

eingereicht/handed in: 11.12.2021
angenommen/accepted: 11.02.2021

Katharina Hornberg, M. Sc.¹, Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann¹, Marko Vukovic, M. Sc.², Dr.-Ing. Sebastian Stemmler², Prof. Dr.-Ing. Dirk Abel²

¹Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) an der RWTH Aachen University,

²Institut für Regelungstechnik (IRT) der RWTH Aachen University

Auswirkungen zyklischer Prozess-einflüsse auf den Werkzeuginnendruckverlauf und die Bauteilqualität im Spritzgießprozess

Die Prozessstabilität beim Spritzgießen wird durch Störeinflüsse negativ beeinflusst. Eine adaptive, phasenvereinende Prozessführungsstrategie, welche den Sollwert-verlauf für eine unterlagerte Werkzeuginnendruckregelung vorgibt, soll eine konstante Bauteilqualität ermöglichen. Die Einflüsse zyklischer Veränderungen werden durch die Auswertung der Prozessgrößenverläufe und des Bauteilgewichts während des Anfahrprozesses für verschiedene Regelungskonzepte untersucht. Abschließend wird bewertet, ob die untersuchten Prozessgrößen für die Prozessführung relevant sind und daher zyklische Anpassungen der Werkzeuginnendruckreferenz notwendig sind.

Effects of cyclical process influences on the cavity pressure curve and part quality in the injection moulding process

The process stability of injection moulding is negatively influenced by disturbing influences. An adaptive, close-phase process control strategy, which defines the reference curve for a subordinate cavity pressure control, should enable constant part quality. The influences of the cyclical changes are analysed for different control strategies by evaluating the process variable curves and the part weight during the start-up process. Up on that, it is evaluated whether the examined process variables are relevant for process control and therefore cyclical adjustments of the cavity pressure reference are necessary.

Auswirkungen zyklischer Prozesseinflüsse auf den Werkzeuginnendruckverlauf und die Bauteilqualität im Spritzgießprozess

K. Hornberg, M. Vukovic, S. Stemmler, Ch. Hopmann, D. Abel

1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Im Spritzgießverfahren werden technische Kunststoffbauteile hergestellt, an die hohe Qualitätsanforderungen gestellt werden. Die Bauteilqualität wird dabei stark von den Prozessbedingungen beeinflusst, die sich anhand der Maschinen-einstellungen ausbilden [1]. Zusätzlich beeinflussen Störeinflüsse die Bauteilqualität. In Folge dessen resultieren trotz konstanter Maschineneinstell-größen unterschiedliche Qualitätskriterien am Spritzgießbauteil.

Zu den Störeinflüssen zählen unter anderem Veränderungen der Umgebungsbedingungen (Lufttemperatur, Luftfeuchte, Staubgehalt) sowie des Maschinenverhaltens durch Verschleiß [2-4]. Diese Einflüsse können sich zyklusübergreifend auf den Spritzgießprozess auswirken und zu einer langfristigen Verschiebung des Mittelwertes der Qualitätsmerkmale führen [5]. Zusätzlich können kurzfristige Trendveränderungen durch ein nicht reproduzierbares Schließverhalten der Rückstromsperre [5, 6] oder chargenabhängige Materialschwankungen (Viskosität, Zusammensetzung, Verschmutzung, Feuchtigkeit) [3-4, 7] auftreten.

Das Ziel der Untersuchung von prozesseitigen Veränderungen während der Bauteilproduktion ist die Quantifizierung des Einflusses der zyklusübergreifenden Störeinflüsse auf den Spritzgießprozess. Der Fokus liegt hierbei auf dem Produktionsanlauf, da hier die stärksten Veränderungen auftreten. Dadurch können phasenübergreifend Informationen über den Prozess ermittelt werden, zu denen beispielsweise die Prozessgrößenverläufe des Werkzeuginnendruckes sowie der Werkzeugtemperatur zählen.

Die ermittelten Informationen können anschließend zum Ausgleich auftretender Störeinflüsse genutzt werden. Dazu soll ein neues Prozessführungskonzept auf Basis einer modellbasierten, prädiktiven Regelung eingesetzt werden, welches den gesamten Einspritzprozess, bestehend aus Einspritz- und Nachdruckphase, über eine Vorgabe des Werkzeuginnendruckverlaufs regelt. Die auftretenden zyklischen Veränderungen werden bei der Bildung der Referenztrajektorie für den Werkzeuginnendruck zyklusweise berücksichtigt. Mithilfe dieses adaptiven Prozessführungskonzepts soll die Sicherstellung einer gleichbleibenden Bauteilqualität ermöglicht werden, auch wenn Störeinflüsse während der Produktion zu Veränderungen der Prozessbedingungen führen. Zusätzlich erfolgt eine Bewertung des Potentials dieses Konzepts, indem

Prozesseinrichtung und Regelgüte mit konventionellen Regelungsstrategien verglichen werden.

2 STAND DER TECHNIK

Störeinflüsse verändern die Prozessbedingungen im Spritzgießprozess kontinuierlich. Daher ist bei Produktionsstart bzw. Produktwechsel oftmals ein iteratives Vorgehen zum Auffinden eines geeigneten Prozesspunktes auf Basis der bereits ermittelten Prozesseinstellungen aus vorherigen Produktionsreihen notwendig. Durch das manuelle Vorgehen ist die Prozesseinrichtung fehleranfällig und abhängig von der Erfahrung des Einrichters [8].

Der Umschaltvorgang zwischen Einspritzphase und Nachdruckphase ist dabei besonders kritisch, da der Wechsel zwischen den Regelgrößen Schneckengeschwindigkeit und Schneckendruck zu Nichtlinearitäten im Prozessverhalten führt. Der optimale Umschaltzeitpunkt für einen angestrebten stetigen Druckverlauf variiert während der Produktion, sodass Qualitätseinbußen aufgrund eines falschen Umschaltzeitpunktes auftreten können [2, 7, 8]. Die Prozessgrößen werden dabei ebenfalls durch das verwendete Umschalverfahren beeinflusst, sodass bei einem Wechsel des Umschalverfahrens eine erneute Prozesseinrichtung notwendig ist [9]. In Bild 1 ist der Werkzeuginnendruckverlauf für verschiedene Umschaltzeitpunkte (USP) skizziert.

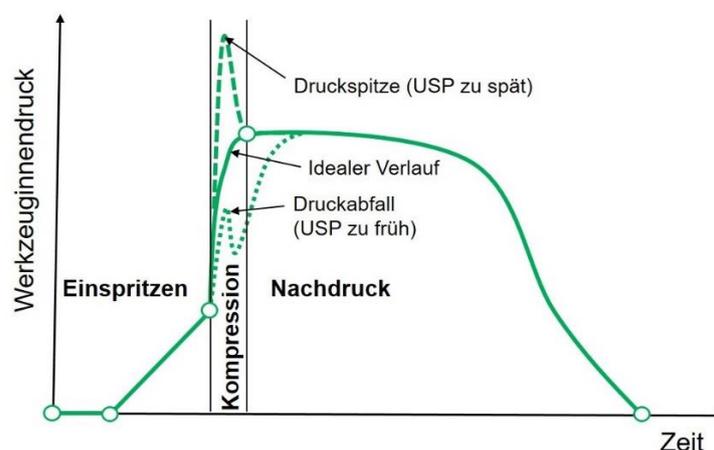


Bild 1: Schematische Darstellung des Werkzeuginnendruckverlaufs eines teilkristallinen Thermoplasten für verschiedene Umschaltzeitpunkte

Erfolgt das Umschalten zu früh, kann die Fließfront einfrieren und das Bauteil nicht vollständig gefüllt werden, was anhand eines Druckeinbruchs im Werkzeuginnendruckverlauf erkennbar ist, siehe Bild 1, gepunktet. Es entstehen Einfallstellen, Bindenähte und Umschaltmarkierungen am Bauteil. Falls der Umschaltvorgang zu spät erfolgt, ergeben sich Druckspitzen in der Kavität, da zu viel Schmelze in die Kavität eingespritzt wird, siehe Bild 1, gestrichelt. Dies kann zu Werkzeugschäden führen. Die Bauteile weisen

Spritzgrate sowie höhere Eigenspannungen und Orientierungen auf [10]. All diese Bauteildefekte führen häufig zu Ausschuss, da die hohen Qualitätsanforderungen des Kunden nicht eingehalten werden. Bislang existiert keine Umschaltstrategie, die langfristig zufriedenstellende Ergebnisse ohne eine Adaption des Prozesses gewährleistet [8].

Die Bauteilqualität wird also durch die Prozessführung stark beeinflusst. Zur Erhöhung der Reproduzierbarkeit wurden Regelungskonzepte anhand von Prozessgrößen für die Einspritzphase [11] und die Nachdruckphase [5, 12-20] entwickelt. Insbesondere die Regelung des Werkzeuginnendruckes zeigt vielversprechende Ergebnisse hinsichtlich einer guten Reproduzierbarkeit. Online Regelungen, die eine optimierte Prozessführung in der Nachdruckphase ermöglichen, wurden stetig weiterentwickelt und berücksichtigen das pVT-Verhalten des verwendeten Materials bei der Bildung der Referenztrajektorie für den Werkzeuginnendruck [21-25]. Die dabei eingesetzte modellbasierte prädiktive Regelung (MPR) prädiziert das zukünftige Prozessverhalten anhand eines dynamischen Prozessmodells, wodurch eine hohe Regelgüte erreicht wird. Als einzige Regelgröße wird der Werkzeuginnendruck verwendet. Eine Anpassung der Einspritzgeschwindigkeit kann durch die Vorgabe des Werkzeuginnendruckverlaufs ebenfalls erfolgen [26]. Das verwendete Prädiktionsmodell zur Vorhersage des Werkzeuginnendruckes wurde ausschließlich anhand empirischer Daten aufgestellt, sodass das Prozessverständnis nur begrenzt zur Prozessregelung eingesetzt wird. Es existieren demnach keine methodischen Ansätze, welche eine ganzheitliche Prozessführung des Spritzgießprozesses unter Berücksichtigung von Prozesswissen zur Generierung einer Referenz für den Werkzeuginnendruck ermöglichen.

Zur ganzheitlichen Prozessregelung von Einspritz- und Nachdruckphase wird daher ein Prozessführungskonzept entwickelt, welches phasenübergreifende Informationen aus Einspritzphase und Nachdruckphase nutzt, um eine phasenvereinende Prozessführung des gesamten Füllvorgangs der Kavität zu realisieren. Ziel ist es, die Reproduzierbarkeit der Produktion qualitativ hochwertiger Funktionsteile zu erhöhen und gleichzeitig den Einstellungsaufwand anhand eines adaptiven Konzeptes zu verringern, indem wenige intuitive Parameter zur Prozesseinrichtung genutzt werden. Die gesamte Prozessregelung erfolgt über den Werkzeuginnendruck, sodass der Füllvorgang nicht in einzelne Prozessphasen unterteilt wird. Für eine detaillierte Vorstellung der MPR sei auf [27-29] verwiesen.

3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

Die Regelgüte einer modellbasierten prädiktiven Regelung wird durch das eingesetzte Modell maßgeblich beeinflusst. Die physikalischen Zusammenhänge des verwendeten Modells zur Werkzeuginnendruckregelung sind für die Reproduzierbarkeit der Regelgröße hinsichtlich einer gewünschten

Referenztrajektorie verantwortlich [29]. Neben der reproduzierbaren Realisierung eines gewünschten Werkzeuginnendruckverlaufs ist der Verlauf selbst für die entstehende Bauteilqualität entscheidend, da er die Qualität direkt beeinflusst.

Eine Herausforderung der Bauteilproduktion ist, dass die Prozessgrößen und die daraus resultierenden Bauteileigenschaften von den aktuellen Prozessbedingungen beeinflusst werden. Folglich ist eine fortwährende Anpassung der Referenztrajektorie an die Störeinflüsse notwendig, um dieselben Bauteileigenschaften zu erhalten. Durch eine Betrachtung der phasen- und zyklusübergreifenden Korrelationen zwischen den Prozessgrößen (insbesondere des Werkzeuginnendrucks) und der Bauteilqualität sollen notwendige Anpassungen der Referenztrajektorie abgeleitet werden.

In den experimentellen Untersuchungen werden zyklusübergreifende Einflüsse von Prozessgrößen auf die Bauteilqualität als Qualitätsgröße untersucht, sodass der Anpassungsbedarf der Referenztrajektorie bei prozesseitigen Veränderungen identifiziert wird. Dazu werden Maschinengrößen, Prozessgrößen und das Bauteilgewicht während des Anfahrprozesses aufgezeichnet und statistisch ausgewertet. Das Ziel der Versuchsreihe ist die Quantifizierung der Effekte des aktuellen Produktionszyklus auf die nachfolgenden Zyklen, sodass die Einflussgrößen zwischen den einzelnen Produktionszyklen identifiziert werden können. Weiterhin werden wichtige phasenübergreifende Prozessgrößen identifiziert, die einen direkten Zusammenhang zur Bauteilqualität aufweisen. Dies ermöglicht im Anschluss die Formulierung von Anforderungen an den Werkzeuginnendruckregler und die Referenztrajektorie, welche bei der Entwicklung des Prozessführungskonzepts berücksichtigt werden müssen.

Die experimentellen Untersuchungen werden neben der MPR auch mit einer Werkzeuginnendruckregelung mit einem PID-Regler durchgeführt sowie mit der konventionellen Maschinenregelung, welche in der Einspritzphase die Schneckengeschwindigkeit regelt und nach einem Umschaltvorgang den Schneckendruck in der Nachdruckphase. Dadurch kann das mögliche Potential des modellbasierten Regelungsansatzes bewertet werden.

In Kapitel 3.1 wird der Versuchsaufbau beschrieben, und die aufgezeichneten Maschinen- und Prozessgrößen(-verläufe) werden vorgestellt. In Kapitel 3.2 folgt die Beschreibung der Versuchsdurchführung. Abschließend wird die Methodik zur Bewertung der Bauteilqualität vorgestellt sowie eine Übersicht der betrachteten Prozessgrößen in Kapitel 3.3 gegeben.

3.1 Versuchsaufbau

Die Spritzgießversuche werden an einer Spritzgießmaschine vom Typ 520A 1500 ALLDRIVE mit 400er Spritzeinheit mit einem Schneckendurchmesser von 35 mm und einer Nadelverschlussdüse des Herstellers Arburg GmbH & Co. KG, Loßburg, Deutschland, durchgeführt. Die verbauten Servoumrichter

AMKASYN KW sind von der Firma AMK, Arnold Müller GmbH & Co. KG, Kirchheim unter Teck, und ermöglichen durch Freischaltung eine Vorgabe externer Spannungssignale zur Steuerung der Schneckengeschwindigkeit, sodass eine direkte Regelung des Schneckenvorschubs möglich ist. Die Werkzeuginnen-druckregelung erfolgt sowohl mit einer MPR, als auch mit einem PID-Regler. Sie werden in MATLAB/Simulink, MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, implementiert und über C Code-Generierung in LabVIEW 2014 des Herstellers National Instruments (NI), Austin, Texas eingebunden [28]. Die Regelung erfolgt in Echtzeit mit einer Abtastrate von 2 ms über den Real Time Controller „NI PXI-8108“ mit dem FPGA-Modul „NI PXI-782R“ desselben Herstellers.

Als Kunststoff wird ein Polypropylen (PP) vom Typ PP579 S der Firma Sabic Deutschland GmbH & Co. KG, Düsseldorf verwendet. Das Spritzgießbauteil „Zentrierrippe“ weist Aussparungen, Laschen, Rippenstrukturen und Dome auf, sodass die Geometrie deutlich komplexer gegenüber vorherigen Untersuchungen des Prozessführungskonzepts ist [27-29], siehe Bild 2. Es wird über einen Stangenanguss zentral gefüllt und hat ein Volumen von 49,7 cm³ (inklusive Anguss) bei einer mittleren Wanddicke von ca. 2 mm.

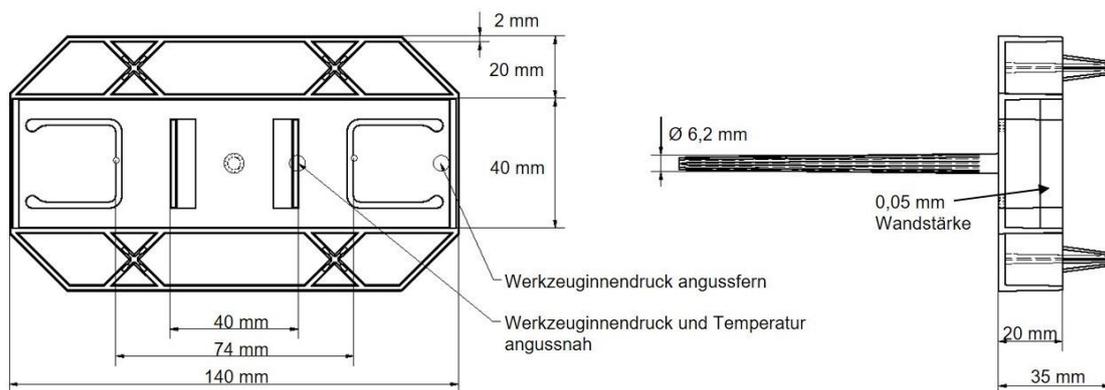


Bild 2: Bauteilabmessungen und Sensorpositionen für das Spritzgießbauteil „Zentrierrippe“

Die Werkzeuginnendruck- und Temperatursensoren der Typen 6157A und 6190CA der Firma Kistler Instrumente GmbH, Winterthur, Schweiz, sind an einer angussnahen sowie angussfernen Position im Spritzgießwerkzeug verbaut. Der angussnahe Werkzeuginnendrucksensor wird zur Prozessregelung eingesetzt, sodass diese bereits bei geringer Kavitätsfüllung erfolgen kann. Zusätzlich ist durch die angussnahe Positionierung ein besonders langer Eingriff in den Prozess möglich, da das Bauteil in Angussnähe zuletzt erstarrt.

In Tabelle 1 sind die Werte der wichtigsten Einstellgrößen aufgelistet.

Einstellparameter	$T_{\text{Zyl.}}$ [°C]	T_{W} [°C]	V_{dos} [cm ³]	V_{ein} [cm ³ /s]	V_{um} [cm ³]	$p_{\text{S}}; p_{\text{Wkz.}}$ [bar]
$p_{\text{Schnecke, konv.}}$	230	40	70	50	16,5	250
$p_{\text{Werkzeug, PID/MPC}}$	230	40	70	50	-	125

Tabelle 1: Maschineneinstellungen der Spritzgießversuche für Schneckendruckregelung ($p_{\text{Schnecke, konv.}}$) und Werkzeuginnendruckregelung ($p_{\text{Werkzeug, PID/MPC}}$)

Abkürzungen: $T_{\text{Zyl.}}$: Zylindertemperatur; T_{W} : Werkzeugtemperatur; V_{dos} : Dosiervolumen; V_{ein} : Einspritzvolumenstrom; V_{um} : Umschaltvolumen; $P_{\text{S;Wkz.}}$: max. Schneckendruck bzw. Werkzeuginnendruck

Für die beiden Werkzeuginnendruckregelungen wurden die korrelierenden Spannungen zur Steuerung der Schneckengeschwindigkeit und proportionalen Werkzeuginnendrucke zu den Versuchseinstellungen der Schneckendruckregelung bestimmt, sodass die Spritzgießbauteile ähnliche Bauteileigenschaften aufweisen. Die Schneckenspannung beträgt -2,34 V für einen Einspritzvolumenstrom von 50 cm³/s und der Werkzeuginnendruck 125 bar für einen Schneckendruck von 250 bar.

3.2 Versuchsdurchführung

Zur Bestimmung zyklusübergreifender Einflüsse auf den Spritzgießprozess wurden Spritzgießversuche mit den drei vorgestellten Regelungskonzepten durchgeführt. Somit kann ebenfalls eine Bewertung der MPR erfolgen. Die drei Versuchsreihen wurden an aufeinanderfolgenden Versuchstagen durchgeführt, sodass innerhalb der Versuchsreihen möglichst gleiche Versuchsbedingungen gewährleistet waren.

Damit optimierte Prozesseinstellungen für Umschaltzeitpunkt und Reglerparameter bereits am Beginn des Versuchstages eingestellt werden konnten, wurden die Parameter im Vorfeld ermittelt. Der Umschaltzeitpunkt wurde bei der konventionellen Maschinenregelung in einer Füllstudie bestimmt, sodass ein stetiger Übergang zwischen Einspritzphase und Nachdruckphase im Verlauf von Schneckenposition und Werkzeuginnendruck erkennbar war. Die Parameter der Werkzeuginnendruckregelungen wurden iterativ angepasst. Der Einrichtungs-aufwand dieser Regelungskonzepte wird in Kapitel 4.1 detaillierter beschrieben.

Zu Beginn eines Versuchstages erfolgte der Aufheizvorgang von Maschine und Werkzeug für 60 Minuten vor Produktionsstart. Nach dem Start des Produktionsbetriebs wurden jeweils die ersten 50 Bauteile entnommen und die Prozessdaten aufgezeichnet. Die ausgewerteten Prozessgrößen und Prozessgrößenverläufe sind unter anderem das eingespritzte Volumen, die Dosierzeit und der Werkzeuginnendruckverlauf.

3.3 Bewertung der Bauteilqualität

Als Methodik zur Bewertung der Bauteilqualität wurden die Spritzgießbauteile gewogen. Das Bauteilgewicht gilt als wichtiger Indikator für die Prozessstabilität, da sich Prozessschwankungen direkt auf das Bauteilgewicht auswirken [2]. Zur Gewichtsermittlung wurde die Präzisionswaage „LA620 S“ der Firma Sartorius AG, Göttingen mit einer Genauigkeit von 1 mg verwendet.

4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Die Versuchsergebnisse werden zunächst hinsichtlich einer Gegenüberstellung der verwendeten Regelungskonzepte ausgewertet. Dazu wird in Kapitel 4.1 der Aufwand der Prozesseinrichtung diskutiert, welcher sich aus dem verwendeten Regelungskonzept ergibt. Im nächsten Schritt erfolgt eine Bewertung des Einflusses der Güte der Regelungskonzepte auf die Qualität der Spritzgießbauteile in Kapitel 4.2.

Die Auswertung der zyklusübergreifenden Einflüsse folgt in Kapitel 4.3 mit einer Auswertung des Bauteilgewichts und der Prozessgrößen während des Anfahrprozesses. Eine abschließende Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse folgt in Kapitel 4.4.

4.1 Auswirkung des Regelungskonzepts auf den Aufwand der Prozesseinrichtung

Das verwendete Regelungskonzept beeinflusst den Aufwand der Prozesseinrichtung maßgeblich. Dieser wird im Folgenden für die Maschinenregelung sowie die Werkzeuginnendruckregelung mit PID-Regelung und MPR für die durchgeführten Spritzgießversuche verglichen. Die einzustellenden Parameter sind in Bild 3 aufgezeigt und werden im Folgenden genauer erläutert.

<u>Maschinenregelung</u>	<u>Werkzeuginnendruckregelung</u>	
	PID-Regler	MPR
Maschineneinstellgrößen <ul style="list-style-type: none"> • Umschaltpunkt* • Einspritzgeschwindigkeit • Nachdruckhöhe • ... 	Einstellgrößen <ul style="list-style-type: none"> • Werkzeuginnendruckreferenz • Stellgrößenbegrenzung¹ Regelparameter* <ul style="list-style-type: none"> • K_i • K_p • K_d 	Einstellgrößen <ul style="list-style-type: none"> • Werkzeuginnendruckreferenz • Stellgrößenbegrenzung¹ Modellparameter für den Antrieb Model-Tuning-Parameter Störgrößenkovarianz
*: Größen müssen bei Veränderungen von Prozesseinstellungen oder der Umgebungsbedingungen für einen stetigen Druckverlauf angepasst werden 1: entspricht der Einspritzgeschwindigkeit		

Bild 3: Übersicht der Parameter zur Prozesseinrichtung in Abhängigkeit vom verwendeten Regelungskonzept vor und während der Bauteilproduktion

Die Präzision der Maschinenregelung von Einspritzgeschwindigkeit und Schneckendruck hat in beiden Prozessphasen bereits ein sehr hohes Niveau der Regelgüte erreicht. Die Regelparameter sind in der maschineninternen Steuerung hinterlegt und für den Maschinenbediener nicht veränderbar. Die konventionelle Prozessführung benötigt daher keinen zusätzlichen Einrichtungsaufwand des Reglers. Jedoch werden bei diesem Ansatz nicht die Größen am Ort der Bauteilentstehung eingestellt. Entsprechend wird Wissen benötigt, um die Maschineneinstellgrößen optimal einstellen zu können. Beispielsweise muss der Umschaltpunkt an den Prozess angepasst und iterativ bestimmt werden, damit der Übergang zwischen Einspritzphase und Nachdruckphase möglichst stetig ist [8]. Die Einstellung eines optimalen Umschaltpunkts benötigt gute Prozesskenntnis und Anpassungen während des Prozesses, falls Störeinflüsse den Spritzgießprozess stark beeinflussen.

Der Vorteil der Werkzeuginnendruckregelungen ist, dass sich ein phasenvereinendes Konzept ergibt, sodass kein Umschaltpunkt existiert und somit bei richtiger Reglereinstellung ein stetiger Druckverlauf im Werkzeug gewährleistet ist. Die Reglerparameter müssen in Abhängigkeit vom verwendeten Reglerkonzept eingestellt werden.

Bei der Nutzung eines PID-Reglers zur Werkzeuginnendruckregelung ist eine Anpassung der Parameter K_p , K_i und K_d für jede Veränderung von Einspritzgeschwindigkeit und Werkzeuginnendruckhöhe notwendig. Gütekriterien bei der Prozesseinstellung sind ein schnelles Erreichen der Referenz, ein geringer Offset zwischen Istwert und Sollwert sowie ein möglichst konstantes Druckniveau ohne Schwingen und Überschwingen während des Schwindungsausgleichs.

Zur Bestimmung der PID-Reglerparameter wird zunächst der Wert K_p des Reglers betragsmäßig zyklusweise erhöht, bis der Istwert des Werkzeuginnendrucks den Sollwert gerade erreicht. Anschließend wird K_p für den nächsten Zyklus um $-0,002$ V/bar verringert und K_i solange zyklusweise erhöht, bis der Werkzeuginnendruck die Referenz ohne Überschwingen erreicht. Abschließend erfolgt ein iteratives Anpassen der beiden Regleranteile nach Erfahrungswerten, bis der resultierende Druckverlauf während des stationären Zustandes die Referenz möglichst gut nachbildet. Eine Zunahme von K_d (Werte $\neq 0$) führt zu einer Verschlechterung der Reglerperformance.

Die Parameter für die hier beschriebenen Spritzgießversuche wurden mit dieser Methodik zu $K_p = -0,011$ V/bar, $K_i = -0,0003$ V/bar*s und $K_d = 0$ bestimmt. Die Dauer der Prozesseinrichtung ist abhängig vom Erfahrungswissen des Einrichters und kann je nach Zykluszeit bis zu mehreren Stunden pro Versuchseinstellung dauern. Bei einer Änderung von Spritzgießmaschine, Material oder Prozesspunkt muss die Bestimmung der Reglerparameter erneut durchgeführt werden.

Die MPR benötigt keine Anpassungen des Reglers, solange Maschine, Material und Werkzeug unverändert sind. Bei Wechsel der Spritzgießmaschine wird ein Sprungversuch durchgeführt, indem ein konstantes Spannungssignal vorgegeben wird. Die Reaktionsfähigkeit der Maschine und das Verhalten des Antriebes werden aufgezeichnet. Anschließend werden die Modellparameter für die Antriebsstrangdynamik identifiziert und in einem Teilmodell maschinenspezifisch berücksichtigt. Bei einem Wechsel des Materials werden die Materialkennwerte wie Schmelzekompressibilität, Materialviskosität und Abkühlverhalten im Modell angepasst. Falls in der Produktion ein neues Werkzeug eingesetzt wird, muss das Füllmodell identifiziert werden. Dazu ist eine Anpassung der Parameter Schussgewicht und Wanddicke notwendig, sodass die Kavitätsfüllung und das Abkühlverhalten des Materials durch das Modell möglichst genau beschrieben werden. Sobald alle Model-Tuning-Parameter für den Prozess einmalig bestimmt wurden, kann der Regler bei beliebigen Prozesseinstellungen verwendet werden. Eine Feintuning ist über die Störgrößenkovarianz möglich.

Zusammenfassend ist die Prozesseinrichtung mit einem PID-Regler zur Werkzeuginnendruckregelung sehr aufwändig gegenüber den anderen Verfahren, da für Veränderungen des Prozesses oder der Prozesseinstellungen die Reglereinstellungen der drei Parameter K_p , K_i und K_d neu angepasst werden müssen. Zusätzlich besitzt der PID-Regler abstrakte Einstellgrößen, welche im Gegensatz zur MPR keinen physikalischen Bezug zum Spritzgießverfahren aufweisen. Bei der MPR sind deutlich seltener Anpassungen der Modellparameter notwendig, welche die grundlegenden Maschinen-, Material- und Bauteileigenschaften berücksichtigen und demnach einfach zu bestimmen sind. Somit ist ein Einsatz der modellprädiktiven Regelung in der Serienproduktion mit geringem Aufwand möglich und stellt eine vielversprechende Alternative zur konventionellen Schneckendruckregelung dar.

4.2 Einfluss des Regelungskonzeptes auf die erzielbare Bauteilqualität

Bei der konventionellen Prozessregelung über Einspritzgeschwindigkeit und Schneckendruck ergeben sich Einbußen in der Prozessstabilität durch den Umschaltvorgang gegenüber phasenübergreifenden Regelungskonzepten, welche bereits im Stand der Technik dargestellt wurden. Ein stetiger Werkzeuginnendruckverlauf, welcher für die Bauteilqualität entscheidend ist, kann mit dieser Methode jedoch zufriedenstellend eingerichtet werden, sofern keine Störungen oder Veränderungen des Prozesses auftreten.

Eine optimale Prozesseinstellung ohne Überschwingen des Werkzeuginnendrucks war für den vorgegebenen Prozesspunkt auch nach mehreren Iterationsschleifen der Parameteroptimierung mit einem PID-Regler nicht möglich, siehe Bild 4. Die Kavitätsfüllung in der Kompressionsphase wird nicht frühzeitig erkannt, sodass Druckspitzen auftreten, welche in Spritzgraten an den Bauteilen resultieren.

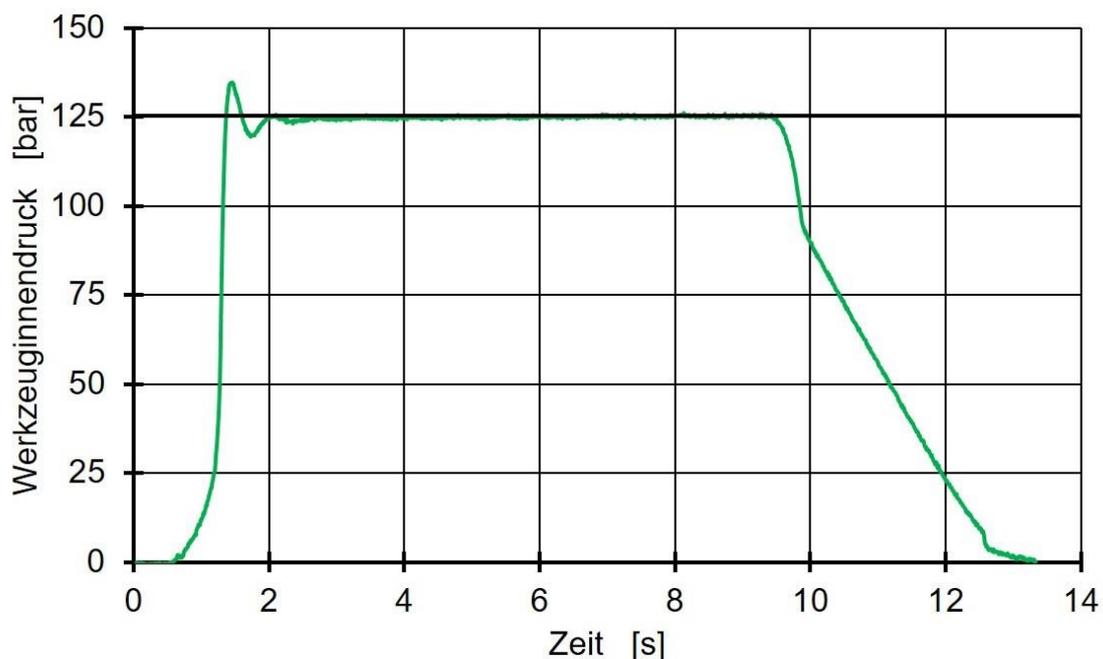


Bild 3: Werkzeuginnendruckverlauf bei PID-Werkzeuginnendruckregelung mit einer Druckreferenz von 125 bar und einem Einspritzvolumenstrom von 50 cm³/s

Ein Grund dafür ist, dass die Reglereinstellungen durch die vorgegebene Einspritzgeschwindigkeit limitiert sind. Die maximale Einspritzgeschwindigkeit v_{\max} ist proportional zu der maximalen Schneckenspannung U_{\max} , die sich näherungsweise über

$$U_{\max} \approx K_p * (p_{\text{soll}} - p_{\text{ist}})$$

bestimmen lässt und somit proportional abhängig von K_p ist. Somit muss der Wert für K_p groß gewählt werden, was jedoch zu einem sehr aggressiven Reglerverhalten führt. Dies bedeutet, dass der Regler sehr große Änderungen der Stellgröße (in diesem Fall des Einspritzvolumenstroms) vornehmen kann. Durch sein reaktives Verhalten erkennt der Regler jedoch zu spät, dass er seinen Referenzwert (den vorgegebenen Werkzeuginnendruck) bereits erreicht hat und verringert somit den Wert der Stellgröße erst spät. Die Folge ist, dass der Referenzwert überschritten wird und die Regelgröße somit zunächst überschwingt, bis ein konstantes Niveau erreicht wird. Eine Prozesseinrichtung ohne Überschwingen wird unmöglich.

Dies zeigt, dass der Versuchsraum mit einem PID-Regler durch die angestrebte Regelgüte hinsichtlich Einspritzgeschwindigkeit und maximalem Werkzeuginnendruck stark eingeschränkt ist, sodass keine beliebigen Versuchseinstellungen mit hoher Prozessgüte möglich sind. Die Unstetigkeit des Prozesses wird nicht beseitigt, sodass einfache Regelkonzepte für den Spritzgießprozess aufgrund seiner hohen Dynamik nicht geeignet sind.

Die MPR hat demgegenüber den Vorteil des prädiktiven Charakters und kann anhand des hinterlegten Modells die Kavitätsfüllung prädizieren, sodass die Einspritzgeschwindigkeit frühzeitig reduziert und somit ein Überschwingen des Werkzeuginnendrucks vermieden wird [27]. Die erzielbare Regelgüte des Werkzeuginnendrucks ist von der Qualität des Modells abhängig. Falls dieses zu ungenau ist, können dauerhafte Abweichungen oder Schwingungen auftreten. Zusätzlich ist die Vorgabe einer realistischen Referenztrajektorie entscheidend, welche durch die MPR realisiert werden kann. Ein robustes Tuning ist möglich, wenn ein Störgrößenbeobachter verwendet wird [29]. Das Feintuning des Reglers erfolgt, indem die Gewichtung der Berücksichtigung von Messdaten und hinterlegtem Modell festgelegt wird.

Eine hohe Reproduzierbarkeit eines vorgegebenen bzw. gewünschten Druckverlaufs ist jedoch nicht alleine entscheidend für das Qualitätsergebnis. Die vorgegebene Referenztrajektorie bestimmt die absoluten Werte der Qualitätsmerkmale wie Bauteilgewicht und Abmessungen. Daher ist neben einer hohen Reproduzierbarkeit, welche von der Reglergüte abhängig ist, auch die genaue Bestimmung einer optimalen Referenztrajektorie notwendig. In der nun folgenden Versuchsreihe wurde daher untersucht, welche zyklusübergreifenden Einflüsse im Spritzgießprozess auftreten und eine Anpassung der Referenztrajektorie notwendig machen.

4.3 Auswirkung zyklusübergreifender Einflüsse auf die Bauteilqualität

Der Spritzgießprozess wird kontinuierlich durch zyklusübergreifende Einflüsse beeinflusst. Die zyklischen Unterschiede von Prozessgrößen und Qualitätsgrößen treten während des Anfahrprozesses verstärkt auf. Daher wird in

diesem Kapitel eine Auswertung von Versuchsdaten des Anfahrprozesses zur Bewertung der Auswirkung zyklusübergreifender Einflüsse durchgeführt.

Bei der Versuchsauswertung und Interpretation werden die folgenden Aspekte betrachtet:

- Einfluss der Regelungsstrategie auf das Erreichen eines (quasi-)stationären Prozesses und die erzielbare Reproduzierbarkeit
- Analyse der Versuchspunkte, welche außerhalb des stationären Bereichs liegen:
 - Versuchsbeginn
 - Ausreißer
- Auffinden und Auswahl relevanter Prozessgrößen, die als Indikatoren für prozesseitige Veränderungen eingesetzt werden können oder direkt von Störeinflüssen beeinflusst werden
- Bewertung der Prozessgrößen hinsichtlich einer Notwendigkeit der Überwachung im stationären Betrieb zur Detektion zyklusübergreifender Veränderungen des Prozesses

4.3.1 Einfluss der Regelungsstrategie auf das Erreichen eines stationären Prozesses und die erzielbare Reproduzierbarkeit

Der Spritzgießprozess wird in Abhängigkeit von der verwendeten Regelungsstrategie unterschiedlich stark durch zyklische, prozesseitige Veränderungen beeinflusst. In Bild 5 ist das Bauteilgewicht der ersten 50 Zyklen bei Produktionsstart in Abhängigkeit von der Regelungsstrategie gezeigt. Die absolute Höhe des Bauteilgewichts ist aufgrund der unterschiedlichen Prozessführungen nicht vergleichbar, sodass hier keine Bewertung möglich ist.

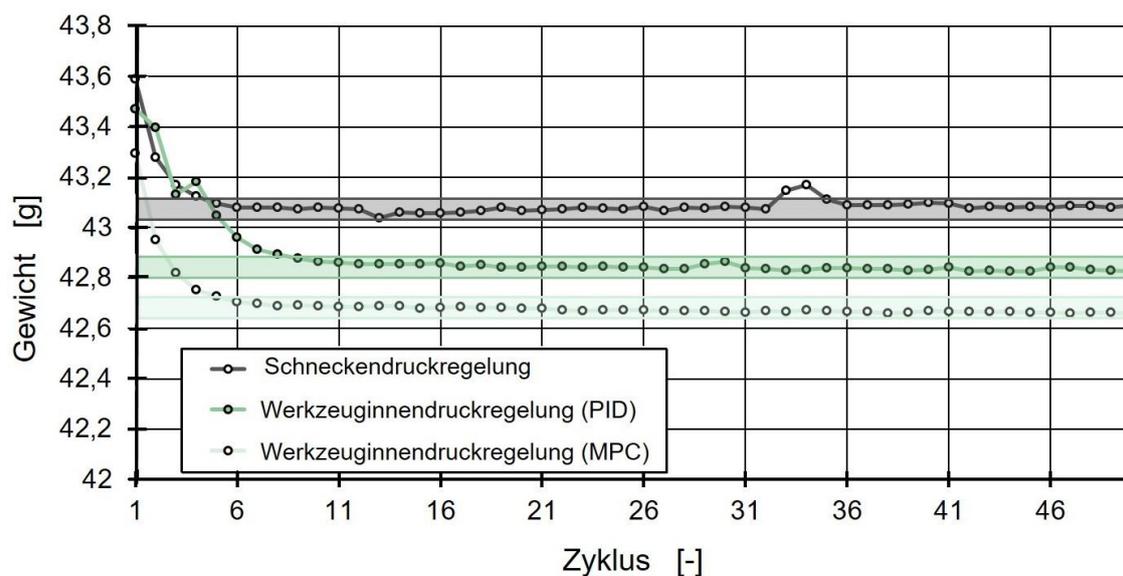


Bild 5: Bauteilgewicht für verschiedene Regelungskonzepte während des Anfahrprozesses (27 s Zykluszeit)

Der stationäre Zustand bei Produktionsstart wird meist erst nach mehreren Betriebsstunden erreicht. Das Erreichen eines quasistationären Zustandes erfolgt demgegenüber bereits nach wenigen Zyklen und wird über die eingezeichneten Toleranzbänder bestimmt.

Bei der Schneckendruckregelung wird der quasistationäre Zustand nach 5 Zyklen erreicht, bei der MPR nach 6 Zyklen. Der PID-Regler benötigt 10 Zyklen zum Erreichen des Toleranzbandes und hat somit den längsten Anfahrprozess. Die Berechnung der Gewichtsänderung innerhalb des Toleranzbandes erfolgt zur Quantifizierung der Veränderungen der Bauteilqualität während des quasistationären Zustandes. Die Abweichungen sind für die Schnecken-druckregelung mit 0,055 g größer als für die Werkzeuginnendruckregelungen mit einer maximalen Gewichtsveränderung von 0,039 g. Bei der MPC sind die Schwankungen des Bauteilgewichts am geringsten ausgeprägt, sodass das Bauteilgewicht während des Anfahrprozesses bei einer Gesamtbetrachtung die höchste Reproduzierbarkeit aufweist.

Für den PID-Regler und die MPC weist der quasistationäre Verlauf des Bauteilgewichts über die Zyklen eine fallende Tendenz auf, wohingegen das Bauteilgewicht bei Schneckendruckregelung leicht ansteigt. Diese Auffälligkeit kann dadurch erklärt werden, dass sich Werkzeugtemperatur und Schmelzetemperatur während des Anfahrprozesses bis zum thermischen Gleichgewichtszustand stetig erhöhen, sodass sich die Schmelze weiter ausdehnt und das spezifische Volumen des Materials ansteigt. Aufgrund der Temperaturerhöhung der Schmelze sinkt ebenfalls die Materialviskosität. Dieser Effekt überwiegt bei einer Regelung des Schneckendrucks, sodass das Bauteilgewicht für diese Führungsgröße ansteigt. Zusätzlich erhöht sich bei Schneckendruckregelung der Werkzeuginnendruck. Von Zyklus 15 zu Zyklus 50 steigt der maximale Werkzeuginnendruck von 138,9 bar auf 140,1 bar an. Aufgrund der gleichbleibenden Referenzvorgabe des Werkzeuginnendrucks fällt somit das Bauteilgewicht bei einer Prozessregelung über den Werkzeuginnen-druck.

4.3.2 Untersuchung der Prozessgrößen von Spritzgießzyklen mit auffälligem Bauteilgewicht (Ausreißer)

Die Prozessgrößen der Versuchspunkte, welche außerhalb des Toleranzbandes liegen, könnten Aufschluss auf eine Auswirkung zufällig auftretender Störeinflüsse geben. Daher werden die Prozessdaten der Versuchspunkte 33 und 34 bei Schneckendruckregelung mit den Prozessdaten der vorherigen und nachfolgenden Zyklen verglichen. Bei der Versuchsdurchführung sind Probleme beim Auswerfen der Bauteile aufgetreten, sodass ein kurzer Produktionsstopp zum Entfernen der Spritzgießbauteile 32 und 33 notwendig war.

Die Auswirkung des Maschinenstopps auf die Prozessgrößen zeigt sich insbesondere bei einer Auswertung der Kontakttemperatur des angussnahen Thermoelements. Die Temperatur liegt sowohl vor Beginn des

Einspritzvorgangs (41 °C statt 42 °C), als auch während der Füllphase im Kontakt mit der Schmelze (61 °C statt 62 °C) um etwa 1 °C tiefer als bei den vorherigen Zyklen. Durch die gleichbleibende Differenz dieser Temperaturabweichung ist eine verringerte Werkzeugtemperatur die Ursache für die Gewichtserhöhungen, da die Schmelze schneller abkühlt und das spezifische Volumen des Materials sinkt, sodass mehr Schmelze während der Nachdruckphase nachgefördert werden kann. In Bild 6 sind die Werkzeuginnendruckverläufe der Zyklen 32 bis 35 dargestellt.

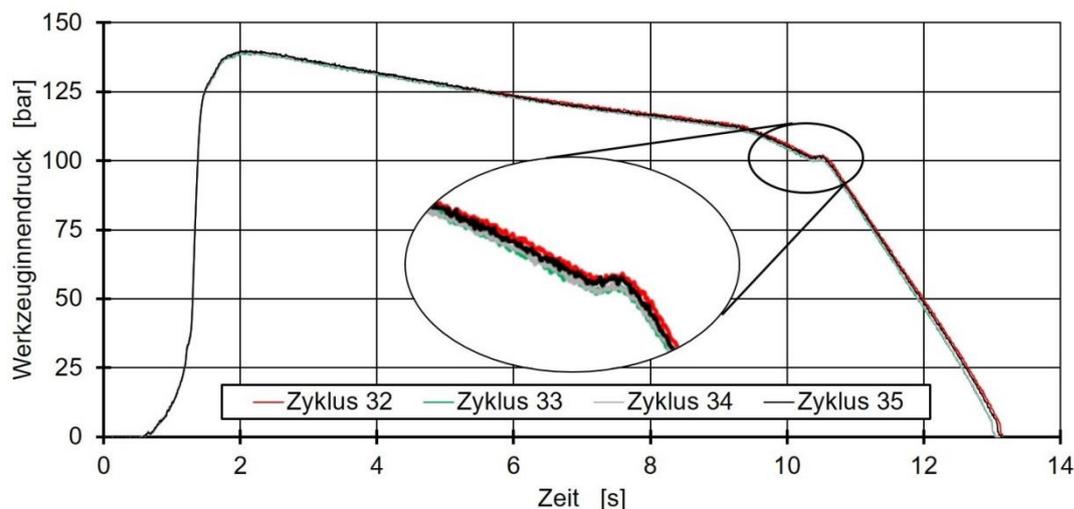


Bild 6: Werkzeuginnendruckverlauf der Zyklen 32 bis 35 zur Bewertung des zyklusübergreifenden Einflusses von Maschinenstopp und Werkzeugtemperatur bei einer Schneckendruckregelung

Eine Betrachtung der Verläufe zeigt, dass der Werkzeuginnendruck während der Einspritz- und Kompressionsphase gleich verläuft, jedoch anschließend bis zum Ende der Nachdruckphase in den Zyklen 33 und 34 abfällt. Die Veränderungen zeigen sich im verringerten Restmassepolster um ca. 0,2 cm³ in den Zyklen 33 und 34 bei gleichbleibendem Dosiervolumen. In Zyklus 35 wird wieder annähernd der Werkzeuginnendruckverlauf aus Zyklus 32 erreicht. Die Bedeutung einer veränderten Werkzeugtemperatur für die Referenztrajektorie wird im nächsten Abschnitt detaillierter betrachtet.

4.3.3 Untersuchung von Prozessgrößen zur Bewertung zyklusübergreifender Einflüsse

Zur Bewertung von zyklusübergreifenden Einflüssen werden die ersten Anfahzyklen näher untersucht, da hier die größten Veränderungen des Bauteilgewichts auftreten. Die Auswirkungen der Prozessgrößen auf die Bauteilqualität sind somit deutlicher sichtbar und erleichtern eine qualitative Bewertung. In Tabelle 2 sind die wichtigsten Prozessdaten für die ersten Zyklen für Schneckendruckregelung (Sr1-5) und modellbasierter prädiktiver Werkzeuginnendruckregelung (Wkzr) gegenübergestellt. Eine Auswertung der Versuchsdaten der PID-Werkzeuginnendruckregelung erfolgt nicht, da der

Werkzeuginnendruckverlauf stark vom vorgegebenen Verlauf abweicht (vgl. Kap. 4.2).

Zyklus	$p_{s,max.}$ [bar]	V_{ein} [cm ³]	T_{dos} [s]	$T_{K,max.}$ [°C]	T_w [°C]	$p_{Wkzn,max.}$ [bar]
Sr1	270	62,85	-	57,48	36,77	112,9
Sr2	272	62,36	10,23	59,84	39,4	135,8
Sr3	276	62,03	9,37	60,64	40,27	135,9
Sr4	275	62,06	9,02	60,99	40,68	137,2
Sr5	275	61,9	8,95	61,23	40,95	137,2
Wkzr1	299	63,115	-	57,07	36,87	123,7
Wkzr2	293	62,51	10,6	59,42	39,33	122,8
Wkzr3	299	62,92	9,44	60,23	40,24	122,6
Wkzr4	297	62,1	9,16	60,58	40,72	122,9
Wkzr5	301	62,02	8,99	60,86	41,03	123,1

Tabelle 2: Prozessgrößen während der ersten 5 Spritzgießzyklen für Schneckendruckregelung (Sr) und modellbasierter prädiktiver Werkzeuginnendruckregelung (Wkzr)

Abkürzungen: $p_{s,max.}$: maximaler Spritzdruck; V_{ein} : eingespritztes Volumen; T_{dos} : Dosierzeit; $p_{Wkzn,max.}$: maximaler angussnaher Werkzeuginnendruck; $T_{K,max.}$: maximale Kontakttemperatur; T_w : Werkzeugtemperatur

Die Versuchsdaten zeigen, dass sich die Prozessgrößen für beide Regelungsstrategien ähnlich verhalten. Der maximale Spritzdruck verhält sich näherungsweise konstant auf niedrigem Niveau, da der Anguss des Bauteils für das verwendete, niedrigviskose Material groß ausgelegt ist.

Das Bauteilgewicht kann direkt durch den proportionalen Zusammenhang zur Einspritzmasse bestimmt werden, welche näherungsweise der Differenz von Dosiervolumen und Restmassepolster entspricht. Eine Aufzeichnung von Dosiervolumen und Restmassepolster bietet somit den Vorteil einer direkten Prozessüberwachung ohne den Einsatz von zusätzlichen Messsystemen. Der Wert sinkt während der ersten Zyklen deutlich, bis er anschließend ein annähernd konstantes Niveau erreicht (vgl. Tabelle 1). Die besonders große Abweichung während des ersten Zyklus wird durch den unpräzisen Dosierprozess verursacht, da der erste Zyklus von Hand aufdosiert wurde. Die eingespritzte Masse resultiert aus den Prozessgrößen Materialviskosität, Werkzeugtemperatur, Schmelze-temperatur und -homogenität. Das komplexe Zusammenspiel dieser Größen verursacht die starken Veränderungen des Bauteilgewichts während der ersten Zyklen.

Die Prozessgrößen des Dosiervorgangs sind eindeutig den zyklusübergreifenden Prozessgrößen zuzuordnen, da die Schmelze im aktuellen Zyklus für den folgenden Zyklus bereitgestellt wird. Die Dosierzeit sinkt während der ersten 5 Zyklen für beide Regelungsstrategien um mehr als 10 %, da die Homogenisierung der Schmelze aufgrund einer ähnlichen thermischen Belastung des Materials durch das nachgeförderte Neugranulat ansteigt. Das Material wird einfacher aufdosiert, sodass bei gleichbleibenden Prozessbedingungen die Schmelzequalität verbessert wird.

Neben der Schmelzequalität ist auch die Schmelzetemperatur eine wichtige Prozessgröße. Diese konnte bei der Versuchsdurchführung nicht direkt gemessen werden, sodass die Veränderung der Schmelzetemperatur nur qualitativ aus maximalen Kontakttemperatur des Thermoelements bestimmt werden konnte. Die Schmelzetemperatur steigt für beide Regelungsstrategien während der ersten 5 Zyklen um ca. 4 °C. Als Ursache kann genannt werden, dass die Materialviskosität der Schmelze während der Produktion sinkt und damit die leichte Erhöhung des Schneckendrucks um wenige bar verursacht wird. Eine eindeutige Aussage ist jedoch nicht möglich, da die Abweichungen im Rahmen der Messgenauigkeit liegen. Die Kontakttemperatur wird nur alle 420 ms abgetastet, was trotz der hohen Trägheit des Thermoelements für die hohe Dynamik im Spritzgießprozess zu gering ist.

Die Werkzeugtemperatur ist die Haupteinflussgröße auf die Abweichungen des Bauteilgewichts, welche während der ersten Zyklen von ca. 37 °C auf 41 °C ansteigt. Die Werkzeugtemperatur ist somit eine entscheidende zyklusübergreifende Prozessgröße, wie bereits in der Diskussion der vorhergehenden Versuchsergebnisse in Kapitel 4.3.2 verdeutlicht wurde. Eine Veränderung der Werkzeugtemperatur wirkt sich auf das Fließverhalten und das Erstarrungsverhalten der Schmelze im Spritzgießwerkzeug aus. Der thermische Einschwingvorgang ist auch nach den ersten 50 Zyklen noch nicht vollständig abgeschlossen und weist somit einen kontinuierlichen, zyklusübergreifenden Einfluss auf, bis die Werkzeugtemperatur einen stationären Wert erreicht.

Abschließend wird der Werkzeuginnendruck als wichtige Prozessgröße und Regelgröße betrachtet. Der Werkzeuginnendruckverlauf wird durch die betrachteten Prozessgrößen maßgeblich beeinflusst, wie bereits am Beispiel der Werkzeugtemperatur gezeigt wurde. Bei Schneckendruckregelung steigt der Werkzeuginnendruck während der ersten 5 Zyklen um 25 bar an. Aufgrund der sinkenden Schmelzeviskosität und der steigenden Werkzeugtemperatur wird in der Kavität ein höherer Werkzeuginnendruck erreicht. Sobald die Schmelze eine thermische Homogenität und gleichbleibende Qualität erreicht hat, sind die Veränderungen des Werkzeuginnendrucks deutlich geringer. Die Ergebnisse zeigen eine hohe Korrelation zur Stabilität des Dosierprozesses. Sobald Dosierzeit und Restmassepolster ein konstantes Niveau erreicht haben, ist auch das Niveau des Werkzeuginnendrucks auf einem konstanten Wert.

Das Ansteigen des Werkzeuginnendrucks während der ersten Produktionszyklen tritt auch bei Werkzeuginnendruckregelung auf, jedoch

deutlich weniger ausgeprägt. Der erreichte Werkzeuginnendruck bei modellbasierter prädiktiver Regelung weicht um bis zu 2,2 bar vom eingestellten Wert von 125 bar ab. Die Abweichungen sind auf die Reglereinstellungen zurückzuführen und resultieren aus den Veränderungen von Schmelzequalität und Materialviskosität, welche zu Produktionsbeginn stärker von den Modellwerten abweichen. Die quasistationären Abweichungen betragen ca. 0,5 bar bei einem Mittelwert von 123,6 bar.

4.3.4 Bedeutung der Versuchsergebnisse für das modellbasierte prädiktive Regelungskonzept

Die Auswertung des Bauteilgewichts während des Anfahrprozesses hat gezeigt, dass ein stationärer Spritzgießprozess erst nach dem Erreichen eines thermischen Gleichgewichts von Maschine und Werkzeug erreicht wird. Für die Prozessführungsstrategie bedeutet dies, dass der Referenzgrößenverlauf für die ersten Zyklen angepasst werden muss, um bereits zu einem früheren Zeitpunkt einen stationären Zustand der Qualitätsgrößen zu erreichen. Dazu muss die Referenz für den Werkzeuginnendruck zyklusweise erhöht werden. Eine Alternative stellt eine pVT-optimierte Prozessführung dar, wobei der Werkzeuginnendruckverlauf während des Schwindungsausgleichs anhand seines pVT-Verhaltens angepasst wird. Die Bestimmung der Schmelztemperatur zur Berechnung des Stellsignals für die Werkzeuginnendruckregelung könnte über eine Abkühlrechnung oder einen Schmelzetemperatursensor, z. B. als Infrarotsensor, in der Kavität erfolgen.

Aus der Betrachtung der Werkzeuginnendruckverläufe bei Produktionsstopp können Anforderungen an das Regelungskonzept abgeleitet werden. Durch den Maschinenstopp sinkt die Werkzeugtemperatur kurzfristig, sodass das Bauteil des nachfolgenden Zyklus aufgrund der schnelleren Abkühlung schwerer wird. Dementsprechend muss die Referenztrajektorie für den Werkzeuginnendruckverlauf bei kurzem Maschinenstopp um wenige bar verringerte Druckwerte aufweisen. Für quantitative Zahlenwerte sind gezielte Spritzgießversuche mit beabsichtigtem Stopp während der Produktion notwendig. Zu Beginn der Produktion ist die Werkzeugtemperatur ganzheitlich niedriger, was an einem größeren Temperaturabfall während der Nebenzeiten zu erkennen ist. Daher ist eine sukzessive Erhöhung der Druckreferenz für ein gleichbleibendes Bauteilgewicht zielführend.

Bei der Prozessführung sollten demnach Veränderungen der Werkzeugtemperatur bei der Bildung der Referenztrajektorie berücksichtigt werden. Während des Anfahrprozesses und bei Prozessunterbrechungen ist eine kontinuierliche Erhöhung des Werkzeuginnendrucks zielführend, um ein konstantes Bauteilgewicht zu erzielen. Sobald ein thermisches Gleichgewicht der Maschine erreicht ist, sind keine weiteren Anpassungen der Referenz notwendig.

Die Notwendigkeit einer Berücksichtigung weiterer Größen bei der Prozessführung konnte anhand der durchgeführten Spritzgießversuche nicht festgestellt werden. Veränderungen der Schmelzequalität wirken sich auf den

Werkzeuginnendruck aus, ebenso wie Veränderungen des Dosierprozesses. Die Auswirkungen sind bei der Werkzeuginnendruckregelung deutlich schwächer ausgeprägt, aber dennoch vorhanden. Die Ergebnisse zeigen somit, dass eine veränderte Materialqualität für den Werkzeuginnendruckverlauf relevant ist und in weiteren Versuchsreihen mit unterschiedlichen Materialien näher untersucht werden sollte. Hier bietet sich beispielsweise ein Material mit hohem Rezyklatanteil an, welches deutlich schwerer zu verarbeiten ist und hohe Qualitätsschwankungen aufweist.

Die Schmelztemperatur konnte in den Versuchsreihen nicht ausreichend genau gemessen werden, sodass eine Berücksichtigung für die Prozessführung in folgenden Versuchsreihen mit geeigneter Sensorik untersucht werden muss. Weitere Veränderungen von Prozessgrößen während des Anfahrprozesses konnten nicht identifiziert werden.

5 FAZIT UND AUSBLICK

Die modellbasierte prädiktive Werkzeuginnendruckregelung zeigt großes Potential, um eine konstante Bauteilqualität während der Bauteilproduktion im Spritzgießen sicherzustellen, indem zyklusübergreifende Einflüsse bereits von Beginn an auszugleichen werden. Durch die Generierung einer geeigneten Referenztrajektorie für den Werkzeuginnendruck kann die Bauteilqualität nicht nur reproduzierbar eingestellt werden, sondern auch entsprechend der Kundenanforderungen gewählt werden. Um prozessseitige Veränderungen zu berücksichtigen, ist eine kontinuierliche Überwachung von Prozessgrößen notwendig, sodass die Referenz für den Werkzeuginnendruck zyklusweise angepasst werden kann. Veränderungen der Werkzeugtemperatur haben einen besonders großen Einfluss auf den Werkzeuginnendruck. Während des Anfahrprozesses und nach einem Produktionsstopp sollte die Werkzeuginnendruckreferenz zyklusweise um wenige bar erhöht werden.

Veränderungen der Materialhomogenität können durch eine Betrachtung der Prozessgrößen während des Dosierprozesses und des Restmassepolsters überwacht werden. Zur Quantifizierung des materiellen Einflusses sind weitere Spritzgießversuche mit unterschiedlichem Material bzw. unterschiedlicher Materialzusammensetzung notwendig. Die Schmelztemperatur konnte über die Kontakttemperatur nicht ausreichend genau betrachtet werden, sodass ein Infrarotsensor zur Messung der Schmelztemperatur in der Kavität bei den folgenden Versuchsreihen verwendet werden sollte.

Zunächst soll die Relevanz wichtiger Prozessgrößen des vorherigen Zyklus auf den darauffolgenden Zyklus untersucht und mit weiteren Spritzgießversuchen quantifiziert werden. Anschließend ist das Ziel der folgenden Versuchsreihen, eine bauteilspezifisch optimale Referenztrajektorie für den Werkzeuginnendruck zu bestimmen. Dazu werden Spritzgießversuche mit verschiedenen Werkzeugen durchgeführt und die Charakteristika des

Werkzeuginnendruckverlaufs wie Knickpunkte, Maximalwerte, Gradienten und Integrale analysiert. Zusätzlich wird der Einfluss dieser Größen auf die Qualitätsmerkmale Bauteilgewicht, Abmessungen, Gratbildung und vollständige Füllung bestimmt, sodass weitere Qualitätsgrößen zur Bewertung der Bauteilqualität berücksichtigt werden. Mit einer zyklusweisen Vorgabe der optimalen Referenztrajektorie lässt sich dann eine gewünschte Bauteilqualität gezielt einstellen und durch eine hohe Regelgüte realisieren.

6 DANKSAGUNG

Das Forschungsvorhaben 378417139 mit dem Titel „Phasenübergreifende Prozessführungskonzepte beim Spritzgießen unter Nutzung moderner Regelungsstrategien“ wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziell gefördert. Ihr gilt unser ausdrücklicher Dank. Weiterhin danken wir Arburg GmbH & Co. KG, Loßburg, Deutschland und Sabic Deutschland GmbH & Co. KG, Düsseldorf, Deutschland, für die Bereitstellung von Maschine und Material für die dargestellten Untersuchungen.

Literatur

- [1] Gießauf, J.; Maier, C. Wie reproduzierbar ist die Reproduzierbarkeit? Kunststoffe 106 (2016) 6, S. 62 – 66
- [2] Johannaber, F.; Michaeli, W. Handbuch Spritzgießen Carl Hanser Verlag, München, 2004
DOI: 10.3139/9783446440982
- [3] Kudlik, N. Reproduzierbarkeit des Kunststoffspritzgießprozesses
Dissertation am Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, 1997
- [4] 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
DOI: 10.1007/s00170-008-1592-4
- [5] Pillwein, G.; Gießauf, J.; Steinbichler, G. Einfaches Umschalten auf konstante Qualität Kunststoffe 102 (2012) 9, S. 31 – 35
- [6] Gornik, C. Abgeleitete Kenngrößen zur Optimierung nutzen Kunststoffe 99 (2009) 9, S. 30 – 34
- [7] Schiffers, R. Verbesserung der Prozessfähigkeit beim Spritzgießen durch Nutzung von Prozess-daten und eine neuartige Schneckenhubführung
Dissertation am Institut für Produkt Engineering, Universität Duisburg-Essen, 1997
- [8] Kazmer, D. O.; Velusamy, S.; Westerdale, S.; et al. A Comparison of Seven Filling to Packing Switchover Methods for Injection Molding
Polymer Engineering & Science 50 (2010) 10, S. 2031 – 2043
DOI: 10.1002/pen.21731
- [9] Hopmann, C.; Hornberg, K. Die Umschaltproblematik und ihre Folgen Kunststoffe 120 (2020) 4, S. 82 – 86
- [10] Schötz, A. Abmusterung von Spritzgießwerkzeugen
3. Aufl. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2019

- DOI: 10.3139/9783446461321
- [11] Gruber, J. Prozessführung beim Thermoplastspritzgießen auf Basis des Werkzeuginnendrucks
Dissertation am Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, 2005
- [12] Dewantoro, G.; Feriyonika, F. Model Reference Adaptive Control of Cavity Pressure in Injection Molding during Filling and Packing Phases
Proceedings of 2nd International Conference on Instrumentation Control and Automation, Bandung, Indonesien, 2011, S. 47 – 52
DOI: 10.1109/ICA.2011.6130128
- [13] Dörner, D.; Radermacher, T.; Wagner, B.; et. al. Iterativ Lernende Regelung einer Kunststoff-Spritzgießmaschine
at – Automatisierungstechnik 62 (2014) 3, S. 226 – 236
DOI: 10.1515/auto-2013-1045
- [14] Johannaber, F.; Michaeli, W. Handbuch Spritzgießen
Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2004
DOI: 10.3139/9783446440982
- [15] Menges, G.; Michaeli, W.; Mohren, P. Spritzgießwerkzeuge
Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2007
DOI: 10.3139/9783446446823
- [16] Michaeli, W.; Lauterbach, M. Die pmT-Optimierung – Konsequenzen aus dem pvT-Konzept zur Nachdruckführung
Kunststoffe 79 (1989) 9, S. 852 – 855
- [17] Tan, K. K.; Huang, S. N.; Jiang, X. Adaptive control of ram velocity for the injection moulding machine
IEEE Transactions on Control Systems Technology 9 (2001) 4, S. 663 – 671
DOI: 10.1109/87.930978
- [18] Tsoi, H.-P.; Gao, F. Control of Injection Velocity Using a Fuzzy Logic Rule-Based Controller for Thermoplastics Injection Molding
Polymer Engineering & Science 39 (1999) 1, S. 3 – 17

- DOI: 10.1002/pen.11392
- [19] Yang, Y.;
Gao, F. Adaptive control of the filling velocity of thermoplastics injection molding
Control Engineering Practice 8 (2000) 11, S. 1285 – 1296
DOI: 10.1016/S0967-0661(00)00060-5
- [20] Zheng, D.;
Alleyne, A. Learning control of an electro-hydraulic injection molding machine with smoothed fill-to-pack transition
Proceedings of the 4th American Control Conference, Chicago, USA, 2000, S. 2558 – 2562
DOI: 10.1109/ACC.2000.878669
- [21] Brecher, C. Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011
DOI: 10.1007/978-3-642-20693-1
- [22] Hopmann C.;
Reßmann A.;
Zöller D.;
et al. Strategy for Robust System. Identification for Model Predictive Control of Cavity Pressure in an Injection Moulding Process
Proceedings of the 11th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments (ISMTII 2013), Aachen, 2013, S. 226
- [23] Michaeli, W. Vereinfachtes Einrichten des Thermoplastspritzgießprozesses mittels Online Werkzeuginnendruckregelung
Abschlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben Nr. 15357 N am Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, 2009
- [24] Reiter, M.;
Stemmler, S.;
Hopmann, C.;
et al. Model Predictive Control of Cavity Pressure in an Injection Moulding Process
Proceedings of the 19th World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC), Kapstadt, Südafrika, 2014, S. 4358 – 4363
DOI: 10.3182/20140824-6-ZA-1003.02505
- [25] Schreiber, A. Regelung des Spritzgießprozesses auf Basis von Prozessgrößen und im Werkzeug ermittelter Materialdaten
Dissertation am Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, 2011

- [26] Hopmann, C.;
Ressmann, A.;
Reiter, M.;
et al. A Self-optimising Injection Moulding Process with
Model-Based Control System Parameterisation
International Journal of Computer Integrated
Manufacturing 29 (2016) 11, S. 1190 – 1199
DOI: 10.1080/0951192X.2015.1066035
- [27] Hopmann, C.;
Schnerr, O.;
Schirmer, M.;
et al. Precise, reproducible process control for injection
moulding
Umdruck zum 30. Internationalen Kolloquium
Kunststofftechnik, Aachen 30 (2020), S. 16 – 24
- [28] Stemmler, S.;
Ay, M.;
Vukovic, M.;
et al. Cross-phase Model-based Predictive Cavity Pressure
Control in Injection Molding
IEEE Conference on Control Technology and
Applications Hong Kong (2019), S. 360 – 367
DOI: 10.1109/CCTA.2019.8920461
- [29] Stemmler, S. Intelligent Control Strategies as an Enabler for Self-
Optimizing Manufacturing Systems
Dissertation am Institut für Regelungstechnik, RWTH
Aachen, 2020
DOI: 10.18154/RWTH-2020-02766

Bibliography

DOI 10.3139/O999.03032021
Zeitschrift Kunststofftechnik / Journal of Plastics
Technology 17 (2021) 3; page 179–203
© Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
ISSN 1864 – 2217

Stichworte:

Spritzgießen, Prozessführung, phasenvereinende Regelung, zyklische Störeinflüsse, Werkzeuginnendruck, Anfahrprozess, Reproduzierbarkeit, Bauteilqualität

Keywords:

Injection moulding, process control, cross-phase control, cyclical disturbances, cavity pressure, start-up process, reproducibility, part quality

Autor / author:

Katharina Hornberg, M.Sc.
Marko Vukovic, M. Sc.
Dr.-Ing. Sebastian Stemmler
Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann
Prof. Dr.-Ing. Dirk Abel

E-Mail: katharina.hornberg@ikv.rwth-aachen.de
Webseite: www.ikv-aachen.de
Tel.: +49 (0)241/80-93806
Fax: +49 (0)241/80-92662

Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen
Institut für Regelungstechnik (IRT)
RWTH Aachen
Seffenter Weg 201
52074 Aachen

Herausgeber / Editors:Editor-in-Chief

Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gottfried W. Ehrenstein
Lehrstuhl für Kunststofftechnik
Universität Erlangen-Nürnberg
Am Weichselgarten 9
91058 Erlangen
Deutschland
Tel.: +49 (0)9131/85 - 29703
Fax: +49 (0)9131/85 - 29709
E-Mail: ehrenstein@lkt.uni-erlangen.de

Europa / Europe

Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer, verantwortlich
Lehrstuhl für Kunststofftechnik
Universität Erlangen-Nürnberg
Am Weichselgarten 9
91058 Erlangen
Deutschland
Tel.: +49 (0)9131/85 - 29700
Fax: +49 (0)9131/85 - 29709
E-Mail: drummer@lkt.uni-erlangen.de

Amerika / The Americas

Prof. Prof. hon. Dr. Tim A. Osswald, verantwortlich
Polymer Engineering Center, Director
University of Wisconsin-Madison
1513 University Avenue
Madison, WI 53706
USA
Tel.: +1 608/263 9538
Fax: +1 608/265 2316
E-Mail: osswald@enr.wisc.edu

Verlag / Publisher:

Carl-Hanser-Verlag GmbH & Co. KG
Wolfgang Beisler
Geschäftsführer
Kolbergerstraße 22
D-81679 München
Tel.: +49 (0)89/99830-0
Fax: +49 (0)89/98480-9
E-Mail: info@hanser.de

Redaktion / Editorial Office:

Dr.-Ing. Eva Bittmann
Jannik Werner, M.Sc.
E-Mail: redaktion@kunststofftech.com

Beirat / Advisory Board:

Experten aus Forschung und Industrie, gelistet unter www.kunststofftech.com