit, den Spritzgießprozess systematisch in Hinsicht auf die Robustheit oder auf ein bestimmtes Eigenschaftsprofil zu optimieren. Dies kann über Daten geschehen, die aus einem vorgelagerten Versuchsplan oder direkt online in der Produktion erfasst wurden. Bei der Offline-Methode werden die Betriebsgrenzen über einen Versuchsplan abgefahren und dessen Ergebnis beurteilt. Über einen geeigneten Modellansatz lässt sich auf die gewünschten Zielwerte interpolieren [Kis11, MM09, Bou94, Pot98, WAK, BHS+12]. Bei der Online-Betriebspunktoptimierung handelt es sich um ein „Trial-Error-Verfahren“. Die Prozesseinstellungen werden über ein Variationsverfahren laufend verändert. Zur fortschreitenden Optimierung der Einstellung muss das Produktionsergebnis in Form von extern generierten Qualitätsdaten oder internen Zyklusinformationen in den Algo-

rithmus zurückfließen. Dieser entscheidet bei der Selektion, welche nachfolgende Veränderung die vielversprechendste Einstellung zum Erreichen des Optimierungszieles ist [Hau89, Bad89, OL95].

2.2.2 Verschiedene Prozessführungsmethoden für den Spritzgießprozess

Den Spritzgießprozess während des Produktentstehungsvorgangs dahingehend zu steuern, dass der geforderte Qualitätsstandard gefertigt wird, war seit Beginn dieses Fertigungsverfahrens verfolgtes Ziel in Industrie und Wissenschaft. Diesbezüglich gab es zahlreiche Entwicklungen bei den Prozessführungsmethoden. Darunter ist der Vorgang zu verstehen, wie auf die zu den Aktuatoren der Maschine gehenden Befehle geschlossen wird, um die Zielgrößen der Prozesseinstellungen einzuhalten. Dies ist Aufgabenstellung des Automatisierungssystems. Als Eingangsgrößen im Automatisierungssystem dienen über Sensoren erfasste Zustände, die mit den Sollwerten verglichen, weiterverarbeitet und als Befehl in die Maschine zurückgegeben werden. Bei der Einteilung der Verfahren lässt sich in jene unterschieden die Maschinen- und Prozesszustände führen und solche die direkt Qualitätsgrößen einregeln. Abbildung 2-5 auf Seite 38 bildet diese Einteilung grafisch ab.

2.2.2.1 Regeln von Maschinen- und Prozesszuständen

2.2.2.1.1 Aufschmelzen

Das Ende des Aufschmelzens, maschinentechnisch umgesetzt Plastifizieren genannt, ist mit der Bereitstellung des nötigen Schmelzevolumens bei der gewünschten Temperatur beendet. Die Temperaturerhöhung erfolgt über die durch die Schnecke eingebrachte Dissipationsenergie und den Wärmeaustausch zur temperierten Zylinderwand. In der heutigen Maschinentechnik sind die Einteilung und die Regelung der Zylindertemperatur in mehrere Zonen als Standard zu betrachten. Genauso sind die Schneckendrehzahl und der Staudruck über Stufen einstellbar und werden in der Prozessphase geregelt. Beendet ist der Plastifizierungsprozess nach dem Erreichen eines definierten Volumens im Schneckenorraum, was über den Dosierhub vorgegeben wird.

Bei den Anstrengungen, die Schmelzebereitstellung zu verbessern, lässt sich aus Sicht der Prozessführung in eine Viskositäts- und in eine Temperaturregelung unterscheiden. Bei gleichbleibenden Materialeigenschaften hängen diese Zustandsgrößen im Verarbeitungsbereich linear voneinander ab [Sch98, Kar07a]. Mit dieser Betrachtungsweise lässt sich über die Messung des leicht zugänglichen Fließwiderstands auf die Schmelztemperatur rück-

schließen. Weitere die Viskosität beeinflussende Faktoren, wie der Druck oder das zeitvariable Verhalten, werden dabei i. d. R. nicht beachtet.

Viskositätsregelung:

Bei der Fließwiderstands- oder Viskositätsregelung werden zur Detektion des Schmelzezustands entweder eigens dazu entwickelte Inline-Messinstrumente (z. B. Rheometerdüse) [Cav05, BDK01, Bei93, Gor05, Ama93, FOSXX] oder von der Viskosität beeinflusste Maschinen- und Werkzeugsignale genutzt. Bei zweitgenannter Methode wurde in der Vergangenheit eine Vielzahl von Möglichkeiten beschrieben. In [SR09a, SR02a] dient das während des Plastifizierens gemessene Schneckendrehmoment als Korrelationsmaß für die Viskosität. Eine weitere Methode verwendet die durch die Viskosität beeinflusste RSP-Schließzeit [Müt11, Thü09, GBR01]. Zu Beginn des Einspritzprozesses geht während der Verschlusszeit Schmelze über die Rückstromsperre verloren. Der zurückfließende Schmelzestrom, der auf die Flanken der Schnecke auftrifft, verursacht ein Drehmoment an der Schnecke. Über die Auswertung des entstehenden Rückdrehmoments lässt sich auf die Viskosität schließen [SR06a]. Weitere Verfahren zum Ermitteln der Viskosität nutzen im Werkzeug verbaute Sensoren. Im Schutzrecht [SR07] ist beschrieben, dass die Fließzeit von „Start Einspritzen“ bis zu einem definierten Punkt im Werkzeug viskositätsabhängig ist. Bei anderen Verfahren, die über zwei Drucksensoren oder einen Temperatursensor und einen Drucksensor [BK11] arbeiten, behilft man sich, genau wie bei den klassischen Rheometern, einer Differenzdruckmessung. Weicht eine über diese Verfahren gemessene viskositätsäquivalente Kennzahl ab, verändert der Regler die Zylindertemperatur, den Staudruck oder die Schneckendrehzahl über den Schneckenweg. Mit diesen Parametern wird über die Schmelzetemperatur Einfluss auf die Viskosität genommen.

Skalare Temperaturregelung:

Neben der Viskositätsregelung entstanden Methoden, welche die Schmelzetemperatur direkt über Temperatursensoren messen und daraufhin regeln [Gän86, Obe96, Blu96, Dub96, Tab01]. Die messtechnische Erfassung der Schmelzetemperatur stellt sich als äußerst schwierig dar und ist mit zusätzlichen Kosten für die Sensorik verbunden. Liu entwickelte ein Verfahren, das mithilfe der Maschinensensorik und eines Prozessmodells auf die Schmelzetemperatur schließt [Liu10]. Als Basis dient der Energieerhaltungssatz im Bilanzraum der Plastifizierung. Liu vernachlässigt den Energieeintrag über die Zylinderwand und beschränkt sich bei seinen Untersuchungen auf die Betrachtung der Dissipationsenergie. Die über den Motor eingebrachte Plastifizierleistung und die Rückzugsgeschwindigkeit über die Zeit sind die Zielgrößen des Regelungsverfahrens. Zum Einhalten der Sollwerte dienen die Drehzahl und der Staudruck als Stellgrößen.

Axiale Temperaturregelung:

Eine andere Variante der Temperaturregelung ist nicht nur einen skalaren Wert zu regeln, sondern die Temperaturverteilung im Dosierhub. Resultierend aus einer abnehmenden wirksamen Schneckenlänge und einer inhomogenen Zylindertemperatur ergibt sich nach dem Plastifizieren ein axiales Temperaturgefälle im Dosierhub [Cav05, Koh73]. Verschiedene Maßnahmen, um diesen axialen Temperaturgradienten zu messen [SR06b, SR99a, SR99b, PSS13] und konstant zu regeln [SR93a, Cav05, SR06c], sind beschrieben. In [SR11a] wird vorgeschlagen, den axialen Temperaturgradienten für die weitere Verfahrensführung zu nutzen. Ein negativer Temperaturgradient⁵ hilft dabei die Zykluszeit zu reduzieren, da die hintere kalte Schmelze im Plastifizierhub durch den Quellfluss in die Bauteilmitte eingelagert wird. Ist dieser in seiner Temperatur reduziert, kühlt das Formteil schneller ab und kann früher entformt werden. Ein positiver Temperaturgradient verhindert ein Verbleiben von Schmelzeinseln im Bauteil, weil das Bauteil hierbei zum Anguss hin einfriert.

Prozessphasen-Steuerung:

Standardmäßig beendet die Prozessphasensteuerung den Plastifizierprozess nach dem Erreichen einer fix definierten Wegmarke im Dosierhub. Dies ist auch bei den angegebenen Verfahren der Fall. Lediglich bei [SR99c, SR02a, Liu10] wird die ansonsten resultierende Sekundärprozessgröße der Dosierzeit eingeregelt.

Bei dem Prinzip der zyklusübergreifend arbeitenden Dosierwegregelung [Hun75] ist der Plastifizierhub variabel. Er wird zyklusübergreifend dahingehend eingestellt, dass die Schnecke zum Zeitpunkt, an dem der Werkzeuginnendruck abgebaut ist, am vorderen Endpunkt steht. Bei einer konstanten RSP-Schließzeit und identischen Druckverhältnissen im Plastifizierhub wird dadurch immer das gleiche Volumen ins Werkzeug eingebracht. Beide Einflussfaktoren sind jedoch signifikanten Schwankungen unterworfen [Sch09, Müt11, KWN01].

Weiterführende Systeme verhindern oder kompensieren den Schmelzeverlust nach dem Plastifizieren bis zu dem Punkt, an dem die Rückstromsperre geschlossen ist. Eine aktive Rückstromsperre schließt den Schneckenorraum durch ein Gegendrehen der Schnecke gesteuert ab [Ste12, URL13a, BG12]. Nachteilig hierbei ist in allen Fällen, dass der Sperring beim Plastifizieren mitdreht. Dadurch verringert sich die Standzeit des Systems. Das von der Firma Fanuc entwickelte System „Precise Metering“ wählt den Entlastungshub so, dass vor und nach der Rückstromsperre gleiche Druckverhältnisse herrschen und somit ein Schmelzefluss aufgrund eines Druckunterschieds unterbunden wird. Im Anschluss daran kann die Rückstromsperre passiv durch eine Verfahrensbewegung der Schnecke verschlossen werden [Fan05].

⁵ Negativer Temperaturgradient: Temperatur nimmt axial von der Düse zur Schneckenspitze hin ab.

2.2.2.1.2 Formgeben

In der Phase Formgeben/Einspritzen erhält der fließfähige Kunststoff durch das Aufbringen von Druck das gewünschte Abbild. Erstes Ziel lautet, dass Werkzeug so schnell wie möglich zu füllen, damit zu Beginn der Nachdruckphase eine möglichst hohe Werkstofftemperatur herrscht [SK04]. Dadurch kann sich der Druck in der Nachdruckphase gleichmäßig in der Form ausbreiten und die Molekülorientierungen haben die maximale Zeit, um sich im Inneren abzubauen. Diese Möglichkeit zur Relaxation verbessert in erster Linie die mechanischen Eigenschaften [Sar80, JM04]. Zweites Ziel ist eine gleichmäßige Verteilung dieser Orientierungen über das Bauteil. Begegnet wird diesen Forderungen standardmäßig über ein geregeltes Geschwindigkeitsprofil für den Schneckenanschub. Gehobene Systeme, die automatisch die Vorlaufgeschwindigkeit einstellen, sind nachfolgend aufgeführt.

Schergeschwindigkeitsregelung:

Der Orientierungsgrad ist beim Einspritzen von der Schergeschwindigkeit abhängig. Eine annähernd homogene Orientierungsverteilung über das Bauteil wird unter Voraussetzung einer regelmäßigen Wandstärke näherungsweise bei einer konstanten Fließfrontgeschwindigkeit erzielt. Die gleichbleibende Fließfrontgeschwindigkeit über den Fließweg resultiert in einem linear ansteigenden Druckverlauf im Werkzeug [MSL07]. Unter dieser Voraussetzung entwickelte Gruber einen Werkzeuginnendruckregler für die Einspritzphase [Gru05]. Der Regler bewirkt durch das stetig gleiche Ansteigen des Werkzeuginnendrucks die benannten Effekte. Eine Alternative zum Drucksensor zur messtechnischen Erfassung der Fließfrontgeschwindigkeit stellt der in [CG06] vorgestellte kapazitive Sensor dar. In einer Regelung fand er Verwendung, um eine konstante Formteilfüllung zu erreichen. Ein anderes System misst die Differenzzeit, welche die Schmelzefront zum Überwinden zweier Wegmarken benötigt, und berechnet daraus die mittlere scheinbare Schergeschwindigkeit [BK12]. Für diese Variante werden mindestens zwei Sensoren im Werkzeug benötigt [Pri12]. Der Regler passt das Einspritzprofil entsprechend einer konstanten Differenzzeit an und gleicht dadurch neben der Scherung auch die Einspritzzeit an. Die in den Spritzgießmaschinen der Firma Fanuc eingesetzte „A.I.-Druckkurvenregelung“ nützt die Schneckenvorlaufgeschwindigkeit als Stellgröße und regelt den Einspritzdruckverlauf eines Gutteils nach. In [Ker02] wird dadurch eine stabilere Füllung prognostiziert. Ein bedeutender Nachteil der beiden vorgestellten über den Druckverlust arbeitenden Systeme ist deren Abhängigkeit von der Viskosität oder der Temperatur. Dadurch ändert sich das Systemverhalten maßgeblich. Abhilfemaßnahmen dazu werden in [Sch11] diskutiert.

Abbremsen:

Während des Formfüllvorgangs verdrängt die vorströmende Masse die sich in der Kavität befindliche Luft. Über definiert eingebrachte Spalte, wie sie an Auswerfern, Kernen, der Trennebene oder speziellen Entlüftungen vorkommen, kann die Luft über den sich aufbauenden Druck aus der Kavität gepresst werden. Strömt die Masse zu schnell ins Werkzeug, bleibt der Luft nicht genug Zeit, um aus dem Werkzeug zu entweichen. Dies führt insbesondere zum Schluss des Formfüllvorgangs zu stark komprimierter Luft, die sich adiabatisch erwärmt und zu Verbrennungen an Bauteil und Werkzeug führt. In der Fachliteratur wird dieses Fehlerbild als „Dieseeffekt“ bezeichnet [Lüd01, Bas99]. Zur Vermeidung ist eine Verlangsamung der Fließfrontgeschwindigkeit zum Schluss des Formgebens anzustreben. Hierzu muss die Schneckenvorlaufgeschwindigkeit gegen Ende des Formgebungsprozesses gezielt abgebremst werden. Bei elektrischen Antriebssystemen ist dies leicht umsetzbar. Für eine gleiche Regelgüte auch in hydraulisch angetriebenen Spritzaggregaten entwickelte die Firma Arburg die „lagegeregelte Schnecke“ [Arb12]. Das gezielte Abbremsen gegen Ende des Einspritzvorgangs hilft nicht nur bei der Entlüftung und dem reproduzierbareren Einspritzen, sondern auch beim Anfahren des folgenden Nachdrucks.

Prozessphasen-Steuerung:

Die Prozessphasen-Steuerung, die das Umschalten von der geschwindigkeitsgeregelten Einspritzphase zur druckgeregelten Nachdruckphase einleitet, ist für die Qualität der Bauteile von besonderer Bedeutung. Ein frühzeitiges Umschalten führt in der folgenden Nachdruckphase für gewöhnlich zu einem Druckabfall in der Kavität. Dies ist der Fall, weil der über den Druckregler ausgegebene Stellwert für die Schneckenanschubgeschwindigkeit in der Regel viel kleiner als die Einspritzgeschwindigkeit ist. Der Druckabfall kann so weit führen, dass es zu einem kurzzeitigen Stocken oder sogar zum Stillstand der Fließfront kommt. Folglich können Fließfrontmarkierungen oder bei dünnwandigen Teilen unvollständig gefüllte Teile entstehen. Selbst bei optisch unveränderten Bauteilen beeinflusst der Umschaltpunkt innere Eigenschaften, wie z. B. die Orientierungen im Bauteil [Kud97, KisXXa].

Ist die Kavität bereits gefüllt und die Maschinensteuerung befindet sich noch in der Einspritzregelung, drückt die Schnecke so lange Material ins Werkzeug, bis ein Abbruchkriterium⁶ auftritt. Anfangerscheinungen dieses erhöhten Masseintrags sind Entformungsschwierigkeiten oder Gratbildungen, wodurch ein dauerhafter Werkzeugschaden am Überlaufort entsteht.

⁶ Schließkraft-, Spritzzeitüberschreitung, Druckbegrenzung, Umschaltpunkt usw.

Das Über- oder Unterfüllen der Form hat demzufolge für den Herstellungsprozess eine entscheidende Bedeutung. Eine rechtzeitige Drosselung des Schmelzeintrags in die Form sollte daher direkt nach der volumetrischen Füllung der Form geschehen. Zum wiederholgenauen Herleiten dieses Schritts wurden in der Vergangenheit mehrere Konzepte vorgestellt.

Maschineninterne Umschaltverfahren:

Die als klassisch bezeichneten Verfahren nutzen einzelne an der Maschinensteuerung verfügbare Signale. Dabei verwendete weg-, zeit- oder druckabhängige Signale werden auf die Überschreitung/Unterschreitung eines Schwellwerts überwacht. Bei dessen Über- oder Unterschreitung erfolgt die Umschaltung auf die druckgeregelte Nachdruckphase.

Die auf der Maschinenseite als erweitert bezeichneten Verfahren berücksichtigen für den Umschaltvorgang mehrere Signale, um die volumengenaue Einbringung der Schmelze zu verbessern. Alle diese Verfahren haben gemeinsam, dass der Wegpunkt, an dem der Einspritzprozess beendet wird, nicht fixiert ist, sondern von einem weiteren Signal abhängt. Aus der Sekundärinformation generieren die Verfahren die Verschiebung des Umschaltpunkts. Damit kompensieren sie Variationen in der Aufbringung des Volumenstroms. Ein Störfaktor, der bei der wegabhängigen Umschaltung nicht berücksichtigt wird, ist das zurückfließende Volumen, während sich die Rückstromsperre schließt. Verfahren wie in [SR08, SR10, Fan05] bestimmen diesen Anteil über die Auswertung des Rückdrehmoments der Schnecke zu Beginn der Vorwärtsbewegung. Weitere Verfahren zur Ermittlung der Rückstromsperrenschließzeit werden in [SR08, SW06, SR04, Fan05] vorgestellt und vorgeschlagen. Andere Methoden referenzieren über das Curve-Matching-Verfahren den Wegpunkt, an dem der Einspritzprozess beginnt, zum ansteigenden Drucksignal am Schneckenschaft [PGS12, Sch09, SR13] und ermitteln daraus den Beginn des verlustfreien Schmelzefflusses.

Weitere Konzepte bestimmen den volumetrischen Füllpunkt über maschineninterne Sensoren unmittelbar. Diese Konzepte erkennen die einsetzende Kompression anhand eines Druckgradienten [SR02b], der Werkzeugaufbiegung [Jae12, WZS99] oder des Rückdrückens der Schnecke [Jae12, Gis80]. Problem bei dieser Art der Umschaltung ist es oft, dass direkt der Zeitpunkt der volumetrischen Füllung erkannt wird. Der Umschaltvorgang beginnt jedoch erst nach einer Reaktionszeit die das System benötigt, um die Messdaten zu verarbeiten und den Schneckenvorschub abzubremesen. Währenddessen komprimiert die vorlaufende Schnecke die Masse fortlaufend, wodurch eine Überfüllung entstehen kann. Zum Verhindern dieses Effekts werden prädikativ und zyklusübergreifend arbeitende Methoden vorgeschlagen [SR05, SR97].

Werkzeuginterne Umschaltverfahren:

Für die Prozessphasen-Steuerung können auch im Werkzeug verbaute Sensoren genutzt werden. Neben dem klassischen druckabhängigen Umschalten erkennen andere Verfahren die Schmelzefront oder werten Drucksensoren dahingehend aus, damit die Kompression der Schmelze festgestellt werden kann.

Bei der Positionsbestimmung der Schmelzefront sind die Sensoren in der Regel mit definiertem Abstand zum Fließwegende angebracht. Der Abstand richtet sich in erster Linie danach, wie schnell das Gesamtsystem vom Eintreffen der Schmelze bis zur deutlichen Reduzierung der Schneckenbewegung benötigt. Zum Feststellen der Schmelzefront sind in [SR11b, Kud97] mehrere Varianten aufgeführt, die über einen binären Schalter die eintreffende Schmelze detektieren. Kudlik setzte hierzu z. B. einen optischen Sensor ein [Kud97]. Eine andere Methode [SR02c, Kön07, Bad08] verwendet den rapiden Anstieg eines Temperatursensors, der die Kontakttemperatur der Werkzeugwand misst, um den Umschaltprozess herbeizuführen. Das akustische Umschalten nutzt den Körperschall zum Erkennen der Schmelzefront [MK+13]. Ein Aktuator erzeugt beim Vorbeiströmen der Schmelze ein Schallsignal, das ausgewertet wird. Als Aktuator kann z. B. ein Auswerferstift dienen, der infolge des sich aufbauenden Schmelzedrucks auf die Halteplatte aufschlägt.

Die Methode des kompressionsabhängigen Umschaltens analysiert den Verlauf von Drucksensoren, um aus einer Steigungsänderung auf den Anfang der Kompressionsphase zu schließen. Diese Verfahren werden in [SR93b] beschrieben und sind in ähnlicher Form in einem Algorithmus im Kistler-Produkt „SmartAMP“ [KisXXb] enthalten. Ein weiteres Verfahren erkennt aus dem Differenzdruck aus zwei Drucksensoren den Zeitpunkt, in dem der Schmelzestrom nach der volumetrischen Füllung schlagartig einbricht [SR99d].

Nachdruckfreies Spritzgießen:

Eine Sonderform des Spritzgießprozesses ist das nachdruckfreie Spritzgießen [GK83, KF88]. Anders als bei den bisher vorgestellten Empfehlungen endet der Formgebungsprozess nicht mit der volumetrischen Füllung der Kavität, sondern erst mit dem Aufbau des Drucks, der zum Schwindungsausgleich benötigt wird. Dadurch hat die Masse maximale Zeit für die Relaxation. Bedingt durch die hohen entstehenden Drücke werden extreme Anforderungen an die Maschinen- und Werkzeugtechnik gestellt, sodass das Prinzip wegen seiner überdimensionierten Maschinenkomponenten unrentabel ist.

2.2.2.1.3 Abkühlen variograv

Hier wird der Stand der Technik und Wissenschaft über die bekannten Verfahren erläutert, die über die Druckführung in die Phase des Abkühlens eingreifen. Dies ist dann möglich, solange eine schmelzeflüssige Verbindung zwischen Plastifizierung und Kavität besteht. In der bisherigen Maschinentechnik erfolgt die Druckregelung über die Kraftmessung am Schneckenschaft oder die Hydraulikdruckerfassung am Zylinder. Alternative Verfahren, die über einen Drucksensor im Schneckenorraum arbeiten, zeigten Vorteile gegenüber den bekannten Systemen auf [BSS+09, Sch09, Sch11]. Aufgrund der Verschleiß- und der Störanfälligkeit bisheriger Sensoren konnte sich diese Variante der Druckregelung allerdings nicht durchsetzen [Joh04].

Der äußerst signifikante Einfluss des Werkzeuginnendrucks als Prozessgröße auf die Qualität wurde bereits früh erkannt [Sch11, Sti73]. Die direkte Regelung des nicht linearen, zeitvarianten und verzögerten Systems stellt jedoch eine komplexe Problemstellung dar [MG05, Bre11]. Aus diesem Grund konzentrierten sich frühe Regelungssysteme für den Werkzeuginnendruck darauf, zyklusübergreifend skalare Kennzahlen, wie einen Maximaldruck [Hel77] oder das Werkzeuginnendruckintegral [Ujm99], als Sollwert zu verwenden. Erst durch die Anwendung gehobener Regelungskonzepte war es möglich, den Werkzeuginnendruckverlauf direkt im Zyklus nachzufahren. Adaptive Regelungskonzepte sind durch modellbasierte prädikative Regelungsverfahren substituiert worden [Sch11]. Schreiber setzte ein System zur Werkzeuginnendruckregelung aufbauend auf der Arbeit von Gruber und Schaller um [Sch11]. Der dort verwendete modellprädikative Regler strebt im Betrachtungshorizont ein bestmögliches Einhalten der Sollwerte an und minimiert dabei über ein Optimierungsverfahren eine Gütefunktion, die das Systemverhalten widerspiegelt. Das Prozesswissen über die Regelstrecke erhält der Regler aus einem künstlichen neuronalen Netz. Festzuhalten bleibt, dass bisher bekannte Möglichkeiten zur Werkzeuginnendruckregelung sehr hohe Anforderungen an die Hardware, die Software und das Fachwissen des Bedienpersonals stellen.

Prozessphasen-Steuerung:

Die Nachdruckphase sollte so lange anhalten, bis sich das Bauteilgewicht nicht mehr erhöht, da somit die Schwindung über einen maximalen Temperaturbereich kompensiert wird. Eine längere Nachdruckzeit hat i. d. R. keinen nennenswerten Einfluss mehr auf die Qualität, kann aber ggf. die Energieeffizienz und die Zykluszeit des Prozesses negativ beeinflussen. Die minimale Nachdruckzeit wird an dem Punkt gewählt, an dem kein signifikanter Gewichtsanstieg in der Siegelkurve mehr erkannt wird. Dieser Prozess ist zeitaufwendig und sein Ergebnis kann sich ggf. während des Prozesses ändern [Gor09]. Beim „geschwindigkeitsab-

hängigen Nachdruckende“ stoppt der Nachdruck, wenn die Schneckenvorlaufgeschwindigkeit einen Wert erreicht, der nur durch die Leckströmung hervorgerufen wird. Aufgrund höherer Genauigkeit nutzt das Verfahren zur Geschwindigkeitsberechnung nicht die differenzierten Wegmesspunkte, sondern eine über Regression an die Messwerte angenäherte Exponentialfunktion [SR06d].

Bricht der Nachdruck in der Abkühlphase zu früh ab, ergibt sich ein Knick in der Werkzeuginnendruckkurve. Diesen erkennt ein in [SR97] beschriebenes Verfahren und erhöht die Nachdruckzeit solange, bis kein abrupter Abfall in der Werkzeuginnendruckkurve mehr erkennbar ist.

2.2.2.1.4 Abkühlen isograv

Ist der Kunststoff so weit verfestigt, dass keine Schmelze mehr über die Plastifizierung in das Bauteil eingebracht werden kann, bleibt das Gewicht konstant. Der Werkstoff wird nun noch so lange abgekühlt, bis er die nötige Steifigkeit erreicht, um, ohne Schaden zu nehmen, entformt werden zu können. Für eine hohe Produktivität regelt ein Temperiergerät Prozessparameter, die die Werkzeugtemperatur beeinflussen. Obwohl der Regelungsvorgang den gesamten Zyklus andauert, wird er in dieser Arbeit fortlaufend der Phase „Abkühlen isograv“ zugeschrieben.

Meist pumpt ein Temperiergerät Wasser mit definierter Vorlauftemperatur durch die Temperierkanäle des Werkzeugs. Die Durchflussmenge ergibt sich bei dieser Methode überwiegend aus der Pumpenleistung und dem Druckverlust im Kanalsystem. Über Wasserbatterien ist es möglich, den Durchfluss aktiv einzustellen, direkte und temperaturgeführte Durchflussregelung sind möglich. Bei der zweitgenannten Variante dient der Durchfluss als Stellglied zum Einstellen einer Rücklauftemperatur. Dadurch steigt die Temperiermitteltemperatur im Temperierkreis reproduzierbar an und verbessert die thermische Homogenität im Temperierkreislauf. Neben der Möglichkeit der Temperiermediumsregelung kann auch die Werkzeugtemperatur als Sollwert unmittelbar Einsatz finden. Störeinflüsse zwischen dem Temperiergerät und dem Sensor werden durch Anpassen der Vorlauftemperatur ausgeglichen [Hub09]. Der Fühler befindet sich zwischen der Werkzeugoberfläche und dem Temperierkanal.

Ein am SKZ entwickelter Inline-Thermografie-Regelkreis verändert die Werkzeugtemperatur gemäß der Oberflächentemperatur des Bauteils nach dem Entformen. Ein Handlingsystem führt das Bauteil nach dem Entformen vor eine IR-Kamera, welche die Oberflächentemperatur digitalisiert und mit einem Referenzbild vergleicht. Die Temperaturdaten werden den ein-

zelenen Temperierkreisläufen zugeordnet. Bei einer Abweichung kann über eine Ventilsteuerung der Durchfluss jedes Kreises verändert werden [SKZ11, KSB10].

Prozessphasen-Steuerung:

Das Ende der Abkühlphase ist erreicht, wenn die in der Steuerung definierte Kühlzeit abgelaufen ist. Dann öffnet die Form und das Bauteil wird entformt. Oft sind bei der Wahl der Restkühlzeit unnötige Reserven enthalten, die die Produktivität der Anlage vermindern. Ein über einen werkzeugwandbündigen Temperatursensor arbeitendes System ermittelt aus Material- und Sensordaten die Kontakttemperatur [SR06e, TSS04]. Nicht der Ablauf einer Zeit bestimmt bei diesem System den Entformungszeitpunkt, sondern ein Unterschreiten der Kontakttemperatur. Eine andere Variante der variablen Kühlzeit überwacht den Temperaturverlauf an der Kontaktfläche in Form eines Integrals. Überschreitet das seit Beginn der Einspritzphase wachsende Integral einen Grenzwert wird die Kühlzeit abgebrochen [SR06f]. Resultierend aus einer wechselnden Restkühlzeit ändert sich bei diesen Verfahren auch die Zykluszeit. Andere instationäre thermische Prozesse sind ggf. nicht an die Veränderungen in der Werkzeugwandtemperatur gekoppelt. Eine variable Kühlzeit verursacht deshalb unter Umständen vollständig andere Prozessgegebenheiten.

2.2.2.2 Qualitätsregelung

Bestimmte Qualitätsmerkmale mancher Bauteile können direkt nach der Herstellung anhand einer Online-Messung mit einer Kennzahl ermittelt werden. Als einfach messbare Größen wurden in [Lem85, Hüp85] das Bauteilgewicht und die Länge des Formteils ermittelt. Als Stellglied für den nächsten Zyklus veränderte der Regler die Nachdruckhöhe oder die Maschetemperatur, wodurch die Qualitätsgrößen auf dem Zielwert gehalten werden konnten.

In den meisten Fällen ist jedoch eine messtechnische Erfassung der Produktqualität direkt nach der Herstellung nicht umzusetzen. Hier lässt sich allerdings der werkzeugfallende Qualitätszustand über ein Modell prognostizieren. Die Möglichkeit der mathematischen Abbildbarkeit zwischen Maschinen- und Prozesszuständen und der Qualität konnte in zahlreichen Arbeiten belegt werden [Sch00, Vac96, Ujm99, Gie92, Hwm04]. Zur Prognose können physikalische (White-Box-Modell) und empirische (Black-Box-Modell) Modelle oder eine Mischung aus beiden (Gray-Box-Modell) verwendet werden. Auf Basis dieses Qualitätsmodells berechnet der Regler seinen Stellwert.

Korrelationsmodell:

Beim Einsatz dieser Methode wird ein bekannter Störeinfluss durch die Prozessparameter erkannt und mithilfe des in einem Modell abgelegten Wissens eine Stellgröße verändert, um

die Qualitätsveränderung auszugleichen. Wichtig ist dabei, dass die Stellgröße den Sensorwert nicht beeinflusst. Anwendung findet diese Methode vor allem bei der Kompensation von Viskositätsschwankungen, wie z. B. bei der Fließzahl-Regelung. Bedingt durch eine erhöhte Viskosität steigt bei konstanter Fließgeschwindigkeit der Druckbedarf. Während der Nachdruckphase, bei geregelter Druck am Schneckenschaft entsteht durch eine höhere Viskosität ein größerer Druckverlust bis in die Kavität, wodurch sich das Bauteilgewicht verringert. Zur Regelung wird aus Vorversuchen ein linearer Zusammenhang aus entstehenden Prozessparametern und der Bauteilqualität sowie einem Stellsignal und dessen Einfluss auf die Bauteilqualität hergestellt. Der daraus entstehende Linearitätsfaktor ist das Proportionalglied im P-Regler. In den bekannten Verfahren [Jar08, Eng02, SR09b] dient die Veränderung im Einspritzdruck oder dem Plastifizierdrehmoment zur Feststellung des Viskositätseinflusses. Diesem wird durch die Anpassung des Nachdrucks gegengesteuert.

Thermodynamische Modelle:

Das vom verarbeiteten Werkstoff eingenommene Volumen ändert sich mit der Temperatur und dem Druck. Der charakteristische Zusammenhang zwischen den drei Zuständen Druck, Temperatur und spezifisches Volumen ist für amorphe und teilkristalline Materialien bekannt und kann durch physikalische Modelle beschrieben werden [Sch86, Tai88, Blu96, Sch11]. Materialspezifisch sind aus praktischen Versuchen für das passende Modell die Koeffizienten des physikalischen Modells zu bestimmen. Versuchstechnische Einrichtungen zur Ermittlung des p v T -Diagramms sind in [MS08a, MS10, No04, Göt11] aufgeführt. In diesem Sinne stellt das p v T -Modell ein Gray-Box-Modell dar, das ein bekanntes qualitatives Materialverhalten durch Messdaten aus dem Laborgerät an den Anwendungsfall anpasst. Durch die Nutzung dieses Modells ist es möglich, über die entstehenden Prozessgrößen auf die Qualitätsgrößen zu schließen [Sch11] oder im Falle einer Regelung die Prozessgrößen gemäß gleichen Qualitätsgrößen zu führen. Die thermischen Verhältnisse während der Abkühlphase sind zwangsweise dynamisch und lassen sich im Prozess nur sehr schwer beeinflussen. Der Druck im Werkzeug hingegen kann durch die Veränderung des Volumens (bestehend aus Kavität, Angussystem und Schmelzevorraum) mithilfe der Schneckenbewegung sehr dynamisch verändert werden und bietet sich daher als Führungsgröße an. Es erfolgt eine Regelung des Werkzeuginnendrucks über die Temperatur und nicht über die Zeit. Auf die mittlere Temperatur im Bauteil schließen die bekannten Verfahren rechnerisch über die Abkühlrechnung oder durch die Messung mit einem IR-Sensor. Gemäß einem definierten Verlauf oder markanten Punkten im p v T -Diagramm schiebt die Schnecke bei der p v T -Regelung definiert Schmelze in die Kavität. Übergeordnete Zielsetzung ist es, dass der Druck im Werkzeug gezielt bei einer definierten Temperatur an die 0-bar-Linie im p v T -Diagramm herangeführt wird. Unter der Prämisse, dass zum Zeitpunkt, an dem der Druck im Werkzeug abge-

baut ist, die Formteilkontur der Werkzeugkavität entspricht und das weitere Schwindungsverhalten bis zur Umgebungstemperatur identisch ist, ergibt sich resultierend eine konstante Bauteilkontur. Durch diese Art der Prozessführung war es in zahlreichen Versuchen möglich, Schwankungen in der Temperaturführung auszugleichen [Ujm99, Bon82, Gru05, Mat85, MS08b]. Das zurzeit wohl am weitesten entwickelte Optimierungsverfahren dieser Art wird in [Sch11] erläutert. Schreiber identifiziert das pvT-Verhalten des Werkstoffs direkt an der Maschine im Werkzeug, in dem später auch die Regelung aktiv ist. Dieses Modell kann die Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern an der Maschine und der Bauteilqualität sehr genau vorhersagen. Der gehobene Regelalgorithmus erlaubt es, den Werkzeuginnen- druck anhand des Temperatursignals gezielt einzustellen. Problematisch bleibt die Detektion der Werkstofftemperatur in der Kavität.

Eine Sonderform der Prozessführung über Druck und Temperatur stellt die von Lauterbach [Lau89, ML89, SR91] entwickelte pmT-Optimierung dar. Bei dieser Variante ist das pvT-Konzept für den praktischen Anwendungsfall vereinfacht worden und an die Stelle des spezifischen Volumens tritt das Bauteilgewicht. Anhand der meist berechneten Bauteiltemperatur unterbricht der Regler zu einer gewissen Zeit die Massezufuhr zur Kavität über eine Verschlussdüse. Hiermit wird eine isochore Prozessführung erzwungen.

Statistische Modelle:

Für die wenigsten Anwendungsfälle ist der physikalische Zusammenhang zwischen Prozess- und Qualitätsgrößen bekannt oder exakt genug beschreibbar. Hier behilft man sich bei der Qualitätsmodellregelung mit statistischen Methoden oder Verfahren aus dem Bereich der „Computational Intelligence“ in Form eines künstlichen neuronalen Netzes und der Fuzzy-Logik [Sch09]. In der Wissenschaft beschäftigten sich folgende Arbeiten mit dieser Thematik der Modellierung und Regelung: [Vac98, Sch09, Ujm99, Ham04].

2.2.3 Qualitätskontrolle

Bekannte Methoden zur prozessnahen Qualitätssicherung in der Spritzgießfertigung sind die Statistical Process Control (SPC) und die Continuous Process Control (CPC) (siehe Abbildung 2-4). Der in den Begriffen enthaltene englische Ausdruck „Control“ ist nicht mit „Regeln“, sondern vielmehr mit „Kontrolle“ oder „Messen“ zu übersetzen. Diese Methoden sind behilflich, um eine Prognose über den Qualitätszustand der Produktionsmenge zu erhalten, und führen keinen Zustand aktiv herbei. Eine detaillierte Übersicht zu den vorgestellten Verfahren findet sich in [Sch00, Mus00, Vac96, Rau08].

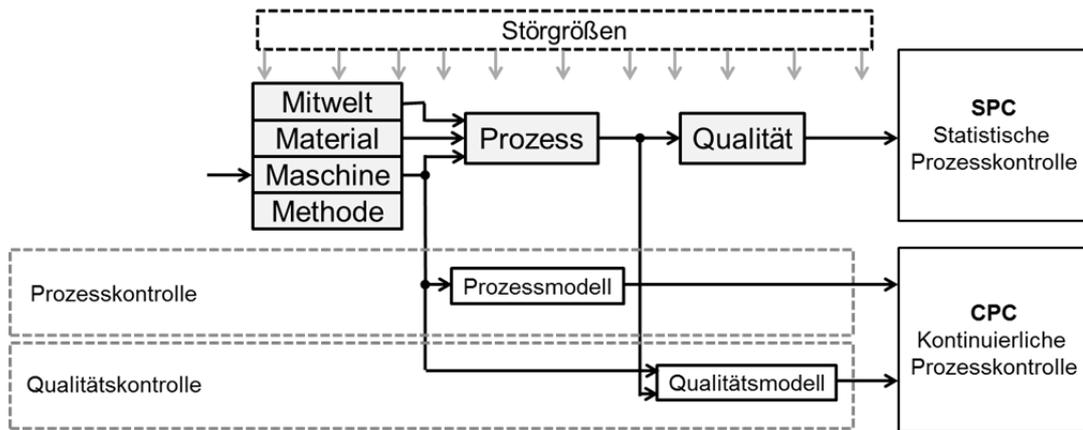


Abbildung 2-4: Verschiedene Maßnahmen zur prozessnahen Qualitätskontrolle

2.2.3.1 Statistische Prozesskontrolle (SPC)

Gängige Maßnahme zur Qualitätssicherung in der Kunststoffverarbeitung ist der Einsatz der statistischen Prozesskontrolle. Dabei wird durch die Auswertung einer Stichprobe auf die Beschaffenheit der Grundgesamtheit geschlossen. Als Kennzahlen für die Analyse dienen der arithmetische Mittelwert der Untersuchungsmenge und dessen statistische Verteilung in Form der Standardabweichung. Unter der Voraussetzung der Normalverteilung lässt sich mit diesen Kennzahlen schätzen, ob sich der Prozess statistisch im Toleranzfeld befindet. Werden zulässige Toleranzen und die statistische Auswertung der Stichprobe verrechnet, entstehen Maschinen- und Prozessindizes. Mit diesen dimensionslosen Zahlen ist es möglich, das Fertigungsmittel oder die Serienproduktion bauteilspezifisch auf ihre Genauigkeit hin zu beurteilen [Rau08, Fae09].

In Zeiten geringer Prozessorleistungen wurde versucht, über eine Stichprobe bei den leicht und schnell zugänglichen Prozesskennzahlen auf deren statistische Verteilung zu schließen und somit eine Aussage über die Qualität zu treffen. Mit steigender Rechenleistung ging diese Methode in die im folgenden Abschnitt 2.2.3.2 erläuterte kontinuierliche Betrachtung über. Durch stetige statistische Auswertung wird lediglich eine Filterung der Prozessdaten erreicht. Heute wird die statistische Prozesskontrolle nur noch am Endprodukt durchgeführt.

Angesichts der Charakteristik der SPC lassen sich keine Ausreißer in der Produktionsmenge erkennen. Außerdem ist die Rückmeldung über ein Verlassen der Toleranzgrenze mit einer langen Totzeit/Verzögerung behaftet. Wird das eigentliche Qualitätskriterium erst nach einer Liegezeit oder nachträglichen Arbeitsschritten beurteilbar, kann sich diese Verzögerung auf mehrere Tage erhöhen.

2.2.3.1.1 Kontinuierliche Prozesskontrolle (CPC)

Um die Nachteile der SPC-Methode bei gleichzeitigem minimalen Kostenaufwand zu eliminieren, kam es zur Entwicklung der kontinuierlichen Prozesskontrolle. Hierbei wird die während der Produktion entstehende Information genutzt, damit am Ende des Zyklus bauteil- oder zyklusspezifisch eine Aussage über die Qualität entsteht. Zur Umsetzung wird mit Prozess- oder Qualitätsmodellen gearbeitet. Sie stellen einen Algorithmus dar, mit dessen Hilfe qualitative oder quantitative Aussagen über die Prozessgüte oder die Produktqualität getroffen werden können.

2.2.3.2 Prozesskontrolle über ein Prozessmodell

Verlassen die Prozessparameter kritische Grenzen, wird die Qualität dadurch auch signifikant beeinflusst. Dies ist die Grundintention dieser Methode. Als Hilfsmittel zur Beurteilung des Prozesszustands dienen meist einfach zugängliche Daten aus der Spritzgießmaschine. Diese werden im Prozessmodell ausgewertet, um auf den aus den Eingangsgrößen entstehenden Prozesszustand zu schließen. Kennzahlen oder Kurvenverläufe, wie z. B. das Massepölster, die Fließzahl oder der Hydraulikdruckverlauf, verrechnet und überwacht das Modell. Verlässt der vorhergesagte Prozesszustand seine Toleranz, wird davon ausgegangen, dass spätestens an diesem Punkt auch die Produktqualität einen unzulässigen Bereich erreicht hat. Infolgedessen sortiert das System das Produkt aus oder ein Warnsignal erscheint. In allen gängigen Spritzgießmaschinen-Steuerungen sind Systeme dieser Kategorie verfügbar oder über externe Systeme nachrüstbar [Eng03, Bat07, ArbXX]. Im Produktionsumfeld sind diese Systeme selten anzutreffen. Sie überwachen i. d. R. der Einfachheit halber in einem einfachen Modell die Grenzwerte von Parametern und können daher den Qualitätszustand des Bauteils nur mangelhaft beschreiben [Gie92, Sch00, PWH+93a, PWH+93b, Häu95]. Methoden, die über Regressionsmodelle oder neuronale Netze den Prozesszustand mittels maschineninterner Signale prognostizieren, sind nicht bekannt, würden aber in diese Kategorie eingeordnet werden.

2.2.3.2.1 Qualitätskontrolle über ein Qualitätsmodell

Bei dieser Variante der zyklusspezifischen Qualitätsbewertung werden die Informationen aus der Maschine und dem Prozess genutzt, um die Qualität direkt bei der Entformung als Berechnungsergebnis vorliegen zu haben. Dies geschieht über im Vorfeld in Versuchen generierte Modelle. Eingesetzt werden z. B. Regressionsmodelle oder neuronale Netze. Als Modell kann aber auch die Überprüfung einzelner produktentscheidender Signale auf die Ein-

haltung von Grenzwerten angesehen werden. Anhand der Eingangsgrößen und des Prozesswissens im Modell lassen sich Schlussfolgerungen zur produzierten Qualität ziehen. Die Qualitätskontrolle kommt folglich durch eine Qualitätsprognose der Forderung einer 100%-Kontrolle nahe. Methoden dieser Kategorie werden in [Gie92, Han94, Mus00, Sch00] beschrieben oder vertrieben [Arb11, URL13b, MKS07].

2.3 Zusammenfassende Bewertung

In den zurückliegenden Kapiteln wurde erläutert, wie auf die bauteilspezifische Prozesseinstellung geschlossen und deren Qualitätsergebnis kontrolliert wird, sowie eine Übersicht der bekannten Prozessführungsmethoden zur Durchführung entsprechender Verfahren gegeben. Es folgt eine zusammenfassende Bewertung des Kenntnisstands und seiner Anwendung in der Praxis. Diese Bewertung ist das Ergebnis von zahlreichen kritischen Dialogen mit Maschinenherstellern, Verarbeitern und Branchenkennern.

Hauptverantwortlicher für die Einstellung des Spritzgießprozesses bleibt der Einrichter. Der Vorgang kann unterstützend durch Expertensysteme begleitet werden. Diese vereinfachen die Bedienung, stellen Methoden zur Verfügung, wie auf Einstellwerte geschlossen werden kann, oder bieten dem Einsteller Vorschläge für Verfahrensparameter an. Letztendlich ist aber nur der Mensch vor der Maschine imstande, mit Informationen aus der Fertigung, seiner Erfahrung, der angeeigneten Lehrmeinung und Tipps aus Expertensystemen den komplexen und immer individuellen Einstellprozess durchzuführen. Die systematische Einstellungsunterstützung mit Versuchsplänen ist ein nützliches Hilfsmittel zur Generierung von Prozesswissen bei neuen Prozessen, hat sich bei den alltäglichen Anwendungen aber als zu zeitintensiv und langwierig herausgestellt. Oft kommt der Einsteller über sein Prozesswissen schneller und einfacher zum Ziel. Der Mensch als wesentlicher Einflussfaktor auf den Prozess kann also (noch) nicht vollends ausgeklammert werden.

Die Methoden zur Prozessführung beim Spritzgießen lassen sich gemäß Abbildung 2-5 in solche unterscheiden, die Eingangssignale für die Steuerung direkt aus Sensoren erhalten, und solche, die Modelle nutzen, um rechnerisch aus den Werten verbauter Sensorik auf den Betrachtungszustand zu schließen. Bei den vorgestellten Verfahren der Maschinen-, Prozess- und Qualitätsgrößenregelung werden über Sensoren erfasste Zustände als Zielwert angefahren. Je weiter die Sensorik in den Prozess integriert wird, umso größerer finanzieller Aufwand für zusätzliche Sensorik und Messinstrumente entsteht. An die prozessnahe Sensorik wird dabei die Anforderung gestellt, unter hohem Druck und Temperatur bei geringem Bauraum zu arbeiten. Unter diesen Umständen werden die Sensoren störanfälliger und das

Regelungskonzept aufgrund des großen Abstands zwischen Sensor und Aktor umso komplexer. Das direkte Erkennen des Regelzustands über einen Sensor ist deshalb oft nicht möglich oder zu kostenintensiv. Unter diesem Aspekt kam es zur Entwicklung modellbasierter Regelungen, die als Prozess- und Qualitätsmodellregelung benannt sind. Bei ihnen wird über die Verarbeitung einfach zugänglicher und günstiger Informationen in einem Modell der zu ermittelnde Zustand prognostiziert. Diese modellbasierten Verfahren haben wiederum die Nachteile, dass sie zu ungenau oder zu zeit- und ressourcenintensiv sind. Außerdem können die Modelle aufgrund einer Systemveränderung auf kurze Zeit ihre Gültigkeit verlieren.

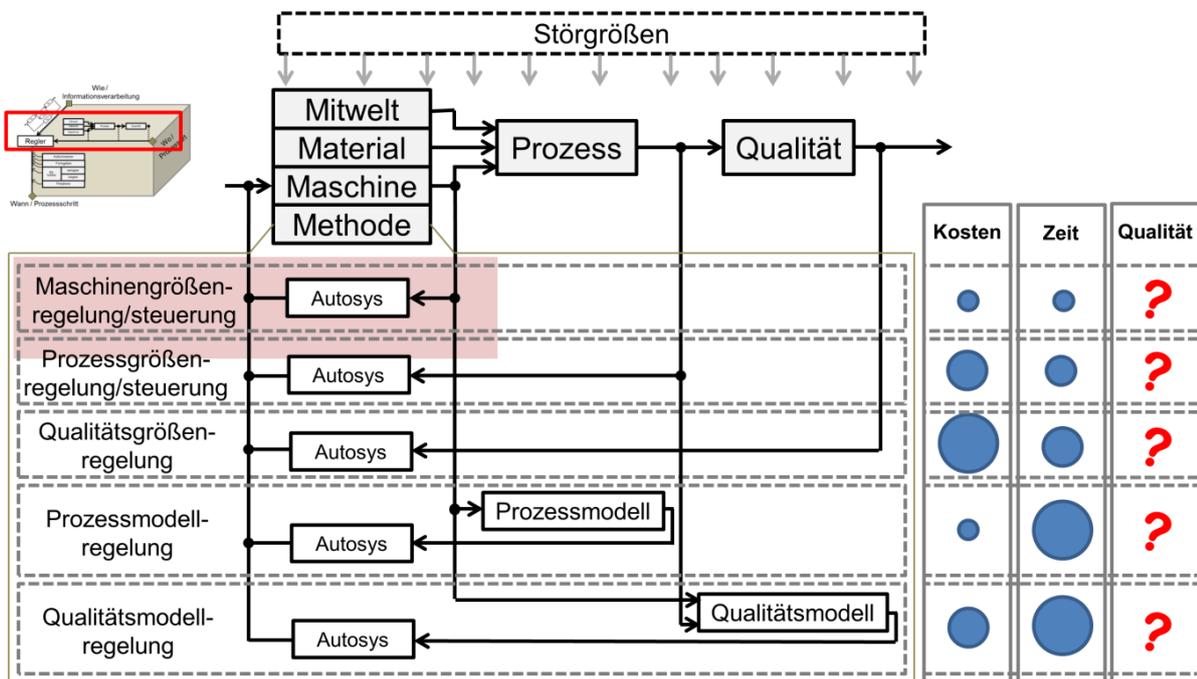


Abbildung 2-5: Einteilung der verschiedenen Prozessführungsmethoden und deren Bewertung

Somit ergeben sich im Vergleich der Prozessführungsmethoden in Bezug auf die Faktoren Zeit und Kosten die in Abbildung 2-5 veranschaulichten Bewertungskriterien. Mit vermehrtem Sensoreinsatz steigen die Kosten und der Zeitaufwand zum Einrichten der Regelung. Bei den modellbasierten Verfahren muss sehr viel Zeit für die Identifikation der Modelle aufgebracht werden. Ein Vergleich der Konzepte in Bezug auf ihre Qualitätskonstanz ist nicht bekannt. Ein Blick in die Fertigungen zeigt, dass bisher nur Methoden auf der Basis von Maschinen- und Prozessgrößen praktische Anwendung fanden. Dies lässt den Schluss zu, dass nur die dafür aufzubringenden Kosten und der Zeitaufwand vom verarbeitenden Gewerbe akzeptiert werden.

Für die Kontrolle des Produktionsergebnisses hat sich trotz seiner Nachteile die SPC bewährt. Dies ist die einzige Methode, mit der die Qualität über externe Messmittel sicher und übergreifend geprüft werden kann. Alternative Konzepte auf Basis von Prognosemodellen

haben sich in der Praxis nicht durchgesetzt. Die Gründe hierfür sind, dass ihre Vorhersagegenauigkeit zu ungenau und ein zu großer zeitlicher und logistischer Aufwand für das Prozesswissen der Modelle aufzubringen ist. Bei der Modellierung besteht außerdem stets die Gefahr, dass bei einem Materialwechsel oder sonstigen systemändernden Vorgängen das Modell keine Gültigkeit mehr besitzt.

3 Verwendete Betriebsmittel und Programme

Für die Klärung der in der Zielsetzung definierten Fragestellungen muss der Spritzgießprozess ganzheitlich analysiert werden. Der zu betrachtende Bilanzraum umfasst dabei die gesamte Fertigungszelle mit allen zur Fertigung des Produkts notwendigen Gerätschaften und Bereichen (Abbildung 3-1). Die Vorstellung der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Gerätschaften erfolgt in Kapitel 3.1. Damit Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge während des Fertigungsprozesses nachvollziehbar sind, müssen die Eingangsgrößen des Bilanzraums und die Prozesszustände im Bilanzraum verändert und gemessen werden können. Genauso ist die Analyse der im Prozess entstandenen Bauteilqualität für die in der Arbeit durchgeführten Untersuchungen wichtig. Die zur Charakterisierung der Eingangsgrößen, Prozesszustände und Ausgangsgrößen eingesetzten Sensoren, Messinstrumente und Analysegeräte werden in Kapitel 3.2 erörtert. Deren messtechnische Erfassung, die Auswertung und ggf. die Rückführung eines Stellsignals sind die Inhalte der darauffolgenden Kapitel. Im letzten Unterkapitel finden sich Informationen zu den verwendeten Materialien und den sich daraus ergebenden Prozesseinstellungen.

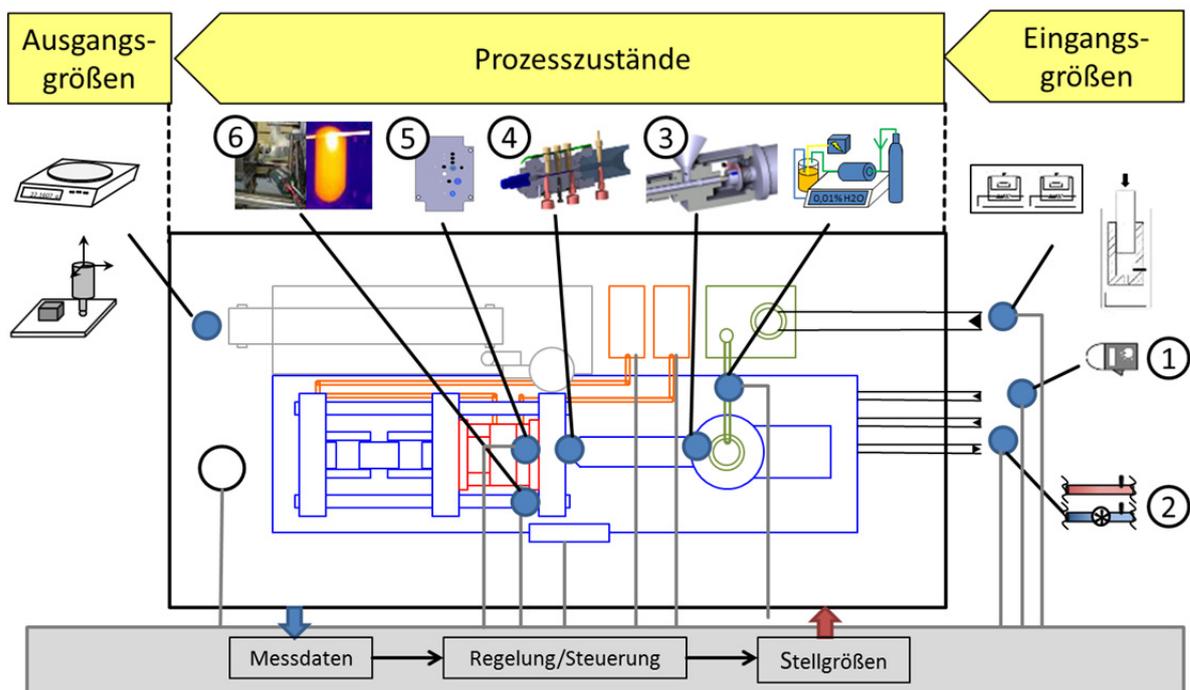


Abbildung 3-1: Schematischer Bilanzraum für die Untersuchungen mit ausgewählten Messinstrumenten aus Tabelle 3-2

3.1 Versuchsanlage, Werkzeug und Bauteile

Versuchsanlage:

Bei der in den Untersuchungen eingesetzten Spritzgießmaschine handelt es sich um eine vollelektrische Maschine mit Direktantrieb der Firma Krauss Maffei vom Typ EX 80-380. Die Plastifizierung verfügt über eine Standard-3-Zonenschnecke mit 30 mm Durchmesser. Stand der während des Plastifizierens entstehende Schmelzezustand nicht im Fokus der Untersuchungen, war auf der Plastifizierung eine Nadelverschlussdüse anstelle der Inline-Rheometerdüse verbaut (siehe S. 45). Zur Temperierung der beiden Formhälften versorgte je ein Temperiergerät Typ: teco cs 140 der Firma gwk das Verteilersystem integriert direkt desselben Herstellers. Mit dieser Zusatzeinheit kann eine temperierkreisspezifische Durchfluss- und Temperaturüberwachung sowie -regelung erfolgen. Zum Trocknen hygroskopischer Materialien kam ein nach dem Trockenluftprinzip arbeitender Motan Luxor 50 zum Einsatz. Weitere Peripheriegeräte wie ein Saugförderer oder ein Knickarmroboter erleichterten die Versuchsdurchführung. Die komplette Fertigungszelle befindet sich in einem vollklimatisierten Reinraum. Die Lüftung der Anlage bläst klimatisierte Luft über die an der Decke befindlichen Drallauslässe in den Reinraum. Damit eine Umwälzung der Luft erfolgen kann, führen bodennahe Absaugungen die Luft ins System zurück. Im Kreislauf der Lüftung ist eine Klimaanlage verbaut. Über die Parameter der Klimaanlage und der Lüftung lassen sich Faktoren aus der Umgebung wie Strömungsverhältnisse, Umgebungstemperatur oder die Luftfeuchtigkeit konstant halten oder deren Einfluss genauer untersuchen [KEG+11].

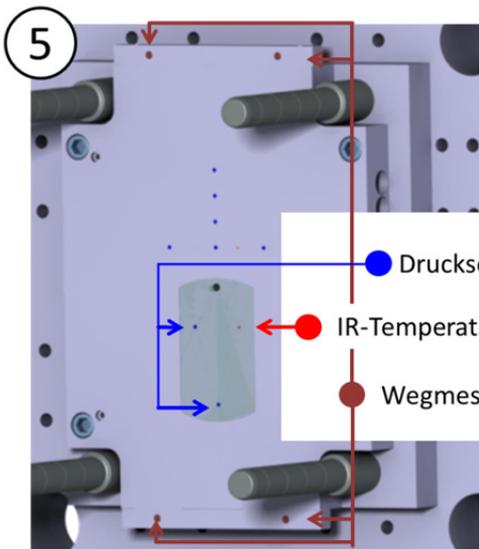
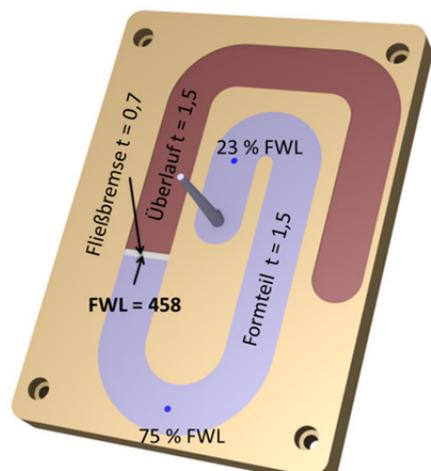
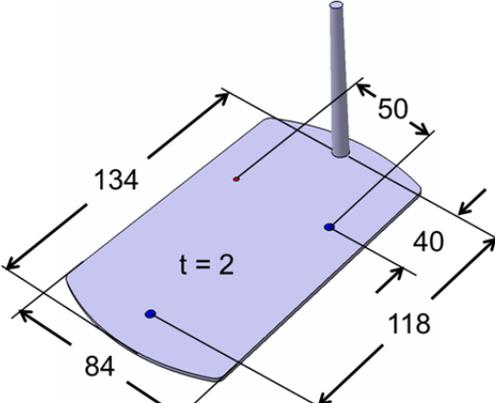
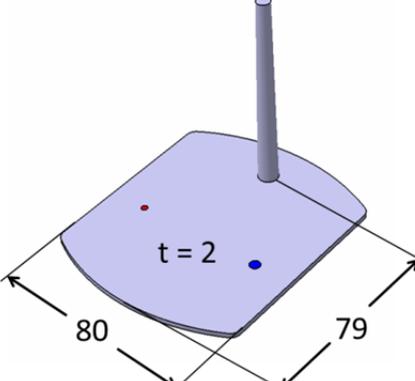
Werkzeug und Bauteile:

Das verwendete Werkzeug ist durch seinen modularen Aufbau flexibel einsetzbar. Auf der Auswerferseite können in die Formplatte verschiedene Einsätze eingebaut werden, die die Werkzeugkavität enthalten (siehe Tabelle 3-1 – Formeinsatz-Fließspirale). Die Düsenseite ist eine flache Platte, in der die kavitätsnahe Sensorik verbaut ist (Tabelle 3-1 oben). An verschiedenen Stellen sind im Werkzeug kombinierte Temperatur und Drucksensoren [Kis08pT] integriert. Neben dem Werkzeuginnendruck wird bei diesen Sensoren die Werkzeugwandtemperatur über ein Thermoelement bestimmt. Für die dynamische Messung der Bauteilquerschnittstemperatur ist ein IR-Sensor [FOS08m] im Werkzeug enthalten. Dritte Zustandsgröße im thermodynamischen Arbeitsprozess ist, neben dem Druck und der Temperatur, das Volumen. Die Veränderung des Kavitätäsvolumens während des Druckaufbaus kann über die an den vier Ecken befindlichen Wegaufnehmer [Bal11] begutachtet werden. Auf der beweglichen Seite befindet sich im Einsatz ein gesonderter Temperatursensor für die später verwendete Werkzeugwand-Temperatur-Regelung.

Tabelle 3-1 zeigt die für die Versuche verwendeten Bauteile und deren Benennung. Alle

verwendeten Versuchsteile sind über einen Stangenanguss angebunden. Zum späteren Bewerten des während der Einspritzung eingebrachten Volumens diente der Fließspiraleinsatz. Dort ist bei einer Fließweglänge von 458 mm eine Fließbremse eingearbeitet, bis zu der das Bauteil im eingerichteten Prozess gefüllt wird. Verändert sich durch eine Störung die Fließweglänge, steigt die Gefahr einer Über- oder Unterspritzung. Anhand der Fließweglängenänderung kann diese quantifiziert werden. Die weiteren verwendeten Versuchsteile sind als Platten ausgeführt. Für die Versuche war der Einsatz jeweils nach unten, wie in den Bildern in Tabelle 3-1 oben angedeutet, eingebaut. Bei allen Bauteilen befinden sich in dieser Einbaulage die Druck-Temperatursensoren an den blau mit großen Durchmesser gekennzeichneten Bauteilabschnitten. In Symmetrie zum angussnahen Drucksensor ist bei den Platten der IR-Temperatursensor [FOS08m] (kleiner roter Durchmesser) positioniert.

Tabelle 3-1: Für die Untersuchungen eingesetztes Werkzeug und Spritzgießbauteile

Versuchswerkzeug Düsenseite	Formeinsatz-Fließspirale
 <p>5</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Drucksensoren ● IR-Temperatursensor ● Wegmessensoren 	 <p>FWL = Fließweglänge – Anguss bis Fließbremse</p>
Methoden-Vergleich-Platte	pvT-Untersuchungen-Platte
	

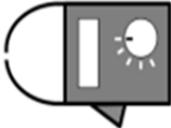
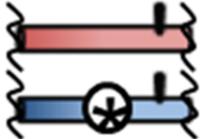
3.2 Sensorik, Messinstrumente und Analysegeräte

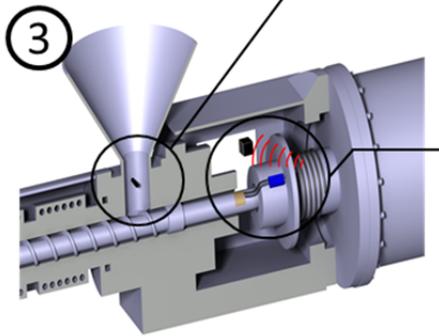
3.2.1 Analysegeräte zum Bestimmen der Materialeigenschaften

Der Restfeuchtegehalt hygroskopischer Kunststoffe lässt sich in einer sehr hohen Genauigkeit über die Karl-Fischer-Titration detektieren. Bei den für die Untersuchungen eingesetzten Geräten handelte es sich um ein auf dem OVEN SAMPLE PROCESSOR 874 basierendes System der Firma Metrom und den Abimed VA-05. Am DSC-Gerät der Firma TA-Instruments vom Typ MDSC 2920 wurden die thermischen Kennwerte generiert. Bei der rheologischen Analyse kam hauptsächlich ein Hochdruckkapillarviskosimeter zum Einsatz. Mit den Rheographen 6000 bzw. 25 (Göttfert) kann die Viskosität für verschiedene Schergeschwindigkeiten analysiert werden.

3.2.2 Wichtige Sensorik im Fertigungsumfeld

Tabelle 3-2: Wichtige Sensorik im Fertigungsumfeld

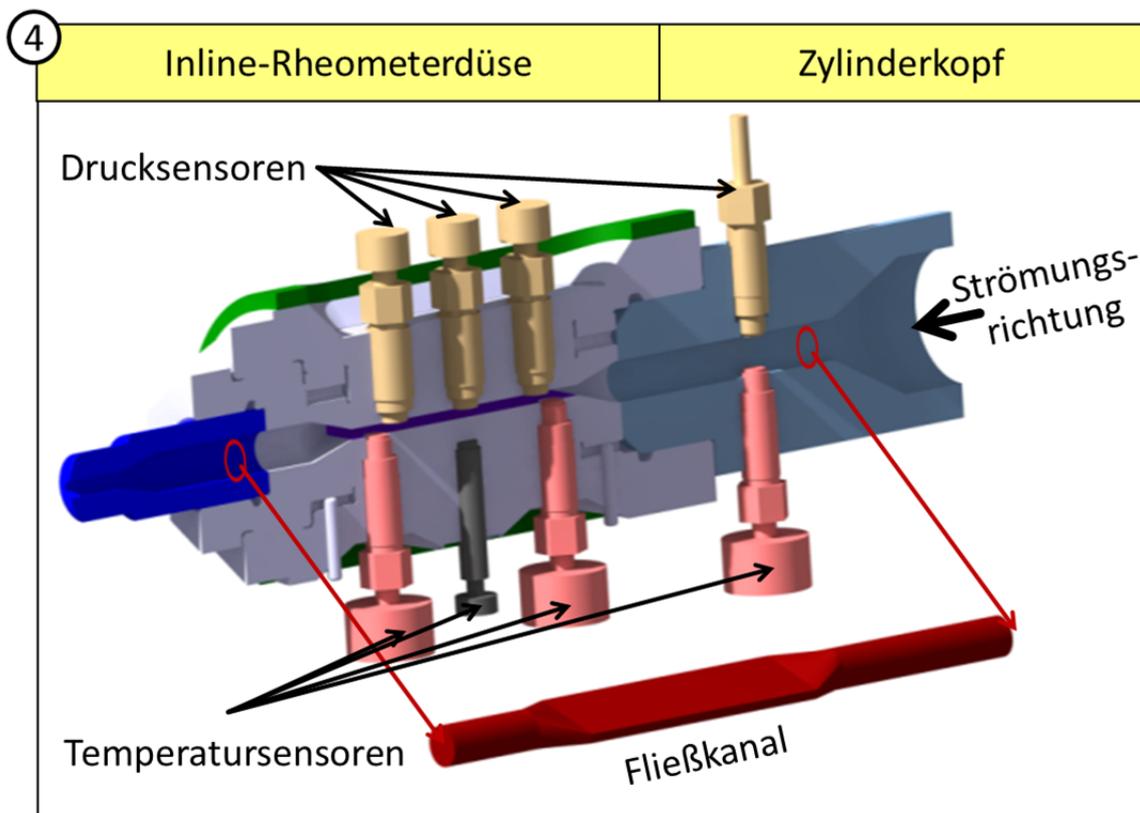
<p>①</p> 	<p>Elektrische Energie:</p> <p>Wesentlicher Energieträger zum Versorgen der Spritzgießfertigungszelle ist der elektrische Strom. Die Güte des in den Bilanzraum eingehenden und an jedem Verbraucher individuell anliegenden Dreiphasendrehstroms wird über Strommesszangen und Spannungswandler überwacht.</p>
<p>②</p> 	<p>Kühlenergie:</p> <p>Zweite essenzielle Energieform, die in den Bilanzraum eingeht, ist die über das Kühlwasser bereitgestellte Kühlleistung. Deren Verbrauch und Güte sind durch eine Temperaturmessung im Vor- und Rücklauf sowie anhand der Durchflussmenge festzustellen. All diese Messgrößen und der Vorlaufdruck sind für jeden Verbraucher messbar.</p>

**Materialtemperatur:**

Zwischen Trichter und Schnecke ermittelt ein Thermo-
element die Materialtemperatur.

Schneckendrehmoment:

Das an der Schnecke anstehende Drehmoment wird
über einen DMS auf der Schnecke erfasst und mithilfe
einer Telemetrieinheit per Funk an die Messdatener-
fassung weitergeleitet.

**Zylinderkopf:**

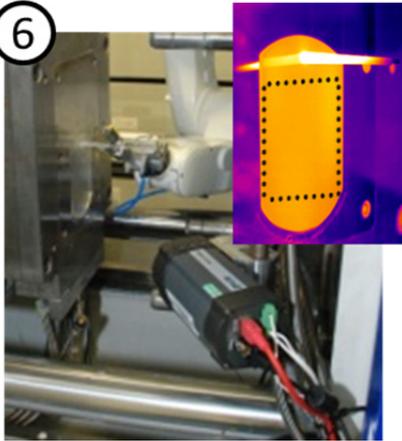
Im Frontbereich der Plastifizierung sind im Zylinderkopf ein Drucksensor [FOS08p] und ein auf dem Sensor [FOS08T] basierender IR-Temperatursensor zur dynamischen Schmelztemperaturbestimmung enthalten.

Inline-Rheometerdüse:

Für die Analyse des Schmelzezustands während des Spritzgießvorgangs ist im Laufe der Arbeit ein Inline-Rheometer entwickelt worden. Die Schmelze wird bei diesem Messinstrument während des Einspritzens durch eine Schlitzkapillare gepresst, über deren Länge drei

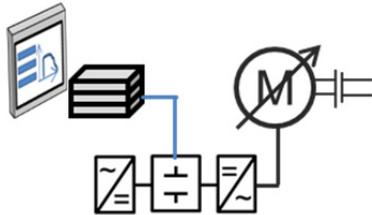
Drucksensoren [Kis09p] angeordnet sind. Die Auswertung der Differenzdruckmessung und der Einspritzgeschwindigkeit erlaubt einen Rückschluss auf die Schmelze-Viskosität. Am Ein- und Auslauf misst je ein weiterer IR-Sensor die Schmelzetemperatur.

6



Inline-Thermografie:

Der IR-Sensor im Werkzeug erfasst die Bauteiltemperatur nur an einem Punkt. Um einen Eindruck des thermischen Fingerabdrucks am Bauteil zu erhalten, kann durch eine IR-Kamera [Fli09] die Oberflächentemperatur direkt vor dem Entformen gemessen werden.



Frequenzumrichter-Daten:

Neben der hohen Präzision haben elektrisch angetriebene Systeme zudem den Vorteil, dass der vom Antrieb aufgenommene Strom in Verbindung mit dem anstehenden Drehmoment steht. Die Versorgung der Antriebe übernimmt ein Frequenzumrichter, dessen Betriebsdaten sich über die Inbetriebnahmesoftware STARTER der Firma Siemens auslesen lassen.

3.2.3 Messmittel zum Untersuchen der Bauteilqualität

In vielen Untersuchungen konnte die Korrelation des Bauteilgewichts mit den Produkteigenschaften nachgewiesen werden. Es besteht ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Werkstoffdichte und den Abmessungen oder den mechanischen und optischen Bauteileigenschaften [DuPXX, Bou94, OFM11]. Daher soll auch in der vorliegenden Arbeit das Bauteilgewicht als Qualitätskriterium betrachtet werden. Das Gewicht der Bauteile konnte mit der Hochpräzisionswaage Precisa 205 A SCS erfasst werden. Beim mehrfachen Wiegen des gleichen Bauteils war eine Wiederholgenauigkeit mit einer Standardabweichung von 0,1 mg möglich, was bei den später produzierten Teilen relativ weniger als $0,5 \times 10^{-3} \%$ des Bauteilgewichts ausmacht. Die Bauteilmasse lässt eine globale Bewertung der Produkteigenschaften zu. Besonders in Kapitel 6.2 ist aber eine lokale Analyse der Produkteigenschaften not-

wendig. Dies geschieht über das Erfassen der Bauteilabmessungen. Zum Vermessen der Bauteilgeometrie muss das Probeteil auf einer Messvorrichtung aufgespannt werden. Erst wenn es in einer definierten Position angebracht ist, kann es durch eine Koordinatenmaschine oder mit Messuhren vermessen werden. Abbildung 3-2 zeigt den Aufbau zur angussnahen und angussfernen Bewertung der Bauteilbreite mithilfe von Messtastern. Bei diesem System zeigte sich nach dem Ein- und Ausspannen des gleichen Bauteils eine Wiederholgenauigkeit von 0,002 mm (relativ $2,2 \times 10^{-3} \%$).

Zum Beurteilen, des während des Einspritzens eingebrachten Volumens, dient später die Fließweglänge, die im Fließspiraleneinsatz (in Tabelle 3-1) zurückgelegt wurde. Die messtechnische Erfassung geschah ausgehend von eingebrachten Markierungen mithilfe eines Messschiebers. In Wiederholmessungen ergab sich eine Reproduzierbarkeit von 0,01 mm (relativ $2,2 \times 10^{-3} \%$).



Abbildung 3-2: Messaufnahme zum Vermessen der Versuchsteile

3.3 Messsystem und Auswertungssoftware

Für die spätere Bewertung der Versuche müssen die während des Prozesses zeitlich variablen Zustände aufgezeichnet und mit den extern gewonnenen Einzelwerten vereint werden. Die zentrale Datenerfassung (Abbildung 3-3 links) der Sensordaten läuft auf einem Messrechner, der die Informationen in einem ASCII-File mit einer Abtastrate von 500 Hz protokolliert. Maschineninterne Daten aus den Sensoren oder der Steuerung werden über eine vom Maschinenhersteller zur Verfügung gestellte Schnittstelle in Echtzeit über ein Ethernet-Bus-

Protokoll zum zentralen Messrechner weitergeleitet. Weiter zusätzlich im Bilanzraum verbaute Sensorik wird über geeignete Module erfasst und mit einem internen Bussystem dem Messrechner zugeführt. Durch den Einsatz eines zentralen Messrechners ist eine zeitsynchrone Erfassung sämtlicher zeitvariabler Größen im Fertigungsumfeld möglich. Erst dadurch lassen sich z. B. der Anstieg im Werkzeuginnendruck zum Start des Einspritzsignals in Bezug setzen.

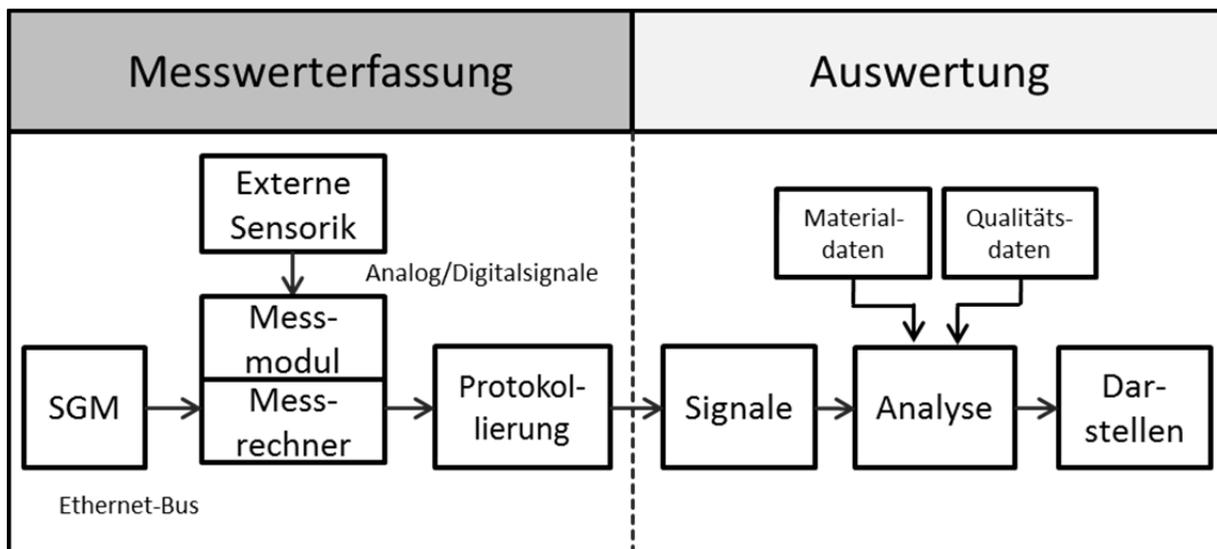


Abbildung 3-3: Schematischer Ablauf für die Messwerterfassung und Auswertung

Zum Auswerten der Datenmengen (Abbildung 3-3 rechts) ist es zunächst notwendig, aus den protokollierten Werten über Kalibrierkonstanten physikalische Signale zu berechnen. Hierzu wurde die Software DIAdem 2012 der Firma National Instruments genutzt. Im View-Modus dieser Software ist eine erste praktikable Sichtung der Messdaten möglich. Die weitere Verarbeitung der Daten erfolgte im Programm SGM-Analyse, das auf der Programmiersoftware LabVIEW basierend für diesen Zweck entwickelt wurde. SGM-Analyse verrechnet einzelne Signale zueinander, ordnet spezielle Signalausschnitte den Zyklen zu und leitet daraus Kennzahlen ab. Letztendlich lassen sich die Kennzahlen mit den extern gewonnenen Material- und Qualitätsdaten vereinen. Zur weiteren Visualisierung der Versuchsdaten bietet die Software OriginLab vielseitige Möglichkeiten.

Im zweiten Teil dieser Arbeit werden alternative Verfahrensmethoden entwickelt. Hier gilt es, nicht nur Messdaten zu erfassen, sondern diese auch in entsprechenden Algorithmen weiterzuverarbeiten und als Stellsignal an die Spritzgießmaschine zu senden. Die dafür eingesetzte Steuerung cRIO-9022 stammt von der Firma National Instruments und wird über die Software LabVIEW programmiert. Das CompactRIO-System vereint I/O-Module, einen programmierbaren FPGA und einen Embedded-Controller [URL13e]. Über eine Netz-

werkverbindung können mit einem Windows-System Daten ausgetauscht werden. Abbildung 3-4 zeigt die einzelnen Baugruppen, deren Aufgaben im Regelungssystem und die Zykluszeit der darauf laufenden zeitkritischen Schleife.

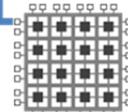
Hardware	Programmaufgabe	Abtastung
Windows System 	<ul style="list-style-type: none"> • Bedienfeld & Visualisierung • Kennzahlberechnung • Protokollierung • Adaptive Reglereinstellung 	Zyklus > 5 s
Embedded-Controller 	<ul style="list-style-type: none"> • Regelung • Prozessphasenmanagement 	4,0 ms
FPGA 	<ul style="list-style-type: none"> • Skalieren phys. Einheit <-> Spannung • Prozessphasen-Steuerung-Formgeben (externes Umschalten) 	0,1 ms
		

Abbildung 3-4: Aufbau des Regelungssystems zur externen Steuerung des Spritzgießprozesses

Das Windows-System stellt die Benutzerschnittstelle dar. Neben der Visualisierung und Bedienung können auf dieser Ebene die in der Steuerung enthaltenen Variablen und I/Os protokolliert werden. Außerdem sind auf diesem Kernel rechenintensive zeitunkritische Aufgaben platziert. Dazu zählen die Berechnung von Kennzahlen und die Identifikation der Reglerparameter. Der zeitkritische Regler zum externen Steuern der Spritzgießmaschine für die Prozessphasenregelung (Kapitel 6.2) läuft auf einem echtzeitfähigen Embedded-System mit einer minimalen Zykluszeit von 4 ms. Das Embedded-System erhält die Prozessdaten aus einem programmierbaren FPGA, der direkt auf die I/Os zugreifen kann. Diese werden zunächst im FPGA konvertiert. Damit ist ein Umrechnen der ein- und ausgehenden Spannungssignale in physikalische Werte gemeint. Als weitere Aufgabe läuft auf dem FPAG die Logik, mit der auf ein Umschaltsignal zum Beenden des Einspritzvorgangs geschlossen und der Vorgang eingeleitet wird. Dort ist ein sehr schnelles Agieren notwendig. Auf dem FPGA war eine Zykluszeit von 0,1 ms möglich.

3.4 Versuchsmaterialien und Zykluseinstellungen

Die in der Arbeit durchgeführte praxisrelevante und ganzheitliche Untersuchung des Spritzgießprozesses macht es notwendig, eine für den Versuchshintergrund spezifische Prozesseinstellung und ein geeignetes Material einzusetzen. In Tabelle 3-3 ist eine Übersicht aufgeführt, die die verwendeten Materialien mit einem Vermerk zum Versuchszweck den jeweiligen Kapiteln zuordnet. Aufgrund der weiten Verbreitung, der einfachen Handhabbarkeit und des breiten Prozessfelds, welches das Material Polypropylen abdeckt, wurde es als Hauptversuchsmaterial eingesetzt. Wurde im Versuch ein anderes Material gewählt, wird dies explizit erwähnt.

Ergänzt wird die Materialauswahl in Tabelle 3-3 durch verschiedene Materialtypen, bei denen mehrere Chargen gesammelt wurden, um die in der Praxis auftretenden Schwankungen auf der Rohstoffseite zu untersuchen und zu bewerten. Diesbezüglich wurde Kontakt zu Rohstoffherstellern, Distributoren und Verarbeitern aufgenommen. Bei ihnen geschah eine selektive Auswahl der durchlaufenden Rohstoffchargen. Ausgewählt wurden für die weiteren Versuche Rohstoffchargen, die die Bandbreite der Rohstoff-Spezifikationsgrenzen abdecken. Schließlich konnten für die folgenden Untersuchungen die in Tabelle 3-4 aufgeführten Rohstoffchargen gesammelt werden.

Bis in Kapitel 6 gesonderte Prozessführungsmethoden eingeführt werden, läuft das Verfahren im Standard-Spritzgießprozess, wie er heute in den Maschinensteuerungen aller Hersteller verfügbar ist. Im betrachteten Fall ist die Druckregelung auf einen Kraftmessring referenziert, der kraftschlüssig mit dem Schneckenschaft verbunden ist. An der Schneckenspritze befindet sich eine Ring-Rückstromsperre. Diese schließt am Anfang des Einspritzvorgangs bedingt durch den Fließwiderstand der Schmelze. Nach dem Erreichen einer Wegmarke wird auf den Nachdruck umgeschaltet. Dieser Punkt ließ sich über eine Formfüllstudie bestimmen und repräsentiert den Punkt, nach dem die Form zu 99 % gefüllt war. Zum reproduzierbaren Temperieren der Form regelt das Temperiergerät die Vorlauftemperatur des Temperiermediums. Die Prozesseinstellungen und -zeiten für den Versuchszyklus sind stark materialabhängig und wurden diesbezüglich angepasst. Somit ergaben sich für die oben aufgeführten Materialien die in Tabelle 3-3 und Tabelle 3-4 dargestellten Prozessparameter.

In Kapitel 6 werden weitere Prozessführungsmethoden getestet, die andere Wege in der Prozesssteuerung und -regelung gehen. Die hierzu vorangegangenen Untersuchungen aus Kapitel A.1 zeigten, dass sich Schwankungen in der Formgebungsphase nur bei Prozessen mit sehr schnellem Einfrierverhalten abzeichnen. Bei langen Einfrierzeiten, wie sie bei teil-

kristallinen Werkstoffen oder dicken Wandstärken auftreten, gleicht die Nachdruckphase die Schwankungen in der Formgebungsphase aus. Diese Erkenntnis ist auch bei der Auswahl der Versuchszyklen in Kapitel 6 berücksichtigt worden. Für die Formgebungsphase werden für die Prozessphasen-Steuerungen, die von der geschwindigkeitsgeregelten Einspritzphase in die druckgeregelte Nachdruckphase umschalten, neue Methoden entwickelt und mit bekannten verglichen. Die Untersuchungen konzentrieren sich auf zwei Aspekte. Im ersten Versuch wird mithilfe der dünnwandigen Fließspirale und eines nachdruckfreien Prozesses das während des Einspritzens eingebrachte Volumen bestimmt. Im zweiten Versuch mit der Methoden-Vergleich-Platte soll untersucht werden, wie sich die Schwankungen im Volumen auf das Bauteilgewicht bei einem Prozess mit einer Nachdruckzeit von 0,3 s auswirken.

Bei den alternativen, neu entwickelten Prozessführungsmethoden in Kapitel 6.2, bei denen für die Prozess-Regelung in den verschiedenen Phasen neue Regelgrößen betrachtet werden, basiert der Zyklus auf dem in dieser Arbeit standardmäßig verwendeten Polypropylen.

Tabelle 3-3: Übersicht über die in der Arbeit verwendeten Versuchsmaterialien

Kapitel	Material	Hintergrund der Verwendung	Zykluszeit [s]	Einspritzzeit [s]	Dosierhub [D]	Staudruck [bar]	Drehzahl [1/min]	T-Zylinder [°C]	T-Wzg [°C]
4	Sabic PP 575P	Hauptuntersuchungsmaterial	25	0,63	1,7	100	200	220	30
	Sabic PP 571P Sabic PP 576P	Einstellen verschiedener Viskositäten. Für Zwischenstufen sind Mischungen angefertigt worden.	25	0,63	1,7	100	200	220	30
5	Sabic PP 575P	Hauptuntersuchungsmaterial	25	0,63	1,7	100	200	220	30
	Makrolon 2605	Einfluss des Restfeuchtegehalts, höhere Prozesstemperaturen	20	0,51	1,6	100	100	300	90
Untersuchungen zu Rohstoffchargenschwankungen siehe Tabelle 3-4									
6	Sabic PP 575P	Hauptuntersuchungsmaterial – Prozessphasen-Regelung	25	0,63	1,7	100	200	220	30
	Sabic PP 571P	Viskositätsänderung – Prozessphasen-Regelung	25	0,63	1,7	100	200	220	30
	Millad® NX™ 8000	Nukleierungsmittel zum Ändern der Rekristallisationstemperatur	25	0,63	1,7	100	200	220	30

Sabic PP 575P	Hauptuntersuchungsmaterial – Prozessphasen-Steuerung – Fließspirale (oben) – Platte (unten)	14*	0,54	1,3	100	200	220	25
		17*	0,61	1,6				
Sabic PP 571P	Viskositätsänderung – Prozessphasen-Steuerung – Fließspirale (oben) – Platte (unten)	14*	0,54	1,3	100	200	220	25
		17*	0,61	1,6				

* Entnahme über Knickarmroboter ca. 3 s

Tabelle 3-4: Übersicht über die untersuchten Rohstoffchargetypen

Material-Kürzel	Beschreibung	Anzahl Chargen	Zykluszeit [s]	Einspritzzeit [s]	Dosierhub [D]	Staudruck [bar]	Drehzahl [1/min]	T-Zylinder [°C]	T-Wzlg [°C]
PP	Niedrigviskoses Controlled Rheologie Polypropylen, Homopolymer	10	24,7	0,63	1,65	100	200	220	30
PC	Mittelviskoses Polycarbonat	6	20,2	0,51	1,63	100	100	300	90
ABS	Im Masse-Verfahren hergestelltes Acrylnitril-Butadien-Styrol	4	16	0,59	1,67	150	200	250	60
PP+EPDM	Mineralgefülltes und schlagzäh modifiziertes Polypropylen	4	20,9	0,54	1,67	90	200	220	30
PA66	Hitzestabilisiertes Polyamid 66	5	25,4	0,55	1,72	80	150	220	30
Reg	Regranulat aus Sabic PP575P mit einem Recyclatanteil von 100 %/75 %/50 %/25 %/0 %	5	19,3	0,51	1,61	60	130	300	90

4 Bewertung der Prozesszustände durch Kennzahlen

4.1 Grundlagen

Zielsetzung der folgenden Untersuchungen ist es, Änderungen an Prozesszuständen festzustellen. Zu diesem Zweck sind in der Spritzgießmaschine eine Vielzahl von Sensorelementen verbaut. Jedes Sensorelement gibt dabei zeitabhängig Aufschluss über die Bedingungen am Messort. Resultierend daraus entsteht für jeden Zyklus oder Versuch ein Kurvenverlauf der Informationen über den Prozesszustand enthält. Die Kurvenverläufe, mehrerer Versuche sind nicht miteinander quantitativ vergleichbar, weshalb die Messkurven anhand von Vorschriften so ausgewertet werden, dass man einen skalaren Wert erhält. Diese Kennzahl soll den durch den Sensor gemessenen prozessrelevanten Zustand eindeutig beschreiben, wodurch Prozessbedingungen anhand skalarer Werte einfach verglichen werden können.

Abbildung 4-1 zeigt die Entscheidungsschritte, die in dieser Arbeit variiert wurden, um eine Kennzahl zu generieren, mit der auf den Prozesszustand geschlossen werden kann. Am Beispiel des Fließwiderstands bzw. der Viskosität sind Möglichkeiten aufgeführt, wie eine Kennzahl ausgewählt werden kann.

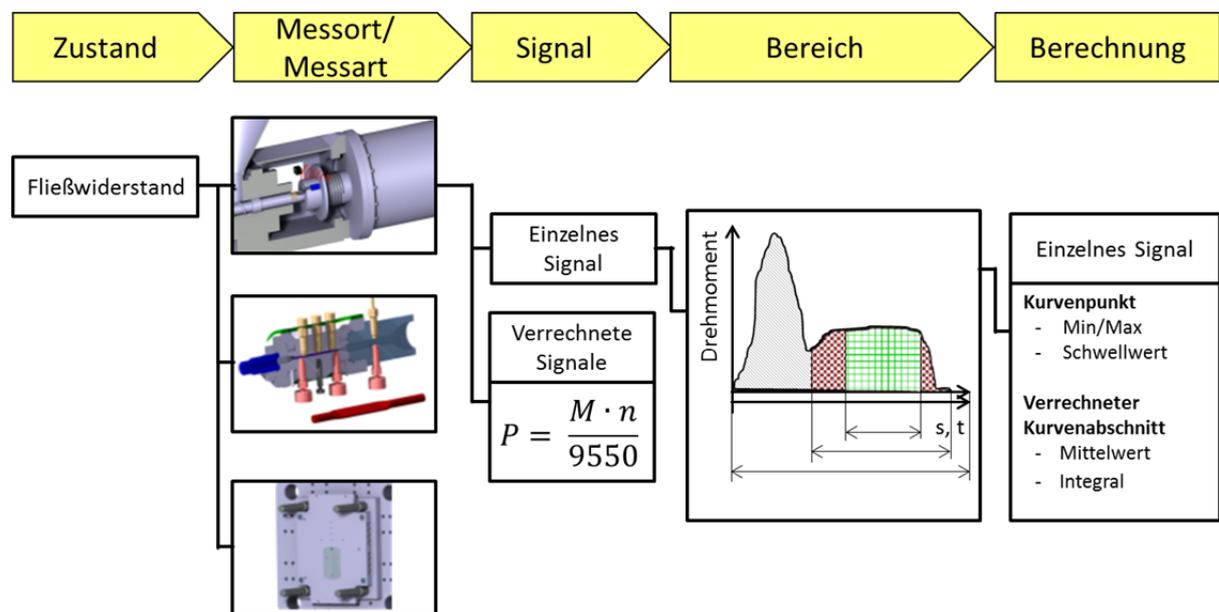


Abbildung 4-1: Systematischer Weg zum Erlangen einer Kennzahl am Beispiel des Fließwiderstands

Zustand:

Der Zustand beschreibt eine prozessrelevante Größe, wie z. B. den Fließwiderstand der Schmelze, die Schmelze-Temperatur oder die Werkzeugwand-Temperatur. Diesen Zustand soll die Kennzahl einfach und eindeutig beschreiben.

Messort/Messart:

Hier wird unterschieden, an welchem Ort mit welchem Verfahren welche Größe gemessen wird. Um beispielhaft auf den Fließwiderstand und folglich daraus auf die Viskosität rückschließen zu können, muss die Schmelze in Bewegung sein. Außerdem gilt es, dabei den für die Bewegung notwendigen Kraftaufwand auszuwerten. Als zeitlich erster Parameter eines Zyklus bietet sich das Schneckendrehmoment beim Plastifizieren, ermittelt über einen DMS an der Schnecke oder den Frequenzumrichterdaten, an. Weitere mögliche Messorte und Sensoren befinden sich an der Plastifizierung oder im Werkzeug, die während der Einspritzbewegung aktiv messen.

Signal:

Entweder kann das Sensorsignal direkt zur Kennzahlgenerierung verwendet oder als multiples Signal mit mehreren Signalen verrechnet werden.

Multiple verrechnete Signale: Hängt eine Zustandsgröße von mehreren Bedingungen ab, müssen diese in der Ermittlung der Kennzahl berücksichtigt werden. Beispielhaft kann hier die Plastifizier- und Einspritzarbeit oder die Berechnung der Viskosität aufgeführt werden. Der Fließwiderstand des Polymeren ist immer auch an die Schergeschwindigkeit gekoppelt. Schwankt diese aufgrund nicht konstant geführter Bewegungsabläufe, variiert auch eine einzeln verrechnete Kennzahl, wie z. B. der Druckverlust. Durch die Betrachtung der Einflussfaktoren kann die Aussagekraft einer Kenngröße bedeutend verbessert werden. Dies ist allerdings nur der Fall, wenn die Eigenstreuung des Zusatzsignals die Kennzahl nicht destabilisiert. Als weiteren Punkt bei den multiplen verrechneten Kurvenabschnitten sind die Leistungskennzahlen zu nennen, mithilfe derer der Energieumsatz im Abschnitt ermittelbar ist. Dadurch ist es denkbar, z. B. durch eine Bilanzierung auf den Energieinhalt in der Schmelze und somit auf die Schmelze-Temperatur zu schließen.

Bereich:

Ist ein Signalverlauf über den Zyklus vorhanden, ist der Bereich auszuwählen, der zur Verrechnung in eine Kennzahl Verwendung finden soll. Als Anfang und Ende für die Bereichsauswahl kann eine Zeit- oder Wegmarke oder auch andere Signale wie z. B. der Temperaturanstieg an der Werkzeugwand beim Überströmen mit Schmelze dienen. Der bedeutende Einfluss des Auswahlbereichs auf die Kennzahl ist in Abbildung 4-2 zu sehen. Dort ist das Schneckendrehmoment über den Plastifizierhub aufgetragen. Die Messdaten vier verschiedener Bereiche (P/s/1–4) wurden herausgeschnitten und ihr Mittelwert berechnet. Die entstehende Kennzahl ist auf ihre Korrelation mit der Viskosität hin ausgewertet worden. Mithilfe des in Kapitel 4.2.1 definierten Korrelationskoeffizienten (KK) lassen sich die gewonnenen Kennzahlen aus den verschiedenen Bereichen vergleichen. Die Aussagekraft der generier-

ten Kennzahlen unterscheidet sich je nach Bereich um bis zu 65 %. Damit ist die Bereichsauswahl ein bedeutender Einflussfaktor für die Kennzahlaussagekraft.

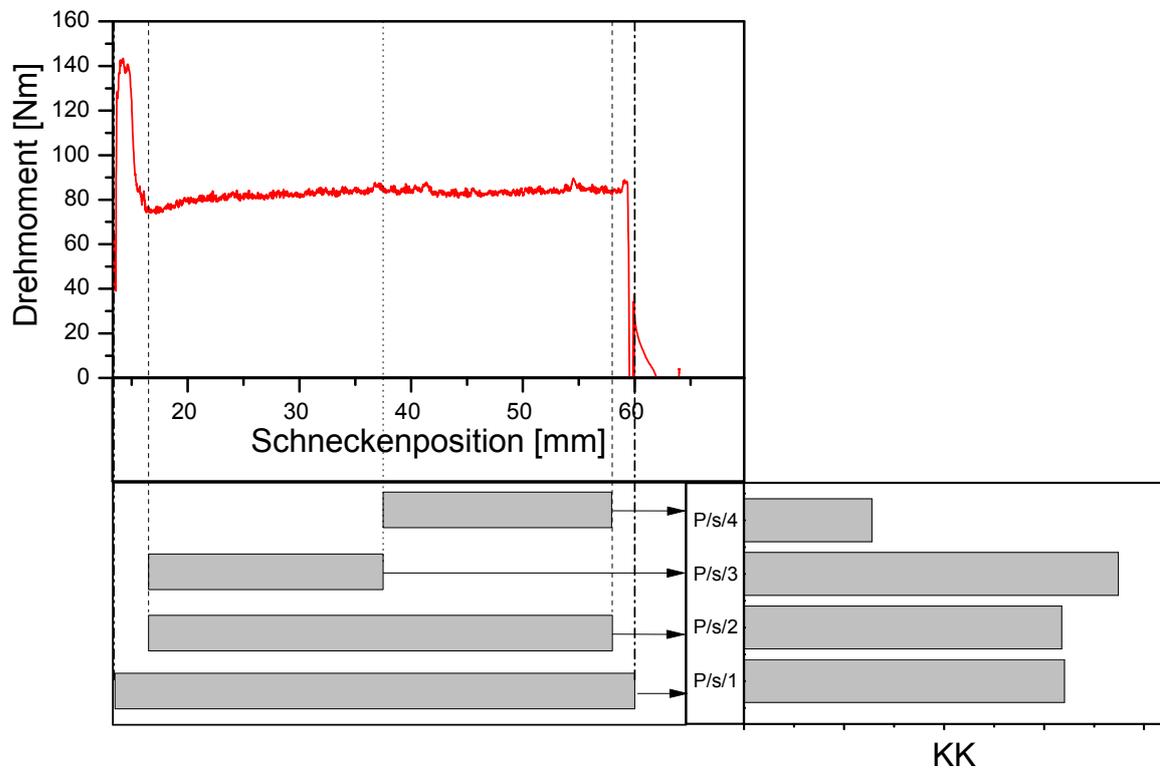


Abbildung 4-2: Verschiedene Signalbereiche zum Berechnen einer Kennzahl am Beispiel des Drehmoments am Schneckenchaft während des Plastifizierens

Berechnung:

Nach der Bereichsauswahl im Signalverlauf steht zur Kennzahlberechnung ein xy-Array, bestehend aus dem Signal über ein zweites Referenzsignal, wie z. B. die Zeit oder der Schneckenweg, zur Verfügung. Im Kern ist eine Kennzahl ein skalarer, über eine Berechnungsvorschrift aus einem Signalverlauf gewonnener Wert, zu dessen Bestimmung zwei Möglichkeiten zur Verfügung stehen.

Kurvenpunkte: Dabei wird ein signifikanter Punkt im Kurvenverlauf als Bewertungskriterium herangezogen. Beispiele sind Maximum, Minimum, Schwellwert oder Zeitpunkt des Maximums.

Verrechnung des Kurvenabschnitts: Hierbei werden alle im Bereich gemessenen Daten zur Kennzahlberechnung genutzt. Als Berechnungsmittel kann der arithmetische Mittelwert oder der Integralwert dienen.

4.2 Vorstellung wichtiger Kennzahlen

Gemäß der Definition in Kapitel 2.1 müssen für den Ablauf des Spritzgießprozesses drei physikalische Arbeitsschritte nacheinander durchlaufen werden: das Aufschmelzen, das Formgeben und das Abkühlen des Werkstoffs. Gemäß dieser Einteilung werden wichtige Kennzahlen vorgestellt, mit denen die Vorgänge während der Arbeitsschritte und ihre Resultate bewertet werden können.

4.2.1 Aufschmelzen

Beim Aufschmelzen wird das Polymer über die entstehende Friktionswärme und die Wärmeleitung in seiner Temperatur erhöht. Der sich in der Schmelze abbildende Zustand ist vom Ablauf dieses Prozesses und den Materialeigenschaften abhängig. Charakterisieren lässt sich der Zustand durch die Enthalpie der Schmelze und die sich daraus ergebenden Materialeigenschaften. Die beiden wesentlichen Größen zum Bewerten dieser Gegebenheiten sind die Schmelze-Temperatur und die Schmelze-Viskosität. Die Auswahl der Kennzahl, mit der dieser Zustand bewertet wird, erfolgte mithilfe des im folgenden Kapitel erläuterten Korrelationskoeffizienten.

Korrelationskoeffizient:

Idealzustand einer Kennzahl ist, dass sie bei unveränderten Bedingungen unsensibel auf stochastische Schwankungen und sonstige Störgrößen reagiert (minimale 2σ in Abbildung 4-3). Tritt allerdings eine Änderung im zu analysierenden Kriterium ein, soll dies signifikant in der Kenngröße wiederzufinden sein (Änderung $K(X)$).

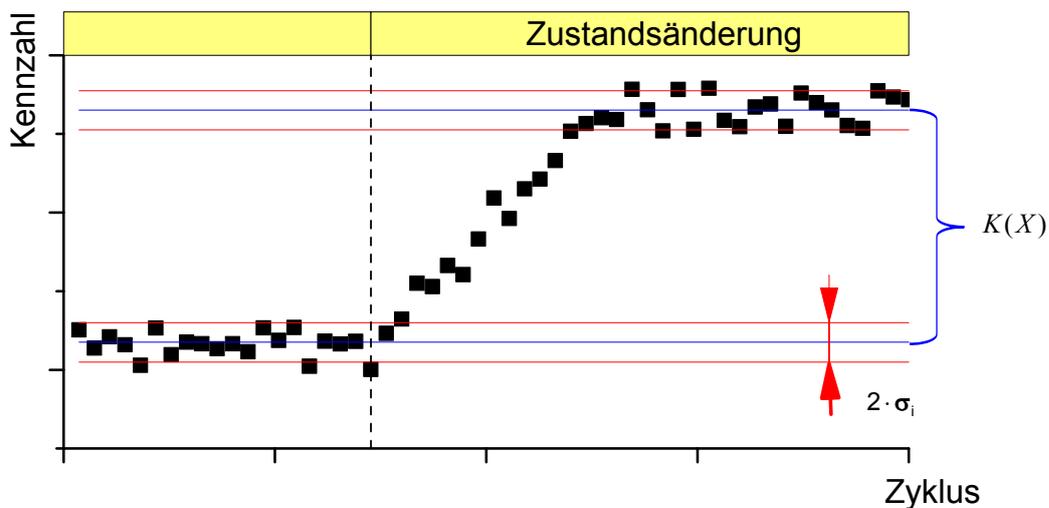


Abbildung 4-3: Verhalten einer Kennzahl vor, während und nach einer Zustandsänderung

Um diese Voraussetzungen zu erfüllen, können die im vorangegangenen Kapitel benannten Parameter verändert werden, um die Kennzahl einzustellen. Die Kennzahl muss letztendlich eine möglichst robuste Aussage über Prozesszustand und -veränderungen treffen.

Ausgehend von den oben beschriebenen Idealvoraussetzungen für eine Kennzahl wurde ein Bewertungsschema definiert, mit dem die Kennzahlen auf ihre Güte hin beurteilt werden können. So lässt sich die aussagefähigste Berechnungsvorschrift für einen Prozesszustand finden. Untersucht wurden Kennzahlen, die den Zustand einer Temperatur- und einer Viskositätsänderung möglichst genau vorhersagen können. Als Basis für diese Bewertung dienen Versuche, bei denen der Untersuchungszustand (Schmelze-Temperatur und -Viskosität) in Stufen verändert wurde. Je Stufe sind aus den Messdaten von 30 Zyklen die Kennzahlen abgeleitet worden. Die statistische Auswertung der Kennzahlen, aufgetragen über den definiert veränderten Zustand, zeigt Abbildung 4-4. Im Untersuchungsbereich ergab sich stets eine lineare Abhängigkeit zwischen Zustand und Kennzahl. Aus den Mittelwerten lässt sich mithilfe der linearen Regression die Steigung und somit die Abhängigkeit zwischen Kennzahl und zu beschreibendem Zustand bestimmen. Multipliziert man die Steigung (m_{Reg}) aus der Regressionsanalyse mit der in der Praxis quantitativ zu erwartenden minimalen Zustandsänderung (X), ergibt dies den zu detektierenden Signalausschlag (Δy).

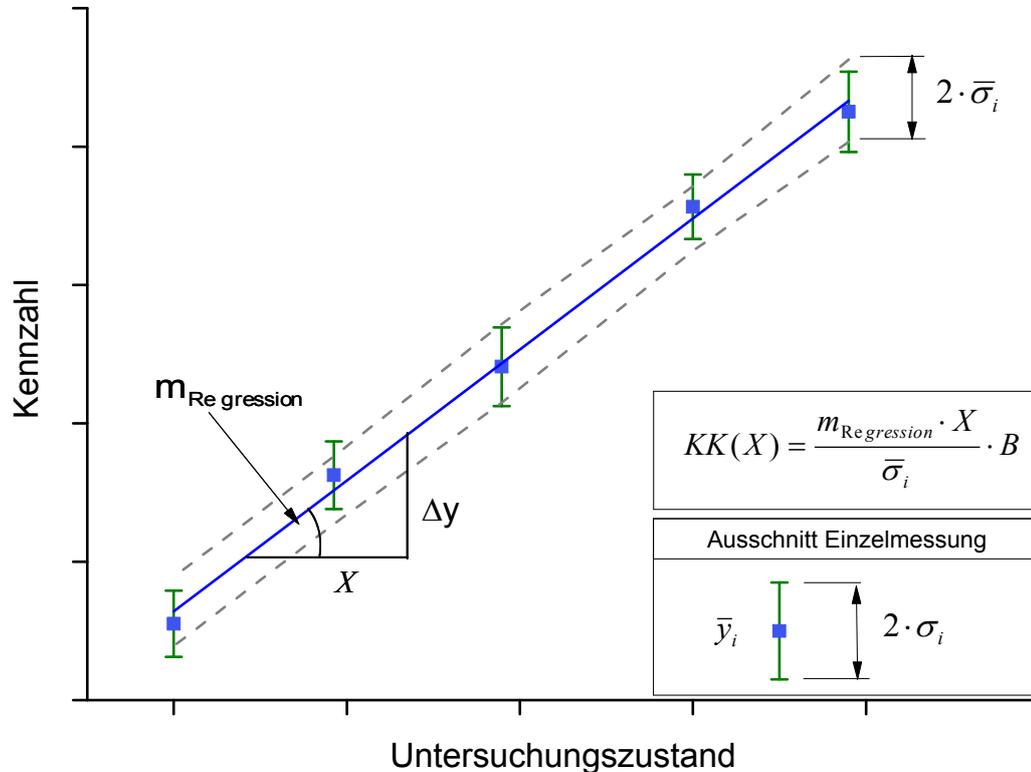


Abbildung 4-4: Berechnungsanweisung für den Korrelationskoeffizient zum Bewerten von Kennzahlen

Die Streuung der Kennzahl (σ_i) wird von den mittleren Standardabweichungen der Einzelmessungen repräsentiert. Wird der zu erwartende Signalausschlag in der Kennzahl (Zähler der Formel) zur Eigenstreuung des Signals (Nenner der Formel) ins Verhältnis gesetzt, entsteht ein Maß für die Qualität der Kennzahl. Diese dimensionslose Zahl wird in der Arbeit als Korrelationskoeffizient bezeichnet. Je höher der Korrelationskoeffizient ist, desto besser lässt sich der Zustand im Untersuchungsbereich durch die Kennzahl beschreiben. Damit die Güte der Regression in der Berechnung Beachtung findet, ist das Bestimmtheitsmaß (B) als Zusatzfaktor B in der Formel enthalten. Die Ergebnisse dieser Analyse für Kennzahlen, die die Schmelze-Viskosität und die Schmelze-Temperatur betreffen, sind nachfolgend erklärt.

Schmelze-Viskosität:

Die Viskosität ist die physikalische Einheit die den Fließwiderstand eines fluiden Verhaltens beschreibt. Um eine Aussage über die Viskosität einer Masse treffen zu können, muss sie in Bewegung sein. Mithilfe der dafür aufzubringenden Kraft oder des Energieverbrauchs für die Massebewegung lassen sich Rückschlüsse auf das Fließverhalten der Schmelze ziehen. Während des Prozessablaufs ergeben sich viele Möglichkeiten, anhand der verbauten Sensorik und geeigneten Berechnungsvorschriften auf die Schmelze-Viskosität zu schließen. Damit in den folgenden Untersuchungen eine robuste Kennzahl zum Bewerten der Viskosität vorliegt, wurden mögliche Kennzahlen mithilfe des Korrelationskoeffizienten bewertet. Zum Variieren der Viskosität sind fünf verschiedene PP-Typen verwendet worden, die im Viskositätsbereich zwischen 36,27 Pas und 25,92 Pas liegen.⁷ Aus den ermittelten Kennzahlen für die Versuche konnte der jeweilige Korrelationskoeffizient berechnet werden.⁸ In Tabelle 4-1 sind wichtige Kennzahlen gegenübergestellt, die eine Aussage über die *Schmelze-Viskosität* zulassen. Angesichts eines Korrelationskoeffizienten von 17,3 kann mit dem Einsatz der Inline-Rheometerdüse eine sehr präzise Aussage über die Viskosität der Schmelze getroffen werden. Diese Kennzahl wird in den weiteren Untersuchungen als *Schmelze-Viskosität* bezeichnet.

⁷ Eingestellt mit den Materialien aus Tabelle 3-3 bei einer Schergeschwindigkeit von 5000 1/s.

⁸ Schwankungsbereich X ist aus den Chargenuntersuchungen aus Kapitel 5.1.3.1 mit einem Wert von 3,5 % abgeleitet worden, dies entspricht 1,27 Pas.

Tabelle 4-1: Kennzahlen zum Bewerten der Schmelze-Viskosität (Kurvenverläufe in A.2)

Messparameter	Beschreibung	Korrelationskoeffizient
Plastifizierdrehmoment	Mittelwert des Plastifizierdrehmoments am Schneckenchaft im Anfangsbereich des Dosierwegs (Abbildung 4-2, P/s/3).	3,9
Fließarbeit (Schmelzedruck)	Einspritzarbeit als Integral aus der wirkenden Kraft am Schneckenkopf über den Einspritzweg.	11,5
Viskosität (Inline-Rheometer)	Scheinbare Viskosität am Rheometer, ermittelt über die Druckdifferenz an den Drucksensoren.	17,3
Fließzahl (Werkzeug)	Integral des Werkzeuginnendruckes beim Einspritzen über den Anfangszeitbereich.	5,4

Schmelze-Temperatur:

Für die Ermittlung der Kennzahl zum Bewerten der Schmelze-Temperatur ist in gleicher Weise verfahren worden wie bei der Schmelze-Viskosität. Die Zylindertemperatur diente in mehreren Stufen zum Einstellen der Schmelze-Temperatur-Sprünge für den Korrelationskoeffizienten.⁹ Im Ergebnis zeigte sich, dass die Messung über das IR-Signal im Zylinderkopf die genaueste Methode zum Bewerten der *Schmelze-Temperatur* ist.

Tabelle 4-2: Kennzahlen zum Bewerten der Schmelze-Temperatur (Kurvenverläufe in A.2)

Messparameter	Beschreibung	Korrelationskoeffizient
IR-Sensor Zylinderkopf	Mittlere Temperatur während des Einspritzens.	8,3
IR-Sensor Druckbereinigt Zylinderkopf	Mittlere Temperatur während des Einspritzens, bereinigt um die adiabate Erwärmung.	1,1
IR-Sensor Werkzeug	Temperaturmittelwert in den ersten 2 s ab Beginn des Überströmens am IR-Sensor im Werkzeug.	4,7
Thermoelement Werkzeugwand	Maximale Werkzeugwandtemperatur.	1,9

⁹ Schwankungsbereich X ist 1 °C.

4.2.2 Formgeben

Entscheidend für die Reproduzierbarkeit des Formgebungsprozesses ist, wie sich der zeitliche Schmelze-Volumenstrom ausbildet. Wesentlichen Einfluss auf den Volumenstrom hat neben der Kolbengeschwindigkeit auch die Schmelzedichte im Vorraum. Außerdem beeinflusst der zu Beginn der Einspritzphase aus dem Dosierhub verloren gehende Leckstrom die Schmelzeinbringung wesentlich. Dieser ist in der Regel nicht aktiv steuerbar und ergibt sich aus den Prozessbedingungen. Je weniger Masse dabei über die Rückstromsperre verloren geht und umso höher die Masse verdichtet war, desto mehr Masse strömt am Anfang in das Werkzeug. Dies kann über die Zeitdifferenz zwischen dem Start der Schneckenbewegung bis zum Überströmen eines angussnahen Punkts bewertet werden. Mützel ermittelte, dass ein wandbündig verbautes Thermoelement aufgrund des sehr steilen Anstiegs im Signal am besten zum reproduzierbaren Erkennen der Schmelzefront geeignet ist [Müt11]. Alternative Sensoren, wie der viskositätsabhängige Werkzeuginnendrucksensor oder der optisch arbeitende IR-Sensor,¹⁰ zeigten schlechtere Ergebnisse. Die Anstiegsflanke ist bei den wandbündigen Thermoelementen umso höher und steiler, je mehr der Bereich um das Thermoelement zum Werkzeug hin thermisch entkoppelt ist und umso weniger Masse der Sensor besitzt. Ein weiterer Aspekt, der die Anstiegszeit positiv beeinflusst, ist die Geschwindigkeit, mit der die Energie um das Thermoelement eindringen kann. Abbildung 4-5 zeigt den Temperaturanstieg für drei verschiedene wandbündige Sensoren, die gleichzeitig mit Schmelze überströmt werden. Verglichen werden zwei Sensoren mit unterschiedlichem Durchmesser (Sensormasse) und ein Sensor, bei dem der Bereich um das Thermoelement mit einer hochleitenden Legierung umgeben ist. In den Temperaturanstiegen in Abbildung 4-5 ist zu sehen, dass der Sensordurchmesser nur eine unwesentliche Rolle für das Ansprechverhalten des Temperatursignals besitzt.

Die Erkenntnisse decken sich mit den Ergebnissen aus [ER07]. Einen weitaus größeren Einfluss auf das Ansprechverhalten des Sensors hat die Einbettung des Thermoelements in ein hochleitendes Substrat.

In vorliegender Arbeit wird die Differenz vom „Beginn Einspritzen“ bis zum Zeitpunkt, an dem das Temperatursignal an der Werkzeugwand eine Steigung von 90 °C/s überschreitet, als *Kavität-Schmelzeintritt* bezeichnet. Je kürzer diese Zeit ausfällt, umso höher war die Schmelze im Schneckenorraum verdichtet oder desto weniger Masse ging am Anfang des Einspritzvorgangs in der Rückstromsperre verloren.

¹⁰ Beim Drucksensor ist die anfängliche Steigung nur sehr gering, zudem ist der Messwert stark von der Viskosität abhängig. Der IR-Sensor löst schon vor dem Überströmen mit Schmelze aus, da aufgrund der Reflexion aus der Werkzeugwand IR-Strahlen in den Sensor eindringen.

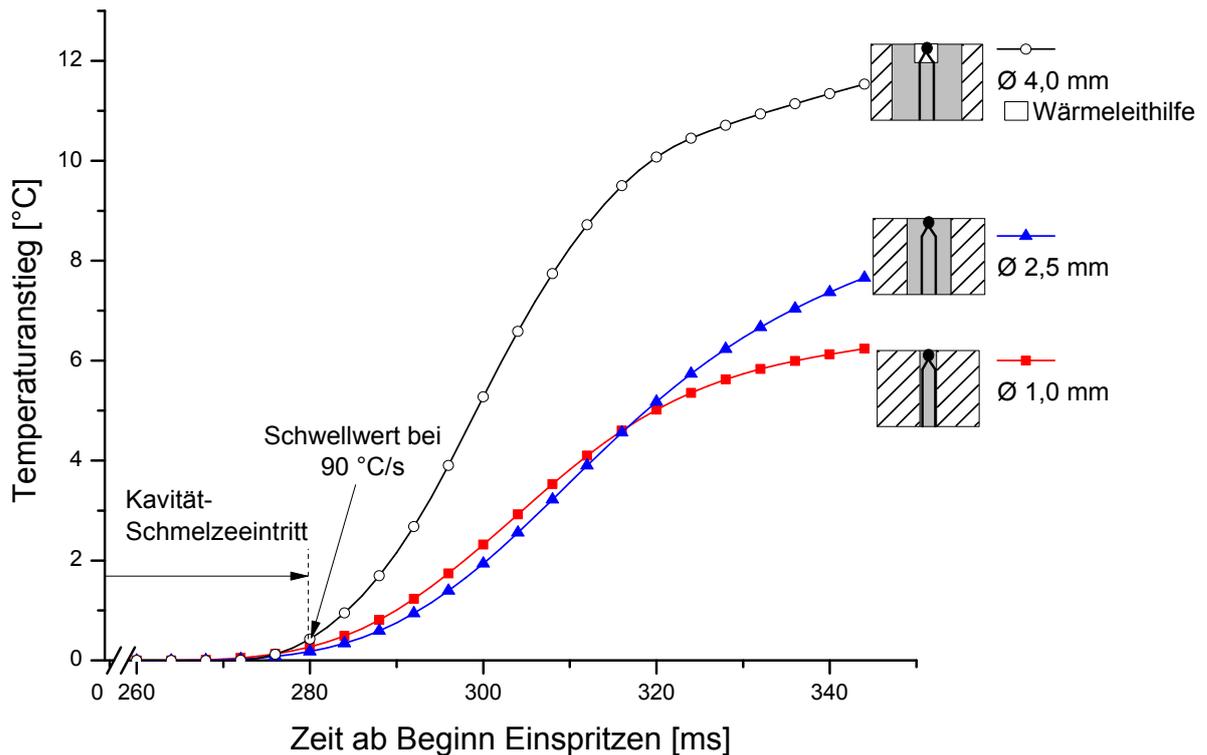


Abbildung 4-5: Temperaturanstieg für wandbündige Sensoren

4.2.3 Abkühlen

Beim Abkühlen wird der heißen Schmelze in der Kavität Energie entzogen, sodass sich der Werkstoff verfestigt. Die während des Abkühlens in der durch das Polymer gefüllten Kavität örtlich und zeitlich ablaufenden Verhältnisse für den Druck und die Temperatur entscheiden über die später erzielten Produkteigenschaften. Das Volumen der Kavität kann in finite Elemente unterteilt werden. Für jedes Element bestimmt das Verhältnis von Druck und Temperatur über die Zeit ($p_i(x,y,z,t)/T_i(x,y,z,t)$) die späteren Eigenschaften. In Summe resultieren diese lokalen Zustände in den Bauteileigenschaften. Zum Bewerten der Druck- und Temperaturverläufe im Werkzeug sind wie in Kapitel 3.1 erläutert Drucksensoren, ein IR-Sensor und wandbündige Thermoelemente verbaut. Mit ihnen lässt sich eine Aussage über die im Werkzeug lokal am Sensor herrschenden Prozessbedingungen treffen, um damit auf die globalen Verhältnisse in der Kavität zu schließen. Die Kavität ist dabei in ihrem geometrischen Aufbau auf die gewünschten Produkteigenschaften und auf prozessbedingte Konstruktionsregeln abgestimmt. Bedingt durch den Werkzeuginnendruck und die damit verbundene elastische Verformung der Werkzeug- bzw. der Maschinenkomponenten verändern sich die geometrischen Verhältnisse im Werkzeug und somit auch die Bauteileigenschaften. Während des Abkühlens müssen deshalb die drei thermodynamisch wichtigen Zustandsgrößen Druck, Temperatur und Volumen permanent betrachtet werden, da sie sich während des

Abkühlens ändern. Im Folgenden werden die für die weiteren Untersuchungen verwendeten Kennzahlen zum Bewerten der Prozesszustände erläutert. Abbildung 4-6 zeigt die Signalverläufe und die Kennzahlen, mit denen diese beurteilt worden sind.

Temperatur:

Neben der im Aufschmelzprozess entstehenden *Schmelze-Temperatur* entscheidet die *Werkzeugwand-Temperatur* maßgeblich über das Abkühlverhalten der Schmelze im Prozess. Erfasst wird sie über das im Drucksensor wandbündig enthaltene Thermoelement. Der Signalverlauf kurz vor dem Einspritzen gibt den größten Aufschluss über die thermischen Gegebenheiten an der Werkzeugwand, da sie im Anschluss wieder von der Schmelze beeinflusst werden. Der Mittelwert des wandbündigen Thermoelements vor dem Einspritzvorgang steht in dieser Arbeit für die *Werkzeugwand-Temperatur*. Diese Kennzahl steht im Verhältnis dazu, wie schnell die Wärme aus der Schmelze abfließen kann.

Speziell für die geometrischen Bauteileigenschaften ist die Temperatur entscheidend, ab der kein Druck mehr im Werkzeug herrscht. Zu diesem Zeitpunkt kann angenommen werden, dass die Bauteilabmessungen der Kavitätskontur entsprechen. Mit sinkender Temperatur nimmt das spezifische Volumen ab und das Bauteil schwindet. Der beschriebene Zeitpunkt ist mit der Temperatur gleichzusetzen, ab welcher im pV T-Zustandsdiagramm die 0-bar-Linie erreicht wird. Je höher die Temperatur ist, bei der dieser Zustand eintritt, umso kleiner ist das Bauteil später in Relation zur Werkzeugkavität. Der drucklose Zustand im Werkzeug ist durch den Werkzeuginnendrucksensor nicht sicher erkennbar.¹¹ Deshalb dient das Unterschreiten der 10-bar-Linie als Indikator für den drucklosen Zustand. Die Bezeichnung der Kennzahl bleibt in dieser Arbeit davon unverändert bei *Bauteil-Temperatur- $p=0$* . Die Bauteil-Temperatur erfasst der IR-Sensor über die emittierten elektromagnetischen Strahlen im Werkzeug. Kunststoffe weisen im Bereich der infraroten Strahlung ein hohes Transmissionsverhalten auf, weshalb sich der Messwert am IR-Sensor aus den Temperaturinformationen der einzelnen Schichten über die Bauteildicke zusammensetzt. Infolgedessen repräsentiert der Messwert am Sensor eine Temperatur, die abhängig von den Umständen einen Punkt in der Temperaturverteilung über den Bauteilquerschnitts entspricht. Genauere Informationen zum Messverhalten des IR-Sensors finden sich in [Obe96, Blu96]. In der Kalibrierung des Sensors ist so verfahren worden, dass das Maximum des Messwerts mit der Zylindertemperatur gleichgesetzt wurde. Der zweite Wert für den Kalibrierkoeffizienten wird bei unendlich langer Abkühlzeit mit dem Signal des wandbündigen Thermoelements abgeglichen.

¹¹ undefinierte Reibung zwischen Sensor und Werkzeug, Drift im Ladungsverstärker usw. verursachen ein ver-rauschtes und verzögertes Absinken des Werkzeugdrucks.

Aufgrund des zum Anguss hin einfrierenden Bauteils beziehen sich die Kennzahlen zur Druck- und Temperaturbewertung auf den angussnahen Drucksensor und den symmetrisch dazu angebrachten IR-Sensor.

Sind der Nachdruck und die Kühlzeit abgelaufen, öffnet das Werkzeug und das Bauteil wird von der formgebenden Kavität entformt. Ab diesem Zeitpunkt kühlt das Bauteil nicht mehr definiert und geführt durch die Kavität ab, sondern undefiniert und ungeführt an der Umgebung. Dadurch kommt es bei unzureichender Kühlung zum Bauteilverzug. Die *Bauteil-Temperatur-Entformen* beschreibt, wie lange definiert in der Form abgekühlt worden ist. Eine niedrige Entformungstemperatur steht für ein verzugsärmeres Bauteil. Zum Ermitteln der Kennzahl ist der Mittelwert des in Tabelle 3-2 unter Inline-Thermografie gekennzeichneten Bereichs berechnet worden. Die Thermografieaufnahme startet mit dem Triggersignal „Werkzeug offen“.

Druck:

Zum Bewerten der Druckzustände im Werkzeug dienen die beiden Kennzahlen *Werkzeug-Innendruck-Maximum* und *Werkzeug-Innendruck-Integral*. Das Integral bildet sich aus der Zeit zwischen dem Beginn des Nachdrucks und dem Zeitpunkt sobald die Druckkurve die 10 bar-Marke unterschritten hat.

Volumen:

Der sich in der Kavität aufbauende Druck führt aufgrund der elastischen Dehnung dazu, dass sich das Kavitätsvolumen ändert. Bei den verwendeten Plattengeometrien hat die Veränderung in der Trennebene entscheidenden Einfluss auf die Plattendicke. Die aufgebaute Schließkraft presst die Kavität zunächst zusammen, mit steigendem Werkzeuginnendruck kippt das Werkzeug aufgrund der asymmetrischen Kraftverteilung bei der Plattengeometrie auseinander. Das Aufkippen der Trennebene kann über die beiden unteren Wegmesssensoren überwacht werden. Deren Messwertänderung von „Beginn Einspritzen“ bis kurz vor dem Entformen soll für die Veränderungen im Kavitätsvolumen stehen und ist mit *Werkzeug-Öffnung* bezeichnet.

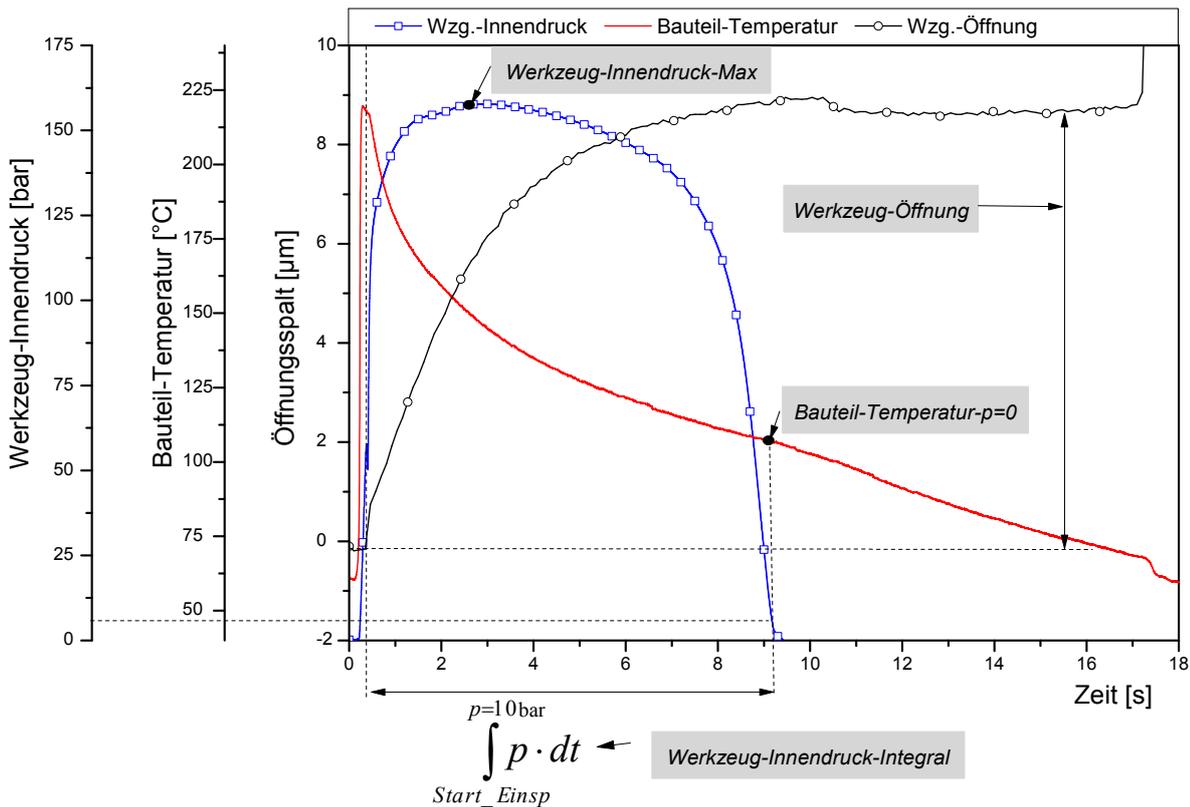


Abbildung 4-6: Thermodynamische Abläufe in der Kavität mit den Kennzahlen zu deren Bewertung

4.3 Absicherung der Prozessfähigkeit und der Kennzahlen

Bei der Realisierung der weiteren Versuchspläne ist darauf zu achten, dass sich bei einem Wechsel in den Einstellungen lange Einlaufzeiten ergeben, was die Zeitspanne für die Versuche zusätzlich erhöht. Weiterhin ist pro Versuchseinstellung ein großes Stichprobenmaß zu wählen, um ein eindeutiges und abgesichertes Ergebnis zu erhalten. Dies ist notwendig, da die zu messenden Einflussgrößen teilweise in den Eigenstreuungen der Messwerte untergehen. Wegen dieser Rahmenbedingungen resultieren lange Versuchszeiten, bei denen die Forderung besteht, dass alle Ergebnisse unter gleichen Bedingungen produziert und gemessen worden sind. Es muss geprüft werden, ob mit der Versuchsanlage über einen längeren Zeitraum vergleichbare Ergebnisse produziert und gemessen werden können und somit deterministische Störungen auszuschließen sind. Unter deterministischen Störgrößen sind z. B. Verschleißerscheinungen, Verschmutzungen und Ablagerungen, Einschwingzeiten, Sensorschwankungen und andere äußere Einflüsse zu verstehen.

Zur Überprüfung der Stabilität des Produktions- und Messsystems wurde nach einer zehnstündigen Aufheizphase und einer zwei Stunden dauernden Einlaufphase in 6,5 Stunden ein Produktionslos von 950 Teilen produziert. Dies geschah bei konstanten Produktionsbedin-

gungen. Im Zehn-Minuten-Abstand erfolgte eine Stichprobenentnahme von mindestens fünf Zyklen für die Ermittlung der Bauteilqualität und der Prozesskennzahlen.

Abbildung 4-7 zeigt den Verlauf der Bauteilqualität über die Zyklen. Unter den gegebenen Versuchsbedingungen ergab sich ein Schwankungsbereich von $\pm 0,038\%$. Dies zeugt von der hohen Reproduzierbarkeit des Prozesses. Mithilfe der Regressionsanalyse lässt sich feststellen, ob während der Produktion eine systematische zeitliche Veränderung in den Qualitätsdaten oder den Kennzahlen auftritt. Hierzu wird der p-Wert aus den Regressionsdaten ermittelt. Der p-Wert, auch Signifikanzwert genannt, gibt in diesem Fall an, wie wahrscheinlich eine Abhängigkeit zwischen der Kennzahl und dem Zeitverlauf ist. Liegt der Wert über 0,05 kann die Hypothese einer zeitlichen Veränderung zu 95 % ausgeschlossen werden. Eine zeitliche Veränderung ist weder beim Bauteilgewicht noch bei den Kennzahlen der Fall. Einzig in der Werkzeugwand-Temperatur zeichnet sich ein Trend ab: In den ersten 500 Zyklen erhöht sie sich um $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, dies ist jedoch für den Prozess vernachlässigbar (Kapitel 6).

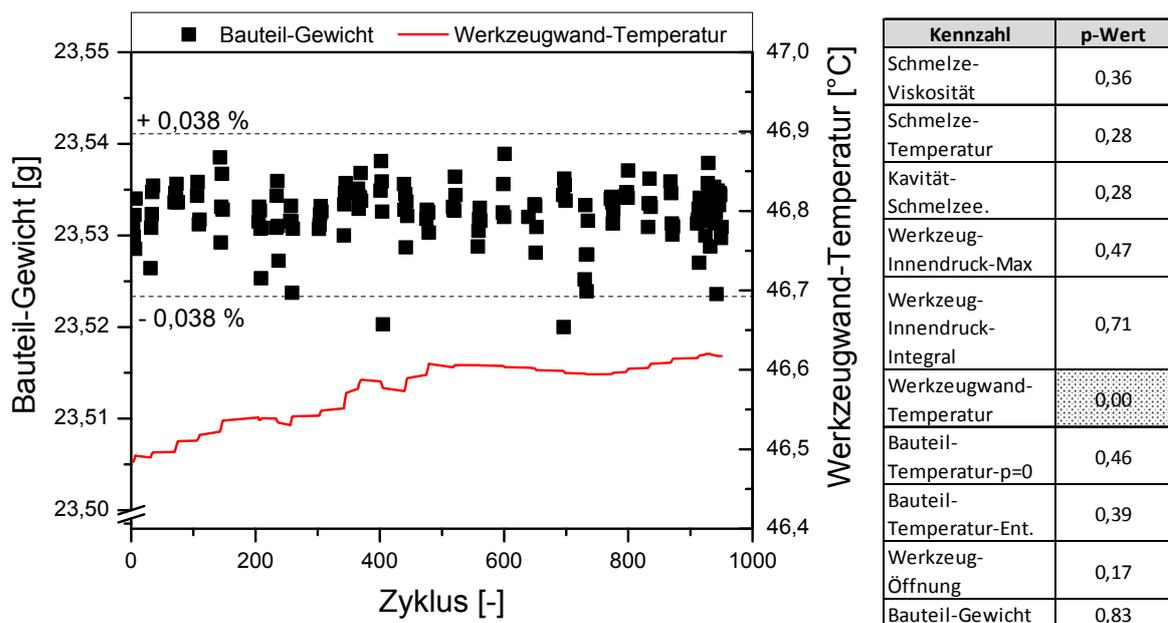


Abbildung 4-7: Diagramm: Verlauf der Werkzeugwand-Temperatur und des Bauteilgewichts im Langzeitversuch – Tabelle: Signifikanzwerte/p-Wert für die Kennzahlen

5 Rahmenbedingungen für die Entwicklung und Bewertung neuer Prozessführungsmethoden

In diesem Kapitel wird anhand einer gezielten Untersuchung und Bewertung ermittelt, welche Einflüsse für Prozess- und Qualitätsschwankungen verantwortlich sind und somit als Störgrößen wirken. Unterschieden werden stochastisch und deterministisch auftretende Störungen. Erstere sind nicht messbare, zufällig einwirkende Veränderungen, die ein Streuen in den Prozess- und Qualitätsparametern verursachen. Ihnen kann letztendlich durch einen gegen Störgrößen robusten Sensor, Messort und Betriebspunkt begegnet werden. Die wesentlichen deterministischen Störungen, die einen gezielten langfristig wirkenden Systemeingriff auf den Spritzgießprozess ausüben, sollen in diesem Kapitel untersucht und bewertet werden.

Auf Basis dieser Untersuchungen gilt es, markante Prozessparameter zu ermitteln, die sich aufgrund wechselnder Produktionsrahmenbedingungen verändern. Sie bieten sich an, um durch eine weiterführende Prozessführungsmethode gezielt geregelt zu werden. Um diese neuen und bestehenden Prozessführungsmethoden zu untersuchen, muss ein Verfahren gefunden werden, mit dem Störgrößen gezielt auf den Prozess aufgebracht werden können.

Zum abschließenden Vergleich der Prozessführungsmethoden ist außerdem ein Bewertungsschema zu erarbeiten, anhand dessen die Methoden in Hinsicht auf ihre Störanfälligkeit verglichen werden können.

5.1 Einflüsse auf Prozess- und Qualitätsschwankungen

Die im Produktionsumfeld wirkenden Störgrößen lassen sich in die drei Kategorien Maschine, Mitwelt und Material einteilen. Analog zu dieser Eingruppierung erfolgt anschließend die Vorstellung der Ergebnisse.

5.1.1 Maschine

5.1.1.1 Regelgüte

In der heutigen Maschinenteknik werden Maschinengrößen wie Temperaturen, Drücke und Geschwindigkeiten geregelt. Erste Forderung an die Spritzgießmaschine ist es, dass der Sollwert stabil gehalten werden kann. Abbildung 5-1 links zeigt die Ist- und Sollgeschwindig-

keit für den Einspritzprozess für 50 aufeinanderfolgende Zyklen. Nach 0,2 s ist der Sollwert von 80 mm/s erreicht und wird ab diesem Zeitpunkt auch fortlaufend gehalten. Durch die Trägheit der Masse ist es jedoch nicht möglich, dem Sprung in der Sollgeschwindigkeit beim Start der Einspritzphase schlagartig zu folgen. Dies spielt für die spätere Qualitätskonstanz der Teile auch eine untergeordnete Rolle. Vielmehr ist es von Bedeutung, dass der Ist-Verlauf der Vorschubkurve konstant über die Zyklen bleibt. Zweite Forderung an die Regelgüte der Maschine ist also, dass es im Fall einer sprunghaften Änderung im Sollwert zu einer identischen Sprungantwort kommt. Die für die Versuche verwendete Maschine kann diese Forderung erfüllen. In Abbildung 5-1 links ist zu sehen, dass die Kurvenverläufe aufeinanderfolgender Zyklen absolut deckungsgleich sind. Der Sollwert wird dabei ohne ein Überspringen angefahren.

Dieses Verhalten muss auch aufrechterhalten werden, wenn sich das Systemverhalten wegen eines Materialwechsels oder einer Parameteranpassung verändert. Zur Überprüfung der Regelgüte der Antriebstechnik ist aus den ersten zehn Zyklen ein Referenzkurvenverlauf abgeleitet worden. Die mittlere Abweichung zwischen Referenzzyklus und den einzelnen Ist-Zyklen in Abbildung 5-1 rechts ist ein Maß dafür, wie gleichbleibend eine Verfahrbewegung über die Zyklen erfolgt. Im Laufe des Versuchs ist über Material- und Parameteränderungen der Gegendruck im System verändert worden. Der mittlere Fehler für die Vorlaufgeschwindigkeit beläuft sich über den Zeitraum in einem Bereich von $\pm 0,003$ mm/s, was verschwindend gering ist. Ein signifikanter Einfluss bei den äußeren Änderungen ist somit nicht zu erkennen. Auch die Positionstreue, wie definierte Wegpunkte (wie z. B. der Dosierhub) angefahren werden, erreicht Werte von $\pm 0,002$ mm. Diese Ergebnisse zeigen, dass durch die Weiterentwicklung des Antriebssystems nunmehr Maschinen zur Verfügung stehen, die in ihrer Reproduzierbarkeit den hydraulischen Maschinen deutlich überlegen sind. Vor allem durch den Einzug der vollelektrischen Antriebssysteme mit Direktantrieb entstand ein extrem steifes Systemverhalten, welches leicht regelbar und im Vergleich zu den hydraulischen Systemen bei Weitem nicht so stör anfällig ist [Kud97]. In der Temperaturregelung der Zylinder-temperatur liegt der Schwankungsbereich bei $0,1$ °C. Nur unwesentlich größer ist die Regelgenauigkeit des Temperiergeräts, das die Vorlauf-temperatur auf $0,2$ °C einstellen kann. Auch bei der Anregung der Prozessdrücke zeigten sich keine wesentlichen Schwankungen. Je nach Prozessbedingungen verändert sich jedoch der Zeitraum, bis der gewünschte Druck aufgebaut wurde. So dauert es in der Nachdruckphase bei einer unterfüllten Form länger, bis der Druck aufgebaut ist, da im ersten Teil des Nachdrucks erst die Form gefüllt werden muss.

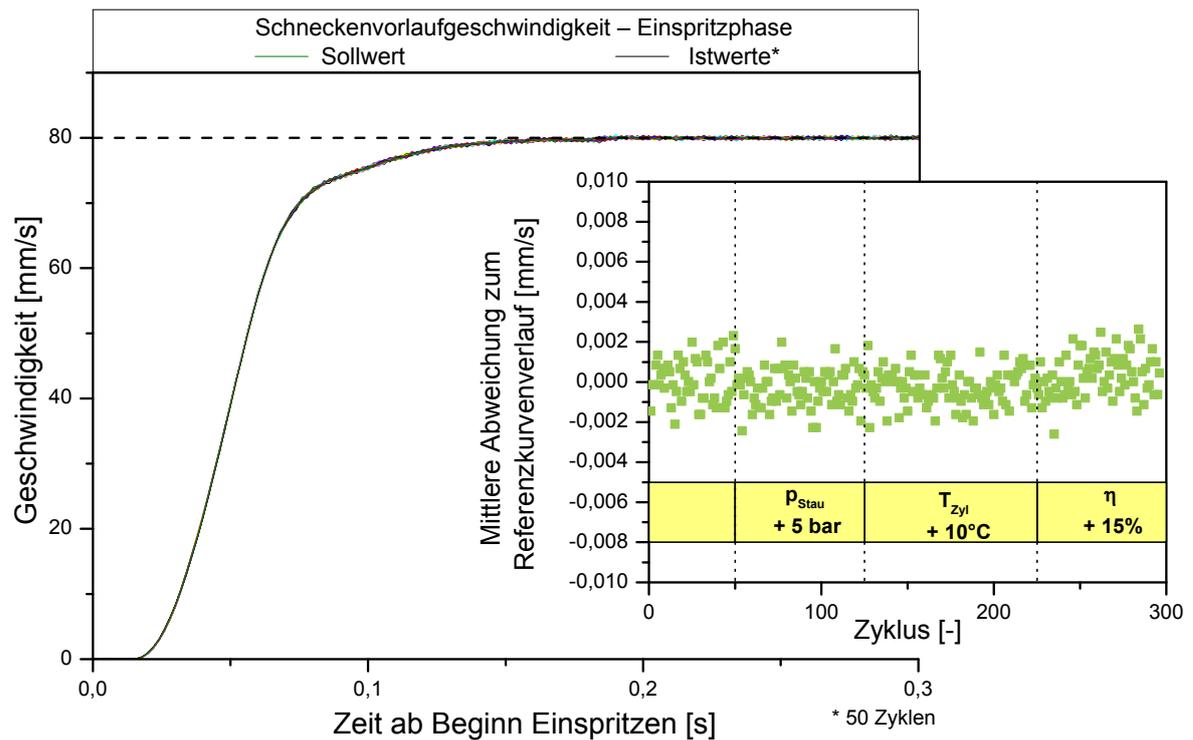


Abbildung 5-1: Links: Anregelverhalten 50 aufeinanderfolgender Einspritzzyklen; rechts: mittlere Abweichung von Einspritz-Ist-Kurve im Vergleich zum Referenzkurvenverlauf

5.1.1.2 Anfahren

Zum Durchführen des Spritzgießprozesses muss die Temperatur des Werkstoffs mehrfach geändert werden. Die Temperatur des Polymeren ist im Prozess nicht direkt regelbar. Vielmehr werden Anlagenkomponenten, die die Temperatur des Werkstoffs beeinflussen, in ihrer Temperaturführung gelenkt. Zu diesen Anlagenkomponenten zählen z. B. die Zylinderwandtemperatur oder die Temperiermitteltemperatur der Werkzeugtemperierung.

Erst wenn alle temperaturüberwachten Komponenten in der Aufheizphase ihre Prozesstemperatur erlangt haben, bekommt der Maschinenbediener maschinenseitig die Freigabe, die Produktion zu starten. Dieses Anfahren der Produktion stellt einen erheblichen Eingriff in den thermischen Haushalt der Spritzgießzelle dar. Zyklusspezifisch ergibt sich ein neuer thermischer stationärer Zustand.

Abbildung 5-2 zeigt die Veränderungen in den Prozesstemperaturen während des Anfahrens am Beispiel einer Produktion mit dem in Tabelle 3-3 vermerkten Polymer Polycarbonat bei einer Zykluszeit von 16,4 s. Erst ab Zyklus Nr. 47 ist ein stationäres Verhalten in den Prozesstemperaturen zu erkennen. Zu Beginn des Anfahrvorgangs wird das kalte Polymer in die Plastifizierung eingezogen und erwärmt sich an der Zylinderwand. Dieser Vorgang entzieht den ersten Zonen Energie, wodurch zunächst die Zylindertemperatur am Einzug abfällt. Be-

dingt durch die Dämpfung des Systems bemerkt das Regelungssystem den Energieentzug totzeitbehaftet. Es dauert 47 Zyklen, bis die Regelung in der Einzugszone imstande ist, diesen Störeinfluss auszugleichen. Durch die drehende Schnecke entsteht eine Zwangsförderung, die das Granulat nach vorne transportiert. Über die Schneckenlänge nimmt die Gangtiefe ab, sodass im vorderen Teil der Plastifizierung viel mehr Friktion entsteht. Dies führt im Anfahrprozess dazu, dass in den vorderen Temperierzonen der Plastifizierung durch die eingebrachte Friktion mehr Energie in die Zonen eingetragen wird. Es entsteht ein gegenteiliger Effekt wie am Einzug, wodurch die Zylindertemperatur im Düsenbereich zunimmt. Die höhere Temperatur im vorderen Bereich der Plastifizierung resultiert letztendlich in einer höheren Schmelze-Temperatur. Auf der Werkzeugseite bildet sich als Folge des Eintrags von heißer Kunststoffschmelze auch ein neuer Gleichgewichtszustand. Die Vorlauf-temperatur der Werkzeugtemperierung war auf einen Sollwert von 90 °C eingestellt. Durch den Energieeintrag aus der Schmelze steigt die mittlere Werkzeugwand-Temperatur auf ein Niveau von ca. 118 °C an. Diese thermischen Verhältnisse in der Plastifizierung, der Schmelze und im Werkzeug beeinflussen die Abkühlkurve des Bauteils und letztendlich die resultierende Bauteil-Temperatur beim Entformen. Wie in der ersten Sektion des Anfahrprozesses bis Zyklus 16 zu erkennen ist, steigt die Oberflächentemperatur des Bauteils, mit der sich einstellenden Werkzeugwandtemperatur. Nach diesem Bereich hat die Werkzeugwand-Temperatur ihren neuen stationären Zustand erreicht. Die Bauteiloberflächentemperatur ist nahezu stationär, weist aber noch einen großen Streubereich auf. Erst ab dem Zeitpunkt, an dem sich die Zylindertemperatur eingeschwungen hat, verhält sich die Oberflächentemperatur konstant.

Die Betrachtung der Regel-, Prozess- und Bauteiltemperaturen zeigt, dass eine stabile Regelzonentemperatur nicht für unveränderte Prozesstemperaturen steht. Dies war werkstoff- und prozessübergreifend zu sehen. Während des Anfahrens stellt sich ein neuer thermischer stationärer Zustand ein. Erst wenn sich dieser zykluspezifische Zustand ergeben hat, ist davon auszugehen, dass gleichbleibende Prozesszustände und Bauteileigenschaften entstehen. Auf Basis dieser Untersuchungen erforderte eine Systemveränderung für die folgenden Untersuchungen eine Einlaufzeit von 25 min oder 70 Zyklen.

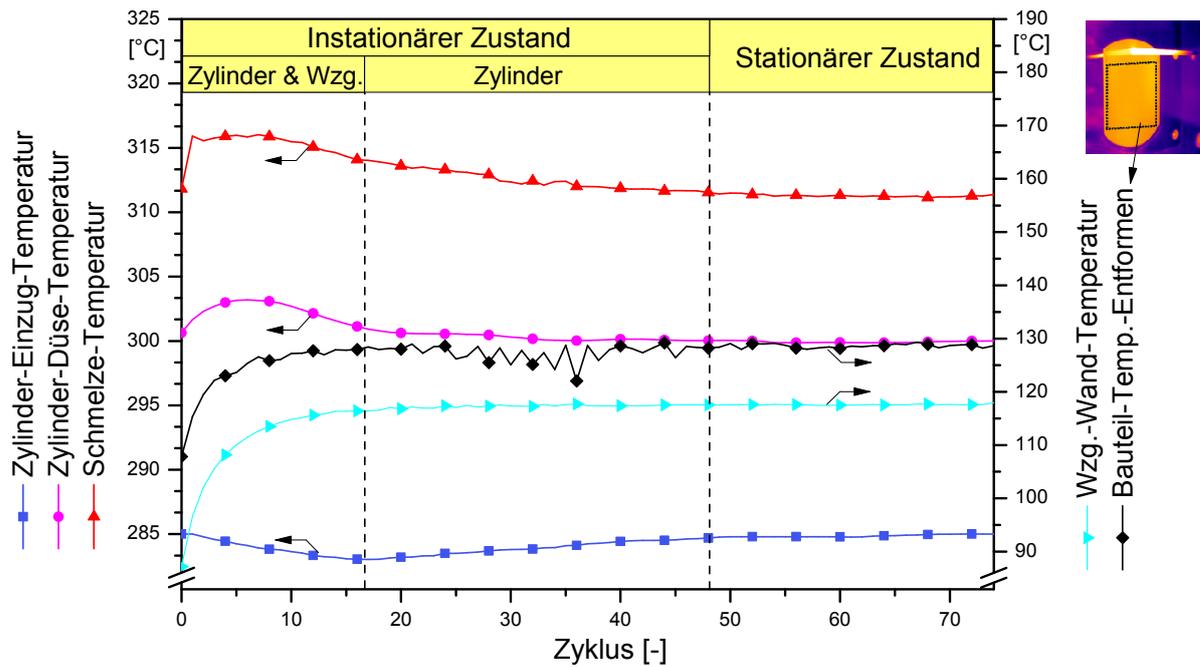


Abbildung 5-2: Änderung im thermischen Haushalt der Spritzgießmaschine

5.1.2 Mitwelt/Umgebung

Zur Kategorie Umgebung zählt nicht nur der Faktor des Raumklimas um die Fertigungszelle, sondern auch die aus der Umgebung in den Fertigungsraum eingetragenen Energieströme, wie z. B. die elektrische Versorgungsspannung und das Kühlwasser, das zur Abfuhr von Wärmeenergie genutzt wird.

5.1.2.1 Raumklima

Wichtige Faktoren, die das Raumklima in der näheren Umgebung der Fertigungszelle bestimmen, sind vor allem die Lufttemperatur, -feuchtigkeit und die Strömungsverhältnisse. Die Lufttemperatur und deren Strömung beeinflussen durch die Konvektion den Energieabtrag oder -eintrag an den Oberflächen der Maschinenteile. Die vorhandene Luftfeuchtigkeit verändert unter anderem die Feuchtigkeitsaufnahme von getrocknetem Granulat oder die elektrostatische Ladung der Kunststoffprodukte. In dieser Untersuchung wird der Einfluss der Luftfeuchtigkeit nicht betrachtet. Der Fokus liegt auf dem Einfluss der Umgebungstemperatur und der Strömungsverhältnisse. Im Folgenden sind die Einflüsse von Schwankungen im Raumklima auf die Messtechnik und den Prozess aufgeführt.

5.1.2.1.1 Einfluss auf die Messtechnik

Die in der Anlage verbauten Sensoren geben Aufschluss über die Prozessbedingungen am Messort. Der Sensor generiert ein Ausgangssignal, das proportional zur zu messenden Zustandsgröße ist. Weitere Randeinflüsse auf das Ausgangssignal sind unerwünscht und müssen kompensiert werden. Andernfalls verursachen sie einen Messfehler. Abbildung 5-3 zeigt den Einfluss der Umgebungstemperatur auf das Sensorsignal verschiedener Drucksensoren. Weil die Sensoren von jeglichen Anbauteilen entkoppelt waren, sind die Veränderungen am Sensor auf die Raumtemperatur zurückzuführen. Die drei im Diagramm aufgeführten Sensoren arbeiten mit verschiedenen Messprinzipien.

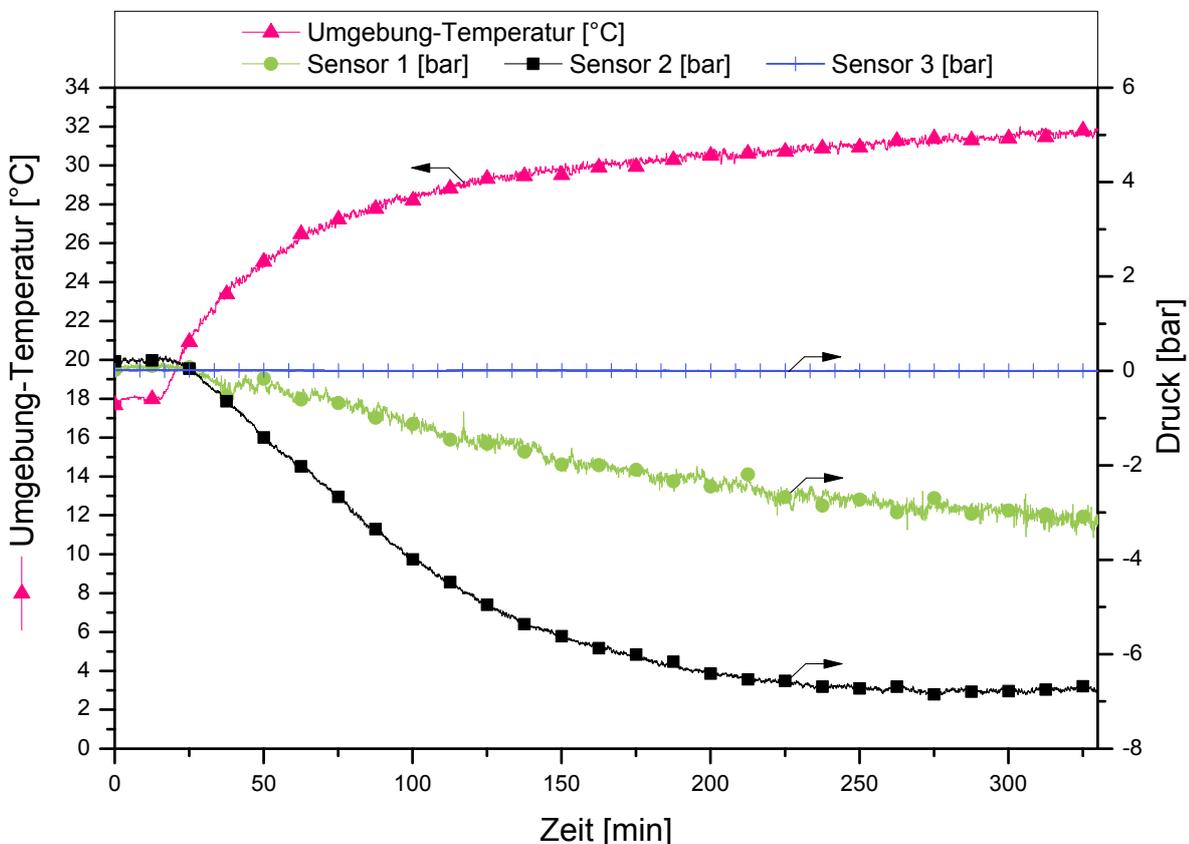


Abbildung 5-3: Einfluss der Umgebungstemperatur auf den Messfehler für verschiedene Sensoren

Sensor 1 wirkt nach dem piezoresistiven Prinzip, sein temperaturbedingter Drift liegt bei ca. 3 bar für den Sprung von 13 °C. Weitaus größer ist der Drift in Sensor 2, der auf Basis eines Dehnungsmessstreifens arbeitet. Einzig der piezoelektrische Werkzeuginnendrucksensor (Sensor 3) zeigt keine Veränderung im Temperaturanstieg. Dies liegt allerdings daran, weil der Ladungsverstärker funktionsbedingt in Zeitintervallen seinen Nullpunkt referenziert und somit kein zeitabhängiger Drift entstehen kann. Diese Möglichkeit des gezielten Resets ist in der Plastifizierung der Spritzgießmaschine nicht gegeben, wodurch dieser Sensortyp hierfür

nicht einsetzbar ist. Aus diesem Grund bleibt die Gefahr eines temperaturbedingten Sensordrifts in der Spritzgießverarbeitung, da die Sensortypen 1 oder 2 in der Spritzgießmaschine verbaut sind. Eine Veränderung der Linearitätskonstante der Sensoren konnte nicht überprüft werden.

5.1.2.1.2 Einfluss auf den Prozess

Für gewöhnlich befindet sich die Spritzgießfertigungszelle nicht in einer klimatisierten Umgebung. Deshalb ist der Prozess den Veränderungen der Umgebung ausgeliefert. Regionale und saisonale Klimaänderungen beeinflussen die Fertigungsumgebung. Kurzfristige Schwankungen können durch sich öffnende Hallentore oder einsetzende Lüfter herbeigeführt werden. Damit diese Einflüsse im Versuch gezielt untersucht werden konnten, ließ sich die Temperatur im Reinraum mithilfe der Klimaanlage von 18 °C auf 32 °C erhöhen. Einsetzende Strömungen in der Fertigungsumgebung wurden durch einen Druckluftstrom im Werkzeugbereich und einen Ventilator vor der Plastifizierung simuliert. Die Auswirkungen dieser kurzfristigen und langfristigen Änderung im Fertigungsumfeld illustriert Abbildung 5-4.

Durch die steigende Umgebungstemperatur geht weniger Energie von der heißen Zylinderoberfläche in die Umwelt verloren. Dadurch fällt die über den Zyklus aufgenommene Energie der Zylinderheizung zunächst ab. Überströmt ab Zyklus 950 wieder kalte Luft die Plastifizierung, steigt die Energieaufnahme zum Halten der Regeltemperatur rapide an. Obwohl die Zylindertemperatur während des Versuchs exakt auf Solltemperatur gehalten werden konnte, verändert der Wechsel in der Umgebungstemperatur auch signifikant das Resultat des Aufschmelzprozesses. Im Zeitraum der Temperaturerhöhung fällt die Schmelze-Temperatur im Niveau ab und der damit verbundene Materialkennwert der Schmelze-Viskosität erhöht sich. Über eine redundante Messung der Temperatur sowie nach einer genaueren Betrachtung der Dissipationsenergie kann ein Messfehler oder ein verringerter Energieeintrag über die Schnecke ausgeschlossen werden. Den Kurvenverläufen zufolge ließe sich eher auf eine Kopplung zwischen der Zylinderheizungs-Energie und der die Schmelze betreffenden Kennzahlen schließen.

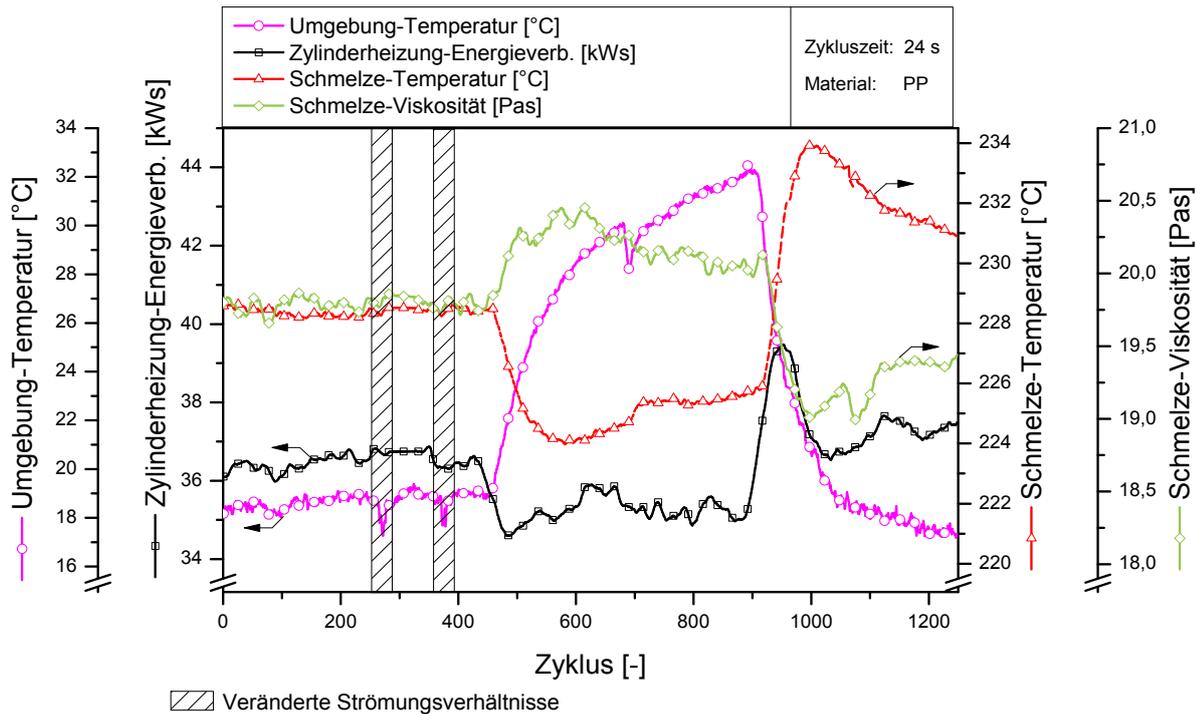


Abbildung 5-4: Einfluss des Raumklimas auf Parameter des Aufschmelzens

Zur Analyse des beschriebenen Phänomens ist ein eigener Versuchsaufbau genutzt worden. Im Frontbereich einer Lanze wurde ein Thermoelement angebracht, das über eine Feder nach oben gedrückt wird. Mithilfe dieser Lanze lässt sich bei ausgebaute Schnecke die Zylinderwand-Temperatur bestimmen. Abbildung 5-6 links zeigt die Lanze in der Plastifizierung. Um die Wandtemperatur direkt messen zu können, mussten die Radien des Sensorkopfs und der Zylinderbohrung aufeinander abgestimmt werden. Unter Verwendung dieses Messinstruments ließ sich die Zylinderwand-Temperatur über die Länge der Plastifizierung ermitteln. Im Versuch galt es herauszufinden, ob sich die Zylinderwand-Temperatur bedingt durch einen unterschiedlichen Wärmestrom an die Umgebung bei aktivem Regler verändert. Damit diese temperatur- und konvektionsbedingten variablen Verlustströme an der Zylinderoberfläche herbeigeführt werden konnten, ist der Isolierzustand der Zylinderoberfläche verändert worden. Die Verläufe der Zylinderwand-Temperatur aus diesen Versuchen sind in Abbildung 5-5 beispielhaft für einen Teilbereich in Zone 3 illustriert. Trotz identischer Regeltemperatur von 220 °C über alle Regelzonen liegen die gemessenen Zylinderwand-Temperaturen immer deutlich darüber. Je höher dabei die Energiezufuhr aus den Heizbändern zum Halten der Solltemperatur ist, desto inhomogener und höher ist der Temperaturverlauf der Zylinderwand-Temperatur (Abbildung 5-5 links). Abbildung 5-5 rechts verdeutlicht, dass die mittlere Wandtemperatur dabei linear mit der eingebrachten Leistung zunimmt. Wie dieser Versuch zeigt, ist die Ursache der abfallenden Schmelze-Temperatur eine niedrigere Zylinderwand-Temperatur. Infolge einer höheren Umgebungs-Temperatur ergibt sich ein geringerer Wär-

mestrom am Heizband, wodurch Zylinderwand-Temperatur und Schmelze-Temperatur abnehmen.

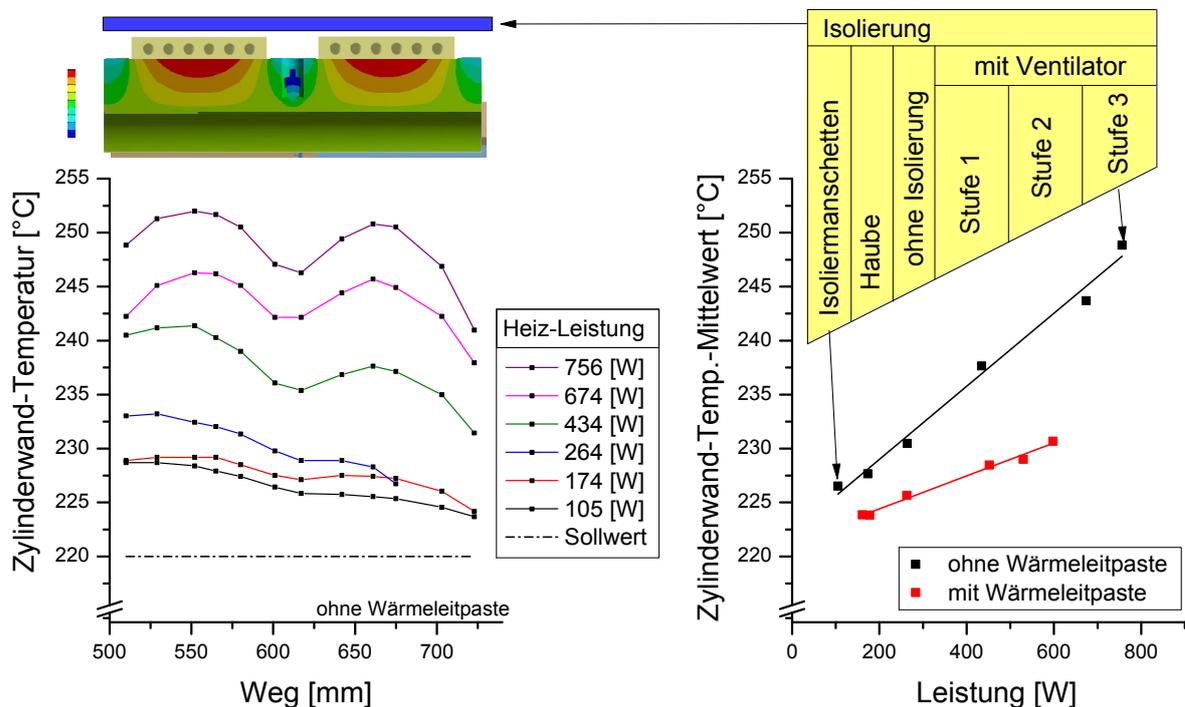


Abbildung 5-5: Zylinderwand-Temperaturen in Abhängigkeit der Leistungsaufnahme der Temperierzone – links: über den Weg, rechts: über die Leistungsaufnahme

Mangels Daten für die Wärmeübertragung im Bilanzraum ist eine genaue Simulation der thermischen Bedingungen im Zylinder nicht möglich.¹² Zur Begründung der oben gemessenen Phänomene folgt daher eine schematische Erklärung der thermischen Verhältnisse im Plastifizierzylinder, die auf punktuellen praktischen Messungen fußt.

Aufgebaut ist die Zylinderheizung für die Zone 3 gemäß Abbildung 5-6 links. Zwei Widerstandsheizbänder umschließen den Zylinder und fungieren dort als Energiequelle. Zwischen den beiden Heizbändern ist in einer Bohrung ein Sensor versenkt, der den Messwert für den Regler liefert. Das Temperaturprofil im Zylinder ist abhängig vom Wärmestrom¹³ und den Wärmewiderständen der einzelnen Bereiche. Die Wärmewiderstände der einzelnen Komponenten können als konstant angesehen werden. Der Wärmestrom hingegen wird vom Regler unmittelbar beeinflusst. Ausgehend von dem als Energiequelle fungierenden Heizband fließt Energie in den Zylinder. Von dort aus bilden sich Wärmeströme zu den Regionen mit niedriger Temperatur aus. Der Energieteil, der in den Zylinder eingeht (Q_{Heizung}), teilt sich auf in die

¹² Abbildung 5-5 links oben zeigt eine über eine FEM-Analyse gewonnene qualitative Temperaturverteilung im Zylinderquerschnitt zum Veranschaulichen der Inhomogenitäten.

¹³ Die Wärmeströme verlaufen immer ausgehend von den Bereichen mit hoher Temperatur in Richtung der Bereiche mit niedrigen Temperaturen.

Ströme, die in das Polymer übergehen (Q_{Plast}), und dem Anteil, der über den Zylinder in den Sensor und dann an die Umgebung (Q_{Verlust}) verloren geht.

Im Folgenden soll genauer auf Abbildung 5-6 rechts eingegangen werden. Dort ist die modellhafte Darstellung der Detailansicht um den Sensor zu sehen. Der Zylinderausschnitt lässt sich im Modell in drei Bereiche und zwei Energieströme vereinfachen. Der unterste Block repräsentiert den Bereich des Zylinders, der sich unter dem Sensor befindet. Für den Sensor steht der oberste Block mit der Position des Thermoelements. Der Block dazwischen ist Ausdruck für den Kontaktwiderstand zwischen Sensor- und Zylinderoberfläche, der überwiegend durch die Bearbeitungsspuren an den Oberflächen herbeigerufen wird. Im Modell sind zwei Wärmeströme wirksam, die beide ihren Ursprung in der Zylinderheizung haben. Die über die Seite eingetragene Energie fließt zur Zylinderwand (Q_{Plast}) und über den Sensor (Q_{Verlust}) an die Umgebung ab. Ein Wärmestrom ist dabei immer an einen Temperaturgradienten gekoppelt. Neben dem Schaubild ist der qualitative Temperaturverlauf im Zylinderdurchmesser für verschiedene Wärmeströme aufgetragen. Herrscht kein Wärmestrom, wäre die Temperatur über den Querschnitt konstant und entspräche der einzuregelnden Sensortemperatur (T_{Se}). Dieser Zustand würde sich theoretisch auch bei unendlich kleinen Wärmewiderständen ausbilden. Wie hoch der Temperaturabfall in Richtung Wärmestrom für einen Block ausfällt, ist vom Wärmestrom und dem individuellen Wärmewiderstand abhängig. Je höher der Wärmewiderstand und der Wärmestrom sind, desto flacher verlaufen die Linien im Diagramm, in dem die Position über die Temperatur aufgetragen ist. Erhöht sich der Verlustwärmestrom über den Sensor, steigt in erster Linie die über den Kontaktwiderstand verursachte Temperaturdifferenz. Bei einer identischen Sensortemperatur resultiert daraus eine höhere Zylinderwand-Temperatur (vgl. Abbildung 5-6 links; $Q = \text{klein}$ und $Q = \text{groß}$). Die in Abbildung 5-5 rechts gemessene Temperaturerhöhung wird also durch die Wärmeleitwiderstände um die Sensorbohrung und den Wärmestrom durch den Sensor verursacht. Bei einer weiteren Messung ist der Wärmewiderstand der Kontaktfläche durch eine Wärmeleitpaste stark reduziert worden. Dadurch wird die in der Kontaktfläche verursachte Temperaturdifferenz und damit der Einfluss der Leistungsaufnahme auf die Zylinderwand-Temperatur stark gemindert (vgl. Abbildung 5-5 rechts). Somit schwächt sich auch der Einfluss des Raumklimas auf die Schmelze-Temperatur ab.

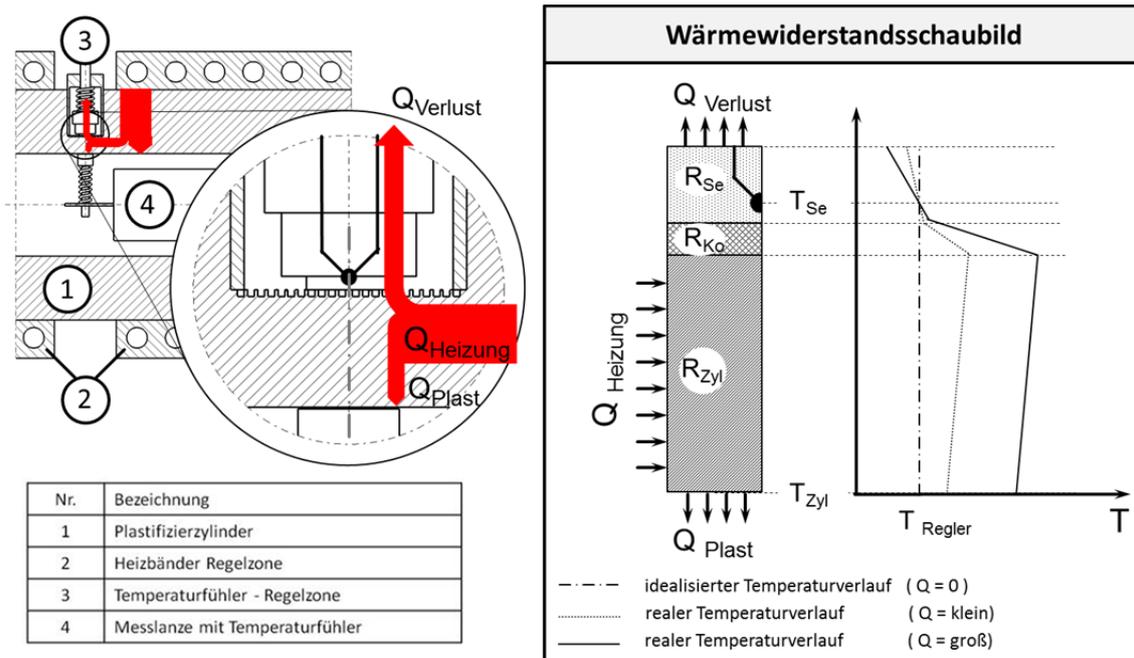


Abbildung 5-6: Schematische Darstellung der Zylinderheizung mit den Energieströmen (links), Wärmewiderstandsmodell der Zylinderheizung mit mehreren qualitativen Temperaturverteilungen (rechts)

Als Ursache aus der Veränderungen in der Schmelze-Qualität werden auch nachfolgende Prozessparameter beeinflusst. Eine höhere Viskosität der Schmelze mindert die Druckübertragung ins Werkzeug, wodurch sich ein niedriger Werkzeuginnendruck einstellt. Dies in Kombination mit einer schneller einfrierenden Masse reduziert das Werkzeug-Innendruck-Integral (siehe Abbildung 5-7). Der schnellere Abfall im Werkzeuginnendruck spiegelt sich auch in der Temperatur wider, bei der der drucklose Zustand im Werkzeug erreicht wird. Diese Kennzahl erhöht sich um $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, sodass davon auszugehen ist, dass die Bauteile mehr schwinden als zuvor. Der Anstieg ist auch mit einem langsameren Abköhlverhalten im Werkzeug verbunden. In Abbildung 5-8 sind die wichtigen Temperaturen aufgeführt, die über das Abköhlverhalten bestimmen. Mit steigender Umgebungstemperatur nimmt auch die Werkzeugwand-Temperatur zu, da sich damit die Verlustenergie vom Werkzeug in die Umgebung vermindert. Demzufolge verursacht ein Anstieg in der Umgebungstemperatur ein langsameres Abköhlen. Aus diesem Grund steigt die Entformungstemperatur trotz einer geringeren Massetemperatur.

Beginnend bei Zyklus 250 und Zyklus 355 sind Strömungsveränderungen im Werkzeug- und Plastifizierungsbereich simuliert worden. Dies wirkte sich allerdings nur auf die Temperaturführung im Werkzeug aus. Bauteil-Temperatur- $p=0$, Werkzeugwand-Temperatur und die Entformungstemperatur fallen schlagartig ab.

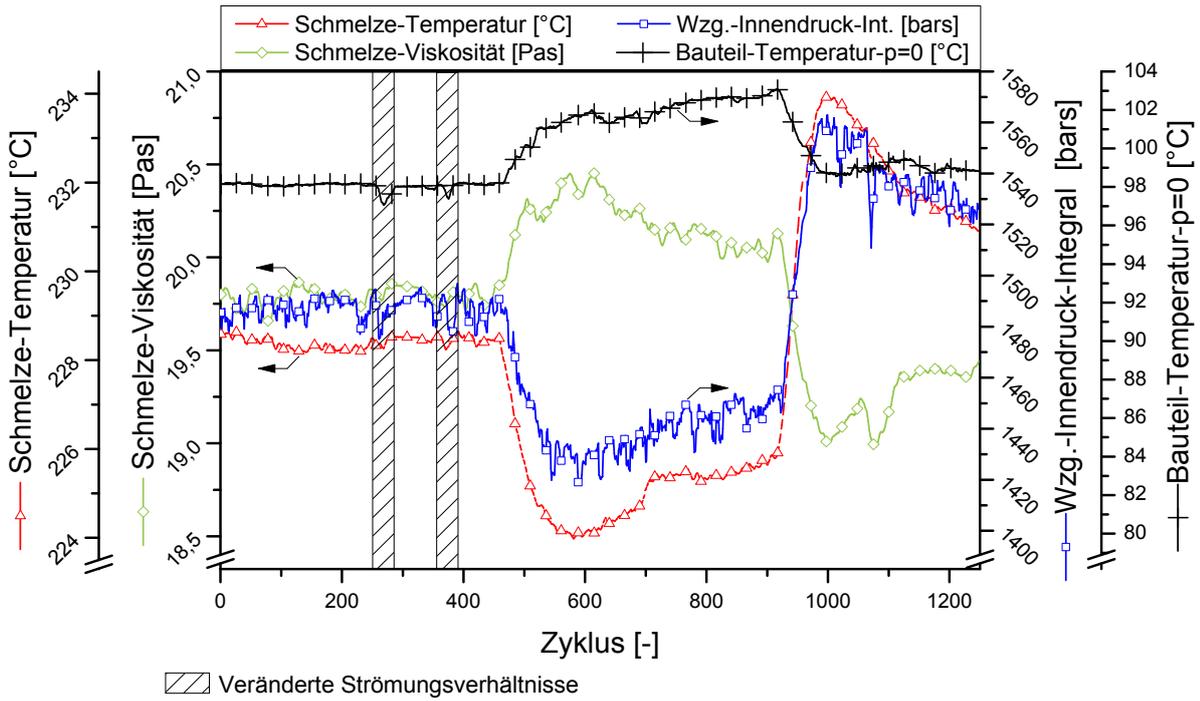


Abbildung 5-7: Einfluss des Raumklimas auf Parameter des Abkühlens I

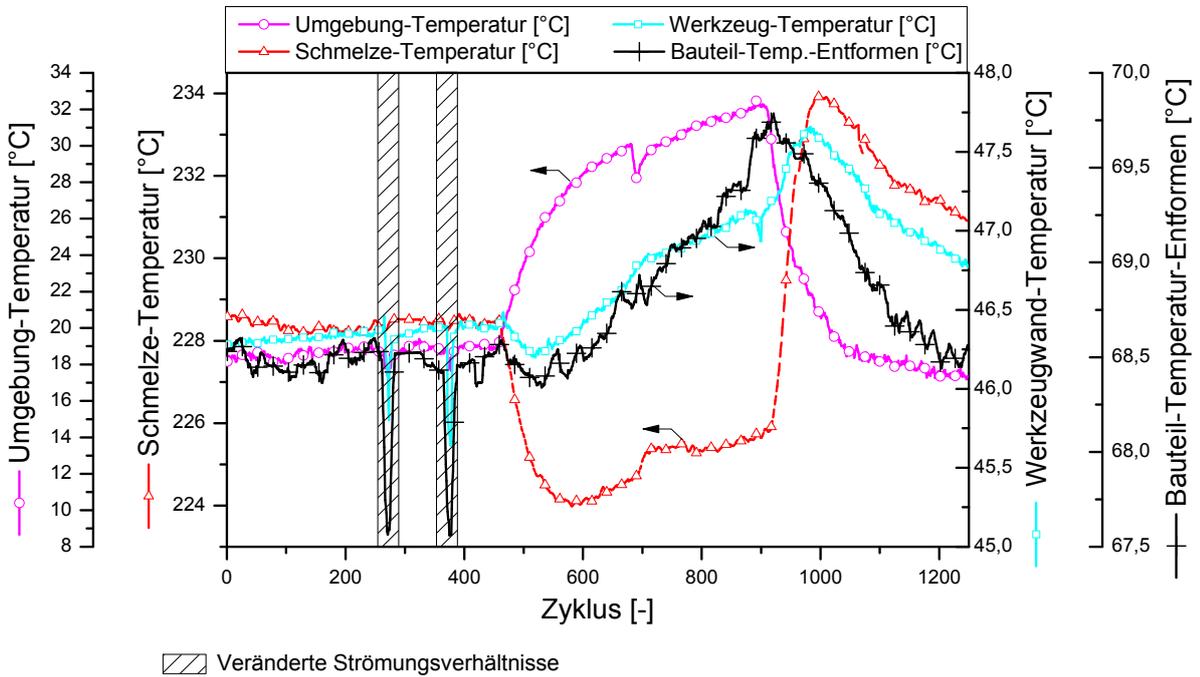


Abbildung 5-8: Einfluss des Raumklimas auf Parameter des Abkühlens II

5.1.2.2 Elektrische Spannung

Die wichtigste Versorgungsquelle für den Betrieb des Spritzgießprozesses stellt die elektrische Energie dar. Sie versorgt die Antriebe, Heizungen und die Steuerung. Gespeist wird die Fertigungszelle von außen über ein Dreiphasenwechselstromnetz im Niederspannungsbereich. Für gewöhnlich handelt es sich dabei um ein betriebsinternes Versorgungsnetz. Das Werk ist oftmals an ein Mittelspannungsnetz angeschlossen und wandelt diese Spannung in den Niederspannungsbereich um. Die an der Fertigungszelle anliegende Spannung muss für den reibungslosen Betrieb der elektrischen Verbraucher bestimmte Kriterien erfüllen. Über die Spannungsqualität wird die Form der Einhaltung dieser Kriterien ausgedrückt. Wichtige Merkmale für die Spannungsversorgung sind Spannungshöhe und -frequenz sowie die Kurvenform der Wechselspannung. Einfluss auf die Spannungsqualität haben neben dem Erzeuger auch die Rückwirkungen aus den Verbrauchern und sonstige Einflüsse während der Übertragung im Netz. Eigene durchgeführte Messungen zeigten, eine das Spannungssignal langsam verändernde, stochastische Streuung von $\pm 10\%$. Einen massiven Eingriff in die Höhe des Spannungsniveaus stellen schlagartig eintretende Änderungen im Leistungsbedarf des Netzes dar, die auftreten, wenn abrupt Verbraucher mit hohem Leistungsbedarf ein- oder ausgeschaltet werden. In dieser hohen Dynamik kann die Versorgungsquelle nicht auf den veränderten Leistungsabruf reagieren, wodurch sich das Spannungsniveau verschiebt. Eine solche Änderung in der Spannungsversorgung ist auf eine produzierende Spritzgießmaschine aufgegeben worden (Abbildung 5-9). Herbeiführen ließ sich dieser Spannungsabfall durch den hohen Leistungsbedarf beim Aufheizen benachbarter Spritzgießmaschinen. Bei der betrachteten produzierenden hydraulischen Spritzgießmaschine¹⁴ konnten die maschineninternen Parameter nur über die Prozessdatenvisualisierung dokumentiert werden, wodurch die Ablesegenauigkeit eingeschränkt war. Die Zylindertemperatur ließ sich nur in 1°C-Schritten ablesen. Aus den Messwerten ist jedoch deutlich ersichtlich, dass sich durch den Abfall der Versorgungsspannung auch die Zylindertemperatur kurz absenkt. Dadurch verändert sich auch das Bauteilgewicht schlagartig. Erst wenn der Regler die Ist-Temperatur angepasst hat, erreicht das Bauteilgewicht sein ursprüngliches Niveau. Im Werkzeug-Innendruck-Integral ist kein signifikanter Einfluss der Spannungsänderung zu erkennen. Deshalb liegt die Vermutung nahe, dass die Spannungsänderung keinen Einfluss auf das Antriebsystem hat. Primär verändert sich durch den Spannungsabfall die Zylindertemperatur. Aufgrund des Spannungswechsels ist das Regelungssystem nicht in der Lage, die Solltemperatur zu halten. Eine Erklärung für diesen Effekt lässt sich im Aufbau des Regelungssystems für die Zylinderheizung finden.

¹⁴ Arburg Allrounder 270 S 350-150.

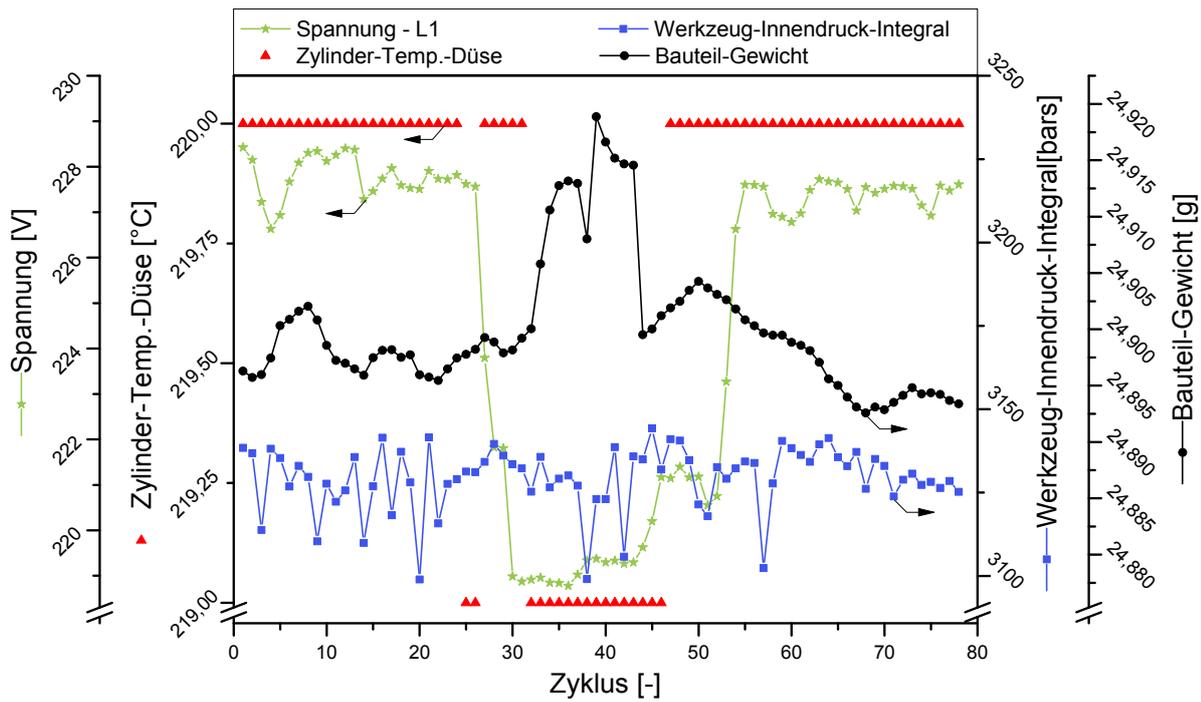


Abbildung 5-9: Auswirkungen eines Spannungsabfalls auf den Spritzgießprozess

Die Temperierung des Zylinders ist so aufgebaut, dass die Temperatur zonenweise über einen Regler beeinflusst wird. Abbildung 5-10 veranschaulicht den Wirkmechanismus der Zylindertemperaturregelung einer Zone in einem Blockschaltbild. In der Regelstrecke wirkt das elektrische Widerstandsheizband als Aktuator. Wird dieses mit Strom durchflossen, transformiert der Widerstand die elektrische Leistung in Wärmeenergie. Die Leistungszufuhr in das Heizband erfolgt gesteuert über eine Pulsweitenmodulation im Stellglied. Ein Halbleiterrelais schließt hierfür den Stromkreis immer für eine prozentuale Einschaltdauer eines Zeitintervalls. Das heißt in einem Beispiel ausgedrückt: Beläuft sich das Stellsignal für das Stellglied (u_i) auf eine Einschaltdauer von 30 %, ist das Halbleiterrelais bei einem Zeitintervall von 1 s insgesamt 0,3 s geschlossen. Mit einem geschlossenen Stromkreis erhält das Heizband eine Leistung, die vom Widerstand und der anliegenden Spannung (U_{Eff}) abhängt. Gemittelt über das Zeitintervall ergibt sich gesteuert über die PWM eine Leistungszufuhr (u_{i-s}) für die Regelzone. Die Pulsweite, die im Regelkreis aktiv Einfluss auf die Leistungszufuhr nimmt, stammt aus dem PID-Regler, der mit seinen drei Gliedern abhängig von der Sollwertabweichung eine Einschaltdauer berechnet.

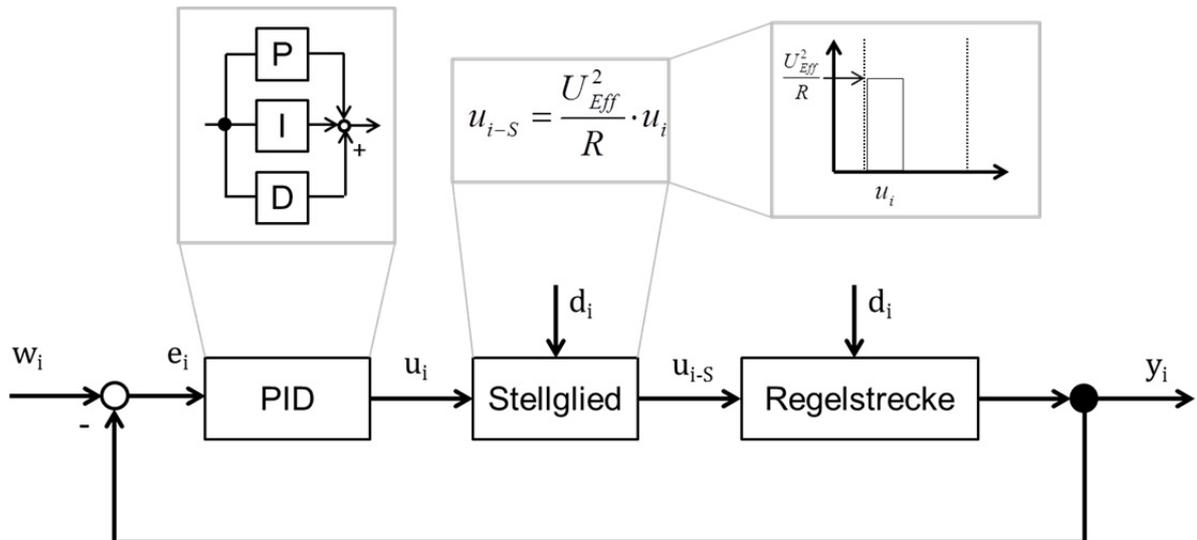


Abbildung 5-10: Blockschaltbild für die Zylindertemperaturregelung

Zur genaueren Untersuchung der Vorgänge in Abbildung 5-9 ist das Blockschaltbild in Abbildung 5-10 in einen eigenen Versuchsstand umgesetzt worden, der eine genauere Messung der Parameter ermöglicht, einen Einblick in die Zusammensetzung des Reglerausgangswerts gibt und es zulässt, die anliegende Spannung über ein Netzteil aktiv steuern. Das Verhalten der Regelstrecke und des Reglers auf einen Spannungsabfall ist in Abbildung 5-11 dargestellt. Beginnend im stationären Zustand bei einer Zylindertemperatur von 200 °C gleicht der Integral-Anteil die Verlustenergie an der Zylinderoberfläche aus. Bei einem Einschaltwert von 22 % ergibt sich bei einer Spannung von 220 V die benötigte Leistung von 265 W. Schlagartig wird die Spannung um den Betrag von 20 V gesenkt, wodurch bei noch immer gleichem Integral-Anteil die eingebrachte Leistung an der Zone abnimmt. Der auf diese Weise verursachte Temperaturabfall dauert so lange an, bis der Integral-Anteil des Reglers so weit gestiegen ist, dass die Einschaltdauer bei veränderter Spannung wieder der ursprünglichen Leistung entspricht. In der später eintretenden Spannungserhöhung zeigt sich ein umgekehrter Effekt. Bei dem bestehenden Regelkonzept für die Zylindertemperatur werden Störgrößen am Stellglied (d_i) nicht mitberücksichtigt. Die anliegende Spannung geht im Quadrat in die Berechnung der Leistung mit ein. Aus diesem Grund wirken sich Schwankungen in diesem Parameter besonders stark auf das Systemverhalten aus.

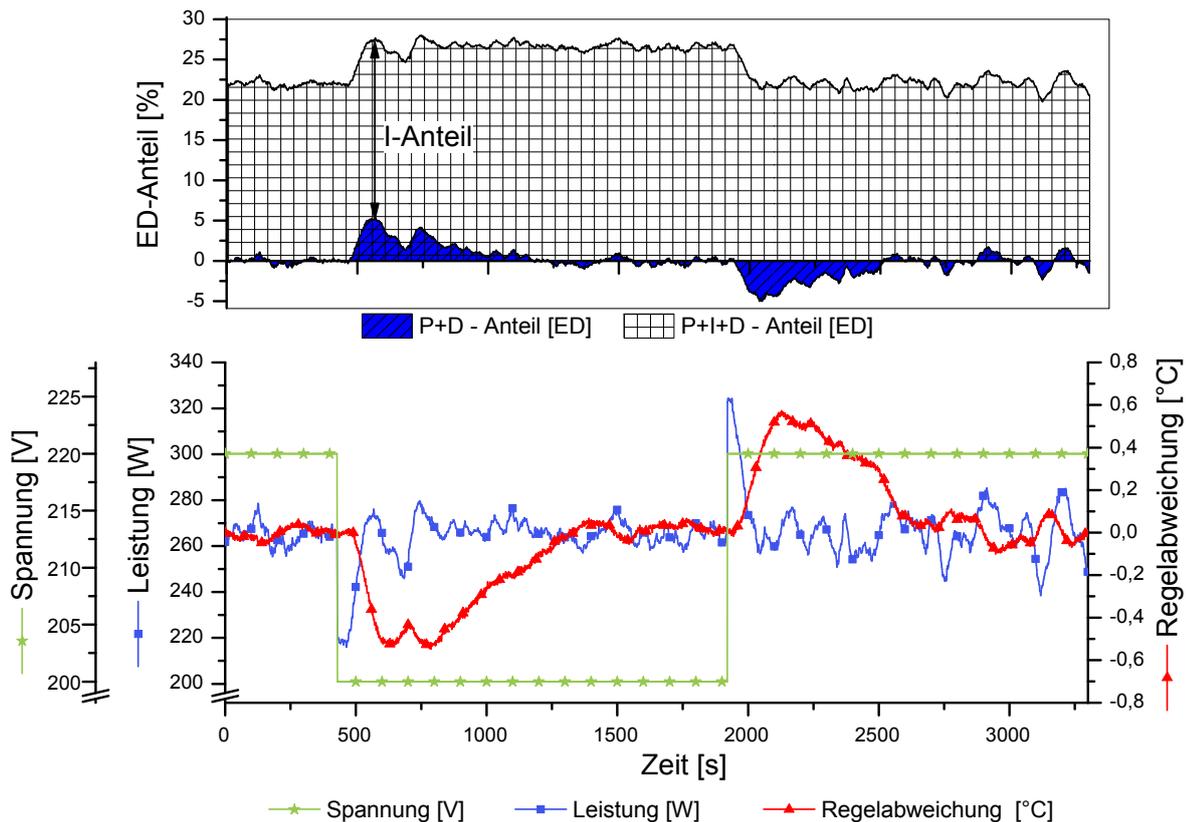


Abbildung 5-11: Auswirkungen eines Spannungsabfalls auf Parameter der Zylinderheizung und der Regelung

5.1.2.3 Kühlwasser

Die Kühlenergie wird in Form des Kühlwassers in einer Spritzgießfertigung in der Regel zentral erzeugt und über ein Verteilersystem an die einzelnen Verbraucher verteilt. Die wesentlichen Prozessgrößen die die Kühlleistung bestimmen, sind die Kühlmitteltemperatur und der anliegende Druck des Kühlwassers, der die resultierende Durchflussrate bestimmt. Auftretende Schwankungen in der Erzeugung oder Veränderungen in den Zuleitungen zum Verbraucher sorgen für wechselnde Bedingungen. Die Auswirkungen solcher Systemveränderungen im Kühlwasser sind in Abbildung 5-12 zu sehen. Mit einer wechselnden Kühlmitteltemperatur tritt der gleiche Effekt wie bei einem Sprung in der Versorgungsspannung auf: Kurzfristig ändert sich die Regelgröße. Dies ist im gegebenen Fall die Temperatur des umgewälzten Temperiermittels. Diese Störung wirkt sich hingegen nur sehr unwesentlich auf die prozessrelevante Werkzeugwand-Temperatur aus. Ein sich ändernder Vorlaufdruck hat hingegen eine schwerwiegendere Störung des thermischen Haushalts zur Folge.

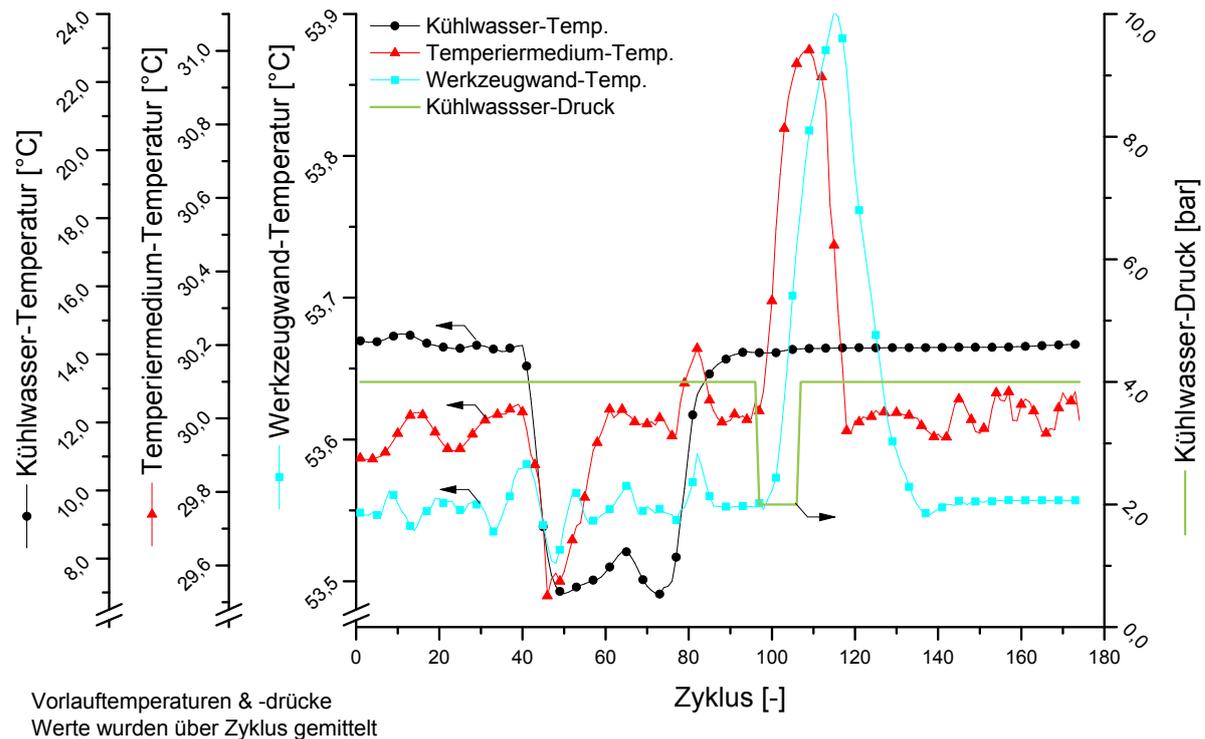


Abbildung 5-12: Einfluss der Kühlmittelqualität auf das Abkühlverhalten

5.1.3 Material

Beim Spritzgießen wird eine Vielfalt von verschiedenen Polymeren verarbeitet. Grob kann man in Hochleistungs-, Technische- und Standardpolymere unterscheiden. Außerdem lassen sich die Polymere anhand ihrer Gefügestruktur in eine amorphe und eine teilkristalline Anordnung der Moleküle einteilen. Ein weiteres relevantes Merkmal der Polymere ist, ob sie hygroskopisch sind oder nicht.

Die Polymere werden in unterschiedlich großen Losgrößen hergestellt und weiter modifiziert. Nach der Synthese erfolgt der Compoundierungsprozess, der zur spezifischen Ausrüstung des Materials dient. Während dieses Vorgangs sollen zugemischte Additivpakete und Füllstoffe das Polymer an die Anforderungen anpassen. Vom Materialhersteller geht der Rohstoff in verschiedenen Packungsgrößen zum Verarbeiter, der das Material direkt oder nach vorgeschalteten Prozessen, wie z. B. Trocknen oder Mischen, verarbeitet.

Um den Materialzustand beim Verarbeiter genauer zu beschreiben, ist zunächst eine Begriffsdefinition durchzuführen. Der Weg den das Material bei dem Verarbeiter von der Anlieferung bis zum Maschinentrichter durchläuft ist in Abbildung 5-13 dargestellt. Dort wird auch auf die Bezeichnungen verwiesen, die in dieser Arbeit für einen bestimmten Materialzustand stehen. Anhand der Art der Aufbereitung werden *Rohstoff* und *Werkstoff* unterschieden. Als

Werkstoff wird das Material am Einzug der Plastifizierung bezeichnet. Die dort anzufindenden Materialeigenschaften sind entscheidend für den weiteren Prozessverlauf und die Produktqualität. Gibt es keine Faktoren, die das Materialverhalten von außen zeitlich verändern, kann das Polymer bei gleichbleibendem Zustand unmittelbar verarbeitet werden. Oftmals muss das Material jedoch, bevor es in die Spritzgießmaschine gelangt, für die Verarbeitung vorbereitet werden. Dazu gehört beispielsweise das Vortrocknen hygroskopischer Polymere oder ein Zudosieren von Masterbatch oder Mahlgut. Das Herbeiführen gleichbleibender Materialrahmenbedingungen ist das Ziel der vor der Plastifizierung vorgelagerten Prozesse. Auf diese wirken abermals Störgrößen ein, die die Werkstoffeigenschaften mitbestimmen. Als *Rohstoff* wird das Material dann bezeichnet, wenn es definiert aufbereitet wurde und somit konstante Rahmenbedingungen, wie z. B. einen gleichen Restfeuchtegehalt, vorherrschen. Bei einer definierten Aufbereitung und gleichen sonstigen Rahmenbedingungen ist die Materialeingangsqualität hauptsächlich vom chemischen Aufbau des Polymeren bestimmt.

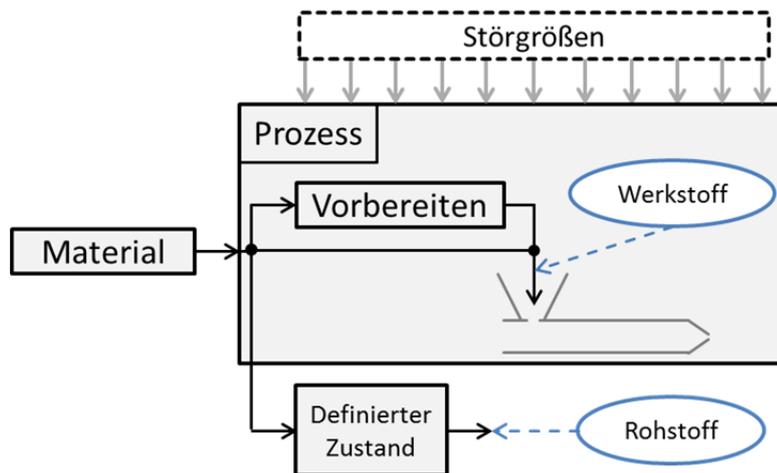


Abbildung 5-13: Weg der Einflussgröße Material von der Anlieferung bis zum Maschinentrichter

Fortlaufend wird in Rohstoff- und Werkstoffeigenschaften unterschieden. Erstere beschreiben die Materialqualität bei einem definierten Zustand, der dem Ideal für die Weiterverarbeitung entspricht. Das Eigenschaftsbild, das sich nach den Schwankungen aus der vorbereiteten Phase ergibt, ist als Werkstoffeigenschaften definiert. Betrachtung fanden in den nachfolgenden Untersuchungen Schwankungen in den Rohstoffeigenschaften und der Einfluss der Restfeuchte auf die Werkstoffeigenschaften.

5.1.3.1 Rohstoffeigenschaften

In diesem Abschnitt werden die Materialien aus Tabelle 3-4 untersucht. Um die Materialien anhand ihrer Grundeigenschaften zu charakterisieren, erfolgte eine umfassende Rohstoffanalyse. Betrachtung fanden die rheologischen, thermischen, thermodynamischen und physi-

kalischen Rohstoffeigenschaften. Dies geschah im Vorfeld zu den Versuchen an der Spritzgießmaschine an Laborgeräten. Durch die Prüfung der Chargen an Laborgeräten kann unter Normbedingungen die Werkstoffeigenschaft charakterisiert werden. Im Laufe des Spritzgießprozesses ist dies nicht feststellbar, da sich in Abhängigkeit der Werkstoffeigenschaften ein instationärer Zustand einstellt, wodurch sich die Prüfbedingungen unterscheiden.

5.1.3.1.1 Rheologische Untersuchungen

Zur Charakterisierung des Fließverhaltens thermoplastischer Kunststoffe haben sich auf dem Markt zwei Prüfverfahren etabliert.

Schmelzindex:

Der Schmelzindex (MFI, MFR) und der dazu komparable Volumen-Fließindex (MVR) sind aufgrund ihrer schnellen und einfachen Durchführbarkeit die am weitesten verbreiteten Prüfverfahren zum Beschreiben der rheologischen Eigenschaften einer Polymerschmelze. In der Regel wird jedes Polymer im Datenblatt und der Lieferspezifikation mit dieser Materialkennzahl charakterisiert. Für das Spritzgießen hat die Kennzahl den großen Nachteil, dass sie nur einen Punkt der Viskositätskurve bei niedriger Schergeschwindigkeit repräsentiert ($\dot{\gamma} \approx 1 \frac{1}{s}$ [Sch98]). Beim Spritzgießen treten jedoch viel höhere Schergeschwindigkeiten im Bereich $>100 \frac{1}{s}$ auf.

Hochdruckkapillarviskosimeter (HKV):

Das Hochdruckkapillarviskosimeter presst die Kunststoffschmelze für verschiedene Volumenströme mithilfe eines Kolbens durch eine Kapillare. Über den Volumenstrom und den Druck am Kapillareinlauf kann auf die Schergeschwindigkeit und die Schubspannung geschlossen werden. Mit diesem Gerät ist es möglich, die Schmelzen auch in dem für den Spritzgießprozess relevanten Schergeschwindigkeitsbereich zu untersuchen. Aufgrund der Strukturviskosität des Polymeren und des Einlaufdruckverlusts handelt es sich bei der gemessenen Viskosität zunächst um einen scheinbaren Wert, der über Korrekturmechanismen in die physikalisch wahre Viskosität umgewandelt werden kann. Durch die Korrektur wird der Messwert mit weiteren Schwankungen belegt, wodurch sich die Vergleichbarkeit verschlechtert. Aus diesem Grund sind die Polymere nur in ihrer scheinbaren Viskosität verglichen worden.

Tabelle 5-1: Prozentuale Viskositätsschwankung für die untersuchten Materialien

Auswertung der rheologischen Untersuchungen												
Material:	PP		PC		ABS		PP+EPDM		Reg		PA 66	
Schergeschwindigkeit [1/s]	Prozentuale Abweichung vom Mittelwert											
	Min %	Max %	Min %	Max %	Min %	Max %	Min %	Max %	Min %	Max %	Min %	Max %
100	-6,6	6,8	-5,1	10,1	-1,4	2,1	-0,4	0,6	-2,8	2,2	-2,0	2,2
500	-5,2	5,5	-3,8	7,7	-1,5	1,4	-0,6	0,3	-2,3	3,4		
1000	-3,1	4,6	-3,4	5,8	-1,0	1,8	-1,1	0,5	-2,6	2,8		
5000	-2,5	3,6	-3,0	4,2	-0,5	1,0	-0,7	0,3	-2,4	2,3		
10000	-2,2	2,9	-2,0	3,6	-0,6	0,8	-0,4	0,6	-2,4	1,9		

Tabelle 5-1 gibt eine Übersicht über den minimalen und maximalen relativen Schwankungsbereich der Viskositäten für verschiedene Schergeschwindigkeiten (Viskositätswerte in Tabelle A-1). Die Viskositätspunkte sind dabei zum Mittelwert über alle Messungen referenziert worden. Bei den Untersuchungen zeigte sich, dass die chargenbedingten Viskositätsunterschiede mit kleinerer Schergeschwindigkeit größer werden. Die größten Schwankungen waren bei den Polymeren PP und PC zu finden. Im Mittel kann hier von einer Viskositätsschwankung im Schwankungsbereich von 8 % ausgegangen werden.

5.1.3.1.2 Thermische Untersuchungen

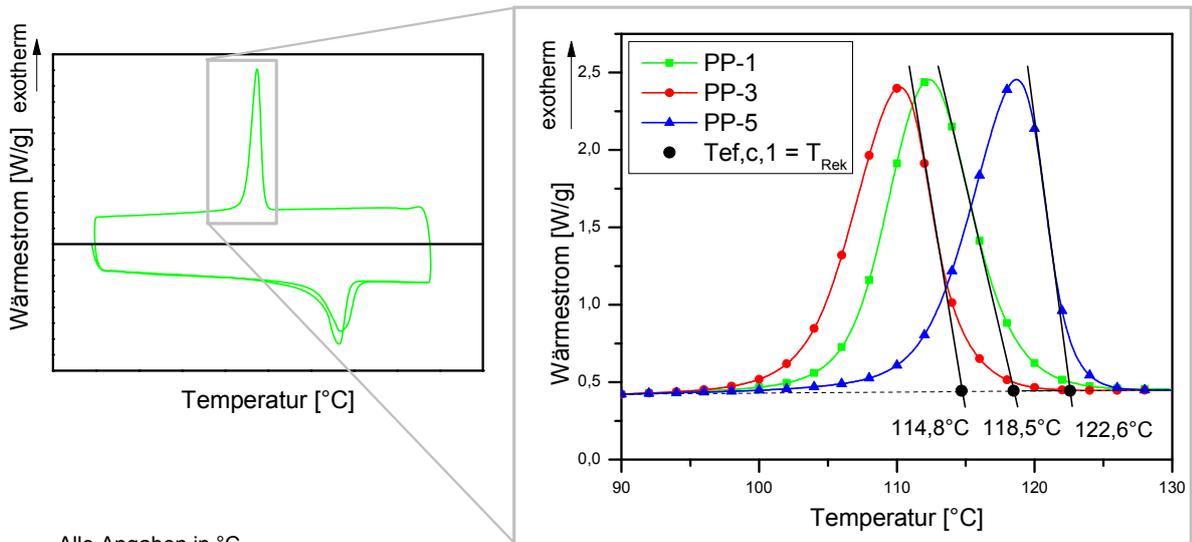
Die in der Prozesstechnik wichtigen thermischen Werkstoffeigenschaften können mithilfe der Differential-Scanning-Calorimetry (DSC) ausgewertet werden, die es ermöglicht, Übergangstemperaturen und kalorische Daten, wie Übergangsenthalpien und die spezifische Enthalpie der Proben, zu bestimmen.

Die Polymere unterscheiden sich grundsätzlich in ihrer supermolekularen Struktur. Bei den Thermoplasten bilden sich je nach Sekundärstruktur der Moleküle und Prozessbedingungen amorphe und teilkristalline Gefügestrukturen aus. Beim Überschreiten der für das Gefüge charakteristischen Übergangstemperatur prägt sich das viskose Verhalten im Polymer fortschreitend aus. Während bei amorphen Thermoplasten nach der Glasübergangstemperatur die einsetzende Molekülbewegung kontinuierlich immer mehr zu einer niedrigeren Viskosität führt, tritt bei teilkristallinen Kunststoffen am Punkt des Kristallschmelzpunkts schlagartig ein Übergang vom festen in den fließfähigen Zustand ein. Infolge eines Hysterese-Effekts unterscheiden sich die Übergangstemperaturen beim Aufheizen von denen beim Abkühlen. Der Übergangsbereich beim Abkühlen verschiebt sich hierbei zu geringeren Temperaturen. Bei kristallinen Stoffen kann der Punkt der Rekristallisation durch eine beschleunigte Keimbil-

nung zu höheren Temperaturen verschoben werden. Ein regelmäßiger Aufbau der Molekülketten oder eingebrachte Sekundärkeime in Form von Nukleierungsmittel oder Verunreinigungen führen zu dieser Verschiebung. Die Übergangstemperaturen stehen im engen Verhältnis zur Temperaturabhängigkeit der Viskosität und damit zu dem Zeitpunkt, an dem der Anguss oder Bauteilbereiche im Prozess versiegelt. Für das Versiegeln der Kavität ist das Einsetzen der strukturellen Veränderung im Material verantwortlich. Zum Bewerten dieses Punkts ist in der DIN EN ISO 11357-1 der extrapolierte Anfangswert für die Kristallisation ($T_{ef,c}$) bzw. den Glasübergang ($T_{ef,g}$) definiert [No10]. Die Tangente zur Bestimmung der extrapolierten Anfangstemperatur wird dabei am Punkt der höchsten Steigung angesetzt, was dem Wendepunkt entspricht. Abbildung 5-14 rechts oben veranschaulicht die Extrapolation an drei Abkühlkurven. Der extrapolierte Punkt für die später in der Arbeit relevanten teilkristallinen Materialien wird als Rekristallisationstemperatur bezeichnet.

Für die Messgenauigkeit in der DSC ist die Probenvorbereitung essenziell. Bei der Analyse der Granulatkörner kann die Probenpräparation nicht reproduzierbar erfolgen. Durch die unterschiedliche Form der Körner und sich bildende Vakuolen im Granulat Korn ergibt sich keine regelmäßige Auflagefläche und Dicke der Probe. Die Probenentnahme geschah deshalb aus gespritzten Platten mit absolut identischer thermischer Vorgeschichte. Mithilfe dieser Platten ist eine reproduzierbare Probendicke und -masse bei ebener Auflagefläche möglich. In eigenen Wiederholmessungen konnte eine Reproduzierbarkeit von $0,4\text{ °C}$ ermittelt werden. Die Ergebnisse der Versuche für die unterschiedlichen Chargen ist in Abbildung 5-14 dargestellt. In der Tabelle in Abbildung 5-14 ist die statistische Auswertung der über die verschiedenen Chargen gemessenen Übergangstemperaturen aufgetragen. Die Zeilen dT_{Min} und dT_{Max} kennzeichnen den nach oben und nach unten gefunden Streubereich. Nur beim teilkristallinen Polypropylen ist ein Unterschied in den Übergangstemperaturen erkennbar. Die Grenzwerte der Abkühlkurven und eine mittlere Kurve für das Polypropylen zeigt Abbildung 5-14 rechts oben. In der Übergangstemperatur ist ein Schwankungsbereich von ca. 8 °C erkennbar.

Die Wärmeenergie, die den Polymeren zugeführt werden muss, um sie auf die Verarbeitungstemperatur zu bringen, wird als Enthalpie bezeichnet. Zu deren Messung stehen an der DSC eine vergleichende Messung über ein Saphirglas und ein temperaturmoduliertes Verfahren zur Verfügung [TAI98, ERT03]. Bei beiden Methoden war bei der mehrfachen Messung mit einem Saphirglas keine Reproduzierbarkeit von besser als 6 % zu erzielen. Dadurch ließen sich mögliche Schwankungen in der spezifischen Wärmekapazität auch nicht über dieses Messverfahren detektieren.



Alle Angaben in °C

Material:	PP	PC	ABS	PP+EPDM	Reg	PA 66
Mittelwert	118,3	144,7	115,4	130,2	119,6	231,9
Minimum	114,8	143,6	115,3	130,0	119,5	231,4
Maximum	122,6	145,4	115,7	130,3	119,7	232,1
dT_{Min}	-3,5	-1,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,5
dT_{Max}	4,3	0,7	0,2	0,2	0,1	0,2

Abbildung 5-14: Ergebnisse aus den thermischen Untersuchungen im DSC-Gerät

5.1.3.1.3 Thermodynamische Untersuchungen

Die thermodynamischen Eigenschaften beschreiben, welches Volumen eine Masseneinheit des Werkstoffs unter Einwirkung von Druck und Temperatur einnimmt. Weitere Umstände, die dieses Verhalten im Abkühlprozess beeinflussen, sind die Abkühlgeschwindigkeit, die Scherrate [Bee05] und der Aufschmelzgrad der Schmelze. Der Aufschmelzgrad ist überwiegend von der Verweilzeit abhängig. Bei einer zu geringen Verweilzeit verbleiben Restkeime in der Schmelze, die eine schneller einsetzende Kristallisation verursachen. Zum Bestimmen des pvT-Verhaltens von Thermoplasten stehen im Wesentlichen zwei unterschiedlich arbeitende Messverfahren zur Verfügung.

Ein Dilatometer ist ein Laborgerät zum Erfassen des pvT-Verhaltens. Die standardmäßig eingesetzte Kolbenvariante ermittelt bei einer homogenen Abkühlgeschwindigkeit das isobare Probenvolumen. In einem Rohr wird hierzu die aufgeschmolzene Probe über einen Kolben verdichtet und von außen gleichzeitig abgekühlt. Der dabei abfallende Druck kann während des Abkühlvorgangs durch ein Nachschieben des Kolbens konstant gehalten werden. Eine

Wegmessung ermittelt über die Abkühlzeit das sich ergebende spezifische Volumen. Mit dieser Prüfmethode ist verbunden, dass in der Praxis auftretende Bedingungen, wie die hohen Abkühlraten unter Scherung bei kurzen Aufschmelzzeiten, nicht berücksichtigt werden. Vor diesem Hintergrund sind Verfahren entwickelt worden, die in der Spritzgießmaschine das thermodynamische Verhalten des Polymers in Betrachtung der Verarbeitungsbedingungen detektieren [Sch11, MS08a, MS08b]. Dadurch ist es möglich, das Materialverhalten unter produktionsnahen Verhältnissen direkt in der Spritzgießmaschine zu analysieren.

Angelehnt an diese Untersuchungen ist die nachfolgend beschriebene Methode in der beschriebenen Versuchsanlage umgesetzt worden. Bei diesem isochor arbeitenden Verfahren befindet sich der Probekörper in der Kavität des Spritzgießwerkzeugs. Die dabei gespritzte Probeplatte ist in Tabelle 3-1 unten rechts gezeigt. Das Messprinzip fußt dabei auf der Annahme, dass bei einem signifikanten Druck im Werkzeug das eingenommene Materialvolumen dem Kavitätswolumen gleich ist. Zudem setzt das Verfahren voraus, dass sich die im Werkzeug befindliche Masse nach dem Verschluss der Düse nicht mehr ändert. Tritt bei einem verschlossenen Werkzeug keine oder eine vernachlässigbare Werkzeugatmung auf, bleibt das spezifische Volumen des Bauteils während der Abkühlphase konstant. Auf das spezifische Volumen lässt sich nach dem Zyklus über die Division aus Kavitätswolumen und Bauteilgewicht schließen. Zur Approximation des pV -Verhaltens müssen alle drei Zustandsgrößen für verschiedene Punkte festgestellt werden, wodurch auch das spezifische Volumen variiert werden muss. Anhand der Öffnungszeit (t_o) der Nadelverschlussdüse lässt sich dies beeinflussen. Mit Ablauf der Öffnungszeit schließt die Nadelverschlussdüse und beendet den Massestrom in die Kavität. Für verschiedene Öffnungszeiten lassen sich somit wechselnde Bauteilgewichte und verschiedene spezifische Volumina einstellen (vgl. Abbildung 5-15). Bei der nach dem Verschließen folgenden isograven Abkühlphase kann das thermodynamische Werkstoffverhalten unter Prozessbedingungen über die Sensorik erfasst werden. Aus den Messdaten lassen sich demnach die nötigen Datenpunkte extrahieren, um über die Zuordnung von spezifischen Volumenwerten, sowie den Druck- und Temperaturpunkten z. B. auf den Isobarenverlauf eines Werkstoffs zu gelangen.

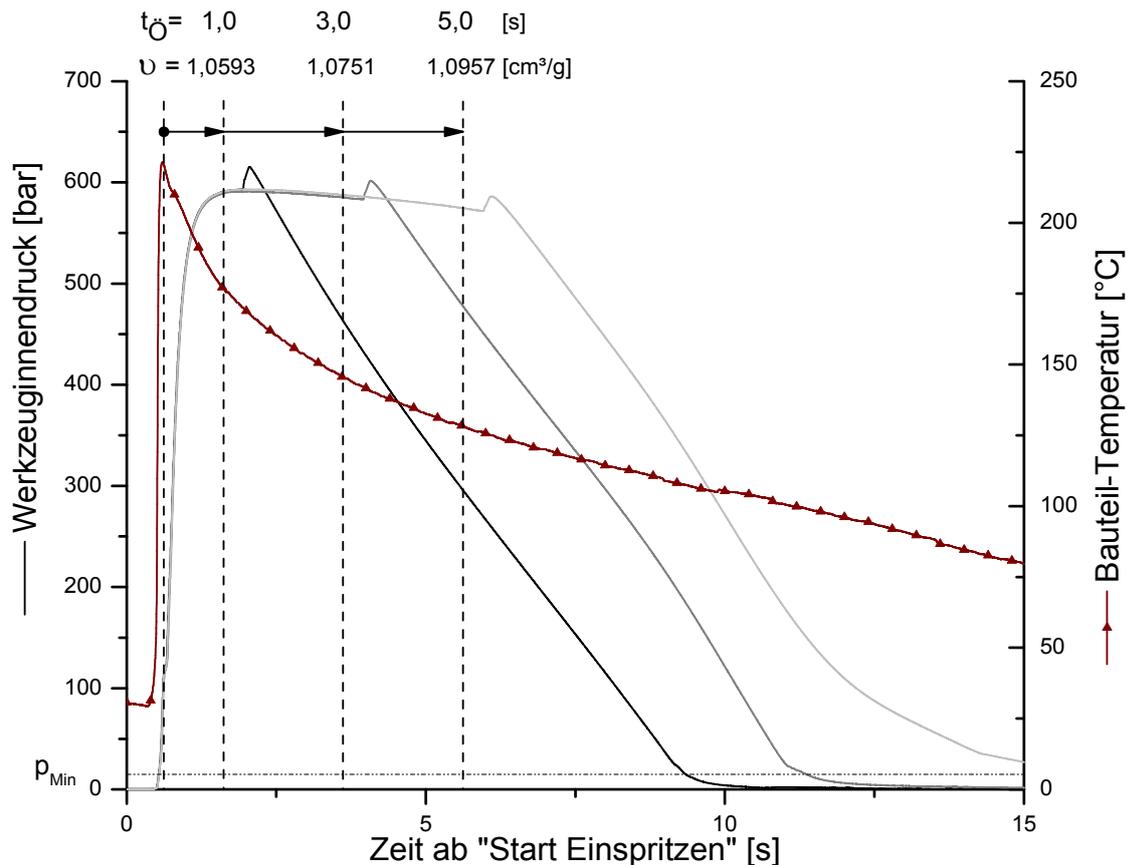


Abbildung 5-15: Temperatur und Druckverlauf nach dem Versiegeln der Form über die Nadelverschlussdüse

Beide Verfahren wurden zum Vergleich des thermodynamischen Verhaltens der verschiedenen Chargen genutzt. Das Laborgerät hat den Vorteil, dass ein beliebig weites Spektrum für die Temperatur und den Druck abgefahren werden kann. Für die Analysen kam der Rheograph 25 der Firma Göttfert [Göt11, Göt12] zum Einsatz. Die Abkühlgeschwindigkeit betrug dabei 1 °C/min . Dies liegt weit unter der im Spritzgießwerkzeug auftretenden Abkühlgeschwindigkeit. Im angewendeten Spritzgießprozess ergeben sich für PP Abkühlraten von 6000 °C/min bis 60 °C/min , über den IR-Sensor gemessen. Unter diesen praxisbezogenen Bedingungen kann mithilfe des oben vorgestellten Verfahrens das thermodynamische Abbild im Spritzgießwerkzeug ermittelt werden. Diese Prüfmethode ist der Einschränkung unterworfen, dass sich lediglich ein über das Prozessfenster ergebender Bereich analysieren lässt. Außerdem ist nur eine vergleichende Messung möglich, da im Abschnitt des Druckabfalls zwangsweise eine starke Inhomogenität und somit hohe Temperatur- und Druckgradienten im Bauteil vorherrschen.

Mit diesen beiden Methoden sind die Chargen der Polymere PP und PC aus Tabelle 3-4 analysiert worden. Ein unterschiedliches Materialverhalten lässt sich dann feststellen, wenn

die Messergebnisse unter Einbeziehung der Messstreuung einen signifikanten Unterschied aufweisen. Für punktuelle Messwerte, wie z. B. das Bauteilgewicht, werden die Konfidenzintervalle mehrerer Proben durch Methoden wie die Varianzanalyse statistisch miteinander verglichen. Im Fall des pV -Verhaltens gilt es, keinen skalaren Wert gegenüberzustellen, sondern Kurvenverläufe (isobarer Vergleich) oder Flächen (spezifisches Volumen in Abhängigkeit von Druck und Temperatur). Hier spannen Konfidenzbänder bzw. -flächen den Bereich auf, in dem der wahre Mittelwert liegt. Nur wenn sich die Konfidenzbänder nicht überlappen, kann statistisch von einem unterschiedlichen Materialverhalten ausgegangen werden.

In Abbildung 5-16 sind die Konfidenzbänder der Materialien aufgetragen, für die ein Unterschied im thermodynamischen Werkstoffverhalten festzustellen war. Die im linken Diagramm dargestellten Daten der Labormessung zeigen wesentlich reproduzierbarere Ergebnisse als die rechts abgebildeten Untersuchungen im Spritzgießwerkzeug. Ein Zeichen hierfür sind die sich viel schmaler ergebenden Konfidenzbänder. Diese Konfidenzbänder konnten mithilfe des Bootstrapping-Verfahrens für das nicht lineare Materialverhalten gewonnen werden. Die Vertrauensbereiche für die verschiedenen Chargen überdecken sich im Feststoff- und Schmelzebereich für beide Verfahren. Somit kann aufgrund eines nicht vorhandenen Materialunterschiedes oder einer ungenügenden Messgenauigkeit nicht von einem anderen Materialverhalten in diesem Temperaturbereich ausgegangen werden. Im Übergangsbereich, in dem die Rekristallisation einsetzt, ergibt sich für die drei Chargen ein signifikanter Unterschied. Die Chargen, die schon bei den thermischen Untersuchungen im DSC Abweichungen in den Übergangstemperaturen zeigten, verhalten sich auch dementsprechend anders im pV -Diagramm. Die einsetzende Kristallisation beim Abkühlen setzt Wärmeenergie frei, da sich die Moleküle in einen energetisch stabileren Zustand begeben. Diese wird in der Enthalpiekurve der DSC erkannt. Gleichzeitig nimmt durch die dichtere Packung der Moleküle auch das spezifische Volumen schlagartig ab. Eine Verschiebung in der Übergangstemperatur verursacht demzufolge auch ein Versetzen der Isobaren.

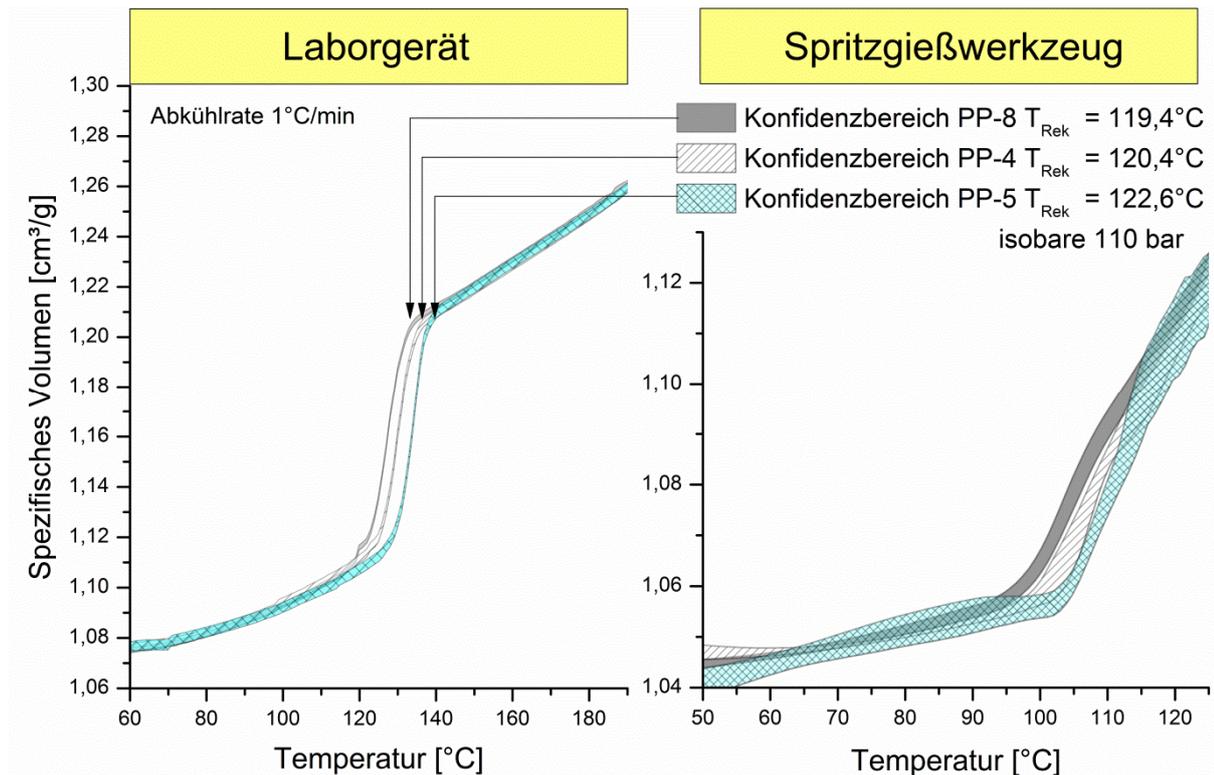


Abbildung 5-16: Konfidenzbänder für die Chargen des PP bei einer Isobaren – links: Messung im Laborgerät; rechts: Messung im Spritzgießwerkzeug

5.1.3.1.4 Prozesseinfluss von Chargenschwankungen

Die vorausgegangenen Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die Rohstoffeigenschaften teils deutlich unterscheiden. Was diese Schwankungen für die weiteren Prozessparameter und die produzierte Produkteigenschaft bedeuten, wird in diesem Kapitel abgehandelt. Alle in Tabelle 3-4 aufgeführten Materialien sind hierzu in der Spritzgießmaschine unter den vermerkten Prozessbedingungen weiterverarbeitet worden. Die eingetretenen Effekte sollen im Folgenden anhand des Materials PP vorgestellt werden.

Mit einer sich chargenbedingt erhöhenden Materialviskosität steigt zunächst das Drehmoment an der Schnecke beim Aufschmelzen (siehe Abbildung 5-17). Dadurch gelangt während des Plastifizierprozesses mehr Energie über die Schnecke in das Granulat. Dies verändert die Schmelze-Temperatur bei diesen Prozesseinstellungen jedoch nicht. Der Schmelze bleibt nach dem Plastifizieren noch genügend Zeit, um in Wechselwirkung mit der Zylinderwand einen stationären Zustand einzunehmen. Bei gleichbleibender Temperatur überträgt sich der rohstoffbedingte Viskositätsunterschied auch in den Schneckenvorraum und ist dort in der Schmelze-Viskosität wiederzufinden.

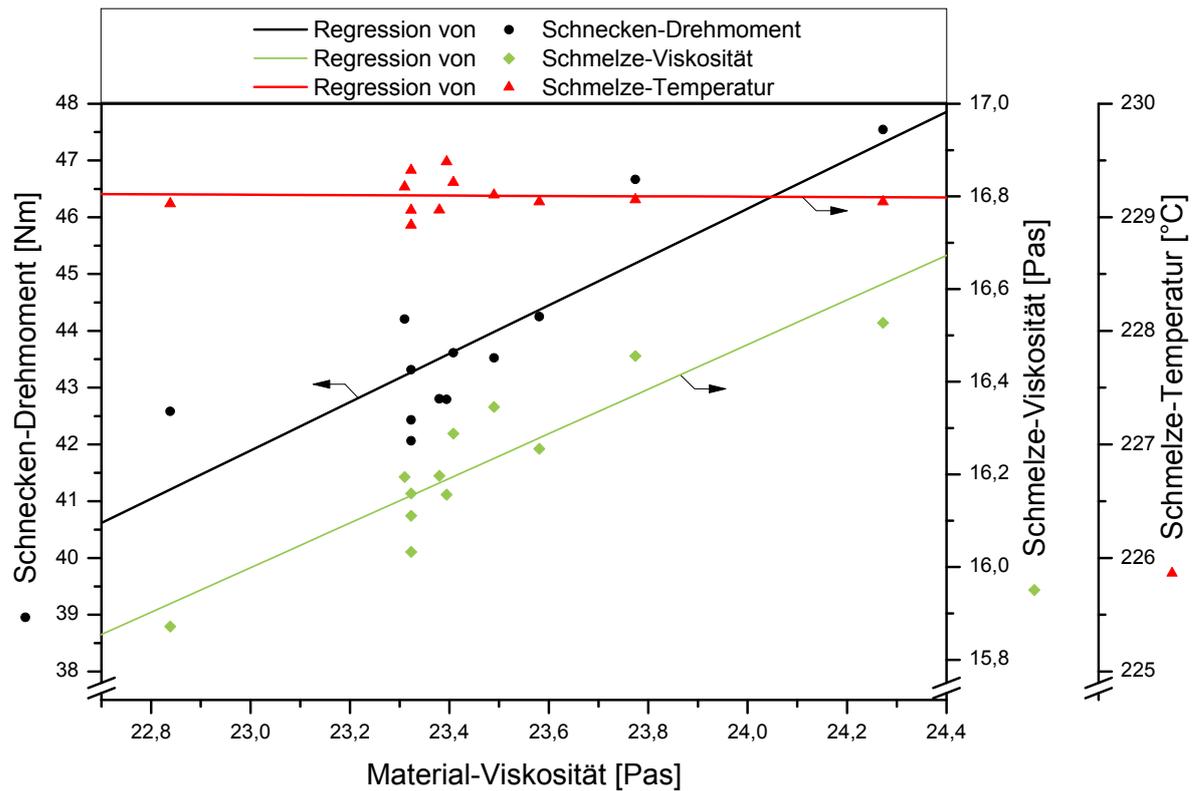


Abbildung 5-17: Einfluss von Rohstoffchargenschwankungen auf den Aufschmelzprozess

Während des Abkühlens ändert sich durch die gleichbleibenden thermischen Verhältnisse die Abkühlkurve nur unwesentlich. Ein deutlicher Unterschied ist hingegen im Werkzeuginnendruckverlauf zu finden (siehe Abbildung 5-18). Die sich ändernde Material-Viskosität beeinflusst den Fließwiderstand zwischen dem Trichter und dem Fließwende. Bei einer bewegten Masse sorgt dieser Fließwiderstand für einen Druckverlust – ausgehend vom druckregulierten Schneckenschaft bis ins Werkzeug. Aus diesem Grund ist in der Anfangsphase des Nachdrucks der Werkzeuginnendruck für die Polypropylentypen mit niedriger Viskosität (Abbildung 5-18 PP7 & PP9) höher als bei denen mit hoher Viskosität. Mit fortschreitender Abkühlung nimmt die Rekristallisationstemperatur einen zunehmend dominierenden Einfluss auf den Druckverlauf im Werkzeug.

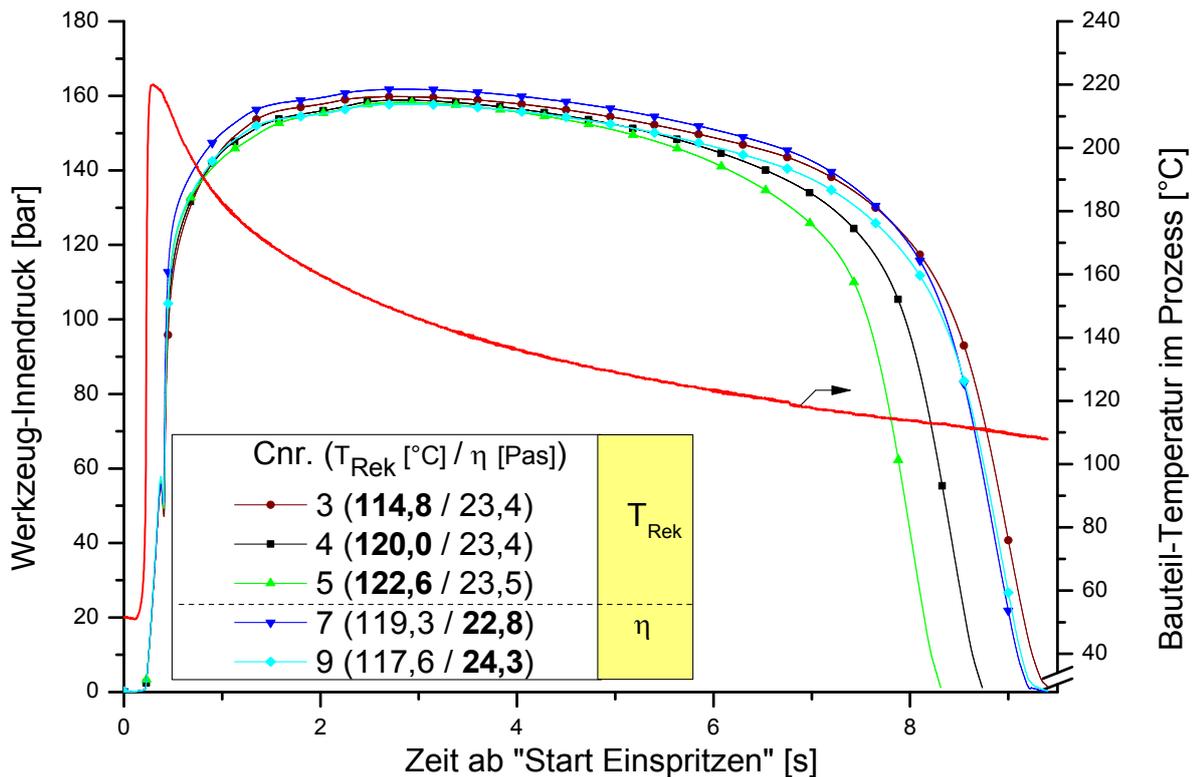


Abbildung 5-18: Druck- und Temperaturverhältnisse während des Formgebens und Abkühlens

Je früher die wirr vorliegenden Ketten in der Schmelze die Möglichkeit finden, sich anzuordnen, desto schneller steigt auch die Viskosität in der Schmelze. Mit größer werdender Viskosität erhöht sich auch der Druckverlust über die Fließweglänge in der Kavität. Dadurch kann zum Druckausgleich immer weniger Masse in die Form nachgefördert werden. Beim völligen Stillstand ist der Siegelpunkt erreicht und der Druck fällt im Werkzeug schlagartig ab. Der Temperaturpunkt dieses Druckabfalls ist in Abbildung 5-19 auf der x-Achse aufgetragen. Dass er in erster Linie vom Einfrierpunkt und nicht von der erreichten Druckhöhe abhängt, zeigt die starke Korrelation zu der an der DSC gemessenen Rekristallisations-Temperatur. Diese ist auch die Haupteinflussgröße für das entstehende Werkzeuginnendruckintegral. Bei dieser Kennzahl spielt das viskositätsabhängige Druckübertragungsverhalten auch eine Rolle, ist aber bei diesen Größenverhältnissen vernachlässigbar.

Mit dem sich im Werkzeug abbildenden Druckverlauf lässt sich eine sehr starke Korrelation zum Bauteilgewicht herstellen. Je höher sich der Druck ausbildet und je länger er wirken kann, umso größer fallen das Werkzeug-Innendruck-Integral und das Bauteilgewicht aus (Abbildung 5-20). Für jedes Grad in der Übergangstemperatur ändert sich im Beispiel das Bauteilgewicht in der Größenordnung von 0,1 %.

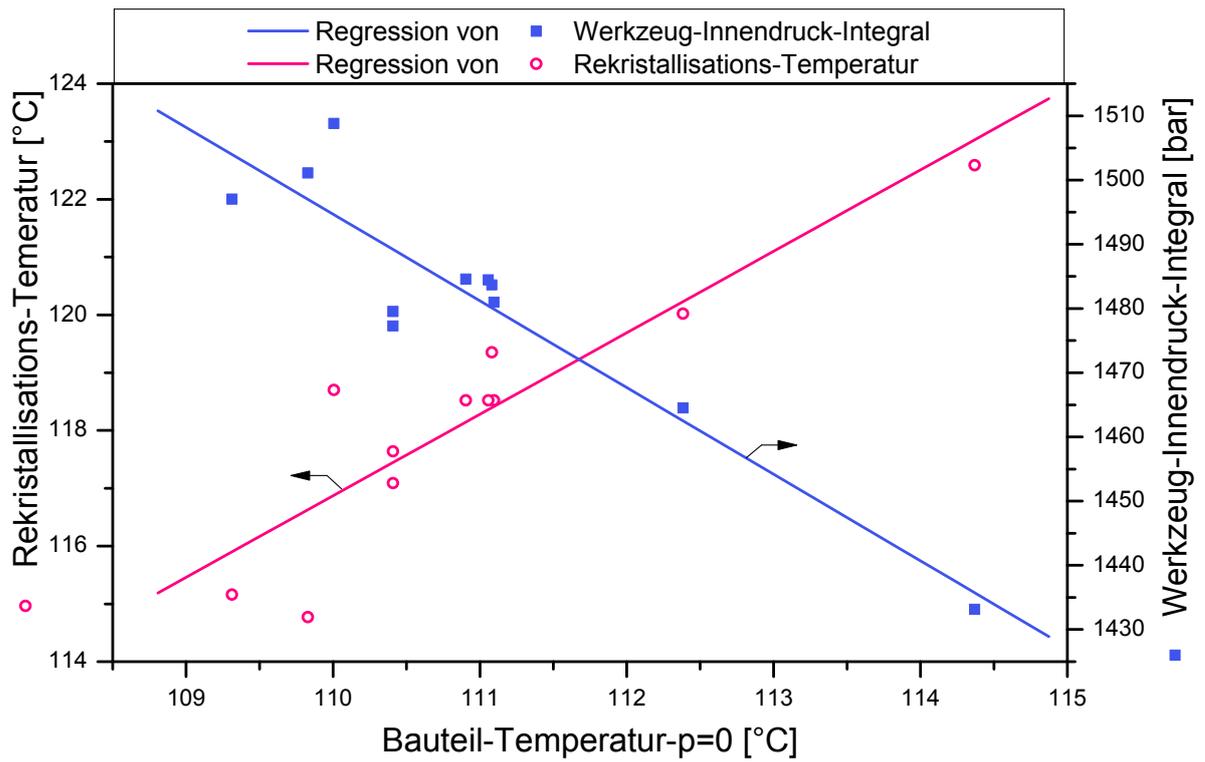


Abbildung 5-19: Einfluss der Rekrystallisations-Temperatur auf den weiteren Formteilbildungsprozess

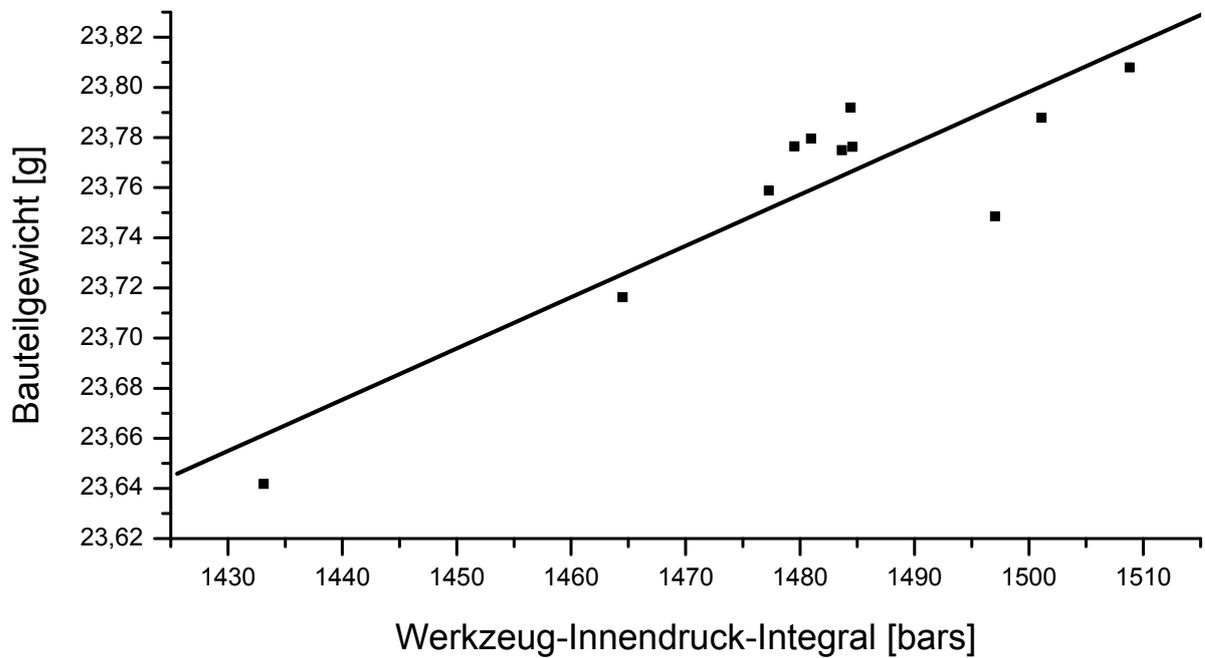


Abbildung 5-20: Zusammenhang zwischen Werkzeuginnendruckintegral und dem Bauteilgewicht

5.1.3.2 Werkstoffeigenschaften

In dieser Arbeit sind die Werkstoffeigenschaften als der Materialzustand nach den die Verarbeitung vorbereitenden Maßnahmen am Entnahmeort des Trichtereinzugs definiert. Manche der zu verarbeitenden Polymere weisen in ihrem molekularen Aufbau starke Dipole auf und werden als hygroskopisch bezeichnet. Ihnen eigen ist, dass sie aus der Umgebung stammende Wassermoleküle absorbieren und in ihr Gefüge einlagern. Bei der Verarbeitung würde dadurch ein Verlust in den Materialeigenschaften auftreten. Aus diesem Grund müssen diese Materialien vor der Verarbeitung entfeuchtet werden. Die gängige Methode zum Vorbereiten ist hierzu das Vortrocknen vor dem Aufschmelzen in einer Trocknungsanlage. In ihr wird dem Polymer das Wasser mithilfe heißer Luft – mit niedrigem Taupunkt – entzogen.

Als Trocknungszielwert werden i. d. R. die von den Materialherstellern empirisch ermittelten Obergrenzen für den Restfeuchtegehalt angestrebt. Es gilt, das Material unter diese zu bringen, um eine problemlose Verarbeitung zu erreichen. Da eine direkte Regelung des Restfeuchtegehalts noch nicht möglich ist, stehen dem Verarbeiter zum Unterschreiten dieses Grenzwerts Einstellungsempfehlungen für die Trockentemperaturen und -zeiten zur Verfügung. Geregelt werden hierbei wiederum Maschinengrößen, die den Restfeuchtegehalt beeinflussen, anstelle der eigentliche Zielgröße. Dadurch ist der Restfeuchtegehalt im Granulat am Schneckeneinzug großen Streuungen unterworfen. Gründe hierfür sind:

- unterschiedliche Trocknereingangsfeuchtigkeit im Granulat,¹⁵
- Schwankungen in der Trockenluftqualität,
- unterschiedliche Verweilzeiten des Granulats durch Störungen, Maschinenstillstände usw.,
- Feuchtigkeitsaufnahme nach der Trocknung im Fördersystem.

5.1.3.2.1 Einfluss des Restfeuchtegehalts bei hygroskopischen Kunststoffen

In einer Untersuchungsreihe wurde analysiert, wie sich Werkstoffeigenschaften, Prozess- und Qualitätszustände bei variierendem Restfeuchtegehalt verhalten. Die Analysen erfolgten mit dem wenig additivierten Polycarbonat aus Tabelle 3-3, das in Form von Sackware ausgeliefert wird. Die im Anlieferungszustand enthaltene Grundfeuchtigkeit betrug 0,15 %. Der variable Restfeuchtegehalt für die verschiedenen Proben konnte mithilfe eines Trockenlufttrockners stufenweise reduziert und die präparierte Probe direkt zur Untersuchung in die Analysevorrichtung eingegeben werden.

¹⁵ Bei den Chargen vom Typ PA 66 aus Tabelle 5-1 lag der Feuchtigkeitsgehalt bei Anlieferung zwischen 0,0923 % und 0,1163 %. Der Schwankungsbereich betrug somit $\pm 11,5$ %.

Zur messtechnischen Erfassung der Werkstoffeigenschaft Viskosität diente das Hochdruckkapillarviskosimeter, da bei dieser Untersuchungsmethode die Schmelztemperatur für alle Proben konstant gehalten werden konnte. Die Untersuchungen zum Prozess- und Qualitätseinfluss erfolgten auf der beschriebenen Anlage.

Bei der Analyse mit konstanter Temperatur im HKV steigt die Viskosität des Materials mit sinkendem Restfeuchtegehalt überproportional an (Abbildung 5-21). Speziell tritt dies im empfohlenen Verarbeitungsbereich mit maximaler Restfeuchtigkeit von 0,02 % auf. Der Restfeuchtegehalt erhöht im Bereich zwischen 0,02 % und 0,01 % die Material-Viskosität um 15 %. Im Anhang unter A.5 findet sich eine Diskussion, die mittels weiterführender Untersuchungen auf den Effekt der Viskositätsveränderung eingeht.

Die vorgefundene Viskositätserhöhung zeigt sich in gleicher Charakteristik nach dem Aufschmelzen in der Plastifiziereinheit. Bedingt durch die mit steigender Viskosität beeinflusste Dissipationsenergie verändert sich die Schmelztemperatur zu höheren Temperaturen. Im Prozess wachsen beim Aufschmelzen durch einen geringeren Restfeuchtegehalt Schmelztemperatur und -viskosität demzufolge an.

Die beim Einspritzen in die Form eingebrachte Masse nimmt wegen des erhöhten Fließwiderstandes der Schmelze zu. Dies tritt ein, da sich zu Beginn des Einspritzprozesses mehr Masse im Schneckenorraum befindet. Abzulesen ist dies im Druckverlauf zwischen „Ende Plastifizieren“ und „Start Einspritzen“. Der Druck steigt mit höherer Viskosität deutlich an. Somit wird bei gleichem Weg mehr Masse ins Werkzeug eingebracht. Der durch die Kennzahl „*Kavität-Schmelzeintritt*“ beschriebene Punkt der ankommenden Schmelze am angussnahen Sensor spiegelt dies wider. Dieser wächst mit zunehmendem Restfeuchtegehalt stetig an. Die Ursache für die Zunahme der Schmelzmasse im Schneckenorraum ließ sich messtechnisch nicht feststellen.

Anzunehmen ist jedoch, dass die aktive Druckregelung bei elektrischen Spritzgießmaschinen nach der Plastifizierphase einen Druckunterschied zwischen dem Bereich vor und nach der Rückstromsperre verursacht. Der Druckunterschied führt dazu, dass Schmelze aus dem Schneckenorraum zurückfließt und somit in der Einspritzphase (bei volumenabhängiger Umschaltung) nicht ins Werkzeug eingetragen wird. Die zweite Ursache ist der veränderte Zeitpunkt, an dem die RSP geschlossen ist. Die RSP wirkt dabei als Schaltinstrument, das die Schnecke vom Förderelement zum Kolben umwandelt. In der Regel geschieht dies zu Beginn der Einspritzphase durch den sich aufbauenden Druck und die Schleppströmung. Im Falle des gemessenen Druckes von bis zu 30 bar im Schneckenorraum (bei hoher Viskosität) ist jedoch davon auszugehen, dass die Rückstromsperre schon nach dem Plastifizieren

beginnt, sich zu schließen. Dadurch geht weniger Schmelze aus dem Plastifizierhub verloren.

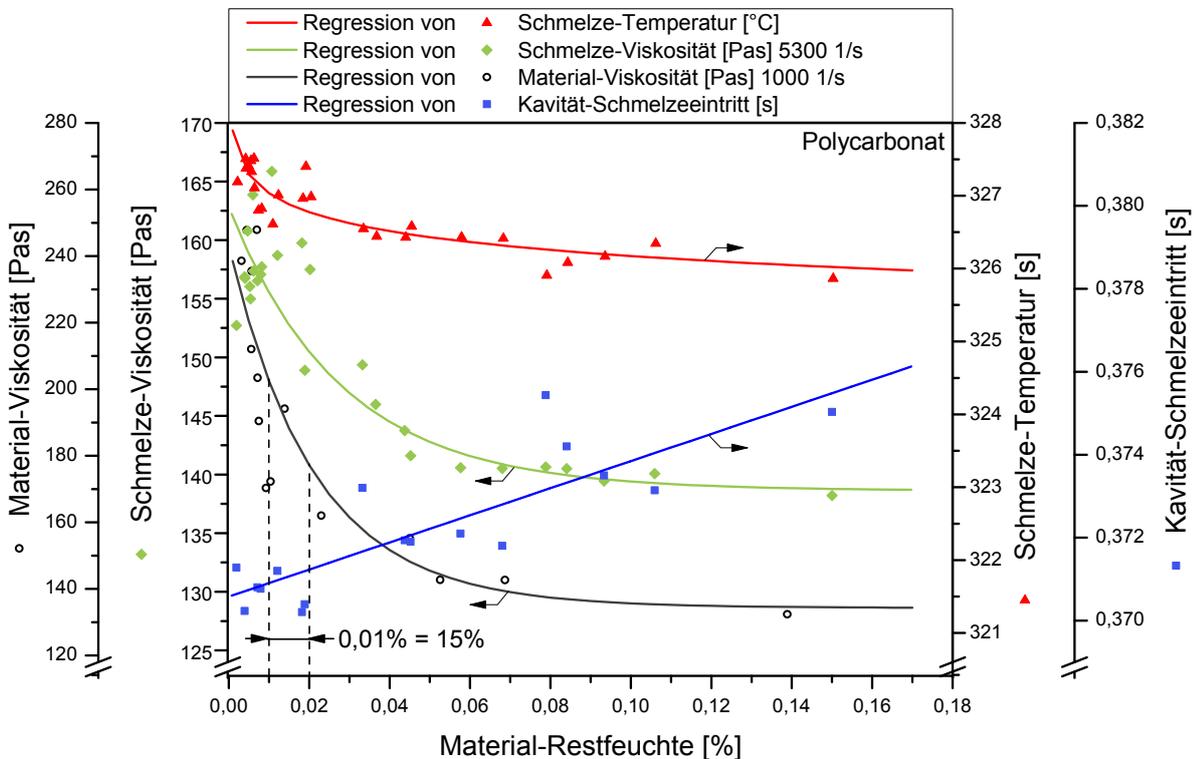


Abbildung 5-21: Einfluss des Restfeuchtegehalts auf Material- und Plastifiziergrößen

Diese beiden Effekte führen dazu, dass mit höherer Viskosität mehr Masse bis zum Weg/Volumetrischen-Umschaltunkt eingetragen wird. Resultierend baut sich in der Kavität der Druck schneller auf (Abbildung 5-22 – A), wodurch zu Beginn der Nachdruckzeit ein höherer maximaler Werkzeuginnendruck entsteht (Abbildung 5-22 – B). Wie Abbildung 5-23 zeigt, korreliert dieser sehr stark mit dem für die Bauteilqualität stehenden Bauteil-Gewicht.

Dies ist der gegenteilige Effekt als aus den Chargenuntersuchungen (Kapitel 5.1.3.1.4) beim Werkstoff PP bekannt. Dort nehmen mit steigender Viskosität der Werkzeuginnendruck und das Bauteilgewicht ab. Im Vergleich zum teilkristallinen PP ist die variograve Abkühlzeit (Siegelzeit) von PC weitaus kürzer. Im betrachteten Fall einer mit Stangenanguss angespritzten Platte der Bauteildicke 2 mm beträgt die Siegelzeit für PP 9 s für PC hingegen nur 1,8 s. Je länger die Siegelzeit, desto dominanter ist der Einfluss der Nachdruckzeit auf die Bauteilqualität und desto geringer ist der Einfluss der Einspritzphase (vgl. Abbildung A-2). Diese kurze variograve Abkühlphase ist dafür verantwortlich, dass im betrachteten Fall der entstehende Werkzeuginnendruck direkt nach der Kompressionsphase über das Bauteilgewicht und die Bauteilabmessungen entscheidet.

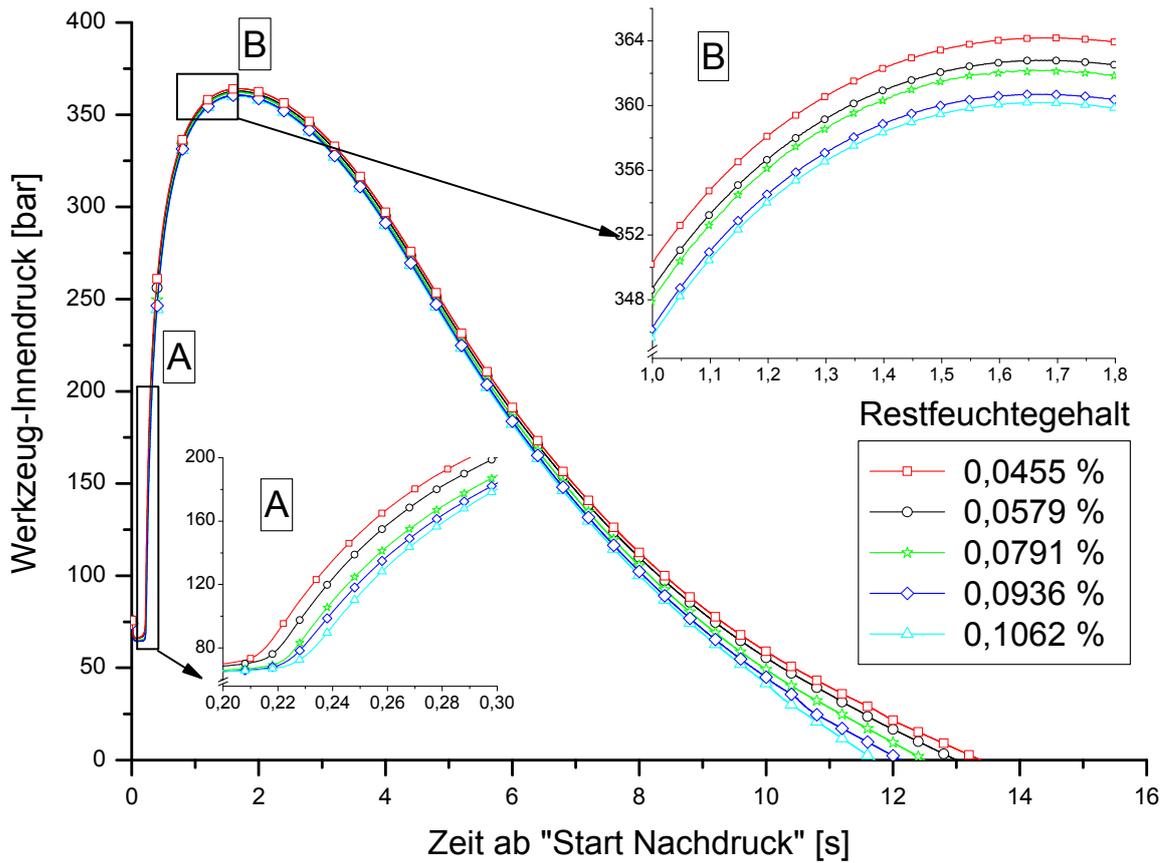


Abbildung 5-22: Werkzeuginnendruckverlauf für verschiedene Restfeuchtegehalte in der Nachdruckphase

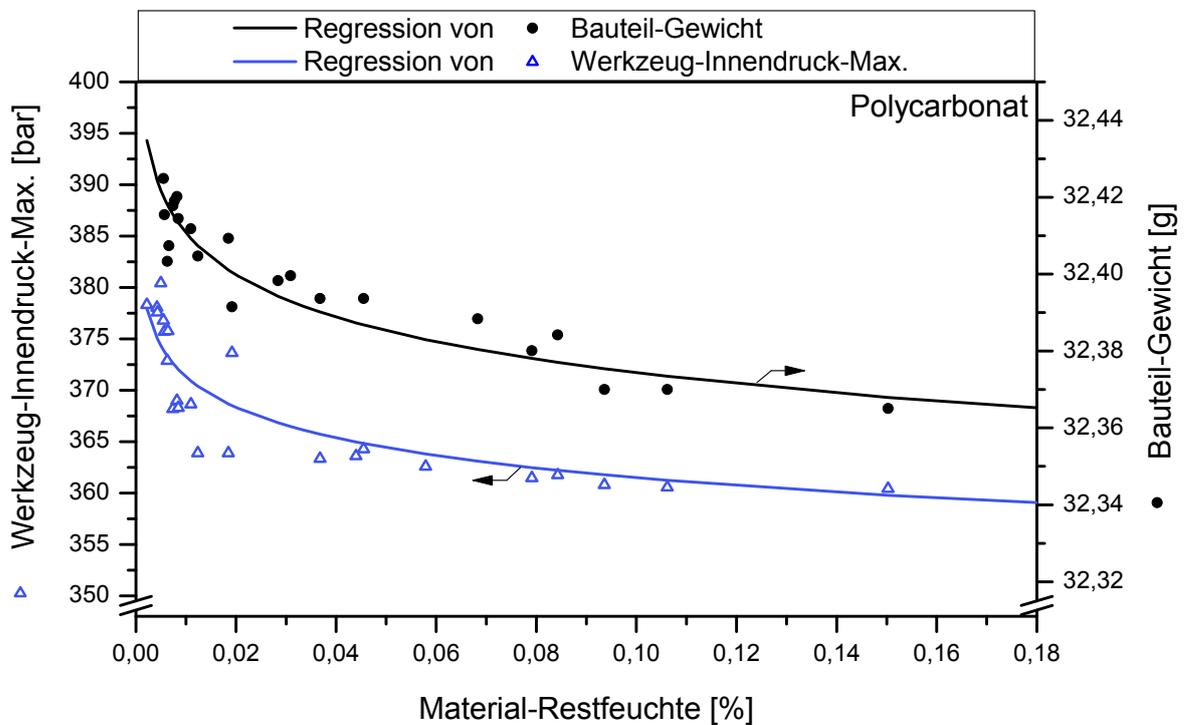


Abbildung 5-23: Korrelation von Restfeuchtegehalt zum Werkzeuginnendruck und Bauteilgewicht

5.1.4 Sonstige Untersuchungen

Neben den hier vorgestellten Störgrößen sind weitere untersucht worden. Dabei war aber entweder kein Effekt nachweisbar oder das Aufkommen der Störgröße lies sich mit der angewandten Methode nicht simulieren. Diese Ergebnisse finden in der fortlaufenden Arbeit keine Beachtung, sind aber im Anhang aufgeführt. Betrachtet wurden der Einfluss der Werkstofftemperatur, die Schüttdichte und Kesselsteinablagerungen in den Temperierkreisläufen.

5.2 Bewertung der auftretenden Störgrößen und deren Auswirkung

In den zurückliegenden Kapiteln ist untersucht worden, welche Störgrößen für den Spritzgießprozess eine Rolle spielen und wie sie sich auf den Prozess auswirken. Nachfolgend werden die Ergebnisse zusammengefasst.

Störgrößen Kategorie Maschine:

Das Anregelverhalten der Spritzgießmaschine zeigte für alle Parameter eine sehr große Reproduzierbarkeit. Auch bei sich ändernden Rahmenbedingungen weisen die antriebsbezogenen Parameter keine Abweichungen auf. Einzig bei den Prozesstemperaturen muss sich nach einer Änderung des Systemzustands ein neuer thermischer Gleichgewichtszustand einstellen, da direkt produktberührende Verfahrenskomponenten nur indirekt in ihrer Temperatur beeinflusst werden können. So dauert es beim Anfahren des Prozesses ca. 50 Schuss, bis sich ein stabiler stationärer Zustand im thermischen Haushalt der Spritzgießfertigungszelle einstellt. In einen über 950 Zyklen dauernden Fertigungsprozess konnten keine systemverändernden Ereignisse festgestellt werden, sodass Verschleißerscheinungen zumindest über einen kurzen Zeitraum auszuschließen sind.

Störgrößen Kategorie Mitwelt/Umgebung:

Einflüsse die aus der Umgebung auf die Spritzgießfertigungszelle einwirken, betreffen die Spannungs- und Kühlwasserqualität. Zudem nimmt das Raumklima Einfluss auf die Fertigungszelle. Im Fall einer sich abrupt ändernden Spannungshöhe kann die Zylindertemperatur nicht konstant gehalten werden. Den gleichen Effekt zeigten Veränderungen in der Kühlwasserqualität, die zuerst die Temperiermitteltemperatur und somit auch die dadurch beeinflussten Verfahrensparameter veränderten. In beiden Regelstrecken haben diese Größen einen bedeutenden Einfluss auf das Systemverhalten. Weil diese vom Regler nicht berücksichtigt werden, wirken sie als Störgröße. Ein wechselndes Raumklima sorgt für einen unterschiedlichen Wärmeaustausch zwischen den Maschinenkomponenten und der Umgebung,

wodurch sich die Eigentemperaturen verändern. Bei den Drucksensoren kann dies zu einem Drift im Sensorsignal führen.

Störgrößen Kategorie Material:

Die Änderungen in den Materialeigenschaften sind auf Unterschiede in den Rohstoffeigenschaften und die dem Aufschmelzen vorgelagerten Prozesse zurückzuführen. Auswirkungen zeigte dies auf die Materialviskosität und die Rekristallisationstemperatur.

Auswirkungen der Störgrößen im Prozess:

Die in Kapitel 5.1 aufgeführten Störgrößen veränderten im Wesentlichen vier wichtige Prozesszustände, die sich als Zielgröße für weiterführende Prozessführungsmethoden anbieten.

Im Resultat des Aufschmelzvorgangs änderten sich Schmelzeviskosität und -temperatur sowie die sich im Dosierhub befindende Schmelzemenge. Als Folge dieser verschiedenen Bedingungen im Schneckenraum traten Unterschiede im Formgebungsprozess auf, da dabei die über den Weg arbeitende Prozessphasen-Steuerung für den Einspritzvorgang systematisch beeinflusst wird. Die wechselnden Rahmenbedingungen sind auch die Ursache warum sich der thermische Haushalt des Werkzeugs ändert, wobei in erster Linie die Werkzeugwand-Temperatur betroffen ist.

Weitere Auswirkung haben diese Störungen auf die Druckübertragung ins Werkzeug und die Abkühlrate der eingebrachten Schmelze. Beide Effekte verändern Werkzeuginnendruck- und Temperaturverlauf nachhaltig.

5.3 Störgrößenaufbringung und -bewertung

Wie in diesem Kapitel anfangs erläutert kann in stochastische und deterministische Störgrößen unterschieden werden. Im Anschluss sind nun Rahmenbedingungen zu erarbeiten, mit denen geprüft werden kann, wie verschiedene Prozessführungsmethoden geeignet sind, die im Produktionsumfeld auftretenden Störgrößen zu kompensieren.

Stochastische Störgrößen:

Die zufällig auftretenden Störgrößen sind dahingehend bewertet worden, dass für jede Methode hundert aufeinanderfolgend produzierte Bauteilgewichte analysiert wurden. Dadurch lassen sich die Methoden im Hinblick auf ihre Reproduzierbarkeit vergleichen. Das Ergebnis eines solchen Versuchslaufs zeigt Abbildung 5-24. Als Kennzahl für die Reproduzierbarkeit wird die relative Standardabweichung der Bauteilgewichte verwendet. Ausreißer, wie die gekennzeichneten Teile in Abbildung 5-24, berücksichtigt die Bewertung nicht, da sie die

Standardabweichung sehr negativ beeinflussen würden und wahrscheinlich von einer schlechten Trennung des Angusses herrühren.

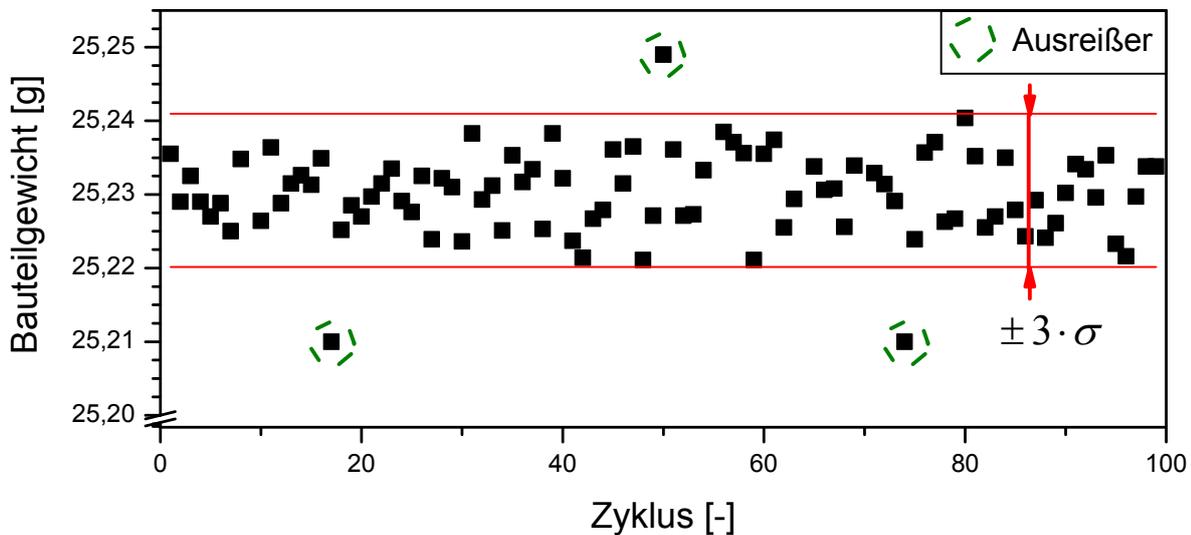


Abbildung 5-24: Gewichtswerte zum Ermitteln der stochastischen Qualitätsstreuung

Deterministische Störgrößen:

Für einen Vergleich der Verfahren ist es zunächst nötig, eine deterministische Störgröße schnell, gezielt und definiert auf den Prozess einwirken zu lassen. Dies ist mit den real auftretenden Störungen wie z. B. der Spannungsqualität oder der Umgebungstemperatur nicht möglich oder nur sehr langwierig herbeizuführen. Aus diesem Grund musste ein Verfahren erarbeitet werden, mit dem die gefundenen signifikanten Störgrößen definiert und wiederholgenau nachgestellt werden können.

Aus den Untersuchungen ging bisher hervor, dass sich die Auswirkungen von Störgrößen in eine Veränderung von fünf Prozessparametern der frühen Phase zusammenfassen lassen (vgl. Kapitel 5.1). Bei den Materialparametern sind Änderungen der Viskosität und der Einfriertemperatur des Werkstoffs festzustellen. Als dritter Punkt ändert sich das Messverhalten des Drucksensors an der Plastifizierung, indem ein Messwertdrift entsteht. Außerdem werden die Temperaturen der Zylinderwand und des Temperiermediums im Zuge sich ändernder Rahmenbedingungen beeinflusst. Die Größenordnung wie sich diese Prozessparameter verändern konnten auf Basis der Versuchsdaten abgeschätzt werden und sind in Abbildung 5-25 vermerkt. Die Richtung der Änderung ist direkt an den Trend der Störgröße gekoppelt. Für die Untersuchungen ist primär der absolute Sprung als Veränderung wichtig, deshalb ist es unwesentlich, in welche Richtung sich die Veränderung bewegt.

Diese Prozessparameter bieten sich als Stellgrößen an, um deterministisch auftretende Störgrößen zu simulieren, da sie direkt einstellbar sind. Trotz ihrer leichten Beeinflussbarkeit

ist es jedoch nicht exakt möglich, die Größenordnung der realen Störgrößeneinwirkung nachzustellen. In den meisten Fällen ist die einstellbare Prozessveränderung viel größer als die über die Störgrößen verursachte, wodurch die Auswirkungen deutlicher ausfallen. Für einen Vergleich ist ein exaktes Einstellen jedoch wichtig, um nur die real auftretende Veränderung zu bewerten. Deshalb muss das Messergebnis auf die real auftretende Störung zurückskaliert werden. Das Zurückrechnen über einen Faktor ist in diesem Fall zulässig, da das Systemverhalten im betrachteten Bereich immer linear ist. Wie die in Kapitel 5 gemessenen Störungen in den kommenden Versuchen nachgebildet und die Ergebnisse ausgewertet werden, illustriert Abbildung 5-25 und wird im Anschluss erläutert.

Störeinfluss		Auswirkung Prozess		Nachbildung		Auswirkung Qualität		
Kategorie	Störeffekt	Prozess-einfluss	Größen-ordnung & Symbol	Nachbildungs-methode	Stell-wert	Versuchs-ergebnis	Umrechnung auf Einzel-ergebnis	Gesamt-bewertung
Anfahren								
Mitwelt	Raumklima	p_{Drift}	5 bar	Nachstellen p_{Stau}, p_{ND}	5 bar			
	Spannung							
	Kühlwasser							
Material	Rohstoff	η	15% - 5%*	Material-wechsel	36-16%*			
	Restfeuchte-gehalt							

* Abhängig von der Schergeschwindigkeit

Abbildung 5-25: Übersicht, wie Störungen nachbildbar sind und deren Resultat auf die Qualität zusammengefasst wird

Zylinderwandtemperatur (T_{Zyl})/Temperiermitteltemperatur (T_{TM}):

Die Temperaturwerte sind an der Spritzgießmaschine in 1 °C-Schritten einstellbar und überprüfbar. Dies reicht nicht aus, um die detektierte Temperaturänderung von 1 °C gezielt und überprüfbar herbeizuführen. Deshalb ist zum präzisen Einstellen der Temperaturänderung der Stellwert von 5 °C gewählt worden. Im Anschluss muss die resultierende Veränderung mit dem Faktor 0,2 gemindert werden, damit das Ergebnis der realen Störung von 1 °C ersichtlich ist.

Sensordrift (p_{Drift}):

Der Drucksensor an der Spritzgießmaschine entscheidet direkt prozessbezogen über den Staudruck- und die Nachdruckhöhe. Zum Nachstellen des Sensordrifts wurde zu beiden Sollgrößen die als Störgröße wirkenden 5 bar hinzuaddiert.

Viskosität (η):

Durch das Umstellen der Materialtypen ließ sich die Viskositätsänderung im Werkstoff simulieren. Für das Versuchsmaterial Polypropylen (Sabic PP 575P) ist auf die nächsthöhere Viskositätsstufe für ein Homopolymer gewechselt worden. Für dieses Material (Sabic PP 571P) war ein Minderungsfaktor von 2,5 einzurechnen.

Rekristallisationstemperatur (T_{Rek}):

Wie sich bei den Untersuchungen der Chargen zeigte, änderte sich bei Polypropylen die Rekristallisationstemperatur. Diese Veränderung der Übergangstemperatur konnte lediglich bei einem teilkristallinen Werkstoff beobachtet werden. Über das Zudosieren eines eigens aus dem Grundsubstrat hergestellten Masterbatches werden 25 ppm Nukleierungsmittel (Millad® NX™ 8000, Firma: Milliken & Company) zudosiert. Dadurch verschiebt sich die Übergangstemperatur um 4 °C. Bei den verschiedenen Chargen änderte sich zwar die Übergangstemperatur, das thermodynamische Verhalten des Werkstoffs abseits der Übergangstemperatur blieb jedoch konstant. Dieses Eigenschaftsbild ist mit dem Nukleieren nicht gezielt einstellbar. Aufgrund der veränderten Kristallisation bestimmt dies auch ein anderes spezifisches Volumen im Feststoffbereich. Dieser Effekt muss korrigiert werden.

Die Gewichtsdivergenz welche aufgrund einer Rekristallisationstemperaturänderung entsteht kann näherungsweise über Formel 5-1 bestimmt werden. Das Verhältnis zwischen den spezifischen Volumenwerten für beide Materialien beschreibt die Änderung im Materialgefüge, bedingt durch die unterschiedlich großen Kristalle. Dies muss korrigiert werden, um auf die über die Rekristallisationstemperatur bedingte Änderung zu schließen.

$$\Delta m_{TR} = m_{PP} - m_{Nuk} \frac{v_{Nuk}}{v_{PP}} \quad \text{Formel 5-1}$$

Bewertung der deterministischen Störgrößen:

Anhand von Prozessparametern kann nun das Aufkommen von Störgrößen simuliert werden. Das Nachstellen dieser Störungen zieht Veränderungen in den nachgeschalteten Prozesszuständen und den Bauteileigenschaften nach sich. Abhängig vom Stellwert und der Stellrichtung ergibt sich ein Sprung in den Parametern. Aufgrund der Tatsache, dass die Störgrößen nicht immer in dem Maße nachzustellen sind, wie sie in der Realität auftreten,

müssen die Ergebnisse mit den vorgestellten Methoden korrigiert werden. Daraus ergibt sich eine zu den realen Störgrößen äquivalente Qualitätsänderung, die in Abbildung 5-25 mit Einzelresultat benannt ist. In Hinsicht auf einen Störeffekt sind somit verschiedene Verfahren auf die Reaktion eines Störgrößentyps vergleichbar.

Im realen Prozessgeschehen wirken die Störgrößen kombiniert auf den Prozess ein. Dadurch können sich deren Auswirkungen vermindern oder verstärken. Verstärken sich alle Effekte in eine Richtung, tritt eine maximale Qualitätsschwankung auf, die es einzudämmen gilt. Ganzheitlich betrachtet konnte bisher der Spritzgießprozess nicht modelliert werden. Dadurch bedingt lässt sich eine absolute deterministisch verursachte Prozessabweichung analytisch nicht feststellen. Unter der Annahme, dass im Gesamtsystem keine Wechselwirkungen zwischen den Faktoren bestehen, ergibt sich jedoch durch die Kumulation der einzelnen Beträge die maximal mögliche Gesamtabweichung. Sie dient als Vergleichsmaß für den folgenden Methodenvergleich.

6 Entwicklung und Validierung neuartiger Prozessführungsmethoden

In diesem Kapitel werden zunächst neue Prozessführungsmethoden entwickelt, mit deren Anwendung die in Kapitel 5.2 beschriebenen Schwankungen ausgeglichen werden können. Alle Verfahren arbeiten mit bekannten Sensoren und können ohne Einrichtungsaufwand sofort betrieben werden. Dadurch sind die entwickelten Methoden unter minimalem Einsatz von Zeit und Kosten verfügbar, weshalb eine hohe Akzeptanz beim Verarbeiter zu erwarten ist.

Die Betrachtung der neuen Prozessführungsmethoden wird im Folgenden in zwei Bereiche aufgeteilt. In Kapitel 6.1 wird separat betrachtet, wie auf den Umschaltpunkt (Prozessphasen-Steuerungen-Formgeben) geschlossen wird. Die Einleitung dieses Prozessschritts hat vor allem bei Prozessen mit schnellen Einfrierzeiten wesentlichen Einfluss (siehe Kapitel A.1).

Abschnitt 6.2 geht auf die neu entwickelten Prozessführungsmethoden, die den Spritzgießprozess aufgrund alternativ betrachteter Parameter für die einzelnen Prozessphasen-Regelungen umsetzen, ein. Dabei wird ein Zyklus mit einer sehr langen isobaren Abkühlzeit als Versuchszyklus gewählt. Auf diese Weise können Einflüsse der separat betrachteten Formgebungsphase nahezu ausgeschlossen werden.

Unter Anwendung der in Abschnitt 5.3 definierten Rahmenbedingungen können diese neu entwickelten sowie bereits bestehende Methoden auf ihr Verhalten unter Einwirkung stochastischer und deterministischer Störgrößen untersucht werden. Zielsetzung des Methodenvergleichs ist es, neben einer minimalen stochastisch verursachten Streuung auch die aus den deterministischen Störgrößen hervorgehende Abweichung durch die Wahl einer gehobenen Prozessführungsmethode zu minimieren. Als Versuchsmaterial ist sowohl PP und PS verwendet worden, die Ergebnisse waren vergleichbar. Im Weiteren werden nur die auf das Material PP bezogenen Ergebnisse vorgestellt.

6.1 Prozessphasen-Steuerungen-Formgeben

Die aus prozesstechnischer Sicht kritischste Prozessphasen-Steuerung ist diejenige, die vom Einspritzprozess auf die Nachdruckphase umleitet (vgl. Abbildung A-2). Während der sehr dynamischen Einspritzphase muss auf den Zeitpunkt des volumetrischen Füllpunkts des Werkzeugs geschlossen und von der geschwindigkeitsgeregelten Phase in die druckge-

regelte Prozessphasen-Regelung umgeschaltet werden. Hierzu analysieren die unterschiedlichen Prozessphasen-Steuerungen verschiedene Sensorsignale.

6.1.1 Verwendete Prozessphasen-Steuerungen-Formgeben

Die in den Versuchen verwendeten Umschaltverfahren haben alle zu eigen, dass sie ein Signal in Hinsicht der Über- oder Unterschreitung eines Schwellwertes auswerten. Wurde der Schwellwert erreicht, schaltet die Maschine ggf. nach dem Ablauf einer Verzögerungszeit auf die Nachdruckphase um. Die verglichenen Umschaltverfahren und ihr verwendetes Signal sind in Abbildung 6-1 eingezeichnet und werden in Tabelle 6-1 beschrieben. Das zeitabhängige Umschalten zeigt die gleichen Ergebnisse wie das wegabhängige Umschalten. Aufgrund der hohen Regelgenauigkeit der Einspritzgeschwindigkeit erreichte das zeitabhängige Umschalten immer den gleichen Umschaltwegpunkt. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse hier nicht aufgeführt. Für die beiden kompressionsabhängig arbeitenden Umschaltverfahren sind in nachfolgenden Kapiteln die Besonderheiten erläutert.

Tabelle 6-1: Erläuterung der Umschaltverfahren

Umschaltart:	Erklärung:
Weg-SGM	Unterschreitet die Schnecke einen Wegpunkt oder ein daraus berechnetes Einspritzvolumen, wird der Umschaltprozess eingeleitet.
Druck-SGM	Durch die während des Einspritzens größer werdende Fließweglänge steigt die Kraft, die benötigt wird, um die Schnecke auf der Soll-Vorlaufgeschwindigkeit zu halten. Das Überschreiten eines aus der Kraft berechneten Drucks steht somit für eine Fließweglänge und leitet den Umschaltvorgang ein.
Vorkompression-SGM	Dieses Umschaltverfahren wertet die Kompression der Schmelze zu Beginn des Einspritzprozesses aus. Dadurch kann ermittelt werden, wann die Rückstromsperre geschlossen ist. Der Schmelzestrom breitet sich fortan proportional zur Vorschubgeschwindigkeit aus. Eine nähere Erläuterung des Verfahrens behandelt Kapitel 6.1.2.
Druck-AN/AF	Hier wirkt das gleiche Prinzip wie bei der zuvor beschriebenen Umschaltvariante (Druck-SGM). Diese Methode nutzt zum Erkennen des Drucks einen Sensor im Werkzeug. Durch den Fließwiderstand oder die Kompression steigt der Druck in der Kavität an. Unterschieden wird

	bei dieser Umschaltvariante, wo der Sensor sitzt (AN angussnah, AF angussfern).
Temperatur-AN/AF	Die temperaturabhängige Umschaltung führt eine Positionsbestimmung der Schmelzefront durch. Ausgewertet wird die erste Ableitung des wandbündigen Temperatursensors. Trifft die Schmelze ein, steigt die Temperatur schlagartig an. Es ist je nach Sensorposition nötig, durch die Zugabe einer Verzögerungszeit den Zeitpunkt abzuschätzen, an dem die Schmelze vom Sensorort bis zum Fließwegende vorgezogen ist.
Kompression-AN/AF	Das Drucksignal nimmt während des Füllens infolge des Fließwiderstands stetig zu. Ist die Form volumetrisch gefüllt, ändert sich der Druckanstiegs schlagartig, da nunmehr die Masse in der Form komprimiert wird. Abschnitt 6.1.3 behandelt, wie das Drucksignal vorverarbeitet werden muss, um ein reproduzierbares Umschaltverhalten zu erlangen.

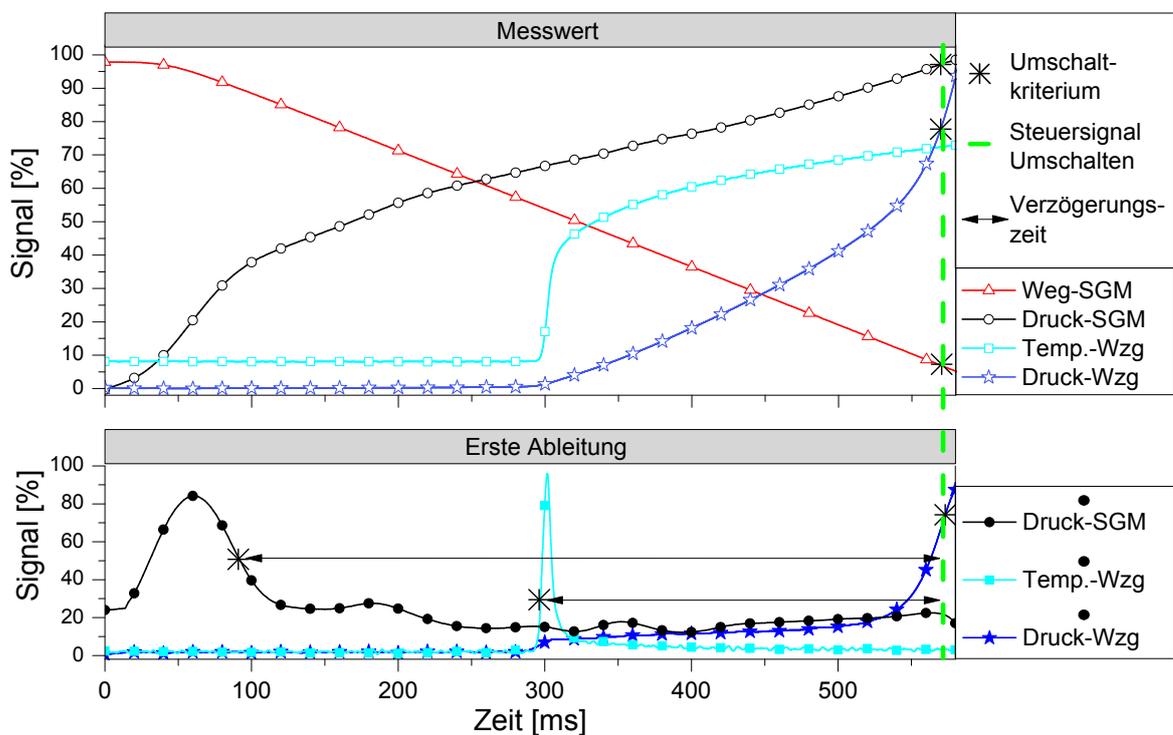


Abbildung 6-1: Signalverläufe der in Tabelle 6-1 erläuterten Umschaltverfahren

6.1.2 Umschalten unter der Beachtung der Vorkompression im Schneckenorraum

Aus den hier folgend aufgeführten Untersuchungen entstand das kompressionsabhängige Umschalten an der Spritzgießmaschine (Vorkompression-SGM). Diese Prozessphasensteuerung wertet den Druckverlauf während des Einspritzens aus und modifiziert das wegabhängige Umschalten. Es beruht darauf, dass Faktoren, die die Schmelzeeinbringung während des Formgebungsprozesses beeinflussen, auch im Drucksignal am Schneckenschaft erkannt werden können. Wie sich der Kurvenverlauf des Drucksignals zu Beginn der Einspritzphase unter dem Einfluss des Dekompressionshubs und der Materialviskosität verändert, ist in Abbildung 6-2 zu sehen. Die Veränderungen im Dekompressionshub simulieren eine unterschiedlich verdichtete Masse im Schneckenorraum. Je mehr die Masse dabei verdichtet ist, umso eher steigt die Druckkurve an. Der Kurvenverlauf verschiebt sich somit parallel zur Zeitachse. Ändert sich die Viskosität der Schmelze, muss mehr Kraft aufgebracht werden, um sie am Fließen zu halten. Der Unterschied in der Druckkurve ist allerdings erst nach dem anfänglich steilen Druckanstieg zu erkennen. Beide Untersuchungen geben darüber Aufschluss, dass sich Abweichungen im Schneckenorraum auf das Drucksignal während des Einspritzens übertragen. Es gilt, aus dem Drucksignal die Informationen zu filtern, die zu einem robusteren Formgebungsprozess führen.

Zu Beginn der Einspritzphase wird die Schmelze vorkomprimiert.¹⁶ Wegen der Trägheit der Masse und des Widerstands gegen das Fließen geht die Bewegung der Schnecke erst in das elastische Materialverhalten über und komprimiert die Schmelze. Gleichzeitig mit der Vorwärtsbewegung der Schmelze schließt auch die Rückstromsperre und wandelt die Schnecke vom Förderinstrument in einen Kolben um. Erst wenn die Rückstromsperre geschlossen und die Schmelze zu einem nötigen Maße verdichtet ist, wird die Bewegung der Schnecke direkt in einen Volumenstrom umgewandelt. Im Kurvenverlauf des Drucks ist dieser Punkt am Steigungswechsel nach der Vorkompression wiederzufinden. Dieser Punkt kann auch für die Vorhersage des Schmelzefortschritts genutzt werden.

¹⁶ Die letztendliche Kompression der Schmelze findet erst dann statt, wenn das gesamte Volumen der Kavität mit Schmelze gefüllt ist.

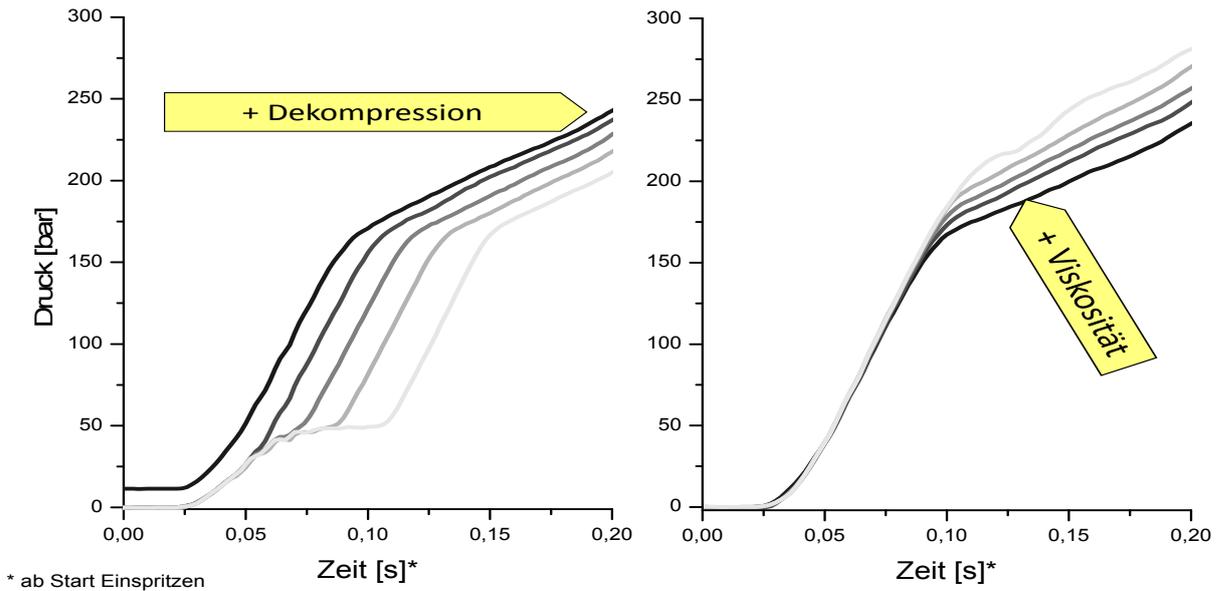


Abbildung 6-2: Veränderung des Drucksignals an der Spritzgießmaschine während des Einspritzens unter Material- und Parametereinfluss

In Abbildung 6-3 links ist die erste Ableitung der in Abbildung 6-2 rechts gezeigten Druckkurven über die Zeit aufgetragen. Sie spiegelt den Druckanstieg während der Anfangsphase wider. Ein deutlicher Unterschied im Kurvenverlauf ist in der abfallenden Flanke nach dem Maximum zu erkennen. Diese Phase steht für das Einsetzen eines konstanten Volumenstroms nach der Vorkompression und dem Verschließen der Rückstromsperre. Mit steigender Viskosität schließt die Rückstromsperre langsamer, wodurch es zu einem verzögerten Einsetzen der Steigungsänderung kommt. Eine Bewertung dieser Steigungsänderung erfolgte über die Vorkompressionszeit. Für mehrere Schwellwerte im Druckanstieg ist der Zeitpunkt des Unterschreitens bestimmt und daraus ein Mittelwert generiert worden. Wie diese Kennzahl und der in Kapitel 4.2.2 definierte Kavität-Schmelzeintritt in Verbindung stehen, ist in Abbildung 6-3 rechts aufgetragen. Die Punkte im Diagramm entstammen einer Versuchsreihe aus über 50 Teilen, während derer sich durch einen Materialwechsel die Viskosität verändern ließ. Die Grafik veranschaulicht, dass der sich ergebende Zeitwert zum Bewerten der Vorkompression im Schneckenorraum im direkten Zusammenhang zum Überströmzeitpunkt des angussnahen Thermoelements steht. Die eingetragene Regressionskurve weist eine Steigung von nahe eins auf, wodurch eine Veränderung in der Vorkompressionszeit auf den Zeitpunkt der Formfüllung umgelegt werden kann.

Diese starke lineare und direkte Korrelation ist sowohl für PP als auch für PS bei einer Veränderung in Viskosität, Temperatur und Staudruck wiederzufinden.

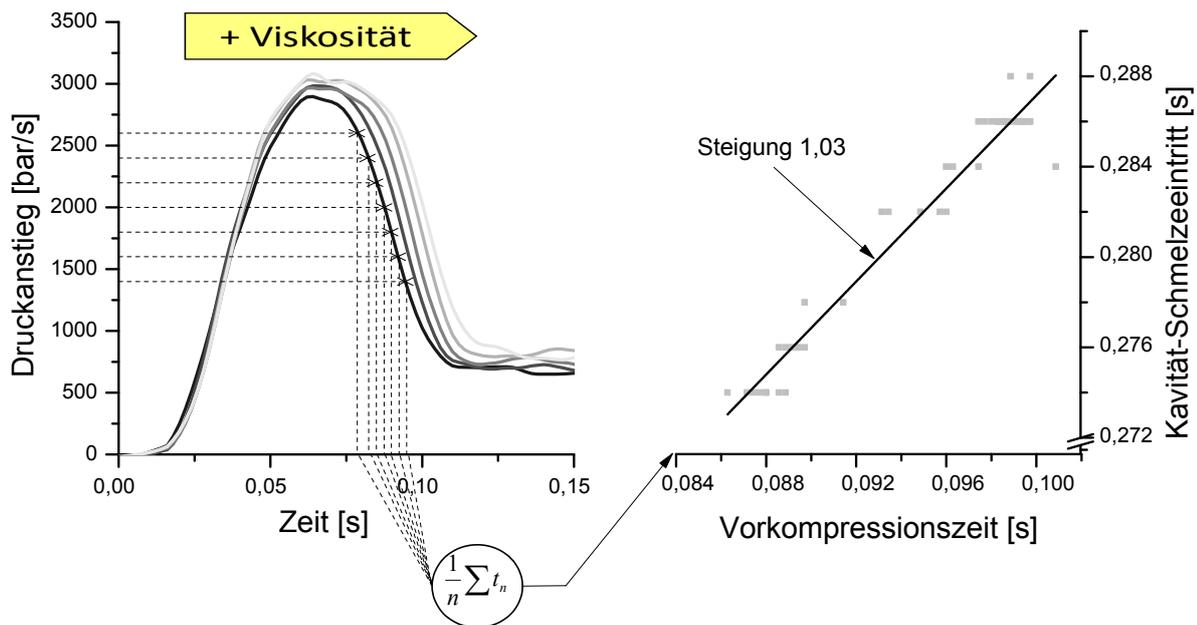


Abbildung 6-3: Korrelation der Steigungsänderung im Drucksignal am Schneckenschaft zum Eintreffen der Schmelze im Werkzeug

Diese Erkenntnis war die Basis zur Entwicklung eines neuen Umschaltverfahrens, das den Umschaltzeitpunkt nicht zum Anfang des Einspritzprozesses referenziert, sondern zum Wechsel der Steigung im Drucksignal. Gemäß der in Abbildung 6-3 enthaltenen Berechnung der Vorkompressionszeit wird der Startzeitpunkt des konstanten Schmelzefflusses bestimmt. Ab diesem Zeitpunkt läuft eine Verzögerungszeit, die so lange andauert, bis die Form vollständig gefüllt ist. Bei abgelaufener Verzögerungszeit wird die Nachdruckphase eingeleitet.

6.1.3 Auswahl eines geeigneten Filters zum kompressionsabhängigen Umschalten mit dem Werkzeuginnendrucksignal

Für die im Werkzeug arbeitende kompressionsabhängige Umschaltung ist die Ableitung des Werkzeuginnendrucksignals notwendig. Mithilfe der Ableitung sucht dieses Verfahren mit einem Schwellwert nach einer abrupten Steigungsänderung im Drucksignal (siehe Abbildung 6-1 $\text{Druck} - \dot{AN}$). Das vom Sensor real gemessene Drucksignal ist jedoch aufgrund von Störungen am Sensor, den Leitungen und dem Messumformern mit einem hochfrequenten Rauschen belegt (siehe Abbildung 6-4 oben). Wird das zeitdiskrete Signal differenziert, werden die hochfrequenten Rauschsignale verstärkt.

Abbildung 6-4 unten zeigt die Ableitung des verrauschten Drucksignals. Aufgrund des Rauschens ist im Signalverlauf der Ableitung keine Steigungsänderung mehr erkennbar. Der verwendete Schwellwert von 0,7 bar/ms wird aufgrund der Ausreißer sofort oder bei einem

geringeren Rauschen verfrüht ausgelöst. Zum zuverlässigen kompressionsabhängigen Umschalten ist ein unverraushtes Signal notwendig.

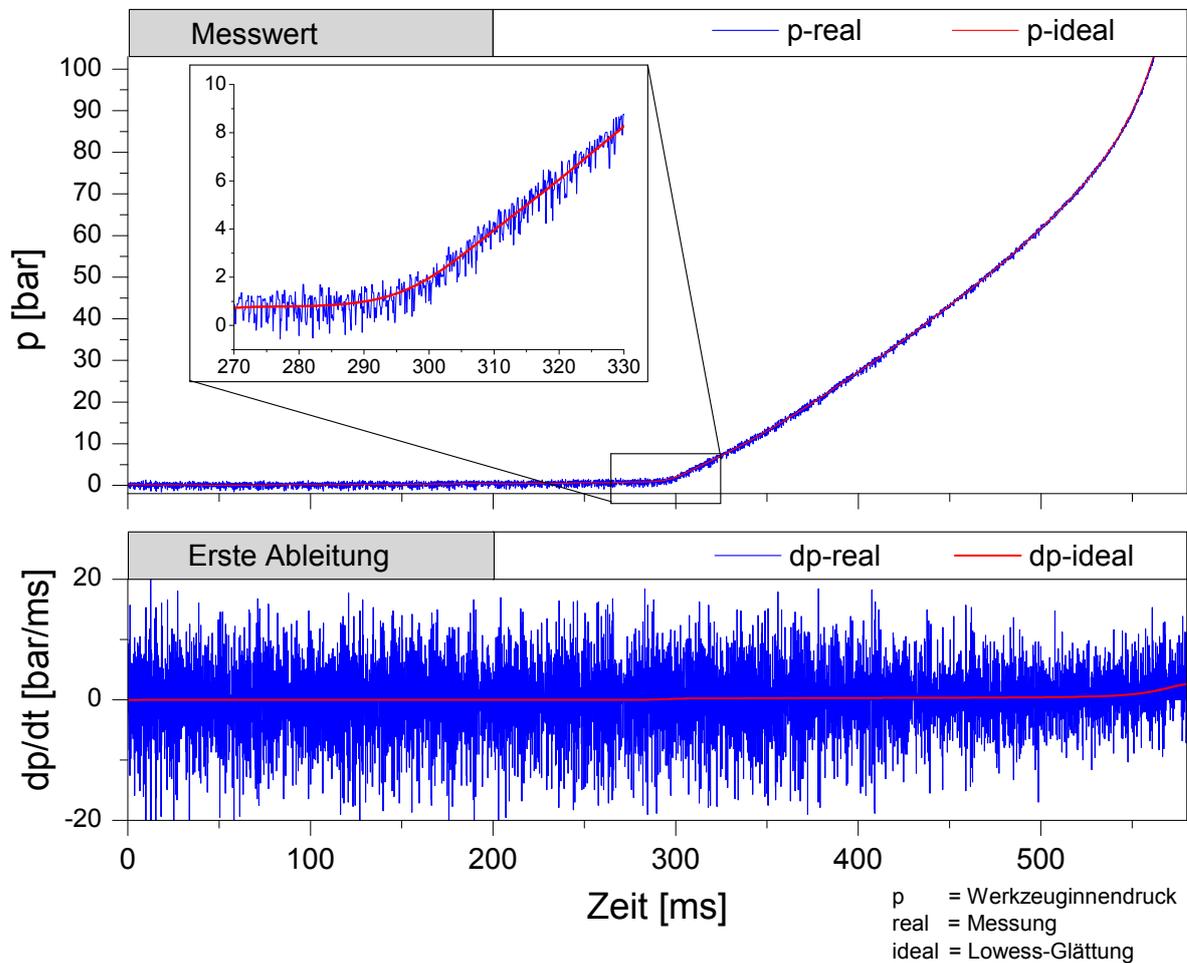


Abbildung 6-4: Signalverläufe für das kompressionsabhängige Umschalten

Ein probates Mittel zum Unterdrücken des Rauschens ist eine Filterung oder Glättung. Dadurch kann online während der Messdatenerfassung auf das am Sensor im idealen Zustand vorherrschende Drucksignal und dessen Steigung zurückgeschlossen werden. Mit steigender Filterordnung nutzt das Verfahren mehr Messwerte aus der Vergangenheit, um den aktuellen Zustand zu prognostizieren. Mit diesem Mittel lässt sich das statistische Rauschen immer weiter unterdrücken, womit die Erkennung des volumetrischen Füllpunkts durch das Rauschsignal weniger stark gestört wird. Die Steigungsänderung im Signal kann deshalb mit höherer Sicherheit richtig erkannt werden.

Beim Filtern wird unter Verwendung von Werten aus der Vergangenheit eine Schätzung für den aktuellen Zustand ausgegeben. Nachteilig an dieser Maßnahme ist, dass mit jedem Wert aus der Vergangenheit einsetzende Änderungen im Signal später und gedämpft er-

kannt werden. Die mit steigender Filterordnung wachsende Gruppenlaufzeit¹⁷ verzögert das System und verschiebt den Kurvenverlauf zu späteren Zeiten. Dies bedeutet, dass bei einem optimierten Signal mit minimalem Rauschen die Steigungsänderung im Drucksignal klar zu detektieren ist. Durch die eintretende Verzögerung ist es jedoch erst später zu erkennen. Für den Einspritzprozess stellt das verzögerte Bemerkens des volumetrischen Füllpunkts ein erhebliches Problem dar, weil während der Verzögerungszeit die Form bereits überfüllt werden kann. Zum kompressionsabhängigen Umschalten muss ein Algorithmus gefunden werden, der die beiden gegenläufigen Effekte einer minimalen Verzögerung und einer maximalen Rauschunterdrückung optimiert.

Für einen Vergleich und die Optimierung verschiedener Filterverfahren mit Blick auf diese Fragestellung ist ein matlabbasiertes Programm erstellt worden. Das Fließdiagramm zum Aufbau des Programms zeigt Abbildung 6-5. Ein idealisiertes unverraushtes Werkzeuginnendrucksignal (1) wird mit einem weißem Rauschen beaufschlagt (2) und mit einem Filterungsverfahren geglättet (3). Im Anschluss lässt sich der Zeitpunkt der volumetrischen Füllung über die Steigung ermitteln (4). Die statistische Auswertung des über hundert Mal durchlaufenen Prozesses gibt an, wie stark die Erkennung des Umschaltpunkts durch das Rauschen streut. Das Suchverfahren erhöht die Filterordnung über ein adaptives System (5) so lange, bis die Umschaltpunkte der hundert Zyklen eine Streuung von kleiner 0,3 ms aufweisen. Die Differenz zwischen dem dabei entstehenden mittleren Auslösezeitpunkt der ver-rauschten Signale und dem Auslösezeitpunkt am unverrauschten Signal ergibt die durch die Filterung verursachte Verschiebung des Signals.

In Abbildung 6-6 links sind die entstehenden Kurvenverläufe der verschiedenen Filtermethoden neben dem idealen Signalverlauf (6) aufgetragen. Zum Zeitpunkt um 300 ms, an dem die Schmelze eintrifft, und beim Einsetzen der Kompression bei etwa 550 ms ist eine deutliche Verschiebung der über die Filter geglätteten Messsignale zur Idealkurve erkennbar.

Der verwendete Moving-Average-Filter glättet das Signal über ein Rechteckfenster. Alle Messdaten haben dabei die gleiche Bedeutung. Eine gewichtete Mittelwertbildung führen die als Tiefpassfilter wirkenden FIR-Filter (Finite Impulse Response) und IIR-Filter (Infinite Impulse Response) aus. Die Messwerte verrechnet der Algorithmus dabei so, dass aus der Fouriertransformation entstehende niedrige Frequenzen den Filter passieren können und die durch das Rauschen verursachten hohen Frequenzen möglichst stark gedämpft werden. Der als nicht rekursiv fungierende FIR-Filter benutzt dabei nur Signale aus den Messwerten. Ein IIR-Filter arbeitet zusätzlich mit zurückliegenden Filterausgangswerten, wodurch der Filter

¹⁷ Die Gruppenlaufzeit beschreibt die Verzögerungscharakteristik eines Filters für verschiedene Frequenzen.

auch rekursiv arbeitet. Zur Klasse der Optimal-Filter gehören der Wiener- und der Kalman-Filter. Beide optimieren das Filter-Ausgangssignal in Hinsicht auf eine minimale quadratische Abweichung.

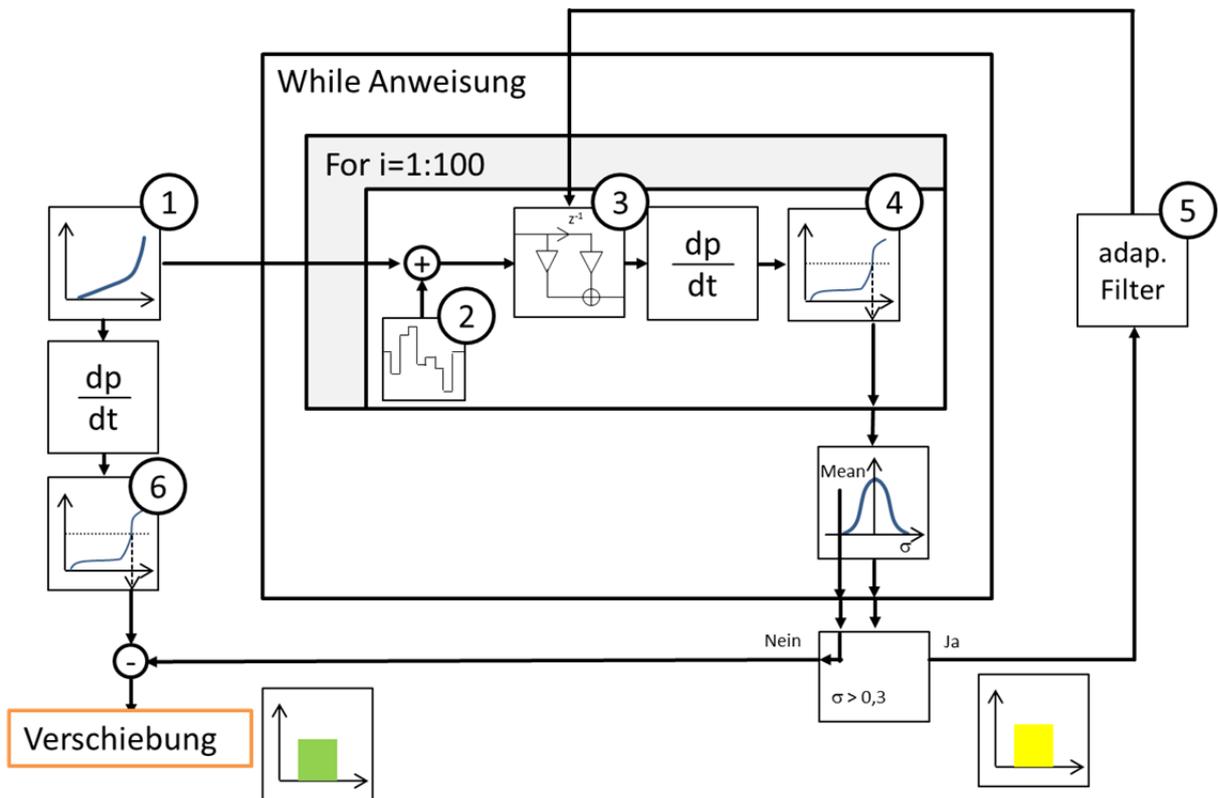


Abbildung 6-5: Fließdiagramm für ein Programm zur optimalen Auslegung eines Filters zum kompressionsabhängigen Umschalten

In der Tabelle in Abbildung 6-6 sind die Optimierungskriterien diverser Filtermethoden gegenübergestellt. Mit jeder Filtervariante ist es möglich, das Drucksignal in der Art zu glätten, dass sich eine Erkennung des Kompressionspunkts mit einer minimalen Streuung ergibt. Die zeitliche Verschiebung zum Idealsignal und die Ordnung des Filtersystems unterscheiden sich jedoch wesentlich. Der IIR- und der Kalman-Filter weisen mit unter 5 ms die kleinsten Zeitverzögerungen auf. Durch die geringe Ordnung und die einfache Umsetzbarkeit ist zur weiteren Vorverarbeitung des Drucksignals¹⁸ der IIR-Filter verwendet worden.

¹⁸ Nur beim kompressionsabhängigen Umschalten bezogen auf den Werkzeuginnendruck.

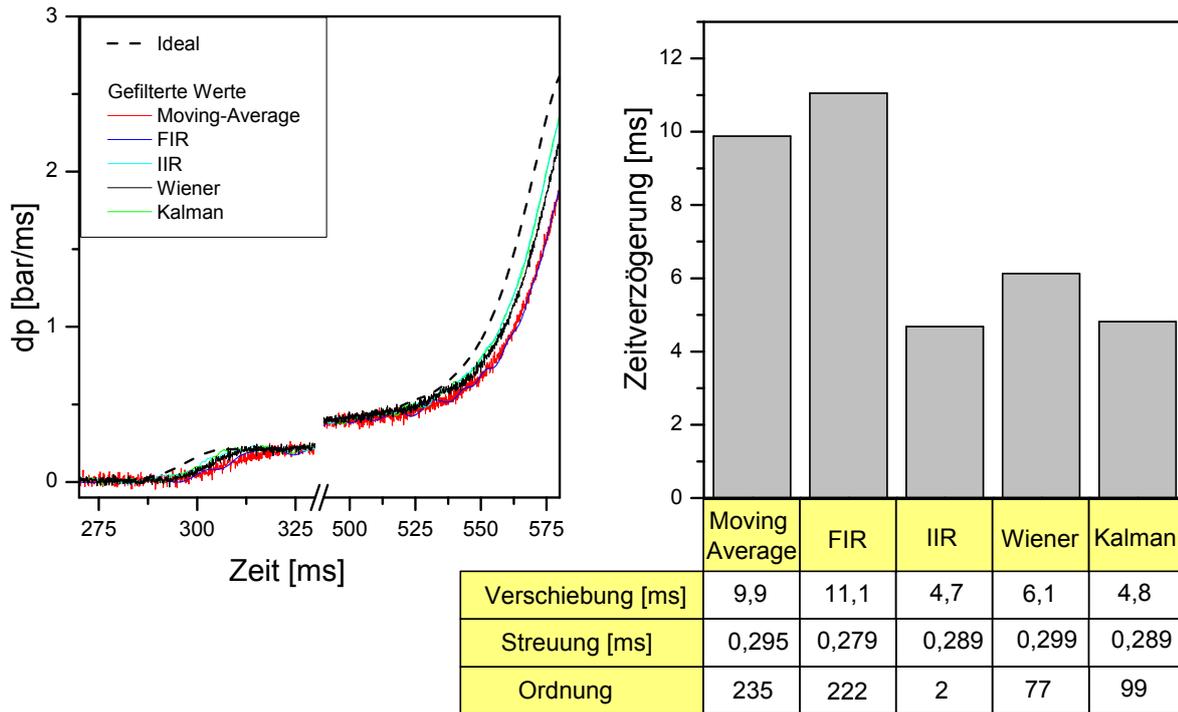


Abbildung 6-6: Vergleich der verschiedenen Filterverfahren

6.1.4 Reproduktionsvermögen der einzelnen Umschaltverfahren

Jedes der untersuchten Umschaltverfahren nutzt einen anderen Sensortyp, -position oder Detektionsverfahren, um den volumetrischen Füllpunkt zu identifizieren. Dadurch ändern sich die Bedingungen, unter denen stochastische Störgrößen auf den Prozess einwirken können.

In Abbildung 6-7 sind die Eigenstreuung der Umschaltmethoden gegenübergestellt. Untersucht wurde, wie unter Verwendung der Fließspirale das eingebrachte Volumen in der Einspritzphase streut. Generell spielt dabei das Verfahren eine untergeordnete Rolle, wenn man die Reproduzierbarkeit in den Qualitätsdaten betrachtet. Entscheidenden Einfluss hat jedoch der Ort der Messdatenerfassung. Je näher die Sensorik für den Umschaltprozess in Richtung Fließwegende geht, desto besser fällt die Reproduzierbarkeit des Verfahrens aus. Das über den am Schneckenschaft arbeitende druckabhängige Umschalten weist bei Weitem die höchste Streuung auf. Alle angussfern arbeitenden Verfahren haben die kleinsten Streuungen und zeigen unabhängig vom Verfahren eine sehr hohe Reproduzierbarkeit. Die maschineninterne Umschaltvariante, die die Informationen aus dem Druck- und Wegsignal verbindet, kompensiert auf diese Weise Störungen im Schneckenorraum. Dadurch zeigt das Verfahren eine ähnliche Reproduzierbarkeit wie die angussnah arbeitenden Methoden.

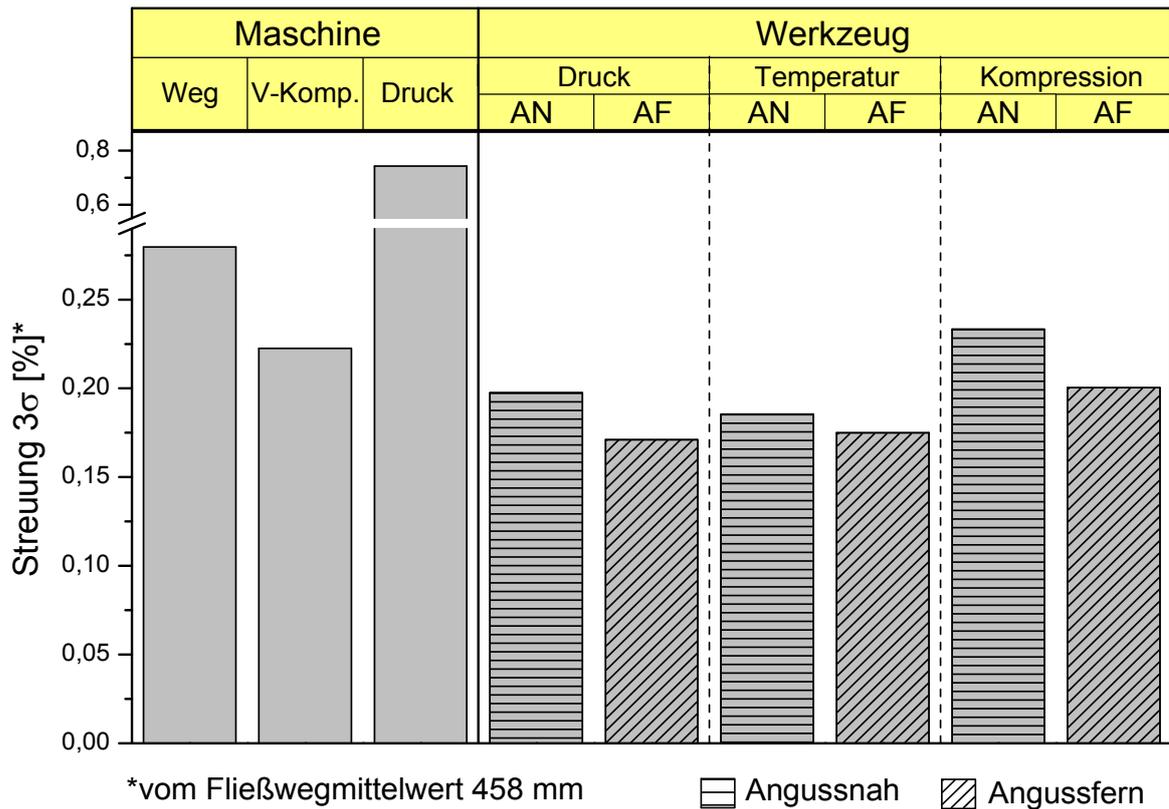


Abbildung 6-7: Vergleich der Umschaltverfahren auf ihr stochastisches Verhalten

6.1.5 Auswirkungen deterministischer Störgrößen auf die Bauteilqualität

Auf den schnell laufenden Prozess ist ein Auftreten der verschiedenen Störgrößen simuliert und deren Einfluss auf die Qualität analysiert worden. Untersucht wurde, wie sich die Änderungen auf das während des Einspritzens eingebrachte Volumen und auf das Bauteilgewicht bei einer Nachdruckzeit von 0,3 s auswirken. Der Betrag der relativen Änderung ist für jedes Verfahren gemäß Kapitel 5.3 kumuliert. Je größer der Teilabschnitt des Balkens im Diagramm ausfällt, umso höher ist auch der Einfluss der Störgröße auf die Qualität. Die absolute Balkenhöhe steht für den Fall, dass alle Störgrößen so wirken, dass das Qualitätsergebnis nur in eine Richtung beeinflusst wird. Dies stellt den absolut schlechtesten eintreffenden Fall dar.

6.1.5.1 Volumeneintrag während des Einspritzens

In diesem Versuch ist das in Tabelle 3-1 vorgestellte Fließspiralengerät mit jedem Verfahren bis zur Fließbremse (die das Ende der Kavität repräsentiert) gefüllt worden.¹⁹ Eine

¹⁹ Die Querschnittsveränderung an der Fließbremse erzeugt eine Steigungsänderung im Drucksignal, die durch das kompressionsabhängige Umschalten erkannt wird. Bedingt durch die Reaktionszeit des Systems verlängerte sich der Fließweg um 35 mm.

störgrößenbedingte Änderung im Schmelzevolumeneintrag lässt sich durch die zurückgelegte Fließweglänge quantifizieren. Bei einem erhöhten Schmelzeintrag wird ein längerer Fließweg zurückgelegt, wodurch die Gefahr einer Überspritzung steigt. Bei einer geringen Fließweglänge können ungefüllte Teile entstehen.

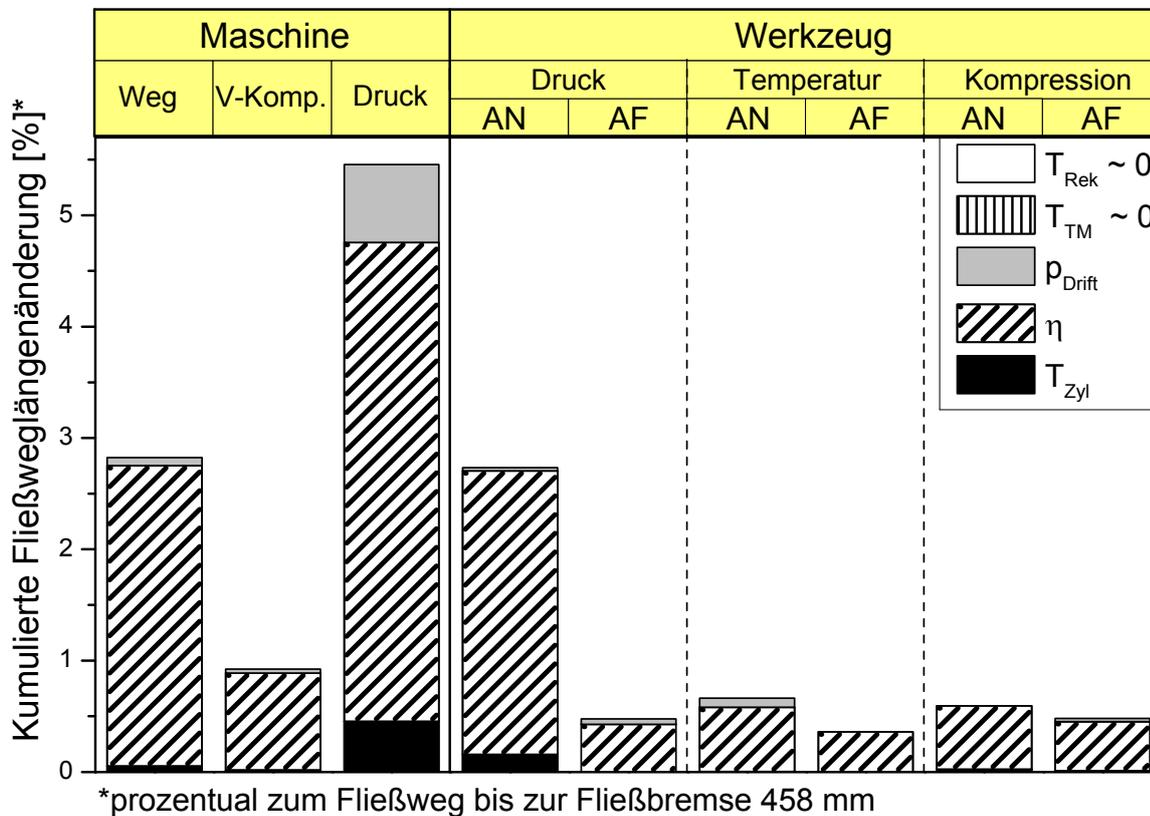


Abbildung 6-8: Auswirkungen deterministischer Störgrößen bei verschiedenen Umschaltverfahren auf das eingebrachte Volumen in der Einspritzphase

In Abbildung 6-8 sind alle Störeffekte so gewählt, dass sie zu einer Fließwegverkürzung führen. Größten Einfluss hat die auftretende Viskositätsänderung neben der wechselnden Zylinderwandtemperatur. Das veränderte Messverhalten des Drucksensors (p_{Drift}) zeigt im Wesentlichen nur beim druckabhängigen Umschalten an der Maschine einen Einfluss. Am robustesten arbeiten das kompressions- und temperaturabhängige Umschalten. Bei den druckabhängigen Umschaltverfahren steigt der Störgrößeneinfluss mit wachsender Distanz des Sensors zum Fließwegende. Das in der Arbeit entwickelte Verfahren, das das wegabhängige Umschalten durch Informationen aus dem Drucksignal der Maschine modifiziert, kann den Schmelzeverlust im Schneckenorraum fast komplett kompensieren, sodass dessen Störanfälligkeit diejenige der im Werkzeug arbeitender Verfahren erreicht.

6.1.5.2 Masseintrag bei einer Nachdruckzeit von 0,3 s

Das eingebrachte Schmelzevolumen entscheidet darüber, wie das Bauteil abgeformt wird und ob eine grundsätzliche Funktionserfüllung gewährleistet werden kann. Weiter präzisiert wird die Anforderung an die Bauteilqualität, wenn auf die Einhaltung optischer, mechanischer oder maßlicher Eigenschaften über das Bauteilgewicht geschlossen wird. Hierzu ist das Plattenbauteil (Tabelle 3-1 Methoden-Vergleich-Platte) unter Versuchsbedingungen produziert worden. Als Nachdruckzeit wurden 0,3 s gewählt, um nachfolgende Effekte die aus einer unterschiedlichen Formfüllung entstehen mitzubetrachten. Dies kann z. B. einen Einfluss auf das Abbremsverhalten der Schnecke oder das Anregelverhalten für den Nachdruck haben.

Auf das Bauteilgewicht (siehe Abbildung 6-9) haben die Störungen für die Umschaltmethoden einen ähnlichen Einfluss wie der vorangegangene Test, bei dem das eingebrachte Volumen begutachtet wurde. Die entstehende Schmelze-Viskosität und Schmelze-Temperatur sind die entscheidenden Einflussgrößen auf der Störgrößenseite. Bei diesen Verfahren war erneut deutlich zu sehen, dass am Fließwegende arbeitende Methoden am resistantesten gegenüber Störgrößen sind.

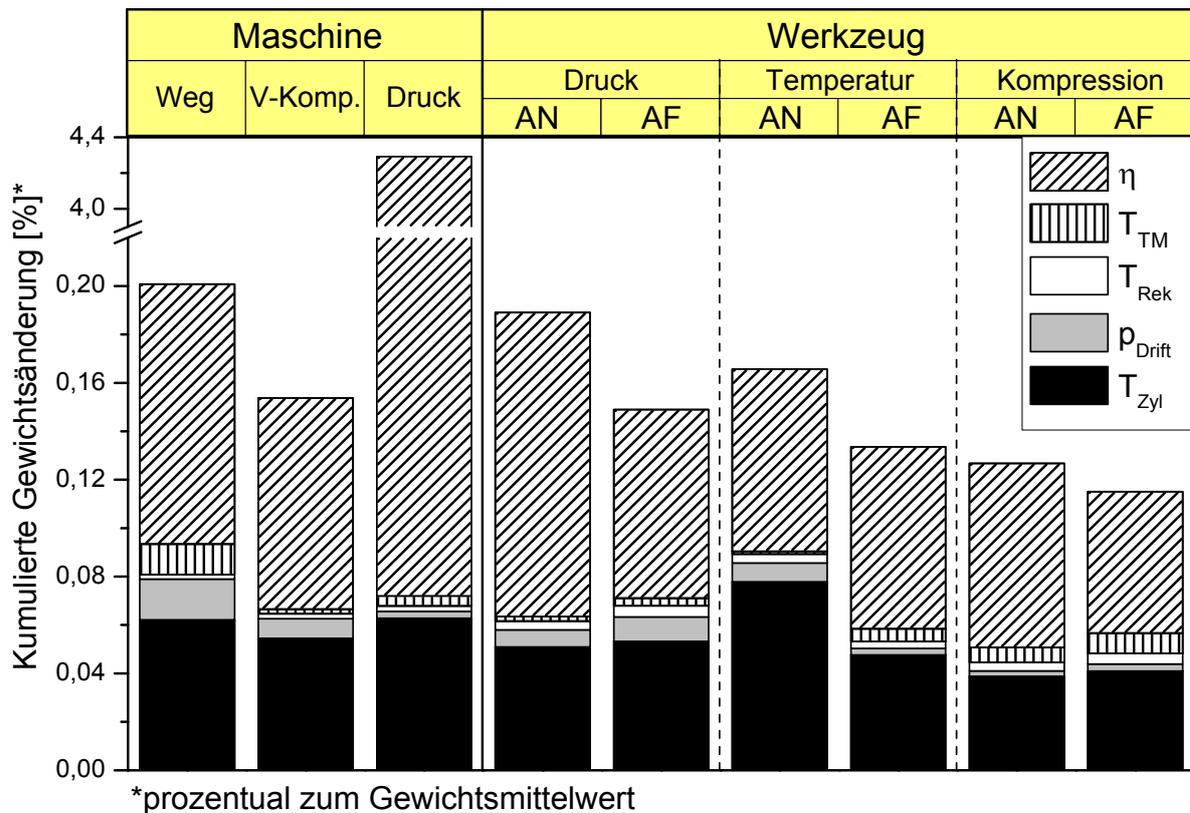


Abbildung 6-9: Auswirkungen deterministischer Störgrößen auf das erzielte Bauteilgewicht für die Umschaltverfahren

6.2 Vergleich verschiedener Prozessphasen-Regelungen

In diesem Abschnitt werden die in der Arbeit neu entwickelten Prozessführungsmethoden vorgestellt. Sie kombinieren teilweise verschiedene Prozessphasen-Regelungen zu einer neuen Prozessführungsmethode. Einen Überblick über die verglichenen Methoden und ihre Prozessregelphasen gibt Abbildung 6-10. Befindet sich der Prozess gerade in keinem der von den drei alternativen Methoden betrachteten Bereiche, wird der Standard-Spritzgießprozess ausgeführt. Die Regelungen arbeiten alle nach dem Prinzip, dass direkt werkstoffberührende oder polymerbezogene Größen geregelt werden. Bewusst wurden ausschließlich nicht modellbasierte Verfahren entwickelt, da sie mit minimalem Kosten- und Zeiteinsatz auszuführen sind. Ein als gut bewerteter Zustand wird dabei durch den Bediener als Referenz definiert und durch die Regelung fortan umgesetzt. In den nächsten Unterpunkten werden die einzelnen Regelsysteme der Verfahren vorgestellt. Als Basis für die von den Methoden verwendeten Zielgrößen dienten die in Kapitel 5 gewonnenen Erkenntnisse.

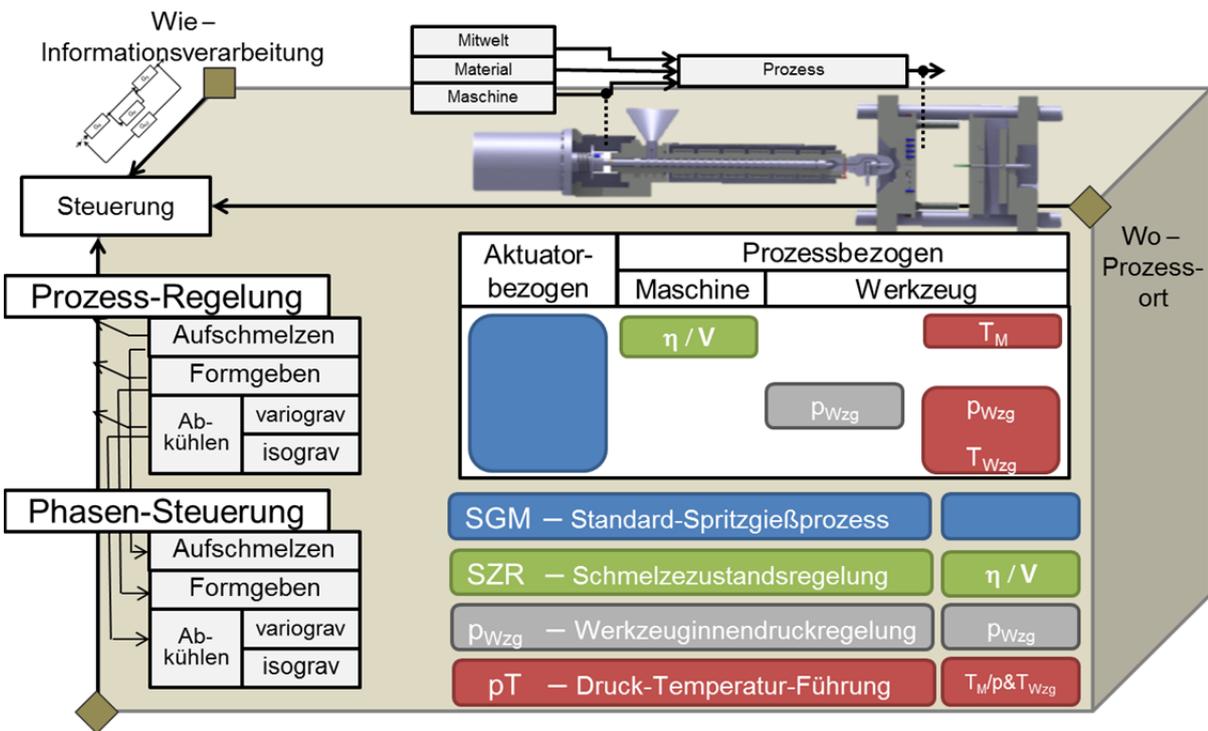


Abbildung 6-10: Übersicht über die Prozessführungsmethoden

6.2.1 Standard-Spritzgießprozess (SGM)

Beim Standard-Spritzgießprozess werden Maschinengrößen gezielt geführt. Abbildung 6-11 zeigt die Regelkreise für den Aufschmelz-, Formgebungs- und Abkühlvorgang (1) sowie die Modelle der sich einzeln bildenden Prozessgrößen für die Phasen (2). Resultierend aus den

Geschehnissen in den Prozessmodellen bilden sich Bauteileigenschaften aus (3). Die Regelung der Maschinengrößen sorgt dafür, dass die gekennzeichneten Bereiche im Prozessgeschehen (4) unabhängig von den Störgrößen konstant bleiben. Die im Prozessverlauf dann folgenden Zustände ergeben sich aus dem Zusammenspiel der Eingangs- und der Störgrößen.

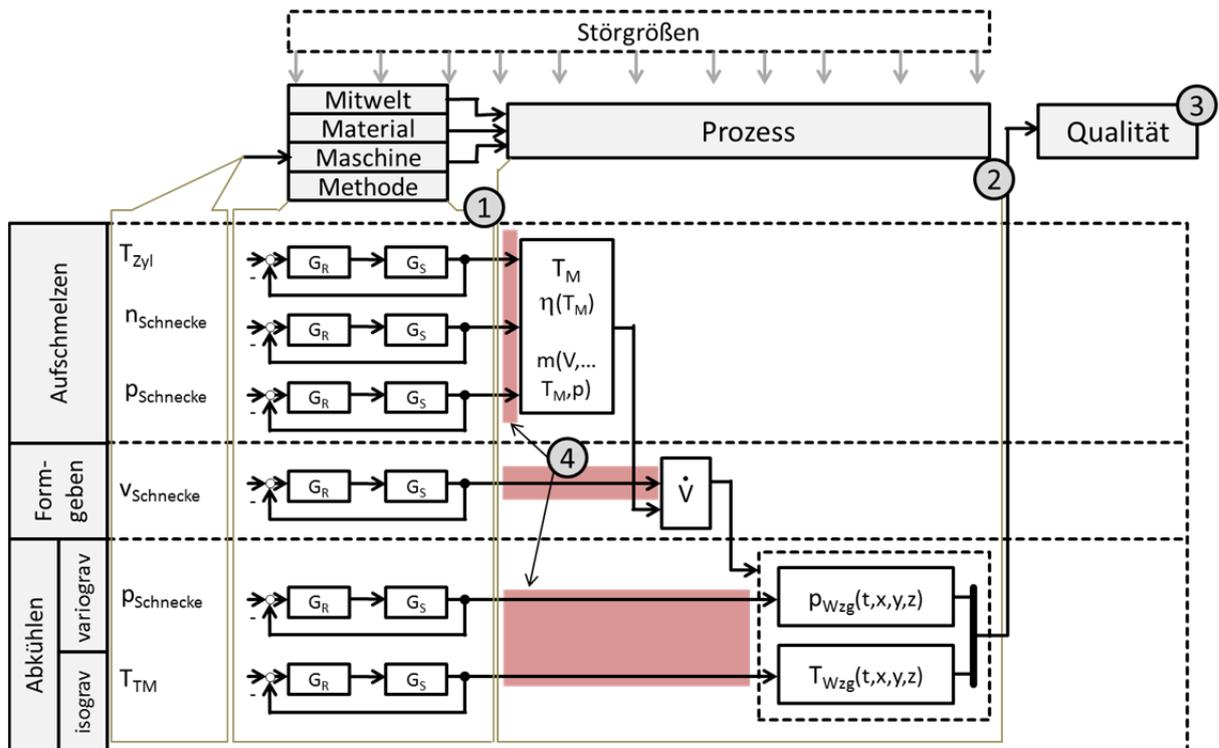


Abbildung 6-11: Prozessabbild für den Standard-Spritzgießprozess (SGM)

6.2.2 Schmelzestandsregelung (SZR)

Die Schmelzestandsregelung verfolgt das Ziel, den Aufschmelzprozess auf aggregatbezogene Kennzahlen hin geregelt durchzuführen. Somit können Störungen während des Aufschmelzprozesses verhindert werden. Als Einstellparameter werden aus dem Drucksensor extrahierte Daten genutzt, die Aufschluss über die Viskosität und die im Schneckenorraum befindliche Schmelzemasse geben. Dies hat den Vorteil, dass ohne zusätzliche Sensorik die Eigenschaft im Schmelzeorraum erkannt werden kann. Demzufolge ergibt sich für diese Prozessführungsmethode die in Abbildung 6-12 gezeigte Abwandlung der Abbildung 6-11. Modifiziert wird der Spritzgießprozess dadurch, dass gezielt Größen geregelt werden, die nach dem Aufschmelzvorgang entstehen.

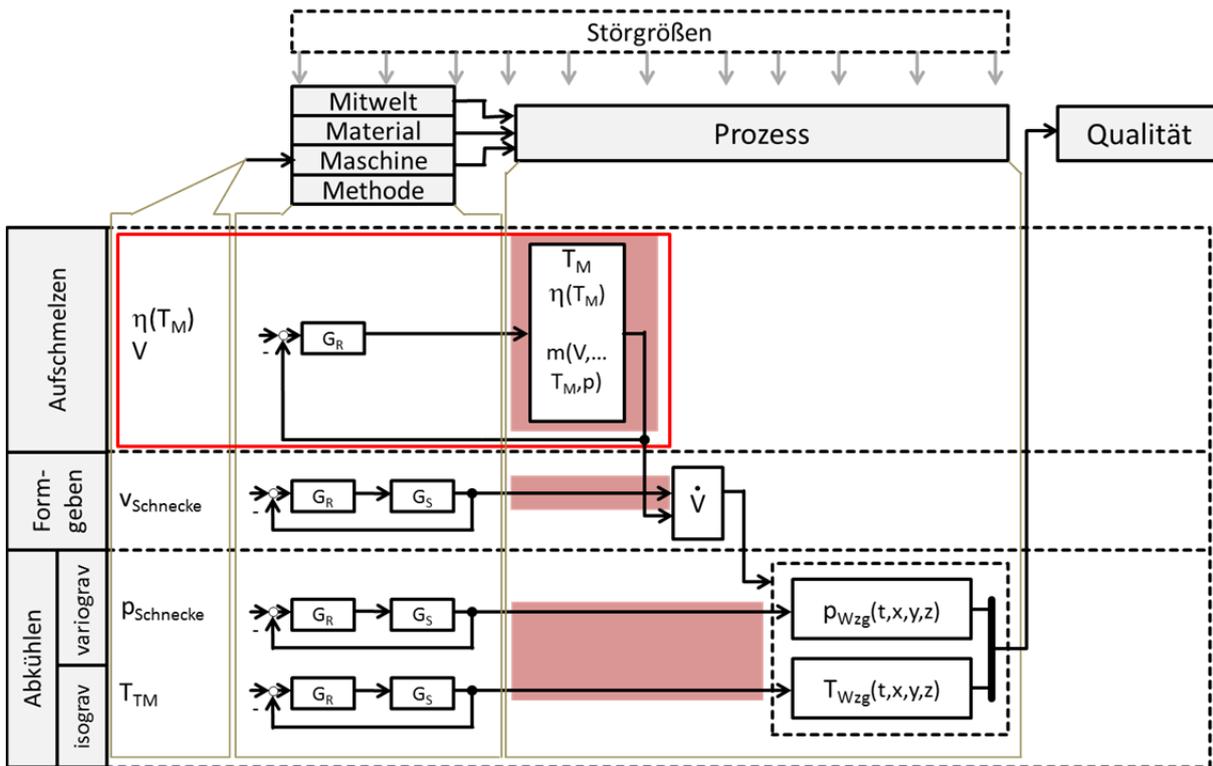


Abbildung 6-12: Prozessabbild für die Schmelzezustandsregelung (SZR)

Die Haupt-Regelgröße ist die temperatur- und materialabhängige Viskosität. Außerdem wird die sich ergebende Schmelzmasse im Schneckenorraum stetig überwacht. Als Stellgrößen zum Einstellen der Zielgrößen dienen die vom Standardspritzgießprozess bekannten Sollwerte. Einer Viskositätsänderung wird durch ein Nachstellen von Staudruck, Drehzahl und Zylindertemperatur entgegengewirkt. Dadurch ändert sich die Temperatur der Schmelze in einer Weise, dass sich die Viskosität anpasst. Für die Bewertung der Schmelze-Viskosität nutzt der Regler die aus dem Drucksignal während des Einspritzens gewonnene Fließzahl. Eine Abweichung vom Sollwert erkennt der verwendete PI-Regler und verändert die Stellgrößen demzufolge so, dass sich die Temperatur im Polymer angleicht.

Zum Erkennen der Viskosität über die Druckkurve und für den nach dem Aufschmelzen folgenden Formgebungsprozess ist es wichtig, dass die Schmelzmasse im Schneckenorraum gleichbleibend ist. Feststellen lässt sich dies über den mittleren Druck, kurz bevor die Schneckenbewegung für den Einspritzprozess startet. Bei einem gleichbleibenden Dosierhub ist die Schmelzmasse proportional vom Druck abhängig. Die Schmelzmasse im Schneckenorraum wird mithilfe des Anfangsdrucks detektiert und über die Staudruckhöhe zyklusübergreifend nachgeregelt.

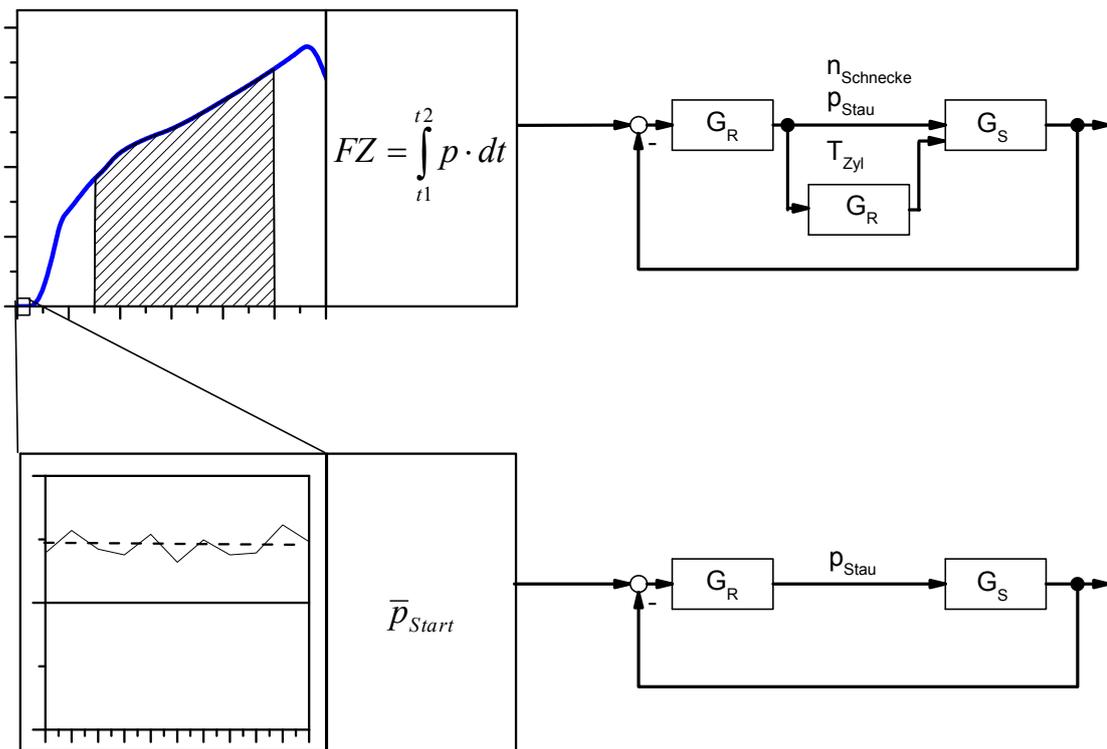


Abbildung 6-13: Regelkreise zum Durchführen der Schmelzezustandsregelung

6.2.3 Werkzeuginnendruckregelung (p_{Wzg})

Die Werkzeuginnendruckregelung widmet sich dem exakten Nachfahren des nach dem Umschalten herrschenden Druckverlaufs in der Kavität. Diese Regelung verlangt den zusätzlichen Einsatz eines Sensors im Werkzeug. Bei den Untersuchungen ist die Regelung immer auf den angussnahen Sensor bezogen. Dem stark nicht linearen und zeitvarianten Verhalten wird mit einem Regelungssystem im Gain-Scheduling-Verfahren begegnet, das die Reglerparameter des verwendeten PI-Reglers in Abhängigkeit vom Regelfehler ändert. Als Stellgröße verwendet der Regler die Schneckenvorlaufgeschwindigkeit, mit der sich das Volumen des Bilanzraums (Schneckenorraum, Kavität) beeinflussen lässt, wodurch sich der Druck am Sensor ändert. Die Nachdruckphase wird bei diesem Verfahren durch das Überschreiten eines Druckwerts am Werkzeuginnendrucksensor eingeleitet. In Anbetracht der gezielten Druckregelung während der Abkühlphase ergibt sich das in Abbildung 6-14 gezeigte Prozessabbild für die Werkzeuginnendruckregelung. Mithilfe dieses Verfahrens lässt sich der Werkzeuginnendruck exakt nachregeln (vgl. Abbildung 7-4) und ist somit unabhängig von den Störgrößen. Eine gezielte Beeinflussung ist jedoch nur so lange möglich, wie zwischen der Düse und dem Drucksensor eine plastische Seele im Bauteil besteht.

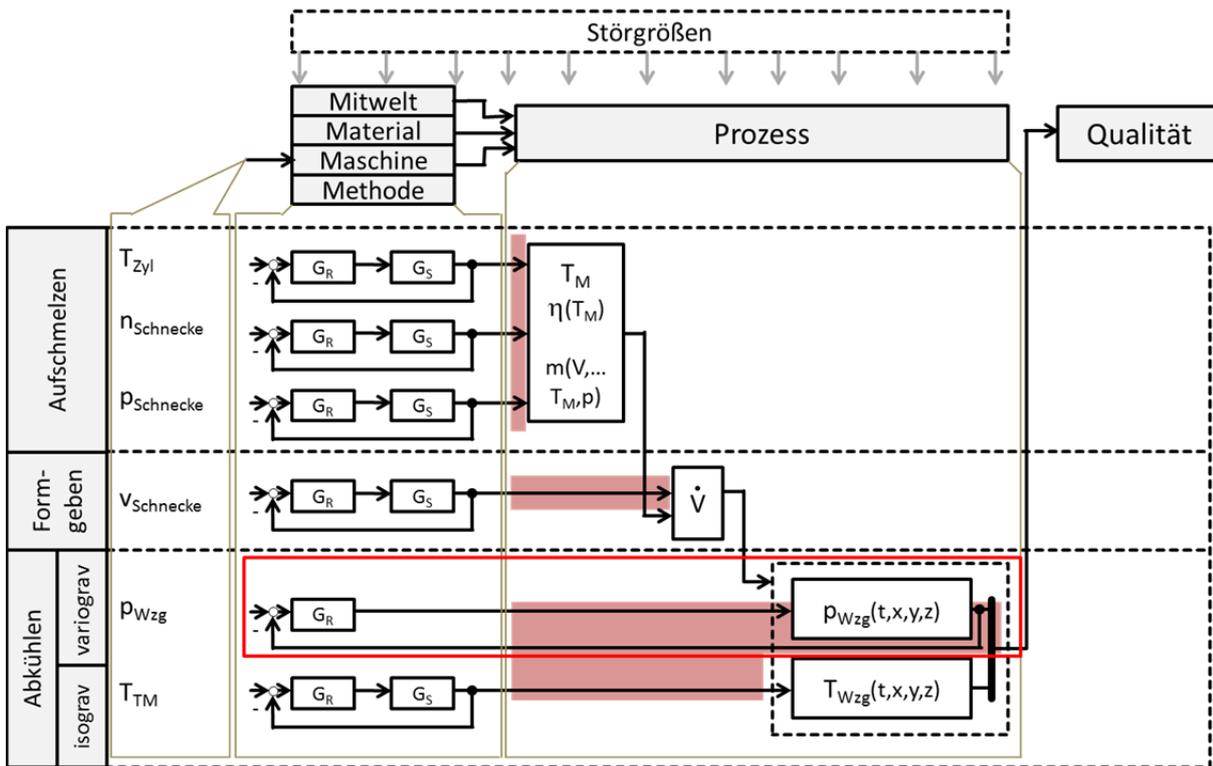


Abbildung 6-14: Prozessabbild für die Werkzeuginnendruckregelung (p_{Wzg})

6.2.4 Druck-Temperatur-Führung (pT)

Neben der im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Druckregelung findet bei diesem Verfahren zusätzlich die gezielte Führung des Temperaturverlaufs im Werkstoff Beachtung. Ein geregeltes Steuern der Aufheiz- und Abkühlkurve des Werkstoffs ist wegen der hohen geforderten Dynamik und des trägen Verhaltens der Maßnahmen, die die Temperatur beeinflussen, nicht möglich. Die im Prozess auftretenden Aufheiz- und Abkühlverhältnisse ergeben sich überwiegend aus den anfänglichen Temperaturwerten zu Beginn des Aufheiz- oder Abkühlvorgangs. Die Anfangstemperaturen, wie z. B. die Schmelze- und die Werkzeugtemperatur bestimmen über den Temperaturabfall nach Einbringung der Schmelze in der Abkühlphase. Diese Ausgangsbedingungen bleiben die einzige Möglichkeit, den Temperaturverlauf im Werkzeug gezielt zu beeinflussen. Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich dieses Regelungsverfahren damit, anhand stabiler Ausgangstemperaturen eine gleichbleibende Abkühlkurve zu erhalten. Beeinflusst wird die Schmelze-Temperatur und Werkzeugwand-Temperatur durch einen PI-Regler. Als Stellgröße dienen die Zylinderwand- und die Temperiermitteltemperatur. Die beiden betrachteten Regelstrecken sind sehr träge und können daher nur zyklusübergreifend in den Prozess eingreifen.

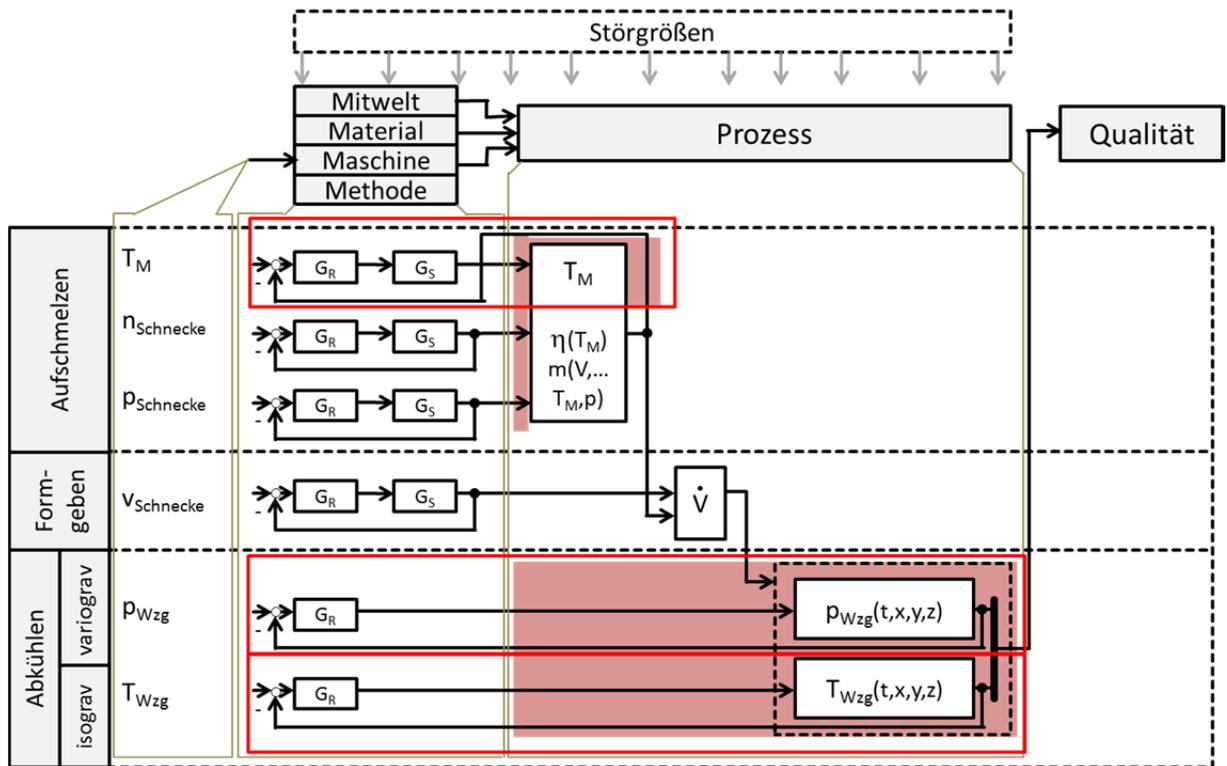


Abbildung 6-15: Prozessabbild für die Druck-Temperatur-Führung (pT)

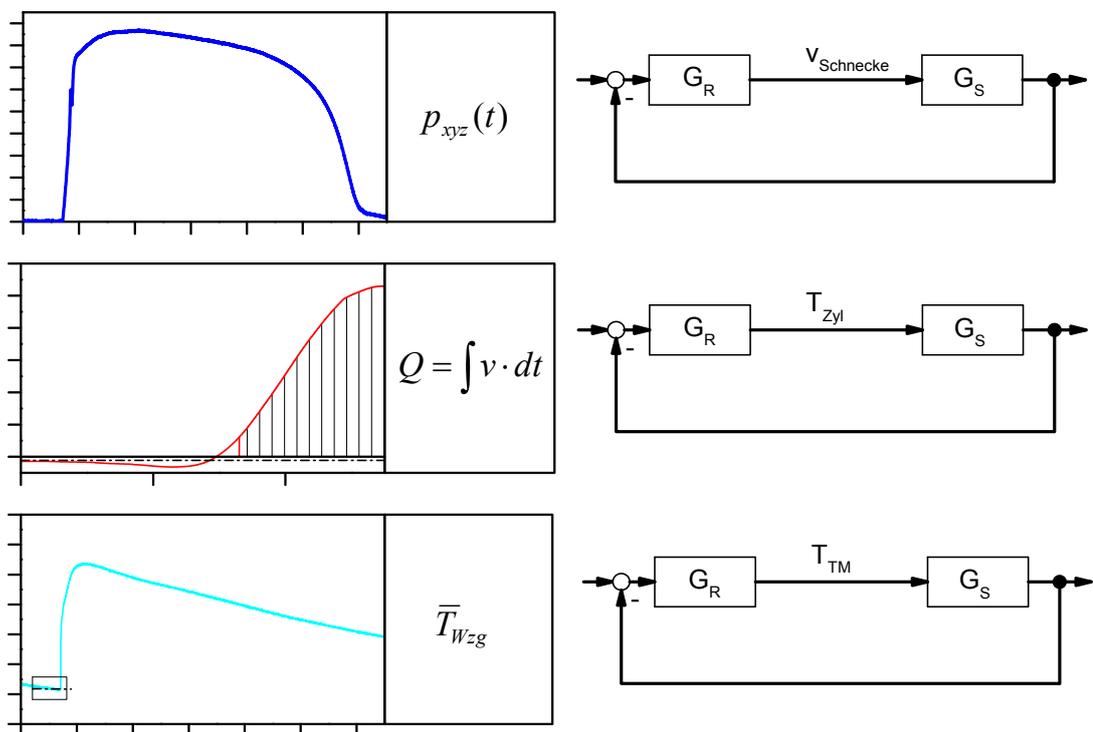


Abbildung 6-16: Regelkreise zum Durchführen der Werkzeuginnendruckregelung und der darauf aufbauenden Druck-Temperatur-Führung

6.2.5 Reaktion der Prozessführungsmethoden auf Störgrößen

Die vier beschriebenen Verfahren sind auf stochastischen und deterministischen Störgrößeneinfluss hin untersucht worden. In der Reproduzierbarkeit weisen die Verfahren keinen signifikanten Unterschied auf. Ihre Eigenstreuungen bewegen sich alle im gleichen Bereich (siehe Abbildung 6-17 3σ). Durchführung und Bewertung der deterministischen Störgrößen geschahen gemäß Kapitel 5.3. In Abbildung 6-17 sind die aufsummierten Qualitätsänderungen je Störgröße für jedes Verfahren aufgetragen. Unterschieden werden bei der Darstellung die Störgrößen die aus der Mitwelt und jene die aus dem Material stammen. Zunächst sollen nur Erstere betrachtet werden. Bei den Methoden der SZR und der pWzg wird nur eine Prozessgröße (Viskosität/Werkzeuginnendruck) geregelt. Dadurch verstärkt sich gesamtheitlich betrachtet der Einfluss der deterministischen Störgrößen. Die störenden Effekte aus der Mitwelt lassen sich erst mit der vorgestellten Druck-Temperatur-Führung weitestgehend kompensieren. Bei dieser Variante der Prozessführung wird durch die simultane Regelung der Druck- und Temperaturverläufe der thermodynamische Prozess ganzheitlich betrachtet.

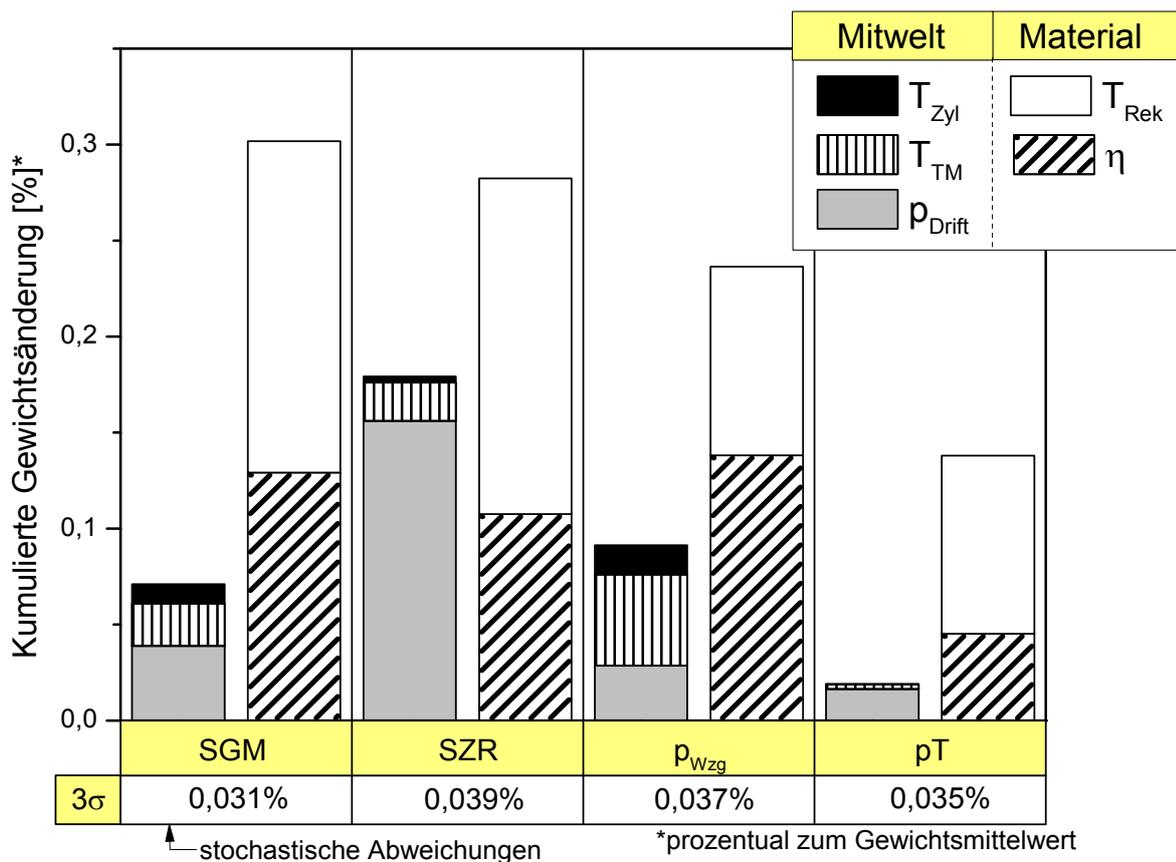


Abbildung 6-17: Auswirkungen stochastischer und deterministischer Störgrößen auf die Qualität bei verschiedenen Prozessführungsmethoden

Materialbedingte Störgrößen nehmen immer mehr ab, je tiefer die Regelgrößen im Prozess wirken. Dennoch ergeben sich bei allen Verfahren noch deutliche Abweichungen. Dies ist selbst bei identischer Nachführung der Temperatur und des Drucks (pT-Führung) während des Abkühlprozesses der Fall.

7 Bewertung der Untersuchungsergebnisse

7.1 Bewertung der auftretenden Störgrößen

Die Ursachen, welche für wechselnde Rahmenbedingungen sorgen und von der Prozessführungsmethode ausgeglichen werden müssen, lassen sich in die Kategorien Maschine, Mitwelt und Material einteilen. Die Betrachtung dieser möglichen Störgrößen zeigte, dass die Maschinenverfahrbewegungen und die Drücke mittlerweile reproduzierbar eingeregelt werden können. Bei den temperierten Komponenten in der Fertigungszelle ist aufgrund der Distanz zwischen dem Sensor und dem polymerberührenden Bereich eine Einschwingzeit notwendig, während derer sich eine neue Gleichgewichtstemperatur einstellt. Auswirkungen der Störeffekte aus der Mitwelt und dem Material lassen sich (gemäß Kapitel 5.2) in fünf veränderte Prozessparameter der frühen Phase zusammenfassen. Davon ausgehend beeinflussen sie die nachfolgenden Zustände. Bei den Materialparametern ist eine Änderung der Viskosität (15 %) und der Einfriertemperatur des Materials (4 °C) am Einzug festzustellen. Zusätzlich veränderte sich das Messverhalten der Drucksensoren, wodurch ein Drift von 5 bar entstand. Störgrößenbedingt war eine Schwankung bei den Prozesstemperaturen um 1 °C erkennbar. Alle diese Variationen im Prozessgeschehen treten im realen Produktionsumfeld auf und müssen durch eine weiterführende Prozessführungsmethode ausgeregelt werden.

Die Prozessführungsmethode entscheidet darüber, wie die Maschinenkomponenten über den Zyklus beeinflusst werden, um das Verfahren durchzuführen. Hierzu teilt die Steuerung den Prozess in einzelne Phasen ein. In jeder dieser Phasen ist sowohl eine Prozessphasensteuerung als auch eine Prozessphasen-Regelung tätig. Im Zuge der Arbeit sind verschiedene Ansätze für andere Prozessführungsmethoden entwickelt und mit den bestehenden Varianten verglichen worden.

7.2 Bewertung der Qualitätsschwankungen bei den Umschaltverfahren

Im Fall schnelllaufender Prozesse mit kurzen Einfrierzeiten hat die Formgebungsphase entscheidenden Einfluss auf die Produktqualität. Das Herleiten des volumetrischen Füllpunkts ist die Aufgabe der Prozessphasen-Steuerung in der Einspritzphase. Hierzu wurden zu den bestehenden Systemen zwei weitere Verfahren entwickelt, die in Abhängigkeit der Kompression auf den volumetrischen Füllpunkt der Form schließen und die druckgeregelte Nachdruckphase einleiten. Bei einem Vergleich der Verfahren galt es, stochastische und determi-

nistische Störgrößen in Bezug auf das Einspritzvolumen und das Bauteilgewicht auszugleichen.

Es zeigte sich, dass verfahrensunabhängig bessere Ergebnisse erzielt wurden je näher die Sensoren am Fließwegende sitzen. Am empfindlichsten reagiert dabei der Druckparameter mit steigendem Abstand auf material- oder temperaturbedingte Viskositätsschwankungen. Die Ursache hierfür wird in Kapitel 7.3.2 behandelt. Bei der temperatur- und kompressionsabhängigen Umschaltung ist der Einfluss der Sensorposition minimal, sodass in der Einspritzphase fast vollständig das gleiche Volumen eingebracht wird. Für eine optimale Bauteilqualität unter minimalem Mitteleinsatz weist die vorkompressionsabhängige Umschaltung in der Spritzgießmaschine die besten Ergebnisse auf. Diese Methode kombiniert die Informationen aus dem Drucksensor und dem Wegmesssystem und kann somit Schwankungen besser ausgleichen.

Der volumengenaue Eintrag der Masse in die Kavität kann demzufolge durch die Wahl eines geeigneten Umschaltverfahrens (Abbildung 6-8: Vorkompression SGM, Druck-WZG AF, Temperatur oder Kompression) selbst bei maximalem Auftreten der deterministischen Störungen gewährleistet werden. Festzuhalten bleibt jedoch, dass selbst bei einer identischen Füllung das Bauteilgewicht entscheidend durch die Störgrößen, welche die Zylindertemperatur und die Werkstoff-Viskosität ändern, beeinflusst wird.

Dies liegt überwiegend am Anregelverhalten des Nachdrucks und an den aufgrund der Temperatur- und Viskositätsänderung bestehenden Dichteunterschieden über die Fließweglänge. In Abbildung 7-1 sind die Druckverläufe für den Drucksensor am Schneckenschaft und den angussnahen Werkzeuginnendrucksensor aufgetragen. Diese werden für den Normalzyklus und für die Störgröße der Viskositäts- und Zylinder-Temperaturerhöhung gezeigt. Die Daten stammen dabei aus der temperaturabhängigen Umschaltung mit dem angussfernen Sensor. Dieses Beispiel soll zeigen, warum trotz eines volumetrisch konstanten Umschaltens für die temperatur- und kompressionsabhängige Umschaltung ein solch hoher Qualitätsunterschied (wie in Kapitel 6.1.5 gezeigt) auftritt.

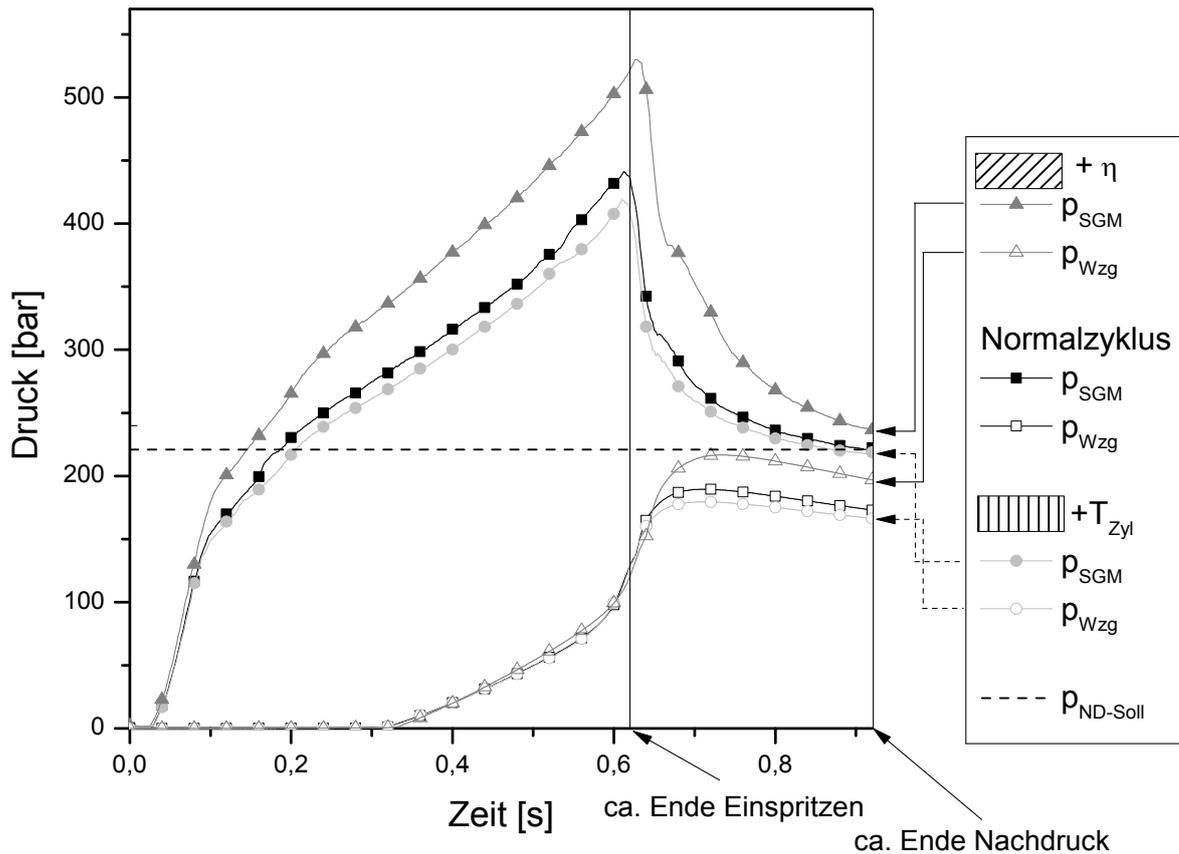


Abbildung 7-1: Druckverläufe für eine Viskositäts- und Schmelzetemperaturerhöhung für die Umschaltvariante Temperatur-AF

Zuerst soll auf die infolge einer Viskositätserhöhung eintretenden Effekte eingegangen werden. Mit einem schlechteren Fließverhalten steigt der Druckbedarf, der benötigt wird, um die Schneckenvorlaufgeschwindigkeit aufrechtzuerhalten. Dadurch erreicht der Druckwert am Schneckenschaft am volumetrischen Füllpunkt einen höheren Wert. Ausgehend von diesem Druckniveau beginnt die Nachdrucksteuerung zu Beginn der Einspritzphase den Sollwert von 220 bar anzufahren. In der kurzen Nachdruckphase von 0,3 s ist es dem PI-Regler jedoch nicht möglich, den geforderten Sollwert zu erreichen. Für die gesamte Nachdruckzeit erzeugt dies einen höheren Werkzeuginnendruck, womit sich auch die Zunahme im Bauteilgewicht erklären lässt.

Im Falle einer zunehmenden Zylinder-Temperatur steigt die Schmelze-Temperatur an und die Schmelze-Viskosität verringert sich, sodass der Druck in der Nachdruckphase schneller angeregelt wird. Mit Ablauf der Nachdruckzeit nimmt in der Kavität der Druck ab, während die Bauteil-Temperatur steigt. Beide Effekte führen zu einem niedrigeren Bauteilgewicht.

Diese Untersuchungen zeigen, dass erweiterte Umschaltverfahren den Zeitpunkt der volumetrischen Füllung gezielter herleiten können. Dadurch nimmt der Einfluss der Störgrößen

deutlich ab. Es bleibt jedoch ein signifikanter störgrößenbedingter Einfluss. Der Grund hierfür ist, dass die Störgrößen immer noch eine Veränderung in den Prozessparametern herbeiführen. Diese veränderten Prozesszustände sorgen für deutliche Variationen im thermodynamischen Prozess und führen somit zu Qualitätsschwankungen.

7.3 Bewertung der Qualitätsschwankungen bei alternativen Prozessregelmethoden

Die gezielte Führung der Prozessparameter ist die Aufgabe der Prozessphasen-Regelung. Durch die Einführung neuer Regelgrößen sind für die verschiedenen Phasen neue Prozessphasen-Regelungen entwickelt worden. Aus deren Kombination entstanden drei neuartige Prozessführungsmethoden mit der Besonderheit, dass sie ohne Kosten- und Zeitmehraufwand mit den vorhandenen Mitteln auszuführen sind. Sie regeln dabei neue Prozessparameter, die aus einem als gut bewerteten Zyklus stammen. Die Anfälligkeit für stochastische Störungen verglichen weisen alle Verfahren die gleichen Streuungen auf. Ein Einfluss der Sensorposition ließ sich nicht (wie bei den Umschaltverfahren) feststellen. Deshalb lässt sich schlussfolgern, dass auf die für den Prozess wichtigen Druck- und Temperaturverläufe keine stochastischen Störeffekte einwirken.

Bei der Aufgabe der deterministischen Störungen sind die Auswirkungen von Störgrößen aus den Kategorien Mitwelt und Material zu unterscheiden. Für die Mitwelt-Störgrößen zeigen die Verfahren, die nur einen Prozess-Parameter während des Zyklus regeln (SZR, p_{Wzq}), zwar bei einzelnen Störungen bessere Ergebnisse, in Summe verschlechtert sich aber das Verhalten gegenüber dem Standardspritzgießprozess. Im Fall der SZR können Veränderungen in der Zylinderwandtemperatur kompensiert werden. Aufgrund der Viskositätserkennung über den Drucksensor hat ein Sensordrift jedoch fatale Folgen. Ein ähnliches Bild zeigte sich bei der alleinigen Regelung des Werkzeuginnendruckes. Dort minderte sich die Störgröße des Druckdrifts, Störungen in der Temperaturführung wurden im Vergleich zum Standard-Spritzgießprozess jedoch verstärkt. Bei der Nachdruckregelung über die Kraft am Schneckenwerkzeug wirkt die Druckübertragung ins Werkzeug so lange, wie eine plastische Seele besteht. Kühlt das fließfähige Innenleben langsamer ab, weil sich die Schmelze- oder die Werkzeugtemperatur erhöhen, bleibt der Druck dennoch erhalten. Dies führt dazu, dass sich der Abfall des Werkzeuginnendruckes auf einen späteren Zeitpunkt verschiebt. Die Werkzeuginnendruckregelung hingegen führt den Druck ungeachtet der thermischen Verhältnisse in den drucklosen Zustand zurück. Bei einer langsameren Kühlung tritt somit der drucklose Zustand in der Kavität bei einer höheren Temperatur ein. Dadurch dämpfen sich Temperaturänderungen nicht selbstständig wie beim Standard-Spritzgießverfahren. Hier wirkt der

Nachdruck so lange, bis das Bauteil eingefroren ist, wodurch sich das System automatisch ausgleicht. Der dennoch entstehende temperaturbedingte Unterschied rührt beim Standard-Spritzgießverfahren aus der besseren Druckübertragung durch die geringere Viskosität im Zylinder. Ganzheitlich betrachtet können die Störungen aus der Mitwelt nur durch ein gleichzeitiges Betrachten von Druck und Temperatur kompensiert werden.

Die Veränderungen im Material lassen sich umso mehr eindämmen, je weiter die Prozessführungsmethode in Richtung der Prozesskette wirkt. Dennoch bleibt bei identischem Prozessablauf für den Druck und die Temperatur ein signifikanter Einfluss bei der Rekristallisationstemperatur und der Viskosität. Die folgenden Abschnitte erläutern für die Methode der Druck-Temperatur-Führung die Gründe für diese Abweichungen.

7.3.1 Rekristallisationstemperatur (T_{Rek})

Das Zudosieren eines Nukleierungsmittels führt zu einem verfrüht einsetzenden strukturellen Wechsel im Polymergefüge. Dies beeinflusst im starken Maße auch die für den Urformprozess wichtigen rheologischen und thermodynamischen Materialeigenschaften. Die Untersuchungsergebnisse in Kapitel 5.1.3.1.3 zeigen, dass sich mit der Übergangstemperatur auch der Feststoffbereich im pVT-Diagramm verschiebt. Die schematische Verschiebung der Isobaren ist in Abbildung 7-2 aufgetragen. Zusätzlich sind die Zustandsänderungen der zwei Materialien während der Formgebungs- und Abkühlphase eingezeichnet. Im Schmelzebereich kann das Verfahren für beide Materialien einen identischen Prozessablauf herbeiführen. Durch die verfrüht einsetzende Kristallisation erhöht sich die Viskosität der Schmelze schlagartig. Ein weiterer Masseeintrag in die Kavität ist folglich nicht mehr möglich, wodurch sich das resultierende Bauteilgewicht verringert. Eine Verschiebung der Übergangstemperatur führt demzufolge zu einer bedeutenden Veränderungen der Prozessabläufe und der Qualität. Dies ist selbst dann der Fall, wenn die Gefügestruktur unbeeinflusst bleibt.

Um dieser Zustandsänderung zu begegnen, müssten die wechselnden Umstände erkannt und ausgeregelt werden. Eine Veränderung in der Übergangstemperatur kann jedoch über die Prozesskennzahlen nicht zuverlässig erkannt werden. Außerdem ließe sich daraus, ohne genauere Kenntnis des Materialverhaltens, kein Kompensationsmaß ableiten. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass chargenbedingt eine Änderung im thermodynamischen Verhalten der Polymere auftreten kann, die aber nur prozesstechnisch mit dem Wissen des chargenspezifischen pVT-Verhaltens gezielt kompensiert werden kann.

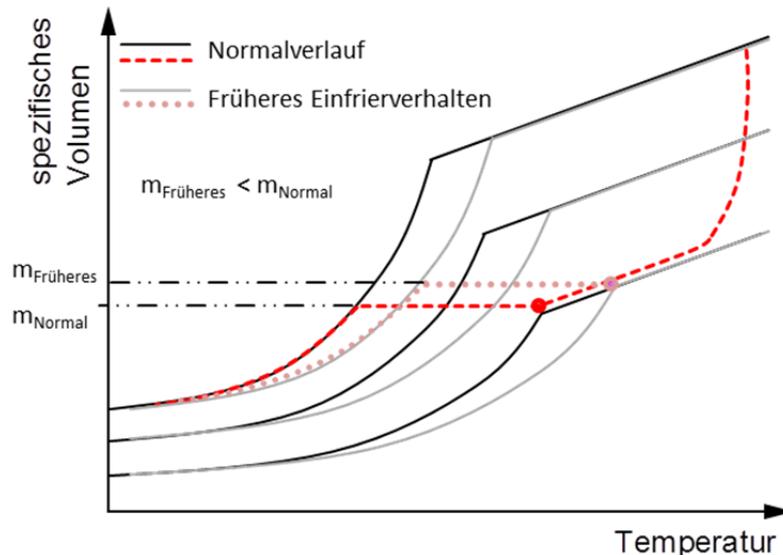


Abbildung 7-2: Thermodynamische Vorgänge beim Verarbeiten von Polymeren mit unterschiedlichem Übergangsverhalten

7.3.2 Viskosität (η)

In den Ergebnissen vorangegangener Kapitel zeigten Viskositätsänderungen einen deutlichen Einfluss auf die Bauteileigenschaften. Mittels Druckmessung konnte nachgewiesen werden, dass eine Erhöhung der Viskosität zu einem geringeren Werkzeuginnendruck führt. Dies resultiert in einem niedrigeren Bauteilgewicht und -abmaßen. Bei der Druck-Temperatur-Führung ergibt sich trotz identischen Verlaufs der partiell erfassten thermodynamischen Parameter (Werkzeuginnendruck und Bauteil-Temperatur) ein signifikanter Unterschied in der Bauteil-Qualität. Die Ursache hierfür liegt in der fortlaufenden Schmelzebewegung während des Formgebungs- und Abkühlvorgangs.

Abbildung 7-3 zeigt den sich im Prozess ergebenden Volumenstrom und die Druckverhältnisse für die verschiedenen Messstellen. Anhand dieser Grafik ist der Effekt der Viskosität auf die Druckübertragung während des Herstellungsprozesses ersichtlich. Während der Formgebungsphase sorgt eine gezielt geführte Schneckenanschub-Geschwindigkeit für die Aufrechterhaltung eines Schmelzestroms. Mit fortschreitendem Fließweg nimmt dabei auch die Kraft zu, die aufgebracht werden muss, um die Schmelze am Fließen zu halten, weil infolge des Fließwiderstands Energie in Form eines Druckgradienten verbraucht wird. Als Konsequenz daraus ergeben sich die Druckverläufe in Abbildung 7-3 bis zur Strichmarkierung. Je weiter dabei der Druckmesspunkt vom Strömungsende entfernt ist, umso höher gestaltet sich der Druck im Polymer. Die während des Einspritzens verdrängte Schmelze breitet sich im Quellfluss in der Kavität aus. Dadurch strömt die Masse vom Inneren des Querschnitts an das Fließwegende und transportiert fortlaufend Schmelze nach vorne. Aufgrund dieses

Quellflusscharakters ergibt sich am Ende des Formfüllprozesses das thermische Bild, dass die Randschicht bereits erstarrt, der Kern aber noch schmelzeflüssig ist. Die Kerntemperatur nimmt dabei zum Fließwegende hin ab, da dort das Material die längste Verweilzeit aufweist.²⁰ Infolgedessen friert das Bauteil – bei sonstigen homogenen Verhältnissen – vom Fließwegende zum Anguss hin ein.

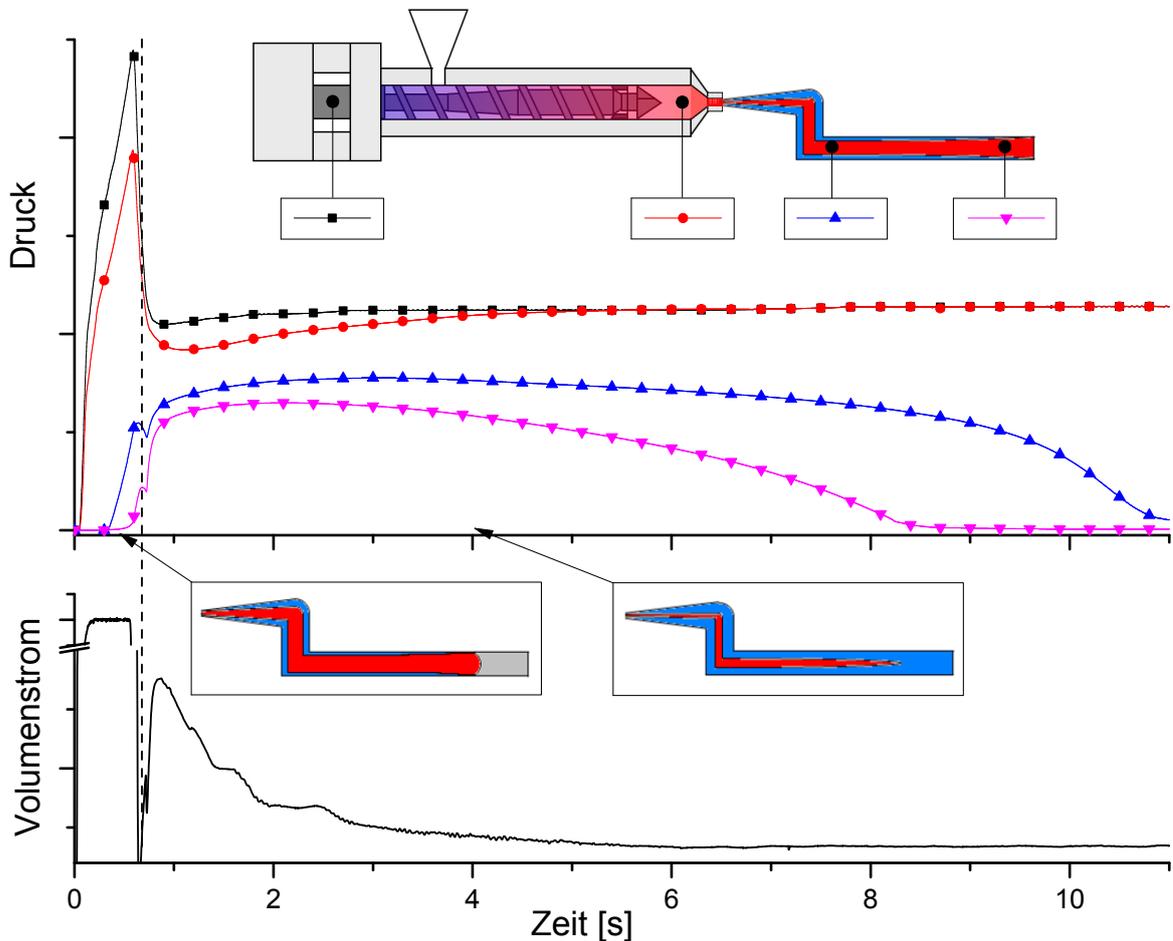


Abbildung 7-3: Druckverläufe an verschiedenen Positionen im Prozess während der Formgebungs- und Abkühlungsphase

Um den dabei auftretenden Volumenschwund auszugleichen, muss Masse in die Kavität nachtransportiert werden, wodurch sich der Druck im Material aufrechterhalten lässt. Zu diesem Zweck wird am volumetrischen Füllpunkt von der geschwindigkeitsgeregelten Einspritzphase auf die druckgeregelte Nachdruckphase umgeschaltet. In dieser Phase ist der Volumenstrom nicht mehr geregelt, sondern ergibt sich aus dem Druckverlust zur Massebewegung und dem Gegendruck. Bei einem vom Fließwegende einfrierenden Bauteil fördert der aufgebrachte Druck bis zum Versiegeln des Angusses Masse in die Kavität. Aufgrund des konstant anhaltenden Massestroms kann sich der Druck in der Kavität nicht gleichbleibend

²⁰ Bei einer normal auftretenden Schererwärmung.

verteilen und es bildet sich ein viskositätsabhängiger Druckgradient in Richtung des Fließwegs. In den Druckkurven während der Nachdruckphase (Abbildung 7-3 oben) äußert sich dies dadurch, dass der Druck vom Schneckenschaft in die Kavität deutlich abnimmt. Erst wenn der Schmelzestrom nachlässt (bei 5 s), nähert sich der Druck im Schneckenvorraum an den am Schneckenschaft an. Der Druck in der Kavität gleicht sich wegen der fortlaufenden Abkühlung und dem damit verbundenen Druckabbau niemals aus.

Abbildung 7-4 verdeutlicht, wie sich die prozesstechnischen Abläufe durch eine Viskositäts-erhöhung bei der Druck-Temperatur-Führung auswirken. Im Diagramm links oben zu sehen sind die Werkzeuginnendruck-Verläufe, wie sie sich bei Materialien mit verschiedener Visko-sität ausbilden. Durch die direkte Regelung des Druckverlaufs am angussnahen Sensor bleibt dieser vom Materialwechsel unberührt. Aufgrund des oben benannten Effekts wird die Druckübertragung im Werkzeug viskositätsbedingt erschwert. Der Druck am Fließwegende fällt dadurch mit steigender Viskosität geringer aus. Beim Wechsel des Polypropylens ergibt sich ein um 4,6 bar geringerer maximaler Werkzeuginnendruck am Fließwegende. Der Tem-peraturverlauf am IR-Thermometer verändert sich infolge des Materialwechsels nicht wes-sentlich, da Schmelze- und Werkzeugwandtemperatur unverändert sind. Aus diesen Rah-menbedingungen kann auf die Verläufe im pvT-Diagramm (Abbildung 7-4 links unten) ge-schlossen werden. Dort ist der Verlauf der Prozesskurve für einen Punkt am Anguss und einen weiteren am Fließwegende eingezeichnet. Am angussnahen Punkt ändert sich der thermodynamische Ablauf durch die Regelung von Druck und Temperatur nicht. Messtech-nisch äußert sich dies auch in einer unveränderten Bauteilbreite nach dem Materialwechsel. Mit steigender Fließweglänge nimmt der erreichte Druck durch die Viskositäts-erhöhung ab. Zwangsläufig kann der Volumenschwund dann nicht mehr so lange ausgeglichen werden. Die 0-bar-Linie im pvT-Diagramm wird mit höherer Viskosität am Fließwegende bei einer höheren Temperatur erreicht. Die Abnahme der mittleren Bauteilbreite spiegelt dies wider.

Folglich ist eine grundlegende Erkenntnis dieser Arbeit, dass verfahrensbedingt bei einem Viskositätswechsel bauteilübergreifend keine gleichbleibenden Prozessbedingungen herbei-geführt werden können. Alle viskositätsbedingten Prozesseinflüsse vor der Kavität lassen sich durch ein geeignetes Regelungskonzept kompensieren. Infolge des Massestroms und des Fließwiderstands entsteht zwangsläufig ein Druckgradient in der Kavität. Der Anstieg dieses Gradienten ist viskositätsabhängig. Demzufolge kann bei einer Viskositätsänderung die Bauteileigenschaft nur lokal durch die Druckführung stabilisiert werden. Global gleich-bleibende Bedingungen sind aufgrund des unterschiedlichen Systemverhaltens nicht mög-lich.

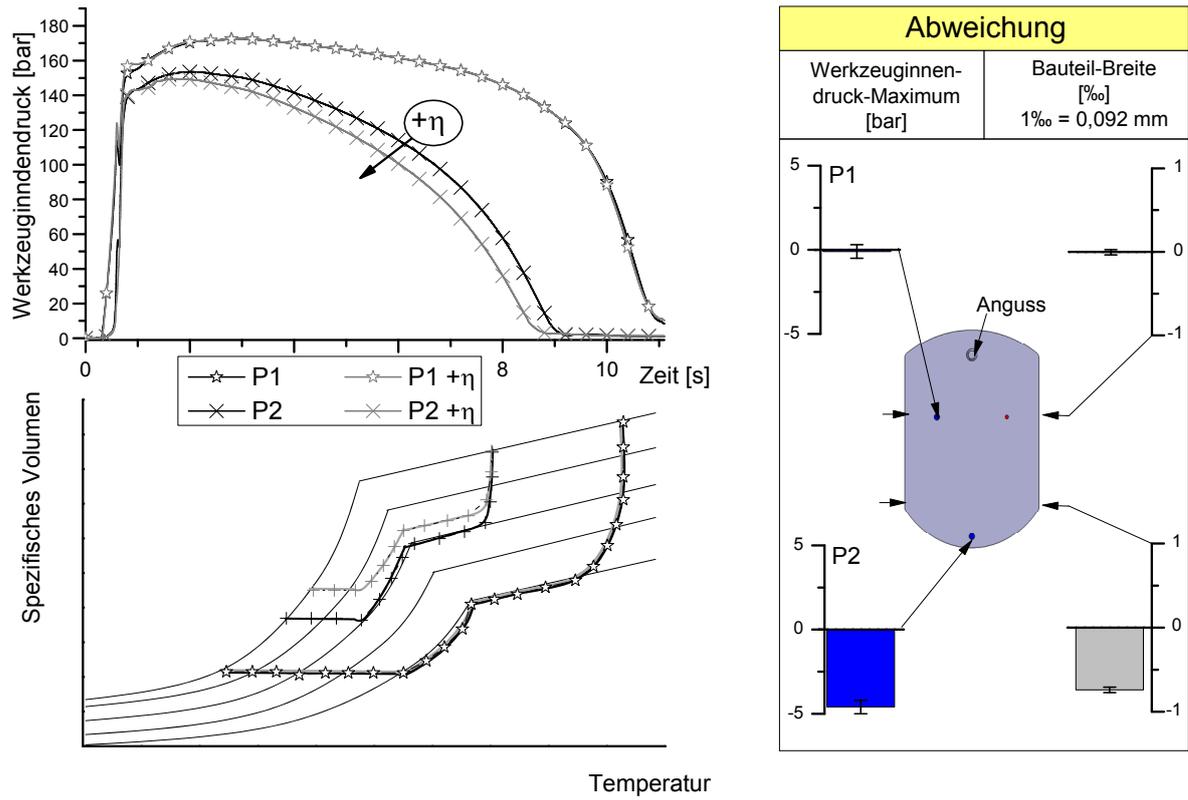


Abbildung 7-4: Prozess- und Bauteilverhalten bei einer Materialviskositätsänderung mit der pT-Methode

8 Zusammenfassung und Ausblick

Eine Möglichkeit, die Wettbewerbsfähigkeit von Produktionsprozessen zu steigern, ist die gesicherte Herstellung einer gleichbleibend hohen Qualität. Dadurch erschließen sich neue Märkte und die Herstellungskosten können über den Abbau nicht wertschöpfender Qualitätskosten gesenkt werden. Beeinflusst wird die Qualität auf produktionsnaher Seite durch die Prozesseinstellung, die Art der Prozessführungsmethode und die Durchführung von Qualitätskontrollmaßnahmen. Eine Analyse des Stands der Technik zeigte, dass sich die Einstellung des Prozesses durch den Fertigungsfachmann und die Qualitätskontrolle über die SPC-Methode bewährt haben. Lediglich der Einsteller ist imstande, die Bedingungen vor Ort über die individuellen und komplexen Zusammenhänge in das geforderte Qualitätsniveau zu überführen. Als Prüfmethode hat sich die statistische Kontrolle der Qualitätsdaten am Endprodukt durchgesetzt. Dies ist die einzige Methode, mit der zuverlässig der Qualitätsstand in zeitlichen Abschnitten kontrolliert werden kann. Aufgabe der Prozessführungsmethode ist es, die Gegebenheiten während der Produktion dahingehend zu leiten, dass zumindest zwischen den Stichproben der SPC-Kontrolle ein gleichbleibendes Qualitätsniveau sichergestellt werden kann. Wie eine Betrachtung der Marktdurchdringung bestehender Methoden verdeutlichte, ist es essenziell, weiterführende Prozessführungsmethoden mit minimalem Kosten- und Zeitaufwand unter Verwendung bestehender Mitteln auszuführen. Zudem ist es von Bedeutung, dass bei der Einführung einer neuen Prozessführungsmethode in Summe für alle prozessrelevanten Störungen ein besseres Ergebnis erzielt wird. Aus diesem Grund sind möglichst alle in der Produktion auftretenden Störgrößen zu betrachten, die für schwankende Produktionsergebnisse sorgen.

In dieser Arbeit wurden anhand einer ganzheitlichen Analyse des Spritzgießprozesses zunächst die Ursachen für ein schwankendes Qualitätsergebnis geklärt. Es stellte sich, trotz der hohen Regelgüte der heutigen Maschinenteknik, heraus, dass Schwankungen im Fertigungsumfeld nur teilweise bis zu einer gewissen Dynamik ausgeglichen werden können. Änderungen in Spannungshöhe, Kühlmittelvorlauftemperatur und -druck veränderten die Wirkungsweise des Stellwerts, wodurch es kurzfristig zu einem Regelfehler kam. Indem diese systembeeinflussenden Faktoren im Regelsystem beachtet werden, kann deren Einfluss in zukünftigen Temperierregelungen vollständig kompensiert werden.

Außerdem stellte sich heraus, dass aufgrund des Abstands zwischen dem Temperatursensor und der werkstoffberührenden Oberfläche eine Temperaturdifferenz entsteht, die sich z. B. abhängig vom Raumklima einstellt. Über eine weitere Integration der Sensoren in den

Prozess, den Abbau von Wärmeleitwiderständen und eine maximal mögliche Isolation der Temperaturregelzone lässt sich dieser Einfluss für die Temperaturregelzonen verhindern.

Aus den Untersuchungen in Kapitel A.2 ging hervor, dass bei hygroskopischen Polymeren durch einen unterschiedlichen Trocknungsgrad chemische und physikalische Veränderungen auftreten. In Anwesenheit von Wasser erfolgt eine Rückreaktion, wodurch sich die Makromoleküle verkürzen. Außerdem wirkt das niedermolekulare Wasser als Gleitmittel, das die intermolekulare Reibung herabsetzt. Beide Effekte führen zu einer drastischen Veränderung der Schmelze-Viskosität. An dieser Stelle kommt die Forderung nach einer Online-Feuchteerkennung auf, um im nächsten Schritt diese prozessrelevante Werkstoffgröße einregeln zu können.

Um den störgrößenbedingten Einfluss auf die Qualität zu mindern, sind in der Arbeit neue Prozessführungsmethoden entwickelt und mit bestehenden verglichen worden. Es galt, die in der Praxis herrschenden Einflüsse auszugleichen.

Für die Prozesssteuerung schnelllaufender Prozesse sind diverse Umschaltverfahren betrachtet worden. Dabei verringerten sich die stochastisch und deterministisch verursachten Qualitätsveränderungen mit sinkendem Abstand zwischen Fließwegende und Sensor. Ohne ein zusätzliches Angleichen der Prozessparameter für den Druck und die Temperatur bleibt trotz eines exakten Umschaltens eine Differenz im Qualitätsergebnis.

Für die genauere Betrachtung der Prozessparameter sind drei weitere Prozessführungsmethoden entwickelt worden. Es zeigte sich, dass nur durch eine gleichzeitige Betrachtung von Druck und Temperatur die Störungen aus der Mitwelt kompensiert werden können. Bei der Betrachtung nur eines Parameters verschlechterte sich ganzheitlich betrachtet das Produktionsergebnis.

Als wesentliche Erkenntnis zeigte sich in vorliegender Arbeit, dass sich Änderungen in den Materialeigenschaften selbst bei identischen Prozessparametern verfahrensbedingt nur eindämmen, jedoch nicht verhindern lassen. Im Fall einer Viskositätsveränderung verhindert der anhaltende Massestrom während der Nachdruckphase die Ausbildung eines homogenen Drucks im Werkzeug. Der resultierende Druckabfall in der Kavität ist auch immer von der Viskosität abhängig, wodurch sich maximal für eine Fließweglänge ein identischer Prozessverlauf herbeiführen lässt. Es gilt zu prüfen, ob über eine alternative Art der Druckerzeugung, wie es z. B. beim Spritzprägeprozess möglich ist, den Viskositätseffekt auszugleichen.

Quellenverzeichnis

- [Ama93] AMANN, A.-N.: In-Line Rheometrie beim Spritzgießen. Universität Stuttgart, Diplomarbeit – Betreuer: Beiermeister, 1993
- [Arb11] N. N.: Arburg Spritzgießmaschinen, Firmenschrift: Arburg GmbH + Co KG, 2011
- [Arb12] N. N.: Spritzgießmaschinen für vielfältige Anwendungen. Firmenschrift: Arburg GmbH + Co KG, 2012
- [ArbXX] N. N.: Bedienungsanleitung ALLROUNDER 200/270/320 S. Firmenschrift: Arburg GmbH + Co KG
- [Bad08] BADER, C.: Und sie bewegt sich doch. Kunststoffe, 6/2008
- [Bad89] BADER, C.: Automatische Optimierung, Kunststoffe 88, 9/1998
- [Bal11] N. N.: Induktive Abstandssensoren BAW M08EI-UAD15B-BP00,2-GS04: Datenblatt: Balluff GmbH, 2011
- [Bas99] N. N.: Spritzgießfehler bei Styrolcopolymeren und ihre Vermeidung. Firmenschrift: BASF AG, 1999
- [Bat07] N. N.: Bedienungsanleitung Spritzgießmaschine HM. Firmenschrift: Battenfeld GmbH, 2007
- [Bay04] N. N.: Makrolon® Chemische Beständigkeit. Firmenschrift: Bayer MaterialScience AG, 2004
- [Bay08] N. N.: Design + Processing Properties. Firmenschrift: Bayer MaterialScience AG, 2008
- [BDK01] BADER, C.; DIEZ, M.; KAISER, W.: Rheologische Messungen auf der Spritzgießmaschine. Kunststoffe 81, 3/1991
- [Bei93] BEIERMEISTER, B.: In-line Rheometrie beim Spritzgießen – Ein Beitrag zur kontinuierlichen Qualitätserfassung. Beitrag zum 13. Stuttgarter Kunststoff-Kolloquium, 1993
- [BG12] BRETTNICH, T.; GELTINGER, S.: Präzision auf die Spitze getrieben. Kunststoffe, 3/2012
- [BHS+12] BOURDON, R.; HELLMANN, A.; SCHRECKENBERG, J.-B.; SCHWEGMANN, R.: Standardisierte Prozess- und Qualitätsoptimierung mit DOE-Methoden – eine Kurzanleitung für die Praxis beim Spritzgießen. Zeitschrift Kunststofftechnik WAK, 06/2012
- [Bic08] BICHLER, M.: Qualitätssicherung beim Spritzgießen. Mannheim: Hüttig, 2008
- [BK11] BADER, C.; KRISTIANSEN, P.-M.: Auf den Punkt gebracht. Kunststoffe, 6/2011

- [BK12] BADER, C.; KÖNIG, E.: Wir regeln das schon. Kunststoffe, 6/2012
- [Blu96] BLUHM, R.: Verbesserte Temperaturkontrolle beim Kunststoffspritzgießen. RWTH Aachen, Dissertation, 1996
- [Bon82] BONGARDT, W.: Verbesserte Prozessführung durch selbsteinstellende Regler. RWTH Aachen, Dissertation, 1982
- [Bou94] BOURDON, R.: Zur Optimierung der Prozeßrobustheit beim Spritzgießen. Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 1994
- [Bre11] BRECHER, C.: Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. Springer, 2011
- [BSS+09] BASTIAN, M.; STITZ, S.; SCHINK, K.; DEUBEL, C.: Qualitätsprobleme beim Anfahren von Werkzeugen. Kunststoffe, 6/2009
- [CAD12] N. N.: CADMOULD@3D-F FILL Version 6.0 Bedienungshandbuch. Firmenschrift: simcon kunststofftechnische Software GmbH, 2012
- [Cav05] CAVIC, M.: Kontinuierliche Prozeßüberwachung beim Spritzgießen unter Einbeziehung von Konzepten zur Verbesserung der Schmelzequalität. Universität Stuttgart, Dissertation, 2005
- [CG06] CHEN, X.; GAO, F.: Profiling of Injection Velocity for Uniform Mold Filling. Advances in Polymer Technology 25, 2006
- [Dem96] N. N.: Spritzgießen – kurz und bündig. Firmenschrift: Demag Plastics Group, 1996
- [Dub96] DUBAY, R.: The Utilization of Model Predictive Control for a plastic injection molding machine, Technical University of Nova Scotia, Dissertation, 1996
- [DuPXX] POPPE, A. E.; LEIDIG, K.; SCHIRMER, K.: Technische Kunststoffe: Die Top Ten der Spritzgießprobleme. Firmenschrift – DuPont
- [EKG11] EBEN, J.; KARLINGER, P.; GEHDE, M.: Der Schlüssel zum geringeren Verbrauch. Kunststoffe, 6/2011
- [Elb73] ELBE, W.: Untersuchungen zum Plastifizierverhalten von Schneckenspritzgießmaschinen. TH Aachen, Dissertation, 1973
- [Eng02] SEITELBERGER, C.: Quality Assurance Programmes for EC 100/CC 100. Technische Information: Engel Austria GmbH, 2002
- [Eng03] N. N.: Engel Microcomputer EC100/CC100 Bedienerhandbuch. Firmenschrift: Engel Austria GmbH, 2002
- [ER07] EHRIG, F.; RUHSTALLER, B.: Schnelle Reaktion gefragt. Plastverarbeiter, 04/2007
- [ERT03] EHRENSTEIN, G. W.; RIEDEL, G.; TRAWIEL, P.: Praxis der Thermischen Analyse von Kunststoffen. München: Hanser, 2003

- [Fae09] FAES, G.– SPC – Statistische Prozesskontrolle. Books on Demand, 2009
- [Fan05] N. N.: FANUC ROBOSHOT S-2000i. Firmenschrift: Fanuc Ltd., 2005
- [Fei13] FEIN, B.: Optimierung von Kunststoff-Spritzgießprozessen. Beuth Verlag GmbH, 2013
- [Fli09] N. N.: Technische Spezifikation A320. Firmenschrift: FLIR Systems, 2009
- [FOS08m] N. N.: Infrarot-Werkzeuginnenthermometer MTS 408-IR-STS. Datenblatt: FOS Messtechnik GmbH, 2008
- [FOS08p] N. N.: Düsendrucksensor DDS 2F. Datenblatt: FOS Messtechnik GmbH, 2008
- [FOS08T] N. N.: Düsenthermometer NTS 2. Datenblatt: FOS Messtechnik GmbH, 2008
- [FOSXX] N. N.: Online Rheometer. Produktinformation: FOS Messtechnik GmbH
- [Gän86] GÄNG, L.-A.: Präzisionsspritzgussteile durch rechnerunterstütztes Optimieren von Prozessparametern. Universität Stuttgart, Dissertation, 1986
- [GBR01] GORNIK, C.; BLEIER, H.; ROTH, W.: Arbeiten an der Spitze. Kunststoffe 91, 6/2001
- [Gie92] GIERTH, M.: Methoden und Hilfsmittel zur prozeßnahen Qualitätssicherung beim Spritzgießen von Thermoplasten. RWTH Aachen, Dissertation, 1992
- [Gis80] GISSING, K.: Prozessmodell für das Spritzgießen von Thermoplasten im Hinblick auf den Einsatz eines Prozessrechners. Montanuniversität Leoben, Dissertation, 1980
- [GK83] GISSING, K.; KNAPPE, W.: Zum optimalen Nachdruckverlauf beim Spritzgießen. Kunststoffe 73, 1983
- [Goe11] N. N.: Erhöhung der Genauigkeit und Erweiterung der Option „pVT“ auf isobare Messung gemäß ISO 17744. Firmenschrift: Göttfert Werkstoff-Prüfmaschinen GmbH, 2011
- [Goe12] N. N.: HOCHDRUCK-KAPILLARRHEOMETER RHEOGRAPH 25. Firmenschrift: Göttfert Werkstoff-Prüfmaschinen GmbH, 2012
- [Gor05] GORNIK, C.: Rheologische Daten direkt an der Maschine bestimmen. Kunststoffe, 4/2005
- [Gor09] GORNIK, C.: Abgeleitete Kenngrößen zur Optimierung nutzen. Kunststoffe, 9/2009
- [Gru05] GRUBER, J.-M.: Prozessführung beim Thermoplastspritzgießen auf Basis des Werkzeuginnendruckes. RWTH Aachen, Dissertation, 2005
- [Ham04] HAMAN, S.: Prozessnahes Qualitätsmanagement beim Spritzgießen. Technische Universität Chemnitz, Dissertation, 2004

- [Han94] HANNIG, D.: Continuous Process Control – Qualitätssicherung im Kunststoffverarbeitungsprozeß auf der Basis statistischer Prozeßmodelle. Universität Paderborn, Dissertation, 1994
- [Hau89] HAUPT, M.: Betriebspunktoptimierung kunststoffverarbeitender Prozesse. RWTH Aachen, Dissertation, 1989
- [Häu95] HÄUßLER, J.: Eine Qualitätssicherungsstrategie für die Kunststoffverarbeitung auf der Basis künstlicher Neuronaler Netze. Universität GH-Essen, 1994
- [Hel77] HELLMAYER, H.-O.: Ein Beitrag zur Automatisierung des Spritzgießprozesses. RWTH Aachen, Dissertation, 1977
- [Hub09] HUBER, R.: Temperaturführung optimieren. Plastverarbeiter, 1/2009
- [Hun75] HUNKAR, D.-B.: The independence of part parameters of process control and justable function in injection molding of thermoplastics. Society of Plastics Engineers, Antec-Proceedings, 1975
- [Hüp85] HÜPPE, R.: Sensoreinsatz zur direkten, kontinuierlichen Erfassung und Regelung von Produkteigenschaften beim Spritzgießen, TU Berlin, Dissertation, 1985
- [Isi86] ISHIKAWA K.: Guide to Quality Control, Asian Productivity Organization, 1986.
- [Jae12] JAEGER, A.: Nur noch volle Teile. Kunststoffe, 4/2012
- [Jar08] JAROSCHEK, C.: Spritzgießen für Praktiker. München: Hanser, 2008
- [JM04] JOHANNABER, F.; MICHAELI, W.: Handbuch Spritzgießen. München: Hanser, 2004
- [Joh04] JOHANNABER, F.: Kunststoff Maschinen Führer. München: Hanser, 2004
- [Kar07a] KARLINGER, P.: Vorlesungsunterlagen: Rheologie. Hochschule Rosenheim, 2007
- [Kar07b] KARLINGER, P.: Vorlesungsunterlagen: Kunststoffverarbeitung 1. Hochschule Rosenheim, 2007
- [Kar07c] KARLINGER, P.: Vorlesungsunterlagen: Projektieren beim Spritzgießen. Hochschule Rosenheim, 2007
- [KEG+11] KARLINGER, P.; EBEN, J.; GEHDE, M.; GRIMM, G.: Maximale Prozesstransparenz in der Kunststoffverarbeitung. Plastverarbeiter, 10/2011
- [Ker02] KERBER, M.: Regelfunktionen mit künstlicher Intelligenz. Kunststoffe 91, 12/1002
- [KF88] KOPPELMANN, J.; FLEISCHMANN, E.: Nachdruckfreies Spritzgießen von Polypropylen. Kunststoffe 78, 1988
- [Kis08pT] N. N.: p-T-Sensor Typ 6190CA. Datenblatt: Kistler Gruppe, 2008

- [Kis09p] N. N.: Schmelzedruck-Messkette Typ 4021A. Datenblatt: Kistler Gruppe, 2009
- [Kis11] N. N.: STASA QC Operating Point Navigator. Firmenschrift: Kistler Group, 2011
- [KisXXa] N. N.: Thermoplast Innendruckmessung, Verfahrensoptimierung und Formteilfehlerkatalog. Firmenschrift: Kistler
- [KisXXb] N. N.: SmartAmp Ladungsverstärker mit Umschaltpunktoptimierung beim Spritzgießen. Datenblatt: Kistler
- [Koh73] KOHLER, R.: Untersuchung zur Verbesserung der thermischen Homogenität der Massevorlage beim Spritzgießen. *Plastverarbeiter* 27, 4/1976
- [Kön07] KÖNIG, E.: Dynamische Temperaturmessung als Ausschussprophylaxe. *Kunststoffe*, 6/2007
- [Kra10] N. N.: ColorForm Lackieren im geschlossenen Werkzeug. Firmenschrift: KraussMaffei Technologies GmbH, 2010
- [KSB10] KLAUS, W.; SCHWALME, G.; BASTIAN, M.: Formteile mit thermischem Fingerabdruck. *Kunststoffe*, 12/2010
- [Kud97] KUDLIK, N.: Reproduzierbarkeit des Kunststoff-Spritzgießprozesses. RWTH Aachen, Dissertation, 1997
- [KWN01] KAMPS, T.; WORTBERG, J.; NEUMANN, M.: Spritzgießen für Schnellläufer. *Kunststoffe*, 7/2001
- [Lan04] N. N.: Verarbeitungsdaten für den Spritzgießer. Firmenschrift: LANXESS AG, 2004
- [Lau89] LAUTERBACH, M.: Ein Steuerungskonzept zur Flexibilisierung des Thermoplast-Spritzgießprozesses, RWTH Aachen, Dissertation, 1989
- [Lem85] LEMKE, H.-J.: Qualitätsabhängige Regelung und Überwachung des Spritzgießprozesses mittels Rechneinsatz. Technische Universität Berlin, Dissertation, 1985
- [Liu10] LIU, J.: Erhöhung der Reproduzierbarkeit des Spritzgießprozesses durch verbesserte Plastifizierkonzepte. Technische Universität München, Dissertation, 2010
- [Lüd01] N. N.: Expertenwissen für Spritzgießer. Ratgeber, K.I.M.W. NRW GmbH, Lüdenscheid, 2001
- [Mat85] MATZKE, A.: Prozeßrechneinsatz beim Spritzgießen – Ein Beitrag zur Erhöhung der Flexibilität der Fertigung. RWTH Aachen, Dissertation, 1985
- [MG05] MICHAELI, W.; GRUBER, J.: Prozessführung beim Spritzgießen – direkte Regelung des Werkzeuginnendruckes steigert die Reproduzierbarkeit. *Zeitschrift Kunststofftechnik WAK*, 09/2005
- [MK+13] MÜLLER, F.; KUKLA, C.: Hör auf dein Werkzeug. *Kunststoffe*, 3/2013

- [MKS07] N. N: SenseLink™ QM. Datenblatt, MKS Instruments, Inc., 2007
- [ML89] MICHAELI, W.; LAUTERBACH, M.: Die pmT-Optimierung – Konsequenz aus dem pvT-Konzept zur Nachdruckführung. Kunststoffe 79, 9/1989
- [MM09] MOSER, S., MADL, D.: Effektives Einfahren eines Spritzgießprozesses. Kunststoffe, 8/2009
- [MS08a] MICHAELI, W.; SCHREIBER, A.: Aller guten Dinge sind drei. Kunststoffe, 12/2008
- [MS08b] MICHAELI, W.; SCHREIBER, A.: Der Innendruck im Fokus der Regelung. Plastverarbeiter, 11/2008
- [MS10] MICHAELI, W.; SCHREIBER, A.: Werkzeug statt Laborgerät. Plastverarbeiter, 03/2010
- [MSL07] MICHAELI, W.; SCHREIBER, A.; LETTOWSKY, C.: Optimierte Prozessführung beim Spritzgießen von Thermoplasten auf der Basis von Prozessgrößen. Zeitschrift Kunststofftechnik WAK, 11/2007
- [Mus00] AL-HAJ MUSTAFA, M.: Modellbasierte Ansätze zur Qualitätsregelung beim Kunststoffspritzgießen. Universität-Gesamthochschule Essen. Dissertation, 2000
- [Müt11] MÜTZEL, M.: Untersuchung der Einflussfaktoren auf die volumetrische Füllung der Kavität und deren Auswirkungen auf die Bauteilqualität. FH-Rosenheim, Diplomarbeit – Betreuer: Eben, 2011
- [No04] N. N.: ISO17744:2004: Plastics – Determination of specific volume as a function of temperature and pressure (pvT diagram) – Piston apparatus method. Genf: ISO, 2004
- [No10] N. N: DIN EN ISO 11357-1: Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC). 2009
- [Obe96] OBENDRAUF, W.: Neue Methoden zur Temperatur- und Dehnviskositätsmessung für die Simulation von Kunststoffverarbeitungsprozessen. Montanuniversität Leoben, Dissertation, 1996
- [OL95] OFFERGELD, H.; LOCHER, J.: Darwinistische Betriebspunktoptimierung. Kunststoffe 85, 1/1995
- [OFM11] FUNK, M.; KLINGHUBER, M.; STROBL, S.; SZASZ, A.: Auswirkungen des Feuchtegehalts im Granulat auf die Formteil-Eigenschaften. FH-Rosenheim, Studienarbeit – Betreuer: Eben, 2011
- [PGS12] PILLWEIN, G.; GIESSAUF, J.; STEINBICHLER, G.: Einfaches Umschalten auf konstante Qualität. Kunststoffe, 9/2012
- [Por99] PORTER, M. E.: Wettbewerbsstrategie. Frankfurt/Main u. a.: Campus-Verl., 1999
- [PWH+93a] POTENTE, H.; WORTBERG, J.; HANNING, D.; HÄUßLER, J.: Kritische Be-

- trachtung zur Prozessüberwachung in der Kunststoffverarbeitung, Teil 1, Plastverarbeiter 44, 8/1993
- [PWH+93b] POTENTE, H.; WORTBERG, J.; HANNING, D.; HÄUßLER, J.: Kritische Betrachtung zur Prozessüberwachung in der Kunststoffverarbeitung, Teil 2, Plastverarbeiter 44, 9/1993
- [Pot98] POTENTE, H. et al.: Optimierung mit Hilfe statistischer Modelle, Kunststoffberater, 3/1998
- [Pri12] N. N.: PRIAMUS FILLCONTROL TYP 7080a. Datenblatt: Priamus System Technologies AG, Schaffhausen, CH, 2012
- [PSS13] PRAHER, B.; STRAKA, K.; STEINBICHLER, G.: Schmelzetemperatur mit Ultraschall messen. Kunststoffe, 7/2013
- [Rau08] RAUWENDAAL, C.: Statistical Process Control in Injection Molding and Extrusion. München: Hanser, 2008
- [Sar80] SARHOLZ, R.: Rechnerische Abschätzung des Spritzgießprozesses als Hilfsmittel zur Maschineneinstellung. RWTH Aachen, Dissertation, 1980
- [Sch00] SCHNERR-HÄSELBARTH, O.: Automatisierung der Online-Qualitätsüberwachung beim Kunststoffspritzgießen. RWTH Aachen, Dissertation, 2000
- [Sch09] SCHIFFERS, R.: Verbesserung der Prozessfähigkeit beim Spritzgießen durch Nutzung von Prozessdaten und eine neuartige Schneckenhubführung. Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2009
- [Sch11] SCHREIBER, A.: Regelung des Spritzgießprozesses auf Basis von Prozessgrößen und im Werkzeug ermittelter Materialdaten. RWTH Aachen, Dissertation, 2011
- [Sch86] SCHMIDT, T.-W.: Zur Abschätzung der Schwindung. RWTH Aachen, Dissertation, 1986
- [Sch98] SCHRAMM, G.: Einführung in Rheologie und Rheometrie. Firmenschrift: Gebrüder HAAKE GmbH, 1998
- [SK04] STITZ, S.; KELLER, W.: Spritzgießtechnik. München: Hanser, 2004
- [SKZ11] N. N.: Weiterbildungsseminar für Bund Industriemeister Kunststoffe – Inline-Thermografie. SKZ, 2011
- [SR02a] Schutzrecht US6,365,075-B1, (2002-04-02), Fanuc Ltd.
- [SR02b] Schutzrecht WO0246624-A2, (2002-06-13), Robert Bosch GmbH
- [SR02c] Schutzrecht EP1381502-B1, (2002-10-17), Priamus System Technologies AG
- [SR04] Schutzrecht JP2004216808, (2004-08-05), Fanuc Ltd.
- [SR05] Schutzrecht AT007473-U1, (2005-04-25), Engel Austria GmbH

- [SR06a] Schutzrecht DE2636554-A1, (1978-02-16), Demag AG.
- [SR06b] Schutzrecht DE102005016618-B3, (2006-09-28), Battenfeld GmbH
- [SR06c] Schutzrecht DE60109673-T2, (2006-03-09), Sumitomo Heavy Industries, Ltd.
- [SR06d] Schutzrecht DE102005016617-B3, (2006-12-14), Battenfeld GmbH
- [SR06e] Schutzrecht WO2006007749-A1, (2006-01-26), Kistler Holding AG
- [SR06f] Schutzrecht DE102005029705-A1, (2006-12-14), Priamus System Technologies AG
- [SR07] Schutzrecht DE102005032367-A1 (2007-01-11), Priamus System Technologies AG
- [SR08] Schutzrecht US2008/0197521-A1, (2008-08-21), Fanuc Ltd.
- [SR09a] Schutzrecht WO2009/026673-A1, (2009-03-05), Husky injection molding systems Ltd.
- [SR09b] Schutzrecht WO20090164150-A1, (2009-02-05), Siemens AG
- [SR10] Schutzrecht EP2017061-B1, (2010-04-28), Fanuc Ltd.
- [SR11a] Schutzrecht DE102010024267-A1, (2011-12-22), KraussMaffei Technologies GmbH
- [SR11b] Schutzrecht CH702013-A2, (2011-04-15), Kistler Holding AG
- [SR13] Schutzrecht EP2583811-A1, (2013-04-24), ENGEL AUSTRIA GmbH
- [SR91] Schutzrecht DE3927995-C2, (1991-10-31), RWTH Aachen
- [SR93a] Schutzrecht DE4210259-A1, (1993-09-30), CKT Kunststoffverarbeitungstechnik GmbH
- [SR93b] Schutzrecht DE4140392, (1993-06-09), Robert Bosch GmbH
- [SR97] Schutzrecht EP0854778-B1, (1997-04-10), Arburg GmbH & Co.
- [SR99a] Schutzrecht DE19755500-A1, (1999.06.17), Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
- [SR99b] Schutzrecht DE19755501-A1, (1999-06-17), Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
- [SR99c] Schutzrecht DE19619730-C2, (1999-01-28), Engel Maschinenbau GmbH
- [SR99d] Schutzrecht US005993704-A, (1999-11-30), K. K. Holding AG
- [Ste07] STEINKO, W.: Optimieren von Spritzgussprozessen. München: Hanser, 2008

- [Ste12] STEINBICHLER, G.: Wissen gibt Impulse. Handout, Engel Symposium, 2012
- [Sti73] STITZ, S.: Analyse der Formteilbildung beim Spritzgießen von Plastomeren als Grundlage für die Prozeßsteuerung. RWTH Aachen, Dissertation, 1973
- [SW06] STEINBICHLER, G.; WOBBE, H.: Ein Schuss wie jeder andere. Kunststoffe, 9/2012
- [Tab01] TABATABAI, S.: Entwicklung und Analyse von Strategien zur prozeßzeitkonformen Qualitätssicherung beim Thermoplast-Spritzgießen. Universität Stuttgart, Dissertation, 2001
- [Tai88] TAIT, P.-G.: One some of the physical properties of fresh water and of sea water. Report on the scientific results of the voyage of H.M.S. Challenger during the year 1873–1876: Physics and Chemistry, Vol. 2, 1889
- [TAI98] N. N.: DSC 2920 Operator's Manual, Firmenschrift: TA Instruments, 1998
- [Thü09] THÜMEN, T.: Analyse der Rückstromsperre für den Spritzgießprozess. Universität Paderborn, Dissertation, 2009
- [TSS04] THIENEL, P., SCHUMACHER, B., SCHNERR, O.: Die Kühlzeit als Variable. Kunststoffe, 9/2004
- [Ujm99] UJMA, A.: Auswirkungen von Rohstoffchargenschwankungen auf den Spritzgießprozeß und regelungstechnische Kompensationsstrategien. Universität-Gesamthochschule Paderborn, Dissertation 1999
- [URL13a] N. N.: activeLock. <http://www.sumitomo-shi-demag.eu/de/produkte/produktionseffizienz/activelock/>, 03.03.2013
- [URL13b] N. N.: CQC-System. http://www.dr-gierth.de/cqc_inkuerze/index.html, 09.03.2013
- [URL13c] N. N.: DiagBes. http://www.kuz-leipzig.de/dienstleistungen_software_diagbes_v_5.html, 09.03.2013
- [URL13d] N. N.: In fünf Schritten zum kompletten Spritzgießprozess. <http://kunststoffreport.de/arburg-einricht-assistent-in-nur-funf-schritten-zum-kompletten-spritzgiesprozess/>, 10.03.2013
- [URL13e] N. N.: Was ist NI CompactRIO. <http://www.ni.com/compactrio/whatis/d/>, 25.03.2013
- [URL13f] N. N.: Viskosimetrie. <http://www.chemgapedia.de>, 23.05.2013
- [Vac96] VACULIC, R.: Regelung der Formteilqualität beim Spritzgießen auf der Basis statistischer Prozessmodelle. RWTH Aachen, Dissertation, 1996

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Vereinfachter thermodynamischer Ablauf beim Spritzgießen über die Temperatur (links) und über die Zeit (rechts).....	17
Abbildung 2-2:	Verfahrenstechnische und maschinelle Unterteilung des Spritzgießzyklus	18
Abbildung 2-3:	Wirkungsplan für den Spritzgießprozess	21
Abbildung 2-4:	Verschiedene Maßnahmen zur prozessnahen Qualitätskontrolle.....	35
Abbildung 2-5:	Einteilung der verschiedenen Prozessführungsmethoden und deren Bewertung	38
Abbildung 3-1:	Schematischer Bilanzraum für die Untersuchungen mit ausgewählten Messinstrumenten aus Tabelle 3-2	41
Abbildung 3-2:	Messaufnahme zum Vermessen der Versuchsteile	47
Abbildung 3-3:	Schematischer Ablauf für die Messwerterfassung und Auswertung	48
Abbildung 3-4:	Aufbau des Regelungssystems zur externen Steuerung des Spritzgießprozesses.....	49
Abbildung 4-1:	Systematischer Weg zum Erlangen einer Kennzahl am Beispiel des Fließwiderstands	53
Abbildung 4-2:	Verschiedene Signalbereiche zum Berechnen einer Kennzahl am Beispiel des Drehmoments am Schneckenschaft während des Plastifizierens	55
Abbildung 4-3:	Verhalten einer Kennzahl vor, während und nach einer Zustandsänderung	56
Abbildung 4-4:	Berechnungsanweisung für den Korrelationskoeffizient zum Bewerten von Kennzahlen	57
Abbildung 4-5:	Temperaturanstieg für wandbündige Sensoren	61
Abbildung 4-6:	Thermodynamische Abläufe in der Kavität mit den Kennzahlen zu deren Bewertung.....	64
Abbildung 4-7:	Diagramm: Verlauf der Werkzeugwand-Temperatur und des Bauteilgewichts im Langzeitversuch – Tabelle: Signifikanzwerte/p-Wert für die Kennzahlen	65
Abbildung 5-1:	Links: Anregelverhalten 50 aufeinanderfolgender Einspritzzyklen; rechts: mittlere Abweichung von Einspritz-Ist-Kurve im Vergleich zum Referenzkurvenverlauf	69
Abbildung 5-2:	Änderung im thermischen Haushalt der Spritzgießmaschine	71
Abbildung 5-3:	Einfluss der Umgebungstemperatur auf den Messfehler für verschiedene Sensoren	72
Abbildung 5-4:	Einfluss des Raumklimas auf Parameter des Aufschmelzens	74
Abbildung 5-5:	Zylinderwand-Temperaturen in Abhängigkeit der Leistungsaufnahme der Temperierzone – links: über den Weg, rechts: über die Leistungsaufnahme.....	75

Abbildung 5-6:	Schematische Darstellung der Zylinderheizung mit den Energieströmen (links), Wärmewiderstandsmodell der Zylinderheizung mit mehreren qualitativen Temperaturverteilungen (rechts)	77
Abbildung 5-7:	Einfluss des Raumklimas auf Parameter des Abkühlens I	78
Abbildung 5-8:	Einfluss des Raumklimas auf Parameter des Abkühlens II	78
Abbildung 5-9:	Auswirkungen eines Spannungsabfalls auf den Spritzgießprozess	80
Abbildung 5-10:	Blockschaltbild für die Zylindertemperaturregelung	81
Abbildung 5-11:	Auswirkungen eines Spannungsabfalls auf Parameter der Zylinderheizung und der Regelung	82
Abbildung 5-12:	Einfluss der Kühlmittelqualität auf das Abkühlverhalten	83
Abbildung 5-13:	Weg der Einflussgröße Material von der Anlieferung bis zum Maschinentrichter.....	84
Abbildung 5-14:	Ergebnisse aus den thermischen Untersuchungen im DSC-Gerät.....	88
Abbildung 5-15:	Temperatur und Druckverlauf nach dem Versiegeln der Form über die Nadelverschlussdüse.....	90
Abbildung 5-16:	Konfidenzbänder für die Chargen des PP bei einer Isobaren – links: Messung im Laborgerät; rechts: Messung im Spritzgießwerkzeug	92
Abbildung 5-17:	Einfluss von Rohstoffchargenschwankungen auf den Aufschmelzprozess.....	93
Abbildung 5-18:	Druck- und Temperaturverhältnisse während des Formgebens und Abkühlens	94
Abbildung 5-19:	Einfluss der Rekristallisations-Temperatur auf den weiteren Formteilbildungsprozess	95
Abbildung 5-20:	Zusammenhang zwischen Werkzeuginnendruckintegral und dem Bauteilgewicht.....	95
Abbildung 5-21:	Einfluss des Restfeuchtegehalts auf Material- und Plastifizierungsgrößen	98
Abbildung 5-22:	Werkzeuginnendruckverlauf für verschiedene Restfeuchtegehalte in der Nachdruckphase.....	99
Abbildung 5-23:	Korrelation von Restfeuchtegehalt zum Werkzeuginnendruck und Bauteilgewicht.....	99
Abbildung 5-24:	Gewichtswerte zum Ermitteln der stochastischen Qualitätsstreuung	102
Abbildung 5-25:	Übersicht, wie Störungen nachbildbar sind und deren Resultat auf die Qualität zusammengefasst wird.....	103
Abbildung 6-1:	Signalverläufe der in Tabelle 6-1 erläuterten Umschaltverfahren.....	109
Abbildung 6-2:	Veränderung des Drucksignals an der Spritzgießmaschine während des Einspritzens unter Material- und Parametereinfluss	111
Abbildung 6-3:	Korrelation der Steigungsänderung im Drucksignal am Schneckenschaft zum Eintreffen der Schmelze im Werkzeug	112
Abbildung 6-4:	Signalverläufe für das kompressionsabhängige Umschalten	113
Abbildung 6-5:	Fließdiagramm für ein Programm zur optimalen Auslegung eines Filters zum kompressionsabhängigen Umschalten	115
Abbildung 6-6:	Vergleich der verschiedenen Filterverfahren	116

Abbildung 6-7:	Vergleich der Umschaltverfahren auf ihr stochastisches Verhalten	117
Abbildung 6-8:	Auswirkungen deterministischer Störgrößen bei verschiedenen Umschaltverfahren auf das eingebrachte Volumen in der Einspritzphase.....	118
Abbildung 6-9:	Auswirkungen deterministischer Störgrößen auf das erzielte Bauteilgewicht für die Umschaltverfahren	119
Abbildung 6-10:	Übersicht über die Prozessführungsmethoden	120
Abbildung 6-11:	Prozessabbild für den Standard-Spritzgießprozess (SGM)	121
Abbildung 6-12:	Prozessabbild für die Schmelzestandsregelung (SZR).....	122
Abbildung 6-13:	Regelkreise zum Durchführen der Schmelzestandsregelung	123
Abbildung 6-14:	Prozessabbild für die Werkzeuginnendruckregelung (p_{Wzg}).....	124
Abbildung 6-15:	Prozessabbild für die Druck-Temperatur-Führung (pT)	125
Abbildung 6-16:	Regelkreise zum Durchführen der Werkzeuginnendruckregelung und der darauf aufbauenden Druck-Temperatur-Führung	125
Abbildung 6-17:	Auswirkungen stochastischer und deterministischer Störgrößen auf die Qualität bei verschiedenen Prozessführungsmethoden.....	126
Abbildung 7-1:	Druckverläufe für eine Viskositäts- und Schmelzetemperaturerhöhung für die Umschaltvariante Temperatur-AF	131
Abbildung 7-2:	Thermodynamische Vorgänge beim Verarbeiten von Polymeren mit unterschiedlichem Übergangsverhalten	134
Abbildung 7-3:	Druckverläufe an verschiedenen Positionen im Prozess während der Formgebungs- und Abkühlungsphase	135
Abbildung 7-4:	Prozess- und Bauteilverhalten bei einer Materialviskositätsänderung mit der pT -Methode	137
Abbildung A-1:	Werkzeuginnendruckverlauf für Prozesse mit unterschiedlichen Einfrierzeiten am Beispiel von Polycarbonat (schnelle Einfrierzeit) und Polypropylen (langsame Einfrierzeit)	158
Abbildung A-2:	Auswirkungen von Schwankungen in der Einspritzphase auf die Bauteilqualität bei unterschiedlichen Nachdruckzeiten	159
Abbildung A-3:	Kurvenverläufe zu den Daten aus Tabelle 4-1	160
Abbildung A-4:	Kurvenverläufe zu den Daten aus Tabelle 4-2.....	161
Abbildung A-5:	Gegenüberstellung der in der Schmelze gemessenen Viskosität zu der zur Molmasse proportionalen Intrinsischen Viskosität	163
Abbildung A-6:	Veränderung in der Schmelzecharakteristik durch Änderung der Schüttdichte	165

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Für die Untersuchungen eingesetztes Werkzeug und Spritzgießbauteile ..43
Tabelle 3-2:	Wichtige Sensorik im Fertigungsumfeld.....44
Tabelle 3-3:	Übersicht über die in der Arbeit verwendeten Versuchsmaterialien51
Tabelle 3-4:	Übersicht über die untersuchten Rohstoffchargentypen.....52
Tabelle 4-1:	Kennzahlen zum Bewerten der Schmelze-Viskosität (Kurvenverläufe in A.2)59
Tabelle 4-2:	Kennzahlen zum Bewerten der Schmelze-Temperatur (Kurvenverläufe in A.2).....59
Tabelle 5-1:	Prozentuale Viskositätsschwankung für die untersuchten Materialien86
Tabelle 6-1:	Erläuterung der Umschaltverfahren108
Tabelle A-1:	Gemessene Viskositäten für die Chargen aus Tabelle 3-4.....161

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen

Abkürzungen

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
AF	Angussfern
AN	Angussnah
Autosys	Automationssystem
Cnr.	Chargennummer
CPC	Continuous Process Control
CRio	Compact reconfigurable I/O
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
FIR	Finite Impulse Response
FPGA	Field Programmable Gate Array
FWL	Fließweglänge
G	Übertragungsverhalten
I	Input
IIR	Infinite Impulse Response
IR	Infrarot
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench
M	Masse
MATLAB	Matrix Laboratory
Max	Maximum
Min	Minimum
n	Drehzahl
O	Output

p	Pressure
PA 66	Polyamid
PC	Polycarbonat
PI	Proportional-Integral
PID	Proportional-Integral-Differential
pmT	Pressure, Mass, Temperature
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
pT	Druck-Temperatur-Führung
pvT	Pressure, Specific Volume, Temperature
PWM	Pulsweitenmodulation
pWZG	Werkzeuginnendruckregelung
Reg	Regranulat
RSP	Rückstromsperre
SGM	Standard-Spritzgießmaschine
SKZ	Süddeutsches Kunststoff-Zentrum
SPC	Statistical Process Control
SZR	Schmelzezustandsregelung
T	Temperatur
t	Zeit
V	Volumen
Wzg	Werkzeug

Formelzeichen

<u>Formelzeichen</u>	<u>Einheit</u>	<u>Beschreibung</u>
B	ohne	Bestimmtheitsmaß
d	variabel	Störgröße
e	°C	Regelabweichung
KK	ohne	Korrelationskoeffizient
m	[g]	Masse
Q	W	Wärmestrom
R	Ohm	Widerstand
t	s	Zeit
T _{ef}	°C	Einfriertemperatur
u	s	Stellgröße
U	V	Spannung
w	°C	Führungsgröße
X	variabel	Untersuchungszustand
x, y, z	variabel	Ortsvektor
y	variabel	Kennzahlwert/Regelgröße
σ	variabel	Standardabweichung
v	[cm ³ /g]	spezifisches Volumen

Indizes

c	crystalline
Eff	effektiv
g	glass transition
i	Index
i-S	i Stellglied
Ko	Kontaktfläche
M	Melt
Min	Minimum
ND	Nachdruck
Ö	Öffnung
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
R	Regler
Rek	Rekristallisation
S	Steuerung
Se	Sensor
Stau	Staudruck
TM	Temperiermedium
Wzg	Werkzeug
Zyl	Zylinder

Anhang

A.1 Einfluss der Einfrierzeit auf das Prozessgeschehen

Der große Erfolg des Spritzgießverfahrens beruht auch auf dem weitläufigen Prozessfeld, das es abdeckt. Die damit ausgeführten Prozesse unterscheiden sich in vielerlei Hinsicht. Eine aus prozesstechnischer Sicht sinnvolle Unterteilung lässt sich anhand der Einfrierzeit vornehmen. Das Einfrierverhalten für das Bauteil entscheidet darüber, wie viel Zeit nach dem Füllen der Kavität noch bleibt, um auf den Abkühlprozess einzuwirken. Dieser Zeitbereich ist in Abbildung 2-1 mit der „isograven Abkühlphase“ definiert worden. Je länger eine plastische Seele im Bauteil besteht, desto mehr kann durch die Druckführung auf die Bauteilqualität Einfluss genommen werden. Die Werkzeuginnendruckverläufe für einen langsam und einen schnell einfrierenden Prozess sind in Abbildung A-1 über die Zeit aufgetragen. Einen schnell einfrierenden Zyklus findet man bei der Verarbeitung amorpher Thermoplasten oder der Herstellung dünnwandiger Bauteile. Unter Verwendung teilkristalliner Polymere und dicker werdender Querschnitte dauert es länger, bis der Siegelpunkt erreicht ist.

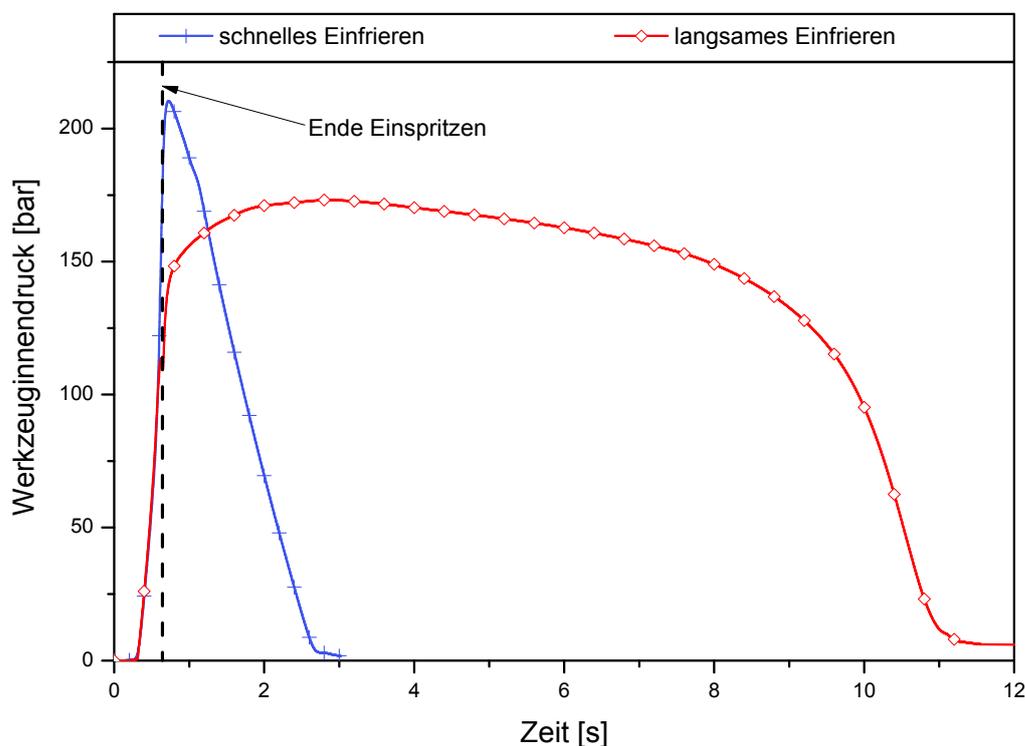


Abbildung A-1: Werkzeuginnendruckverlauf für Prozesse mit unterschiedlichen Einfrierzeiten am Beispiel von Polycarbonat (schnelle Einfrierzeit) und Polypropylen (langsame Einfrierzeit)

Aus Perspektive der Prozesstechnik entscheidet die Länge der Siegelzeit über die Gewichtung der Formgebungsphase an der Bauteilqualität. Die nächste Untersuchung widmet sich diesem Punkt. Verschieden lange Nachdruckzeiten repräsentieren, wie lange aktiv über die Druckführung agiert werden kann. Die Schwankungen in der Formgebungsphase lassen sich durch Veränderung des Umschaltpunkts simulieren. In der kleinen Grafik in Abbildung A-2 ist das aus den Schwankungen resultierende Bauteilgewicht für eine Nachdruckzeit von 0,2 s aufgetragen. Je steiler die an die Messergebnisse angenäherte Regressionsgerade ausfällt, umso stärker ist die Phase des Einspritzens für die entstehende Bauteilqualität verantwortlich. Dementsprechend zeigt der sich aus den einzelnen Steigungen ergebende Kurvenverlauf (Abbildung A-2), welchen Einfluss die Formgebungsphase für verschiedene Einfrierzeiten auf die Bauteilqualität hat. Je länger die Nachdruckzeit wirken kann, umso weniger spielt der Einspritzprozess eine Rolle für das entstehende Bauteilgewicht. Bei einer Nachdruckzeit von 5 s kann der Nachdruck die Unterschiede ausgleichen und der Einfluss der Einspritzphase ist nahe null.

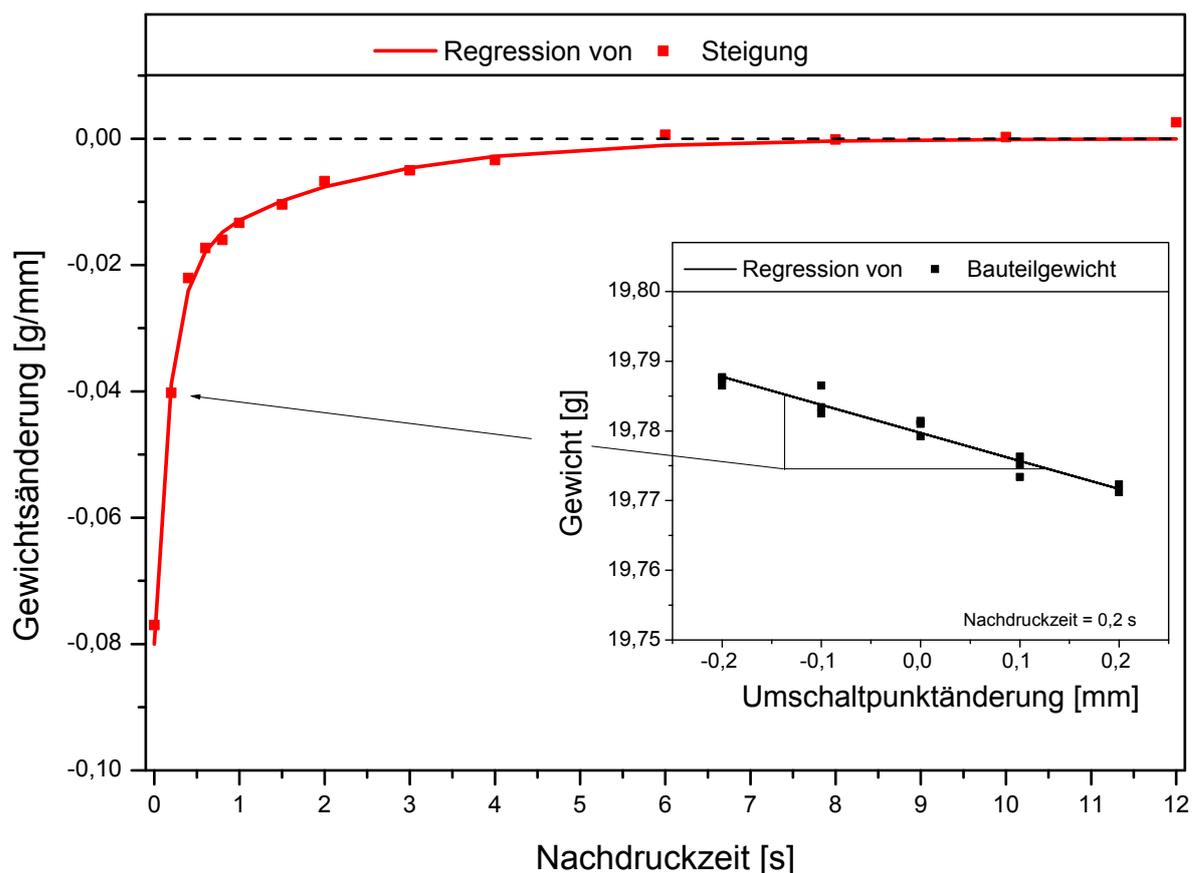


Abbildung A-2: Auswirkungen von Schwankungen in der Einspritzphase auf die Bauteilqualität bei unterschiedlichen Nachdruckzeiten

Vor diesem Hintergrund variiert die Bedeutung der Prozessphase für die entstehenden Bauteileigenschaften mit dem sich ergebenden Prozessbild. Eine Einteilung für das Prozessbild kann über das Einfrierverhalten definiert werden. Daraus resultiert, wie lange der Nachdruck in den Abkühlprozess eingreifen kann. Ergibt sich eine kurze isograde Abkühlphase, entscheidet der Formgebungsprozess wesentlich über die Bauteilqualität.

A.2 Kurvenverläufe für wichtige Kennzahlen

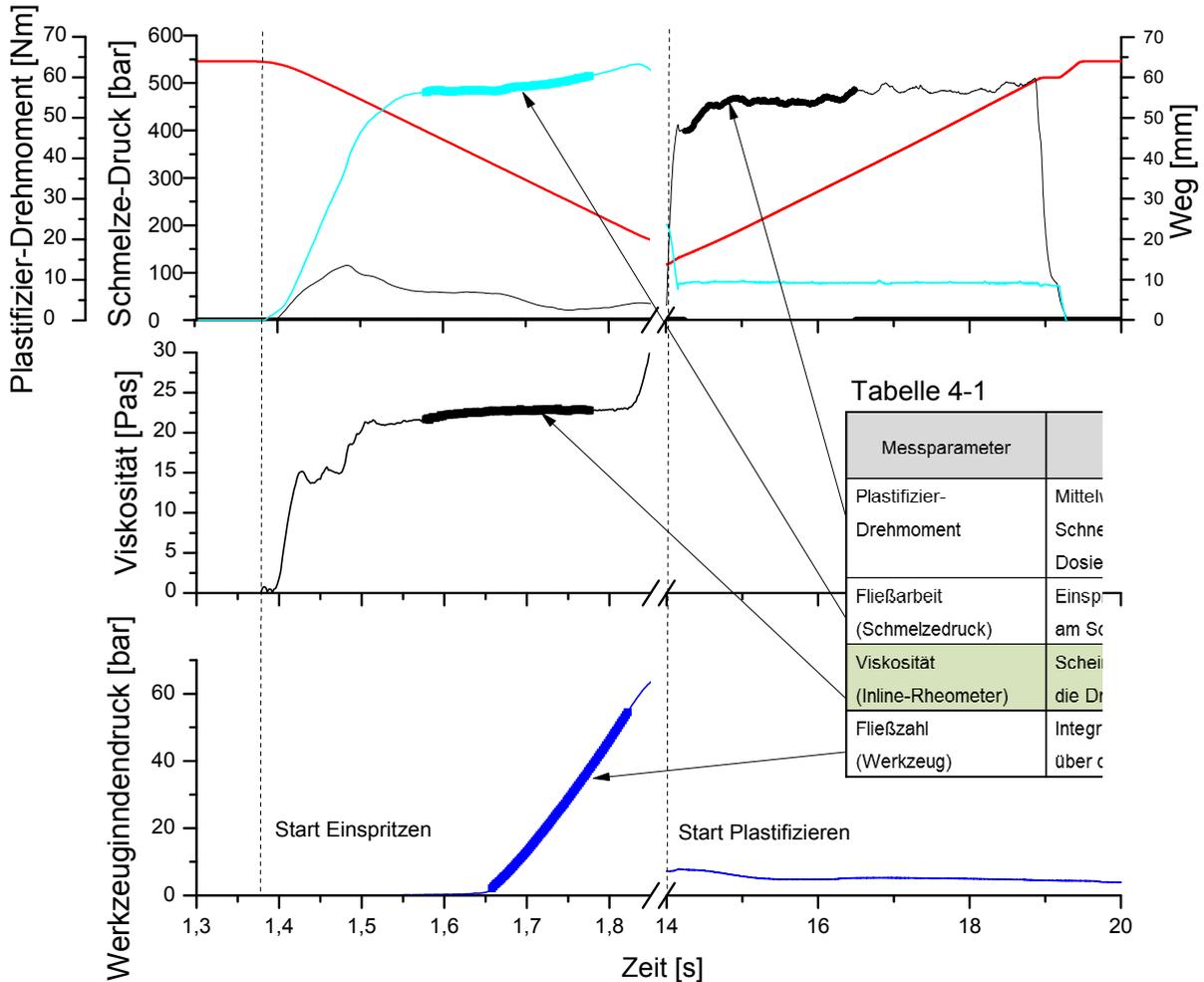


Abbildung A-3: Kurvenverläufe zu den Daten aus Tabelle 4-1

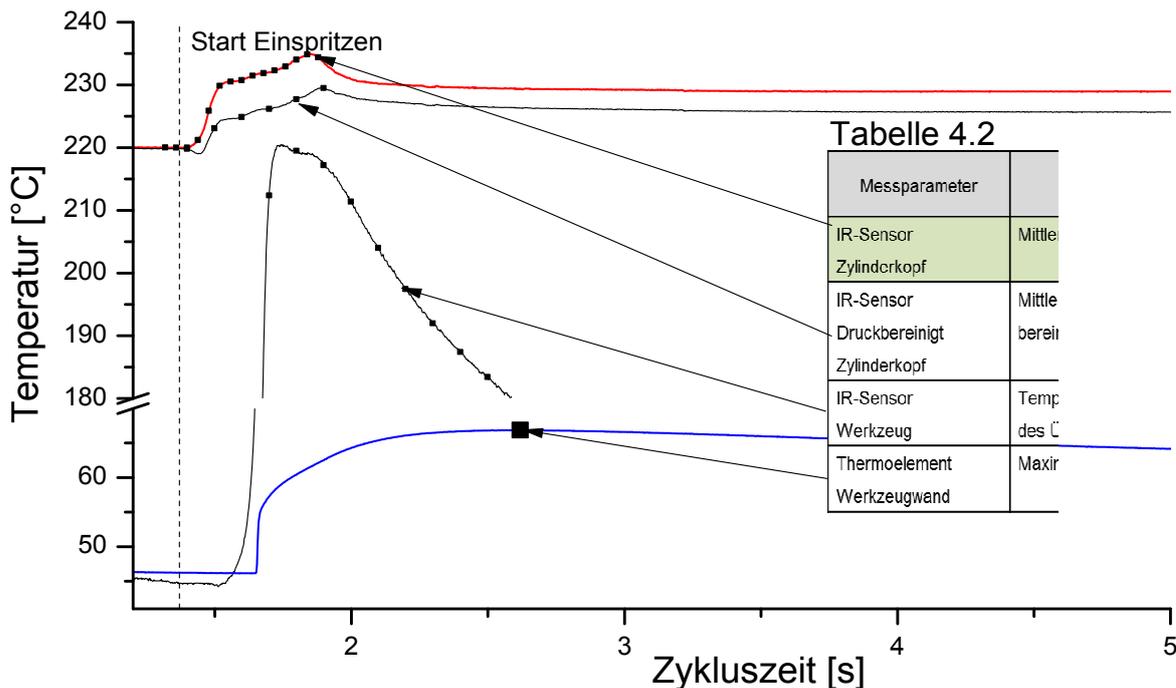


Abbildung A-4: Kurvenverläufe zu den Daten aus Tabelle 4-2

A.3 Kennwerte aus den Chargenuntersuchungen

Tabelle A-1: Gemessene Viskositäten für die Chargen aus Tabelle 3-4

Material:	PP	PC	ABS	PP+EPDM	Reg	PA 66
Chargenr.	Scheinbare Viskosität bei 5000 1/s [Pas]					Viscosity Num. Sul-furic ISO 307
1	23,3	147,0	41,5	22,5	19,7	146,0
2	23,3	140,0	41,7	22,7	19,4	143,0
3	23,4	140,9	41,6	22,7	19,2	142,0
4	23,4	136,8	42,2	22,7	19,0	140,0
5	23,5	139,4	-	-	18,8	143,0
6	23,8	142,0	-	-	-	-
7	22,8	-	-	-	-	-
8	23,4	-	-	-	-	-
9	24,3	-	-	-	-	-
10	23,6	-	-	-	-	-

* Wiederholgenauigkeit der Messung: 1 %

A.4 Genauere Untersuchungen der inneren Vorgänge bei variablem Restfeuchtegehalt

Die vorangegangenen Untersuchungen zeigten, dass die Viskosität des Werkstoffs Polycarbonat mit sinkendem Restfeuchtegehalt deutlich zunimmt. Als Ursache sind zwei Effekte denkbar:

- Die eingelagerten Wassermoleküle wirken zwischen den Makromolekülen des Polymers als „Schmierfilm“. Bekannt ist dieses Phänomen aus den Werkstoffeigenschaften des Polyamids. Hier erhöht sich bei steigendem Konditionierungsgrad die Schlagzähigkeit, gleichzeitig sinkt der E-Modul des Werkstoffs.
- Bei Polycarbonat handelt es sich um den Ester des Bisphenol-A und der Kohlensäure. Bei Erwärmung unter Anwesenheit von Wasser findet eine Rückreaktion statt [Bay04]. Die damit einhergehende Kettenverkürzung führt zur besseren Fließfähigkeit des Polymers.

Zum Eruiieren der Ursache wurden weitergehende Untersuchungen unternommen.

Analyse der Schmierwirkung:

Das Polypropylen ist ein unpolarer Werkstoff, der als weitestgehend reaktionsträge gilt. Es ist nicht zu erwarten, dass durch das gleichzeitige Erhitzen eines PP-Wasser-Gemischs eine chemische Reaktion eintritt. Ein oberflächlich mit Wasser benetztes PP-Granulat wurde dazu benutzt, um den viskositätsmindernden Effekt von Wasser über eine Schmierwirkung zu testen. Eine Viskositätsmessung im HKV war in diesem Zusammenhang nicht möglich, da sich aufgrund der langen Füllzeit das Wasser sofort verflüchtigte. Bei der Verarbeitung in der Spritzgießmaschine trat eine deutliche Viskositätsminderung durch die Anwesenheit von Wasser in der Schmelze ein. Dies zeugt davon, dass auch in der ungeordneten molekularen Anordnung der Schmelze durch das Vorhandensein einer niedermolekularen Phase die Reibung zwischen den Molekülen abnimmt.

Analyse des thermischen Abbaus:

Polycarbonat ist ein Polykondensat aus Bisphenol-A und Phosgen und besitzt daher einen linearen und unverzweigten Kettenaufbau. Unter Anwesenheit von Wasser und hohen Temperaturen kann eine Rückreaktion stattfinden, bei der die Makromoleküle gespalten werden. Um dies zu überprüfen, sind aus den oben in der Prozessuntersuchung produzierten Teilen Proben für die weitere Analyse entnommen worden. Mittels der Lösemittelviskosimetrie lassen sich aus den Bauteilen Rückschlüsse auf die Molmasse und somit auf den molekularen

Abbau ziehen. In diesem Solvationsprozess weiten sich die Moleküle im Lösemittel aus und führen selbst bei einer geringen Konzentration zu einer Viskositätssteigerung [URL13f]. Das Ergebnis der Lösemittelviskosimetrie ist der Staudinger-Index, auch als intrinsische Viskosität bezeichnet. Bei der Lösemittelviskosimetrie²¹ ist ein Viskositätswechsel direkt auf eine Veränderung in der Molmasse bzw. Kettenlänge zurückzuführen, da sonstige Rahmenbedingungen identisch sind. In Abbildung A-5 ist die während des Prozesses gemessene Schmelze-Viskosität der zur Molmasse proportionalen intrinsischen Viskosität gegenübergestellt. Beide zeigen ein identisches Verhalten mit abnehmendem Restfeuchtegehalt.

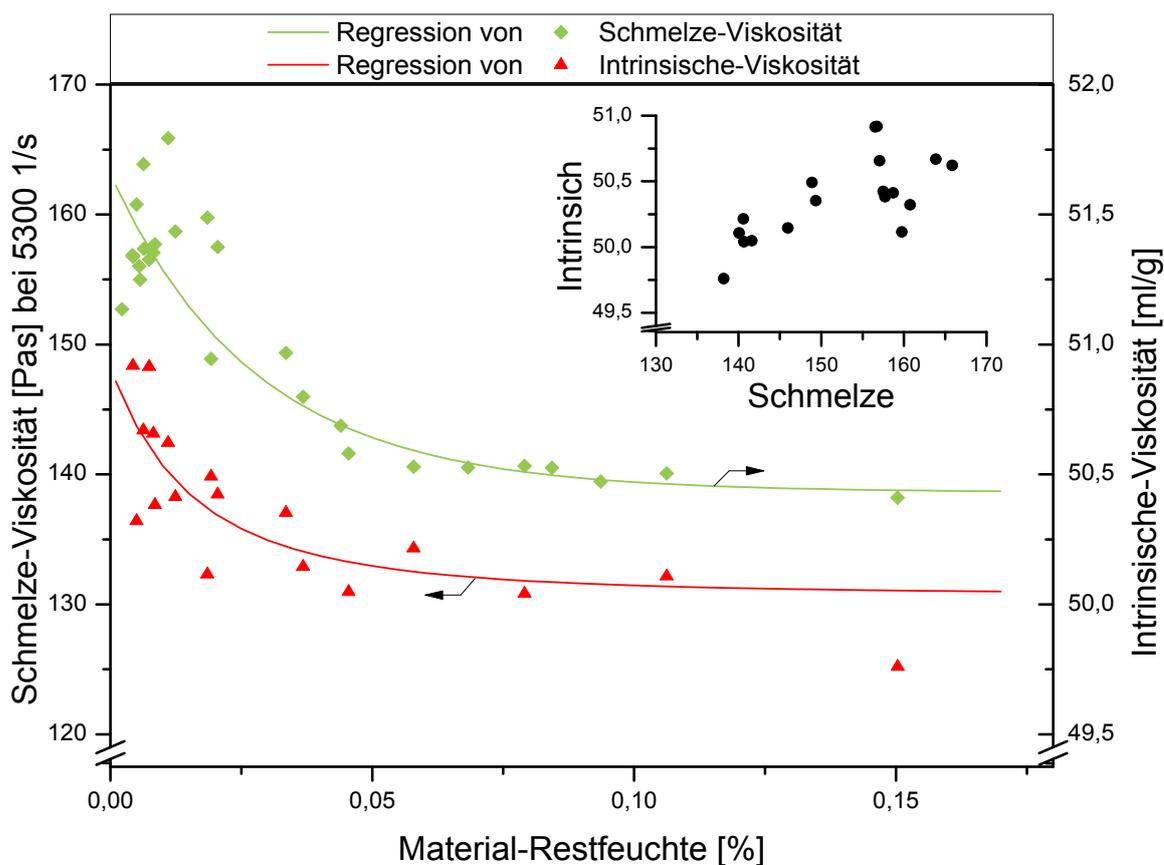


Abbildung A-5: Gegenüberstellung der in der Schmelze gemessenen Viskosität zu der zur Molmasse proportionalen intrinsischen Viskosität

Die beiden Untersuchungen weisen darauf hin, dass der mit dem Restfeuchtegehalt auftretenden Viskositätsänderung ein physikalischer und ein chemischer Einfluss zugrunde liegen. Die Fremdphase Wasser führt zu einer verminderten makromolekularen Reibung und somit zu einem physikalischen Schmiereffekt. Eine chemische Veränderung im Polymer konnte über die Lösungsmittelviskosimetrie nachgewiesen werden. Das Vorkommen geringster Spu-

²¹ Die intrinsische Viskosität ließ sich mit dem LAUDA-iVisc-System vollautomatisch erfassen.

ren von Wasser führt auch bei sehr kurzen Verweilzeiten zu einer Hydrolyse und somit zu einem irreversiblen Polymerabbau.

A.5 Sonstige Untersuchung zum Thema Störgrößeneinfluss

Im Zuge der Untersuchungen zum Störgrößeneinfluss beim Spritzgießen sind neben den in Kapitel 5 vorgestellten Themen weitere Prüfungen durchgeführt worden. Dabei war aber entweder kein Effekt nachweisbar oder die Aufbringung der Störgröße ließ sich mit der angewandten Methode nicht simulieren. Betrachtung fanden der Einfluss der Werkstofftemperatur, die Schüttdichte und eine Ablagerung von Kesselstein in den Temperierkreisläufen. Nachfolgend sind die Einzelheiten zu den Versuchen dargestellt.

Rost- und Kesselstein-Ablagerungen:

Um die Form auf einer gleichbleibenden Temperatur zu halten, geschieht der Energieaustausch über ein Temperiermedium. Diese Flüssigkeit wird in Kühlkanälen durch das Werkzeug geführt und sorgt dabei für den Energieaustausch. Als Temperiermedium wird für gewöhnlich Wasser eingesetzt. Infolge des langfristigen Einsatzes verändert sich die Oberfläche der Kühlkanäle. Bei unbehandeltem Wasser setzt eine Rost- und Kesselsteinbildung ein. Dadurch verändern sich der Kanalquerschnitt und der Wärmeübergang zum Werkzeug. Dies beeinflusst den thermischen Haushalt der Form.

Im Versuch ist ein solches Einsetzen von Ablagerungen über eine Beschichtung der Kanäle nachgestellt worden. Mit einem Wattestab konnte ein Polyurethanlack in die Kanäle aufgebracht werden. Dieser ist nach dem Auftrag mit einem Heißluftstrom getrocknet worden. Eine definierte Schichtdicke war mit dieser Methode nicht nachstellbar. Der Nachweis einer Beschichtung konnte allerdings beim nachträglichen Freibohren der Kühlkanäle erbracht werden, wenngleich sich diese Veränderung in den Prozessdaten nicht bemerkbar machte. Die Werkzeugwand-Temperaturen und die Bauteil-Temperatur blieben unverändert.

Schüttdichte:

Die Granulatkörner sind im Warm- oder Kaltabschlagsverfahren herstellbar und werden bei sehr hohen Durchsätzen nicht mehr in Säcken oder Oktabins angeliefert, sondern mittels eines Silozugs direkt in ein Hochsilo geblasen, wo sie in bis zu zwanzig Meter hohen Türmen lagern. Aufgrund der Unterschiede in Kornform und -größe rieseln kleine runde Körner nach unten durch. Aus diesem Grund nimmt die Schüttdichte des Materials vom Boden nach oben hin ab, sodass diese Materialeigenschaft mit der Zeit variiert. In einem Versuch ist dies nachgestellt worden, indem Granulatkörner mit einer Schneidmühle zerkleinert wurden. Mit steigendem Mahlgrad verlieren die Körner immer mehr ihre ideale sphärische Form, wodurch

die Schüttdichte abnimmt. Durch die minimale thermische Belastung sollte somit eine unterschiedliche Schüttdichte bei vermeintlich gleichen Materialeigenschaften hergestellt werden. Im Versuch tritt dabei eine Änderung auf, die nur durch ein verändertes rheologisches Rohstoffverhalten erklärt werden kann (siehe Abbildung 2-1). Mit dem Wechsel der Schüttdichte steigen Schmelze-Viskosität und Schmelze-Temperatur gleichzeitig an.²² Bei gleichen rheologischen Materialeigenschaften verhalten sich diese Eigenschaften jedoch gegenläufig. Demzufolge ist davon auszugehen, dass durch die Herstellung unterschiedlicher Schüttdichten in der Schneidmühle auch die Rohstoffeigenschaften verändert werden. Die separate Bestimmung der Viskosität im HKV zeigte gleiche Ergebnisse. Dort steigt mit steigendem Mahlgrad und somit sinkender Schüttdichte die Viskosität deutlich an. Die Messungen weisen also darauf hin, dass eine Herstellung verschiedener Korngrößen über diese Methode unzulässig ist.

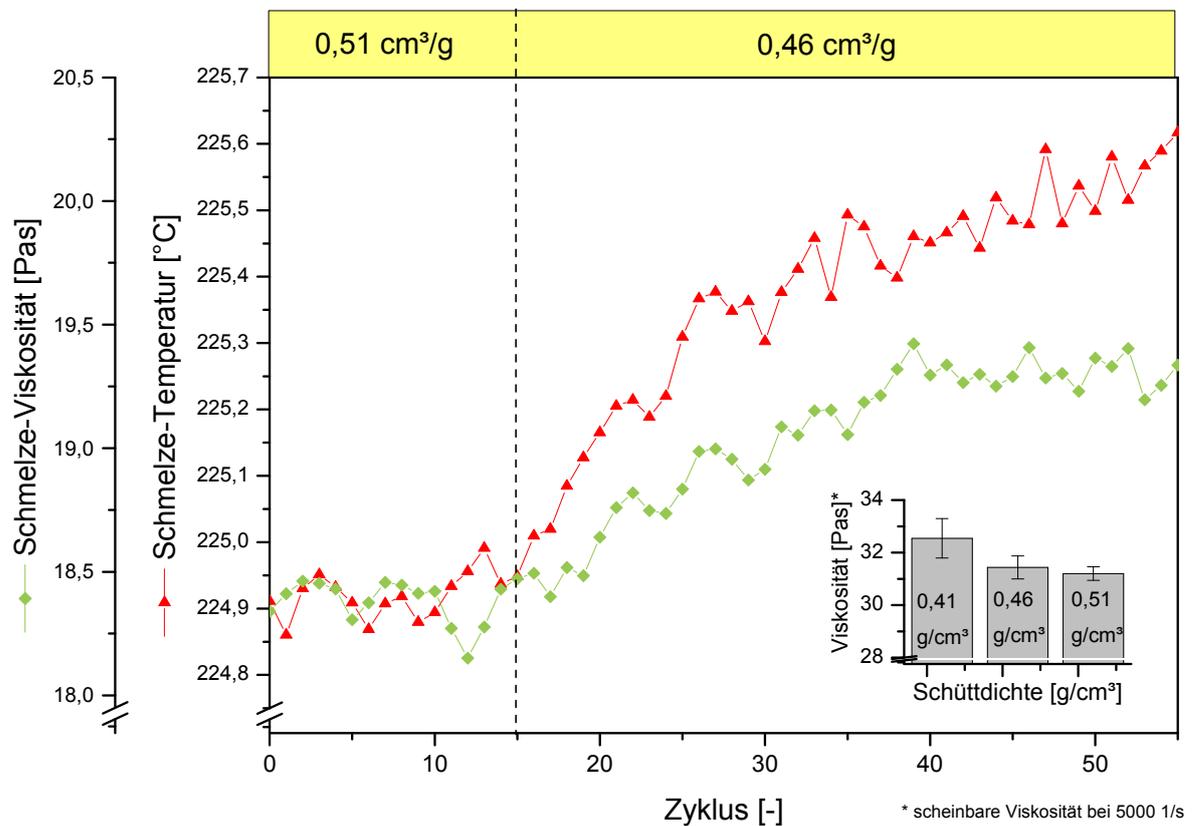


Abbildung A-6: Veränderung in der Schmelzecharakteristik durch Änderung der Schüttdichte

²² Diese Veränderung war in allen Kennzahlen zu erkennen, wodurch ein Fehler in der messtechnischen Erfassung ausgeschlossen werden kann.

Werkstoff-Temperatur:

Vor allem bei Materialien, die vorgetrocknet werden, kann die Werkstoff-Temperatur am Trichter stark schwanken. Durch Störungen oder bedingt durch das zyklische Förderverhalten unterliegt das Material variablen Verweilzeiten, wodurch sich die Temperatur den Verhältnissen in der Umgebung anpasst. Indem beim nicht hygroskopischen Material Polypropylen die Temperatur im Trockner eingestellt wurde, ließen sich die Versuchsparameter einzig auf die Veränderung in der Enthalpie zurückführen. Eine Änderung in den Prozessparametern konnte bei einer Zykluszeit von 22 s aber nicht festgestellt werden.

LEBENS LAUF

Persönliche Daten

Name: Johannes Eben
Geburtsdatum, -ort: 18. März 1983, Landau an der Isar
Familienstand: ledig
Staatsangehörigkeit: deutsch



Beruflicher Werdegang

09/00–02/03 **Ausbildung** zum Verfahrensmechaniker für Kunststoff- und Kautschuktechnik bei der BMW Group

03/03–12/04 Fertigungsfachmann bei der BMW Group-Landshut

09/04–07/05 Berufsoberschule Landshut

10/05–09/09 **Diplomstudium** der Kunststofftechnik an der FH-Rosenheim

07/05–09/09 Verschiedene Tätigkeiten mit Bezug zur Kunststofftechnik als Werksstudent/Tutor/Hilfskraft

03/08–09/08 Praxissemester im Bereich Automotiv Glazing bei der Webasto AG mit anschließender Werksstudententätigkeit

03/09–08/09 Diplomarbeit bei Krauss Maffei zum Thema: „Ermittlung signifikanter Einflussgrößen auf den Schmelzezustand“

09/09–12/13 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Hochschule Rosenheim

Seit 01/14 Leiter Entwicklung und Technik bei Intercable

10/10–08/12 **Weiterbildung** zum „Master of Business Administration and Engineering“ (M.B.A.+Eng.)