Phasenübergreifende Regelung des Werkzeuginnendrucks zur Erhöhung der Reproduzierbarkeit im Spritzgießen

Phase-unifying Cavity Pressure Control to Increase Reproducibility in Injection Moulding

Von der Fakultät für Maschinenwesen der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades einer
Doktorin der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Katharina Hornberg

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Abel

Tag der mündlichen Prüfung: 20.08.2024

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

DANK

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk (IKV) an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen in den Jahren 2019 bis 2023.

Mein ausdrücklicher Dank gebührt Herrn Prof. Dr.-Ing. Ch. Hopmann für die Betreuung dieser Arbeit und die kritische Durchsicht meiner Ausführungen. Ich danke ihm sehr für die stete Unterstützung meiner Tätigkeit und Forschungen sowie den Rückhalt und den Freiraum dieses Forschungsgebiet zu gestalten. Ebenso möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. D. Abel für die Übernahme des Korreferats und die gute Zusammenarbeit mit dem Institut für Regelungstechnik bedanken.

Meine höchste Anerkennung gilt allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des IKV, insbesondere aber den Kollegen der Abteilung Spritzgießen, ohne deren Hilfsbereitschaft und Teamgeist diese Arbeit nicht denkbar gewesen wäre. Für die Durchsicht der Arbeit und ihre wertvollen Anmerkungen möchte ich mich zusätzlich bei Philipp Hennes, Matthias Schöll und Malte Schön bedanken. Ebenso bin ich Maike van Megeren, Pia Wagner und Vera Dahmen dankbar für Ihre Unterstützung bei der Vorbereitung des Promotionsvortrags.

Daneben gilt mein Dank allen studentischen Hilfskräften und Studienarbeitern meiner Arbeitsgruppe, deren unermüdliche und tüchtige Mitarbeit in allen Lagen diese Arbeit erst ermöglicht hat. Namentlich möchte ich Julius Willich, Yannick Gaul, Christian Fink, Maria Theresia Schmitz, Roman Kristan, Anastasiia Hluboka, Silas Danz, Pascal Höhler, Dennis Klein, Joshua Schälich, Hasan Olmaz, Maximilian Heinemann, Carlos Fischer, Niklas Lacroix, Manoj Kumar Mudiganti und Hans Rodenbach benennen. Ihr wart ein einmaliges und tolles Team. Insbesondere die Zusammenarbeit im Messeprojekt für die K 2022 mit Julius, Yannick, Christian, Roman und Silas war eine intensive und lehrreiche Zeit, die wir gemeinsam erfolgreich gemeistert haben!

Die Forschungen wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Projekts „Phasenübergreifende Prozessführungskonzepte beim Spritzgießen unter Nutzung moderner Regelungsstrategien“ finanziell gefördert. Bei den Kollegen Marko Vukovic, Sebastian Stemmler und Philipp Schubert des IRT bedanke mich für den engen Austausch. Danke Marko als Sparring-Partner und Gute-Laune Mensch, auch wenn die Versuche mal nicht so laufen wie geplant! Jan Lachhein von der Firma Arburg danke ich für die fortwährende Unterstützung im Projekt.

Meinen Eltern und meiner ganzen Familie möchte ich außerdem von Herzen für die immerwährende Unterstützung in allen Phasen der Anfertigung danken. Danke, dass ihr mir das ermöglicht habt!

Aachen, im Dezember 2024 Katharina Hornberg

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS I

1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG 1

1.1 Einleitung 1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise 4

2 STAND DER TECHNIK 7

2.1 Störeinflüsse auf die Reproduzierbarkeit von Spritzgießprozessen 7
2.1.1 Maschinenbedingte Prozessschwankungen 9
2.1.2 Materialbedingte Prozessschwankungen 10
2.1.3 Änderungen im thermischen Haushalt des Spritzgießprozesses 11
2.1.3.1 Schmelze- und Werkzeugtemperatur 12
2.1.3.2 Umgebungseinflüsse 12
2.1.3.3 Produktionsunterbrechung und Anfahrvorgänge 13
2.2 Prozessführung im Spritzgießen 15
2.2.1 Konventioneller Spritzgießprozess 15
2.2.2 Assistenzsysteme für die konventionelle Prozessführung 17
2.2.3 Prozessführung über eine Werkzeuginnendruckregelung 20
2.3 Zwischenfazit 23

3 VERSUCHSAUFBAU 25

3.1 Anlagentechnik und Software 25
3.2 Verwendete Bauteile und Materialien 26
3.3 Methoden zur Bestimmung der Bauteilqualität 28

4 REGELUNGSKONZEPT FÜR DIE PHASENÜBERGREIFENDE WERKZEUGINNENDRUCKREGELUNG 29

4.1 Aufbau des Regelkreises 30
4.2 Automatisierte Reglerparametrierung mittels Bayes´scher Optimierung 32
4.3 Begriffskonvention 35

5 EINFLUSS DER WERKZEUGINNENDRUCKREFERENZ AUF DIE BAUTEILQUALITÄT 37

5.1 Einspritzphase 38
5.2 Kompressionsphase 39
5.3 Nachdruckphase 43
5.4 Bauteilerstarrung 48

6 KENNZAHLEN DER PROZESSGRÖßENVERLÄUFE 51

6.1 Schneckenposition und -geschwindigkeit 52
6.2 Schneckendruck 53
6.3 Werkzeuginnendruck 54

6.4 Werkzeugtemperatur 56
6.5 Übergreifende Prozesskennzahlen 57
6.6 Zyklusbezogene Metadaten 58

7 SENSITIVITÄT DER PROZESSKENNZAHLEN FÜR STÖREINFLÜSSE 60

7.1 Referenz im stationären Prozesszustand 60
7.2 Anfahrvorgänge nach einer Produktionsunterbrechung 61
7.3 Thermische Veränderungen 66
7.4 Chargenwechsel bei PCR 70
7.5 Zwischenfazit 75

8 KONZEPTE ZUR QUALITÄTSOPTIMIERTEN WERKZEUGINNENDRUCKREGELUNG 77

8.1 Störungsausgleich ohne Prozessinformationen 77
8.2 Automatisierte Siegelpunktbestimmung im Prozess 81
8.3 Kühlratenabhängige pvT-Modellierung 87

9 VALIDIERUNG UND BEWERTUNG DER PROZESSFÜHRUNGSKONZEPTE 91

9.1 Ausgleich thermischer Störeinflüsse 91
9.2 Ausgleich von Materialschwankungen 95
9.3 Potential der Regelkonzepte zum Einsatz in der Serienproduktion 99
9.3.1 Automatisierte Siegelpunktbestimmung 100
9.3.2 pvT-Optimierung 100

10 FAZIT UND AUSBLICK 101

10.1 Fazit 101
10.2 Ausblick 103

11 ZUSAMMENFASSUNG / SUMMARY 105

11.1 Zusammenfassung 105
11.2 Summary 106

12 ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES 107

12.1 Abkürzungen 107
12.2 Formelzeichen 107
12.3 Indizes 108

13 LITERATURVERZEICHNIS 109

14 ANHANG 117

14.1 Materialinformationen Rezyklat 117
14.2 Regelparameter 117
14.3 Maschineneinstellungen 118
14.4 Automatisierte Auswertung von Prozessgrößenverläufen 120
14.5 Schmidt-Koeffizienten zur Modellierung des pvT-Verhaltens 122

1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

1.1 Einleitung

Das Spritzgießverfahren ist das bedeutendste Herstellungsverfahren für dreidimensionale Massenartikel und technische Bauteile aus Kunststoff. Dieses hochpräzise und äußerst vielseitige Verfahren ermöglicht eine fast uneingeschränkte Gestaltungsfreiheit hinsichtlich der Geometrie und Oberflächenstruktur von Kunststoffbauteilen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit der Funktions- und Prozessintegration, sodass ein hoher Automatisierungsgrad erreicht werden kann [HMM+18, JM04].

In Zeiten steigender Energiekosten und intensivem globalen Wettbewerb sind effiziente Prozesse im Spritzgießen entscheidend. Das Ziel der Unternehmen ist ein wirtschaftlicher Prozess mit einer hohen Reproduzierbarkeit bei der Herstellung qualitativ hochwertiger Produkte.

Während der Serienproduktion von Spritzgießbauteilen treten fortwährend unvermeidbare Veränderungen der Verarbeitungsbedingungen auf. Diese Störeinflüsse verursachen Prozessschwankungen und infolgedessen die Produktion von Ausschussteilen, sobald die Qualitätsanforderungen an die Spritzgießbauteile nicht mehr eingehalten werden. Beispielsweise kann die Schmelze durch Chargenschwankungen eine höhere Viskosität aufweisen, sodass das Bauteil nicht vollständig gefüllt wird. Die Kompensation von Störeinflüssen ist demnach entscheidend für eine verbesserte Wirtschaftlichkeit der Spritzgießproduktion. Dazu muss der Prozess kontinuierlich angepasst werden, um Veränderungen in den Verarbeitungsbedingungen auszugleichen.

Die Anpassung verschiedener Maschineneinstellgrößen ermöglicht die Kompensation von Störeinflüssen. Zum Beispiel kann eine unvollständige Kavitätsfüllung durch einen späteren Umschaltzeitpunkt, eine Erhöhung des Einspritzvolumenstroms oder eine Anhebung der Schmelzetemperatur vermieden werden [Sch19]. Das Vorgehen zur Prozessanpassung wird dabei meist unternehmensspezifisch vorgegeben [BHS+12]. Die Dauer der Prozessanpassung und die Qualität der neuen Prozesseinstellung sind vom Erfahrungswissen des Maschinenbedieners abhängig [Bic12, CFT+09]. Ein weiteres Problem stellt die fehlende kontinuierliche Überwachung von Qualitätsgrößen dar, wenn die Überprüfung der Bauteilqualität nur stichprobenartig erfolgt. Dadurch wird die Produktion von Ausschussteilen unter Umständen erst Stunden später erkannt.

Im Vergleich zu Maschinengrößen weisen Prozessgrößen eine hohe Korrelation zur Bauteilqualität auf und ermöglichen eine indirekte Überwachung der Bauteilqualität. Die Erfassung und Auswertung von Prozessdaten, die alle wichtigen Prozessgrößen aus Maschinen- und Sensordaten umfassen, ist somit essentiell, um einen effizienten Prozess mit hoher Reproduzierbarkeit zu gewährleisten und Qualitätsabweichungen frühzeitig zu erkennen. Die Prozesseinrichtung und -optimierung kann durch die Verwendung von Prozessdaten signifikant beschleunigt werden und gleichzeitig die Robustheit der Maschineneinstellung gegenüber Störeinflüssen erhöhen. Beispielsweise kann anhand des Werkzeuginnendruckverlaufs der Umschaltpunkt bestimmt werden. Neben einer Verbesserung der Bauteilqualität können Kosten gesenkt werden, bspw. durch die Reduktion des Energieverbrauchs oder die Erhöhung der Gesamtanlageneffizienz aufgrund einer höheren Robustheit gegenüber Störeinflüssen [HS21].

Prozessdaten ermöglichen in der Serienproduktion eine Überwachung der Reproduzierbarkeit des Prozesses, ohne die Bauteilqualität explizit auszuwerten. Dazu kann eine Trendanalyse oder ein Vergleich mit Referenzkurven durchgeführt werden. Die Festlegung von zulässigen Schwankungsbereichen einzelner Prozessgrößen, wie dem Werkzeuginnendruckintegral, ermöglicht schnelle Prozesseingriffe, falls Abweichungen in den Prozessdaten auftreten [GMK23]. Sobald die Prozessgrößen das vorgegebene Toleranzband verlassen, ist eine automatisierte Separation von Ausschussteilen möglich [NN03]. Die isolierte Betrachtung von Prozessgrößen hat jedoch den Nachteil, dass sich diese gegenseitig verstärken oder kompensieren können [Kle20]. Bei gegensätzlicher Verstärkung können bereits sehr kleine Abweichungen der Prozessgrößen zu Ausschuss führen. Daher bilden die Toleranzbänder nur ein sehr schmales Prozessfenster ab.

Statt einer Separation von Ausschussteilen ist es effektiver, einen stabilen Spritzgießprozesses dauerhaft zu gewährleisten. Es genügt nicht, wenn Maschinen- und Prozessdaten visualisiert werden und somit den Maschinenbediener bei der Nachjustierung des Prozesses unterstützen. Stattdessen sollte eine automatisierte Prozessoptimierung erfolgen. Es gibt bereits industrielle Ansätze, um Einspritzprofil, Umschaltpunkt und Nachdruck bei auftretenden Veränderungen der Prozessbedingungen automatisch anzupassen [NN17, NN18, NN19d]. Am weitesten verbreitet sind die Systeme iQ weight control der Firma ENGEL AUSTRIA GmbH und APC plus der Firma KraussMaffei Technologies GmbH. Dabei wird der Einspritzdruckverlauf mit einer Referenzkurve verglichen bzw. der Druckverlauf mit einer materialspezifischen Kompressionskurve verglichen, um Viskositäts-

schwankungen auszugleichen. Diese Assistenzsysteme müssen an jeder Maschine durch den Hersteller aktiviert werden, was einen Kostenfaktor darstellt. In einem heterogenen Maschinenpark sind verschiede Systeme der Hersteller vertreten, welche unterschiedliche Einstelloptionen bieten. Als Lösung wurde von Imflux Inc. ein System entwickelt, welches mehrere Lösungskonzepte durch die Analyse verschiedener Prozessgrößenverläufe bietet, um den Einspritzvolumenstrom, den Umschaltpunkt sowie den Nachdruck herstellerunabhängig bei Viskositätsveränderungen anzupassen. Allerdings ist die Systemeinrichtung für neue Spritzgießprozesse sehr aufwendig und kostenintensiv, sodass Imflux insbesondere für kleinere Unternehmen keine wirtschaftliche Lösung darstellt. Die Akzeptanz solcher Assistenzsysteme ist bei Maschinenbedienern nicht immer gegeben, auch da sie in der Maschinensteuerung als Blackbox erscheinen. Die obigen Beispiele zeigen, dass Optimierungspotential in der Automatisierung der Spritzgießproduktion beim Auftreten von Störeinflüssen besteht [YCL+16].

Die Regelung von Maschinengrößen ist einer Regelung von Prozessgrößen immer unterlegen. Im Gegensatz zu Maschinengrößen werden Prozessgrößen direkt am Ort der Bauteilentstehung gemessen und besitzen daher eine höhere Korrelation zur Bauteilqualität. Als Regelgröße ist der angussnahe Werkzeuginnendruck ideal, da er über einen langen Zeitraum geregelt werden kann. Seine hohe Korrelation zur Bauteilqualität wird in zahlreichen Veröffentlichungen immer wieder bewiesen [Sch11, APD+23, KWH23].

Der Spritzgießprozess weist ein totzeitbehaftetes, nichtlineares Streckenverhalten auf, was den Einsatz höherer Regelungsverfahren erforderlich macht. Die Kombination aus einer modellprädiktiven Regelung mit einem Zustandsschätzer weist eine hohe Regelgüte auf, sodass die Einhaltung vorgegebener Referenzen für den Werkzeuginnendruck ermöglicht wird [VSH+22]. Das Konzept der modellbasierten, prädiktiven Werkzeuginnendruckregelung wird in dieser Arbeit verwendet und weist Vorteile gegenüber industriellen Assistenzsystemen auf, da die Prozesseinrichtung innerhalb weniger Spritzgießzyklen durch den Maschinenbediener erfolgen kann. Dabei ist der Einsatz herstellerübergreifend für verschiedene Antriebsarten möglich [HVG+23]. Zur Regelung des Werkzeuginnendrucks wird der Schneckenvorschub als Stellgröße sowohl für die Einspritz- als auch die Nachdruckphase verwendet.

Störeinflüsse erfordern eine Anpassung der Referenz für den Werkzeuginnendruck zur Vermeidung von Qualitätseinbußen, da das Materialverhalten durch den Prozesszustand beeinflusst wird. Eine Werkzeuginnendruckregelung könnte die Produktivität von Spritzgießunternehmen erheblich steigern und dem Fachkräftemangel entgegenwirken. Dazu ist jedoch die Detektion von Störeinflüssen im Prozess und darauf aufbauend die Ableitung idealer Werkzeuginnendruckreferenzen erforderlich.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Das Ziel der Forschungsarbeit ist die automatisierte Kompensation von Qualitätsschwankungen im Spritzgießprozess, welche durch verschiedene Störeinflüsse verursacht werden. Im konventionellen Spritzgießprozess wird die Kavität in der Einspritzphase durch Vorgabe einer Schneckenvorschubgeschwindigkeit volumetrisch gefüllt. Anschließend wird auf eine Druckregelung umgeschaltet, um die Schwindung des abkühlenden Kunststoffs bis zur Erstarrung des Angusses auszugleichen. Aufbauend auf vorangegangenen Forschungsarbeiten ([RSH+14, SAV+19, Sch11, Ste20]) dient jedoch in dieser Arbeit der Werkzeuginnendruck als einzige Regelgröße für Einspritz- und Nachdruckphase. Eine überlagerte Qualitätsregelung soll optimale Referenzverläufe für den Werkzeuginnendruck berechnen, indem der aktuelle Schmelzezustand über Prozessgrößen geschätzt wird. Eine Bewertung der Bauteilqualität erfolgt dabei ausschließlich auf Basis von Prozessdaten, sodass keine Rückführung von Qualitätsdaten zur Regelung erforderlich ist. Zur Berechnung von zustandsspezifischen Werkzeuginnendruckreferenzen sind in dieser Arbeit folgende Forschungsfragen zu beantworten:

- Welche phasenspezifischen Stellgrößen müssen zur Vorgabe der Werkzeuginnendruckreferenz geregelt werden, um eine hohe Bauteilqualität zu erreichen? (Kapitel 5)
- Welche Prozessgrößenverläufe müssen für jeden Spritzgießzyklus überwacht werden, um Störgrößen zu detektieren? Ist dabei eine Reduktion auf wenige Prozesskennzahlen möglich? (Kapitel 6-7)
- Kann ein Konzept entwickelt werden, welches den automatisierten Ausgleich von thermischen und materialbedingten Schwankungen ermöglicht? Zeigen die entwickelten Prozessführungskonzepte eine höhere Reproduzierbarkeit der Bauteilqualität im Vergleich zur konventionellen Prozessführung auf? (Kapitel 8-9)

Im Nachfolgenden wird eine Zusammenfassung der einzelnen Kapitelinhalte gegeben, welche zur Beantwortung der Forschungsfragen aufeinander aufbauen.

Die Ursachen der wichtigsten Störeinflüsse im Spritzgießprozess werden in Kapitel 2 vorgestellt und deren Auswirkungen auf die Reproduzierbarkeit der Bauteilqualität beschrieben. Anschließend werden verschiedene Prozessführungskonzepte vorgestellt. Dazu zählen die konventionelle Prozessführung, der Einsatz von Assistenzsystemen auf Basis einer Regelung von Maschinengrößen sowie die Regelung des Werkzeuginnendrucks.

Der Versuchsaufbau zur Durchführung von Spritzgießversuchen wird in Kapitel 3 beschrieben. Dazu zählen die eingesetzte Anlagentechnik und Software, verwendete Spritzgießwerkzeuge und Materialien sowie die Methoden zur Bestimmung der Bauteilqualität.

In Kapitel 4 wird der Aufbau des in dieser Arbeit eingesetzten Regelkreises beschrieben und die automatisierte Reglerparametrierung vorgestellt, welche eine hohe Regelgüte des Werkzeuginnendrucks bei geringem Einstellaufwand ermöglicht.

In Kapitel 5 werden die Stellgrößen der Werkzeuginnendruckreferenz vorgestellt, über die der allgemeine Verlauf des Werkzeuginnendrucks angepasst werden kann. Für die einzelnen Prozessphasen werden verschiedene Einstellungen untersucht und die Bauteilqualität ausgewertet. Dadurch können die Prozessphasen bestimmt werden, in denen eine Regelung des Werkzeuginnendrucks sinnvoll ist.

Der Spritzgießprozess soll über Kennzahlen charakterisiert werden, um eine Bewertung des aktuellen Prozesszustands zu ermöglichen. Dazu wird in Kapitel 6 die neu entwickelte Software InjectiX vorgestellt, die eine automatisierte Bestimmung von Prozesskennzahlen ermöglicht. Anschließend werden die untersuchten Prozesskennzahlen vorgestellt, die aus den Verläufen von Schneckenposition und -geschwindigkeit, Schneckendruck, Werkzeuginnendruck, Werkzeugtemperatur sowie zyklusbezogener Metadaten berechnet werden.

Darauf aufbauend erfolgt in Kapitel 7 die Auswahl geeigneter Kennzahlen zur Prozessüberwachung und Störgrößendetektion. Die Kennzahlen werden hinsichtlich ihrer Sensitivität für verschiedene Störeinflüsse miteinander verglichen, um die wichtigsten Kennzahlen zur Detektion von Qualitätsunterschieden auszuwählen. In diesem Zusammenhang werden die Auswirkungen von Produktionsunterbrechungen, thermischen Veränderungen und Materialschwankungen auf Bauteilqualität und Prozesskennzahlen analysiert und mit den zufälligen Schwankungen im stationären Zustand, wie dem Schließverhalten der Rückstromsperre, verglichen.

In Kapitel 8 werden verschiedene Konzepte zur Generierung qualitätsoptimierter Werkzeuginnendruckreferenzen vorgestellt. Zunächst wird untersucht, ob ein Ausgleich von Prozessstörungen ohne die Analyse von Prozessgrößenverläufen möglich ist. Mit der automatisierten Bestimmung des Siegelpunkts wird anschließend ein neues Verfahren vorgestellt, das den Schneckendruckverlauf zur Prozessführung online auswertet. In vorherigen Forschungsarbeiten wurde die Referenz für den Werkzeuginnendruck anhand des materialspezifischen Zusammenhangs zwischen Druck, Temperatur und spezifischem Volumen (pvT) vorgegeben. Zur Weiterentwicklung der sog. pvT-Optimierung wird ein kühlratenabhängiges pvT-Modell aufgestellt, um eine prozessnähere Beschreibung des Materialverhaltens zu erhalten.

Die Validierung der entwickelten Strategien aus Kapitel 8 erfolgt in Kapitel 9 mittels Störgrößen in Form von thermischen Veränderungen und Materialwechsel, die in den Prozess eingebracht werden. Die Verfahren werden mit der konventionellen Prozessführung und der pvT-Optimierung vergleichen. Dadurch kann die Leistungsfähigkeit der Systeme im Vergleich zu bestehenden Verfahren bewertet werden.

2 STAND DER TECHNIK

Eine hohe Reproduzierbarkeit der Bauteilqualität ist für eine wirtschaftliche Spritzgießproduktion entscheidend, um den Ausschuss gering zu halten. Allerdings kann die Prozessfähigkeit durch eine Vielzahl von Störeinflüssen beeinflusst werden, welche den Prozesszustand verändern und eine Anpassung der Maschineneinstellungen erfordern. Im folgenden Kapitel werden die Störeinflüsse im Kontext der Detektierbarkeit und ihrer Auswirkung auf die Bauteilqualität diskutiert. Anschließend werden Strategien zur Prozessführung vorgestellt, die einen Ausgleich der Störeinflüsse in Form von Assistenzsystemen in der Industrie bzw. komplexer Regelkreise in der Forschung ermöglichen sollen.

2.1 Störeinflüsse auf die Reproduzierbarkeit von Spritzgießprozessen

Der Spritzgießprozess wird über eine Vielzahl von Maschinenparametern direkt in der Steuerung der Spritzgießmaschine eingestellt. Bei unveränderter Maschineneinstellung und einem idealen Regelverhalten der Spritzgießmaschine werden die Bauteile in jedem Zyklus mit der gleichen Qualität produziert. In der Serienproduktion wirken jedoch Störeinflüsse auf den Prozess, welche einzeln oder in Wechselwirkung miteinander auftreten und zu Ausschussteilen führen können. Typische Störgrößen sind Änderungen im thermischen Haushalt der Maschine, Material- oder Umweltveränderungen sowie der Verschleiß von Maschine oder Werkzeug [BSS+09, Kaz09, KW09]. Die Maschinenparameter müssen angepasst werden, sobald veränderte Produktionsbedingungen zu nicht mehr vertretbaren Qualitätsunterschieden führen. Aus dem Zusammenspiel von Maschinenparametern und Störgrößen resultieren Prozessgrößen, die eine direkte Korrelation zur Bauteilqualität besitzen, jedoch nicht direkt an der Spritzgießmaschine einstellbar sind. Prozessgrößen beschreiben den Zustand der Schmelze im Aggregat und im Werkzeug und sind daher ideale Größen für die Prozessüberwachung und –steuerung [JM04]. Die wichtigsten Prozess- und Störgrößen sind in Bild 2.1 aufgezeigt. Die Übersicht erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, da viele weitere Größen ebenfalls den Schmelzezustand beeinflussen.

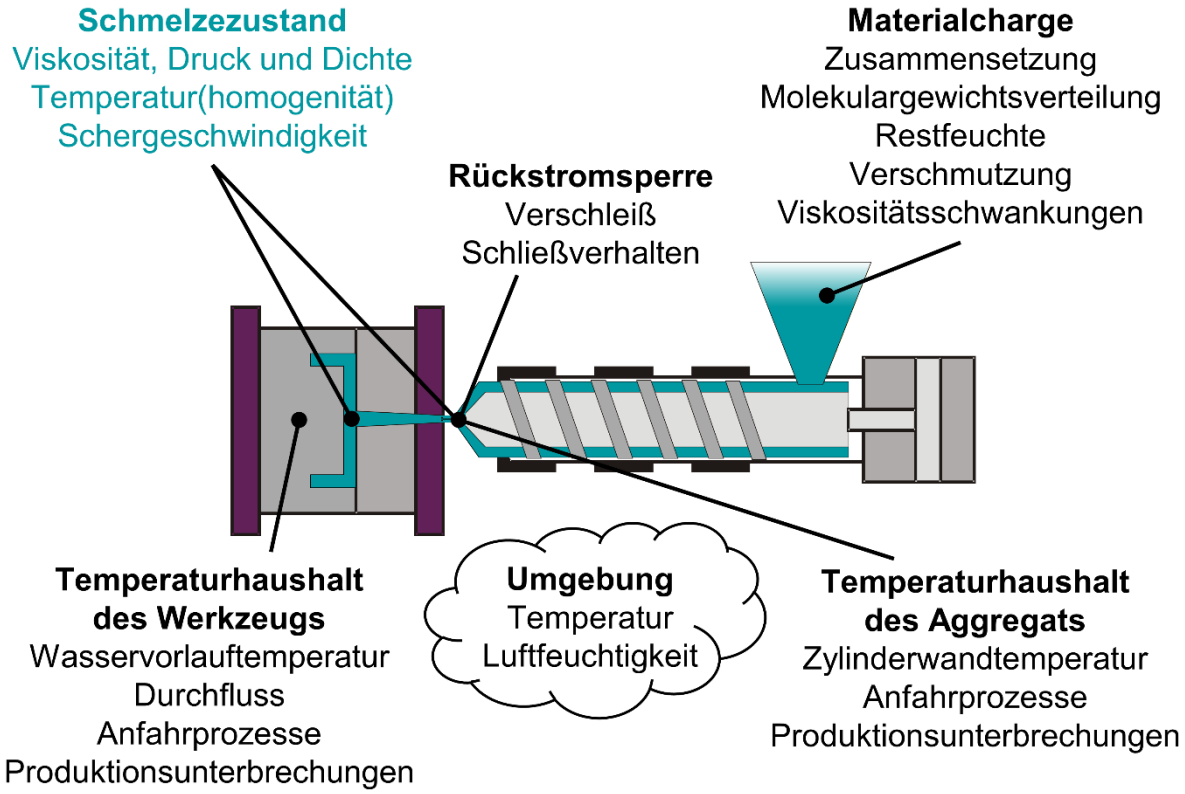

Bild 2.1: Übersicht relevanter Störgrößen, die den Schmelzezustand verändern.

Fig. 2.1: Overview of relevant disturbance variables that change the melt state.

Die Störeinflüsse können von Schuss zu Schuss oder zyklusübergreifend auftreten. Erstere Störeinflüsse sind zufällige Prozessschwankungen und variieren von Schuss zu Schuss. Beispiele hierfür sind das Schließverhalten der Rückstromsperre oder Verunreinigungen im Material. Sie verursachen eine Streuung der Bauteilqualität und sind somit für die Prozessfähigkeit ausschlaggebend [Gor09, PGS12]. Zusätzlich wirken einige Störeinflüsse über mehrere Spritzgießzyklen hinweg, wie beispielsweise ein Wechsel der Materialcharge. Die Materialeigenschaften können in Bezug auf Viskosität, Zusammensetzung, Molekulargewichtsverteilung und Restfeuchtegehalt von Charge zu Charge variieren [Kud97, KW09] und somit zu einer dauerhaften Verschiebung der mittleren Bauteilqualität (konstante Qualitätsabweichung) oder zu stärkeren Qualitätsschwankungen führen. Dies reduziert die Langzeitfähigkeit des Prozesses.

Im Folgenden werden die Ursachen typischer Störeinflüsse und deren Auswirkungen auf die Reproduzierbarkeit der Bauteilqualität aufgezeigt. Die Störgrößen werden in maschinenbedingte Prozessschwankungen, materialbedingte Prozessschwankungen und Änderungen des thermischen Haushalts unterteilt.

2.1.1 Maschinenbedingte Prozessschwankungen

Der Schmelzefluss vom Schneckenvorraum in die Kavität variiert für jeden Spritzgießzyklus, sodass keine exakte Reproduzierbarkeit von Schuss zu Schuss gegeben ist [JM04]. Zu den Störgrößen zählen u. a. das Schließverhalten der Rückstromsperre, die Deformationen von Spritzgießmaschine und Werkzeug sowie das individuelle zeitabhängige Maschinenverhalten. Zusätzlich kann das aufdosierte Schmelzevolumen variieren, da durch die Dekompression am Ende der Dosierphase eine unbekannte Schmelzemenge aus dem Schneckenvorraum zurückfließt [HK23].

Das Schließverhalten der Rückstromsperre hat einen großen Einfluss auf die Reproduzierbarkeit und wird u. a. durch die Geometrie von Schnecke und Rückstromsperre, den Kunststoff, das verwendete Werkzeug und die Maschineneinstellungen beeinflusst [GBR01, SHS13]. Zusätzlich beeinflusst die Viskosität das Schließverhalten, sodass die Rückstromsperre bei einer geringeren Viskosität später schließt [Hei14]. Solange die Rückstromsperre nicht geschlossen ist, fließt Schmelze aufgrund des hohen Drucks im Schneckenvorraum über die Schneckengänge zurück in die Meteringzone. Diese Leckageströme reduzieren die Schmelzemenge, welche in die Kavität eingespritzt wird. Durch Verschleiß können die Schwankungen der Schließzeit noch verstärkt werden, sodass Qualitätsprobleme auftreten [MXD+23].

Ein verändertes Schließverhalten der Rückstromsperre kann über den Einspritzdruckverlauf detektiert werden. Die Rückstromsperre ist geschlossen, sobald die Steigung des Einspritzdrucks stark ansteigt [GBR01, Hei14]. Darauf basierend können die Schließzeitveränderungen ausgeglichen werden, indem der wegabhängige Umschaltpunkt zyklusweise verschoben wird. Alternativ gibt es aktiv schließende Rückstromsperren, indem die Schnecke vor dem Einspritzvorgang entgegen der Plastifizierrichtung gedreht wird. Diese Systeme sind allerdings verschleißanfälliger [SHS13]. Werden druckabhängige Umschaltverfahren verwendet, können die Schwankungen im Schließverhalten der Rückstromsperre automatisch ausgeglichen werden [SKM14].

Die Deformation von Spritzgießmaschine und Werkzeug während des Einspritzvorgangs ist stark druckabhängig [HK23]. Durch die Deformation des Spritzaggregats kann das reale Schmelzevolumen im Schneckenvorraum vom Volumen, welches auf Basis der Schneckenposition berechnet wird, abweichen [MBH+90]. Die Veränderung des Schneckendrucks beträgt von Schuss zu Schuss nur wenige bar, sodass dieser Effekt vernachlässigt werden kann. Auch die individuelle Maschinendynamik kann als Störeinfluss vernachlässigt werden, solange kein Maschinenwechsel stattfindet.

2.1.2 Materialbedingte Prozessschwankungen

Der Zusammenhang zwischen den Prozessgrößenverläufen und der Bauteilqualität variiert für verschiedene Materialien [TMM+21]. Es können bereits bei der Verarbeitung verschiedener Chargen des gleichen Materials signifikante Qualitätsunterschiede auftreten, welche aufgrund schwankender Produktionsbedingungen beim Materialhersteller entstehen. Diese Chargenschwankungen können auf die unzureichende Vermischung von Materialchargen oder wechselnde Zusammensetzungen bei Rezyklaten zurückgeführt werden [HG15, Hei14]. Die Materialzusammensetzung kann produktionsbedingt oder durch Rezepturveränderungen des Materialherstellers variieren, sodass unter anderem die rheologischen, thermischen und optischen Eigenschaften des Materials verändert werden. Bei Rezyklaten können zusätzlich Fremdstoffe in variabler Zusammensetzung vorhanden sein und natürliche Prozessschwankungen von Schuss zu Schuss verstärken.

Die Herstellung von Bauteilen aus Rezyklaten wird von der Gesellschaft und der Politik immer stärker gefordert und unterstützt [NN19a, RAK17]. Die Zusammensetzung der Rezyklate wird nach DIN ISO/TR 17098:2014 vorgegeben, sodass bspw. das Material zu mindestens 94 % aus dem deklarierten Kunststoff bestehen muss [NN14]. Der verbleibende Anteil besteht aus organischen und anorganischen Fremdstoffen, wie Fremdpolymeren, Metall, Glas oder Papier. Diese Fremdstoffe führen zu Fehlstellen und variieren in ihrem Anteil von Charge zu Charge. Zusätzlich ist die Materialhistorie jeder Charge unterschiedlich und führt zu unterschiedlichen Kettenlängenverteilungen der Monomere, falls nicht ausreichend Stabilisatoren vorhanden sind. Durch den thermischen Abbau findet beispielsweise beim Massenkunststoff Polypropylen vermehrt eine Reduktion der Kettenlängen der Markomoleküle statt, sodass die Reduktion des Molekulargewichts zu einer verringerten Viskosität führt. Die Schädigung des Polymers ist dabei abhängig vom Plastifizierprozess [SLL07]. Dadurch treten schwankende Verarbeitungsbedingungen in der Spritzgießproduktion auf, welche durch die geringen Chargengrößen bei Rezyklaten häufige Prozessanpassungen erforderlich machen [BB14, MK11].

Insbesondere die Viskosität hat einen großen Einfluss auf die Schmelzetemperatur und damit auf den Spritzgießprozess und die Bauteilqualität [Fra19]. Viskositätsschwankungen können sowohl von Schuss zu Schuss als auch beim Chargenwechsel auftreten. Eine höhere Viskosität führt zu einem Anstieg des Einspritzdrucks. Durch die veränderten Fließeigenschaften ist eine Anpassung des Umschaltpunkts zwischen Einspritz- und Nachdruckphase notwendig [Hei14]. Das Einspritzintegral und der maximale Schneckendruck können für verschiedene

Materialklassen unterschiedlich sein, auch wenn die Viskosität identisch ist. Daher ist ein Vergleich der Viskosität nur innerhalb einer Materialklasse sinnvoll [LPH+22].

Somit sind Inkonsistenzen in den Materialeigenschaften eine große Herausforderung insbesondere bei der Verarbeitung von PCR. Die Auswirkungen auf die Verarbeitbarkeit sind von mehreren Materialkennwerten abhängig, die den Prozesszustand und damit die Bauteilqualität beeinflussen und von Schuss zu Schuss sowie insbesondere beim Chargenwechsel variieren können.

2.1.3 Änderungen im thermischen Haushalt des Spritzgießprozesses

Der Wärmehaushalt während eines Spritzgießzyklus wird dynamisch durch den Kunststoff, das Wärmeaustauschmedium, die Maschine und die Umgebung beeinflusst. Schwankungen in den thermischen Produktionsbedingungen sind häufig die Ursache von Qualitätsveränderungen bei der Verarbeitung von Neuware. Die Wärmeströme von Aggregat und Werkzeug sind in Bild 2.2 aufgezeigt. Die Bilanzgrenze wird um das Werkzeug und um das Aggregat gelegt, um die jeweiligen thermischen Haupteinflüsse abzubilden.

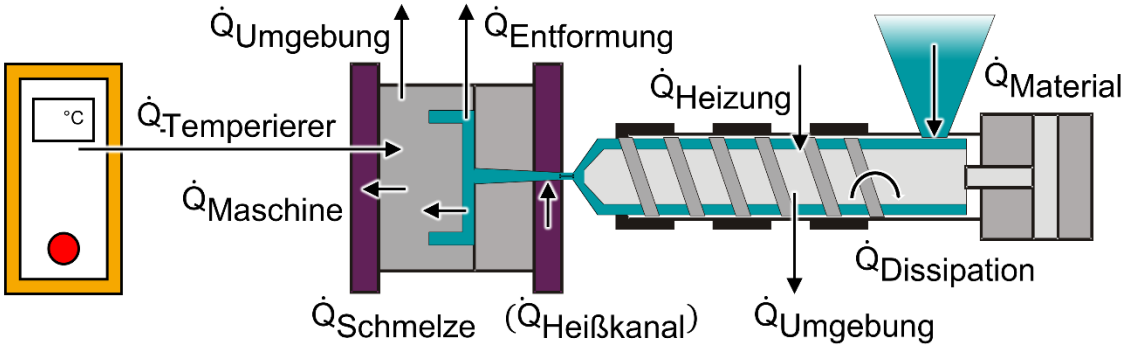

Bild 2.2: Vereinfachte Darstellung der dynamischen Wärmeströme in Aggregat und Werkzeug.

Fig. 2.2: Simplified illustration of the dynamic heat flow in injection unit and mould.

Der Wärmehaushalt von Aggregat und Werkzeug erreicht nach dem Anfahrvorgang einen quasi stationären Zustand, solange die dynamischen Wärmeströme konstant bleiben. Thermische Veränderungen werden durch Schwankungen der Wärmeströme verursacht und können unterschiedliche Auswirkungen auf die Qualitätsmerkmale von Spritzgießbauteilen haben.

2.1.3.1 Schmelze- und Werkzeugtemperatur

Schwankungen der Zylinder- und Werkzeugtemperatur werden durch Mess- und Regelschwankungen bedingt und betragen wenige Grad. Sie entstehen durch das träge Regelstreckenverhalten, da Temperaturänderungen von Werkzeug- und Zylinderstahl nur langsam und zeitverzögert erfolgen trotz hoher Wärmeleitfähigkeit des Stahls [HG15]. Die Massetemperatur der Kunststoffschmelze resultiert zu einem Großteil aus der Dissipationsenergie, welche durch die rotatorische Schneckenbewegung in der Dosierphase entsteht. Zusätzlich sind an der Außenseite des Zylinders elektrische Heizbänder angebracht, die eine Beeinflussung der Zylindertemperatur ermöglichen. Die Massetemperatur im Schneckenvorraum ist örtlich und zeitlich inhomogen und kann um mehrere Grad variieren [Gor07]. Die Schwankungen der Temperaturverteilung von Schuss zu Schuss sind jedoch eher gering, sodass im eingeschwungenen Prozesszustand von einem gleichbleibenden Wärmeeintrag der Kunststoffschmelze in das Spritzgießwerkzeug ausgegangen werden kann [JM04]. Das Werkzeug wird durch den Wärmeaustausch mit der Kunststoffschmelze und dem Wärmetauschmedium erwärmt [YCL+16]. Gleichzeitig gibt das Werkzeug Wärme an die Spritzgießmaschine ab, die sich ebenfalls erwärmt [Cat79]. Bei den meisten Spritzgießverfahren hat das Werkzeug eine höhere Temperatur als die Umgebung, sodass kontinuierlich Wärme vom Spritzgießwerkzeug an die Umgebung abgegeben wird.

In den Kühlkanälen des Spritzgießwerkzeugs können mit der Zeit mineralische Ablagerungen und Korrosionsschichten gebildet werden, die zu lokal verringerter Kühlleistung führen. Die niedrigere Wärmeleitfähigkeit der gebildeten Schichten und der effektiv geringere Kühlkanaldurchmesser senken die Wärmeabfuhr. Neben einer erhöhten Restkühlzeit kann die Ausschussquote erheblich zunehmen. Durch Beschichtungen, korrosionsbeständige Stähle oder eine Vorbehandlung des Kühlmediums kann die Auswirkung von Ablagerungen deutlich verringert bzw. durch die regelmäßige Werkzeugwartung verhindert werden [HG15, Gri10].

2.1.3.2 Umgebungseinflüsse

Der Einfluss der Produktionsumgebung auf den Spritzgießprozess ist wenig erforscht, da die Umgebungsbedingungen nur schwer kontrollierbar sind. *Westerdale und Kazmer* stellten fest, dass sowohl eine höhere Umgebungstemperatur als auch eine höhere relative Luftfeuchte zu schwereren Bauteilen führen. Die Umgebungsbedingungen wurden dabei durch natürliche Wetterveränderungen variiert [WK08]. Wenn die Produktionshalle nicht klimatisiert ist, können somit Tages- und

Jahreszeit die Bauteilqualität beeinflussen. Auch ein geöffnetes Hallentor führt zu Umgebungsschwankungen und kann die Reproduzierbarkeit der Bauteilqualität verringern.

Die Untersuchung von Umgebungseinflüssen auf die Bauteilqualität ist im industriellen Umfeld leichter umsetzbar, wenn Prozess- und Qualitätsdaten aus der Produktion für viele Produktionsaufträge über einen längeren Zeitraum bereitstehen. Die aktuellen Bestrebungen zur Vernetzung der Spritzgießproduktion könnten somit weitere Erkenntnisse zu Umgebungseinflüssen bringen, indem die gesammelten Produktionsdaten unter Berücksichtigung der Umgebungsdaten analysiert werden.

Dabei ist die Platzierung der Sensoren zur Erfassung der Umgebungsbedingungen entscheidend. Die Abwärme der Spritzgießmaschinen und Peripheriegeräte beeinflusst neben der Temperatur auch die Aufzeichnung der Druck- und Luftfeuchtigkeitsverhältnisse. Die Luftfeuchtigkeit hat einen direkten Einfluss auf den Prozess, indem sie die Wiederaufnahme von Wasser bei hygroskopischen Kunststoffen beeinflusst [HG15].

2.1.3.3 Produktionsunterbrechung und Anfahrvorgänge

Zur Vermeidung von Ausschuss in der Serienproduktion wird der Prozess häufig über Prozessgrößen wie das Restmassenpolster oder den maximalen Einspritzdruck überwacht, um Veränderungen im Prozess rechtzeitig zu erkennen und in den Prozess einzugreifen. Erfolgt der Prozesseingriff jedoch zu spät oder kann die Ursache der Prozessveränderung nicht ermittelt und kompensiert werden, verlassen die überwachten Parameter das vorgegebene Prozessfenster und die Produktion wird unterbrochen, um die Anzahl an Ausschussteilen zu reduzieren. Ungeplante Produktionsunterbrechungen können ebenfalls eintreten, wenn Bauteile nicht richtig entformt werden und ein manueller Eingriff erforderlich ist. Der Anfahrprozess nach einer solchen Unterbrechung oder zu Beginn eines neuen Produktionsauftrags kann über einen erheblichen Zeitraum hinweg zu einem kontinuierlichen Driften der Bauteilqualität führen und einen Großteil des Produktionsausschusses beim Spritzgießen verursachen [KW09, YCL+16].

Während eines Maschinenstillstands nimmt die Verweilzeit der Kunststoffschmelze zu. Falls ein materialabhängiger Schwellwert der Verweilzeit überschritten wird, findet beim Massenkunststoff Polypropylen ein signifikanter Abbau der Polymerketten bzw. eine Depolymerisation statt [DHM22]. Dadurch wird die Schmelzequalität während der ersten Anfahrzyklen negativ beeinflusst. Die Bauteile werden zur Vermeidung von Fehlfunktionen als Ausschuss deklariert [Bic12].

Es erfolgt ein kontinuierlicher Wärmeaustausch zwischen Maschine und Werkzeug [HHV+21, YCL+16], bis ein zyklisches Gleichgewicht zwischen Wärmezufuhr und -abfuhr besteht [DH91]. Thermische Veränderungen während einer Produktionsunterbrechung können über Thermoelemente in der Kavität detektiert werden [HHV+21].

Je nach Maschine, Werkzeug, Material und Umgebungsbedingungen kann der Anfahrprozess nach einer Produktionsunterbrechung mehrere Stunden dauern, bis ein stabiler Zustand erreicht ist. Der Temperaturverlust während des Produktionsstillstands ist bei kurzen Zykluszeiten von größerer Bedeutung, da mehr Zyklen erforderlich sind, bis das thermische Gleichgewicht wieder erreicht ist. Bei einer größeren zu temperierenden Werkzeugmasse werden längere Zeiten benötigt, um konstante Temperaturdifferenzen zwischen Vorlauf und Rücklauf zu erhalten, welche auf eine thermische Stabilität des Werkzeugs hindeuten [GM16].

2.2 Prozessführung im Spritzgießen

Die Prozessführung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Spritzgießverfahrens. Neben einer manuellen Anpassung der Maschinenparameter (konventionelle Prozessführung) können diese automatisiert angepasst werden (Einsatz von Assistenzsystemen) oder es kann eine direkte Regelung von Prozessgrößen erfolgen (Werkzeuginnendruckregelung). Der automatisierte Ausgleich von Störeinflüssen und von Schuss zu Schuss auftretenden Prozessschwankungen erhöht die Produktivität des Verfahrens, da die Ausschussquote durch rechtzeitige Prozessanpassungen reduziert werden kann.

Nach einer Beschreibung der konventionellen Prozessführung im Spritzgießen werden Assistenzsysteme vorgestellt, welche maschineninterne Regler nutzen, um Störeinflüsse im Prozess auszugleichen. Die Ansätze nutzen Prozessdaten der Einspritzphase des aktuellen Spritzgießzyklus, um Umschaltpunkt und Nachdruck anzupassen. Es werden sowohl Ansätze aus der Forschung, als auch kommerzielle Produkte der Maschinenhersteller diskutiert. Im abschließenden Unterkapitel wird mit der phasenübergreifenden Werkzeuginnendruckregelung ein Konzept vorgestellt, welches den Druck in der Kavität über dem gesamten Spritzgießzyklus anhand einer Referenzkurve regelt.

2.2.1 Konventioneller Spritzgießprozess

Die Füllung der Werkzeugkavität erfolgt über eine geschwindigkeitsgeregelte Einspritzphase und eine druckgeregelte Nachdruckphase. Nach dem Schließen der Rückstromsperre sowie der Kompression des Kunststoffs wird mit einer konstanten Geschwindigkeit eingespritzt. Sobald die Kavität volumetrisch gefüllt ist, wird auf die Kompressions- und Nachdruckphase umgeschaltet, in welcher der Hydraulikdruck im Einspritzzylinder bei einer hydraulischen Spritzgießmaschine bzw. die auf die Schnecke wirkende Kraft bei einer elektrischen Spritzgießmaschine geregelt wird.

Zum Ausgleich der Materialschwindung wird häufig ein konstanter Nachdruck aufrechterhalten, bis der Siegelpunkt erreicht ist. Zu diesem Zeitpunkt ist die Schmelze im Anguss erstarrt, sodass kein Material in die Kavität nachgefördert werden kann. Maschineninterne Regelkreise stellen dabei sicher, dass die Maschinengrößen reproduzierbare Verläufe aufweisen, sodass Produktionsschwankungen unter 0,1 Gew.% üblich sind [JM04]. Unter identischen Prozessbedingungen würde dies zu identischen Bauteilen in jedem Zyklus führen [TBF+18].

Der Umschaltpunkt zwischen Einspritzphase und Nachdruckphase hat einen großen Einfluss auf das Bauteilgewicht und die geometrischen Abmessungen [CZH21]. Bei Störungen verschiebt sich der optimale Umschaltpunkt, sodass die Schwellwertvorgabe für das Umschaltsignal angepasst werden muss. Der Automatisierungsgrad ist gering, weshalb manuelle Prozessanpassungen vom Maschinenbediener vorgenommen werden. Falls keine Anpassung erfolgt, können Qualitätsprobleme am Bauteil auftreten.

Die Überwachung des richtigen Umschaltpunkts kann über den Werkzeuginnendruck erfolgen. Beispielsweise weist eine Spitze im Werkzeuginnendruck am Ende der Kompressionsphase auf einen zu späten Umschaltpunkt zwischen Einspritzphase und Nachdruckphase hin. Dies kann am Bauteil durch Spritzgrate sichtbar werden und wirkt sich auf Orientierungen und Eigenspannungen im Bauteil aus. Wird der Umschaltpunkt zu früh gesetzt, führt ein Werkzeuginnendruckabfall in der Kompressionsphase zu einer Verlangsamung der Fließfront. Kommt die Fließfront zum Stillstand, kann dies als Umschaltmarkierung auf dem Bauteil sichtbar werden. Zusätzlich können anisotrope Orientierungen, Umschaltmarkierungen und Einfallstellen auftreten [Jar19].

Der Umschaltpunkt wird zur Prozesseinrichtung anhand einer Füllstudie experimentell ermittelt. Dadurch können Reaktionszeiten von Maschinensteuerung, Spritzeinheit und bedarfsweiser Sensorik berücksichtigt werden [Jar19]. Es gibt eine Vielzahl an Umschaltkriterien, um von der Einspritzphase auf die Nachdruckphase umzuschalten. Ein Vergleich zwischen den Umschaltverfahren wurden bereits mehrfach durchgeführt [EDT03, Gor09, HH20, Hua07, KVW+10, WPY11].

In der Praxis wird das schneckenpositionsabhängige Umschaltverfahren am häufigsten eingesetzt. Darauf folgt mit einem einstelligen prozentualen Anteil das werkzeuginnendruckabhängige Umschaltverfahren. Beide Verfahren weisen eine vergleichbare hohe Reproduzierbarkeit auf [KVW+10]. Die Reproduzierbarkeit wird beim positionsabhängigen Umschaltverfahren durch Dosierschwankungen und Änderungen im Schließverhalten der Rückstromsperre stark beeinflusst, da an einem definierten Positionswert der Schnecke umgeschaltet wird [Sch11]. Beim werkzeuginnendruckabhängigen Umschaltverfahren wird bei einem definierten Schwellwert des Werkzeuginnendrucks umgeschaltet. Dies hat den Vorteil, dass Schwankungen in der Einspritzphase, wie das Schließverhalten der Rückstromsperre, ausgeglichen werden können [SKM14]. Das Verfahren weist allerdings eine hohe Viskositätsabhängigkeit auf [Sch11]. Nachteilig ist zusätzlich der Einsatz teurer Sensorik, die in direkt messender Ausführung Markierungen auf der Bauteiloberfläche

hinterlässt. Daher ist der Einsatz von Sensorik im Spritzgießwerkzeug meist nur wirtschaftlich, wenn diese zusätzlich zur optimierten Prozessführung eingesetzt wird [KVW+10].

Auch temperaturabhängige Umschaltverfahren wurden in der Forschung untersucht. Jedoch reagieren Thermoelementen aufgrund der Kontakttemperaturmessung sehr träge, sodass das temperaturabhängige Umschaltverfahren im Vergleich zu den anderen Verfahren eine geringe Reproduzierbarkeit aufweist [KVW+10]. Infrarotsensoren haben eine sehr kurze Reaktionszeit und erlauben daher eine präzise Umschaltung [Kud97]. Allerdings sind die Sensoren sehr empfindlich und teuer, sodass Infrarotsensoren hauptsächlich in der Forschung eingesetzt werden.

Während der Spritzgießproduktion verschiebt sich der ideale Umschaltzeitpunkt, sobald Prozessveränderungen auftreten. Aufgrund häufiger Qualitätsprobleme ohne die manuelle Anpassung des Umschaltpunkts werden fortwährend weitere Umschaltmethoden entwickelt, welche den Umschaltpunkt automatisiert anhand von Prozessdaten anpassen [CLH19, CZH21, Hei14, Hua07, SKM14, XXF+22]. Alle Umschaltverfahren haben jedoch gemein, dass am Umschaltpunkt ein harter Wechsel der Regelgröße stattfindet. Dadurch ist der Prozesszustand während der hochdynamischen Kompressionsphase zum Umschaltzeitpunkt nicht eindeutig definiert und ein Wechsel zwischen verschiedenen Einspritzphasen prozesstechnisch nicht ideal [Ste20].

2.2.2 Assistenzsysteme für die konventionelle Prozessführung

Bei der konventionellen Prozessführung können veränderte Prozessbedingungen zu Ausschussteilen führen, falls die Maschineneinstellungen nicht angepasst werden. Zur Prozesseinrichtung und -anpassung wurden verschiedene Lösungsansätze und Assistenzsysteme entwickelt, um Störgrößen unter der Nutzung maschineninterner Regler automatisiert ausgleichen zu können. Dadurch kann der Automatisierungsgrad der Spritzgießproduktion erhöht werden, sodass kein manueller Eingriff des Maschinenbedieners notwendig ist. Im Folgenden werden zunächst einige Verfahren aus der Forschung zur automatisierten Prozessanpassung vorgestellt. Anschließend folgen Verfahren, welche im industriellen Umfeld eingesetzt werden.

Referenzverfahren über den Einspritzdruck

Zum Ausgleich von Schwankungen der Viskosität und des Schließverhaltens der Rückstromsperre hat *Heinzler* ein adaptives Regelungskonzept entwickelt [Hei14]. Der Schließzeitpunkt der Rückstromsperre wird über einen Einspritzdruck von 100 bar

definiert. Zum Ausgleich von Viskositätsschwankungen wird simulativ der Einspritzdruckverlauf für einen Referenzbetriebspunkt abgeleitet und an der Spritzgießmaschine eingestellt, sodass bei Viskositätsunterschieden der Umschaltzeitpunkt verschoben wird. Dementsprechend resultiert aus der Druckvorgabe ein höherer Einspritzvolumenstrom für niedrige Viskositäten, sodass der Umschaltpunkt früher erreicht wird. Der Nachdruck wird auf Basis des resultierenden Einspritzvolumenstroms angepasst.

Druckdifferenz im Heißkanal

Bei einem weiteren Konzept zum Ausgleich von Viskositätsschwankungen wurden im Heißkanal zwei Drucksensoren platziert. Auf Basis der Druckdifferenz wurde ein Fuzzly-Regler implementiert, sodass der Schmelzezustand durch eine Anpassung von Einspritzvolumenstrom und Heißkanaltemperatur konstant gehalten werden konnte [HDH+19, HH17]. Für dieses Verfahren sind jedoch zwei Sensoren im Heißkanal erforderlich.

Druckdifferenz im Werkzeug

Vasco et al. haben eine externe Maschinensteuerung entwickelt, welche das Einspritzvolumenstromprofil auf Basis des Druckunterschieds zwischen zwei Werkzeuginnendrucksensoren von Schuss zu Schuss anpasst [VMO+23]. Dadurch konnten im Vergleich zum konventionellen Spritzgießprozess geringere Nachdrücke realisiert werden, um die Energieeffizienz zu steigern. Das Prozessfenster wird in Abhängigkeit von der kritischen materialspezifischen Scherrate bestimmt. Wenn das Prozessfenster über mehrere Zyklen hinweg verlassen wird, führt dies zu einem Stillstand der Maschine, um Ausschussteile zu vermeiden.

Überwachung der Holmdehnung

Zur Qualitätsüberwachung und adaptiven Prozessanpassung wurde von *Chen et. al.* ein Konzept entwickelt, welches Prozessveränderungen durch die Messung der Holmdehnung über Dehnungsmessstreifen detektiert [CZH21]. Der Vorteil von DMS liegt in den geringen Kosten, der einfachen Anwendbarkeit und dem werkzeugunabhängigen Einsatz ohne Markierungen auf der Bauteiloberfläche. Bei einer verringerten Materialviskosität wird während der Einspritzphase mehr Schmelze in die Kavität eingespritzt, sodass die maximalen Schließkraft ansteigt, welche am Umschaltpunkt erreicht wird. Aufgrund der Schließkrafterhöhung wird der Umschaltvorgang früher eingeleitet und der Nachdruck stufenweise reduziert. Es werden insgesamt 13 Zyklen benötigt, um Abweichungen zu detektieren und auszugleichen.

Trendanalyse aufeinanderfolgender Spritzgießzyklen

Weiterhin wurden Algorithmen entwickelt, um den Prozesszustand anhand von Daten vorheriger Spritzgießzyklen zu bewerten. Die Prozessdaten des aktuellen Zyklus werden mit einer definierten Anzahl an Prozessdaten vorheriger Zyklen in ein Regressionsmodell eingebunden, um eine Trendanalyse der Qualität durchzuführen [ZH22]. Die Methodik wurde nur für einen Spritzgießprozess mit dem Bauteilgewicht als Qualitätsgröße vorgestellt und ist daher nicht erprobt.

APC plus

Das patentierte Verfahren „APC plus“ wurde vom Maschinenhersteller KraussMaffei Technologies GmbH, München entwickelt [Kru15, NN17]. Abweichungen im aktuellen Prozesszustand werden durch den Vergleich mit einer materialspezifischen Kompressionskurve erkannt, um Schwankungen der Viskosität auszugleichen. Die Fließfähigkeit der Schmelze wird dabei während der Einspritzphase anhand von Kennzahlen bewertet. Die Grenzen des Messbereichs werden an dynamische Effekte angepasst und die Schmelzekompression berücksichtigt. Der Umschaltvorgang erfolgt, sobald ein variabel berechnetes Einspritzvolumen erreicht wird. Auch der Nachdruck wird angepasst.

iQ weight control

Das Assistenzsystem iQ weight control der Firma ENGEL AUSTRIA GmbH, Schwertberg, Österreich, gleicht Prozessschwankungen aus, um ein konstantes Bauteilgewicht zu erreichen. Dazu wird der Einspritzdruckverlauf mit einer Referenzkurve verglichen, und das Einspritzprofil und der Umschaltzeitpunkt werden bei detektierten Abweichungen für denselben Schuss angepasst. Dadurch erfolgt der Umschaltvorgang bei gleichem Füllstand und Volumenstrom wie im Referenzzyklus [PGS12]. Gewichtsveränderungen aufgrund einer veränderten Viskosität oder Umgebungsschwankungen können durch eine Anpassung des Nachdrucks direkt kompensiert werden [NN18]. Die Einstellgrößen können begrenzt werden, sodass regulatorischen Vorgaben, wie sie beispielsweise in der Medizintechnik gefordert sind, berücksichtigt werden. iQ weight control führt zu einem Maschinenstillstand zur Vermeidung von Ausschussteilen, sobald die Grenzwerte überschritten werden [RL19].

Imflux

Das Assistenzsystem von Imflux Inc., Hamilton, USA, kann herstellerübergreifend auf verschiedenen Spritzgießmaschinen eingesetzt werden. Zu den Funktionen des Systems zählen die Regelung des Volumenstroms in Abhängigkeit von einer

Masterkurve für den Schneckenwegverlauf [NN19f], die Anpassung des Schneckendrucks in Einspritz- und Nachdruckphase auf Basis einer Werkzeuginnendruckvorhersage [NN19e] oder die Vorgabe einer Werkzeuginnendruckreferenz durch die Regelung des Schneckenvorraumdrucks [NN19d], um prozessseitige Veränderungen auszugleichen. Der Ausgleich von Viskositätsunterschieden ist gezielt durch die Regelung des Zeitpunkts möglich, zu dem der Werkzeuginnendrucksensor erreicht wird [NN16]. Die Einrichtung des Systems erfordert allerdings einen sehr hohen Versuchsaufwand für neue Spritzgießprozesse.

2.2.3 Prozessführung über eine Werkzeuginnendruckregelung

Durch die direkte Regelung von Prozessgrößen können Unsicherheiten und Störungen während der Kavitätsfüllung besser ausgeglichen werden als bei der Regelung von Maschinengrößen. Durch die erhöhte Prozessstabilität können die optimalen Grenzen des Prozessfensters besser ausgenutzt werden. Während bei der konventionellen Prozessführung hauptsächlich PID-Regler zum Einsatz kommen, sind für die Regelung von Prozessgrößen fortgeschrittene Regelungsansätze erforderlich, um das nichtlineare Materialverhalten zu berücksichtigen. Dadurch kann der Automatisierungsgrad insbesondere bei komplexen Prozessen erhöht werden. Vielversprechende Ansätze sind iterativ lernende Regler (ILR) und modellprädiktive Regler (MPR) [TBF+18].

Iterativ lernende Ansätze werden bisher nur zur Regelung des Werkzeuginnendrucks in der Nachdruckphase eingesetzt [HAH+17, LWN+10]. Ein Einsatz der MPR wurde sowohl für die Einspritzphase [Dub01] als auch für die Nachdruckphase [RSH+14] und die Restkühlphase [PDS06] untersucht. Weiterhin gibt es kombinierte Ansätze, die Einspritz- und Nachdruckphase über den Werkzeuginnendruck regeln [Gru05, MS09]. Zwischen den Prozessphasen findet jedoch weiterhin ein diskreter Umschaltvorgang statt. Der erste phasenvereinende Regelansatz, bei dem der Werkzeuginnendruck als Regelgröße für beide Prozessphasen verwendet wird, umfasst einzelne Modelle für die Einspritz- und Nachdruckphase, zwischen denen über den angussfernen Werkzeuginnendruck umgeschaltet wird. Der Umschaltvorgang erfolgt jedoch vor der vollständigen Kavitätsfüllung durch eine Überblendung von einer maximalen Volumenstromvorgabe zu einer Werkzeuginnendruckvorgabe, sodass in den Prozessgrößenverläufen kein Umschaltvorgang zu erkennen ist [SAV+19]. Alle Verfahren haben gemein, dass für jede Prozessphase ein eigenes Prozessmodell notwendig ist.

Eine Weiterentwicklung der phasenvereinenden Regelung verwendet ein gemeinsames Prozessmodell für die Einspritz- und Nachdruckphase, um den Umschaltvorgang auch regelungstechnisch zu eliminieren. Dadurch wird kein angussferner Werkzeuginnendrucksensor benötigt, sodass das Verfahren wirtschaftlicher wird. Außerdem kann ein Sprung in der Stellgröße durch falsche Prozesseinstellungen vermieden werden. Zudem ermöglicht die Online-Parameterabschätzung einen arbeitspunktunabhängigen Ansatz [VSH+22].

Für den Ausgleich von Störeinflüssen ist ein Qualitätsmodell zur Prozessführung erforderlich, welches den Zusammenhang zwischen Bauteilqualität und Prozesszustand abbildet. In der Nachdruckphase kann die Berechnung der Werkzeuginnendruckreferenz basierend auf dem Materialverhalten erfolgen. Der materialspezifische Zusammenhang zwischen Druck, Temperatur und spezifischem Volumen wird über ein pvT-Modell beschrieben und zur Vorgabe des Werkzeuginnendrucks eingesetzt.

Die Idee einer Werkzeuginnendruckregelung anhand des materialspezifischen pvT-Verhaltens wurde am IKV bereits in den 80er Jahren entwickelt, war jedoch zu diesem Zeitpunkt technisch nicht zufriedenstellend umsetzbar [ML89, NN90]. Das pvT-Verhalten von Kunststoffen, insbesondere teilkristalliner Thermoplaste, ist für die späteren Bauteileigenschaften im Spritzgießen relevant. Dabei wird das spezifische Bauteilvolumen über ein druck- und temperaturabhängiges Kennfeld beschrieben. Der ideale Prozessverlauf ist in Bild 2.3 gezeigt.

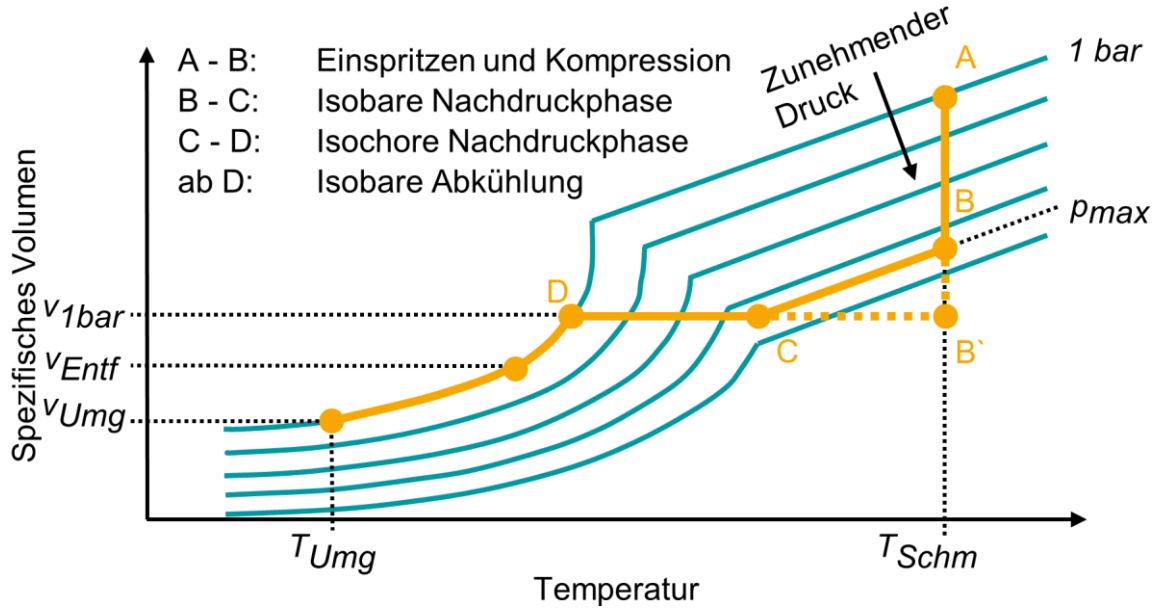

Bild 2.3: Werkzeuginnendruckverlauf bei der pvT-Optimierung.

Fig. 2.3: Cavity pressure curve with pvT-optimisation.

In der Einspritzphase wird isotherm eingespritzt (A → B`). Anschließend soll das spezifische Volumen während der gesamten Nachdruckphase konstant gehalten werden (B` → D), um Orientierungen und fließbedingte Eigenspannungen zu minimieren [HRH+16]. Der maximale Werkzeuginnendruck wird durch die Maschinenspezifikation und die Steifigkeit des Spritzgießwerkzeugs begrenzt. Zu hohe Drücke sind daher nicht wirtschaftlich, können zu einer Beschädigung des Werkzeugs führen und reduzieren die Lebensdauer des Werkzeugs. Der isochore Prozessverlauf wird durch einen isobaren Prozessverlauf ersetzt, indem ein konstanter Werkzeuginnendruck bis zum Erreichen des gewünschten spezifischen Volumens aufrechterhalten wird (B → C). Der Werkzeuginnendruckverlauf wird über die Berechnung der Schmelzetemperatur (Gleichung 2.1) angepasst [Jar19]. Dabei entspricht *s* der mittleren Bauteildicke und a_{eff} der effektiven Temperaturleitfähigkeit.

$$T(t) = T_{Wkz} + (T_S - T_{Wkz}) * \frac{8}{\pi^2} * e^{-a_{eff}*(\pi/s)^2*t} \qquad \textit{(Gl. 2.1)}$$

Die Abkühlung des Bauteils erfolgt isobar, sobald der Werkzeuginnendruck auf den Umgebungsdruck abgefallen ist. Das gleiche spezifische Volumen soll bei Atmosphärendruck in jedem Zyklus zu einer konstanten lokalen Schwindung führen. Die pvT-optimierte Prozessführung ist lokal idealisiert, da sowohl über der Bauteildicke als auch über dem Fließweg ein unterschiedliches Temperatur- und Druckprofil vorherrscht. Die Inhomogenität führt zu lokal verschiedenen spezifischen Volumina und dementsprechend zu anderen Verläufen im pvT-Diagramm [HRH+16]. Das Bauteilgewicht kann über das spezifische Volumen, die Dichte des verwendeten Kunststoffs sowie das Bauteilvolumen berechnet werden. Dabei wird das spezifische Volumen bei Atmosphärendruck (D) als Zielgröße für die pvT-Optimierung verwendet, sodass über die Vorgabe des spezifischen Volumens das Zielgewicht bestimmt wird. Durch die lokalen Unterschiede im Bauteil sowie die Materialdatenbestimmung unter prozessfernen Bedingungen im Labor bestehen Abweichungen zwischen dem berechneten spezifischen Volumen und dem realen spezifischen Volumen, woraus eine Abweichung des Bauteilgewichts vom Zielgewicht folgt. Daher ist eine iterative, experimentelle Bestimmung der Vorgabe für das spezifische Volumen erforderlich, um das gewünschte Bauteilgewicht zu erzielen.

Die Regelung des Werkzeuginnendrucks unter Verwendung der pvT-Optimierung als Qualitätsmodell wurde kontinuierlich weiterentwickelt [Gru05, MS07, MS09]. Im Vergleich zur konventionellen Prozessführung konnten Veränderungen des Bauteilgewichts aufgrund von thermischen Schwankungen deutlich reduziert werden [Sch11]. Das Konzept wurde von *Stemmler* weiterentwickelt, indem sowohl Einspritz-

als auch Nachdruckphase über einen vorgegebenen Verlauf für den Werkzeuginnendruck geregelt werden. Dazu wurde sowohl eine modellbasierte, prädiktive Regelung als auch eine iterativ lernende Regelung implementiert. Für die Modellierung werden physikalisch basierte Prozessmodelle für Einspritz- und Nachdruckphase eingesetzt. Die volumetrische Kavitätsfüllung wird durch einen angussfernen Werkzeuginnendrucksensor detektiert, um zwischen den Modellen für beide Prozessphasen umzuschalten. Es konnte eine Regelgüte von ± 2 bar Genauigkeit erreicht werden. Dadurch wurden die Gewichtsunterschiede durch thermische Schwankungen noch weiter reduziert [Ste20].

2.3 Zwischenfazit

Während der Spritzgießproduktion können verschiedene Störeinflüsse auftreten, die Prozessschwankungen verursachen. Dadurch verändert sich der Schmelzezustand in der Kavität, sodass die Bauteileigenschaften variieren. Zur Detektion maschinenbedingter und materialbedingter Prozessschwankungen sowie eines eingeschwungenen Prozesszustands werden häufig zyklisch protokollierte Werte relevanter Prozessgrößen, wie der maximale Spritzdruck, die Dosierzeit oder das Restmassepolster, betrachtet. Diese punktuellen Messwerte besitzen jedoch keine direkte Korrelation zur resultierenden Bauteilqualität [GM16, HHV+23]. Vielmehr ist es erforderlich die Prozessgrößenverläufe während des gesamten Spritzgießzyklus zu analysieren, um den Schmelzezustand im Werkzeug durch Prozessanpassungen konstant zu halten, sodass Qualitätsschwankungen reduziert werden.

Es wurden industrielle Assistenzsysteme vorgestellt, welche eine höhere Reproduzierbarkeit gegenüber der konventionellen Prozessführung für den Ausgleich von Störeinflüssen aufweisen. Dazu werden die Maschinenparameter automatisch angepasst, sobald Veränderungen in den Prozessgrößenverläufen detektiert werden. Allerdings sind diese Verfahren der Regelung von Prozessgrößen, insbesondere des Werkzeuginnendrucks, unterlegen, da im Werkzeug gemessene Größen eine höhere Korrelation zur Bauteilqualität aufweisen und somit zur Prozessregelung zu bevorzugen sind. Die Assistenzsysteme bilden nur den Arbeitsbereich ab, der durch die hinterlegten Modelle beschrieben wird. Für neue Spritzgießprozesse ist somit ein hoher Versuchsaufwand zur Einrichtung der Systeme erforderlich. Die Verfahren automatisieren die Umschaltmethodik, jedoch existiert weiterhin ein diskreter Umschaltvorgang. Bei stark abweichenden Arbeitsbedingungen ist eine eingeschränkte Verwendbarkeit der phasenbasierten Modelle zu erwarten.

In vergangenen Forschungsarbeiten wurde eine Werkzeuginnendruckregelung entwickelt, die ein hohes Potential zum Ausgleich thermischer Störeinflüsse zeigt [Ste20]. Die Übertragung auf industrierelevante Prozesse und Qualitätsmerkmale erfolgte bislang nicht. Es wurden in allen vorgestellten Arbeiten einfache Bauteile und niedrigviskoses Material verwendet und ausschließlich das Bauteilgewicht als Qualitätsmerkmal betrachtet. Als Störeinflüsse sind nur thermische Veränderungen von Werkzeug und Zylinder untersucht worden, wobei weitere Störeinflüsse einen entscheidenden Einfluss auf die Bauteilqualität haben können. Das Verfahren aus [VSH+22] bzw. [Ste20] soll daher im Rahmen dieser Arbeit mit einem Qualitätsmodell kombiniert werden, welches ebenfalls materialbedingte Störeinflüsse berücksichtigt. Zusätzlich erfolgt die Übertragung auf bisher nicht untersuchte Materialien, Bauteile und Qualitätsgrößen.

3 VERSUCHSAUFBAU

Dieses Kapitel beschreibt die verwendete Anlagentechnik und Software zur Werkzeuginnendruckregelung. Anschließend werden die verwendeten Probekörper, Materialien und Prüfmethoden vorgestellt, die zur Bewertung der Prozessführungskonzepte eingesetzt werden.

3.1 Anlagentechnik und Software

Alle Versuche dieser Arbeit werden an einer Spritzgießmaschine des Typs 520A 1500-400 ALLDRIVE mit einem Schneckendurchmesser von 35 mm und einer Nadelverschlussdüse des Herstellers Arburg GmbH & Co. KG, Loßburg, durchgeführt. Die verbauten Servoumrichter AMKASYN KW der Firma AMK Arnold Müller GmbH, Kirchheim unter Teck, ermöglichen die Vorgabe externer Spannungssignale, sodass eine direkte Regelung des Einspritzvolumenstroms möglich ist.

Die Regelung erfolgt in Echtzeit mit einer Abtastrate von 125 Hz über den Real Time Controller NI PXI-8108 mit dem FPGA-Modul NI PXI-782R des Herstellers National Instruments (NI), Austin, USA. Alle verwendeten Regler wurden in der Software MATLAB/Simulink der Firma MathWorks, Natick, USA, implementiert und über C-Code in der Software LabVIEW des Herstellers NI eingebunden.

Zur simultanen Abfrage von Sensordaten sind drahtlose Schnittstellen etabliert. Das Protokoll „Message Queue Telemetry Transport“ (MQTT) ermöglicht den Datentransfer auch bei hohen Latenzen und niedrigen Bandbreiten, sodass es ideal für die Datenaufzeichnung mehrerer Umgebungssensoren in der Spritzgießhalle geeignet ist [Nas17]. Die Maschinendaten werden von der Spritzgießmaschine über die Software „Apache Kafka“ der Apache Software Foundation, Forest Hill, USA, in Form eines JSON-Clusters an das Topic eines MQTT-Brokers übertragen. Zur Messung von Umgebungstemperatur, Luftfeuchte und Luftdruck werden zwei Sensoren des Typs „XDK 110“ der Firma Robert Bosch GmbH, Gerlingen, eingesetzt. Eine Messstelle ist direkt an der Spritzgießmaschine positioniert. Der zweite Sensor wird so platziert, dass die Messung nicht durch die Abwärme von Spritzgießmaschinen oder die Lüftung der Halle beeinflusst wird. Beide Sensoren übertragen die Daten an ein weiteres Topic des MQTT-Brokers. Alle Daten des MQTT-Brokers können in LabVIEW abgerufen werden. Die Auswertung der zyklusbezogenen Daten und der Prozessgrößenverläufe zur Kennzahlgenerierung erfolgt mit der Software MATLAB und wird in Kapitel 14.4 detaillierter vorgestellt. Zur Speicherung der Daten besteht eine direkte Anbindung an eine SQL-Datenbank.

3.2 Verwendete Bauteile und Materialien

In dieser Arbeit werden zwei Bauteilgeometrien unterschiedlicher Komplexität untersucht. Das Bauteil „Platte“ weist eine sehr einfache Geometrie auf und hat eine Dicke von 2 mm bei einer Länge von 140 mm und einer Breite von 90 mm. Das Bauteil wird über einen Stangen- und Filmanguss gefüllt und hat ein Volumen inkl. Anguss von 31,2 cm³, siehe Bild 3.1. Aus dem Plattenbauteil werden Zugprüfkörper ausgestanzt, um die mechanischen Eigenschaften zu bewerten.

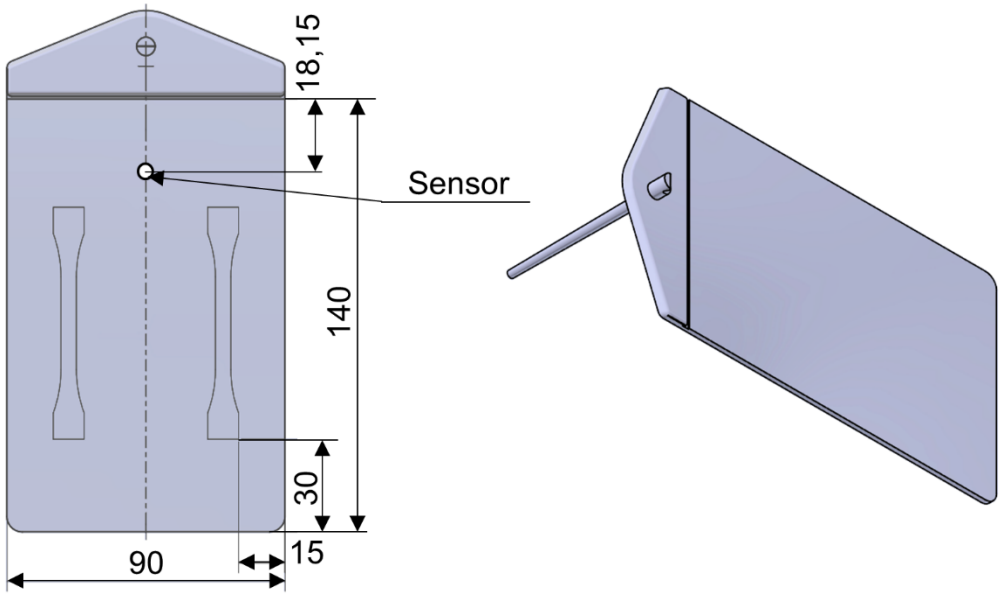

Bild 3.1: Bauteil „Platte“ mit Sensorposition und Lage der ausgestanzten Prüfkörper.

Fig. 3.1: Part “Plate” with position of sensor and punched test specimens.

Das komplexe Bauteil „Verzugsprobekörper“ weist Aussparungen, Laschen und Rippenstrukturen auf, welche die Prüfung verschiedener Abmessungen zur Bewertung der Maßhaltigkeit ermöglichen. Das Bauteil wird über einen Stranganguss zentral gefüllt und weist ein Gesamtvolumen von 49,7 cm³ bei Wanddicken zwischen 1,3 mm und 2 mm auf. Das Bauteil mit eingezeichneter Sensorposition und Prüfmerkmalen ist in Bild 3.2 dargestellt. In beiden Werkzeugen wird angussnah ein kombinierter Werkzeuginnendruck- und Temperatursensor des Typs 6190CA der Firma Kistler Instrumente GmbH, Winterthur, Schweiz, verbaut und zur Prozessregelung eingesetzt.

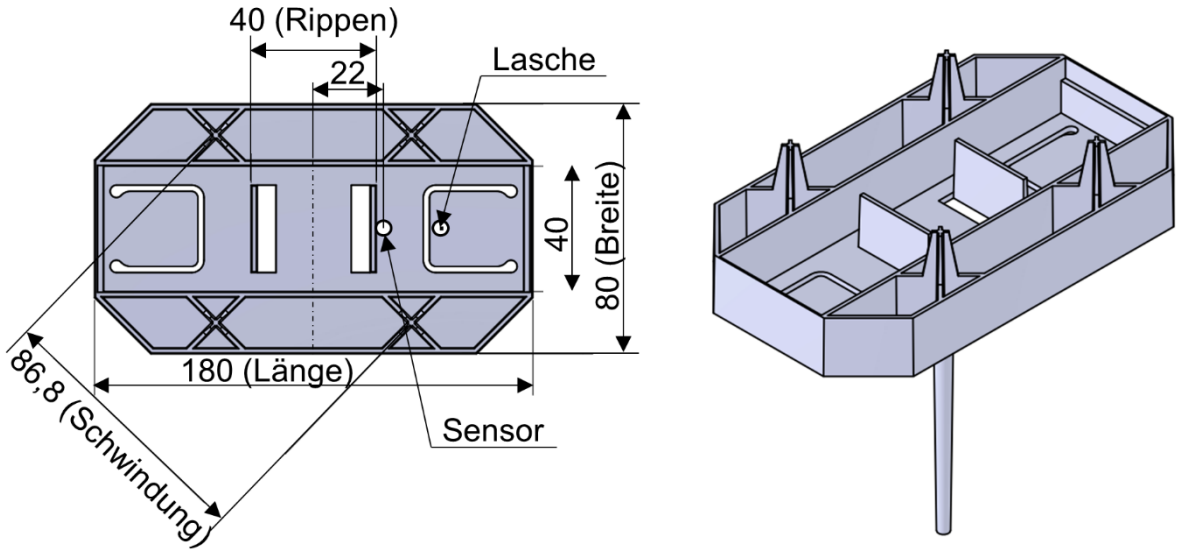

Bild 3.2: Bauteil „Verzugsprobekörper“ mit Sensorposition und Angabe der Prüfmaße.

Fig. 3.2: Part “Warpage part” with sensor position and specification of the test dimensions.

In den Untersuchungen werden drei Typen Polypropylen eingesetzt. Das unverstärkte Polypropylen (PP-UV) vom Typ PP579 S der Firma Sabic Deutschland GmbH & Co. KG, Düsseldorf wurde in der Forschungshistorie zur Entwicklung der Prozessregelung eingesetzt, sodass eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu den bisherigen Forschungsarbeiten besteht. Das Material wird vorrangig für Dünnwandverpackungen eingesetzt und ist daher für die ausgewählten Bauteilgeometrien nicht repräsentativ. Zudem ist das Material lichtdurchlässig, sodass für eine optische Bauteilvermessung das Additiveren von Farbpartikeln oder eine Vorbehandlung der Oberfläche erforderlich ist.

Als zweites Material wird ein talkumverstärktes Polypropylen (PP-TV) vom Typ Hostacom X M2 U34 des Herstellers Lyondellbasell Industries, Rotterdam, Niederlande, verwendet. Es weist eine höhere Formstabilität und Hitzebeständigkeit als unverstärktes PP auf und wird hauptsächlich im Automobilsektor eingesetzt. Das Material ist schwarz eingefärbt, sodass eine optische Bauteilvermessung ohne Vorbehandlung der Bauteile möglich ist. Vor den Spritzgießversuchen wird das Material gemäß der Herstellerangabe für 3 Stunden bei 80 °C vorgetrocknet.

Zur Untersuchung von Materialschwankungen bei der Verarbeitung von Post Consumer Rezyklaten (PCR) wurden insgesamt fünf Rezyklatchargen vom Typ Systalen PP-24000 gr000 der Firma Systec Plastics GmbH, Köln, verarbeitet. Die Chargen weisen Viskositätsunterschiede von bis zu 20% auf, siehe Kapitel 14.1.

3.3 Methoden zur Bestimmung der Bauteilqualität

Als Qualitätsmerkmale werden das Bauteilgewicht, die Bauteildimensionen und die mechanischen Eigenschaften untersucht. Die Bauteile werden mit einer Präzisionswaage des Typs LA620S der Firma Sartorius AG, Göttingen, mit einer Genauigkeit von 1 mg gewogen. Die Abmessungen der Verzugsprobekörper aus PP-TV und PP-PCR werden über das 3D-Vermessungssystem ATOS Q der Carl Zeiss GOM Metrology GmbH, Braunschweig, mit einer Genauigkeit von 0,02 mm bestimmt. Ein Vergleich mit dem 3D-Modell des Spritzgießbauteils ermöglicht die Auswertung der Bauteilabmessungen. Das 3D-Modell entspricht der Bauteilgeometrie bei einer Schwindung von 1,5 %.

Die Zugproben zur mechanischen Prüfung werden aus dem Plattenbauteil in Anlehnung an DIN EN ISO 2818:2019 ausgestanzt [NN19b]. Dazu werden je Platte zwei Zugproben des Typs 1BA nach DIN EN ISO 527-2:2012 längs zur Fließrichtung ausgestanzt [NN12]. Die mechanische Prüfung erfolgt in Anlehnung an DIN EN ISO 527-1:2019 mit der Universalprüfmaschine des Typs Z150, einer Kraftmessdose des Typs XforceHP mit einer Nennlast von 1 kN und einem MultiXtens Dehnungsaufnehmer der Firma ZwickRoell AG, Ulm. Die Prüfgeschwindigkeit wird bei einer Traversengeschwindigkeit von 0,5 mm/min konstant gehalten, sodass eine Dehnrate von 2 %/min resultiert [NN19c].

4 REGELUNGSKONZEPT FÜR DIE PHASENÜBERGREIFENDE WERKZEUGINNENDRUCKREGELUNG

Bei der Prozessführung auf Basis einer Werkzeuginnendruckregelung ist die Regelgüte für die Einstellbarkeit der Bauteilqualität entscheidend. Eine hohe Reproduzierbarkeit des Werkzeuginnendruckverlaufs geht mit einer reproduzierbaren Bauteilqualität einher. Die Referenz für den Werkzeuginnendruck muss dabei eine arbeitspunktunabhängige hohe Reproduzierbarkeit der Bauteilqualität ermöglichen und somit robust gegenüber Störungen sein. Die hohen Anforderungen an die Qualität spritzgegossener Bauteile und die nichtlineare, zeitvariable Dynamik der Prozessgrößenverläufe erfordern dazu den Einsatz höherer Regelungsverfahren.

Im Folgenden wird das Regelungskonzept dieser Arbeit beschrieben, welches auf einer modellprädiktiven Regelung zur Stellgrößenberechnung und einem Kalman-Filter zur Zustandsschätzung beruht. Das Prozesswissen ist in physikalisch motivierte Modelle zur Prozessregelung überführt, sodass der aktuelle Prozesszustand über gewöhnliche Differentialgleichungen abgebildet wird [Ste20, SAV+19]. Die sogenannten Zustandsraummodelle können dabei direkt aus physikalischen Gleichungen abgeleitet und zur Laufzeit auf Basis aktueller Messdaten angepasst werden. Der Regelungsansatz wurde bereits mehrfach weiterentwickelt (u.a. in [VSH+22, VSA+22]), um die Robustheit zu erhöhen und den Einstellaufwand zu reduzieren. Dazu wurde beispielsweise ein adaptiver Tuningparameter eingeführt, welcher Modellunsicherheiten zur Laufzeit abbilden kann.

Der in dieser Arbeit verwendete Regelansatz ist im Folgenden zusammengefasst. Eine detaillierte Beschreibung der Modellgleichungen erfolgt in *Vukovic et. al.* [VSH+22, VSA+22]. Einziger Unterschied zur Literatur ist die Einführung eines Schwindungsparameters für die Volumenstrombilanz der Kavität. Die regelungstechnische Weiterentwicklung ist Bestandteil einer zeitnah geplanten Dissertation des Instituts für Regelungstechnik, sodass für weiterführende Informationen darauf verwiesen wird [Vuk24*].

Der adaptive Regler wird über fünf Parameter definiert, welche von Maschine, Material und Werkzeug abhängig sind und somit für jeden Prozess neu eingestellt werden müssen. Bei manueller Parametrierung ist der zeitliche Aufwand hoch und eine hohe Expertise des Maschinenbedieners erforderlich. Daher wird eine Bayes´sche Optimierung zur automatisierten Parametrierung verwendet, welche eine schnelle und einfache Einrichtung des Reglers ermöglicht.

4.1 Aufbau des Regelkreises

Bei der phasenvereinenden Werkzeuginnendruckregelung werden Einspritz- und Nachdruckphase über den Werkzeuginnendruck als Regelgröße geregelt. Einzige Stellgröße ist hierbei die Schneckenvorschubgeschwindigkeit. Dadurch findet kein Umschalten zwischen verschiedenen Prozessphasen statt. Der Vorteil ist, dass Qualitätseinbußen durch einen Wechsel der Regelgröße und damit einhergehend dem falschen Umschaltzeitpunkt vermieden werden.

Für die phasenvereinende Werkzeuginnendruckregelung wird ein externer Regler verwendet, welcher aus einer adaptiven modellprädiktiven Regelung (aMPR) und einem Unscented Kalman-Filter (UKF) besteht. Als Stellgröße **U** wird die Steuerspannung am Umrichter der Einspritzachse vorgegeben. Die Korrelation zwischen Steuerspannung und Schneckenvorschub kann durch ein System 2. Ordnung (PT_2) beschrieben werden. Die Parameter zur Beschreibung des Übertragungsverhaltens werden in einem Sprungversuch maschinenspezifisch bestimmt. Dadurch ist die direkte Vorgabe des Einspritzvolumenstroms als Stellgröße möglich. Die Regelgröße **Y** ist der Werkzeuginnendruck. Die Referenz des Werkzeuginnendrucks $\mathbf{p_{ref}}$ wird über ein Qualitätsmodell in Abhängigkeit von den Prozessbedingungen berechnet. Der Zustandsvektor **X** wird über den UKF zur Laufzeit anpasst, und beschreibt den aktuellen Prozesszustand zur Prozessmodellierung. Mit einer definierten Abtastzeit werden neue Stellsignale für den Einspritzvolumenstrom vorgegeben, um den Werkzeuginnendruck entsprechend der Referenzvorgabe zu regeln. Die Regelkreisstruktur ist in Bild 4.1 dargestellt.

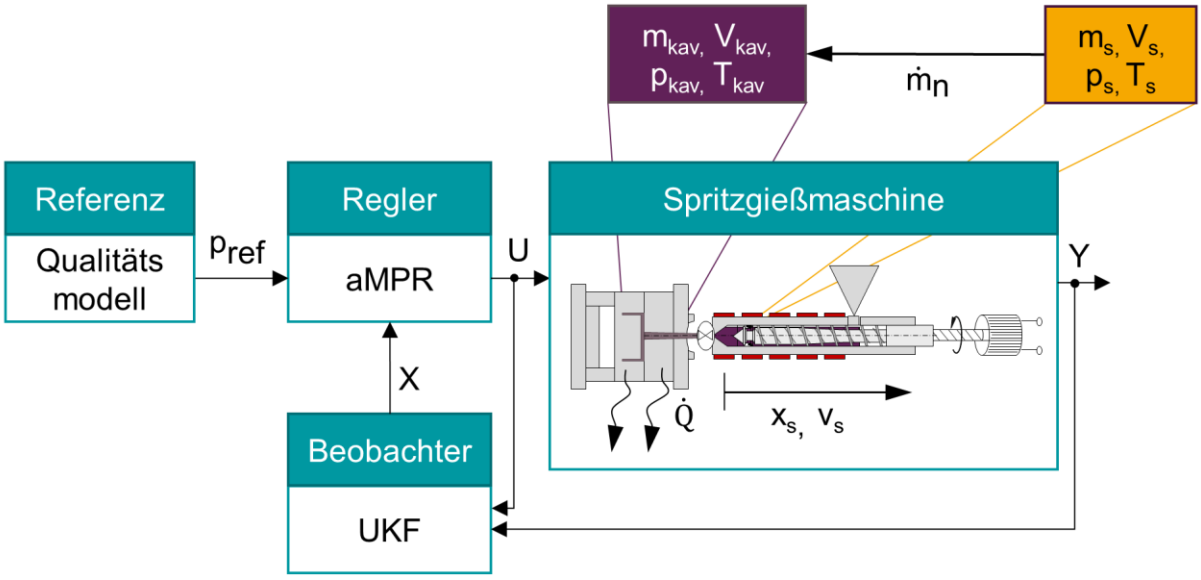

Bild 4.1: Aufbau des Regelkreises

Fig. 4.1: Structure of the control loop

Modellprädiktive Regler können Vorhersagen über das zukünftige Prozessverhalten auf Basis eines Prozessmodells treffen, welches in dieser Arbeit auf Messdaten und Schätzungen des aktuellen Systemzustands basiert. Über den sog. Prädiktionshorizont wird das zukünftige Prozessverhalten (und damit der Werkzeuginnendruckverlauf) für die nächsten Abtastschritte geschätzt. Ziel ist, durch Lösung des Optimierungsproblems eine Kostenfunktion zu minimieren. Die Kostenfunktion entspricht hier einer Minimierung des Abstands zwischen aktuellem Werkzeuginnendruck und der Werkzeuginnendruckreferenz über die gesamte Regeldauer. Zusätzlich wird die Stellgrößenänderung zwischen zwei Abtastschritten bewertet, damit große Sprünge im Einspritzvolumenstromverlauf verhindert werden. Für den Stellhorizont der Steuerspannung wird dazu eine Abfolge der Stellsignale für die nächsten Abtastschritte berechnet. Die Prädiktion mehrerer Stellsignale ermöglicht die Vermeidung großer Stellsignalsprünge, da ein längerer Zeithorizont betrachtet wird [KC15]. Das erste Stellsignal wird zur Regelung eingesetzt. Der Vorgang wird für den nächsten Abtastschritt auf Basis der neu verfügbaren Messgrößen, welche durch den UKF für eine aktuelle Schätzung des Zustands bewertet werden, wiederholt. Der Abtastschritt muss lang genug gewählt werden, sodass Zustandsschätzung und Optimierung des Stellsignals abgeschlossen sind. Dadurch wird der Unterschied zwischen vorhergesagter und tatsächlicher Systemantwort minimiert.

Das Prozessmodell muss ausreichend genau sein, um eine gute Prädiktion des Systemverhaltens über dem Prädiktionshorizont zu liefern. Dazu wird das nichtlineare Druckübertragungsverhalten von Kunststoffschmelzen explizit berücksichtigt. Der Spritzgießprozess wird durch ein physikalisch basiertes Grey-Box Modell beschrieben, welches gemeinsam für Einspritz- und Nachdruckphase verwendet wird. Der Schneckenvorraum (Index s) und die Kavität (Index kav) werden dabei als Druckbehälter modelliert und der Schmelzefluss über Druckaufbaugleichungen beschrieben. Der Druckaufbau im Schneckenvorraum wird durch die Auswertung der Prozessgrößenverläufe von Schneckenposition und Einspritzvolumenstrom zur Laufzeit angepasst. Der Druckaufbau in der Kavität setzt sich aus dem eingehenden Schmelzefluss und einem theoretischen negativen Volumenstrom zusammen, der die Materialschwindung abbildet. Der Kompressionsmodul der Schmelze ist variabel und wird zur Laufzeit anhand der Prozessgrößenverläufe geschätzt. Dadurch können Einflüsse von Material, Maschineneinstellung und Bauteilgeometrie auf den Druckaufbau in der Kavität berücksichtigt werden, ohne diese explizit zuvor zu ermitteln. Die Strömung der Schmelze durch Düse und Angusskanal wird als stationäre, isotherme und laminare Strömung eines newtonschen Fluids beschrieben.

Die Viskosität wird anhand von Prozessdaten bis zur volumetrischen Füllung approximiert, sodass keine Viskositätsdaten über das Material vorliegen müssen.

Im Spritzgießen kann der Prozesszustand nicht vollständig über Sensorik abgebildet werden. Kalman-Filter schätzen nicht messbaren Prozessgrößen auf Basis von Messdaten und ermöglichen somit eine Beschreibung des aktuellen Prozesszustands. Beispielweise werden Druck und Temperatur im Werkzeug nur lokal bestimmt, obwohl ein dreidimensionales Druck- und Temperaturfeld im Bauteil vorherrscht. Auch die Schmelzetemperaturverteilung im Schneckenvorraumkann kann nicht über Sensorik erfasst werden. Die genannten Prozessgrößen weisen eine hohe Korrelation zur Bauteilqualität auf und sind somit zur Prozessführung wichtig. Ein UKF verwendet nichtlineare Approximationsmethoden zur Berechnung, um eine hohe Genauigkeit für die Zustandsschätzung des nichtlinearen dynamischen Systems zu erhalten. Er berechnet eine Korrektur des Prozessmodells auf Basis der aktuellen Maschinen- und Sensorsignale. Die Beschreibung des dynamischen Systems umfasst auch die mittleren quadratischen Unsicherheiten, die aus zufälligen dynamischen Störungen und Messrauschen der Sensoren resultieren [GA15].

Zur Prozessregelung können Beschränkungen von Stellgrößen und Prozessgrößen berücksichtigt werden. Bei der Werkzeuginnendruckregelung wird die maximale Steuerspannung begrenzt, sodass bis zum Anstieg des Werkzeuginnendrucks ein maximaler Einspritzvolumenstrom vorgegeben wird. Anschließend erfolgt die Überblendung zu einer Werkzeuginnendruckvorgabe, sobald kleinere Stellsignale als die Beschränkung berechnet werden. Der Werkzeuginnendruckverlauf wird durch die Lösung des Optimierungsproblems für die nächsten Abtastschritte prädiziert und eine Stellsignalfolge für die Steuerspannung ausgegeben. Der Vorgang wird wiederholt, bis eine einstellbare Nachdruckzeit erreicht ist.

4.2 Automatisierte Reglerparametrierung mittels Bayes´scher Optimierung

Bei der Einrichtung neuer Spritzgießprozesse ist eine Anpassung der Parametrierung des Reglers erforderlich, da Werkzeug-, Maschinen- oder Materialwechsel einen erheblichen Einfluss auf das Antwortverhalten der Regelstrecke aufweisen [MG05]. Die adaptive MPR verfolgt den Ansatz, dass keine Informationen über den verarbeiteten Kunststoff oder das verwendete Werkzeug durch den Anwender bereitgestellt werden müssen. Stattdessen wird der Regler über einen Parametersatz $\boldsymbol{\theta}$ von fünf Parametern prozessspezifisch eingestellt, welche die Dynamik des Reglers, die Stetigkeit des Steuersignals und die Robustheit der Regelgüte gegenüber

Veränderungen im Spritzgießprozess beeinflussen. Die adaptive Eigenschaft des Reglers gewährleistet eine effiziente Übertragbarkeit auf neue Spritzgießprozesse.

Die beiden Model-Tuning-Parameter K_η und $V_{c,l}$ sind maßgeblich für die Dynamik des Reglers verantwortlich. K_η ist ein Skalierungsfaktor für die Viskosität. Der Schwindungsparameter $V_{c,l}$ berücksichtigt das Schwindungsverhalten der Kunststoffschmelze und wurde eingeführt, um Regelabweichungen bei langen Nachdruckzeiten zu verringern.

Der Skalierungsfaktor für die Zeitdiskretisierung τ beeinflusst die Länge des Prädiktionshorizonts. Die Parameterkovarianz Q_d beschreibt die Sensitivität der Parameterschätzung und wirkt als Skalierungsfaktor für K_η. Die Stellgrößengewichtung R sagt aus, wie stark die Stellgröße (in diesem Fall die Steuerspannung) zwischen den Abtastschritten verändert werden darf. Höhere Werte lassen geringe Sprünge im Stellgrößenverlauf zu.

Für alle fünf Parameter wird ein Wertebereich vorgegeben, um den Suchbereich einzugrenzen und damit die Parametrierung effizienter zu gestalten. Weiterhin wird ein unsicheres Regelverhalten während der Optimierung ausgeschlossen, welches zu Schäden an Spritzgießmaschine und Werkzeug führen kann. Die Grenzwerte sind in Tabelle 3.1 aufgelistet.

	K_η	τ	R	Q_d	$V_{c.l}$
$\boldsymbol{\theta_{max}}$	100	50	10000	10000	1
$\boldsymbol{\theta_{min}}$	30	15	1000	1000	0

Tabelle 4.1: Grenzwerte der Regelparameter.

Table 4.1: Limits of the control parameters.

Für die Einstellung der fünf Regelparameter gibt es verschiedene Methoden, die auf Expertenwissen oder maschinellen Lernverfahren beruhen. Zur manuellen Bestimmung der Regelparameter ist Expertenwissen erforderlich, um die Auswirkung von Parameteränderungen und deren Wechselwirkung richtig zu bewerten. Diese Methode ist zeitaufwändig und kann im Vergleich zu automatisierten Einstellmethoden zu schlechteren Ergebnissen führen.

Für die Nutzung automatisierter Methoden kann die Einstellung der Regelparameter als Black-Box Optimierungsproblem formuliert werden, um eine möglichst gute Parametrierung mit einer geringen Anzahl an Iterationen zu finden. Die Bayes´sche Optimierung (BO) kann bereits mit einer geringen Anzahl von Datenpunkten effektiv

lernen und dadurch die Einrichtzeit für neue Prozesse reduzieren [LP21, TEM+21]. Die Regelgüte wird dabei über (konstante) Regelabweichungen und das Folgeverhalten bewertet. Aus den Verläufen von Einspritzvolumenstrom und Werkzeuginnendruck können Bewertungskriterien abgeleitet werden, die in Form einer Kostenfunktion $J(\boldsymbol{\theta})$ das Optimierungsproblem darstellen. Diese berücksichtigt als Integral sowohl Druckspitzen J_{os}, als auch Abweichungen von der Werkzeuginnendruckreferenz J_e, siehe Bild 4.2.

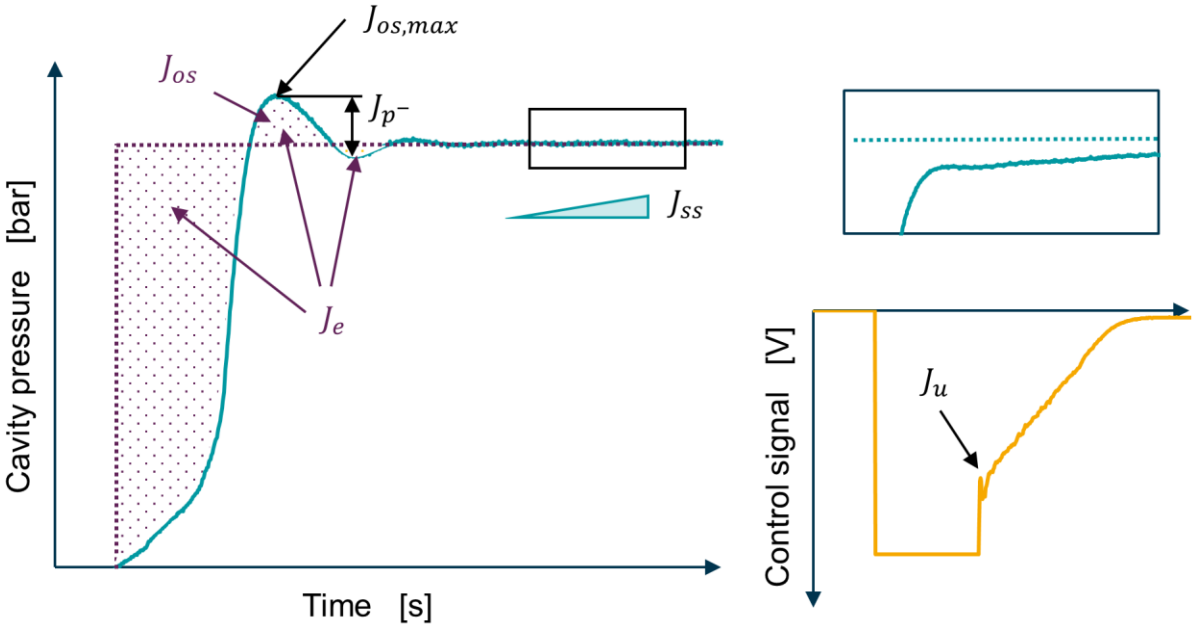

Bild 4.2: Bewertung der Regelgüte

Fig. 4.2: Evaluation of controller performance

Die Optimierungsgewichtung zwischen beiden Kriterien stellt immer einen Kompromiss dar, da beide Parameter eine gegensätzliche Reglerparametrierung erfordern. Während für die schnellstmögliche Füllung ein aggressives Regelverhalten erforderlich ist, wird für geringe Druckspitzen ein konservatives Regelverhalten gefordert. Das Ziel ist ein optimaler Parametersatz $\boldsymbol{\theta}^*$, welcher die Kostenfunktion minimiert, siehe Gleichung 4.1.

$$\boldsymbol{\theta}^* = \min J(\boldsymbol{\theta}) = \min \left(J_\mathrm{e} + {J_\mathrm{os}}^2\right) \qquad \textit{(Gl. 4.1)}$$

$$u.d.B.$$

$$J_\mathrm{p}{}^- \leq 8\ bar$$

$$J_\mathrm{os,max} \leq 5\ bar$$

$$J_\mathrm{u} \leq 0{,}01\ V$$

$$J_\mathrm{ss} \leq 2{,}5\ \frac{bar}{s}$$

Es können zusätzliche Beschränkungen der Systemantworten vorgegeben werden, um die allgemeine Nutzbarkeit der Optimierungslösung sicherzustellen. Falls eine oder mehrere der Randbedingungen nicht eingehalten werden, gilt die Lösung als nicht zulässig. Beispielsweise können elektronische Einlegeteile bei einer zu hohen Druckbeaufschlagung beschädigt werden. Somit wäre der maximale Werkzeuginnendruck eine notwendige Randbedingung. Zu den Randbedingungen zählen:

- Vermeidung von Oszillation J_p^-
- Maximales Überschwingen des Werkzeuginnendrucks $J_{os,\,max}$
- Stetigkeit im Verlauf des Einspritzvolumenstroms J_u
- Realisierung stationärer Druckwerte J_{ss}

Ein Vorteil der Bayes´schen Optimierung ist, dass Unsicherheiten in der vorliegenden Datenbasis berücksichtigt werden. Die sog. Acquisition Function bewertet die zu erwartende Gütefunktion auf Basis der zur Verfügung stehenden Versuchsdaten sowie der Unsicherheit in den Daten. Dabei wird zwischen Exploration (d.h. der Erkundung von Bereichen mit großer Messunsicherheit) und Exploitation (d.h. der näheren Betrachtung von Bereichen, wo eine geringe Kostenfunktion erwartet wird) abgewogen. In dieser Arbeit wird die Funktion Expected Improvement verwendet.

Datenpunkte werden durch empirisches Austesten ausgewählter Parameterkombinationen erhalten. Dazu werden 15 Optimierungszyklen für jede Kombination aus Material und Werkzeug durchlaufen. Als Startbedingung der Bayes´schen Optimierung werden in den ersten beiden Optimierungsschritten die Grenzwerte des Parametersatzes $\boldsymbol{\theta}$ untersucht. Die finalen Regelparameter sind in Kapitel 14.2 aufgelistet.

4.3 Begriffskonvention

Bei der phasenübergreifenden Prozessführung existiert keine klare Trennung zwischen den einzelnen Prozessphasen. Vom Start des Einspritzens bis zum Erreichen des Siegelpunktes wird der Werkzeuginnendruck über den Schneckenvorschub als Stellgröße geregelt. Die Begriffe Einspritz-, Kompressions- und Nachdruckphase werden jedoch weiterhin verwendet, um den Prozesszustand in Anlehnung an die konventionelle Prozessführung zu beschreiben.

Regelungstechnisch wird die Steuerspannung der Einspritzachse als Stellgröße verwendet, um den Werkzeuginnendruck zu regeln. Die Steuerspannung entspricht einem Einspritzvolumenstrom und weist aufgrund des Koordinatensystems

(Schneckenposition = 0 bei aufgebrauchtem Restmassepolster) ein negatives Vorzeichen auf. Im Folgenden wird der Begriff Einspritzvolumenstrom äquivalent zur Vorgabe der Steuerspannung verwendet, wobei der Einspritzvolumenstrom aus der Umsetzung des Spannungssignals im Umrichter vorgegeben wird.

Die gesamte Regeldauer t_{ges} setzt sich aus zwei Zeiten zusammen, welche durch unterschiedliche Randbedingungen definiert sind (vgl. Gleichung 4.2).

$$t_{ges} = t_{ein} + t_{nach} \qquad \textit{(Gl. 4.2)}$$

Die Einspritzdauer t_{ein} wird über einen Schwellwert von 5 bar bei Erreichen des Sensors beendet. Schwankungen in der Einspritzphase, welche u.a. durch das Schließverhalten der Rückstromsperre entstehen, können somit über die variable Dauer kompensiert werden. Die Nachdruckzeit t_{nach} wird durch den Bediener vorgegeben und kann durch eine Abbruchbedingung im Regelalgorithmus verkürzt werden. Die diskrete Unterteilung hat im Gegensatz zum konventionellen Umschaltvorgang keinen negativen Einfluss auf die Bauteilqualität, da bis zur volumetrischen Bauteilfüllung ein konstanter Einspritzvolumenstrom vorgegeben wird.

Zur Temperaturmessung ist im Werkzeug ein direkt messendes Thermoelement des Typs K verbaut, das die Kontakttemperatur zwischen Schmelze und Werkzeug misst. Der Messwert entspricht somit nur direkt vor dem Einspritzvorgang näherungsweise der mittleren Werkzeugtemperatur. In der Arbeit wird die Bezeichnung Werkzeugtemperatur verwendet, obwohl eine Kontakttemperatur gemessen wird.

Abschließend werden die Begriffe offline, inline und online am Beispiel einer Regelung definiert, da diese in Veröffentlichungen teilweise anders definiert werden [HCK+22]. Für eine offline Regelung werden Daten aus Spritzgießversuchen gesammelt und separat ausgewertet. Die neuen Parametersätze werden anschließend an der Maschine eingestellt, jedoch nicht direkt während der Produktion angepasst. Demgegenüber entspricht eine inline Regelung einer Prozessanpassung von Schuss zu Schuss z.B. auf Basis der Daten aus dem vorherigen Spritzgießzyklus. Bei einer online Regelung wird der Prozess in annähernd Echtzeit während der Bauteilentstehung oder dem Dosierprozess angepasst. Dadurch kann die Bauteilqualität für den aktuellen Zyklus beeinflusst werden.

5 EINFLUSS DER WERKZEUGINNENDRUCKREFERENZ AUF DIE BAUTEILQUALITÄT

Die prozessspezifische Referenzvorgabe für den Werkzeuginnendruck ist entscheidend zur Erzielung der geforderten Qualitätsvorgaben. Die Einstellung der Bauteilqualität und der Ausgleich von Störeinflüssen erfordert Stellgrößen für den Werkzeuginnendruckverlauf. Diese Stellgrößen müssen inline bzw. online einstellbar sein und eine Qualitätsregelung ermöglichen.

Die Beschreibung der Werkzeuginnendruckreferenz über Skalare, Geraden und physikalische Modelle reduziert die Anzahl einzustellender Parameter, siehe Bild 5.1. Der maximale Einspritzvolumenstrom $\dot{V}_{max}$ kann nach oben begrenzt werden, um zu hohe Scherraten im Material zu verhindern. Ein unterer Grenzwert für den Einspritzvolumenstrom ($\dot{V}_{min} > 0$) kann einen negativen Einspritzvolumenstrom zum schnelleren Druckabbau in der Kompressionsphase verhindern. Zusätzlich kann die Referenz des Werkzeuginnendrucks in den einzelnen Prozessphasen angepasst werden.

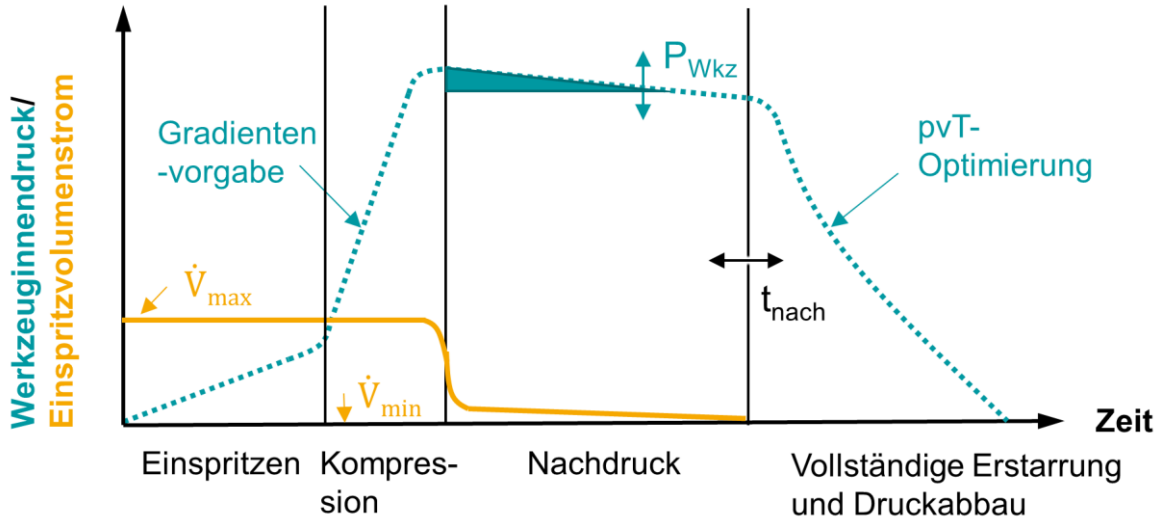

Bild 5.1: Stellgrößen von Einspritzvolumenstroms und Werkzeuginnendruckreferenz.

Fig. 5.1: Manipulated variables of injection volume flow rate and cavity pressure reference.

Im Folgenden wird der Zusammenhang zwischen den Stellgrößen und der Bauteilqualität untersucht. Ausgehend vom Stand der Technik werden dazu repräsentative Referenzvorgaben abgeleitet und die Maßhaltigkeit sowie die mechanischen Bauteileigenschaften gegenübergestellt. Dabei werden die Prozessphasen Einspritzen, Kompression, Nachdruck und Bauteilerstarrung isoliert betrachtet. Die Ergebnisse sollen die Ableitung qualitätsoptimierter Werkzeuginnendruckreferenzen ermöglichen. Zusätzlich können geeignete Stellgrößen zur gezielten Anpassung des Werkzeuginnendruckverlaufs bei Störeinflüssen ausgewählt werden.

5.1 Einspritzphase

Der Zeitpunkt der volumetrischen Bauteilfüllung, welcher anhand der Knickstelle im Werkzeuginnendruckverlauf detektiert werden kann, ist über die Stellgrößenbegrenzung des Einspritzvolumenstroms einstellbar. Nach allgemeinen Empfehlungen für die Einspritzphase soll die Kavität möglichst schnell gefüllt werden, um die Zykluszeit für eine wirtschaftliche Produktion gering zu halten und eine homogene Temperaturverteilung im Bauteil zu erzielen. Nach oben sollte der Einspritzvolumenstrom begrenzt werden, um Materialschädigungen durch eine zu hohe Scherrate zu vermeiden [Bic12, Gru05]. Ein geringer Einspritzvolumenstrom verringert die Orientierungen im Bauteil und somit auch die Eigenspannungen. Allerdings entsteht eine dickere Randschicht, die den Druckverlust zum Fließwegende erhöht und somit Unterschiede in den angussnahen und angussfernen Bauteildimensionen verstärkt [CHH21]. Eine zweite Empfehlung ist die Reduktion des Einspritzvolumenstroms am Fließwegende, um Brenner und ein Überspritzen der Kavität zu vermeiden [Bic12, Thi77]. Die Verbesserung der Bauteilqualität ist jedoch nur gering ausgeprägt [CHH21]. Beim Einsatz der phasenübergreifenden Prozessführung wird der Einspritzvolumenstrom automatisch in der Kompressionsphase reduziert, um ein Überschwingen des Werkzeuginnendrucks zu vermeiden. Somit sind beide Anforderungen mittels Werkzeuginnendruckregelung einfach umsetzbar.

Komplexe Bauteile erfordern die Vorgabe eines Volumenstromprofils in der Einspritzphase, falls große Änderungen des Fließfrontquerschnitts über dem Fließweg auftreten. Dadurch werden zu hohe oder zu geringe Einspritzvolumenströme vermieden [CZK+10]. Die volumetrische Füllung der Kavität kann über Werkzeuginnendruckgradienten oder variable Stellgrößenbegrenzungen gezielt vorgegeben werden. Dadurch wäre die Realisierung einer konstanten Fließfrontgeschwindigkeit auch bei Wanddickensprüngen möglich. Die Stellgrößenbegrenzung des Einspritzvolumenstroms könnte über die Identifikation von Veränderungen im Werkzeuginnendruckgradienten angepasst werden, da der Gradient des Druckanstiegs bei Wanddickensprüngen variiert. Eine zeitliche Vorgabe ist nicht sinnvoll, da die Reproduzierbarkeit der Spritzgießmaschine (Schließverhalten der Rückstromsperre, Maschinendynamik) eine direkte Übertragung von simulativ optimierten Einspritzprofilen verhindert [Grü19, HK23]. Die Zusammenhänge zwischen Einspritzvolumenstrom und Bauteilqualität sind zum aktuellen Forschungsstand noch nicht ausreichend erforscht, sodass die Profilierung des Einspritzvolumenstroms in dieser Arbeit nicht näher untersucht wird.

5.2 Kompressionsphase

Beim Übergang von der Kompressions- in die Nachdruckphase ist eine schnelle Reduktion des Einspritzvolumenstroms erforderlich, um Druckspitzen im Werkzeuginnendruck zu minimieren. Die Stellgrößenbegrenzung für den minimalen Einspritzvolumenstrom $\dot{V}_{min}$ hat einen entscheidenden Einfluss auf das Regelverhalten. Bei einer Begrenzung $\dot{V}_{min} > 0$ ist eine Schneckenbewegung ausschließlich in Richtung Werkzeug möglich, sodass kontinuierlich Schmelze in die Kavität nachgefördert wird. Ohne Begrenzung des minimalen Einspritzvolumenstroms ist ein Rückzug der Schnecke zur Entlastung der Schmelze möglich, um Druckspitzen im Werkzeuginnendruck zu reduzieren. Durch den Schneckenrückzug könnten jedoch Markierungen am Bauteil auftreten oder Luft in die Düse eingezogen werden, sodass Bauteilqualität und Prozessstabilität negativ beeinflusst werden.

Der Einfluss des minimalen Einspritzvolumenstroms auf die Bauteilqualität wird untersucht, indem Spritzgießversuche mit dem Verzugsprobekörper und der Platte durchgeführt werden. Als Materialien werden die Polypropylene (PP) PP-UV und PP-TV verwendet. In den Versuchen werden ein beliebiger und ein begrenzter minimaler Einspritzvolumenstrom gegenübergestellt. Die Begrenzung des minimalen Einspritzvolumenstroms wird so gewählt, dass eine kontinuierliche Vorwärtsbewegung der Schnecke unabhängig von der Berechnung des Stellsignals gewährleistet wird. Dazu wird der resultierende Einspritzvolumenstrom während der Nachdruckphase in einem Identifikationszyklus bestimmt und als Grenzwert eingestellt. Der Werkzeuginnendruck wird bei allen Versuchen in der Nachdruckphase konstant gehalten. Eine Übersicht der Maschinen- und Reglereinstellungen ist in Kapitel 14.3 gegeben. Pro Versuchseinstellung werden 10 Bauteile hergestellt.

Die Verläufe von Werkzeuginnendruck und Einspritzvolumenstrom sind exemplarisch für den Verzugsprobekörper bei $\dot{V}_{min} > 0$ und $\dot{V}_{min}$ beliebig mit PP-TV in Bild 5.2 dargestellt.

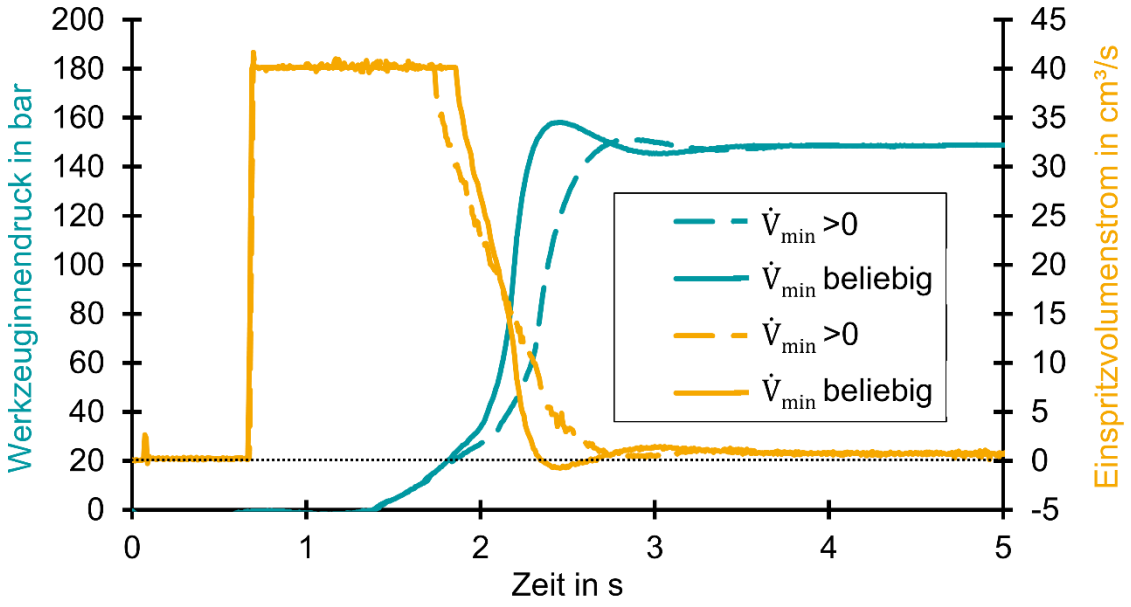

Bild 5.2: Werkzeuginnendruck und Einspritzvolumenstrom bei begrenztem (>0) und unbegrenztem (beliebig) minimalen Einspritzvolumenstrom.

Fig. 5.2: Cavity pressure and injection volume flow rate for limited (>0) and unlimited (beliebig) minimal injection volume flow rate.

Die Begrenzung des minimalen Einspritzvolumenstroms kann einen Rückzug der Schnecke verhindern, führt jedoch zu einer langsameren Bauteilfüllung. Die Einspritz- und Kompressionsphase wird somit sowohl von dem maximalen als auch von dem minimalen Einspritzvolumenstrom beeinflusst, da bei der Berechnung neuer Stellsignale der zukünftige Prozesszustand berücksichtigt wird. Der Handlungsraum des Reglers ist begrenzt, sodass der Einspritzvolumenstrom früher reduziert wird, um nach dem steilen Anstieg des Werkzeuginnendrucks in der Kompressionsphase das Überschwingen zu reduzieren. Dadurch beginnt nach 1,1 s die Reduktion des Einspritzvolumenstroms.

Ohne eine Begrenzung des minimalen Einspritzvolumenstroms wird das Werkzeug schneller volumetrisch gefüllt. Der maximale Einspritzvolumenstrom wird für 0,1 s länger aufrechterhalten und schneller reduziert, wobei ein minimaler Einspritzvolumenstrom von 0,7 $\frac{cm^3}{s}$ erreicht wird. Ein negativer Einspritzvolumenstrom (Rückzug der Schnecke) erfolgt erst nach der volumetrischen Füllung, sodass keine Markierungen an der Bauteiloberfläche zu erkennen sind. Der Werkzeuginnendruck weist ein Überschwingen von über 8 bar auf. Eine schnelle Bauteilfüllung ist neben der Vermeidung von Druckspitzen ein Optimierungskriterium im Reglertuning, sodass die Druckspitzen zugunsten einer schnelleren Bauteilfüllung akzeptiert werden. Im Vergleich dazu beträgt das Überschwingen bei $\dot{V}_{min} > 0$ weniger als 2 bar.

Die Ergebnisse ermöglichen eine Beurteilung der Optimierungskriterien für den Werkzeuginnendruckverlauf in Bezug auf die Bauteilqualität. In Bild 5.3 ist die Maßhaltigkeit für den Verzugsprobekörper gegenübergestellt.

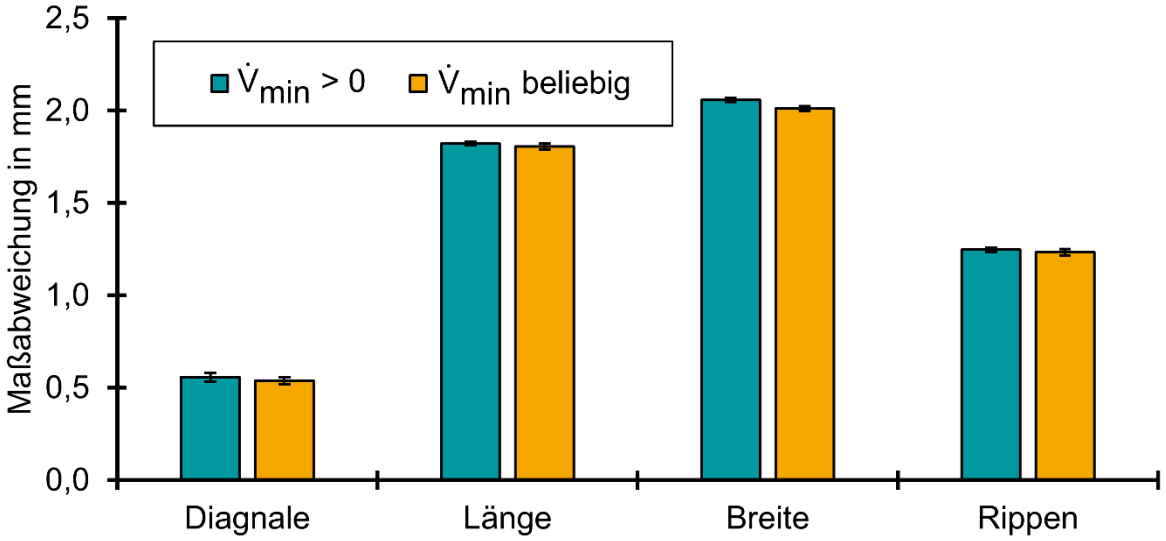

Bild 5.3: Maßabweichung bei beliebigem und begrenztem min. Einspritzvolumenstrom.

Fig. 5.3: Dimensional deviation for unlimited and limited minimal injection volume flow rate.

Der diagonale Abstand zwischen zwei Zentrierungsstiften unterscheidet sich lediglich im Rahmen der Messgenauigkeit, ebenso wie die Maßabweichungen von Rippen und Bauteillänge. Änderungen der Maßhaltigkeit können allein in der Bauteilbreite erkannt werden, wobei die Maßabweichung bei Schneckenrückzug minimal um 0,05 mm reduziert wird. Die schnellere Bauteilfüllung führt zu einem insgesamt höheren Druck in der Kavität. Dieser kann zu einer geringfügig höheren Maßhaltigkeit der Spritzgießbauteile führen. Somit hat ein höheres Überschwingen des Werkzeuginnendrucks hier keinen negativen Einfluss auf die Maßhaltigkeit der Spritzgießbauteile.

Die mechanischen Bauteileigenschaften sind in Bild 5.4 für PP-UV und PP-TV für beide Strategien gegenübergestellt. Links ist die Zugfestigkeit und rechts der E-Modul aufgetragen.

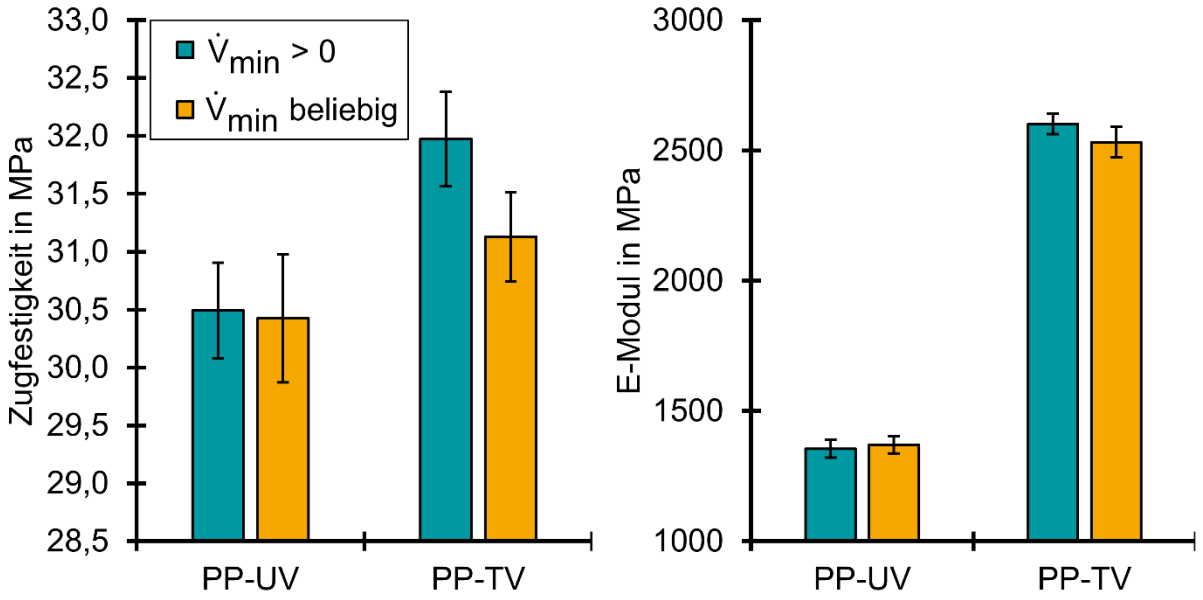

Bild 5.4: Mechanische Bauteileigenschaften bei beliebigem und begrenztem minimalen Einspritzvolumenstrom.

Fig. 5.4: Mechanical part properties for unlimited and limited minimal injection volume flow rate.

Die Zugfestigkeit wird bei PP-UV durch die Prozessführung in der Kompressionsphase nicht signifikant beeinflusst. Die Zugfestigkeit ist um ca. 1 MPa höher, wenn ein Rückzug der Schnecke bei der Verarbeitung des PP-TV verhindert wird. Aufgrund der hohen Standardabweichungen von 0,4 MPa ist der Unterschied allerdings nur gering. Auch der E-Modul wird durch die Prozessführung in der Kompressionsphase nicht signifikant beeinflusst. In vorherigen Arbeiten wurde ebenfalls beobachtet, dass die mechanischen Bauteileigenschaften nicht zwingend aufgrund höherer Werkzeuginnendruckintegrale, wie sie durch eine schnelle Bauteilfüllung erreicht werden, verbessert werden können [HWK+22].

Zusammenfassend bewirken eine höhere Druckspitze um 6 bar sowie ein kurzzeitiger Rückzug der Schnecke eine minimale Reduktion der Zugfestigkeit, jedoch gleichzeitig einen positiven Einfluss auf die Maßhaltigkeit. Die mechanischen und geometrischen Prüfungen wurden an verschiedenen Bauteilen durchgeführt. Der Einfluss des Schneckenrückzugs ist material- und bauteilabhängig, sodass die allgemeine Gültigkeit der Ergebnisse für weitere Spritzgießprozesse untersucht werden muss. Der Schneckenrückzug zeigt einen Einfluss die Bauteilqualität und somit auch die Bedeutung des Umschaltpunkts im konventionellen Spritzgießprozess auf.

Im weiteren Vorgehen der Dissertation wird die Begrenzung des minimalen Einspritzvolumenstroms als Kompromiss zwischen beiden Qualitätskriterien auf 0 cm^3/s festgelegt.

5.3 Nachdruckphase

In der Nachdruckphase sind der Nachdruck und die Nachdruckzeit entscheidend für die finale Bauteilqualität. Die Nachdruckzeit hat aufgrund des Einflusses auf die Zykluszeit einen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit und sollte daher so kurz wie möglich gewählt werden. Eine Erhöhung der Nachdruckzeit führt ebenso wie eine Erhöhung des Nachdrucks zu einer Erhöhung des Bauteilgewichts, solange der Siegelpunkt noch nicht erreicht ist. Der Zusammenhang zwischen den Größen wurde in der studentischen Arbeit von Herrn Klein experimentell untersucht, um deren Einsetzbarkeit zur Einstellung der Bauteilqualität zu bewerten. Dazu wurden die Nachdruckzeiten 7,5 s, 8 s und 8,5 s mit den konstanten Werkzeuginnendrücken von 160 bar, 180 bar und 200 bar miteinander kombiniert [Kle22]. Alle weiteren Versuchseinstellungen wurden konstant gehalten (vgl. Kapitel 14.3). Die Korrelation von Bauteilgewicht G, Nachdruck p_{nach} und Nachdruckzeit t_{nach} kann für den untersuchten Prozessbereich durch eine lineare Regressionsgleichung beschrieben werden kann [HHV+22b]. Der Zusammenhang ist in Gleichung 5.1 für den Verzugsprobekörper gegeben.

$$G = 0{,}0036 * p_{nach} + 0{,}281 * t_{nach} \qquad \textit{(Gl. 6.1)}$$

Um den Zusammenhang zu validieren, wird untersucht, ob das Bauteilgewicht bei einer beliebigen Kombination von Nachdruck und Nachdruckzeit konstant gehalten werden kann. Zu diesem Zweck wurden konstante Werkzeuginnendrücke von 175 bar, 180 bar, 185 bar und 190 bar und Nachdruckzeiten von 7,75 s, 8,00 s, 8,25 s und 8,50 s festgelegt. Der Wert der jeweils anderen Variable wurde gemäß der Regressionsgleichung angepasst. Die resultierenden Bauteilgewichte sind in Bild 5.5 gezeigt.

Änderungen in beiden Parametern können durch eine Anpassung des anderen Parameters in Bezug auf das Bauteilgewicht kompensiert werden. Der Versuchspunkt mit einer Einstellung von 7,75 s für die Nachdruckzeit liegt um 0,04 g neben dem Zielgewicht. Dies liegt daran, dass die Schmelze im angussnahen Bereich noch sehr niedrigviskos ist und somit am Ende der Nachdruckzeit zurück in den Schneckenvorraum fließt. Insgesamt sind sowohl der Nachdruck als auch die Nachdruckzeit als Stellgröße einsetzbar, um ein konstantes Bauteilgewicht zu erreichen. [HHV+22b]

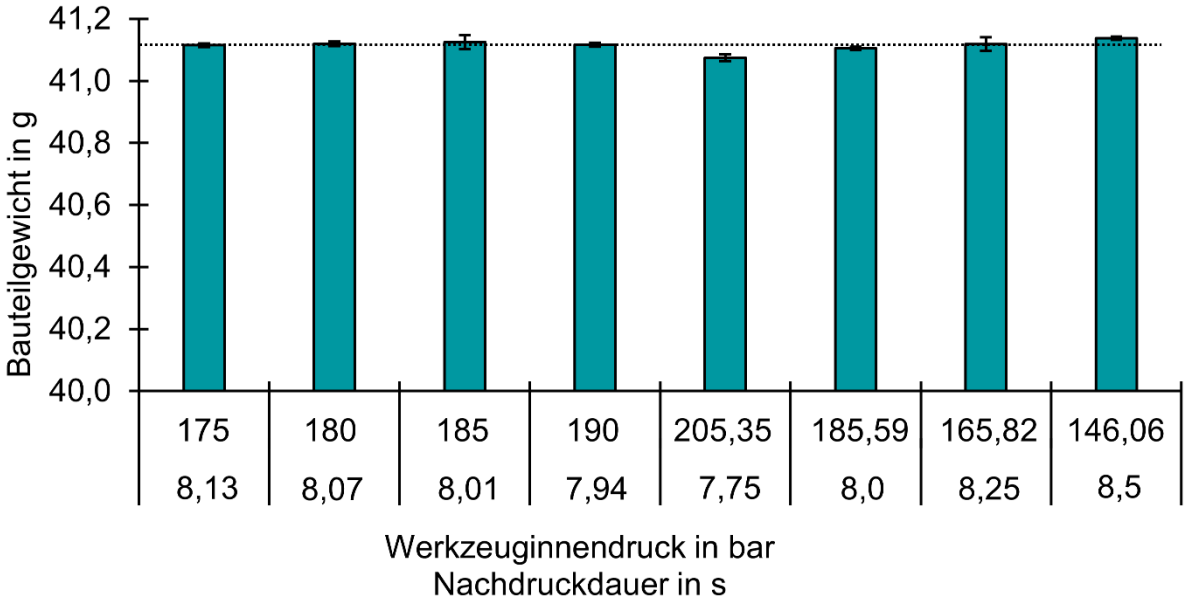

Bild 5.5: Bauteilgewicht für Kombinationen aus Werkzeuginnendruck und Nachdruckzeit.

Fig. 5.5: Part weight for combinations of cavity pressure and holding pressure time.

In den bisherigen Untersuchungen wurde lediglich eine konstante Werkzeuginnendruckreferenz während eines Spritzgießzyklus vorgegeben, und es werden keine weiteren Qualitätsparameter neben dem Bauteilgewicht betrachtet. Das Bauteilgewicht ist jedoch für technische Spritzgießbauteile kein geeignetes Qualitätsmerkmal. Im Folgenden wir daher untersucht, wie die Maßhaltigkeit sowie die mechanischen Bauteileigenschaften durch den Werkzeuginnendruckverlauf in der Nachdruckphase beeinflusst werden.

Bei komplexen Bauteilen mit hohen Qualitätsanforderungen ist manchmal eine Profilierung mit mehreren Nachdruckstufen erforderlich. Die Generierung eines solchen Nachdruckprofils ist mit einem hohen Versuchsaufwand verbunden. Spritzgießsimulationen sind zum aktuellen Stand nicht zur Generierung einer Werkzeuginnendruckreferenz geeignet. Prozessgrößenverläufe, insbesondere der Werkzeuginnendruck, weisen durch Vereinfachungen und Modellannahmen eine zu große Differenz zu realen Messwerten auf [Hei21]. Die Untersuchung komplexer Referenzvorgaben ist daher im Verhältnis zum Aufwand im Rahmen dieser Arbeit nicht sinnvoll und wird nicht untersucht.

Im Folgenden werden drei lineare Referenzen für den Werkzeuginnendruck in der Nachdruckphase untersucht:

- lineare Reduktion des Werkzeuginnendrucks (Gradient $\frac{dp}{dt} < 0$)
- konstanter Werkzeuginnendruck (Gradient $\frac{dp}{dt} = 0$)
- linearer Anstieg des Werkzeuginnendrucks (Gradient $\frac{dp}{dt} > 0$)

Der Strömungsvorgang in der Nachdruckphase verursacht Eigenspannungen im Bauteil, da kältere Schmelzepartikel von nachströmender Schmelze weitergefördert werden. Durch eine geringere Relaxation der kälteren Schmelze können sichtbare Verformungen oder eine Reduktion der Bauteilfestigkeit auftreten. Daher wird allgemein ein konstanter Schneckendruck mit einer abfallenden Rampe zum Ende der Nachdruckphase empfohlen, um den Bauteilverzug zu minimieren [Jar19]. Eine lineare Reduktion des Werkzeuginnendrucks über der Nachdruckzeit entspricht dabei annähernd dem Werkzeuginnendruckverlauf der allgemeinen Empfehlung für den konventionellen Spritzgießprozess bei der Verarbeitung teilkristalliner Thermoplaste. In Anlehnung an die bisherigen Untersuchungen zur Werkzeuginnendruckregelung wird ebenfalls ein konstanter Werkzeuginnendruck untersucht. Zusätzlich wird eine ansteigende Referenz für den Werkzeuginnendruck untersucht, um in angussfernen Bauteilbereichen einen höheren Werkzeuginnendruck bei zunehmender Nachdruckzeit aufrechtzuerhalten.

In Spritzgießversuchen werden aus den Materialien PP-UV und PP-TV die Bauteile Verzugsprobekörper und Platte für alle drei Referenzvorgaben im eingeschwungenen Zustand hergestellt. Die Nachdruckdauer liegt mit 6 s vor Erreichen des Siegelpunkts. Maßabweichungen sowie die mechanischen Eigenschaften werden für 10 Bauteile je Versuchseinstellung ausgewertet. Der Druckgradient von +/- 5bar/s entspricht nach halber Nachdruckzeit der konstanten Referenz. Die Referenztrajektorien werden dementsprechend so gewählt, dass das Druckintegral im Rahmen der Mess- und Regelgenauigkeit konstant gehalten wird, siehe Tabelle 5.1. Die Maschinen- und Reglereinstellungen sind in Kapitel 14.3 aufgelistet.

	Verzugsprobekörper		**Platte**	
Druck [bar]	**Beginn**	**Ende**	**Beginn**	**Ende**
Fallend (Gradient < 0)	170	130	220	180
Konstant (Gradient = 0)	150	150	200	200
Steigend (Gradient > 0)	130	170	180	220

Tabelle 5.1: Übersicht der Einstellparameter zur Untersuchung verschiedener Werkzeuginnendruckgradienten in der Nachdruckphase.

Table 5.1: Overview of the setting parameters for analysing different cavity pressure gradients in the holding pressure phase.

Die Ergebnisse der Bauteilvermessung des Verzugsprobekörpers sind in Bild 5.6 für alle drei Strategien gegenübergestellt.

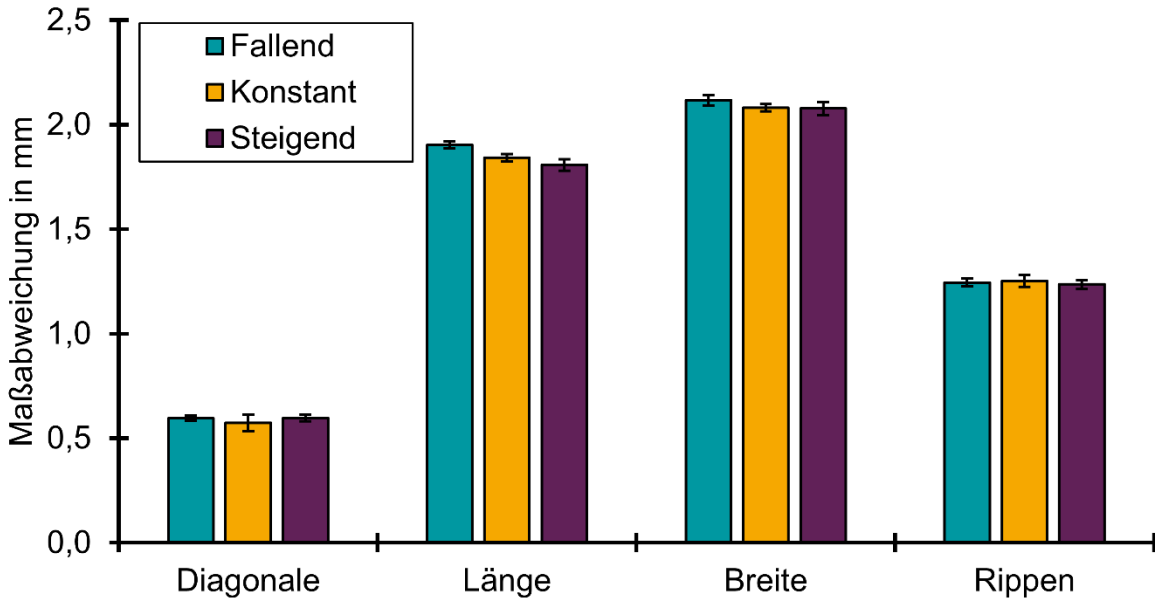

Bild 5.6: Maßabweichung bei fallender, konstanter und steigender Referenzvorgabe für den Werkzeuginnendruck.

Fig. 5.6: Dimensional deviation for falling, constant and rising cavity pressure reference.

Die Diagonale weist keinen signifikanten Unterschied für die verschiedenen Werkzeuginnendruckreferenzen auf, ebenso der Rippenabstand. Ein fallender Werkzeuginnendruck führt zu einer Maßabweichung in Längsrichtung von 1,9 mm. Demgegenüber ist die Maßabweichung für einen steigenden Werkzeuginnendruck um 0,1 mm geringer. Die gleichen Tendenzen sind auch für die Bauteilbreite erkennbar, auch wenn die Streubreite im Rahmen der Maßabweichung liegt. Durch die Erhöhung des angussnahen Werkzeuginnendrucks wird ebenfalls in angussfernen Bereichen ein höherer Werkzeuginnendruck bei längerer Nachdruckzeit aufrechterhalten, welcher Maßabweichungen entgegenwirkt.

Die Ergebnisse zur Maßhaltigkeit widersprechen somit der allgemeinen Empfehlung zur Reduktion des Druckeinflusses in der Kavität über die Dauer der Nachdruckphase.

Ein Vergleich der mechanischen Kennwerte Zugfestigkeit und E-Modul ist in Bild 5.7 dargestellt. Die mechanischen Eigenschaften werden durch den Werkzeug-innendruckgradienten nicht entscheidend beeinflusst. Die folgenden Beobachtungen liegen im Rahmen der Standardabweichungen. Mit steigendem Werkzeuginnendruck werden die höchsten Zugfestigkeiten für beide Materialien erzielt. Die geringste Zugfestigkeit weisen die Bauteile mit fallendem Werkzeuginnendruck bei PP-UV auf. Bei PP-TV sind die Zugfestigkeiten für einen fallenden und konstanten Werkzeuginnendruck vergleichbar. Bei PP-UV weisen die Prüfkörper mit fallendem Werkzeuginnendruck den höchsten E-Modul auf. Für PP-TV sind keine Unterschiede im E-Modul zu erkennen.

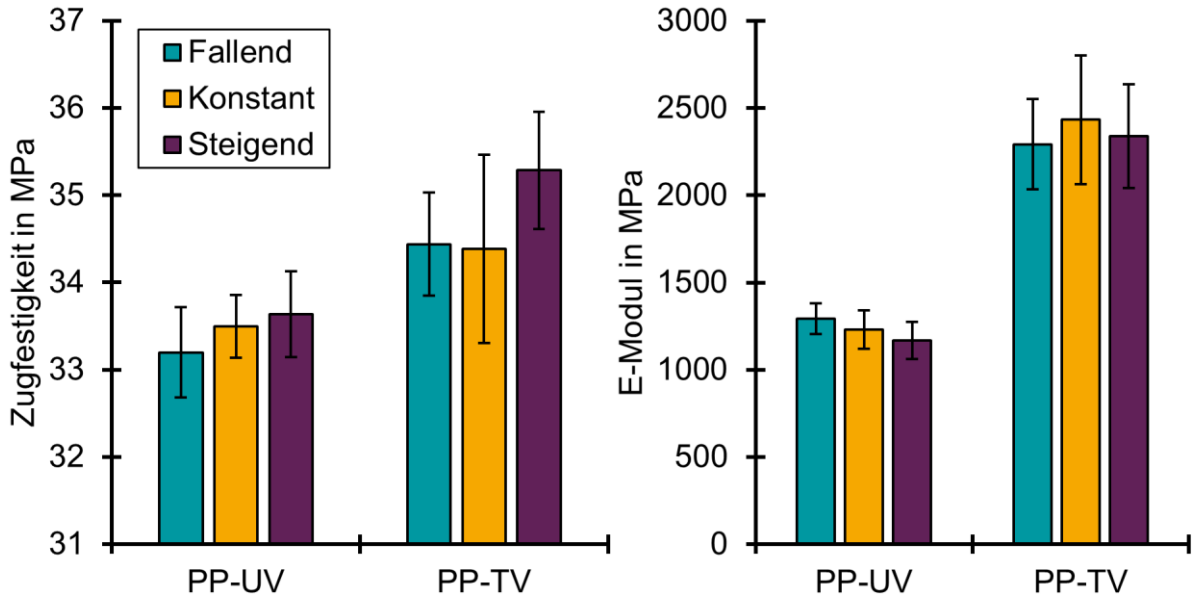

Bild 5.7: Mechanische Bauteileigenschaften bei fallender, konstanter und steigender Werkzeuginnendruckreferenz.

Fig. 5.7: Mechanical part properties for falling, constant and rising cavity pressure reference.

Zusammenfassend konnte nachgewiesen werden, dass der Werkzeuginnendruckgradient in der Nachdruckphase einen entscheidenden Einfluss auf die Maßhaltigkeit hat. Ein positiver Gradient wirkt positiv auf die Maßhaltigkeit in Längsrichtung aus. Ein fallender Gradient zeigt einen gegensätzlichen Einfluss. Die mechanischen Bauteileigenschaften werden durch den Werkzeuginnendruckgradienten nicht signifikant beeinflusst, wobei Tendenzen eines positiven Einflusses bei steigendem Werkzeuginnendruck auf die Zugfestigkeit zu erkennen sind. Umgekehrt verhält es sich für den E-Modul bei der Verarbeitung von PP-UV.

Zur Einordnung der Versuchsergebnisse und Durchführung ergänzender Spritzgießversuche ist die Berücksichtigung der Sensorposition erforderlich. Der Werkzeuginnendrucksensor sollte zur Prozessregelung angussnah platziert werden, sodass ein langer Prozesseingriff bis zur Bauteilerstarrung möglich ist. Die Vorgabe eines steigenden angussnahen Werkzeuginnendrucks führt dann zu einem konstanteren Werkzeuginnendruck in angussfernen Bauteilbereichen. Bei einer einzigen Stell- und Regelgröße kann keine separate Optimierung für einzelne Bauteilsegmente durchgeführt werden. Jedoch zeigen die Ergebnisse, dass ein steigender angussnaher Werkzeuginnendruck die Bauteilqualität positiv beeinflussen kann. Bei der Untersuchung von Prozessführungskonzepten zum automatisierten Ausgleich von Störeinflüssen wird daher eine ansteigende Referenz für den Werkzeuginnendruck verwendet, sofern dies praktisch umsetzbar ist.

Der optimale Werkzeuginnendruckgradient ist material- und bauteilabhängig und könnte durch die Untersuchung verschiedener Steigungen für den vorliegenden Prozess optimiert werden. Auch die optimale Höhe des mittleren Werkzeuginnendrucks in der Nachdruckphase ist bauteilspezifisch und experimentell ermittelbar. Auf weiterführende Untersuchungen wird an dieser Stelle verzichtet, da aus prozessspezifischen Versuchen keine allgemeinen Erkenntnisse ableitbar sind.

5.4 Bauteilerstarrung

Am Siegelpunkt erstarrt die Schmelze im engsten Querschnitt des Angusses, sodass kein weiteres Material in die Kavität nachgefördert werden kann. Der Nachdruck wird idealerweise bis zum Siegelpunkt aufrechterhalten, um die Volumenschwindung der Schmelze in der Nachdruckphase auszugleichen. Sobald die Nachdruckzeit beendet ist sinkt der Werkzeuginnendruck auf Umgebungsdruck ab.

In Kapitel 2.2.3 wurde mit der pvT-Optimierung ein Prozessführungskonzept vorgestellt, welches den Druckabbau auch während der Bauteilerstarrung regelt. Dazu wird der Werkzeuginnendruck entsprechend des materialspezifischen pvT-Modells bis zum Umgebungsdruck als Referenz vorgegeben, um ein konstantes spezifisches Volumen zu realisieren.

Das Konzept wurde in eigenen Vorarbeiten aufgegriffen, um die Übertragbarkeit auf andere Materialien und Bauteile sowie den Einfluss der Materialdatenqualität zu untersuchen. Das Projekt „Analysis of potential benefits in compensating material fluctuations for a given geometry and material“ wurde in Kooperation mit Hitachi Ltd. Corporation, Yokohama, Japan, durchgeführt. Im Folgenden wird ein Auszug der durchgeführten Arbeiten vorgestellt sowie die Ergebnisse diskutiert.

Für das Projekt wurde unter Anderem ein PP vom Typ Moplen QCP300R des Herstellers Lyondellbasell Industries, Rotterdam, Niederlande, verarbeitet. Das pvT-Modell des Materials wurde mit dem pvT500 der Firma GÖTTFERT GmbH, Buchen, bei einer Kühlrate von 5 K/min aufgestellt und als Schmidt Modell in der Regelung implementiert. Die Schmidt Koeffizienten sind in Tabelle 14.8 im Anhang zu finden. Die Versuche wurden ohne Begrenzung des minimalen Einspritzvolumenstroms sowie mit einer konstanten Werkzeuginnendruckreferenz durchgeführt. Als Bauteil wurde die Platte verwendet und die Maschineneinstellgrößen Werkzeugtemperatur, Zylindertemperatur, Nachdruck und maximaler Einspritzvolumenstrom variiert, siehe Tabelle 5.2.

Parameter	-	0	+	Einheit
Wasservorlauftemperatur	30	40	50	°C
Zylindertemperatur	190	200	210	°C
Max. Einspritzvolumenstrom	16	20	24	cm³/s
Werkzeuginnendruck	175	200	225	bar

Tabelle 5.2: Variation der Maschineneinstellgrößen nach einem vollfaktoriellen Versuchsplan.

Table 5.2: Variation of machine setting for a full factorial experimental plan.

Die Regelung des Werkzeuginnendrucks kann in Abhängigkeit von der Prozesseinstellung während der Bauteilerstarrung zu Regelabweichungen führen. Diese Abweichungen sind für geringe Werkzeug- und Zylindertemperaturen aufgetreten. In Bild 5.8 sind die Verläufe von Schneckendruck, Werkzeuginnendruck und Einspritzvolumenstrom dargestellt, welche eine Analyse der Ursache ermöglichen.

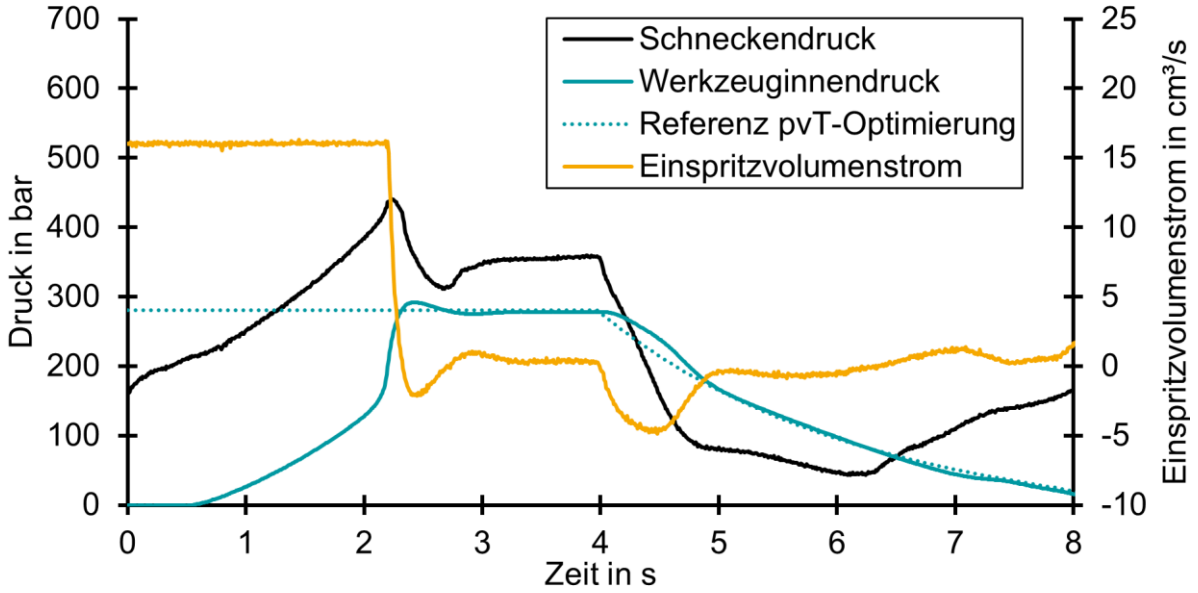

Bild 5.8: Schneckendruck, Werkzeuginnendruck und Einspritzvolumenstrom bei geringer Werkzeug- und Zylindertemperatur mit pvT-Optimierung.

Fig. 5.8: Screw pressure, cavity pressure and injection volume flow rate for low mould and barrel temperatures with pvT-optimisation.

Die Prozessbedingungen im Spritzgießen sind von den modellierten Bedingungen mit pvT-Modell und Abkühlrechnung verschieden, welche für die Kalkulation der Werkzeuginnendrucktrajektorie eingesetzt wurden. Sobald die Werkzeuginnendruck-referenz nach ca. 4 s abfällt ist der Werkzeuginnendruck zu hoch, sodass der Werkzeuginnendruck über einen negativen Einspritzvolumenstrom von annähernd 5 cm³/s reduziert wird. Nach ca. 6,5 s fällt der Werkzeuginnendruck unter die

Referenz. Durch einen positiven Einspritzvolumenstrom wird weiteres Material in Anguss und Kavität gefördert, um die Referenzvorgabe wieder zu erreichen. Somit weicht die Referenzvorgabe der pvT-Optimierung von der natürlichen Druckabbaukurve des Materials ab. Die entgegengesetzten Schneckenbewegungen sind prozesstechnisch nicht optimal. Für eine hohe Bauteilqualität sollten die Massebewegungen in der Nachdruckphase so gering wie möglich gehalten werden, um innere Spannungen zu reduzieren. Weiterhin können angussnahe Kaltverschiebungen auftreten, wenn die Schmelze schneller erstarrt, als durch die pvT-Optimierung berechnet wird, siehe Bild 5.9.



Bild 5.9: Links: Bauteil ohne Defekte; Rechts: Bauteil zum Zyklus in Bild 5.8 mit angussnahen Kaltverschiebungen.

Fig. 5.9: Left: part without defects; right: part for figure 5.8 cycle with flashing close to the gate.

Zusammenfassend wurde gezeigt, dass bei größeren Abweichungen zwischen ermitteltem und realem pvT-Verhalten Qualitätsprobleme auftreten können. Dazu zählen angussnahe Bauteildefekte wie Kaltverschiebungen, sodass keine qualitätsoptimierte Prozessführung beim Einsatz der pvT-Optimierung garantiert werden kann. Dementsprechend wäre eine iterative Anpassung der Materialdaten erforderlich, um Qualitätsprobleme zu vermeiden.

Eine Verkürzung des Prozesseingriffs bis zum Siegelpunkt kann die potentiellen Qualitätsprobleme bei einer pvT-optimierten Prozessführung vermeiden. Der Druckabbau in der Kavität erfolgt dann „natürlich“, sodass Abweichungen in der Modellierung die Bauteilqualität nicht negativ beeinflussen, sofern die Regeldauer den Siegelpunkt nicht überschreitet. Daher wird in folgenden Untersuchungen zur pvT-Optimierung der Prozesseingriff beendet, sobald ein isochorer Werkzeuginnendruckverlauf durch die pvT-Optimierung berechnet wird.

6 KENNZAHLEN DER PROZESSGRÖßENVERLÄUFE

Ein automatisierter Störgrößenausgleich erfordert die zuverlässige Erkennung von Störgrößen. Die Überwachung des Prozesses kann dazu über Kennzahlen erfolgen, die die wichtigsten Informationen über den Prozesszustand beinhalten. Bei der Identifikation von Prozessabweichungen können daraufhin automatisierte Anpassungen im Prozess erfolgen, um eine konstante Bauteilqualität zu gewährleisten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Programm entwickelt, welches die automatisierte Generierung von Prozesskennzahlen ermöglicht. Die wichtigsten Funktionen der Matlab-App „InjectiX“ umfassen die Konfiguration, den Import und Export von Daten sowie die Funktionsüberprüfung der Berechnung und werden in Kapitel 14.4 beschrieben.

Die Korrelation zwischen Prozessgrößenverläufen und der Bauteilqualität kann durch maschinelles Lernen mittels automatisierter Merkmalsextraktion bestimmt werden [MZR+18, RKD21, TMM+21]. Beispielsweise werden bestimmte Merkmale der Kurvenverläufe mittels Autoencoder gelernt, die eine Korrelation zwischen Bauteilqualität und Prozesszustand aufweisen [MZR+18]. Für das Anlernen der Modelle wird ein großer Datensatz benötigt.

Die Abstraktion von Prozessgrößenverläufen über Kennzahlen, die charakteristische Merkmale der Kurvenverläufe beschreiben, stellt dazu eine Alternative dar und bietet dem Anwender die Möglichkeit zur einfachen Interpretation. Der Informationsgehalt der Prozessgrößenverläufe wird durch die Abstraktion des gesamten Kurvenverlaufs auf einzelne Kennzahlen deutlich reduziert. Die Kennzahlen bilden wichtige Stützpunkte der Prozessgrößenverläufe ab und können bei der Versuchsauswertung zum Prozessverständnis beitragen. Zusätzlich können Grenzwerte für einzelne Kennzahlen vorgegeben werden, sodass die automatisierte Prozessüberwachung und –regelung verschiedener Prozesse gut zu realisieren ist.

Die Nutzung von Kennzahlen zur Beschreibung des Spritzgießprozesses wurde bereits von *Gierth* in den 90er Jahren untersucht und zur Korrelation zwischen Bauteilqualität und Prozess eingesetzt. Die Kennzahlberechnung und Prozessmodellierung erfolgte ausschließlich offline aufgrund geringer Rechenleistung [Gie92]. Inzwischen werden Prozesskennzahlen auch inline ausgewertet, um die Bauteilqualität vorherzusagen [GTG+14]. Die Informationen können zusätzlich zur Sortierung von Ausschussteilen [LR19] oder zur Berechnung von Prozessanpassungen verwendet werden [VMO+23]. Auch bei den kommerziell erhältlichen

Assistenzsystemen werden Kennzahlen wie das Einspritzintegral des Schneckendrucks eingesetzt, um Prozessanpassungen zu berechnen.

Im Folgenden werden die Prozesskennzahlen vorgestellt, welche aus den Prozessgrößenverläufen von Werkzeuginnendruck, Werkzeugtemperatur, Schneckendruck, Schneckenposition und Schneckengeschwindigkeit berechnet werden.

6.1 Schneckenposition und -geschwindigkeit

Das Schmelzevolumen im Schneckenvorraum (aufdosiertes Volumen) kann über den Verlauf der Schneckenposition bestimmt werden. Der Einspritzvolumenstrom resultiert unter Berücksichtigung von Kompression aus dem Schneckenvorschub. Die Kurvenverläufe und Kennzahlen sind in Bild 6.1 dargestellt.

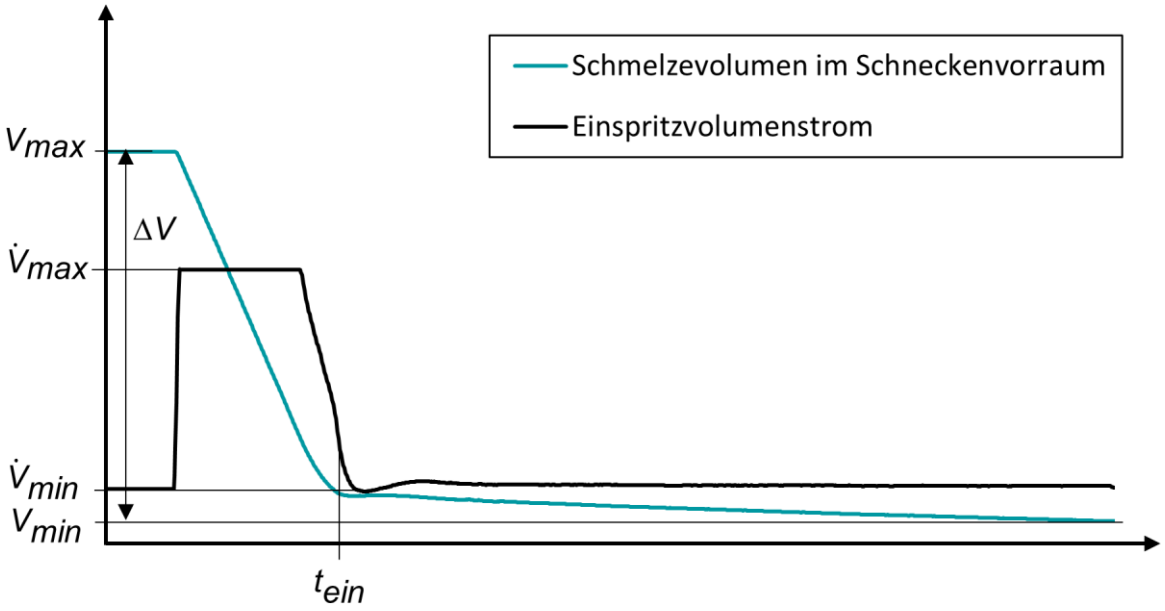

Bild 6.1: Kennzahlen des Schmelzevolumens und des Einspritzvolumenstroms

Fig. 6.1: Key characteristics of the melt volume and the injection volume flow rate.

Das **maximale Schmelzevolumen V_{max}** entspricht dem Dosiervolumen und kann auf Dosierschwankungen hindeuten. Das **minimale Schmelzevolumen V_{min}** entspricht dem Restmassepolster und wird am Ende der Nachdruckphase erreicht. Die Differenz aus maximaler und minimaler Schneckenposition entspricht dem **Einspritzvolumen ΔV** und hat eine hohe Korrelation zum Bauteilgewicht. Auftretende Leckageverluste der Rückstromsperre können über diese Kennzahl jedoch nicht berücksichtigt werden.

Die **Einspritzdauer t_{ein}** wird über den Einspritzvolumenstromverlauf definiert. Der Übergang zwischen Einspritz- und Nachdruckphase ist erreicht, sobald der maximale Einspritzvolumenstrom um einen definierbaren Schwellwert unterschritten wird.

Änderungen im Füllerhalten können somit über die Einspritzdauer detektiert werden, da der Einspritzvolumenstrom anhand des aktuellen Prozesszustands von der Regelung berechnet wird.

Der **maximale Einspritzvolumenstrom** $\dot{V}_{max}$ wird als Grenzwert in der Reglereinstellung vorgegeben und bis zur volumetrischen Bauteilfüllung aufrechterhalten. Der **minimale Einspritzvolumenstrom** $\dot{V}_{min}$ kann begrenzt werden, um einen Stillstand oder den Rückzug der Schnecke zu vermeiden und somit einen Rückfluss der Schmelze aus der Kavität zum Druckausgleich zu verhindern. Falls keine untere Begrenzung von $\dot{V}_{min}$ definiert wird, resultiert ein negativer Einspritzvolumenstrom zur Reduktion von Druckspitzen am Ende der Kompressionsphase. Dadurch kann eine schnellere Bauteilfüllung erreicht werden. Somit können die Kennzahlen des Einspritzvolumenstroms zur Bewertung der Regelgüte ausgewertet werden.

6.2 Schneckendruck

Der Schneckendruck wird durch die auf die Schnecke wirkende Kraft bestimmt. Da bei phasenübergreifender Prozessführung der Werkzeuginnendruck als Regelgröße verwendet wird, beinhaltet der Schneckendruckverlauf einen höheren Informationsgehalt über den Prozesszustand als bei der konventionellen Prozessführung. Die relevanten Kennzahlen des Schneckendruckverlaufs sind in Bild 6.2 dargestellt und werden nachfolgend erläutert.

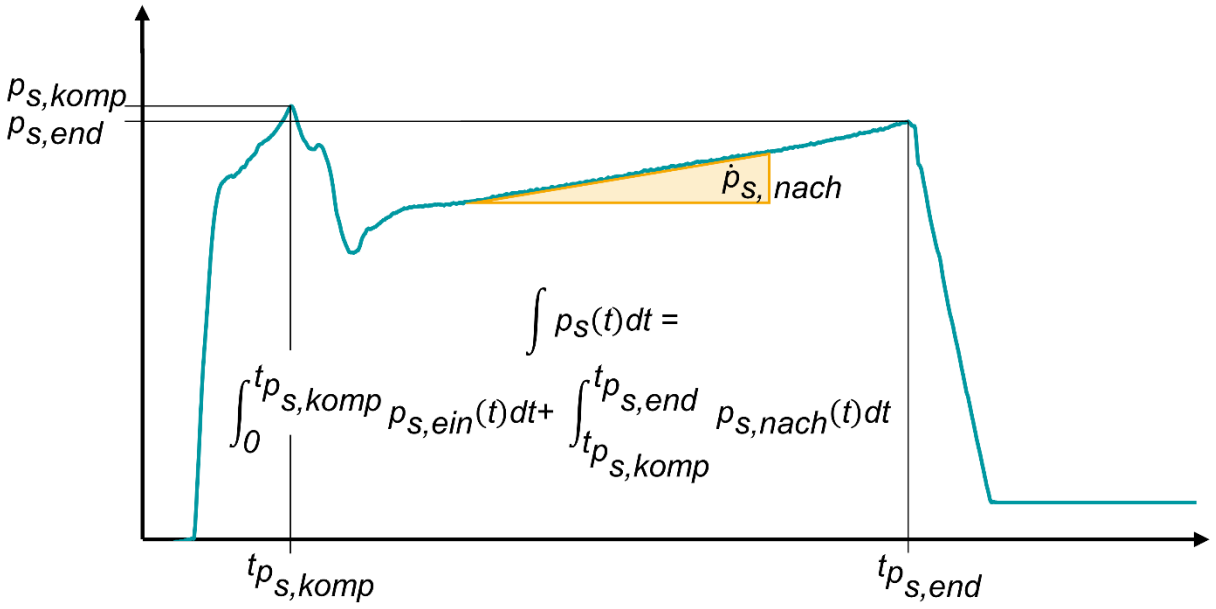

Bild 6.2: Die Kennzahlen des Schneckendruckverlaufs sind wichtig zur Bestimmung des Prozesszustands.

Fig. 6.2: The key characteristics of the screw pressure curve are important to evaluate the process state.

Bei einer Regelung des Werkzeuginnendrucks werden Druckspitzen im Vergleich zur konventionellen Prozessführung minimiert. Der **maximale Schneckendruck** wird dabei nicht zwingend in der Kompressionsphase $p_{s,komp}$ erreicht, sondern kann ebenfalls am Ende der Regeldauer $p_{s,end}$ auftreten. Zusätzlich werden **Zeitpunkte** $t_{s,komp}$ bzw. $t_{s,end}$ erfasst, sodass Schwankungen im Füllverhalten detektiert werden können.

Das **Schneckendruckintegral** $\int p_s(t)dt$ wird für die gesamte Regeldauer berechnet. Das **Einspritzintegral** $\int p_{s,ein}(t)dt$ wird, übereinstimmend mit der Auswertung des Werkzeuginnendrucks, bis zum Schwellwert des Einspritzvolumenstroms gebildet. Das **Nachdruckintegral** $\int p_{s,nach}(t)dt$ wird bis zum Ende der Nachdruckphase t_{end} gebildet, sodass Prozessveränderungen den einzelnen Prozessphasen zugeordnet werden können. Änderungen im Schneckendruck werden vorwiegend durch Viskositätsänderungen der Schmelze verursacht.

Der **Schneckendruckgradient in der Nachdruckphase** $\dot{p}_{s,nach}$, siehe Bild 6.3, korreliert mit dem Druckübertragungsverhalten zwischen Schneckenvorraum und Werkzeugkavität. Bei der Vorgabe eines konstanten Werkzeuginnendrucks in der Nachdruckphase bleibt der Schneckendruckgradient näherungsweise konstant und steigt beim Erstarren der Kunststoffschmelze exponentiell an. Der exponentielle Druckanstieg erfolgt früher, je weiter die Sensorposition vom Anguss entfernt ist.

6.3 Werkzeuginnendruck

Der Werkzeuginnendruck korreliert bei der konventionellen Prozessführung mit zahlreichen Qualitätsparametern, da er im Werkzeug und damit am Ort der Bauteilentstehung anliegt. Durch die Vorgabe von Einspritzvolumenstrom oder Schneckendruck variiert der Werkzeuginnendruck bei Veränderungen im Prozess und bildet somit Störgrößen direkt ab.

Bei der phasenübergreifenden Werkzeuginnendruckregelung ist der Informationsgehalt des Werkzeuginnendrucks geringer, da der Werkzeuginnendruck als Regelgröße eingesetzt wird und somit Einspritzvolumenstrom und Schneckendruck resultierende Größen darstellen. Dadurch sind bei einer hohen Regelgüte keine Prozessschwankungen im Werkzeuginnendruck erkennbar. Einige Kennzahlen des Werkzeuginnendrucks können dennoch verwendet werden, um die Regelgüte zu überwachen. Eine Veränderung der Prozesskennzahlen kann auf Störungen im Prozess hindeuten, da eine Arbeitspunktverschiebung das Regelergebnis beeinflusst.

Die Kennzahlen zur Beschreibung des Werkzeuginnendruckverlaufs werden im Folgenden beschrieben und sind in Bild 6.3 dargestellt.

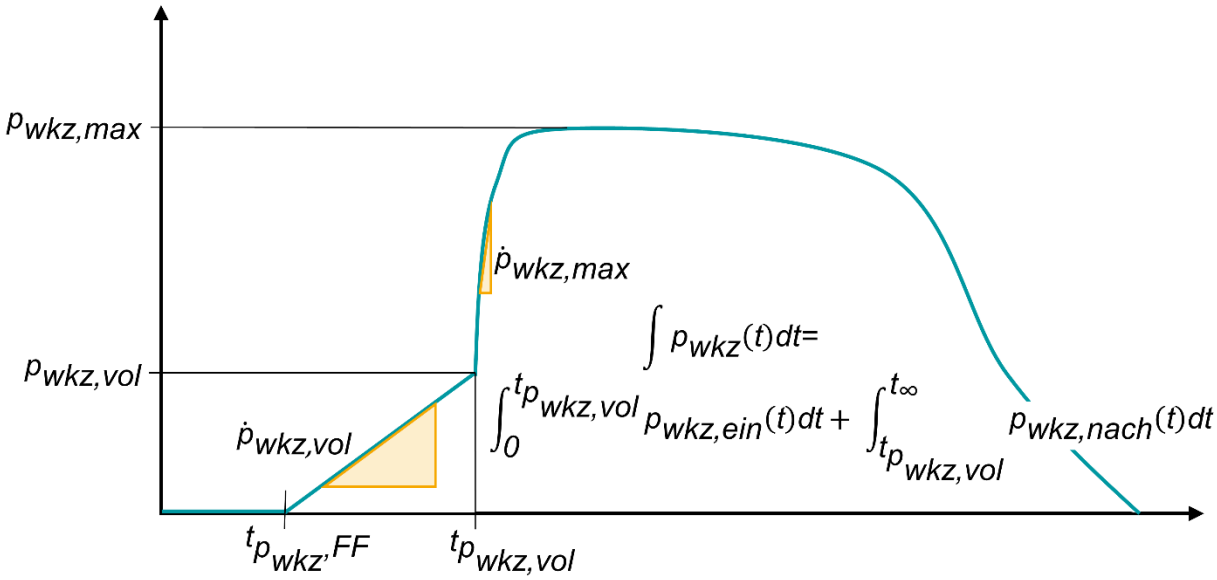

Bild 6.3: Kennzahlen des Werkzeuginnendruckverlaufs.

Fig. 6.3: Key characteristics of the cavity pressure curve.

Das **Werkzeuginnendruckintegral** $\int \boldsymbol{p_{wkz}(t)dt}$ wird aus dem Einspritzintegral $\int p_{wkz,ein}(t)dt$ und dem Nachdruckintegral $\int p_{wkz,nach}(t)dt$ gebildet. Es hat eine sehr hohe Korrelation zum Bauteilgewicht und kann zur Identifikation prozesslicher Veränderungen dienen, falls eine Abweichung des Integrals bei gleichen Prozesseinstellungen auftritt [Bic12]. Das **Einspritzintegral** entspricht der Fließzahl und wird bis zum Erreichen eines Schwellwerts für den Einspritzvolumenstrom gebildet, da bei der Werkzeuginnendruckregelung kein diskreter Umschaltvorgang von der Einspritzphase zur Nachdruckphase stattfindet. Zusätzlich wird das **Nachdruckintegral** bis zum Siegelpunkt gebildet, sodass Veränderungen im Druckintegral den einzelnen Prozessphasen zugeordnet werden können. Während Veränderungen im Einspritzintegral vorrangig auf Störeinflüsse zurückgeführt werden können, weist eine Veränderung des Nachdruckintegrals auf eine veränderte Regelgüte durch eine Arbeitspunktverschiebung hin, sofern keine automatisierte Prozessanpassung durch die Regelung erfolgt.

Der **maximale Werkzeuginnendruck** $\boldsymbol{p_{wkz,max}}$ wird am Ende der Kompressionsphase erreicht. Er beschreibt das Überschwingen des Werkzeuginnendrucks in Korrelation zum Sollwert und somit die Regelgüte.

Der **Zeitpunkt, an dem die Fließfront (FF) der Schmelze den Drucksensor erreicht** $\boldsymbol{t_{p_{wkz},FF}}$ wird über einen Schwellwert des Werkzeuginnendrucks von $p_{wkz} > 2$ bar

bestimmt. Dadurch wird sichergestellt, dass das Messrauschen von bis zu ± 1,5 bar die Kennzahl nicht beeinflusst. Über $t_{p_{wkz},FF}$ können Änderungen im Schließverhalten der Rückstromsperre über die Fließfront erkannt werden. Die **volumetrische Füllung der Werkzeugkavität** $\boldsymbol{p_{wkz,vol}}$ wird über die Knickstelle im Werkzeuginnendruckverlauf definiert. Je näher der Sensor am Anguss platziert ist, desto deutlicher ist der Gradientenwechsel erkennbar. Die Kombination aus $t_{p_{wkz},FF}$ und dem **Zeitpunkt der volumetrischen Kavitätsfüllung** $\boldsymbol{t_{wkz,vol}}$ kann das Fleißverhalten der Kunststoffschmelze beschreiben. Falls das Verhältnis beider Kennzahlen von Schuss zu Schuss variiert, kann dies auf Viskositätsänderungen des Materials hindeuten.

Die **Gradienten** $\boldsymbol{\dot{p}_{wkz,vol}}$ **und** $\boldsymbol{\dot{p}_{wkz,max}}$ beschreiben den Druckanstieg während der Bauteilfüllung sowie während der Kompressionsphase, siehe Bild 6.3. Darüber kann das Material- und Regelverhalten in Einspritz- und Kompressionsphase beschrieben werden. Beispielsweise ist eine geringere Viskosität durch eine höhere Fließfrontgeschwindigkeit und damit einem schnelleren Druckanstieg in der Kompressionsphase erkennbar.

6.4 Werkzeugtemperatur

Die Werkzeugtemperatur kann zur Identifikation thermischer Störeinflüsse genutzt werden. Eine Änderung der Werkzeugtemperatur hat einen direkten Einfluss auf die Bauteilqualität, wie die Maßhaltigkeit. In Bild 6.4 sind die Kennzahlen des Werkzeugtemperaturverlaufs dargestellt, welche im Folgenden erläutert werden.

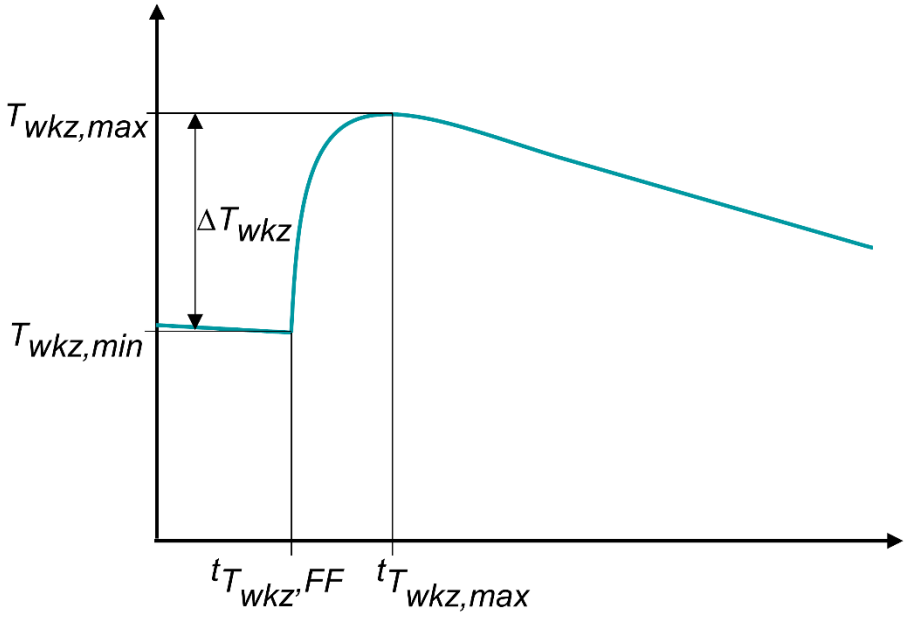

Bild 6.4: Der Temperaturverlauf beschreibt den thermischen Haushalt des Werkzeugs.

Fig. 6.4: The temperature curve describes the heat balance of the mould.

Die **minimale Werkzeugtemperatur** $T_{wkz,min}$ wird unmittelbar vor dem Überströmen des Sensors durch die Fließfront der Schmelze erreicht, da das Werkzeug lokal zu Beginn der Einspritzphase weiterhin abkühlt. Thermische Veränderungen im Temperaturhaushalt des gesamten Werkzeugs können somit erkannt werden. Der **Zeitpunkt der minimalen Werkzeugtemperatur** $t_{T_{wkz},FF}$ kann zur Detektion der Fließfront der Schmelze, äquivalent zum Überschreiten eines Werkzeuginnendrucks von 2 bar, ausgewertet werden. Im Allgemeinen reagieren Thermoelemente bei einem Sensordurchmesser von 4 mm langsamer als Drucksensoren, sodass eine Verwendung von Drucksensoren zur Erfassung der Fließfront empfohlen wird. Bei der Abtastzeit von 125 Hz waren jedoch in bisherigen Untersuchungen keine Unterschieden zwischen den Sensortypen in der Fließfronterkennung feststellbar.

Die **maximale Werkzeugtemperatur** $T_{wkz,max}$ wird etwa eine Sekunde nach dem Überströmen des Thermoelements erreicht und kann qualitativ zur Detektion von Veränderungen der Schmelzetemperatur verwendet werden, sofern die Werkzeugtemperatur konstant bleibt. Die maximale Werkzeugtemperatur wird etwa zu Beginn der Nachdruckphase erreicht und der **Zeitpunkt** $t_{T_{wkz,max}}$ erfasst.

Die **Differenz zwischen maximaler und minimaler Werkzeugtemperatur** ΔT_{wkz} beschreibt den Wärmeaustausch des Werkzeugs während eines Spritzgießzyklus. Eine hohe Temperaturdifferenz deutet auf eine größere Wärmeabfuhr hin. Die **mittlere Werkzeugtemperatur** $\bar{T}_{wkz}$ über der gesamten Zykluszeit kann verwendet werden, um Veränderungen im thermischen Haushalt des Spritzgießwerkzeugs festzustellen. Durch die Mittelwertbildung ist der Einfluss von Messrauschen auf die Kennzahlberechnung reduziert.

6.5 Übergreifende Prozesskennzahlen

Die **mittlere Druckübertragung** $\bar{p}$ zwischen Schneckendruck und Werkzeuginnendruck wird nach Gleichung 6.1 über die gesamte Dauer von Einspritz- und Nachdruckphase berechnet.

$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(p_{wkz,i} \,/\, p_{s,i})}{n} \qquad \textit{(Gl. 6.1)}$$

Die Kennzahl kann zur Identifikation von Viskositätsschwankungen genutzt werden, da bei höherer Viskosität eine geringere Druckübertragung und somit ein niedrigerer Wert gegeben ist. In diesem Zusammenhang wird als weitere Kennzahl die **maximale Druckübertragung** $\bar{p}_{max}$ bestimmt, welche am Ende der Kompressionsphase erreicht wird. Der Vorteil gegenüber einer separaten Betrachtung

von Schneckendruck und Werkzeuginnendruck liegt in einer Viskositätsbewertung unabhängig vom Regelungsverfahren.

Beim Einsatz von zwei Werkzeuginnendrucksensoren kann das **Druckverhältnis im Werkzeug $\bar{p}_{wkz}$** analog zur mittleren Druckübertragung berechnet werden. Allerdings haben Untersuchungen gezeigt, dass beim Einsatz mehrerer Werkzeuginnendrucksensoren der Zugewinn an Prozessinformation gering ist [HHV+23].

Im idealen Spritzgießprozess wird die Kavität in jedem Zyklus zum gleichen Zeitpunkt vollständig gefüllt. Der **Zeitpunkt der störungsfreien Kavitätsfüllung $t_{vol,theor.}$** wird nach Gleichung 6.2 aus dem Dosiervolumen, der Dekompression und dem Kavitätsvolumen über die Schneckenposition berechnet.

$$t_{vol,theor.} = f(V) = t(V_{max} - V_{deko} - V_{kav}) \qquad \textit{(Gl. 6.2)}$$

Die Differenz zwischen der theoretischen $t_{vol,theor.}$ und der realen volumetrischen Kavitätsfüllung t_{vol} gibt näherungsweise Aufschluss über das Schließverhalten der Rückstromsperre. Durch die Berücksichtigung weiterer Kennzahlen (z.B. t_{FF}) können qualitativ Veränderungen im Fließverhalten von Schuss zu Schuss während der Einspritzphase bestimmt werden.

Die Messdatenerfassung wird mit dem Start des Einspritzvorgangs begonnen und nach dem Dosiervorgang beendet. Diese **Zykluszeit t_{zyk}** beschreibt die Dauer von Einspritz-, Nachdruck- und Dosierphase. Änderungen der Zykluszeit deuten auf Veränderungen des Materialverhaltens hin.

6.6 Zyklusbezogene Metadaten

Zyklusbezogene Metadaten werden aus verschiedenen Datenquellen erfasst, um weitere Prozessinformationen zu jedem Zyklus zu erhalten. Die Maschineneinstellungen der Spritzgießmaschine werden gespeichert, um Änderungen in der Prozesseinstellung durch den Maschinenbediener festzuhalten. Dies ist wichtig, da Änderungen in den Maschineneinstellungen einen direkten Einfluss auf alle Prozessgrößenverläufe haben.

Zusätzlich können die zyklischen Prozessdaten überwacht werden, um zyklusübergreifende Störeinflüsse festzustellen. Beispielsweise können die Ist-Temperaturen der Zylinderheizzonen überwacht werden, um defekte Zylinderheizbänder oder eine unzureichende Kühlung der Einzugszone zu detektieren. Falls die Werkzeugtemperierung über eine OPC-UA Schnittstelle verfügt, können die Vor- und Rücklauftemperatur sowie der Durchfluss des Temperiermediums ebenfalls

erfasst werden. Aus der Produktionsumgebung werden Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck an zwei Messstellen erfasst, um Veränderungen in der Produktionsumgebung, beispielsweise zwischen zwei Versuchsreihen, zu erkennen.

7 SENSITIVITÄT DER PROZESSKENNZAHLEN FÜR STÖREINFLÜSSE

Im Folgenden wird die Eignung verschiedener Prozesskennzahlen zur Detektion von Störeinflüssen untersucht, um Veränderungen im Prozess bei phasenübergreifender Werkzeuginnendruckregelung frühzeitig zu erkennen und auszugleichen. Ideale Kennzahlen weisen eine geringe zufällige Streuung bei gleichzeitig hoher Sensitivität für Prozessveränderungen auf und haben eine hohe Korrelation zur Bauteilqualität.

Zunächst wird der stationäre Prozesszustand untersucht, um eine Bewertungsgrundlage für Prozessschwankungen bei Werkzeuginnendruckregelung zu schaffen. Anschließend werden Störeinflüsse in den Prozess eingebracht und im Kontext der zufälligen Prozessschwankungen bewertet. Dabei werden Anfahrvorgänge und thermische Veränderungen mit dem Material PP-TV untersucht. Als Bauteilgeometrie wird der Verzugsprobekörper ausgewählt, da eine große Veränderung der Bauteilabmessungen zu erwarten ist. Zur Bewertung von Materialschwankungen werden verschiedene Chargen eines PP-PCR für beide Bauteilgeometrien verarbeitet. Aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung verschiedener Rezyklatchargen (vgl. Kapitel 14.1) wird ein großer Chargeneinfluss auf die mechanischen Bauteileigenschaften erwartet. Falls nicht anders angegeben, werden die Maschineneinstellungen nach Tabelle 14.3 im Anhang mit einem minimalen Einspritzvolumenstrom von 0 cm^3/s verwendet.

7.1 Referenz im stationären Prozesszustand

Der Spritzgießprozess unterliegt natürlichen Schwankungen, die aus der Reproduzierbarkeit der Spritzgießmaschine, der Temperaturkontrolle von Aggregat und Werkzeug, dem Werkzeugverschließ und den Materialschwankungen resultieren. Dadurch liegt eine zufällige Streuung der Prozesskennzahlen und der Bauteilqualität vor. Die Quantifizierung der zufälligen Prozessstreuungen ist erforderlich, um Eingriffsgrenzen für die Regelung bei Veränderungen im Prozess zu definieren. Zur Analyse der natürlichen Prozessschwankungen werden die Prozessdaten von 100 Zyklen ausgewertet. Die Maßhaltigkeit wird zur Reduktion des Messaufwands für 30 zufällig ausgewählte Bauteile aus einer Stichprobe von 100 Bauteilen bestimmt. In Tabelle 7.1 sind Mittelwert und Standardabweichung für die Qualitätsgrößen aufgeführt.

	Diagonale	Länge	Breite	Rippen	Lasche
Mittelwert in mm	87,07	137,51	77,24	40,64	1,19
Stabw. ±	0,015	0,015	0,013	0,019	0,104

Tabelle 7.1: Mittelwert und Standardabweichung im stationären Prozesszustand.

Table 7.1: Mean value and standard deviation in the steady-state process condition.

Die Bauteilmaße weisen im stationären Prozesszustand größtenteils eine geringe Standardabweichung von weniger als 0,02 mm auf und liegen im Rahmen der Messgenauigkeit von 0,02 mm. Die Hochbiegung der Lasche kann messtechnisch nur schwierig erfasst werden, da die hohe Standardabweichung von 0,1 mm auf Messungenauigkeiten zurückzuführen ist. Aus diesem Grund wird das Qualitätsmerkmal in folgenden Untersuchungen nicht weiter berücksichtigt.

Die Standardabweichung der Prozesskennzahlen resultiert aus der Summe der zufälligen Prozessstreuung und dem Messrauschen in den Prozessgrößenverläufen. Kennzahlen, die ausschließlich im stationären Prozesszustand einen konstanten Wert aufweisen und durch das Messrauschen nur geringfügig beeinflusst werden, sind ideal, um Prozessabweichungen zu detektieren. Für die durchgeführten Untersuchungen weisen einige der Kennzahlen diese Eigenschaft auf. Dazu zählen u.a. die Integrale von Schneckendruck und Werkzeuginnendruck, die maximale Einspritzsteigung des Werkzeuginnendrucks, der maximale Werkzeuginnendruck, der maximale Schneckendruck in der Kompressionsphase und am Nachdruckende sowie die Kennzahlen des Werkzeugtemperaturverlaufs. Definierte Überwachungsgrenzen können unter Berücksichtigung verschiedener Störeinflüsse festgelegt werden. Dabei sollte verhindert werden, dass bereits große Qualitätsabweichungen in der Produktion auftreten, bevor die Störung erkannt wird.

7.2 Anfahrvorgänge nach einer Produktionsunterbrechung

Bei einer Produktionsunterbrechung verändern sich während des Maschinenstillstands der thermische Haushalt von Spritzgießmaschine, Kunststoffschmelze und Werkzeug, sodass Prozess- und Qualitätsveränderungen beim Wiederanfahren des Prozesses auftreten, bis ein stationärer Prozesszustand erreicht ist. Ein längerer Maschinenstillstand führt zu größeren Veränderungen, sodass auch die Prozesskennzahlen größere Veränderungen aufweisen. Die hier dargestellten Untersuchungen bauen auf den studentischen Arbeiten der Herren Olmaz und Fink auf [Fin22, Olm21].

Zur Auswahl geeigneter Kennzahlen für die Identifikation des Übergangs vom Anfahren zum stationären Prozess werden die ersten 150 Zyklen des Anfahrvorgangs ausgewertet. Die zyklische Veränderung der Prozessgrößenverläufe nimmt exponentiell ab, sodass die größten Veränderungen in den ersten Zyklen erkennbar sind. Die Veränderungen des Prozesszustands wirken sich auch auf die Bauteilqualität aus, siehe Bild 7.1. Die Maße sind zur vereinfachten Darstellung für den Wertebereich zwischen Minimum und Maximum normiert aufgetragen.

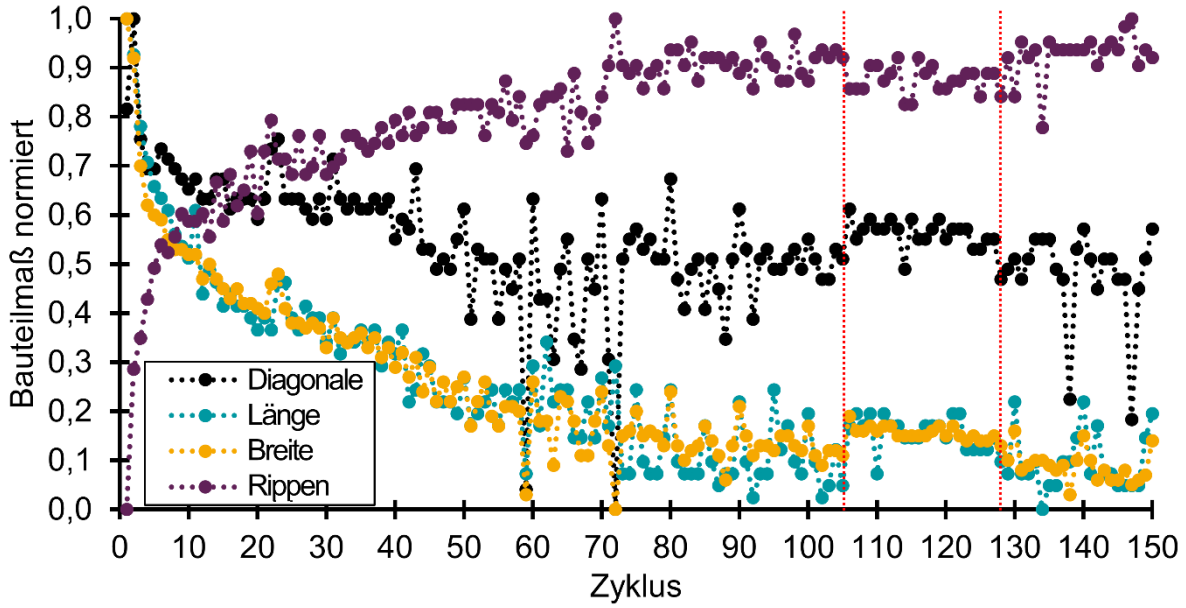

Bild 7.1: Verlauf der Bauteilmaße während der ersten 150 Zyklen nach Produktionsstart.

Fig. 7.1: Part dimensions during the first 150 cycles after start of production.

Alle Prüfmaße zeigen deutlich, dass die Bauteilverformung während des Anfahrvorgangs zunimmt, da eine steigende Werkzeugtemperatur die Maßabweichung begünstigt. Die Kunststoffschmelze besitzt ein höheres spezifisches Volumen, ebenfalls aufgrund der langen Verweilzeiten im Plastifizierzylinder, sodass weniger Schmelze zum Schwindungsausgleich in die Kavität nachgefördert wird. Die Bauteile 105 bis 128 weisen einen Offset zum erkennbaren Kurvenverlauf auf. Da diese Bauteile nacheinander am gleichen Tag gemessen wurden, kann die Abweichung auf die Messmethodik bzw. Prüfbedingungen des Tages der Bauteilvermessung zurückgeführt werden.

Der diagonale Abstand weist eine höhere Schwankungsbreite als die anderen Abmessungen auf, da hier vermehrt Messausreißer auftreten. Länge und Breite des Verzugsprobekörpers weisen eine hohe Korrelation zueinander auf, wie im ähnlichen Kurvenverlauf erkennbar ist. Die Maßhaltigkeit nimmt bei einer Extrapolation der Kurvenverläufe auch nach 150 Zyklen weiter ab, sodass nach zwei Stunden

Maschinenlaufzeit noch kein stationärer Prozesszustand erreicht wurde. Die Veränderungen fallen nach den ersten 100 Bauteilen jedoch nur gering aus. Der Abstand zwischen den Rippen ist bereits nach dem 70. Zyklus näherungsweise konstant. Aufgrund der geringen Veränderungen könnten somit in der Spritzgießproduktion bereits Gutteile innerhalb der Spezifikationsgrenzen produziert werden, obwohl noch kein stationärer Prozesszustand erreicht ist.

In vorherigen Untersuchungen wurde das Bauteilgewicht als Qualitätsgröße verwendet, um Anfahrvorgänge zu untersuchen [HHV+21]. Zur Einordnung der Vorarbeiten wurde zusätzlich das Bauteilgewicht erfasst, siehe Bild 7.2.

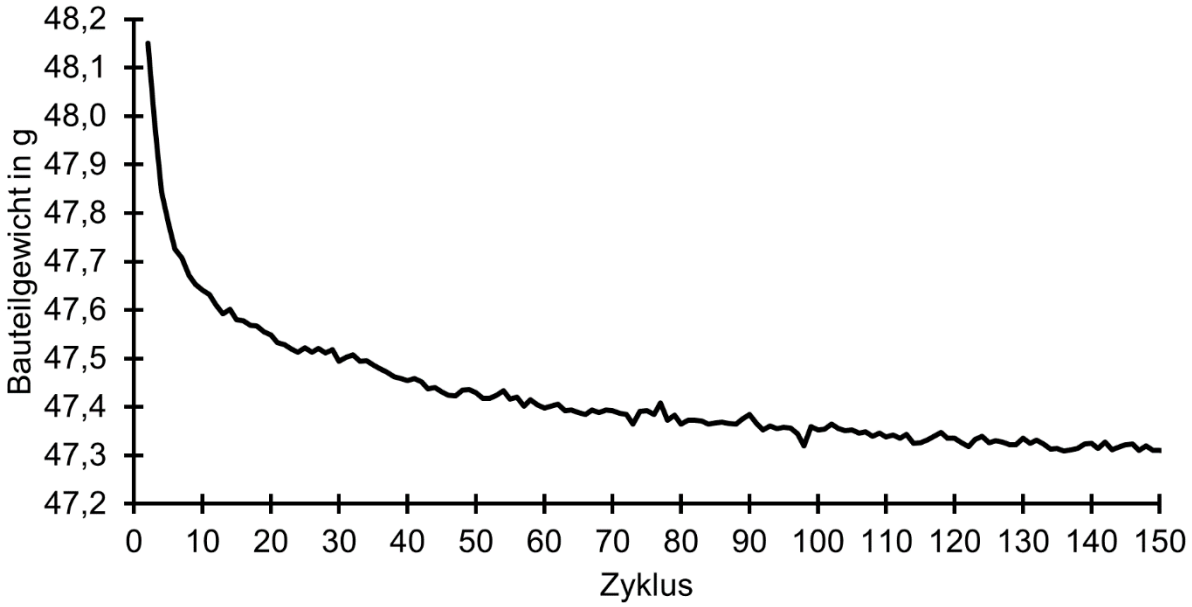

Bild 7.2: Verlauf des Bauteilgewichts während der ersten 150 Zyklen nach Produktionsstart.

Fig. 7.2: Part weight during the first 150 cycles after start of production.

Beim (Wieder-)Anfahren der Produktion bewirkt insbesondere das um ca. 5 Grad kältere Werkzeug eine schnellere Abkühlung der einströmenden Schmelze. Diese führt aufgrund eines geringeren spezifischen Volumens der Schmelze zu einem höheren Massestrom in die Kavität. Infolgedessen ist das Bauteilgewicht in den ersten Produktionszyklen höher und fällt exponentiell auf einen quasistationären Wert ab [HHV+21].

Der Verlauf des Bauteilgewichts ähnelt den Verläufen der Bauteilabmessungen. Die Korrelation zwischen dem Gewicht und den Abmessungen Rippenabstand, Länge und Breite beträgt bei einer linearen Regression für die ersten 70 Zyklen mehr als 95%. Die Korrelation wird für die darauffolgenden Zyklen auf maximal 49,5 % zwischen Gewicht und Breite reduziert. Die geringere Korrelation im Vergleich zum Erwartungswert könnte nur teilweise auf Messunsicherheiten zurückzuführen sein. Die

Ergebnisse zeigen, dass nur eine eingeschränkte Bewertung der Bauteilqualität über das Gewicht möglich ist, jedoch für die ersten Zyklen ein linearer Zusammenhang besteht.

Im Folgenden werden verschiedene Prozesskennzahlen diskutiert, um den Prozess und somit indirekt die Bauteilqualität während des Anfahrens der Spritzgießproduktion zu überwachen. In der Analyse wurden alle Prozesskennzahlen berücksichtigt. Bereits vor Erreichen des stationären Zustands von Prozessgrößen und Bauteilqualität können Bauteile produziert werden, welche die Qualitätsanforderungen erfüllen. Die Kennzahlen weisen idealerweise denselben exponentiellen Verlauf wie die Qualitätsmerkmale auf, um den quasistationären Prozesszustand abzubilden. Dadurch könnte eine Qualitätsvorhersage auf Basis von Prozesskennzahlen getroffen werden. In Bild 7.3 sind die Kennzahlen mit der höchsten Korrelation zu den Qualitätsmerkmalen dargestellt, um die Qualitätsänderung über dem Anfahrprozess abzubilden. Die Kennzahlen sind jeweils auf den Wertebereich zwischen Minimum und Maximum normiert.

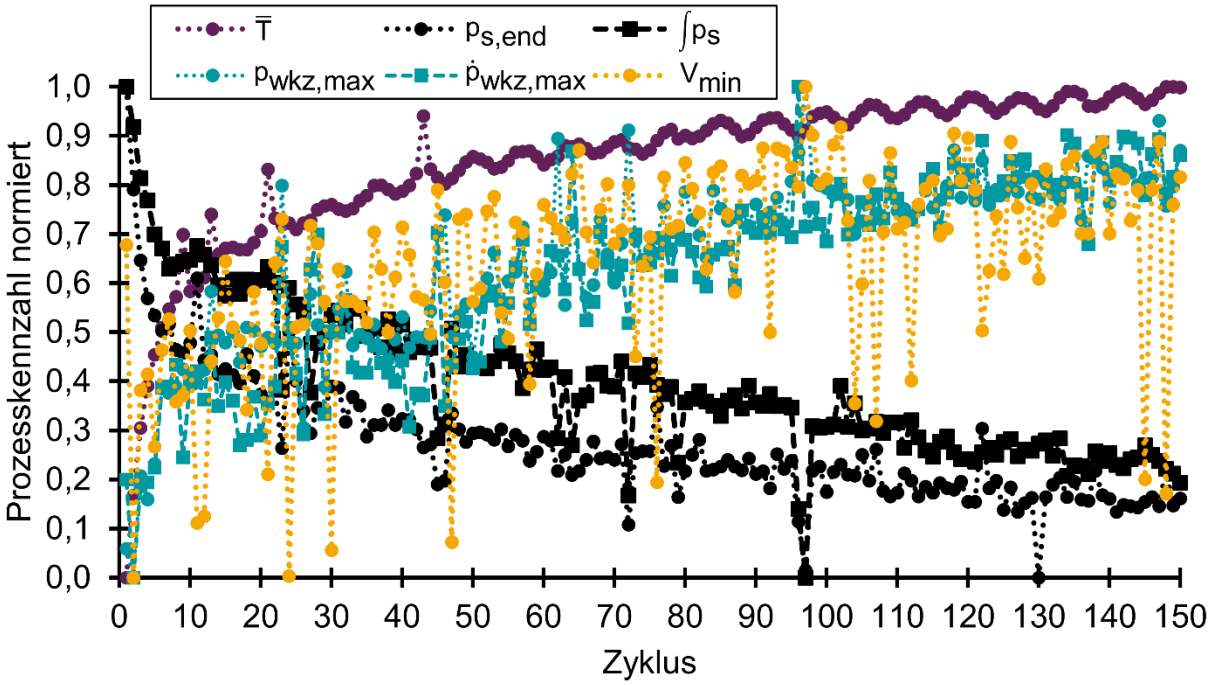

Bild 7.3: Wichtigste Prozesskennzahlen während der ersten 150 Zyklen nach Produktionsstart.

Fig. 7.3: Most important key characteristics during the first 150 cycles after start of production.

Die Veränderung des thermischen Haushalts kann über den Anstieg der Werkzeugtemperatur detektiert werden. Die mittlere Werkzeugtemperatur $\overline{T}_{wkz}$ steigt während der Anfahrzyklen an und weist eine Korrelation von über 90 % zu den Qualitätsmerkmalen auf. Zyklische Schwankungen der Wasservorlauftemperatur werden in der mittleren Werkzeugtemperatur, nicht jedoch in den Qualitätsmerkmalen

sichtbar. Der Temperaturverlauf ist sinusförmig mit einer Schwankungsbreite von 0,3 °C, die sich aus dem Regelverhalten der Temperierer ergibt.

Während der Anfahrzyklen können ebenfalls Veränderungen im Schneckendruckverlauf festgestellt werden. Der Schneckendruck am Ende der Nachdruckphase $p_{s,end}$ korreliert während der ersten 70 Zyklen am stärksten mit den Qualitätsmerkmalen, da nach einem stark exponentiellen Abfall in den ersten 10 Zyklen die Veränderung der Prozesskennzahl abnimmt. Für den quasistationären Zustand weist das Schneckendruckintegral $\int p_s(t)dt$ die höchste Korrelation auf. Die Änderungen des Schneckendruckintegrals sind auf einen verringerten Schneckendruckgradienten in der Nachdruckphase zurückzuführen.

Das Werkzeuginnendruckintegral $\int p_{wkz}(t)dt$ bleibt während der Anfahrzyklen nahezu konstant und weist eine Gesamtveränderung von 0,4 % auf. Allerdings deuten ein Anstieg des maximalen Werkzeuginnendrucks $p_{wkz,max}$ und der maximalen Steigung des Einspritzdrucks $\dot{p}_{wkz,max}$ auf eine Beeinflussung der Regelgüte durch die kontinuierliche Veränderung des Prozesszustands hin. Beide Kennzahlen weisen jeweils eine Korrelation von mehr als 50 % zur Bauteilqualität auf, sodass ein allgemeiner Zusammenhang zwischen Regelgüte und Bauteilqualität besteht. Die ersten 4 Anfahrzyklen werden durch beide Kennzahlen nicht abgebildet, was statistisch bei einer Regressionsanalyse in einem hohen Residuum erkennbar ist. Die Umsetzung einer lernenden MPR zum Ausgleich der Regelabweichungen von Schuss zu Schuss ist geplant. Somit ist davon auszugehen, dass die Reproduzierbarkeit der Kennzahlen des Werkzeuginnendruckverlaufs bei Prozessveränderungen zunimmt und diese nicht zur Prozessüberwachung geeignet sind.

Der Abstand zwischen den Rippen weist eine hohe Korrelation zum Restmassepolster und damit dem gesamten Einspritzvolumen auf. Nach den ersten 70 Zyklen weist das Restmassepolster V_{min} einen konstanten Mittelwert auf. Die Schwankungen des Restmassepolsters von Schuss zu Schuss sind jedoch im Vergleich zu den anderen Prozesskennzahlen sehr hoch, da Veränderungen im Schließverhalten der Rückstromsperre durch die Werkzeuginnendruckregelung prozessbedingt ausgeglichen werden und das Messrauschen diese Kennzahl stark beeinflusst.

Die Kennzahlen der Einspritzphase (u.a. Knickstelle im Werkzeuginnendruckverlauf $p_{wkz,vol}$,, Zeitpunkt des maximalen Schneckendrucks $t_{s,komp}$, Einspritzdruckintegral $\int p_{s,ein}(t)dt$) sind zur Detektion des Anfahrprozesses nicht geeignet, da sie währenddessen einen konstanten Wert aufweisen. Auch die Druckübertragung zwischen Aggregat und Werkzeug weist keine Korrelation zur Bauteilqualität auf.

Es kann festgehalten werden, dass die Bauteilqualität während des Anfahrvorgangs der Spritzgießmaschine verändert wird. Der Abstand zwischen den Rippen weist bereits nach 70 Zyklen einen konstanten Wert auf und korreliert mit dem Restmassepolster. Die anderen Qualitätsmerkmale verändern sich auch nach 150 Zyklen weiter und können über die mittlere Werkzeugtemperatur, das Schneckendruckintegral und den Schneckendruck am Ende der Nachdruckphase überwacht werden.

7.3 Thermische Veränderungen

Beim Spritzgießen können Schwankungen von Umgebungs-, Werkzeug- oder Schmelzetemperatur auftreten. Vorversuche haben gezeigt, dass die gezielte Untersuchung von Umgebungseinflüssen im Forschungsumfeld nicht umsetzbar ist, da die Umgebungsbedingungen nicht kontrolliert eingestellt werden können [Kle22]. Daher werden thermischen Veränderungen simuliert, indem Wasservorlauf- und Zylindertemperatur variiert werden. Für drei Prozesseinstellungen werden die Prozesskennzahlen und die Bauteilqualität für 10 Zyklen ausgewertet.

Der Regler wird für eine Werkzeugtemperatur von 40 °C und eine Zylindertemperatur von 240 °C parametriert. Daher wird zunächst überprüft, inwiefern eine erneute Parametrierung des Reglers bei thermischen Veränderungen erforderlich ist. In Bild 7.4 sind die Verläufe von Werkzeuginnendruck und Einspritzvolumenstrom für alle Arbeitspunkte gegenübergestellt. Aufgrund der hohen Reproduzierbarkeit innerhalb einer Temperatureinstellung wird jeweils nur ein Zyklus exemplarisch gezeigt.

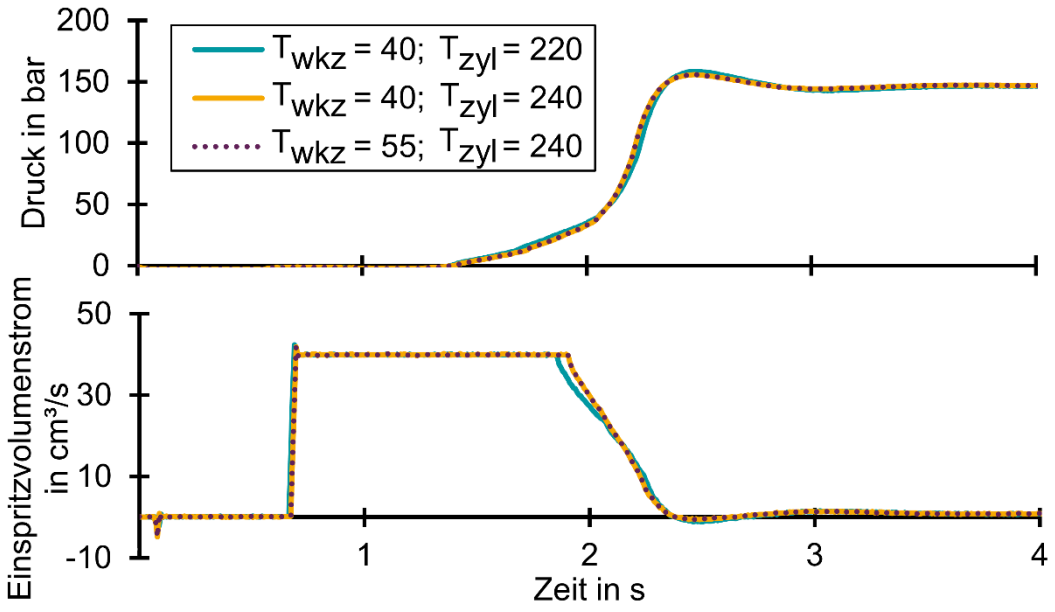

Bild 7.4: Werkzeuginnendruck und Einspritzvolumenstrom für verschiedene thermische Prozessbedingungen.

Fig. 7.4: Cavity pressure and injection volume flow rate for different thermal process conditions.

Eine Veränderung der Werkzeugtemperatur hat keinen Einfluss auf die Regelgüte, da die Prozessgrößenverläufe den selben Verlauf aufweisen. Allerdings sind geringe Unterschiede der Regelgüte für unterschiedliche Zylindertemperaturen erkennbar. Der Einspritzvolumenstrom wird bei einer geringeren Temperatur früher reduziert. Dennoch tritt ein höheres Überschwingen um 2,75 bar auf. Die Signifikanz dieser Regelabweichung wird geprüft, indem die Kennzahlen des Werkzeuginnendrucks mittels Regressionsanalyse zur Bauteilqualität korreliert werden, da der Werkzeuginnendruck ein wichtiger Indikator für die Bauteilqualität ist. Es konnte kein signifikanter Einfluss des Werkzeuginnendrucks auf die Bauteilqualität festgestellt werden, sodass der Regler ein robustes Verhalten gegenüber thermischen Störungen aufweist und keine Anpassung der Regelparameter für verschiedene thermische Prozessbedingungen erforderlich ist.

Durch thermische Veränderungen wird die Bauteilqualität stark beeinflusst, sodass eine Detektion thermischer Veränderungen während des Prozesses erforderlich ist. In Bild 7.5 ist die Abweichung der Bauteilmaße gegenübergestellt.

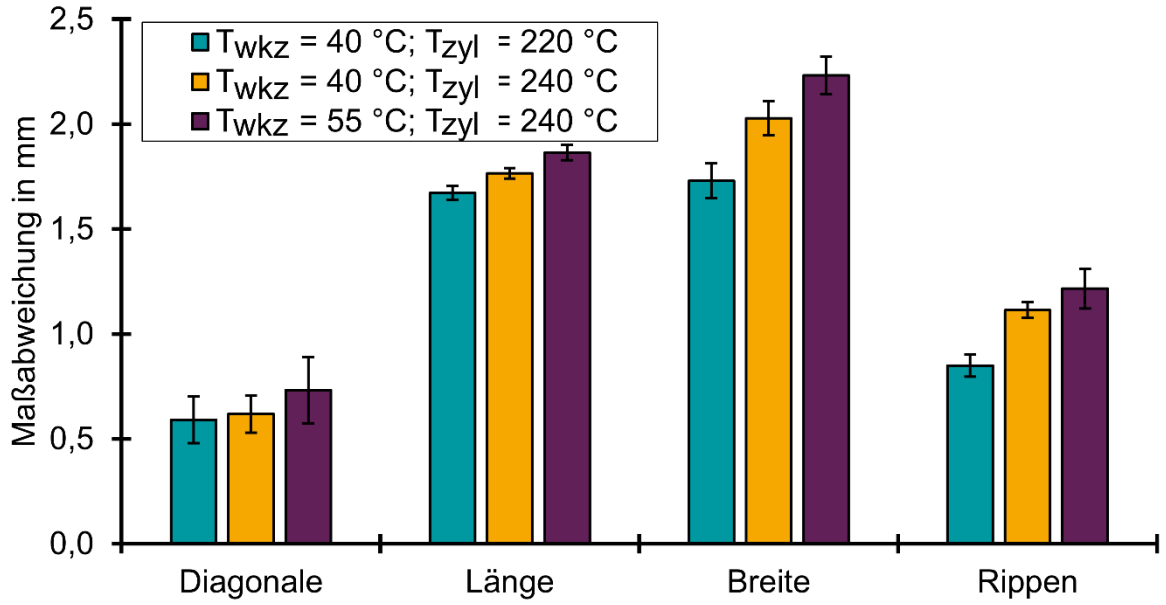

Bild 7.5: Maßabweichung bei verschiedenen Werkzeug- und Zylindertemperaturen.

Fig. 7.5: Dimensional deviation for different mould and barrel temperatures.

Bei einer Erhöhung der Zylindertemperatur um 20 °C werden die Maßabweichungen größer. Wird zusätzlich die Werkzeugtemperatur um 15 °C erhöht, nimmt die Abweichung weiter zu. Insbesondere die Bauteilbreite und der Abstand zwischen den Rippen werden negativ beeinflusst, sodass geringere Temperaturen zu einem besseren Qualitätsergebnis führen. Die diagonale Bauteilabmessung wird nicht signifikant beeinflusst, da sich die Streubreite für alle Arbeitspunkte überschneidet.

Die Versuchsdaten werden im Folgenden verwendet, um zu untersuchen, inwieweit der Einfluss thermischer Störgrößen auf die Bauteilqualität über Prozesskennzahlen abgebildet werden kann. Zur Einordnung der Ergebnisse wird darauf verwiesen, dass die Korrelation der thermischen Störungen zu den Qualitätsmerkmalen mittels linearer Regressionsanalyse bei 80 % liegt und somit nicht vollständig abgebildet wird.

Die Kennzahlen des Werkzeugtemperaturverlaufs weisen mittels linearer Regressionsanalyse ein Vertrauensniveau von mehr als 97 % zu den thermischen Prozesseinstellungen auf und sind in Bild 7.6 dargestellt.

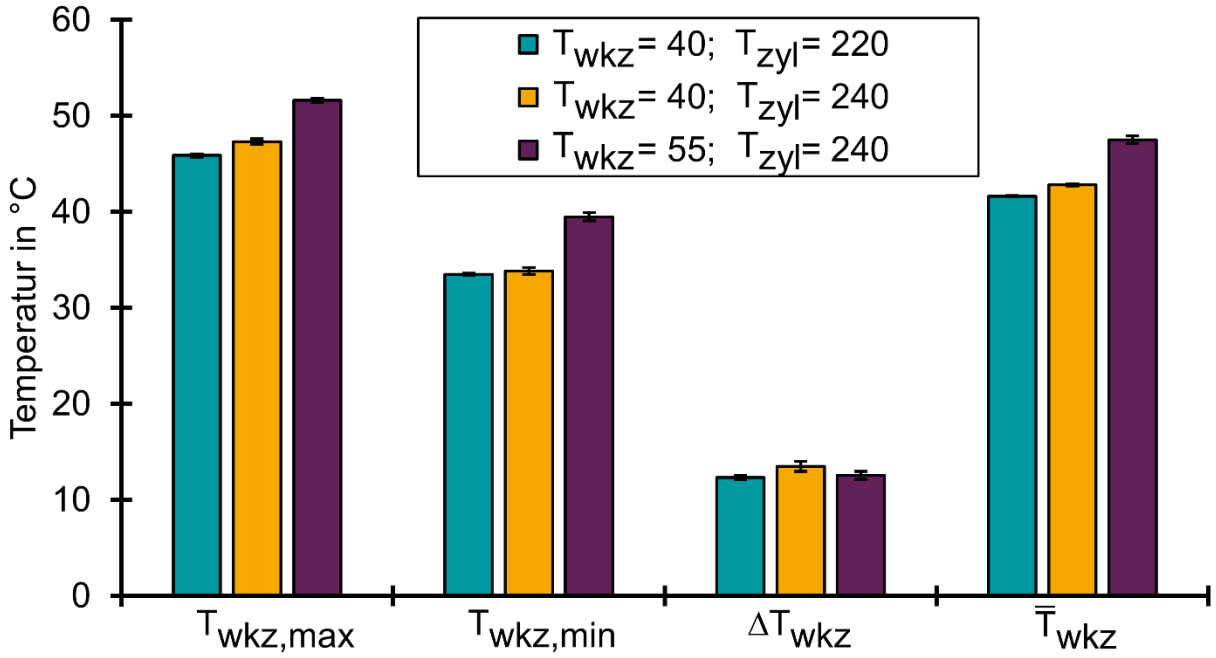

Bild 7.6: Prozesskennzahlen des Temperaturverlaufs.

Fig. 7.6: Key characteristics of the temperature curve.

Die maximale Werkzeugtemperatur $T_{wkz,max}$ und die mittlere Werkzeugtemperatur $\overline{T}_{wkz}$ werden durch die Wasservorlauftemperatur und die Zylindertemperatur beeinflusst, da das Werkzeug bei einer höheren Schmelzetemperatur während der Kavitätsfüllung stärker aufgeheizt wird. Änderungen der Werkzeugtemperatur können über die minimale Werkzeugtemperatur $T_{wkz,min}$ erfasst werden, da die Werkzeugtemperatur erst nach dem Überströmen des Sensors durch die Schmelzetemperatur beeinflusst wird. Die Korrelation der vorgestellten Kennzahlen zur Bauteilqualität ist mit 30 - 60 % nur schwach ausgeprägt, da Änderungen der Zylindertemperatur nicht vollständig abgebildet werden. Die Differenz aus maximaler und minimaler Werkzeugtemperatur ΔT_{wkz} ermöglicht keine eindeutige Identifizierung thermischer Veränderungen, da neben dem Temperaturunterschied auch das Temperaturniveau betrachtet werden sollte. Falls Werkzeug- und Zylindertemperatur gleichgerichtet verändert werden

resultiert daraus eine gleichbleibende Temperaturdifferenz, jedoch ist der Temperaturhaushalt unterschiedlich, vgl. Bild 7.6.

Über den Schneckendruckverlauf können thermische Störungen ebenfalls detektiert werden. Insbesondere der Schneckendruck am Ende der Nachdruckphase und die Nachdrucksteigung weisen mit mindestens 97 % ein hohes Vertrauensniveau zu den Störgrößen auf und sind in Bild 7.7 dargestellt.

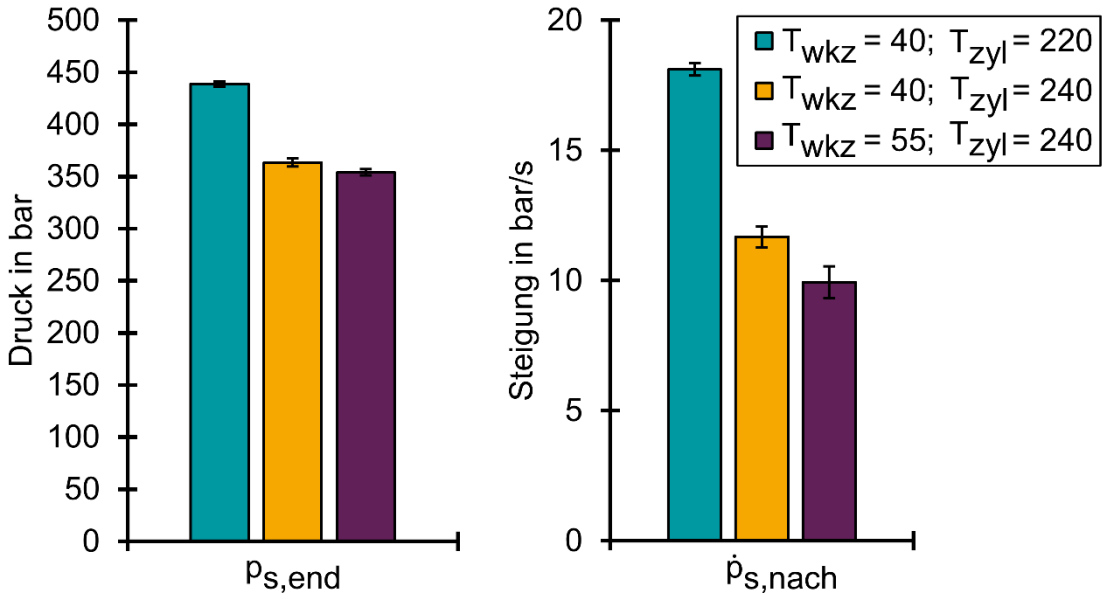

Bild 7.7: Prozesskennzahlen des Schneckendruckverlaufs.

Fig. 7.7: Key characteristics of the screw pressure curve.

Die Kennzahlen $p_{s,end}$ und $\dot{p}_{s,nach}$ werden durch die Zylindertemperatur am stärksten beeinflusst, da die Kennzahlen für die erste Versuchseinstellung die größten Unterschiede zeigen. Eine höhere Zylindertemperatur verringert die Viskosität, sodass der Schneckendruckbedarf sinkt. Der Effekt einer Zylindertemperaturänderung auf die beiden Prozesskennzahlen ist dabei um mehr als das Dreifache höher als bei der Werkzeugtemperatur, welche ebenfalls einen signifikanten Einfluss hat. Dies ist im Vergleich der Versuchspunkte 2 und 3 zu sehen. Daher sind die Kennzahlen nicht ausschließlich zur Detektion von Veränderungen der Schmelzetemperatur geeignet, sondern beschreiben ebenfalls Veränderungen der Werkzeugtemperatur. Für beide Kennzahlen ist die Korrelation zur Bauteilqualität mit 58 - 88 % hoch, sodass eine Überwachung während der Produktion sinnvoll ist. Der Abstand zwischen den Rippen kann am besten abgebildet werden, gefolgt von Breite und Länge.

7.4 Chargenwechsel bei PCR

Bei der Verarbeitung von Rezyklaten treten Veränderungen der Bauteilqualität auf, sobald ein Wechsel der Materialcharge stattfindet [HHV+23]. Zum Auffinden des materialspezifischen Zusammenhangs zwischen Bauteilqualität und Materialcharge wurden bereits umfangreiche Materialanalysen der in dieser Arbeit verwendeten PP-PCR-Chargen in der studentischen Arbeit von Frau Schmitz durchgeführt [Sch22]. Dabei konnte kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Bauteilqualität und verschiedener Materialkennwerte festgestellt werden, welche die Zusammensetzung sowie das rheologische und thermische Schmelzeverhalten beschreiben (vgl. Kapitel 14.1). Die höchste Korrelation zum Bauteilgewicht zeigten der MFR und der anorganische Reststoffanteil im Rezyklat, welche jedoch auch nur bedingt aussagekräftig sind [HHV+23]. Die Inkonsistenzen der Materialeigenschaften können demnach nicht eindeutig den Qualitätsveränderungen zugeordnet werden.

Im Folgenden wird untersucht, ob Prozesskennzahlen zur Detektion verschiedener Rezyklatchargen eingesetzt werden können. Prozesskennzahlen bieten im Vergleich zu Labormessungen von Materialeigenschaften den Vorteil, dass sie inline während der Bauteilproduktion erfasst werden können. Demnach bieten sie das Potential zur Steigerung der Reproduzierbarkeit bei der Verarbeitung verschiedener Rezyklatchargen, sofern Qualitätsveränderungen über Prozesskennzahlen dargestellt werden können. Für die Untersuchungen werden die mechanischen Bauteileigenschaften sowie die Maßhaltigkeit für fünf verschiedene Chargen mit phasenübergreifender Werkzeuginnendruckregelung verglichen und die wichtigsten Kennzahlen zur Detektion von materiellen Veränderungen bestimmt.

Zur Analyse der mechanischen Bauteileigenschaften werden die Maschineneinstellungen einer zentralen Prozesseinstellung ausgewählt, um den Versuchsaufwand zu begrenzen (vgl. Tabelle 14.6). Aus Plattenbauteilen werden 20 Zugprobekörper je Materialcharge hergestellt und mechanisch geprüft. Die mechanischen Bauteileigenschaften sind in Bild 7.8 dargestellt.

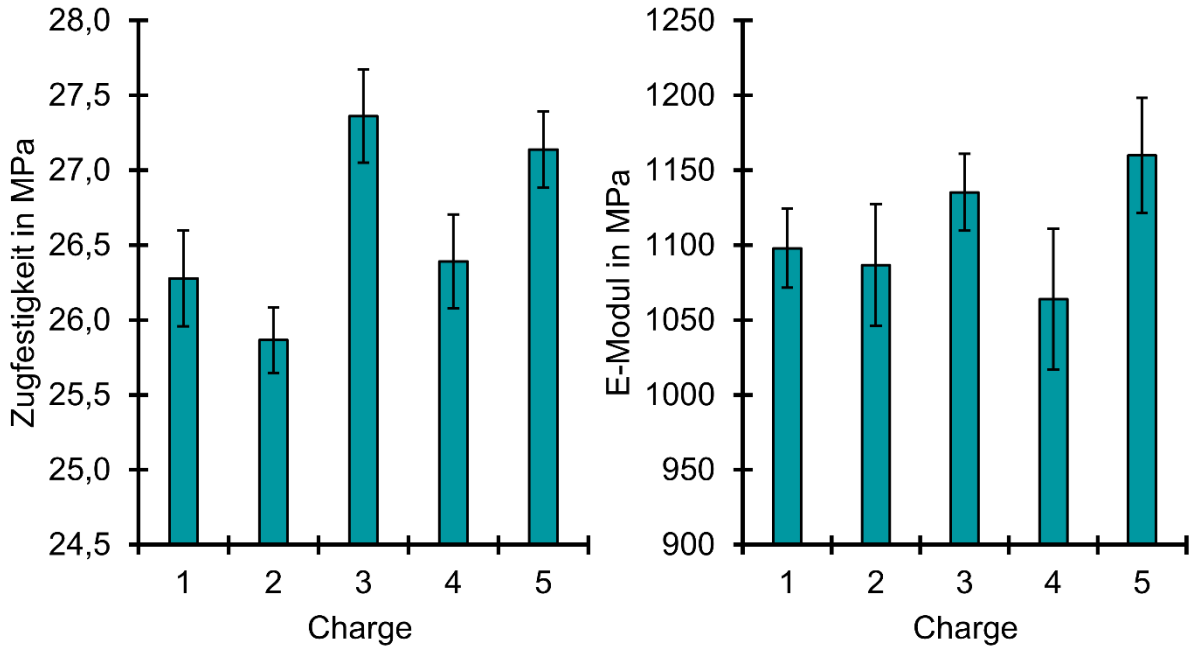

Bild 7.8: Die mechanischen Eigenschaften variieren für verschiedene Materialchargen.

Fig. 7.8: The mechanical part properties vary for different material batches.

Die Zugfestigkeit ist für Charge 3 am höchsten und für Charge 2 am geringsten. Die Standardabweichung ist im Verhältnis zur Festigkeitsänderung hoch, sodass keine klare Differenzierung aller Chargen möglich ist. Die Unterschiede zwischen den Chargen sind für den E-Modul geringer ausgeprägt und liegen annähernd im Rahmen der Standardabweichung. In Bild 7.9 sind die wichtigsten Kennzahlen zur Korrelation zwischen den mechanischen Bauteileigenschaften und den Prozesskennzahlen gegenübergestellt.

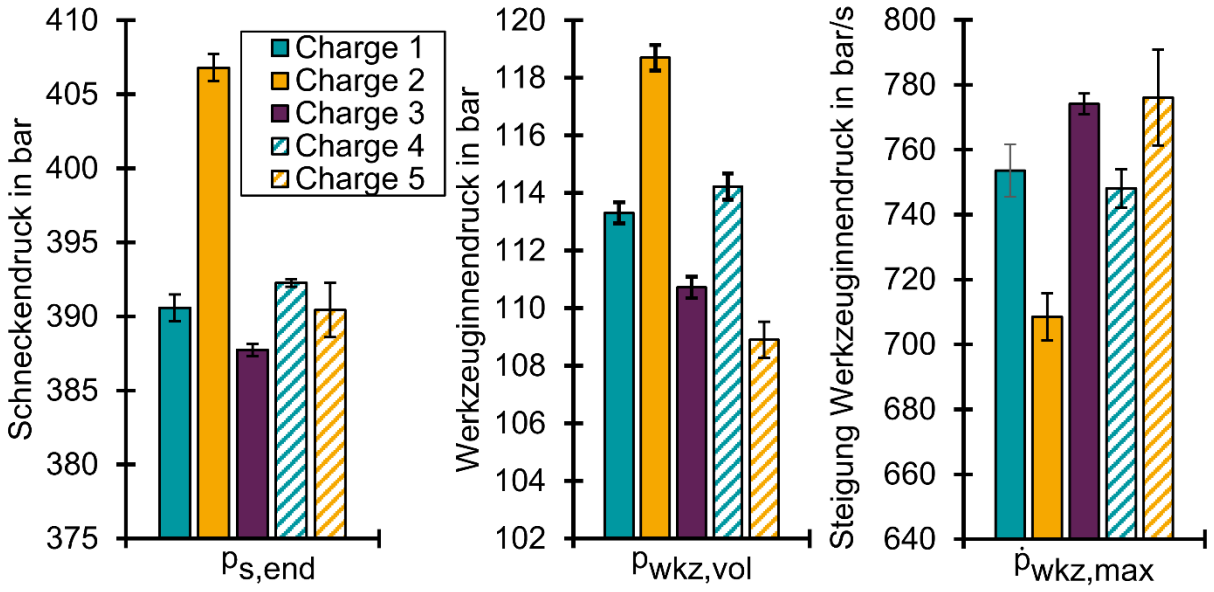

Bild 7.9: Prozesskennzahlen mit Korrelation zu den mechanischen Bauteileigenschaften.

Fig. 7.9: Process indicators with correlation to the mechanical part properties.

Die Zugfestigkeit weist einen Zusammenhang zum Schneckendruck am Ende der Nachdruckphase $p_{s,end}$ auf. Dabei entspricht ein hoher Schneckendruck einer geringen Zugfestigkeit. Auffällig ist der besonders hohe Schneckendruck für Charge 2, welcher über dem gesamten Zyklus um ca. 15 bar höher liegt als bei den anderen Chargen. Der höhere Schneckendruck kann keiner Materialeigenschaft eindeutig zugewiesen werden, sodass dazu zur Korrelation zwischen Prozess und Rezyklateigenschaften weitere Materialuntersuchungen notwendig sind.

Der Werkzeuginnendruck bei volumetrischer Bauteilfüllung $p_{wkz,vol}$ korreliert ebenfalls zur Zugfestigkeit, wobei ein hoher Werkzeuginnendruck bei volumetrischer Füllung einer hohen Zugfestigkeit entspricht. Gleichzeitig ist die maximale Steigung des Werkzeuginnendrucks $\dot{p}_{wkz,max}$ geringer, was beides der höheren Viskosität der Chargen 1 und 4 im Vergleich zu den Chargen 3 und 5 zugeordnet werden kann, vgl. Tabelle 14.1. Somit könnte sich eine höhere Druckübertragung in die Kavität aufgrund einer geringeren Materialviskosität positiv auf die mechanischen Bauteileigenschaften auswirken. Da jedoch viele weitere Unterschiede zwischen den Materialchargen bestehen, gilt es diese These in weiteren Versuchen zu prüfen.

Neben den mechanischen Bauteileigenschaften wird ebenfalls die Maßhaltigkeit der Spritzgießbauteile untersucht. Damit lässt sich feststellen, ob die Bauteilabmessungen verschiedener Materialchargen über Prozesskennzahlen vorhergesagt werden können. Darauf aufbauend könnten Anpassungen der Prozesseinstellungen abgeleitet bzw. zur Prozessregelung eingesetzt werden. Als weiteres Qualitätsmerkmal wurde das Gewicht ausgewertet, um den Bezug zur ersten Versuchsreihe herzustellen. Dazu wurden Verzugsprobekörper aus den Chargen 2 und 3 hergestellt, da sie die größten Abweichungen in der Zugfestigkeit zeigen und die Besonderheiten von Charge 2 überprüft werden können. Die Maßhaltigkeit ist in Bild 7.10 gegenübergestellt.

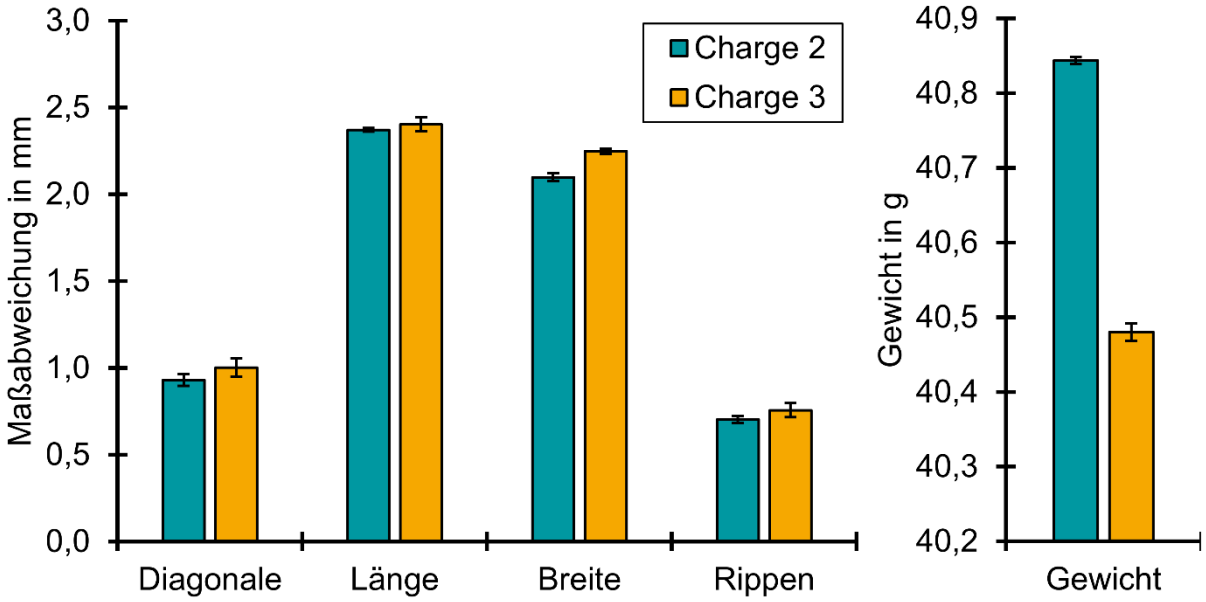

Bild 7.10: Maßabweichung für verschiedene Materialchargen.

Fig. 7.10: Dimensional deviation for different material batches.

Die Maßhaltigkeit ist für Charge 2 höher, insbesondere die Bauteilbreite weist mit 0,15 mm eine geringere Maßabweichung auf. Somit führt ein Wechsel der Materialcharge zu anderen Bauteilabmessungen. Die Bauteile von Charge 2 sind um 0,36 g schwerer, was bei der höheren Dimensionsgenauigkeit den allgemeinen Erwartungen entspricht. Die allgemeine Gültigkeit dieses Zusammenhangs gilt es zu prüfen. Die Prozesskennzahlen mit der höchsten Korrelation zu Maß- und Gewichtsabweichungen sind in Tabelle 7.2 aufgeführt.

	Werkzeuginnendruck			**Schneckendruck**		**Kombin.**
Kennzahl	$\mathbf{p_{wkz,max}}$	$\mathbf{\int p_{wkz,n.}}$	$\mathbf{\dot{p}_{wkz,max}}$	$\mathbf{p_{s,end}}$	$\mathbf{p_{s,komp}}$	$\mathbf{\bar{p}}$
Einheit	bar	bar · s	bar / s	bar	bar	-
Charge 2	152,40	1299,84	446,41	309,31	307,43	0,53
Stabw. ±	0,16	2,23	1,35	1,25	1,49	0,0013
Charge 3	152,84	1317,24	482,28	295,56	294,61	0,55
Stabw. ±	0,03	1,63	0,96	1,91	1,85	0,0015

Tabelle 7.2: Prozesskennzahlen zur Detektion von Materialschwankungen.

Table 7.2: Key characteristics for the detection of material fluctuations.

Bei der Korrelation zwischen Prozessdaten und Qualitätsdaten ist auffällig, dass der maximale Werkzeuginnendruck $p_{wkz,max}$ sowie das Werkzeuginnendruckintegral in der Nachdruckphase $\int p_{wkz,nach}$ für Charge 2 trotz Regelung des Werkzeuginnendrucks

geringer sind. Die Unterschiede sind mit 0,44 bar und 17,4 bar*s zwar nur schwach ausgeprägt, jedoch unter Berücksichtigung der Standardabweichung als Unterschied feststellbar. Sie sind unter anderem auf das Regelverhalten zurückzuführen, welches durch die Materialeigenschaften beeinflusst wird. Somit zeigt der Chargenvergleich, dass keine allgemeine Aussage über den Zusammenhang zwischen Nachdruck und Maßhaltigkeit des Bauteils getroffen werden kann, da für das gleiche Bauteil in anderen Arbeiten ein umgekehrter Zusammenhang festgestellt wurde [Hoh21]. Eine mögliche Ursache für die Gewichtsunterschiede ist das pvT-Verhalten der Materialien, da Charge 2 ein geringeres spezifisches Volumen im gesamten pvT-Kennfeld aufweist, wie in den Vorarbeiten festgestellt wurde [Sch22].

Charge 2 hat mit einem MFI von 10,31 im Vergleich zu einem MFI von 13,9 bei Charge 3 eine geringere Fließfähigkeit, wie durch eine geringere mittlere Druckübertragung $\bar{p}$ von 4,4 % zwischen Schnecke und Werkzeug deutlich wird. Die Kennzahlen des Schneckendrucks weisen die Fließunterschiede ebenso deutlich auf, da sowohl der maximale Schneckendruck in der Kompressionsphase als auch der Schneckendruck am Ende der Nachdruckphase um ca. 15 bar höher sind als bei Charge 3. Im Werkzeuginnendruckverlauf kann die höhere Materialviskosität über eine geringere Nachdrucksteigung in der Kompressionsphase $\dot{p}_{wkz,max}$ von mehr als 35 $\frac{bar}{s}$ und damit 7,4 % ebenfalls eindeutig erkannt werden. Somit werden die Beobachtungen eines deutlich höheren Schneckendrucks für Charge 2 bestätigt und eine qualitative Beschreibung der Fließeigenschaften verschiedener Materialchargen ist mittels Prozesskennzahlen möglich.

Der Zusammenhang zwischen Materialcharge, Prozesskennzahlen und Bauteilqualität kann nicht eindeutig bestimmt werden. Die Wechselwirkungen zur Material-zusammensetzung sind bei Rezyklaten besonders stark ausgeprägt, da unterschiedliche Bestandteile im Material enthalten sein können. Dadurch können auch bei gleichen Prozesskennzahlen unterschiedliche Bauteilqualitäten resultieren. Die Kennzahlen des Schneckendruck- und Werkzeuginnendruckverlaufs können jedoch überwacht werden, um Änderungen im Spritzgießprozess zu detektieren. Eine höhere Maßhaltigkeit korreliert mit einem höheren Bauteilgewicht. Ohne Qualitätsprüfung ist jedoch eine direkte Korrelation zwischen Qualität und Prozesskennzahlen nicht möglich. Die Kennzahlen können somit nur verwendet werden, um Unterschiede im Prozess aufzuzeigen. Zur konkreten Qualitätsoptimierung sind weiterführende Versuche mit zusätzlichen Materialchargen notwendig.

7.5 Zwischenfazit

Der Anfahrvorgang sowie die untersuchten Prozessstörungen werden über einen anderen Satz an Kennzahlen beschrieben. Die wichtigsten vier Kennzahlen sind zusammenfassend in Tabelle 7.3 für alle untersuchten Prozesse gegenübergestellt.

	Werkzeug-temperatur		Werkzeug-innendruck	Schneckendruck
Kennzahl	$\bar{T}_{wkz}$	$T_{wkz,min}$	$\dot{p}_{wkz,max}$	$p_{s,end}$
Stationär	x	x	x	x
Anfahrvorgang	x		(x)	x
Zylindertemperatur	x			x
Werkzeugtemperatur	x	x		(x)
Materialschwankungen			x	x

Tabelle 7.3: Prozesskennzahlen zur Detektion verschiedener Störeinflüsse.

Table 7.3 Key characteristics for the detection of different process disturbances.

Während des Anfahrprozesses bildet die mittlere Werkzeugtemperatur sowohl Prozessveränderungen als auch die Veränderung der Bauteilqualität gut ab. Zusätzlich sind der Schneckendruck am Ende der Regeldauer $p_{s,end}$ während der ersten 70 Spritzgießzyklen und das Schneckendruckintegral $\int p_s(t)dt$ im quasistationären Prozesszustand zur Detektion der Prozessveränderungen geeignet.

Die minimale Werkzeugtemperatur $T_{wkz,min}$ ist am besten zur Detektion von Veränderungen der Wasservorlauftemperatur geeignet, wobei auch andere Kennzahlen des Temperaturverlaufs eine hohe Korrelation aufweisen. Veränderungen der Schmelzetemperatur werden nur eingeschränkt durch die Kennzahlen abgebildet. Die Dauer der Dosierphase, der Schneckendruck am Ende der Regeldauer sowie der Schneckendruckgradient in der Nachdruckphase weisen demgegenüber eine hohe Korrelation zur Schmelzetemperatur auf. Beide Kennzahlen des Schneckendrucks bilden Veränderungen der Werkzeugtemperatur ebenfalls ab, jedoch etwas schlechter als die Kennzahlen des Temperaturverlaufs.

Die Bauteilqualität ist bei der Verarbeitung von PP-PCR sehr stark materialabhängig und daher nur eingeschränkt über den Prozess einstellbar. Änderungen der Materialcharge können über das Druckverhältnis zwischen Schneckenvorraum und Werkzeug $\bar{p}$, den maximalen Schneckendruck in der Kompressionsphase $p_{s,komp}$ und am Ende der Regeldauer $p_{s,end}$ sowie die maximale Werkzeuginnendrucksteigung in

der Einspritzphase $\dot{p}_{wkz,max}$ detektiert werden. Materialschwankungen können fast ausschließlich der maximalen Einspritzsteigung $\dot{p}_{wkz,max}$ zugeordnet werden.

Der Schneckendruck ist die einzige Prozessgröße, welche alle Störeinflüsse abbilden kann. Der maximale Schneckendruck am Ende der Regeldauer ist somit die wichtigste Kennzahl zur Prozessüberwachung. Zum automatisierten Ausgleich aller Störeinflüsse sollte demnach eine Prozessführung unter Berücksichtigung des Schneckendruckverlaufs untersucht werden. Das ausgearbeitete Konzept wird neben weiteren Prozessführungsstrategien im folgenden Kapitel vorgestellt.

8 KONZEPTE ZUR QUALITÄTSOPTIMIERTEN WERKZEUGINNENDRUCKREGELUNG

Beim Auftreten von Störeinflüssen werden der Schmelzezustand und damit auch die Bauteilqualität verändert. Eine Anpassung der Prozesseinstellung ist erforderlich, um Ausschussteile zu vermeiden. Die Werkzeuginnendruckkurve muss demnach verändert werden, um Qualitätsveränderungen zu homogenisieren. In den vorherigen Kapiteln wurde bereits gezeigt, dass eine hohe Regelgüte für verschiedene Werkzeuginnendruckverläufe erreicht werden kann. Darauf aufbauend werden im Folgenden Konzepte vorgestellt, die eine höhere Qualitätskonstanz durch automatisierte Anpassungen der Werkzeuginnendruckreferenz ermöglichen sollen.

Zunächst wird am Beispiel von Produktionsunterbrechungen untersucht, ob auch ohne die Analyse von Prozessgrößenverläufen oder Materialuntersuchungen eine qualitätsoptimierte Referenzvorgabe für den Werkzeuginnendruck möglich ist. Darauf folgend werden zwei Prozessführungskonzepte vorgestellt, die anhand von Prozessinformationen einen automatisierten Ausgleich von Störeinflüssen ermöglichen sollen. Die automatisierte Siegelpunktbestimmung ermöglicht eine Anpassung der Nachdruckzeit an die aktuellen Prozessbedingungen, indem der Siegelpunkt im Prozess bestimmt wird. Anschließend erfolgt die Vorstellung eines kühlratenabhängigen pvT-Modells zur pvT-optimierten Prozessführung. Durch die genauere Abbildung der Materialeigenschaften im Spritzgießprozesses soll die Qualitätskonstanz bei pvT-optimierter Regelung gesteigert werden.

8.1 Störungsausgleich ohne Prozessinformationen

Am Beispiel von Produktionsunterbrechungen unterschiedlicher Dauer wird untersucht, inwieweit ein Störgrößenausgleich ohne zusätzliche Prozessinformationen durch eine Anpassung der Werkzeuginnendruckreferenz möglich ist. Die folgende Methodik wurde in der studentischen Arbeit von Herrn Olmaz erarbeitet [Olm21].

Veränderungen von Schmelzezustand und Temperaturhaushalt während einer Produktionsunterbrechung erfordern die Anpassung der Prozesseinstellung, um die Produktion von Ausschussteilen bei Wiederaufnahme der Produktion zu vermeiden. Im Folgenden wird ein Verfahren vorgestellt, das den Anfahrprozess nach einer Produktionsunterbrechung verkürzen soll und damit die Ausschussquote in der Produktion reduziert. Dazu soll die Anpassung der Werkzeuginnendruckreferenz über die Unterbrechungsdauer empirisch berechnet werden, sodass explizit keine Prozessgrößenverläufe zur Modellierung zur Verfügung stehen müssen.

Die Untersuchungen werden mit dem Verzugsprobekörper und dem Material PP-UV durchgeführt. Als Qualitätsmerkmal wird das Bauteilgewicht bestimmt.

Zunächst werden Spritzgießbauteile für verschiedene Unterbrechungszeiten hergestellt, um den Einfluss von Produktionsunterbrechungen auf das Bauteilgewicht zu quantifizieren. Hierzu werden sechs Versuchsreihen mit einer Unterbrechungsdauer von 15 Sekunden, 30 Sekunden, 60 Sekunden, 5 Minuten, 10 Minuten und 1 Stunde 4-fach durchgeführt und das Bauteilgewicht für die ersten 10 Bauteile ermittelt. Aufgrund der schnelleren Temperaturänderung des Werkzeugs zu Beginn der Unterbrechung werden für kürzere Unterbrechungszeiten mehr Versuchsreihen eingeplant als für längere Unterbrechungszeiten. Die Maschineneinstellungen werden konstant gehalten und sind in Tabelle 14.7 aufgelistet. In Bild 8.1 ist das Bauteilgewicht für die ersten 5 Bauteile nach einer Produktionsunterbrechung dargestellt. Für kurze Unterbrechungszeiten von 15 s und 30 s wurde das stationäre Bauteilgewicht bereits in weniger als 5 Zyklen erreicht.

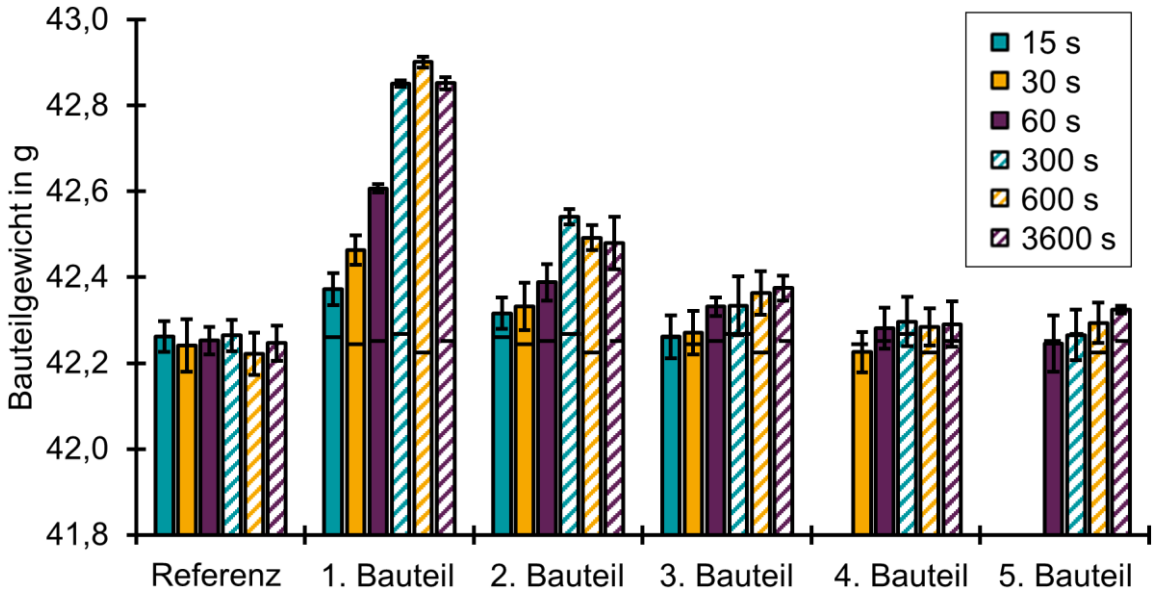

Bild 8.1: Gewicht der ersten fünf Bauteile für verschiedene Unterbrechungszeiten im Vergleich zum Bauteilgewicht im stationären Prozesszustand.

Fig. 8.1: Weight of the first five parts for different interruption times compared to part weight under stationary process conditions.

Das erste Bauteil weist die größte Gewichtsänderung im Vergleich zum stationären Zustand auf. Die Schmelze wird während der Unterbrechung nicht ausgespritzt und neu aufdosiert, sodass neben einer Veränderung der Werkzeugtemperatur auch eine starke Veränderung des Schmelzezustands auftritt. Die Gewichtsunterschiede sind für längere Stillstandszeiten größer und betragen bis zu 1,6 % des Bauteilgewichts. Bei einer kürzeren Unterbrechungsdauer von 15 s ist das ursprüngliche Bauteilgewicht

bereits nach 3 Zyklen erreicht. Ab einer Unterbrechungsdauer von 300 s weisen die Gewichtsabweichungen einen ähnlichen Verlauf auf.

Die geringere Werkzeugtemperatur direkt nach einer Produktionsunterbrechung führt aufgrund des pvT-Verhaltens der Schmelze zu einem höheren Bauteilgewicht, da mehr Schmelzevolumen in die Kavität eingespritzt werden kann. Dieser Effekt überwiegend gegenüber einer höheren Schmelzetemperatur durch die längere Aufheizung im Aggregat. Zum Ausgleich des erhöhten Bauteilgewichts wurde untersucht, ob eine Anpassung des maximalen Werkzeuginnendrucks zielführend ist.

Der Zusammenhang zwischen Unterbrechungsdauer und Bauteilgewicht wird auf Basis der experimentellen Daten aus den Eingangsversuchen abgebildet. Anschließend werden bereits vorhandene Versuchsdaten des Spritzgießprozesses verwendet, um den Einfluss verschiedener Werkzeuginnendruckreferenzen auf das Bauteilgewicht abzubilden. Die Anpassung des Werkzeuginnendrucks wird für die ersten fünf Bauteile nach einer Produktionsunterbrechung mithilfe der Curve Fitting Toolbox in der Software Matlab auf Basis dieser Daten nach Gleichung 8.1 berechnet. Die Gleichungsstruktur ergibt sich dabei aus der geringsten Abweichung zwischen erwartetem und experimentell ermitteltem Bauteilgewicht für die ersten 5 Bauteile bei verschiedenen Unterbrechungszeiten.

$$f(t_{stopp}) = p_{max} = p_{stat} - (\, a * e^{b*t_{stopp}} - c * e^{d*t_{stopp}}),\ t_{stopp} \in \mathbb{N} \qquad \textit{(Gl. 8.1)}$$

Die Variable t_{stopp} entspricht der Unterbrechungsdauer. Ab Zyklus 6 wird die Werkzeuginnendruckreferenz aus dem stationären Spritzgießprozess verwendet. und a,b,c und d sind Konstanten, die in Tabelle 8.1 für die ersten 5 Zyklen aufgelistet sind.

# nach Unterbrechung	a	b	c	d
1	52,53	0	46,11	-0,010
2	4,58	-0,026	94,01	-1,617*10e-4
3	92,05	0	13,50	-0,018
4	7,13	-0,027	96,93	-2,217*10e-5
5	-0,005	$\ln(t_{stopp})$	0,318	0

Tabelle 8.1: Funktionsparameter für die ersten 5 Bauteile beim Anfahrprozess für verschiedene Unterbrechungszeiten.

Table 8.1: Function parameters for the first 5 parts after start of production for different durations of production stop.

Die 5 Gleichungen, welche sich aus Gleichung 8.1 ergeben, werden in einem Excel-Tool zusammengefasst. Bei Eingabe der Werkzeuginnendruckreferenz im stationären

Prozess p_{stat} und der Unterbrechungsdauer wird der maximale Werkzeuginnendruck für die ersten fünf Zyklen ausgegeben. Das Tool ermöglicht eine schnelle Berechnung der neuen Referenzwerte für den Werkzeuginnendruck und zeigt in Abhängigkeit von der Unterbrechungsdauer auf, für wie viele Zyklen eine angepasste Referenz benötigt wird. Beispielsweise ist für eine Unterbrechungsdauer von 15 s nur eine Anpassung des Werkzeuginnendrucks für die ersten drei Zyklen notwendig.

Das Qualitätsmodell wird validiert, indem das mittlere Bauteilgewicht der ersten 5 Bauteile nach unterschiedlicher Unterbrechungsdauer für angepasste Werkzeuginnendruckreferenzen und gleiche Werkzeuginnendruckreferenzen gegenübergestellt wird. In Bild 8.2 sind exemplarisch die Gewichtsänderungen für das erste Bauteil ohne und mit Anpassung des Werkzeuginnendrucks gezeigt [HHV+22b].

Die Gewichtsabweichung beträgt ohne eine Anpassung des maximalen Werkzeuginnendrucks bis zu 700 mg, was einer prozentualen Abweichung von mehr als 1,5 % entspricht. Bei einer Anpassung des Werkzeuginnendrucks über das Qualitätsmodell liegt die größte Gewichtsabweichung im Mittel nur bei 45,1 mg. Die Reproduzierbarkeit des Bauteilgewichts kann somit deutlich erhöht werden.

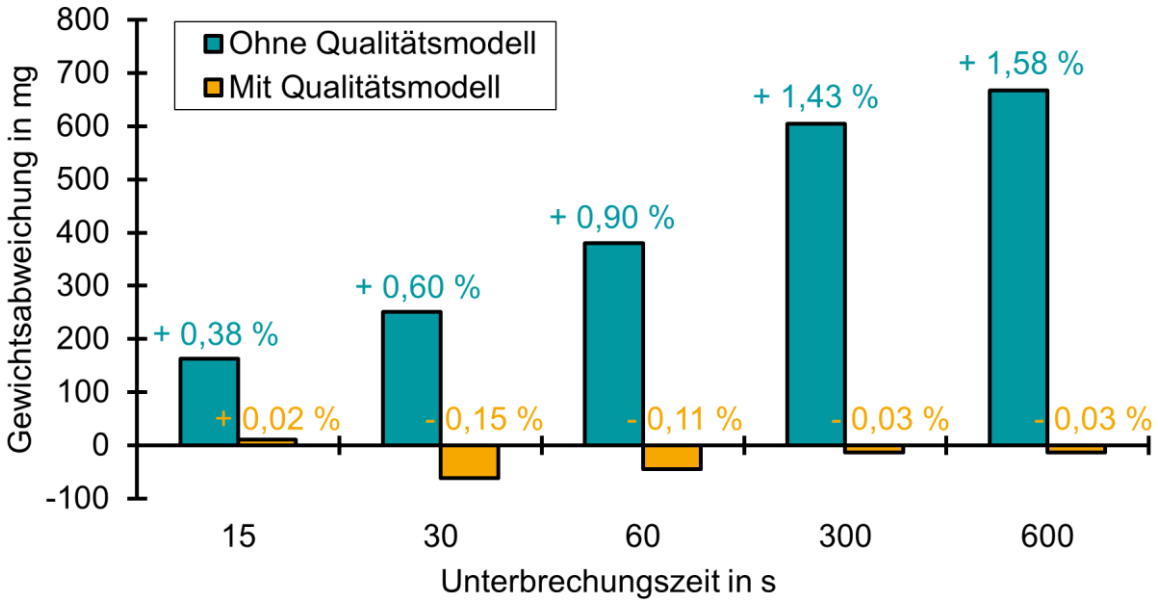

Bild 8.2: Gewichtänderung des ersten Bauteils mit und ohne Anpassung des maximalen Werkzeuginnendrucks für verschiedene Unterbrechungszeiten.

Fig. 8.2: Weight change of the first part with and without adjustment of the maximum cavity pressure for different interruption times.

Zur Bewertung der Ergebnisse in Bezug auf weitere Qualitätsgrößen werden für den Verzugsprobekörper ebenfalls die Bauteilmaße bestimmt. Dazu wird exemplarisch für Unterbrechungszeiten von 60 s und 600 s die Bauteilbreite gemessen, siehe Bild 8.3.

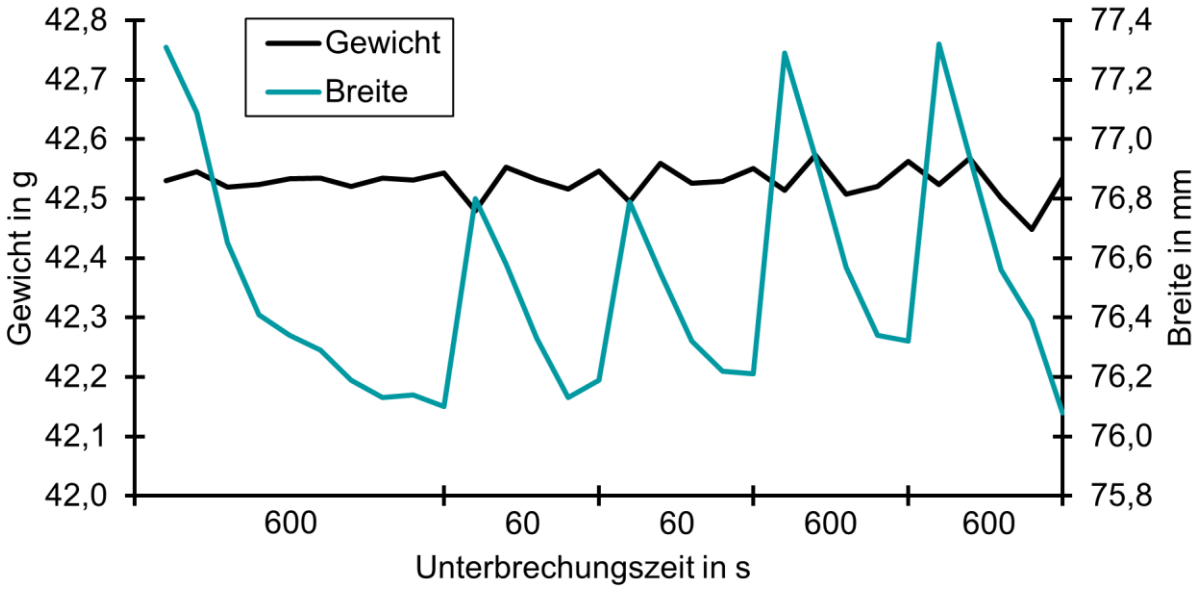

Bild 8.3: Breite und Gewicht mit Anpassung des maximalen Werkzeuginnendrucks für die ersten 5 Bauteil bei Unterbrechungszeiten von 60 und 600 s.

Fig. 8.3: Width and weight with adjustment of the maximum cavity pressure for the first 5 parts with interruption times of 60 and 600 s.

Obwohl das Bauteilgewicht während der Anfahrzyklen konstant gehalten werden kann, nimmt die Bauteilbreite während des Anfahrprozesses von Schuss zu Schuss ab, was einer geringeren Maßhaltigkeit entspricht. Die allgemeine Aussage einer hohen Korrelation zwischen Bauteilgewicht und Bauteildimensionen zeigt somit für Anfahrvorgänge keine Gültigkeit.

Die Modellbildung erfolgt mit diesem Vorgehen ausschließlich auf Basis experimenteller Versuchsdaten. Sie sind somit fehlerbehaftet und wurde ausschließlich datenbasiert aufgestellt. Das Modell bildet einen eingeschränkten Arbeitsbereich ab und müsste bspw. für andere Werkzeugtemperaturen, Werkzeuge sowie Qualitätsgrößen neu parametriert werden. Demnach ist ein hoher Versuchsaufwand für die Prozesseinrichtung erforderlich, um ein umfassendes Regelungskonzept zu entwickeln. Eine rein experimentelle Prozessbeschreibung wird nicht alle Störeinflüsse abdecken können. Das Vorgehen ist somit wirtschaftlich nicht umsetzbar und auch nicht zielführend. Es zeigt dennoch, dass für einzelne Qualitätsmerkmale die experimentelle Modellbildung genutzt werden kann, um Störeinflüsse auszugleichen.

8.2 Automatisierte Siegelpunktbestimmung im Prozess

Im Folgenden wird ein Konzept vorgestellt, um den Werkzeuginnendruck genau bis zum Siegelpunkt auf Basis von Prozessgrößenverläufen zu regeln. Das Verfahren weist einen geringen Einrichtaufwand auf, da nur ein Referenzzyklus erforderlich ist.

Für die automatisierte Siegelpunktbestimmung im Prozess wird der Nachdruck so lange aufrechterhalten, bis das Erstarren des Bauteils in den Prozessgrößenverläufen erkennbar ist. Ein Nachteil der Bestimmung des Schmelzezustands anhand von Prozessgrößen ist der verzögerte Eingriff in den Prozess, da erst nach dem Beginn der Bauteilerstarrung ein Abbruchkriterium definiert werden kann. Dieser Effekt muss durch die Wahl geeigneter Kriterien zur Bestimmung der optimalen Nachdruckzeit reduziert werden. Zur Detektion der Bauteilerstarrung kann der Schneckendruckverlauf oder der Einspritzvolumenstromverlauf verwendet werden.

In Bild 8.4 ist ein Referenzzyklus für das Material PP-UV mit dem Plattenbauteil gezeigt. In der Nachdruckphase wird der vorgegebene maximale Werkzeuginnendruck durch einen sehr geringen Einspritzvolumenstrom aufrechterhalten. Die Drucküber-tragung vom Schneckenvorraum in die Kavität wird durch den höheren Druckbedarf aufgrund des Erstarrens der Schmelze verringert, sodass der Schneckendruck ansteigt, siehe Bild 8.4.

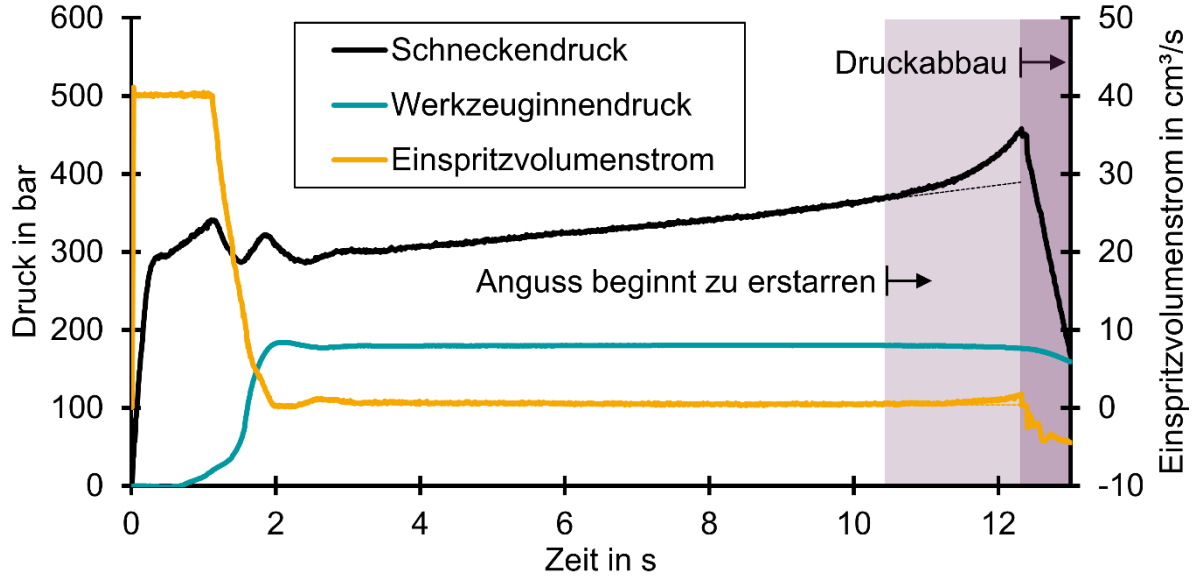

Bild 8.4: Schneckendruck, Werkzeuginnendruck und Einspritzvolumenstrom für lange Nachdruckzeiten.

Fig. 8.4: Screw pressure, cavity pressure and injection volume flow rate for long holding pressure times.

Die Erstarrung von Schmelze im Anguss, welche vorwiegend in den Randbereichen aufgrund des Wärmeaustauschs mit dem Spritzgießwerkzeug beginnt, bewirkt eine zunehmende Reduktion der Querschnittsfläche. Dadurch steigt der Druckbedarf an, um den Werkzeuginnendruck aufrechtzuerhalten. Der Beginn der Erstarrung des Angusses wird durch einen exponentiellen Anstieg des Schneckendruckgradienten ab ca. 10,5 s sichtbar. Der Einspritzvolumenstrom steigt erst ca. 1 s später als der

Schneckendruckgradient sichtbar an, sobald der angussnahe Werkzeuginnendruck nicht mehr aufrechterhalten werden kann und unter die Referenzvorgabe fällt.

Die Regelabweichungen bei langen Nachdruckzeiten treten auf, da das Prozessmodell nur den schmelzeförmigen Zustand beschreibt. Beim Übergang von Schmelze zu Feststoff wird das Material steifer. Durch den stark ansteigenden Kompressionsmodul wird ein zu geringer Stellgrößeneingriff berechnet, da der Kompressionsmodul im Prozessmodell des Reglers berücksichtigt wird. Durch die zeitlich verzögerte Erhöhung des Einspritzvolumenstroms können Kaltverschiebungen und innere Spannungen, insbesondere im Bereich zwischen Sensorposition und Anguss, auftreten, da die Schmelze bereits stark abgekühlt ist. Die Prozessregelung sollte daher beendet sein, bevor der Einspritzvolumenstrom aufgrund der Bauteilerstarrung wieder ansteigt.

Der Schneckendruckverlauf weist ein signifikantes Messrauschen von bis zu 6 bar auf, welches auf die analoge Signalübertragung zurückzuführen ist. Der Schneckendruck p_s und der Gradient des Schneckendrucks $\dot{p}_s$ werden daher über die Methode des gleitenden Mittelwerts nach Gleichung 8.2 geglättet.

$$p_s{}^{(n)}(t), \dot{p}_s{}^{(n)}(t) = \frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n-1} p_s(t-i) \qquad \textit{(Gl. 8.2)}$$

Die zeitliche Verzögerung des gleitenden Durchschnitts λ wird nach Gleichung 8.3 berechnet zu:

$$\lambda = \frac{n-1}{2} \qquad \textit{(Gl. 8.3)}$$

Bei gleichem Erstarrungsverhalten sollte der Regeleingriff zum gleichen Zeitpunkt beendet werden. Die zeitliche Verzögerung der Detektion des Gradientenanstiegs muss daher im Prozess möglichst gering sein, sodass die Bauteilerstarrung vor dem Anstieg des Einspritzvolumenstroms detektiert wird. Andererseits muss die Signalglättung ausreichend groß gewählt werden, um den Einfluss von Messrauschen zu minimieren und eine hohe Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Der Verlauf der Schneckendruckgradienten ist bei einer Verzögerung von 0,196 s (n=50) und 0,396 s (n=100) in Bild 8.5 dargestellt.

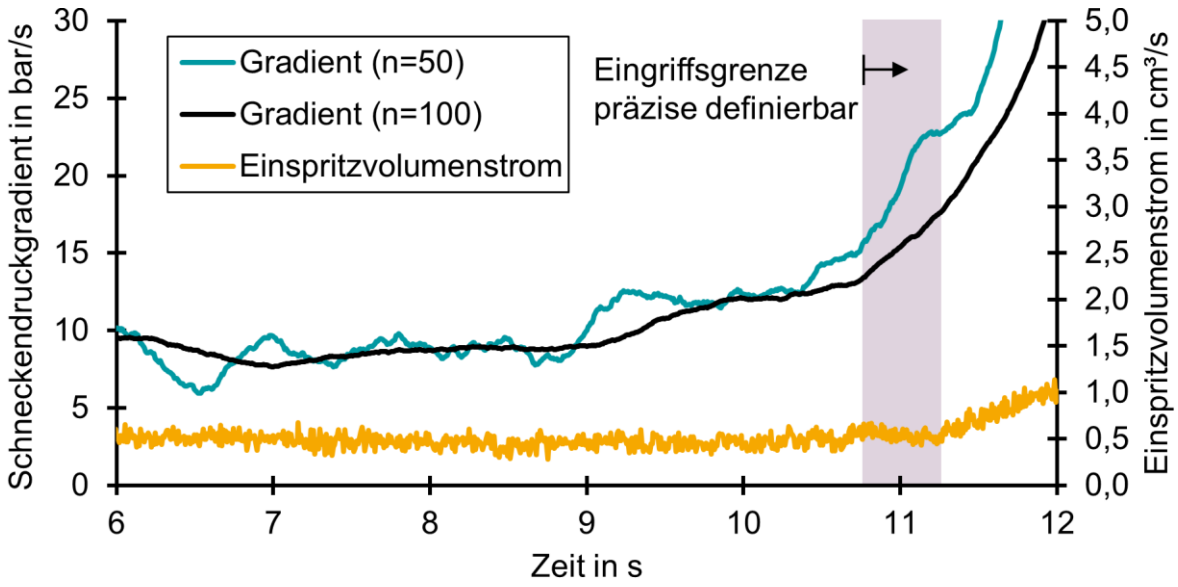

Bild 8.5: Glättung von Schneckendruck und Schneckendruckgradienten mit n=50 und n=100.

Fig. 8.5: Smoothing of screw pressure and screw pressure gradients with n=50 and n=100.

Bei einer Signalglättung über 50 Abtastschritte weist die Steigung des Gradienten eine Vielzahl an Wendepunkten auf und ist somit nicht stetig steigend. Die Signalglättung über 100 Zeitschritte weist demgegenüber im signifikanten Zeitbereich eine nahezu konstante Steigung des Schneckendruckgradienten auf. Obwohl der Signalverlauf aufgrund der Signalglättung eine Totzeit aufweist, ist eine eindeutige Eingriffsgrenze zur Beendigung der Nachdruckphase vor der vollständigen Bauteilerstarrung definierbar. Der Schwellwert ist prozessabhängig und kann als skalarer Wert anhand eines Referenzzyklus bestimmt werden. Im obigen Beispiel wäre ein Schneckendruckgradient von 15 bar/s ein sinnvoller Schwellwert, um die Nachdruckphase zu beenden.

Das Konzept ist für das Material PP-TV und den Verzugsprobekörper adaptierbar, indem ein Identifikationszyklus mit langer Nachdruckzeit durchgeführt wird, siehe Bild 8.6.

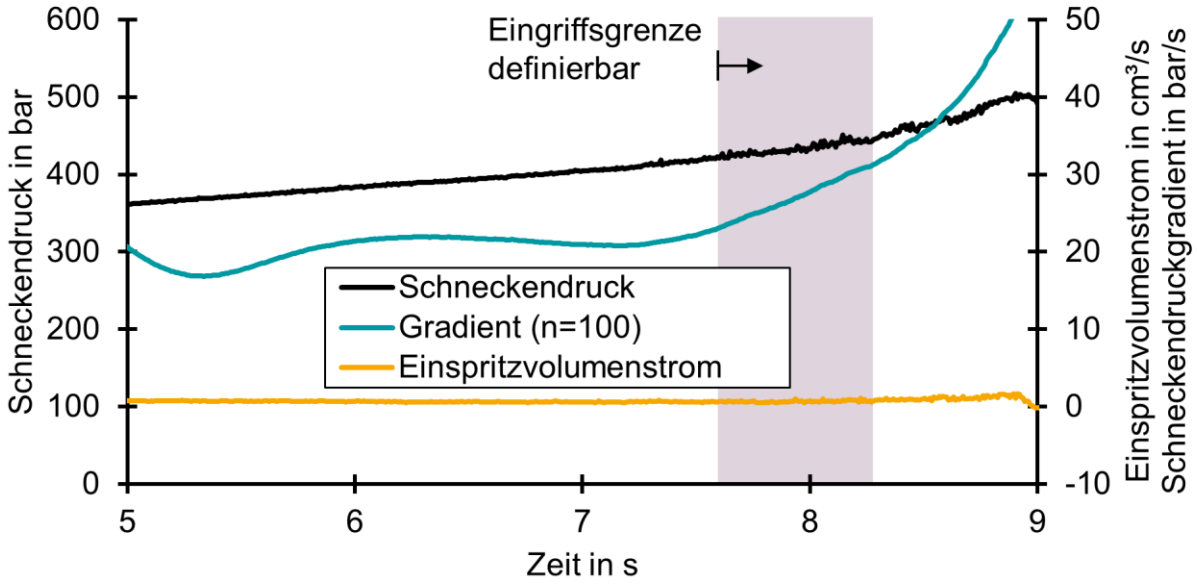

Bild 8.6: Automatisierte Siegelpunktbestimmung für den Verzugsprobekörper mit PP-TV.

Fig. 8.6: Automated sealing point determination for the warpage part with PP-TV.

Für den Verzugsprobekörper werden kürzere Prozesszeiten erreicht, da der Sensor hinter dem Durchbruch sehr ungünstig platziert ist, weiter vom Anguss entfernt ist und dadurch die Schmelze dort schneller einfriert. Der Schneckendruckgradient schwankt während der Nachdruckphase um einen Wert von 20 bar/s und steigt ab ca. 7,5 s stetig an. Der Einspritzvolumenstrom steig nach ca. 8,2 s an, sodass der Schwellwert für den Schneckendruckgradienten zwischen 22 und 31 bar/s gewählt werden kann. Aufgrund der größeren Entfernung zwischen Sensor und Anguss wird der Schwellwert zu 30 bar/s bestimmt, um eine maximale Annäherung an den tatsächlichen Siegelpunkt am Anguss zu erhalten.

In Kapitel 6.3 wurde eine Verbesserung der Bauteilqualität mit ansteigender Werkzeuginnendruckreferenz in der Nachdruckphase festgestellt. Bei einer steigenden Referenzvorgabe wird die Regelabweichung über der Prozesszeit geringer, siehe Bild 8.7.

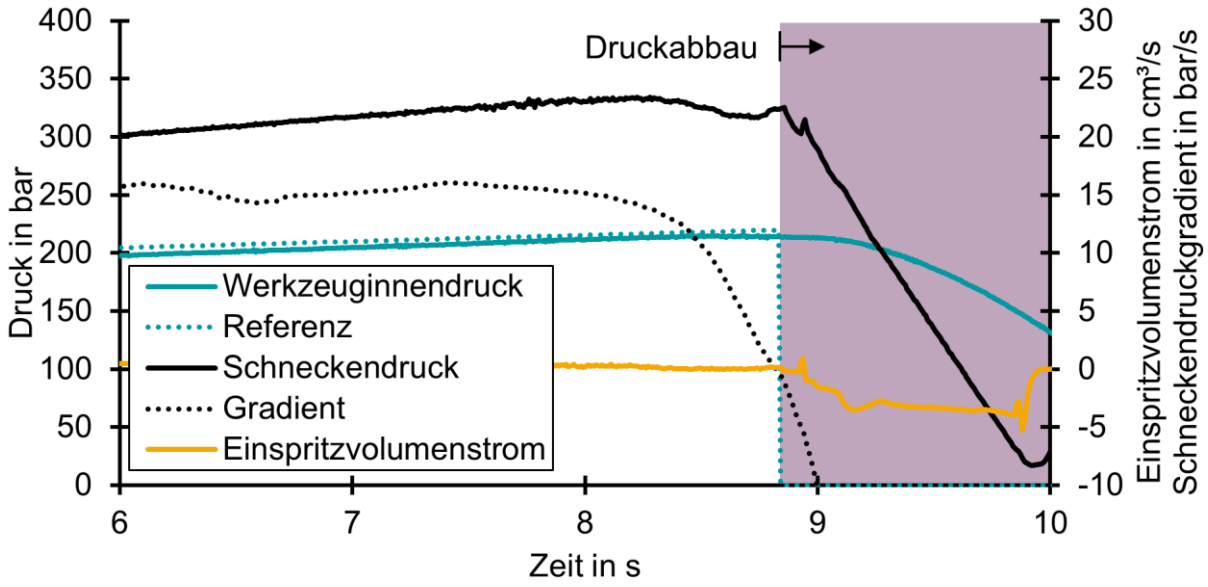

Bild 8.7: Werkzeuginnendruck, Schneckendruck und Einspritzvolumenstrom bei ansteigender Werkzeuginnendruckreferenz.

Fig. 8.7: Cavity pressure, screw pressure and injection volume flow rate with increasing cavity pressure reference.

Als Folge werden geringere Stellsignale für den Einspritzvolumenstrom berechnet, wodurch der Werkzeuginnendruck nach ca. 8,5 s nicht weiter ansteigt. Durch den verringerten Einspritzvolumenstrom fällt der Schneckendruck ab, sodass der Schneckendruckgradient ebenfalls abfällt. Durch das Regelverhalten wird somit der Schneckendruckgradient stark beeinflusst. Dadurch sind die Effekte der Bauteilerstarrung nicht eindeutig erkennbar.

Die Analyse der Prozessgrößenverläufe zeigt, dass die automatisierte Siegelpunktbestimmung mit den eingestellten Reglerparametern für steigende Werkzeuginnendruckreferenzen nicht umsetzbar ist. Da die Regelparameter zum Vergleich der Ergebnisse im Rahmen dieser Arbeit nicht angepasst werden, ist somit nur eine konstante Werkzeuginnendruckreferenz für die Siegelpunktbestimmung geeignet.

Die weitere Bauteilerstarrung erfolgt ohne Referenzvorgabe für den Werkzeuginnendruck, sodass der Druckabfall wie im konventionellen Spritzgießprozess ohne Regelung erfolgt. Das vorgestellte Prozessführungskonzept hat den Vorteil, dass kostenintensive und aufwändige Labormessungen entfallen, die für einen geregelten Druckabbau anhand des materialspezifischen pvT-Verhaltens erforderlich sind.

8.3 Kühlratenabhängige pvT-Modellierung

Bei der pvT-Optimierung wird der Werkzeuginnendruck auf Basis eines hinterlegten pvT-Modells geregelt, welches materialspezifisch bestimmt wird. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Modellierung des pvT-Verhaltens um eine Kühlratenabhängigkeit erweitert. Durch die Berücksichtigung von spritzgießtypischen Kühlraten wird die Modellierung prozessnäher gestaltet, sodass über die pvT-optimierte Werkzeuginnendruckregelung eine höhere Qualitätskonstanz bei Störeinflüssen erzielt werden könnte. Im Folgenden wird die Ermittlung des kühlratenabhängigen pvT-Modells beschreiben und Unterschiede zum klassischen pvT-Modell aufgezeigt. Der Einsatz des pvT-Modells zur pvT-optimierten Werkzeuginnendruckregelung erfolgt in Kapitel 9.

Im Spritzgießen werden an der Kavitätswand hohe Kühlraten von mehreren 1000 K/s erreicht, wohingegen in der Bauteilmitte geringere Kühlraten von wenigen Grad Celsius pro Sekunde auftreten [SNL+15]. Die Kühlrate hat einen sehr großen Einfluss auf das pvT-Verhalten und die Kristallisation. Mit zunehmender Abkühlgeschwindigkeit sinkt die Übergangstemperatur und der Temperaturbereich für die Kristallisation wird breiter [XYC+18]. Bei der pvT-Messung in Prüflaboren werden geringe Kühlraten von wenigen K/min realisiert, sodass eine direkte Übertragung der gemessenen pvT-Kennfelder in die Praxis nur eingeschränkt möglich ist.

Durch *Wang et. al* wurde ein kontinuierliches Zwei-Domänen-Tait-Modell (CTD-Modell) aufgestellt, welches einen kühlratenabhängigen Term in der pvT-Modellierung einführt [WHR+20]. Dieser Ansatz wurde anschließend um DSC- und Flash-DSC-Messungen erweitert. Bei logarithmischer Auftragung der Kühlrate besteht ein näherungsweise linearer Zusammenhang zwischen Übergangstemperatur und Kühlrate bei Umgebungsdruck [AHW+20].

Zur Implementierung eines kühlratenabhängigen pvT-Modells für die Werkzeuginnendruckregelung wurde das kühlratenabhängige Kennfeld der Übergangstemperatur nach *Alms et al.* für das Material Hostacom X2 M U34 (PP-TV) aufgestellt [AHW+20]. Die pvT-Messungen wurden mit der pvT-Messzelle pvT500 der Firma GÖTTFERT GmbH, Buchen, bei einer Kühlrate von 5 K/min für die Drücke 200, 400, 800, 1200 und 1600 bar bei Temperaturen von 260 °C bis 30 °C durchgeführt. Die Daten wurden in Temperaturintervallen von 5 °C aufgezeichnet. Anschließend wurden DSC-Messungen mit der Flash DSC 2+ der Firma Mettler Toledo, Columbus, USA, bei einer Heizrate von 100 K/s und einer Probengröße von ca. 25 ng für einen Temperaturbereich von - 80 °C bis 200 °C durchgeführt. Die Kühlraten wurden von 10

bis 100 K/s in 10er Schritten und von 100 bis 700 K/s in 100er Schritten untersucht. Die Kristallisationstemperatur wird durch Auswertung der Onset-Temperatur des Kristallisationspeaks der α-Phase bestimmt, da diese in erster Näherung der Übergangstemperatur im pvT-Modell entspricht [AHW+20]. Durch Extrapolation für hohe Drücke und hohe Kühlraten kann eine Vorhersage der Übergangstemperatur für prozessnahe Verarbeitungsbedingungen getroffen werden, siehe Bild 8.9.

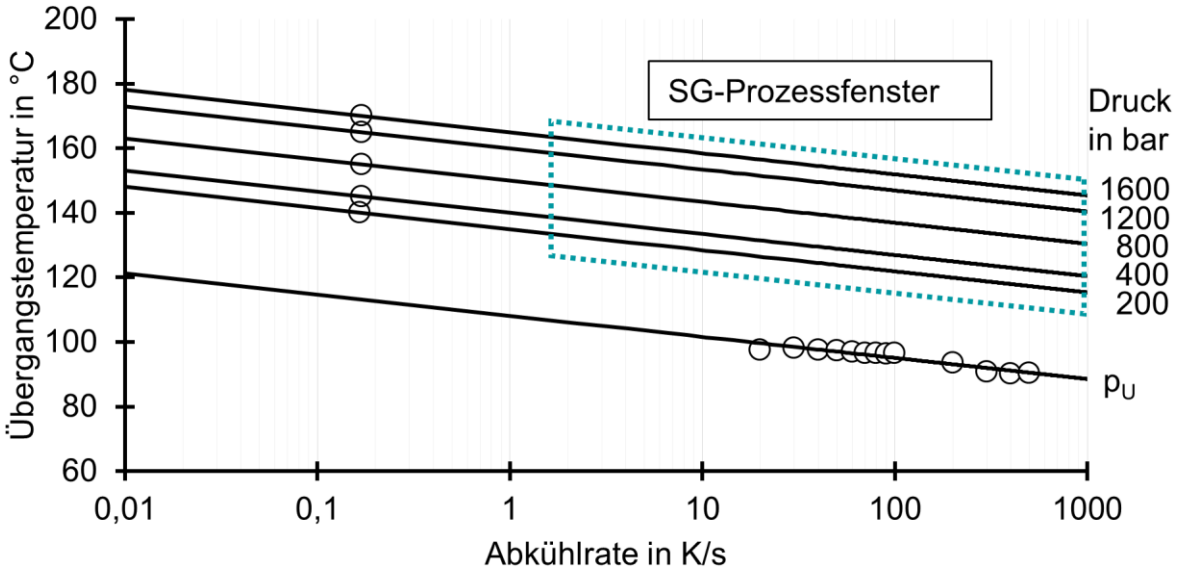

Bild 8.9: Es besteht eine lineare Abhängigkeit zwischen Übergangstemperatur und Abkühlrate für verschiedene Drücke bei einer Extrapolation des CTD-Modells nach [AHW+20].

Fig. 8.9: There is a linear correlation between transition temperature and cooling rate for different pressures by extrapolation of the CTD model according to [AHW+20].

Um die Abkühlrate im pvT-Modell zu berücksichtigen, werden zusätzliche Informationen über die lokalen Abkühlbedingungen im Werkzeug benötigt. Die lokalen, zeitabhängigen Kühlraten werden simulativ mit der Simulationssoftware Sigmasoft der Firma Sigma Engineering GmbH, Aachen, exemplarisch für eine Werkzeugtemperatur von 40 °C und eine Schmelzetemperatur von 240 °C bestimmt. In Bild 8.10 ist der Verlauf der lokalen Abkühlrate an der angussnahen Sensorposition des Verzugsprobekörpers dargestellt.

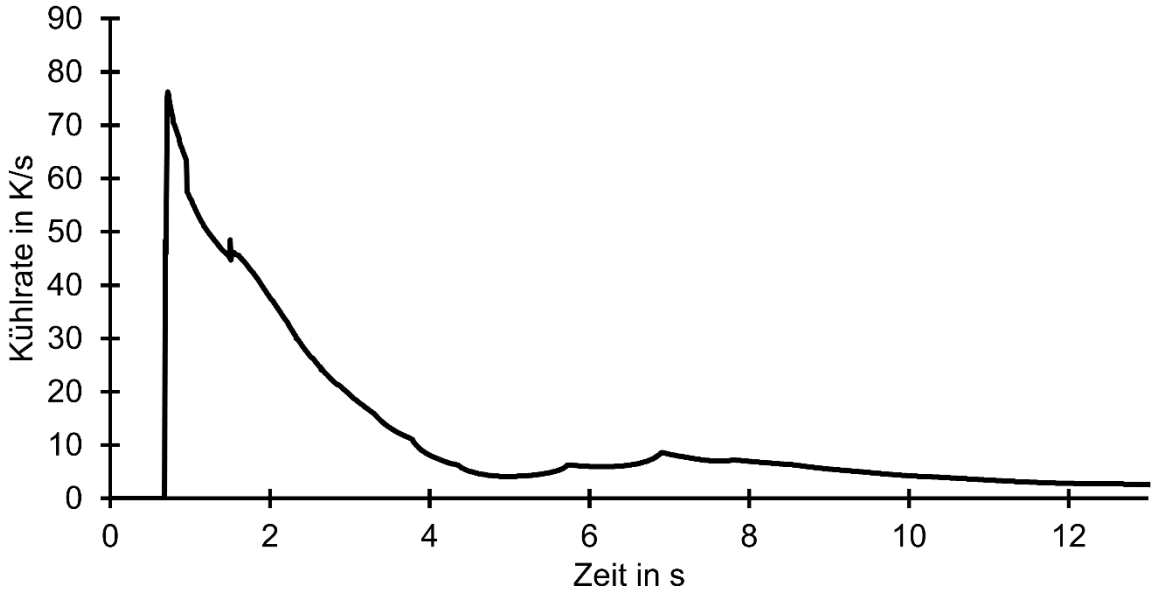

Bild 8.10: Verlauf der lokalen Abkühlrate an der Sensorposition

Fig. 8.10: Local cooling rate at the sensor position

Die Kühlrate an der Kontaktfläche zwischen Sensor und Schmelze sinkt zu Beginn sehr schnell ab. Der Übergang zwischen Einspritzphase und Nachdruckphase ist durch eine Unstetigkeit im Kühlratenverlauf zu erkennen, da verschiedene Solver für beide Prozessphasen eingesetzt werden. Nach ca. 4 s werden nur noch einstellige Kühlraten an der Sensorposition erreicht. Die Bauteilerstarrung erfolgt im realen Prozess nach ca. 11 s, sodass zur Anpassung des pvT-Modells eine Kühlrate von 4 K/s angenommen wird. Die Schmidt Koeffizienten der pvT-Modelle sind in Tabelle 8.2 gegenübergestellt.

Im Feststoffbereich zeigen teilkristalline Thermoplaste im unteren Temperaturbereich ebenfalls einen nahezu linearen Verlauf des spezifischen Volumens, welcher durch die Koeffizienten PF 1-4 beschrieben wird. Mit steigender Temperatur geht dieser in einen exponentiellen Verlauf über (PF 5-7). Die druckabhängige Übergangstemperatur wird über die Koeffizienten PK 1 und PK 2 beschrieben. Im Schmelzbereich verlaufen die Isobaren linear und bilden eine Geradenschar mit einer Steigung, die vom Druck abhängt (PS 1-4). Die Gleichungen zur Bestimmung der pvT-Geraden sowie weiterführende Informationen finden sich in [Sch86].

Koeffizient	Einheit	Standard	Kühlratenabhängig
Feststoffbereich			
PF1	bar·cm³/g	42811	42242
PF2	bar·cm³/(g·K)	0,1881	0,4522
PF3	bar	469,76	900,54
PF4	bar	46509	46211
PF5	cm³/g	$1{,}1735*10^{-19}$	$2{,}0452*10^{-19}$
PF6	1/K	0,0658	0,3217
PF7	1/bar	$1{,}9294*10^{-3}$	$8{,}6530*10^{-3}$
Übergangsbereich			
PK1	°C	135,27	125,41
PK2	°C/bar	0,0250	0,0259
Schmelzebereich			
PS1	bar·cm³/g	25408	23788
PS2	bar·cm³/(g·K)	1,3235	1,5242
PS3	bar	1606,9	1791,9
PS4	bar	27027	25486

Tabelle 8.2: Vergleich der pvT-Koeffizienten: Standard und kühlratenabhängige Modellierung.

Table 8.2: Comparison of pvT-coefficients: standard vs cooling rate-dependent modeling.

Die pvT-Koeffizienten sind unter Berücksichtigung der Kühlrate insbesondere zur Bestimmung der Übergangstemperatur verschieden. Die Übergangstemperatur wird kühlratenabhängig zu um 10 °C kälteren Temperaturen bei etwa gleichbleibender Druckabhängigkeit verschoben, was einer längeren Nachdruckzeit im Prozess entspricht. Die Unterschiede im Feststoffbereich sind größer als im Schmelzebereich, wobei der Feststoffbereich nicht zur Prozessführung genutzt wird.

Beide pvT-Modelle werden in der Regelung implementiert, um den Mehrwert der Modelloptimierung praktisch zu quantifizieren. Dabei ist eine Kombination mit steigenden Werkzeuginnendruckreferenzen möglich, da die Abbruchbedingung ausschließlich über das pvT-Modell berechnet wird.

9 VALIDIERUNG UND BEWERTUNG DER PROZESSFÜHRUNGSKONZEPTE

Die Eignung der entwickelten Prozessführungskonzepte zum automatisierten Störgrößenausgleich wird untersucht, indem thermische Störungen und Materialschwankungen durch Chargenwechsel in den Spritzgießprozess eingebracht werden. Es werden die folgenden Prozessführungskonzepte miteinander verglichen:

- konventionelle Prozessführung
- automatisierte Siegelpunktbestimmung
- pvT-Optimierung
- kühlratenabhängige pvT-Optimierung

Der minimale Einspritzvolumenstrom wird für alle Werkzeuginnendruckregelungen auf 0 cm³/s festgelegt. Bei der automatisierten Siegelpunktbestimmung wird eine konstante Referenz für den Werkzeuginnendruck vorgegeben, um eine möglichst reproduzierbare Abbruchbedingung zu gewährleisten. Bei der pvT-Optimierung wird eine ansteigende Referenz für den Werkzeuginnendruck verwendet, um die qualitätsoptimierte Form der Werkzeuginnendruckkurve mit einer störungsresistenten Prozessführung zu kombinieren. Anhand der Versuchsergebnisse wird das Potential der Prozessführungsstrategien bewertet und die Möglichkeiten zur Optimierung aufgezeigt. Dabei wird zunächst der Unterschied in der Prozessführung für alle Strategien aufgezeigt. Anschließend erfolgt eine Bewertung von GewichtMaßhaltigkeit sowie der mechanischen Bauteileigenschaften.

9.1 Ausgleich thermischer Störeinflüsse

Die Bauteilerstarrung korreliert stark mit den thermischen Prozessbedingungen, sodass mehrere Arbeitspunkte zur Bewertung der Kompensationsfähigkeit von thermischen Störeinflüssen untersucht werden. Dazu werden Verzugsprobekörper bei einem maximalen Einspritzvolumenstrom von 30 cm³/s mit dem Material PP-TV hergestellt. Die untersuchten Kombinationen aus Werkzeug- und Zylindertemperatur sind in Tabelle 9.1 aufgeführt. Nachdruck und Nachdruckdauer werden an dieser Stelle nicht aufgeführt, da sie im weiteren Verlauf diskutiert werden.

	AP1	**AP2**	**AP3**	**AP4**
Werkzeugtemperatur [°C]	40	40	55	55
Zylindertemperatur [°C]	220	240	220	240

Tabelle 9.1: Untersuchte Arbeitspunkte zu Validierung der Prozessführungskonzepte.

Table 9.1: Examined operating parameters for validation of the process control concepts.

Im thermisch eingeschwungenen Zustand werden je Arbeitspunkt 10 Bauteile hergestellt und das Gewicht für den Verzugsprobekörper ermittelt. Zur Reduktion des Prüfaufwands der Bauteilmaße wird der Stichprobenumfang auf die letzten 5 Bauteile je Arbeitspunkt reduziert. Im Folgenden wird zunächst die arbeitspunktabhängige Prozesseinstellung der Prozessführungskonzepte verglichen. Anschließend werden das Bauteilgewicht sowie die Maßhaltigkeit gegenübergestellt.

Die Aussagekraft der Versuchsergebnisse für die konventionelle Prozessführung ist eingeschränkt, da eine Abweichung des realisierten Nachdrucks vom eingestellten Wert um mehr als 10 bar nach den Spritzgießversuchen festgestellt wurde. In der Spritzgießmaschine sind keine Systeme zur Kompensation des Nullpunkt-Drifts der Einspritzkraftsensorik in Abhängigkeit von der Temperatur verbaut. Dies führt dazu, dass die Kraftmessung während des Versuchstages driftet. Dieser Drift kann im kraftlosen Zustand (z.B. vor dem Start des Einspritzens) bestimmt werden. Der eingestellte Schneckendruck wurde während der Spritzgießversuche nicht angepasst, sodass für die Arbeitspunkte verschiedene Schneckendrücke realisiert wurden.

Bei den werkzeuginnendruckgeregelten Konzepten werden die Nachdruckzeiten automatisch in Abhängigkeit vom thermischen Prozesszustand unter Nutzung des Abbruchkriteriums bzw. der pvT-Modelle angepasst, sodass unterschiedliche Nachdruckzeiten für die Arbeitspunkte resultieren. Für das kühlratenabhängige pvT-Kennfeld wurden die Temperatureinstellungen von Arbeitspunkt 2 verwendet, welche ebenfalls in der Spritzgießsimulation zur Modellierung verwendet wurden. Die individuellen Prozesseinstellungen sind in Tabelle 9.2 für den Verzugsprobekörper gegenübergestellt.

Die Nachdruckzeit wird bei thermischen Veränderungen durch alle drei Regelungskonzepte gleichgerichtet verändert. Bei einer hohen Werkzeug- und Zylindertemperatur werden die längsten Nachdruckzeiten vorgegeben, wohingegen die kürzesten Nachdruckzeiten für geringe Werkzeug- und Zylindertemperaturen resultieren.

	AP1	**AP2**	**AP3**	**AP4**
Konventionell	313 bar	316 bar	326 bar	327 bar
Siegelpunkt	6,16 ±0,26 s	7,47 ±0,05 s	7,22 ±0,11 s	8,38 ±0,15 s
pvT-Optimierung	4,31 s	4,84 s	6,78 s	7,35 s
pvT mit Kühlrate	5,4 s	5,9 s	6,92 s	7,5 s

Tabelle 9.2: Schneckendruck bzw. Nachdruckzeit in Abhängigkeit vom Prozessführungskonzept (Material: PP-TV).

Table 9.2: Screw pressure resp. holding pressure time for different process control concepts (material: PP-TV).

Bei der automatisierten Siegelpunktbestimmung haben Veränderungen der Zylindertemperatur einen stärkeren Einfluss auf die Nachdruckzeit als Veränderungen der Werkzeugtemperatur. Die Nachdruckzeit wird dabei für die untersuchten Arbeitspunkte in der gleichen Größenordnung verändert. Im Gegensatz dazu haben bei den pvT-Optimierungen die Veränderungen der Werkzeugtemperatur einen dreimal so großen Einfluss auf die Nachdruckzeit als Veränderungen der Zylindertemperatur. Dies ist auf die Abkühlrechnung zur Bestimmung der Schmelzetemperatur zurückzuführen (vgl. Gleichung 2.1), da Veränderungen der Werkzeugtemperatur einen größeren Einfluss auf die berechnete mittlere Schmelzetemperatur haben. Bei der kühlratenabhängigen pvT-Optimierung werden längere Nachdruckzeiten als bei der klassischen pvT-Optimierung berechnet, da die Übergangstemperatur zu geringeren Temperaturen verschoben wurde.

Bei der automatisierten Siegelpunktbestimmung wurde als Abbruchkriterium ein Schneckendruckgradient größer als 30 bar/s bestimmt. Diese Festlegung erfolgte für die Prozesseinstellungen von Arbeitspunkt 2. Daraus resultiert eine geringe Standardaweichung von 0,05 s für die Nachdruckzeit. Auffällig sind die höheren Standardabweichungen für die Arbeitspunkte 1, 3 und 4. Die veränderten thermischen Bedingungen haben einen großen Einfluss auf den Schneckendruckverlauf, wie bereits in Kapitel 7.3 festgestellt wurde. Die Abbruchbedingung über einen konstanten Schneckendruckgradienten ist somit nicht vollständig reproduzierbar für andere Arbeitspunkte. Zur Optimierung der automatisierten Siegelpunktbestimmung könnte somit eine dynamische Anpassung der Abbruchbedingung (beispielsweise über die prozentuale Steigungsänderung) die Reproduzierbarkeit der Nachdruckzeit erhöhen.

Im Folgenden wird die Konstanz des Bauteilgewichts bewertet, welches in Bild 9.1 aufgetragen ist. Die gepunkteten Linien entsprechen dem Mittelwert des Bauteilgewichts über alle Versuchspunkte. Die schraffierten Bereiche und gestrichelte Linie entsprechen dem Bauteilgewicht ohne Kompensation des abweichenden Schneckendrucks bei der konventionellen Prozessführung.

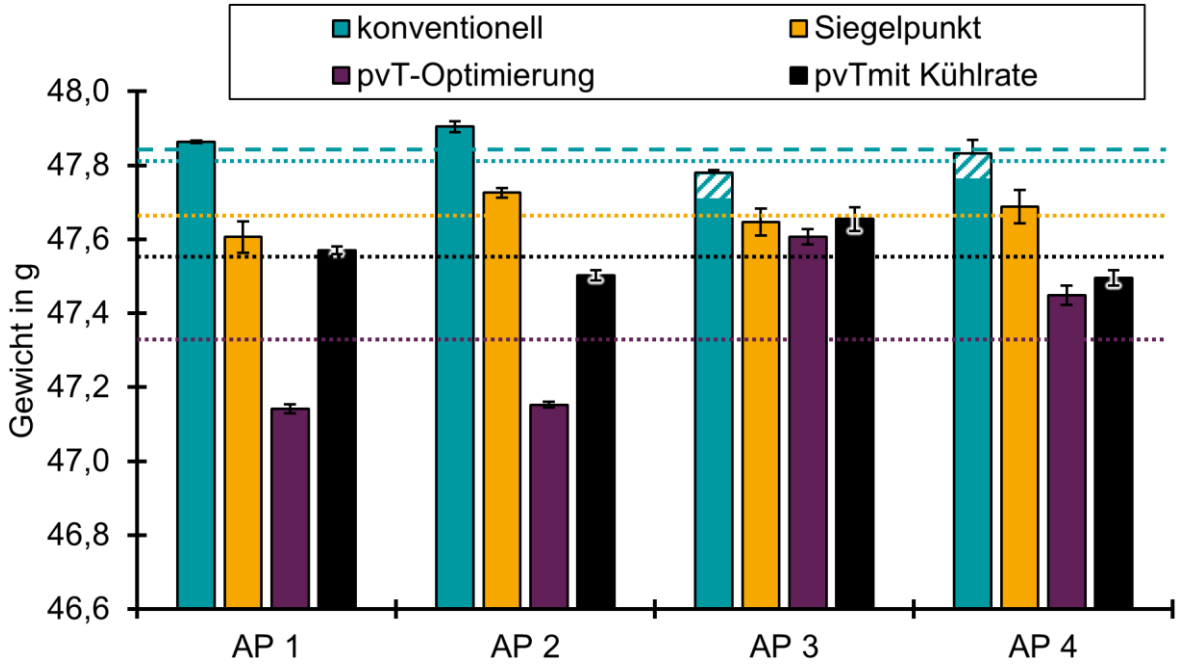

Bild 9.1: Bauteilgewicht für verschiedene Prozessführungskonzepte bei unterschiedlichen thermischen Prozessbedingungen.

Fig. 9.1: Part weight for different process control concepts with changing thermal conditions.

Die höchste Gewichtskonstanz wird mit der konventionellen Prozessführung erreicht, wobei der variable Schneckendruck die Reproduzierbarkeit des Bauteilgewichts erhöht. Das Bauteilgewicht ist ohne Anpassungen im Prozess bei einer höheren Werkzeugtemperatur geringer, da das spezifische Volumen der Schmelze erhöht ist und somit weniger Material in die Kavität nachgedrückt wird. Der um 13 bar höhere Schneckendruck in den Arbeitspunkten 3 und 4 gleicht das geringere Bauteilgewicht um ca. 0,064 g aus, da der höhere Schneckendruck eine stärkere Kompression des Materials von 0,0013 g/cm³ bewirkt. Unter der Berücksichtigung dieser Annahme liegt die Standardabweichung mit 0,078 g oberhalb der Standardabweichung bei der automatisierten Siegelpunktbestimmung mit 0,056 g und kühlratenabhängiger pvT-Optimierung mit 0,067 g. Bei der klassischen pvT-Optimierung werden die thermischen Einflüsse der Werkzeugtemperatur auf das Gewicht überschätzt, sodass zu geringe Nachdruckzeiten für die Arbeitspunkte 1 und 2 realisiert werden.

Zur Bewertung der Maßhaltigkeit wurden die Bauteilmaße über alle Arbeitspunkt gemittelt und sind in Bild 9.2 aufgetragen.

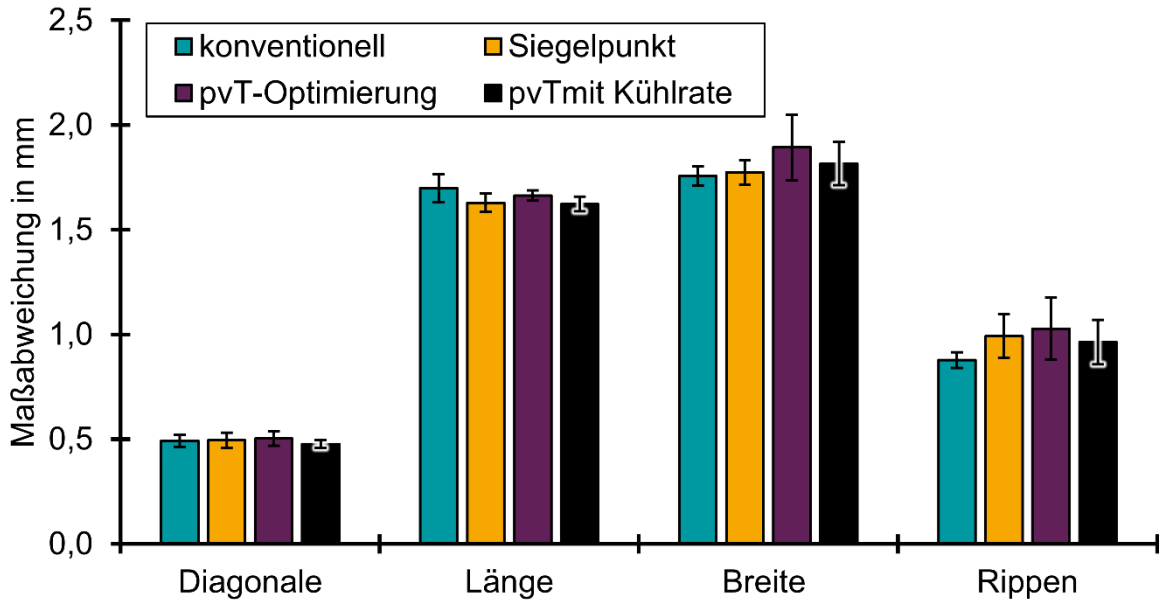

Bild 9.2: Maßabweichung für verschiedene Prozessführungskonzepte bei unterschiedlichen thermischen Prozessbedingungen.

Fig. 9.2: Dimensional deviation for different process control concepts with changing thermal conditions.

Die Ergebnisse zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Prozessführungsstrategien. Die Standardabweichungen der Bauteilmaße sind aufgrund der Bildung von Mittelwerten im Vergleich zu vorherigen Versuchen höher. Es ist jedoch zu erkennen, dass die Streuung für die konventionelle Prozessführung am geringsten ist. Auch der Abstand zwischen den Rippen die geringste Maßabweichung für die konventionelle Prozessführung auf. Demgegenüber ist die Maßabweichung in Längsrichtung am größten. Diese Tendenzen sind jedoch nicht eindeutig feststellbar.

Die mechanischen Bauteileigenschaften weisen im Vergleich der Prozessführungskonzepte ebenfalls keine signifikanten Unterschiede auf. Somit wird durch die Prozessführung bei thermischen Veränderungen ausschließlich das Bauteilgewicht signifikant beeinflusst.

9.2 Ausgleich von Materialschwankungen

Zur Bewertung des automatisierten Ausgleichs von Materialschwankungen durch die Prozessführungskonzepte werden die Chargen 2 und 3 des PP-PCR bei den Prozesseinstellungen von Arbeitspunkt 2 verarbeitet. Die Bauteilqualität wird anhand des Gewichts und der Bauteilmaße für den Verzugsprobekörper sowie den mechanischen Bauteileigenschaften für die Platte untersucht.

Das kühlratenabhängige pvT-Modell wird aufgrund des hohen Messaufwands nicht für die verschiedenen PP-PCR-Chargen bestimmt. Somit wird nur die klassische pvT-Optimierung in den Versuchen verwendet, indem die beiden pvT-Modelle der Materialchargen 2 und 3 implementiert werden. In Tabelle 9.2 sind die Nachdruckzeiten gegenübergestellt, welche durch die Prozessführungskonzepte realisiert wurden. Zusätzlich ist der Schneckendruck für die konventionelle Prozessführung angegeben, welcher aufgrund des Sensordrifts der Einspritzsensorik für beide Chargen unterschiedlich ist.

	Charge 2	**Charge 3**
Konventionell	274 bar	282 bar
Siegelpunkt	8,08 ± 0,48 s	8,76 ± 0,28 s
pvT-Optimierung	5,196 s	7,836 s

Tabelle 9.3: Schneckendruck bzw. Nachdruckzeit in Abhängigkeit vom Prozessführungskonzept (Bauteil: Verzugsprobekörper, Material: PP-PCR).

Table 9.3: Screw pressure resp. holding pressure time for different process control concepts (part: warpage part, material: PP-PCR).

Die Nachdruckzeit ist für Charge 2 bei der automatisierten Siegelpunktbestimmung um durchschnittlich 0,68 s kürzer als für Charge 3. Der Schneckendruckgradient steigt für Charge 2 durch die schlechtere Druckübertragung früher an, wie bereits in Kapitel 7.4.3 auf Basis der Prozesskennzahlen festgestellt wurde. Bei der pvT-Optimierung werden ebenfalls kürzere Nachdruckzeiten für Charge 2 bestimmt, wobei die Differenz mit 2,64 s deutlich stärker ausgeprägt ist. Die Unterschiede resultieren aus den verschiedenen pvT-Modellen. Der Zielwert für das spezifische Volumen wurde nicht chargenspezifisch angepasst, da bereits ein genereller Offset zwischen dem realen spezifischen Volumen und dem spezifischen Volumen nach pvT-Modell eine Ungenauigkeit in der Prozessführung darstellt. Der Unterschied in den Nachdruckzeiten deutet auf eine Überkompensation der Materialunterschiede hin. Dies wird bei einem Vergleich des Bauteilgewichts deutlich, siehe Bild 9.4.

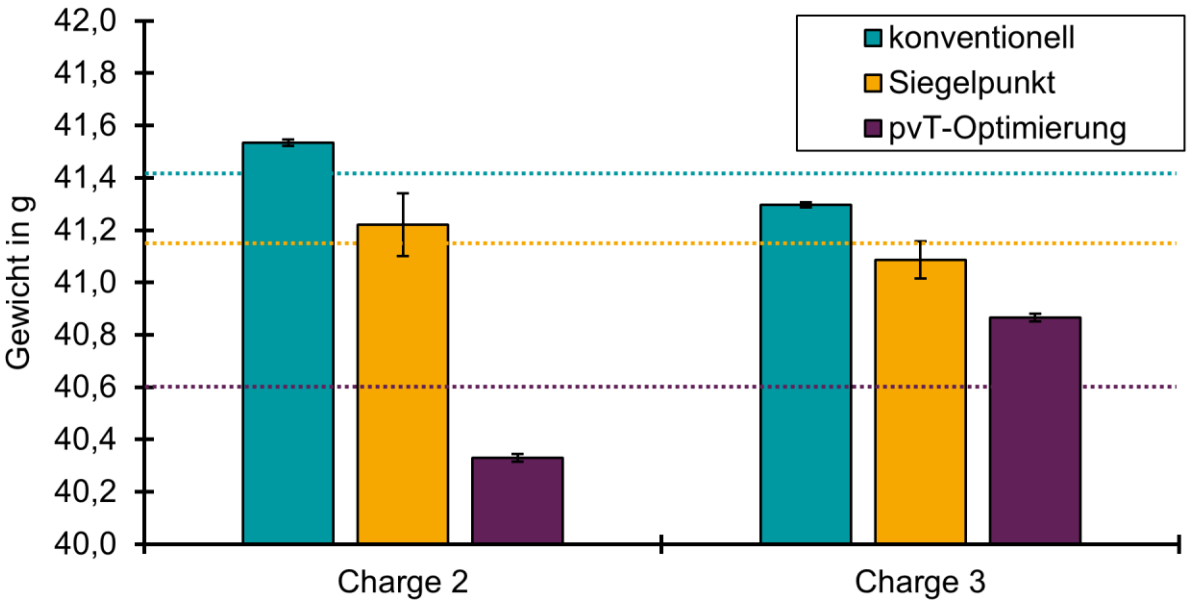

Bild 9.4: Bauteilgewicht für verschiedene Prozessführungskonzepte bei der Verarbeitung unterschiedlicher PP-PCR-Chargen.

Fig. 9.4: Part weight for different process control strategies when processing varying PP-PCR batches.

Die Bauteile sind mit pvT-Optimierung bei Charge 2 um 0,54 g leichter als bei Charge 3 und weisen damit den größten Gewichtsunterschied auf. Dies bestätigt die Problematik in der Wahl des Zielwerts für das spezifische Volumen (vgl. [HRH+16]), welches für die Länge der Nachdruckzeit verantwortlich ist. Dementsprechend ist eine Anpassung des spezifischen Volumens für verschiedene Rezyklatchargen erforderlich, auch wenn bereits der Offset zwischen dem Zielwert und dem realen spezifischen Volumen zu einer eingeschränkten Berücksichtigung des wirklichen Schmelzezustands in der Prozessführung führt.

Durch den Nullpunkt-Drift der Einspritzsensorik wurde für Charge 2 bei konventioneller Prozessführung ein geringerer Schneckendruck realisiert. Dadurch ist der Gewichtsunterschied zwischen beiden Chargen geringer als bei gleichem Schneckendruck für beide Materialchargen. Der Gewichtsunterschied beträgt 0,24 g.

Im Gegensatz dazu werden mit der automatisierten Siegelpunktbestimmung die geringsten Gewichtsunterschiede zwischen beiden Chargen mit 0,13 g realisiert. Die Nachdruckzeit ist für Charge 3 länger und gleicht somit die Chargenunterschiede im Vergleich zur konventionellen Prozessführung um 43,7 % besser aus. Bei der automatisierten Siegelpunktbestimmung weist das Bauteilgewicht eine höhere Standardabweichung auf, die auf unterschiedliche Nachdruckzeiten von Schuss zu Schuss zurückzuführen ist. Das Bauteilgewicht korreliert dabei für die einzelnen Spritzgießzyklen mit der Nachdruckzeit. Die Unterschiede resultieren

dementsprechend aus Ungenauigkeiten in der Siegelpunktbestimmung und erfordern eine Anpassung der Signalfilterung oder des Abbruchkriteriums.

Die Standardabweichungen der Bauteilabmessungen sind ebenfalls höher als bei den anderen beiden Prozessführungsstrategien, wie in Bild 9.5 dargestellt ist.

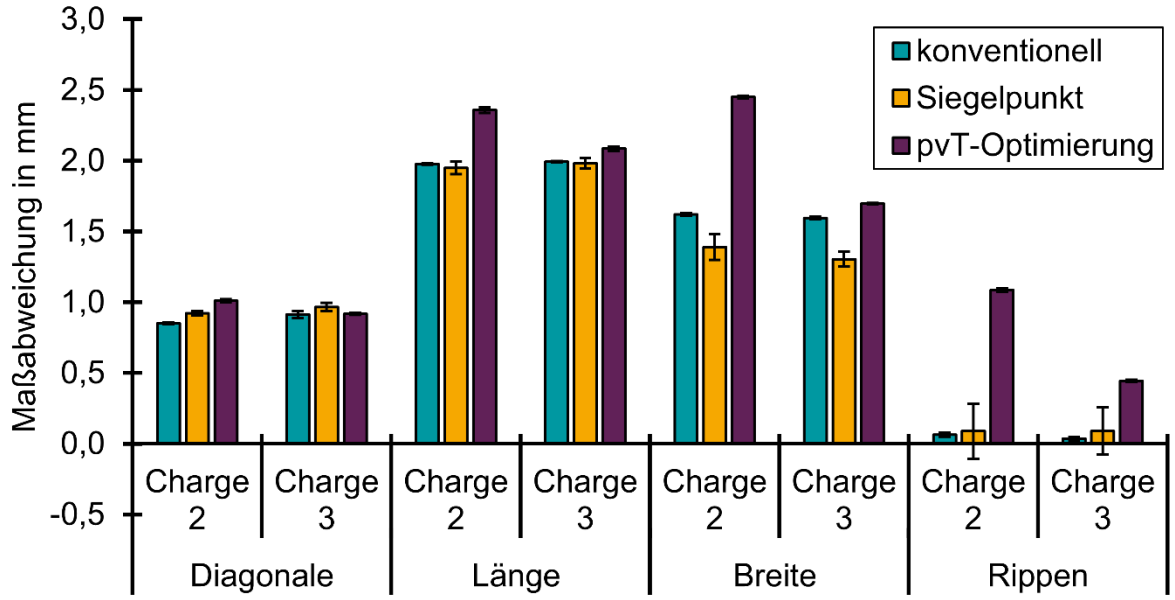

Bild 9.5: Maßabweichung für verschiedene Prozessführungskonzepte bei der Verarbeitung unterschiedlicher PP-PCR-Chargen.

Fig. 9.5: Dimensional deviation for different process control concepts when processing varying PP-PCR batches.

Die geringste Maßhaltigkeit weisen die Bauteile mit pvT-Optimierung auf. Die Kombination aus ansteigender Referenz für den Werkzeuginnendruck und pvT-optimierter Prozessführung entspricht somit nicht zwingend einer hohen Maßhaltigkeit. Dies könnte an einer geringeren Bauteilfüllung aufgrund der unterschätzten Nachdruckzeit liegen, da die Bauteile das geringste Bauteilgewicht aufweisen. Die Maßhaltigkeit ist für Charge 2 am geringsten, wobei die Bauteile auch das geringste Gewicht aufweisen. Somit wurden durch die pvT-Optimierung zu geringe Nachdruckzeiten berechnet.

Die Bauteile mit konventioneller Prozessführung weisen die geringsten diagonalen Abweichungen auf, was am höheren Bauteilgewicht liegen könnte. Die Bauteilbreite ist mit automatisierter Siegelpunktbestimmung am geringsten und weist den größten Unterschied von 0,2 mm zwischen beiden Prozessführungsstrategien auf, was einer prozentualen Verbesserung gegenüber der konventionellen Prozessführung von 14,2 % für Charge 2 und 18,2 % für Charge 3 entspricht. Abschließend werden die mechanischen Bauteileigenschaften bewertet, die in Bild 9.6 gezeigt sind.

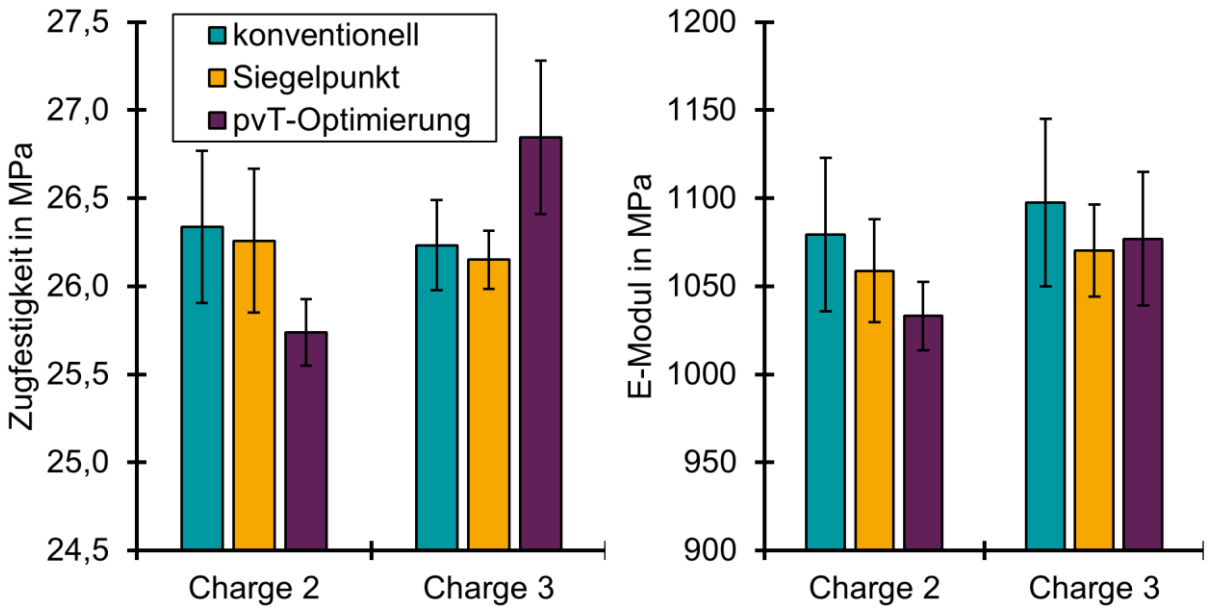

Bild 9.6: Mechanische Bauteileigenschaften für verschiedene Prozessführungskonzepte bei der Verarbeitung unterschiedlicher PP-PCR-Chargen.

Fig. 9.6: Mechanical part properties for different process control concepts when processing varying PP-PCR batches.

Unterschiede in den mechanischen Bauteileigenschaften sind nur bei der pvT-Optimierung in der Zugfestigkeit zu erkennen. Für Charge 3 liegt die Zugfestigkeit um mehr als 1 MPa höher, was mit den Ergebnissen aus Kapitel 7.4.3 übereinstimmt. Alle anderen Versuchsergebnisse sind im Rahmen der Standardabweichung und daher nicht eindeutig bewertbar.

9.3 Potential der Regelkonzepte zum Einsatz in der Serienproduktion

Das Potential der Prozessführungskonzepte wird im Vergleich zur konventionellen Prozessführung für den Einsatz in der Serienproduktion bewertet. Dabei werden die Bewertungskriterien Einrichtaufwand, Kompensation von Störeinflüssen und resultierende Bauteilqualität berücksichtigt.

Allgemein ist der Einrichtaufwand bei der phasenübergreifenden Werkzeuginnendruckregelung im Vergleich zur konventionellen Prozessführung höher, da die Bestimmung der Regelparameter für jeden Prozess erforderlich ist. Durch den Einsatz eines automatisierten Reglertunings konnte der Einrichtaufwand im Vergleich zu vergangenen Arbeiten jedoch bereits deutlich reduziert werden.

9.3.1 Automatisierte Siegelpunktbestimmung

Bei der automatisierten Siegelpunktbestimmung ist das Abbruchkriterium sowohl bauteil-, material- als auch prozesspunktabhängig und kann über einen einzigen Identifikationszyklus bestimmt werden. Für den Einsatz in der Serienproduktion ist jedoch eine automatisierte Anpassung des Abbruchkriteriums erforderlich, damit ein Eingreifen des Bedieners bei Veränderungen im Prozess nicht notwendig ist.

Die automatisierte Siegelpunktbestimmung zeigt großes Potential zum Ausgleich von thermischen und materialbedingten Störeinflüssen. Bereits ohne eine Anpassung des Abbruchkriteriums an die aktuellen Prozessbedingungen konnte eine teilweise Verbesserung der Bauteilqualität gegenüber der konventionellen Prozessführung erreicht werden. Dies gilt insbesondere für die Verarbeitung verschiedener Rezyklatchargen. Defizite des Konzepts liegen in der hohen Standardabweichung der Bauteilqualität, sodass eine Optimierung des entwickelten Konzepts für eine hohe Reproduzierbarkeit erforderlich ist. Die aktuell erreichbare Qualitätskonstanz ist nicht ausreichend für die Serienproduktion.

9.3.2 pvT-Optimierung

Für den Einsatz der pvT-Optimierung ist die aufwändige Bestimmung von Materialmodellen erforderlich. Insbesondere bei der kühlratenabhängigen pvT-Optimierung sind ein hoher Aufwand und hohe Kosten zur Prozesseinrichtung erforderlich, da neben pvT-Messungen auch Flash-DSC-Messungen sowie Spritzgießsimulationen durchgeführt werden müssen. Bei einem Wechsel der Bauteilgeometrie kann eine Anpassung des Zielwerts für das spezifische Volumen notwendig sein, da dieser Wert von der Sensor-position im Bauteil abhängig ist.

Bei beiden Konzepten der pvT-Optimierung ist der Ausgleich von Störeinflüssen stark von der Qualität des pvT-Modells, dem Material und dem Zielwert für das spezifische Volumen abhängig. Die Veränderungen der Bauteilqualität können überkompensiert werden, sodass größere Qualitätsabweichungen als bei der konventionellen Prozessführung, jedoch in entgegengesetzter Wirkungsrichtung auftreten können. Im Kontext zu vorangegangenen Arbeiten (vgl. [HRH+16, Sch11, Ste20]) wird somit die Annahme bestätigt, dass der erfolgreiche Einsatz der pvT-Optimierung materialabhängig ist und für jeden Prozess die iterative Bestimmung des Zielwerts für das spezifische Volumen erfordert.

10 FAZIT UND AUSBLICK

10.1 Fazit

In dieser Arbeit wurde ein Regelungskonzept vorgestellt, welches den Werkzeuginnendruck phasenübergreifend in Einspritz- und Nachdruckphase regelt. Dadurch können Unstetigkeiten durch den Umschaltvorgang und daraus resultierende Qualitätsprobleme vermieden werden. Auf den Spritzgießprozess wirken zusätzliche Störeinflüsse, die eine Anpassung der Referenz für den Werkzeuginnendruck erfordern, um Qualitätsveränderungen zu vermeiden.

Zunächst wurden verschiedene Werkzeuginnendruckreferenzen für die einzelnen Prozessphasen untersucht, um die wichtigsten Stellgrößen zu identifizieren. Der charakteristische Werkzeuginnendruckverlauf hat einen entscheidenden Einfluss auf die resultierende Bauteilqualität. Ohne eine Begrenzung des minimalen Einspritzvolumenstroms wird die Kavität schneller gefüllt, was jedoch in einem höheren Überschwingen im Werkzeuginnendruck resultiert. Die Maßhaltigkeit der Spritzgießbauteile ist höher, wohingegen die Zugfestigkeit sinkt. In der Nachdruckphase führt ein steigender Werkzeuginnendruckverlauf zum besten Qualitätsergebnis, da neben einer Erhöhung der Zugfestigkeit die Maßhaltigkeit der Bauteile steigt. In der Validierung konnte mit einer steigenden Werkzeuginnendruckreferenz in Kombination mit der pvT-Optimierung keine verbesserte Bauteilqualität festgestellt werden. Gleichzeitig steht ein steigender Werkzeuginnendruck im Widerspruch zur konventionellen Prozessführung. Für die Bestimmung eines qualitätsoptimierten Referenzverlaufs müssen demnach weitere Spritzgießprozesse betrachtet werden, wobei der Fokus auf den Druckverlauf in der Nachdruckphase gelegt werden sollte. In dieser Prozessphase konnte der größte Einfluss der Referenz auf die Bauteilqualität festgestellt werden. Neben den untersuchten Qualitätsgrößen sollten zusätzlich die inneren Bauteileigenschaften ausgewertet werden.

Anschließend wurden verschiedene Störeinflüsse in den Spritzgießprozess eingebracht, um die Detektierbarkeit der Prozessstörungen anhand von Prozesskennzahlen zu untersuchen. Das neu entwickelte Programm „InjectiX“ ermöglicht eine automatisierte Kennzahlgenerierung aus Prozessgrößenverläufen. Der Werkzeugtemperaturverlauf kann zur Überwachung des Einschwingvorgangs nach Produktionsunterbrechungen sowie bei thermischen Veränderungen verwendet werden. Materialunterschiede sind in der maximalen Einspritzsteigung im Werkzeuginnendruckverlauf erkennbar. Alle untersuchten Störungen sind allerdings auch ausschließlich über Veränderungen des den maximalen Schneckendruck am

Ende der Regeldauer abbildbar. Da der Schneckendruck zwar alle Prozessstörungen abbildet, aber auch gleichzeitig von diesen beeinflusst wird, sollte in weiterführenden Spritzgießversuchen die Wechselwirkung verschiedener Störeinflüsse untersucht werden. Dadurch kann geprüft werden, ob die in dieser Arbeit identifizierten Überwachungsgrößen eine uneingeschränkte Detektion von Qualitätsveränderungen ermöglichen.

Als dritter Forschungsschwerpunkt wurde der automatisierte Ausgleich von Störeinflüssen untersucht. Dazu wurden zwei Konzepte entwickelt, die ohne die Rückführung von Qualitätsdaten eine hohe Reproduzierbarkeit der Bauteilqualität ermöglichen sollen. Aufgrund der hohen Korrelation zwischen Schneckendruck und Prozessstörungen wurde ein Prozessführungskonzept auf Basis des Schneckendruckverlaufs abgeleitet. Dabei wird die Nachdruckphase beendet, sobald der Schneckendruckgradient aufgrund der zunehmenden Materialabkühlung einen experimentell ermittelten Grenzwert überschreitet. Mit diesem Konzept war es möglich, die Reproduzierbarkeit der Bauteilqualität sowohl für thermische Störeinflüsse als auch bei der Verarbeitung verschiedener Materialchargen zu erhöhen. Allerdings ist die Reproduzierbarkeit des Werkzeuginnendruckverlaufs von Schuss zu Schuss und damit der Bauteilqualität geringer als beim konventionellen Spritzgießprozess, sodass die Reproduzierbarkeit des Konzepts erhöht werden muss. Falls dies gelingt, ist ein eindeutiger Mehrwert gegenüber industriellen Assistenzsystemen gegeben, da eine schnelle und kostengünstige Prozesseinrichtung erfolgen kann.

Als zweites Prozessführungskonzept wurde die pvT-Optimierung weiterentwickelt. In Voruntersuchungen wurde festgestellt, dass beim Einsatz der pvT-Optimierung Qualitätsprobleme durch angussnahe Überspritzungen auftreten können, falls das pvT-Modell das Materialverhalten während der Erstarrung unzureichend abbildet. Daher wurde eine prozessnähere Abbildung des pvT-Modells zur Prozessregelung implementiert, indem spritzgießtypische Abkühlraten bei der Modellbildung berücksichtigt wurden. Dazu wurde die Übergangstemperatur für hohe Kühlraten im Prüflabor ermittelt und die lokale Abkühlrate am Ort der Sensorposition mittels Spritzgießsimulationen bestimmt. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die kühlratenabhängige pvT-Optimierung Vorteile gegenüber der klassischen pvT-Optimierung aufweist. Unter Berücksichtigung des Einstellaufwands weist das Verfahren jedoch Nachteile gegenüber der automatisierten Siegelpunktbestimmung aufgrund der hohen Materialabhängigkeit auf. Zur Qualitätsoptimierung ist die iterative Ermittlung des Zielwerts für das spezifische Volumen erforderlich. Neben dem aufwändigen Einrichtprozess entstehen hohe Kosten zur Bestimmung des kühlratenabhängigen

pvT-Modells. Damit ist das Verfahren nur für Prozesse mit sehr großen Stückzahlen geeignet, bei denen industrielle Assistenzsysteme nicht die erforderliche Genauigkeit liefern.

Zusammenfassend zeigt diese Arbeit das große Potential der phasenübergreifenden Werkzeuginnendruckregelung in Kombination mit prozessdatenbasierten Methoden zum Ausgleich von Störeinflüssen. Die Prozessführungskonzepte können die Produktivität von Spritzgießunternehmen erheblich steigern und dem Fachkräftemangel entgegenwirken, da ein automatisierter Ausgleich von Prozessstörungen möglich ist. Im Vergleich zu Assistenzsystemen der Maschinenhersteller können die Konzepte maschinenunabhängig eingesetzt werden und eliminieren den Umschaltpunkt als Schwachstelle des Prozesses.

10.2 Ausblick

Die phasenübergreifende Werkzeuginnendruckregelung zeigt großes Potential zum automatisierten Ausgleich von Störeinflüssen. Für den Einsatz in der Serienproduktion sind jedoch weitere Forschungsarbeiten notwendig.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde festgestellt, dass die Regelgüte durch Störeinflüsse verändert wird. Erst wenn der Werkzeuginnendruck zuverlässig geregelt werden kann, ist eine Qualitätsregelung, wie sie mit den beiden Prozessführungskonzepten entwickelt wurde, effizient möglich. Die Implementierung einer lernenden modell-prädiktiven Regelung könnte Regelabweichungen entgegenwirken. Die Regelungs-parameter werden dabei auf Basis aktueller Prozessdaten von Schuss zu Schuss angepasst, sodass die Robustheit der Regelung gegenüber Störeinflüssen zunimmt.

Das Konzept der automatisierten Siegelpunktbestimmung bietet Potential, um bei geringem Einstellaufwand eine hohe Reproduzierbarkeit der Bauteilqualität bei Störeinflüssen zu ermöglichen. Zur Reduktion der zyklischen Streuung ist eine Optimierung des Abbruchkriteriums erforderlich. Zum einen erfordert das hohe Messrauschen in den Prozessgrößenverläufen den Einsatz von Filtern zur Glättung der analogen Signalverläufe. Eine digitale Signalübertragung könnte das Messrauschen reduzieren und somit eine präzisere Bestimmung der aktuellen Schneckendrucksteigung ermöglichen. Weiterhin sollten präzisere Ansätze zur Definition des Abbruchkriteriums untersucht werden. Der absolute Wert des idealen Schneckendruckgradienten als Abbruchkriterium variiert für verschiedene Arbeitspunkte, da durch Prozessveränderungen der gesamte Schneckendruckverlauf verändert wird. Dementsprechend könnte eine prozentuale Betrachtung des Schneckendruckgradienten die Qualitätskonstanz weiter erhöhen.

Zur Bestimmung der lokalen Abkühlrate über Spritzgießsimulationen wird das pvT-Verhalten des Materials in der Simulation berücksichtigt. Daher sollte der Einfluss verschiedener Zylinder- und Werkzeugtemperaturen auf die Abkühlrate untersucht werden. Zusätzlich könnte ein iteratives Vorgehen zur Bestimmung des pvT-Modells die Modellgenauigkeit erhöhen. Dazu wird das ermittelte pvT-Modell iterativ zur erneuten Bestimmung der Abkühlrate eingesetzt. Der Zielwert für das spezifische Volumen könnte bei der Verarbeitung von Rezyklaten chargenspezifisch angepasst werden, um die Unterschiede im Materialverhalten bei der Prozesseinstellung zu berücksichtigen. Die Problematik des Offsets zwischen eingestelltem und realisiertem spezifischen Bauteilvolumen durch die pvT-Optimierung besteht jedoch weiterhin und erfordert die Bestimmung prozessnaher Materialdaten.

Für den industriellen Einsatz ist eine Integration in die Maschinensteuerung sinnvoll, um Totzeiten zu reduzieren, die durch die Signalübertragung entstehen. Alternativ ist der Wechsel von Analogsignalen auf das Bus-System der Spritzgießmaschine erforderlich, um die Abtastzeiten für neue Stellsignale zu reduzieren, und somit für Prozesse mit höheren Einspritzvolumenströmen einsetzbar zu sein.

11 ZUSAMMENFASSUNG / SUMMARY

11.1 Zusammenfassung

Diese Arbeit basiert auf einer phasenübergreifenden Werkzeuginnendruckregelung, die Unstetigkeiten in der Prozessführung durch die Vermeidung des Umschaltvorgangs zwischen Einspritz- und Nachdruckphase minimiert. In der Serienproduktion wirken Störeinflüsse auf den Spritzgießprozess, die eine Anpassung der Prozesseinstellung erfordern. Dazu ist die Detektion von Störeinflüssen im Prozess und darauf aufbauend die Ableitung idealer Werkzeuginnendruckreferenzen für eine hohe Reproduzierbarkeit der Bauteilqualität erforderlich.

Zunächst wurden verschiedene Stellgrößen der Werkzeuginnendruckreferenz für einen qualitätsoptimierten Verlauf untersucht. Eine Begrenzung des minimalen Einspritzvolumenstroms hat nur einen geringen Einfluss auf die Bauteilqualität. Ein steigender Werkzeuginnendruck in der Nachdruckphase kann die Maßhaltigkeit erhöhen. Weiterhin sollte der Werkzeuginnendruck während der Bauteilerstarrung nicht geregelt werden, um Spritzgießfehler zu vermeiden.

Prozesskennzahlen ermöglichen die Überwachung des Spritzgießprozesses, um Änderungen im Schmelzezustand durch Störeinflüsse zu detektieren. Für Anfahrproesse, thermische Veränderungen und Materialwechsel wurden die wichtigsten Kennzahlen identifiziert, die eine Überwachung ermöglichen und zur Bauteilqualität korrelieren.

Zum automatisierten Ausgleich von Störeinflüssen wurden zwei Prozessführungskonzepte entwickelt. Die pvT-Optimierung wurde um ein kühlratenabhängiges pvT-Modell erweitert, welches eine prozessnähere Beschreibung des Materialverhaltens abbildet. Allerdings ist die Reproduzierbarkeit der Bauteilqualität vom verwendeten Material und dem Zielwert des spezifischen Volumens abhängig. Bei der automatisierten Siegelpunktbestimmung wird die Nachdruckzeit anhand der Steigung des Schneckendruckverlaufs angepasst. Dadurch werden Qualitätsveränderungen durch thermische und materielle Störeinflüsse reduziert, jedoch mit optimierungsfähiger Reproduzierbarkeit von Schuss zu Schuss.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass Störeinflüsse über Prozessgrößenverläufe sowohl detektiert als auch durch die Regelung des Werkzeuginnendrucks ausgeglichen werden können. Ein großes Potential zeigt die automatisierte Siegelpunktbestimmung, da die Qualitätskonstanz der Spritzgießbauteile mit geringem Einrichtaufwand erhöht werden konnte.

11.2 Summary

This work is based on a phase-unifying cavity pressure controller that minimises discontinuities in the process by avoiding the switchover between the injection and the holding pressure phase. In mass production, disturbances affect the injection moulding process that requires an adjustment of the process settings. Therefore, the detection of disturbing influences in the process and, based on this, the derivation of ideal cavity pressure references is necessary for a high reproducibility of the part quality.

Initially, various control variables of the cavity pressure reference were investigated for a quality-optimised process. A limitation of the minimum injection volume flow rate has only a minor influence on the part quality. A rising cavity pressure in the holding pressure phase can increase dimensional accuracy. Furthermore, the cavity pressure should not be controlled during part solidification in order to avoid part defects.

Process indicators enable the monitoring of the injection moulding process in order to detect changes in the melt state due to disturbances.The most important key figures were identified for start-up processes, thermal changes and material changes, which allow them to be monitored and correlated to part quality.

Two process control concepts were developed for the automated compensation of disturbances. The pvT optimisation was expanded to include a cooling rate-dependent pvT-model, which provides a more process-oriented description of the material behavior. However, the reproducibility of the part quality depends on the material and the target value of the specific volume. With automated sealing point determination, the holding pressure time is adjusted based on the gradient of the screw pressure curve. This reduces quality changes due to thermal and material disturbances, although the reproducibility from shot to shot has to be optimised.

In summary, it was shown that disturbances can be detected via process variable curves and also compensated for by controlling the cavity pressure. Automated sealing point determination shows great potential, as the quality consistency of the injection moulded parts could be increased with minimal set-up effort.

12 ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES

12.1 Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
BO	Bayes´sche Optimierung
CSV	Comma-seperated values
CTD	Compressibility, Temperature, and Density
DSC	Differential Scanning Calorimetry
FPGA	Field Programmable Gate Array
ILR	Iterativ lernende Regelung
JSON	JavaScript Object Notation
MPR	Modellprädiktive Regelung
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
OPC-UA	Open Platform Communications - Unified Architecture
PCR	Post Consumer Rezyklat
PP	Polypropylen
pvT	Druck- und temperaturabhängiges spezifisches Volumen
SQL	Structured Query Language
TV	talkumverstärkt
UKF	Unscented Kalman-Filter
UV	unverstärkt
xslx	XML Spreadsheet

12.2 Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
a	W/(m*K)	Temperaturleitfähigkeit
G	g	Gewicht
J	-	Kostenfunktion
p	bar	Druck
$\dot{Q}$	W/s	Wärmestrom
t	s	Zeit
T	°C	Temperatur
U	variabel	Stellgröße

V	cm^3	Volumen
$\dot{V}$	cm^3/s	Einspritzvolumenstrom
X	-	Zustandsvektor
Y	variabel	Regelgröße
θ	-	Parametersatz
λ	-	gleitender Durchschnitt

12.3 Indizes

Index	**Bedeutung**
deko	Dekompression
e	integrale Abweichung Werkzeuginnendruck
eff	effektiv
ein	Einspritzphase
end	Ende der Nachdruckphase
FF	Fließfront
ges	gesamt
i	Laufkoordinate
kav	Kavität
max	maximal
min	minimal
nach	Nachdruckphase
os	integraler Wert der Druckspitze
os,max	maximaler Werkzeuginnendruck
p^-	Druckverlust nach Druckspitze
ref	Referenz
s	Schnecke
ss	stationärer Druckgradient
stat	stationär
stopp	Produktionsunterbrechung
theor.	theoretisch
u	Stetigkeit
vol	volumetrisch gefüllt
wkz	Werkzeug
zyk	Zyklus

13 LITERATURVERZEICHNIS

[AHW+20] ALMS, J.; HOPMANN, C.; WANG, J.; HOHLWECK, T.: Non-Isothermal Crystallisation Kinetics of Polypropylene at High Cooling Rates and Comparison to the Continuous Two-Domain pvT Model. *Polymers* 12 (2020) 7

[APD+23] ARAÚJO, C.; PEREIRA, D.; DIAS, D.; MARQUES, R.; CRUZ, S.: In-cavity pressure measurements for failure diagnosis in the injection moulding process and correlation with numerical simulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 126 (2023) 1-2, S. 291–300

[BB14] BHATTACHARYA, D.; BEPARI, B.: Feasibility study of recycled polypropylene through multi response optimization of injection moulding parameters using grey relational analysis. *Procedia Engineering*(2014) 97, S. 186–196

[BHS+12] BOURDON, R.; HELLMANN, A.; SCHRECKENBERG, J.; SCHWEGMANN, R.: Standardisierte Prozess- und Qualitätsoptimierung mit DOE-Methoden - eine Kurzanleitung für die Praxis beim Spritzgießen. *Journal of Plastics Technology* 8 (2012) 5, S. 525–549

[Bic12] BICHLER, M.: *Prozessgrößen beim Spritzgießen.* Berlin, Wien, Zürich. Beuth Verlag, 2012

[BSS+09] BASTIAN, M.; STITZ, S.; SCHINK, K.; DEUBEL, C.: Quality Problems during Mold Start-Up? *Kunststoffe International* 99 (2009) 6, S. 13–16

[Cat79] ČATIĆ, I.: Cavity temperature—An Important Parameter in the Injection Molding Process, 19(13). *Polymer Engineering and Science* 19 (1979) 13, 893-899

[CFT+09] CHEN, W.-C.; FU, G.-L.; TAI, P.-H.; DENG, W.-J.: Process parameter optimization for MIMO plastic injection molding via soft computing. *Expert Systems with Applications* 36 (2009) 2, S. 1114–1122

[CHH21] CHEN, J.-Y.; HUNG, P.-H.; HUANG, M.-S.: Determination of process parameters based on cavity pressure characteristics to enhance quality uniformity in injection molding. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 180 (2021), S. 121788

[CLH19] CHEN, J.-Y.; LIU, C.-Y.; HUANG, M.-S.: Enhancement of Injection Molding Consistency by Adjusting Velocity/Pressure Switching Time Based on Clamping Force. *International Polymer Processing* 34 (2019) 5, S. 564–572

[CZH21] CHEN, J.-Y.; ZHUANG, J.-X.; HUANG, M.-S.: Enhancing the quality stability of injection molded parts by adjusting V/P switchover point and holding pressure. *Polymer* 213 (2021), S. 123332

[CZK+10] CHEN, X.; ZHANG, L.; KONG, X.; LU, J.; GAO, F.: Automatic velocity profile determination for uniform filling in injection molding. *Polymer Engineering & Science* 50 (2010) 7, S. 1358-1371

[DH91] DAVIS, C. C.; HUDSON, J. C.: Injection Molding Process Variation before and after Interruption. In: Society of Plastics Engineers (Hrsg.): *ANTEC ´91 Conference Proceedings,* 1991, S. 474–476

[DHM22] DAHLMANN, R.; HABERSTROH, E.; MENGES, G.: *Menges Werkstoffkunde Kunststoffe.* Rainer Dahlmann, Edmund Haberstroh, Georg Menges. München. Hanser, 2022

[Dub01] DUBAY, R.: Predictive Control of Cavity Pressure During Injection Filling. *Journal of Injection Molding Technology* 5 (2001) 2, S. 72–79

[EDT03] EDWARDS, R.; DIAO, L.; THOMAS, C. L.: A Comparison of Position, Cavity Pressure, and Ultrasound Sensors for Switch/Over Control in Injection Molding. In: Society of Plastics Engineers (Hrsg.): *Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings.* Nashville, USA, 2003, S. 586–590

[Fin22] FINK, C.: *Entwicklung einer Qualitätsregelung zum Ausgleich thermischer Störeinflüsse im Spritzgießprozess.* RWTH Aachen, Bachelorarbeit, 2022 - Betreuer: Katharina Hornberg

[Fra19] FRANKLAND, J.: *Understanding Viscosity in Extrusion*. Plastics Processing 2016, URL: https://www.ptonline.com/articles/understanding-viscosity-in-extrusion

[GA15] GREWAL, M. S.; ANDREWS, A. P.: *Kalman filtering.* Theory and practice using MATLAB. Hoboken, New Jersey. John Wiley & Sons, 2015

[GBR01] GORNIK, C.; BLEIER, H.; ROTH, W.: Arbeit an der Spitze. Das Schließverhalten von Rückstromsperren. *Kunststoffe* 91 (2001) 6, S. 72–74

[Gie92] GIERTH, M. M.: *Methoden und Hilfsmittel zur prozeßnahen Qualitätssicherung beim Spritzgießen von Thermoplasten.* RWTH Aachen, Dissertation, 1992 - ISBN: 3-86073-073-8a

[GM16] GIEßAUF, J.; MAIER, C.: Wie reproduzierbar ist die Reproduzierbarkeit? *Kunststoffe* 106 (2016) 6, S. 62–66

[GMK23] GIEßAUF, J.; MAYR, K.; KILIAN, J.: Intelligente Assistenz entlastet das Produktionspersonal. *Kunststoffe* 113 (2023) 9, S. 52–55

[Gor07] GORNIK, C. J.: *Neue Erkenntnisse zur Plastifiziereinheit von Spritzgießmaschinen basierend auf experimentellen Untersuchungen.* Montanuniversität Leoben, Dissertation, 2007

[Gor09] GORNIK, C.: Abgeleitete Kenngrößen zur Optimierung nutzen. *Kunststoffe*(2009) 9, S. 30–34

[Gri10] GRIES, H.: Kostenfaktor Korrosion. *Kunststoffe* 100 (2010) 4, S. 50–53

[Gru05] GRUBER, J.-M.: *Prozessführung beim Thermoplastspritzgießen auf Basis des Werkzeuginnendrucks.* RWTH Aachen, Dissertation, 2005

[Grü19] GRÜMER, B.: *Vorhersage der Robustheit von Spritzgießprozessen.* RWTH Aachen, Dissertation, 2019 - ISBN: 978-3-95886-273-9

[GTG+14] GAO, R.; TANG, X.; GORDON, G.; KAZMER, D. O.: Online product quality monitoring through in-process measurement. *CIRP Annals* 63 (2014) 1, S. 493–496

[HAH+17] HOPMANN, C.; ABEL, D.; HEINISCH, J.; STEMMLER, S.: Self-optimizing injection molding based on iterative learning cavity pressure control. *Production Engineering Research and Development* 11 (2017) 2, S. 97–106

[HCK+22] HERTZ, R.; CHRISTENSEN, J. K.; KRISTIANSEN, S.; THERKELSEN, O.; SCHMIDT, L.: In-line Process and Material Property Measurement in Injection Moulding - a Theoretical Review. *Production & Manufacturing Research* 10 (2022) 1, S. 938–963

[HDH+19] HOPMANN, C.; DORNEBUSCH, H.; HEINISCH, J.; WERNER, J.-M.: Development of a temperature displacement law for viscosity fluctuations integrated into the control setup of the injection molding process. In: Society of Plastics Engineers (Hrsg.): *Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings.* Detroit, USA, 2019

[Hei14] HEINZLER, F.: *Modellgestützte Qualitätsregelung durch eine adaptive, druckgeregelte Prozessführung beim Spritzgießen,* Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2014

[Hei21] HEINISCH, J.: *Einsatz von maschinellen Lernverfahren zur Einrichtung von Spritzgießprozessen.* RWTH Aachen, Dissertation, 2021 - ISBN: 978-3-95886-401-6

[HG15] HOPMANN, C.; GRÜMER, B.: Vorhersage robuster Prozesse während der Produktentwicklung. In: Institut für Kunststoffverarbeitung (Hrsg.): *IKV Fachtagung "Industrie 4.0 - (R)evolution in der Kunststoffverrarbeitung",* 2015

[HH17] HOPMANN, C.; HEINISCH, J.: Process control strategies for injection molding processes with changing raw material viscosity. *Journal of Polymer Engineering* 38 (2017) 5, S. 483–492

[HH20] HOPMANN, C.; HORNBERG, K.: Die Umschaltproblematik und ihre Folgen. *Kunststoffe* 110 (2020) 3, S. 82–86

[HHV+21] HORNBERG, K.; HOPMANN, C.; VUKOVIC, M.; STEMMLER, S.; ABEL, D.: Auswirkungen zyklischer Prozesseinflüsse auf den Werkzeuginnendruckverlauf und die Bauteilqualität im Spritzgießprozess, Effects of cyclical process influences on the cavity pressure curve and part quality in the injection moulding process. *Zeitschrift Kunststofftechnik/ Journal of Plastics Technology* 17 (2021) 3, S. 179–203

[HHV+22b] HORNBERG, K.; HOPMANN, C.; VUKOVIC, M.; ABEL, D.: Part Quality Control through Holistic Consideration of Cross-phase Cavity Pressure Characteristics in Injection Moulding. In: Institut für Kunststoffverarbeitung (Hrsg.): *2nd International Symposium on Plastics Technology,* 2022

[HHV+23] HORNBERG, K.; HOPMANN, C.; VUKOVIC, M.; STEMMLER, S.; ABEL, D.: Compensation of batch fluctuations of post-consumer recyclate in injection molding by phase-unifying process control. In: Society of Plastics Engineers (Hrsg.): *Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings.* Denver, USA, 2023

[HK23] HOPMANN, C.; KÖBEL, T.: Development of a methodical approach to set-up the injection velocity profile dependent on the part geometry. *Journal of Polymer Engineering* 43 (2023) 5, S. 454–464

[HMM+18] HOPMANN, C.; MENGES, G.; MICHAELI, W.; MOHREN, P.: *Spritzgießwerkzeuge.* Auslegung, Bau, Anwendung. München, Wien. Carl Hanser Verlag, 2018

[Hoh21] HOHLWECK, T.: *Inverse thermische Optimierung zur wissensbasierten thermischen Spritzgießwerkzeugauslegung.* RWTH Aachen, Dissertation, 2021 - ISBN: 978-3-95886-432-0

[HRH+16] HOPMANN, C.; REßMANN, A.; HEINISCH, J.: Influence on Product Quality by pvT-Optimised Processing in Injection Compression Molding. *International Polymer Processing* 31 (2016) 2, S. 156–165

[HS21] HOPMANN, C.; SCHMITZ, M.: *Plastics industry 4.0.* Potentials and applications in plastics technology. Munich, Cincinnati, OH. Carl Hanser Verlag; Hanser Publications, 2021

[Hua07] HUANG, M.-S.: Cavity pressure based grey prediction of the filling-to-packing switchover point for injection molding. *Journal of Materials Processing Technology* 183 (2007) 2-3, S. 419–424

[HVG+23] HORNBERG, K.; VUKOVIC, M.; GERADS, J.; LOCKNER, Y.; ZIMMERMANN, C.; SCHMITZ, M.; STEMMLER, S:; HOPMANN, C.; ABEL, D.: Präzise Prozessführung mit InjectiX. *Kunststoffe* 113 (2023) 9, S. 70 - 73

[HWK+22] HOPMANN, C.; WALTHER, T.; KÖBEL, T.; HORNBERG, K.; VUKOVIC, M.; ABEL, D.: Resilient injection moulding process control, Tagungshandbuch zum 31. Internationalen Kunststofftechnischen Kolloquium. In: Institut für Kunststoffverarbeitung (Hrsg.): *31. Internationales Kunststofftechnisches Kolloquium des IKV,* 2022, S. 22–35

[Jar19] JAROSCHEK, C.: *Spritzgießen für Praktiker.* München. Hanser, 2019

[JM04] JOHANNABER, F.; MICHAELI, W.: *Handbuch Spritzgießen.* München, Wien. Carl Hanser Verlag, 2004

[JMG03] JANSSON, A.; MÖLLER, K.; GEVERT, T.: Degradation of post-consumer polypropylene materials exposed to simulated recycling—mechanical properties. *Polymer Degradation and Stability* 82 (2003) 1, S. 37–46

[Kaz09] KAZMER, D.: *Plastics manufacturing systems engineering.* A systems approach. Cincinnati, Ohio. Hanser Publications, 2009

[KC15] KOUVARITAKIS, B.; CANNON, M.: *Model Predictive Control.* Classical, Robust and Stochastic. Springer International Publishing AG, 2015

[Kle20] KLEPPMANN, W.: *Versuchsplanung.* Produkte und Prozesse optimieren. München. Hanser, 2020

[Kle22] KLEIN, D. P.: *Steigerung der Produktqualität durch den Einsatz eines automatisierten Störgrößenausgleichs im Spritzgießen.* RWTH Aachen, Bachelorarbeit, 2022 - Betreuer: Katharina Hornberg

[Kru15] KRUPPA, S.: *Adaptive Prozessführung und alternative Einspritzkonzepte beim Spritzgießen von Thermoplasten,* Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2015

[Kud97] KUDLIK, N.: *Reproduzierbarkeit des Kunststoff-Spritzgießprozesses.* RWTH Aachen, Dissertation, 1997 - ISBN: 3-89653-412-4

[KVW+10] KAZMER, D. O.; VELUSAMY, S.; WESTERDALE, S.; JOHNSTON, S.; GAO, R. X.: A comparison of seven filling to packing switchover methods for injection molding. *Polymer Engineering & Science* 50 (2010) 10, S. 2031–2043

[KW09] KAZMER, D. O.; WESTERDALE, S.: A model-based methodology for on-line quality control. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 42 (2009) 3, S. 280–292

[KWH23] KE, K.-C.; WU, P.-W.; HUANG, M.-S.: Multi-quality prediction of injection molding parts using a hybrid machine learning model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2023)

[LP21] LE RICHE, R.; PICHENY, V.: Revisiting Bayesian optimization in the light of the COCO benchmark. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 64 (2021) 5, S. 3063–3087

[LPH+22] LIEW, K.-F.; PENG, H.-S.; HUANG, P.-W.; SU, W.-J.: Injection Barrel/Nozzle/Mold-Cavity Scientific Real-Time Sensing and Molding Quality Monitoring for Different Polymer-Material Processes. *Sensors (Basel, Switzerland)* 22 (2022) 13

[LR19] LUCA, A.; RIEMER, O.: Analysis of the Downscaling Effect and Definition of the Process Fingerprints in Micro Injection of Spiral Geometries. *Micromachines* 10 (2019) 5

[LWN+10] CHUANG, L.; FULI, W.; DAPENG, N.; YANG, L.: Cavity pressure control by iterative learning control with zero-phase filtering in injection molding. In: IEEE (Hrsg.): *Chinese Control and Decision Conference.* Xuzhou, China, 2010, S. 376–379

[MBH+90] MICHAELI, W.; BOURDON, K.; HAUPT, M.; HUNOLD, D.; ROBERS, T.: Das Volumenstrom-übertragungsverhalten in der Einspritzphase. *Plastverarbeiter* 41 (1990) 9, S. 186–195

[MG05] MICHAELI, W.; GRUBER, J.: Prozessführung beim Spritzgießen - direkte Regelung des Werkzeuginnendrucks steigert die Reproduzierbarkeit. *Zeitschrift Kunststofftechnik* 1 (2005) 1, S. 1–12

[MK11] MEHAT, N. M.; KAMARUDDIN, S.: Investigating the Effects of Injection Molding Parameters on the Mechanical Properties of Recycled Plastic Parts Using the Taguchi Method. *Materials and Manufacturing Processes* (2011) 26

[ML89] MICHAELI, W.; LAUTERBACH, M.: Die pmT-Optimierung – Konsequenzen aus dem pvT-Konzept zur Nachdruckführung. *Kunststoffe* 79 (1989) 9, S. 852–855

[MS07] MICHAELI, W.; SCHREIBER, A.: Online Cavity Pressure Control in Injection Moulding. *Journal of Polymer Engineering* 27 (2007) 6-7, S. 429–445

[MS09] MICHAELI, W.; SCHREIBER, A.: Advanced Process Control For Injection Molding Based On Cavity Pressure, Society of Plastics Engineers, ANTEC ´09 Conference Proceedings. In: Society of Plastics Engineers (Hrsg.): *ANTEC ´09 Conference Proceedings,* 2009, S. 1704–1708

[MXD+23] MA, Y.; XU, Y.; DANG, K.; FU, N.; JIAO, X.; XIE, P.; YANG, W.: Study on the evaluation and compensating strategy for the wear damage of non-return valve during injection molding process. *Polymer Engineering and Science* 63 (2023) 3, S. 811–820

[MZR+18] MAO, T.; ZHANG, Y.; RUAN, Y.; GAO, H.; ZHOU, H.; LI, D.: Feature learning and process monitoring of injection molding using convolution-deconvolution auto encoders. *Computers & Chemical Engineering* 118 (2018), S. 77–90

[NN03] N.N.: *SCP Typ 2853A und PiCo Typ 2859A.* Kosten sparen in der Spritzgießindustrie, 27.03.2003

[NN12] N.N.: DIN EN ISO 527-2: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen. Berlin: Beuth Verlag, 2012

[NN14] N.N.: DIN ISO/TR 17098: Stoffliche Verwertung von Verpackungsmaterialien – Bericht über Substanzen und Materialien, die die stoffliche Verwertung behindern können. Berlin: Beuth Verlag. 2014

[NN16] N.N. *EP 3 027 380 B1: Injection molding machines and methods for Accounting for changes in material properties during injection molding runs,* 2016

[NN17] N.N. *DE 10 2015 117 237 B3: Verfahren zur Bestimmung eines realen Volumens einer spritzgießfähigen Masse in einem Spritzgießprozess*, 2017

[NN18] N.N.: *inject 4.0.* Lösungen für die smart factory. URL: https://www.engelglobal.com/de/at/inject-4-0/ueber-inject-4-0.html, 22.08.2019

[NN19a] N.N.: *The European Green Deal.* Brussels, 11.12.2019

[NN19b] N.N.: DIN EN ISO 2818: Kunststoffe – Herstellung von Probekörpern durch mechanische Bearbeitung. Berlin: Beuth Verlag, 2019

[NN19c] N.N.: DIN EN ISO 527-1: Kunststoffe – DIN EN ISO 527-1: Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundsätze. Berlin: Beuth Verlag, 2019

[NN19d] N.N. *WO 2019/245794 A1: Systems and approaches for controlling an injection molding machine*, 2019

[NN19e] N.N. *WO 2019/213380 Al: Systems and lv1 methods for controlling injection molding using predicted cavity pressure*, 2019

[NN19f] N. N. *US 2019/0105826 Al: Real time material and velocity control in a molding system*, 2019

[NN90] N. N. *EP0461143B1: Verfahren zum Steuern der Nachdruckphase beim Spritzgießen thermoplastischer Kunststoffe.* Patentschrift, Europäisches Patentamt, 26.02.1990

[Olm21] OLMAZ, H.: *Analyse der Auswirkungen zyklusübergreifender Störeinflüsse auf den Spritzgießprozess.* RWTH Aachen, Bachelorarbeit, 2021 - Betreuer: Katharina Hornberg

[PDS06] PRAMUJATI, B.; DUBAY, R.; SAMAAN, C.: Cavity Pressure Control During Cooling in Plastic Injection Molding. *Advances in Polymer Technology* 25 (2006) 3, S. 170–181

[PGS12] PILLWEIN, G.; GIESSAUF, J.; STEINBICHLER, G.: Einfaches Umschalten auf konstante Qualität. *Kunststoffe* 102 (2012) 9, S. 31–35

[RAK17] RUDOLPH, N. S.; AUMANATE, C.; KIESEL, R.: *Understanding plastics recycling.* Economic, ecological, and technical aspects of plastic waste handling. Cincinnati, Munich. Hanser Publishers; Hanser Publications, 2017

[RKD21] RØNSCH, G. Ø.; KULAHCI, M.; DYBDAHL, M.: An investigation of the utilisation of different data sources in manufacturing with application in injection moulding. *International Journal of Production Research* 59 (2021) 16, S. 4851–4868

[RL19] RAZENBÖCK, J.; LHOTA, C.: Konforme dynamische Prozesse. *MedPLAST* (2019), S. 18–21

[RSH+14] REITER, M.; STEMMLER, S.; HOPMANN, C.; RESSMANN, A.; ABEL, D.: Model Predictive Control of Cavity Pressure in an Injection Moulding Process. *IFAC Proceedings Volumes* 47 (2014) 3, S. 4358–4363

[SAV+19] STEMMLER, S.; AY, M.; VUKOVIC, M.; ABEL, D.; HEINISCH, J.; HOPMANN, C.: Cross-phase Model-based Predictive Cavity Pressure Control in Injection Molding. In: IEEE (Hrsg.): *Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*IEEE, 2019, S. 360–367

[Sch11] SCHREIBER, A.: *Regelung des Spritzgießprozesses auf Basis von Prozessgrößen und im Werkzeug ermittelter Materialdaten,* RWTH Aachen, Dissertation, 2011 - ISBN: 3-86130-717-0

[Sch19] SCHÖTZ, A.: *Abmusterung von Spritzgießwerkzeugen.* Strukturierte und analytische Vorgehensweise. München. Hanser, 2019

[Sch22] SCHMITZ, M. T.: *Analyse von Material, Prozess und Qualität bei der Verarbeitung von Post-Consumer Rezyklaten im Spritzgießprozess zur Entwicklung eines Prozessführungskonzepts.* RWTH Aachen, Masterarbeit, 2022 - Betreuer: Katharina Hornberg

[Sch86] SCHMIDT, T. W.: *Zur Abschätzung der Schwindung,* RWTH Aachen, Dissertation, 1986

[SHS13] SCHMIED, M.; HOCHREITER, E.; STEINBERGER, G.: Gesteuerter Schließvorgang, höchste Gewichtskonstanz. *Kunststoffe* 103 (2013) 8

[SKM14] SCHIFFERS, K.; KRUPPA, S.; MOSER, S.: Für jeden Schuss der richtige Umschaltpunkt. *Kunststoffe* 104 (2014) 11, S. 58–63

[SLL07] SU, K.-H.; LIN, J.-H.; LIN, C.-C.: Influence of reprocessing on the mechanical properties and structure of polyamide 6. *Journal of Materials Processing Technology* 192-193 (2007), S. 532–538

[SNL+15] SUÁREZ, S. A.; NARANJO, A.; LÓPEZ, I. D.; ORTIZ, J. C.: Analytical review of some relevant methods and devices for the determination of the specific volume on thermoplastic polymers under processing conditions. *Polymer Testing* 48 (2015), S. 215–231

[Ste20] STEMMLER, S.: *Intelligente Regelungsstrategien als Schlüsseltechnologie selbstoptimierender Fertigungssysteme.* RWTH Aachen, Dissertation, 2020

[TBF+18] THOMBANSEN, U.; BUCHHOLZ, G.; FRANK, D.; HEINISCH, J.; KEMPER, M.; PULLEN, T.; REIMER, V.; ROTSHTEYN, G.; SCHWENZER, M.; STEMMLER, S.; ABEL, D.; GRIES, T.; HOPMANN, C.; KLOCKE, F.; POPRAWE, R.; REISGEN, U.; SCHMITT, R.: Design framework for model-based self-optimizing manufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*(2018) 10.1007/s00170-018-1951-8, S. 1433–3015

[TEM+21] Ryan Turner; David Eriksson; M. McCourt; J. Kiili; Eero Laaksonen; Zhen Xu; Isabelle M Guyon: Bayesian Optimization is Superior to Random Search for Machine Learning Hyperparameter Tuning: Analysis of the Black-Box Optimization Challenge 2020. *Neural Information Processing Systems*(2021) 133, S. 3–26

[Thi77] THIENEL, P.: *Der Formfüllvorgang beim Spritzgießen von Thermoplasten,* RWTH Aachen, Dissertation, 1977

[TMM+21] TRIPATHI, S.; MITTERMAYR, C.; MUHR, D.; JODLBAUER, H.: Large scale predictability analysis of process variables from injection molding machines. *Procedia Computer Science*(2021) 180, S. 545–560

[VMO+23] VASCO, J. C.; MARTINS, J.; OLIVEIRA, P.; CHAVES, P.: Closed-Loop Control Applied to the Injection Moulding Process—An Industry 4.0 Refurbishment Case Study. *Electronics* 12 (2023) 2, S. 271

[VSA+22] VUKOVIC, M.; STEMMLER, S.; ABEL, D.; HORNBERG, K.; HOPMANN, C.: A Comparison of Two Sigma Point Kalman Filters for Adaptive Cross-phase Cavity Pressure Control in Injection Molding. *10th IFAC Manufacturing Modelling, Management and Control Conference,* 2022

[VSH+22] VUKOVIC, M.; STEMMLER, S.; HORNBERG, K.; ABEL, D.; HOPMANN, C.: Adaptive model-based predictive control for cross-phase cavity pressure control in injection molding. *Journal of Manufacturing Processes* 77 (2022), S. 730–742

[Vuk24*] VUKOVIC, M.: *Cross-Phase Injection Molding Control for Thermoplastics Processing.* RWTH Aachen, Dissertation, *2024 - in Vorbereitung

[WHR+20] WANG, J.; HOPMANN, C.; RÖBIG, M.; HOHLWECK, T.; KAHVE, C.; ALMS, J.: Continuous Two-Domain Equations of State for the Description of the Pressure-Specific Volume-Temperature Behavior of Polymers. *Polymers* 12 (2020) 2

[WK08] WESTERDALE, S.; KAZMER, D.: THE EFFECTS OF TEMPERATURE AND RELATIVE HUMIDITY ON INJECTION MOLDED PART QUALITY. In: Society of Plastics Engineers (Hrsg.): *ANTEC ´08 Conference Proceedings,* 2008

[WPY11] WANG, J.; PENG, J.; YANG, W.: Filling-To-Packing Switchover Mode Based on Cavity Temperature for Injection Molding. *Polymer-Plastics Technology and Engineering* 50 (2011) 12, S. 1273–1280

[XXF+22] XU, Y.; XIE, P.; FU, N.; JIAO, X.; WANG, J.; LIU, G.; DOU, X.; ZHA, Y.; DANG, K.; YANG, W.: Self-optimization of the V/P switchover and packing pressure for online viscosity compensation during injection molding. *Polymer Engineering & Science* 62 (2022) 4, S. 1114–1123

[XYC+18] XIE, P.; YANG, H.; CAI, T.; LI, Z.; LI, Y.; YANG, W.: Study on the Pressure-Volume-Temperature Properties of Polypropylene at Various Cooling and Shear Rates. *Polymer Korea* 42 (2018) 2, S. 167–174

[YCL+16] YANG, Y.; CHEN, X.; LU, N.; GAO, F.: *Injection Molding Process Control, Monitoring, and Optimization.* München, Wien. Carl Hanser Verlag, 2016

[ZH22] ZHAO, L.; HUANG, X.: Slow Time-Varying Batch Process Quality Prediction Based on Batch Augmentation Analysis. *Sensors (Basel, Switzerland)* 22 (2022) 2

14 ANHANG

14.1 Materialinformationen Rezyklat

	Charge 1	Charge 2	Charge 3	Charge 4	Charge 5
Gewicht [g]	27,663	27,886	27,524	27,689	27,695
Reststoffe anorganisch [%]	0,84	1,23	0,65	0,92	0,98
MFR [g/10min]	11,64	10,31	13,9	11,06	11,72
PE-Anteil (FTIR) [-]	0,1	0,12	0,05	0,1	0,05
Degradations-temperatur [°C]	476,79	475,65	473,65	476,98	474,02

Tabelle 14.1: Ausgewählte Übersicht untersuchter Materialkennwerte des PP-PCR Systalen PP-24000 gr000.

Table 14.1: Selected overview of analysed material characteristics of the PP-PCR system PP-24000 gr000.

14.2 Regelparameter

In der folgenden Tabelle sind die Regelparameter für beide Bauteile beim Einsatz der verschiedenen Materialien gegenübergestellt. Die Regelparameter wurden beim Material PP-PCR nicht automatisch optimiert, sondern manuell eingestellt, da das Konzept zur automatisierten Reglerparametrierung parallel zur Durchführung dieser Arbeit entwickelt wurde.

Parameter	Platte PP-TV	Platte PP-UV	Platte PP-PCR	VP PP-TV	VP PP-PCR
Min. $\dot{V}$	variabel	variabel	0	variabel	0
Max. $\dot{V}$	25	25	25	40	40
K_η	41	50	200	100	100
τ	30	32	50	31	31
R	1969	1170	4000	1500	1500
Q_d	2466	1263	3000	2500	2500
$V_{c,I}$	0,104	0,093	0	0,37	0,37

Tabelle 14.2: Regelparameter für Platte und Verzugsprobekörper mit PP-TV und PP-UV.

Table 14.2: controller setting for experiments of chapter 5.2.

14.3 Maschineneinstellungen

Im Folgenden sind die Einstellungen der Spritzgießversuche aufgeführt. Die Wasservorlauftemperatur wird am Temperierer des Werkzeugs eingestellt. Die Vorgabe der Zylindertemperatur erfolgt über die Maschinensteuerung. Der Eingriff des externen Reglers auf die Spritzgießmaschine beschränkt sich auf die Einspritzphase im Maschinenablauf. Am Ende der Regeldauer wird durch die externe Regelung auf die Nachdruckphase der Spritzgießmaschine umgeschaltet. Dort erfolgt ein Druckabbau im Spritzaggregat über 1 s, bevor der Dosierprozess und damit der Standard-Prozessablauf fortgesetzt wird. Der maximale Einspritzvolumenstrom resultiert aus einer Begrenzung der Steuerspannung (s. Kapitel 4). Die Referenz für den Werkzeuginnendruck und die Nachdruckdauer werden ebenfalls in der externen Regelung eingestellt.

Kapitel 5.2: Kompressionsphase

Parameter	**Wert**	**Einheit**
Wasservorlauftemperatur	45	°C
Zylindertemperatur	240	°C
Max. Einspritzvolumenstrom	40/25 (VP/P)	cm³/s
Werkzeuginnendruck	150/200 (VP/P)	bar
Nachdruckzeit	8/6 (VP/P)	s

Tabelle 14.3: Maschineneinstellgrößen zu den Versuchen aus Kapitel 5.2.

Table 14.3: machine setting for experiments of chapter 5.2.

Kapitel 5.3: Werkzeuginnendruck vs Nachdruckzeit

Parameter	**Wert**	**Einheit**
Wasservorlauftemperatur	40	°C
Zylindertemperatur	230	°C
Max. Einspritzvolumenstrom	40	cm³/s

Tabelle 14.4: Maschineneinstellgrößen zu den Versuchen aus Kapitel 5.3.

Table 14.4: machine setting for experiments of chapter 5.3.

Kapitel 5.3: Werkzeuginnendruckgradient

Parameter	Wert	Einheit
Wasservorlauftemperatur	45	°C
Zylindertemperatur	240	°C
Max. Einspritzvolumenstrom	40/25 (VP/P)	cm³/s
Werkzeuginnendruck	variabel	bar
Nachdruckzeit	8/6 (VP/P)	s

Tabelle 14.5: Maschineneinstellgrößen zu den Versuchen aus Kapitel 5.3.

Table 14.5: machine setting for experiments of chapter 5.3.

Kapitel 7.4: Materialschwankungen

Parameter	Wert	Einheit
Wasservorlauftemperatur	40	°C
Zylindertemperatur	220	°C
Max. Einspritzvolumenstrom	40/30 (VP/P)	cm³/s
Werkzeuginnendruck	150/300 (VP/P)	bar
Nachdruckzeit	8/5,6 (VP/P)	s

Tabelle 14.6: Maschineneinstellgrößen zu den Versuchen aus Kapitel 7.4.

Table 14.6: machine setting for experiments of chapter 7.4.

Kapitel 8.1: Störgrößenausgleich ohne Prozessinformationen

Parameter	Wert	Einheit
Wasservorlauftemperatur	40	°C
Zylindertemperatur	230	°C
Max. Einspritzvolumenstrom	22	cm³/s
Werkzeuginnendruck (konstant)	130	bar
Nachdruckzeit	6	s

Tabelle 14.7: Maschineneinstellgrößen zu den Versuchen aus Kapitel 8.1.

Table 14.7: machine setting for experiments of chapter 8.1.

14.4 Automatisierte Auswertung von Prozessgrößenverläufen

Zur Auswertung der Prozessgrößenverläufe wurde die Matlab-App „InjectiX“ entwickelt. Damit können die Prozesskennzahlen sowohl offline, als auch inline nach jedem Zyklus berechnet werden.

Konfiguration

Die Konfiguration von InjectiX beginnt mit der Eingabe von Kavitäts- und Dekompressionsvolumen nach dem Dosieren sowie der eingesetzten Sensorik. Neben den Prozessgrößenverläufen aus der Maschine sind bis zu zwei Werkzeuginnendruckverläufe und ein Temperaturverlauf auswertbar. Eine Erweiterung um weitere Prozessgrößenverläufe, wie dem Drehmoment während des Dosiervorgangs, ist möglich.

Der Übergang zwischen Einspritz- und Nachdruckphase ist bei der phasenübergreifenden Prozessführung fließend und nicht eindeutig über die Maschineneinstellung definiert. Daher wird standardmäßig ein Schwellwert für den Einspritzvolumenstrom abgefragt, der den Übergang zwischen den Prozessphasen als Berechnungsgrundlage festlegt.

In InjectiX steht eine detaillierte Anzeige aller Prozessgrößenverläufe zur Verfügung, sodass Ausreißer in den Datensätzen erkannt werden können. Diese Überprüfung ist für alle Datensätze erforderlich, da bei einer Reduktion der Kurvenverläufe auf einzelne Kennzahlen die spezifischen Besonderheiten nicht immer erkennbar sind.

Import und Export von Daten

Während der Produktion werden die Prozessgrößenverläufe und die zyklusbezogenen Prozessdaten über LabVIEW am Ende jedes Spritzgießzyklus in einer separaten Datei gespeichert. Diese Dateien können unverarbeitet bei InjectiX eingelesen werden. Der Import der Datenreihen sowie der Export der Ergebnisse wird als Massenoperation auf den Formaten *.xlsx oder *.csv unterstützt. Zusätzlich besteht die Option zur direkten Anbindung an eine SQL-Datenbank, sodass die generierten Prozesskennzahlen gemeinsam mit den zyklusbezogenen Prozessdaten in einer SQL-Datenbank gespeichert werden. Dadurch wird eine strukturierte Archivierung von Versuchsdaten gewährleistet.

Funktionsüberprüfung der Berechnungsalgorithmen

Die Prozessgrößenverläufe weisen für verschiedene Spritzgießprozesse unterschiedliche Verläufe und Charakteristika auf. Dies kann dazu führen, dass die Charakteristika der Kurvenverläufe durch die Mustererkennung nicht eindeutig erkannt

werden. Daher können über Start- und Endwerte, sowie Schwellwerte die Algorithmen der Suchmethoden angepasst werden, um eine große Bandbreite verschiedener Prozessgrößenverläufe auszuwerten.

Minima und Maxima sowie deren Zeitpunkte können ohne die Vorgabe von Randbedingungen aus Prozessgrößenverläufen bestimmt werden. Demgegenüber stellt die Berechnung von Gradienten, Teilintegralen und Knickpunkten eine Herausforderung dar, da die Prozessgrößenverläufe für verschiedene Spritzgießprozesse stark unterschiedlich sein können. Alle Kurvenverläufe werden durch die Prozesseinstellungen, das verwendete Material und die Bauteilgeometrie beeinflusst. Daher werden Indikatoren eingesetzt, um die Funktionsweise der Algorithmen zu überprüfen, siehe Bild 14.1.

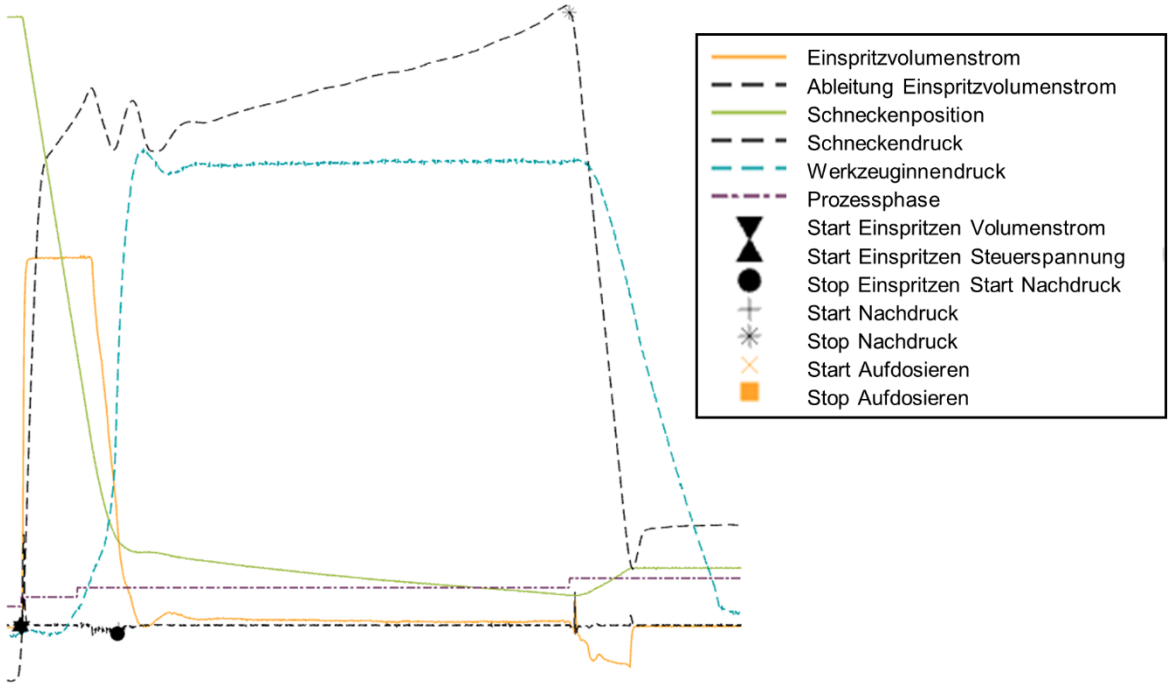

Bild 14.1: Indikatoren ermöglichen eine Überprüfung der Berechnungsalgorithmen.

Fig. 14.1: Indicators allow verification of the algorithms.

Die Indikatoren müssen für jeden Prozess auf Plausibilität überprüft werden, der mit InjectiX ausgewertet werden soll. Bisher konnten alle Datensätze einer Versuchsreihe mit derselben Konfiguration ausgewertet werden, sodass die Überprüfung nur einmalig zu Beginn der Auswertung erforderlich ist. Die Randbedingungen der Indikatoren sind in der Konfiguration direkt hinterlegt, sodass eine schnelle Anpassung für neue Prozesse möglich ist.

14.5 Schmidt-Koeffizienten zur Modellierung des pvT-Verhaltens

Koeffizient	Einheit	Schmidt-Koeffizienten
Feststoffbereich		
PF1	bar·cm³/g	34427
PF2	bar·cm³/g·°C	0,0910
PF3	bar	145,99
PF4	bar	31685
PF5	cm³/g	$1{,}6947*10^{-3}$
PF6	1/°C	0,0323
PF7	1/bar	$1{,}1133*10^{-3}$
Übergangsbereich		
PK1	°C	134,65
PK2	°C/bar	0,0275
Schmelzebereich		
PS1	bar·cm³/g	29072
PS2	bar·cm³/g·°C	1,1319
PS3	bar	1082,3
PS4	bar	25852

Tabelle 14.8: pvT-Koeffizienten für das Material Moplen QCP300R aus Kapitel 5.4.

Table 14.8: pvT-coefficients for the material Moplen QCP300R from chapter 5.4.