

Schlussbericht vom 30.11.2024

zum IGF-Vorhaben Nr. 01IF22193 N

Thema

Entwicklung eines Regelungskonzeptes zur Steigerung der Produktqualität und Produktivität beim Spritzgießen von Duroplasten

Berichtszeitraum

01.03.2022 bis 30.11.2024

Forschungsvereinigung

Kunststoffverarbeitung

Forschungseinrichtung(en)

Forschungseinrichtung 1:

Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen

Seffenter Weg 201

52074 Aachen

Forschungseinrichtung 2

IRT – Institut für Regelungstechnik

RWTH Aachen University

Campus-Boulevard 30

52074 Aachen

Inhaltsverzeichnis

1	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	3
1.1	Kurzzusammenfassung.....	3
1.2	Vorwort und Dank.....	4
1.3	Einleitung und Zielsetzung	4
1.4	Grundlagen.....	5
1.5	Arbeitspaket 2: Konstruktion eines Werkzeugeinsatzes.....	13
1.6	Arbeitspaket 1: Untersuchungen zur Formteilqualität beim Duroplast-Spritzgießen	18
1.7	Arbeitspaket 3: Entwicklung eines Qualitätsmodells.....	22
1.8	Arbeitspaket 4: Entwicklung einer Prozessregelung.....	31
1.9	Arbeitspaket 5: Implementierung an einer Technikumsmaschine	38
1.10	Arbeitspaket 6: Bewertung der Regelung an praxisnahen Formteilen	41
1.11	Fazit der Projektergebnisse und Ausblick	56
2	Verwendung der Zuwendung	58
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	59
4	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten.....	60
4.1	Wissenschaftlich-technischer Nutzen	60
4.2	Wirtschaftlicher Nutzen	60
5	Wissenstransfer in die Wirtschaft.....	62
5.1	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft.....	62
5.2	Einschätzung der Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzeptes .	64
6	Durchgeführte Transfermaßnahmen	65
7	Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit.....	65
8	Abkürzungen, Formelzeichen, Indizes.....	66
8.1	Abkürzungen	66
8.2	Formelzeichen	67
8.3	Indizes.....	68
9	Literaturverzeichnis	70
10	Anhang.....	74
10.1	Versuchsplan der ersten Versuchsreihe.....	74

1 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

1.1 Kurzzusammenfassung

Duroplaste rücken aufgrund ihrer Eigenschaften, wie Temperaturbeständigkeit, elektrischer Isolierung, hoher Festigkeit und Steifigkeit über einen großen Temperaturbereich sowie ihrer Maßhaltigkeit, verstärkt in den Fokus technischer Serienanwendungen. Das Spritzgießen ist auch für duroplastische Werkstoffe das bedeutendste Verarbeitungsverfahren. Eine hohe Prozessstabilität ist für die Wettbewerbsfähigkeit der oft kleinen und mittelständischen Verarbeiter essenziell. Allerdings hängt dies bei der heute üblichen Prozessführung über Maschinengrößen maßgeblich von den Erfahrungen des Maschinenbedieners ab. Auch stellt das stark chargenabhängige Materialverhalten von Duroplasten eine Herausforderung dar. Dies führt zu hohen Prozessschwankungen sowie einer hohen Ausschussquote und damit zu einem Verlust der Produktionseffizienz.

Ein in diesem Projekt untersuchter Lösungsansatz zur Erhöhung der Produktivität und Formteilqualität beim Duroplast-Spritzgießen stellt eine Prozessführung auf Basis der Regelung von Prozessgrößen dar. Ein solcher Regelansatz ist für die Duroplast-Verarbeitung bislang noch nicht umgesetzt worden. Ziel des Projektes ist daher, die Reproduzierbarkeit durch eine Prozessführungsstrategie zu optimieren und die Auswirkungen von Materialschwankungen auf die Formteilqualität zu reduzieren. Die Entwicklung der Regelung erfolgt am Institut für Regelungstechnik (IRT) der RWTH Aachen und wird in enger Zusammenarbeit am Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) an der RWTH Aachen implementiert und analysiert.

Dazu wird mithilfe von Spritzgießversuchen eine geeignete Prozessgröße zur Regelung identifiziert. Als Materialien werden verschiedene Phenolharze untersucht. Störungen im Spritzgießprozess werden über eine Variation der Maschineneinstellgrößen simuliert. Anschließend werden die Prozessgrößenverläufe ausgewertet, um geeignete Kennzahlen zur Prozessüberwachung und Prozessregelung zu identifizieren. Die Qualität wird über die Masse, mechanische Eigenschaften und die Oberflächenqualität bewertet und mit den Prozessgrößen korreliert. Dadurch können geeignete Regelgrößen, wie der Werkzeuginnendruckverlauf oder das Restmassepolster, abgeleitet werden. Der Spritzgießprozess wird mitsamt der speziellen Materialeigenschaften der Duroplaste über ein mathematisches Modell beschrieben, um Prozesswissen in die Regelung miteinzubeziehen. Durch maschinelles Lernen kann das Prozessmodell während der Fertigung fortlaufend verbessert werden.

Eine modellprädiktive Regelung des Werkzeuginnendruckes (MPR) nach einer vorgegebenen Referenzdruckkurve durch Einstellen der Schneckengeschwindigkeit über ein externes, analoges Spannungssignal am verbauten Servoumrichter erzielt in den Versuchen gute Ergebnisse und ist einem einfachen Proportional-Integral-Differential (PID)-Regler überlegen. Beurteilt an dem Werkzeuginnendruckintegral wird durch die Regelung des Werkzeuginnendruckes eine höhere Prozesskonstanz erzielt. Zusätzlich kann mittels eines lernenden Qualitätsmodelles eine Soll-Bauteilmasse durch die MPR eingeregelt werden. Es kann eine Verbesserung der Massenkonstant erreicht werden. Eine signifikante Verbesserung der Maßhaltigkeit, der Bauteiloberflächenqualität oder der mechanischen Eigenschaften konnte bislang jedoch nicht nachgewiesen werden.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

1.2 Vorwort und Dank

Die nachfolgend beschriebenen und erläuterten Untersuchungen wurden im Rahmen des IGF-Vorhabens 22193 N der Forschungsvereinigung Kunststoffverarbeitung über das DLR im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Der vorliegende Bericht ist der Schlussbericht des Forschungsvorhabens.

Ein wesentlicher Teil der Ergebnisse wurde von Jens Ahlers, M.Sc., Moritz Mascher, M.Sc., und Dr. Ing. Katharina Hornberg erarbeitet sowie teilweise von Studierenden der RWTH Aachen in Form von studentischen Arbeiten niedergelegt. Diese Arbeiten sind nicht zur Veröffentlichung vorgesehen, können aber in den Bibliotheken des Instituts für Kunststoffverarbeitung und des Institutes für Regelungstechnik eingesehen werden.

Dem Deutschen Bundestag, dem BMWK und der AiF-Mitgliedsvereinigung „Kunststoffverarbeitung“ gilt unser Dank. Darüber hinaus gilt unser Dank allen Firmen, die durch Bereitstellung von Materialien, Maschinen und sonstigen Sachmitteln diese Arbeit unterstützt haben.

1.3 Einleitung und Zielsetzung

Die Herstellung von duroplastischen Formteilen durch das Duroplast-Spritzgießen kombiniert die prozesseitigen Vorteile des Spritzgießprozesses und die materialeitigen Vorteile von rieselfähigen Formmassen. Somit ist es möglich Bauteile mit sehr guter Temperatur- und Medienbeständigkeit, einer sehr guten elektrischen Isolierung sowie hohen mechanischen Eigenschaften innerhalb eines breiten Temperaturbereichs reproduzierbar und funktionsintegriert herzustellen. Deshalb eignet sich dieses Verfahren hervorragend für die industrielle Anwendung [HT08, URL13]. Nichtsdestotrotz treten beim Duroplast-Spritzgießen hohe Prozessschwankungen auf, welche sich aus den Lagerbedingungen, Chargenschwankungen, Umgebungsbedingungen und Maschinenverschleiß zusammensetzen [Hor24, WTH18]. Um diese Prozessschwankungen auszugleichen, wird geschultes Personal benötigt, das durch manuelles und iteratives Anpassen der Maschineneinstellungen auf veränderte Prozessbedingungen reagiert [Bic12]. Zudem wird durch steigende Energie- und Produktionskosten die Effizienzsteigerung von Prozessen notwendig, um bei intensivem globalem Wettbewerb weiterhin konkurrenzfähig zu sein. Hierbei ist ein wirtschaftlicher Spritzgießprozess mit hoher Reproduzierbarkeit bei der Herstellung von qualitativ hochwertigen Produkten das Ziel.

Um diesen Herausforderungen gerecht zu werden, können alternative Regelungsstrategien die Lösung sein. Diese ermöglichen die schnelle Reaktion auf Prozessschwankungen durch die stetige Anpassung von Prozessgrößen. Eine modellprädiktive Regelung (MPR) des Duroplast-Spritzgießprozesses könnte Prozessschwankung durch stetige Anpassung der Stellgrößen bereits im Prozess anpassen. Bisher wurde dieser Ansatz nur für den klassischen Thermoplast-Spritzgießprozess erprobt [Hor24, Vuk24]. In Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) an der RWTH Aachen und dem Institut für Regelungstechnik (IRT) der RWTH Aachen wird eine MPR für den Duroplast-Spritzgießprozess entwickelt und hinsichtlich der Reglerperformance, den individuellen Verarbeitungsgrenzen der Regelungsstrategie und den Einflüssen auf unterschiedliche Bauteileigenschaften untersucht.

Zielsetzung und Vorgehensweise

Der Einsatz einer MPR zur Prozessregelung birgt großes Potenzial, da sie auf Prozessschwankungen reagieren kann. Durch die Erhöhung des Automatisierungsgrades können Material-, Personal-, und Energiekosten reduziert werden. Zur Entwicklung einer geeigneten MPR wird zunächst der Einfluss verschiedenster Maschineneinstellgrößen auf den Duroplast-Spritzgießprozess untersucht und auf Basis der Untersuchungen eine geeignete Regelgröße ausgewählt. Die MPR wird für verschiedene Bauteile und Formmassen hinsichtlich der Regelgüte analysiert und bewertet. Zusätzlich werden die resultierenden Bauteileigenschaften wie die Bauteilmasse und die Bauteildicke, die Maßhaltigkeit der Bauteile, die Oberflächeneigenschaften sowie den mechanischen Eigenschaften ermittelt und mit der konventionellen Prozessführung verglichen. Ferner sollen Erkenntnisse über das Anfahrverhalten der MPR und die Reaktionsfähigkeit zur Anpassung an Chargenschwankungen gewonnen werden. Abschließend erfolgt eine Einordnung der Ergebnisse der MPR, um die Übertragbarkeit auf industrielle Anwendungen zu bewerten.

1.4 Grundlagen

Vor dem Hintergrund hoher Anforderungen an technische Kunststoffbauteile werden duroplastische Formmassen in einer Vielzahl von technischen Serienanwendungen eingesetzt [RG15, Sch11]. Das Duroplast-Spritzgießen vereint die guten Material-eigenschaften von Duroplasten mit den zahlreichen Vorteilen des Spritzgießprozesses. So können Formteile mit guter Qualität funktionsintegriert und reproduzierbar hergestellt werden. Die Formteilqualität beim Duroplast-Spritzgießen kann direkt über die Einstellung von Prozessgrößen beeinflusst werden [Höe14]. Neben den direkten Einstellgrößen können auch zufällige und nicht reproduzierbare Veränderungen des Prozesses die Bauteilqualität beeinflussen [Hor24, WTH18]. Um solche Prozessschwankungen auszugleichen, erfolgt bis heute ein manuelles, iteratives Nachstellen der Maschineneinstellung durch einen Maschinenanlagenführer [Bic12]. Durch die direkte Regelung von Prozessgrößen können Veränderungen des Materials ausgeglichen und schnell auf Prozessschwankungen reagiert werden. Dies würde die Ressourceneffizienz und die Produktqualität erhöhen sowie zeitgleich die Kosten für Ausschuss und Personal reduzieren [Hor24, Vuk24]. Im folgenden Kapitel wird das Eigenschaftsprofil von Duroplasten und anschließend die Prozessführung beim Spritzgießen diskutiert. Dabei wird besonders auf den konventionellen Spritzgießprozess mit Fokus auf dem Duroplast-Spritzgießen, der Prozessführung bei einer Werkzeuginnen-druckregelung und auf Störeinflüsse auf die Reproduzierbarkeit von Spritzgießprozessen eingegangen.

Duroplaste und ihr Eigenschaftsprofil

Aufgrund ihrer engmaschigen Vernetzung sind Duroplaste weder schmelzbar noch löslich sowie kaum quellbar [HM17, Kai11]. Duroplastische Materialien werden je nach Form, Ausgangsstoff oder Verarbeitungstyp in härtbare Formmassen und Halbzeuge eingeteilt. Beide Darbietungsformen weisen ähnliche Ausgangsstoffe auf, werden jedoch unterschiedlich eingesetzt. So bestehen sie aus einem Reaktionsharz, einem Härter und beliebigen Füllstoffen [BBO+07].

Rieselfähige Duroplastformmassen zeichnen sich nach ISO 14526-1:1999 dadurch aus, dass sie drucklos durch die Beschickungssysteme von Verarbeitungsmaschinen befördert werden können [NN99]. Sie werden üblicherweise als Pulver, Granulat oder Mahlgut vertrieben [BBO+07, Zha22]. Füllstoffe und Additive sind durch vorherige Compoundierung in die Formmasse eingearbeitet, sodass rieselfähige Formmassen durch

Druck und Temperatur direkt zu Bauteilen verarbeitet werden [BBO+07, Zha22]. Gängige Verfahren zur Verarbeitung von rieselfähigen Formmassen sind unter anderem das Pressen, Spritzpressen, Strangpressen und das Spritzgießen [BBO+07]. Die Zusammensetzung von rieselfähigen Formmassen ist komplex und beinhaltet neben dem härtbaren Harz oftmals Härter, diverse mechanische Füllstoffe, Gleit- und Trennmittel sowie Farbpigmente [Kai11, Zha22]. Füllstoffe werden gezielt eingesetzt, um sowohl die resultierende Bauteileigenschaft als auch die Verarbeitungseigenschaft zu verbessern. Somit ergibt sich das Eigenschaftsprofil der Formmasse aus der individuellen Konfiguration des Duroplastes [Kai11, Zha22]. Als Polymermatrix können Phenolformaldehydharze (PF), Harnstoffformaldehydharze (UF), Melaminformaldehydharze (MF), ungesättigte Polyesterharze (UP) oder Epoxidharze (EP) eingesetzt werden [BBO+07, Kai11, Zha22]. Die Auswahl der Polymermatrix hat einen direkten Einfluss auf die thermischen, elektrischen und chemischen Eigenschaften der Formmasse, wohingegen die mechanischen Eigenschaften maßgeblich von Füllstoffart und -menge bestimmt werden [BHM19, Zha22].

Duroplaste zeichnen sich durch eine sehr gute elektrische Isolierung und gute Flammbeständigkeit aus. Im Rahmen dieser Arbeit werden verschiedene PF-Formmassen verwendet. Diese werden bevorzugt eingesetzt, wenn eine hohe Anforderung an Maßhaltigkeit und Wärmebeständigkeit existiert [BBO+07]. Die mechanischen und elektrischen Eigenschaften können durch Hinzugabe von passenden Füllstoffen zielgerichtet beeinflusst werden. Bei PF-Formmassen machen Füllstoffe, wie für Duroplaste im Allgemeinen üblich, oftmals mehr als die Hälfte der Formmasse aus [BBO+07, Kai11, Zha22]. Dies sorgt zum einen für eine Modifikation verschiedener Eigenschaften, zum anderen aber auch zur erheblichen Vergünstigung des Formmasse. PF-Formmassen zeichnen sich durch einen günstigen Einkaufspreis aus [Kai11]. Die Harzbasis verfügt über einen hohen E-Modul und ein hart sprödes Bruchverhalten. Die Festigkeit und die Bruchempfindlichkeit hängt stark vom eingesetzten Füllstoff und der Harzmischung ab [BBO+07, BHM19]. Sie zeichnen sich durch eine gute Wärmeformbeständigkeit bei hoher mechanischer Last aus. Diese führt zu Gebrauchstemperaturen bis zu 170 °C bei anorganischen Füllstoffen und bis zu 120 °C bei Hinzugabe von organischen Füllstoffen [BHM19, Kai11]. Zudem sind PF-Formmassen beständig gegenüber einer Reihe von Medien wie gegen organische Lösungsmittel, Öle, Fette, Benzin und Alkohol [BBO+07, BHM19]. Nicht beständig sind sie jedoch gegen starke Säuren und Laugen [BBO+07, BHM19].

Rieselfähige PF-Formmassen lassen sich vielseitig weiterverarbeiten. Sie vernetzen unter Abspaltung von Wasserdampf durch Polykondensation, weshalb hohe Verarbeitungsdrücke notwendig sind [BHM19]. Die Verarbeitung erfolgt überwiegend durch (Spritz-)pressen sowie durch das Spritzgießen [BHM19, Kai11]. Beim Spritzgießen werden vorwiegend weiche, speziell für die Verarbeitung eingestellte Formmassen verwendet [BHM19]. Die Masse-temperatur im Spritzgießaggregat wird auf 90 °C bis 110 °C eingestellt. Die Einspritzdrücke können im Prozess Werte bis zu 2.500 bar erreichen. Das Spritzgießwerkzeug wird im Prozess auf bis zu 190 °C temperiert. [BBO+07, BHM19]. Das aufgeschmolzene Harz hat zunächst eine niedrige Viskosität, weshalb Gratbildung möglich ist [BHM19].

Füllstoffe und Additive

Füllstoffe und Additive sind essenziell, um die Verarbeitungs- sowie die resultierenden Bauteileigenschaften der Formmassen einzustellen. So können zum Beispiel die mechanische Festigkeit, die Wärmeformbeständigkeit, die Chemikalienbeständigkeit und die allgemeine Verarbeitbarkeit gezielt verbessert werden. Wie bereits erläutert, stellen rieselfähige Formmassen oft ein hochgefülltes System (50 – 80 Gew.-% Füllstoffanteil) dar [BBO+07, BHM19, Zha22]. Zur Verbesserung der mechanischen Festigkeit werden z. B. Glasfasern und

-kugeln sowie Talkum eingesetzt [BBO+07, BHM19, Zha22]. Eine wesentliche Herausforderung ist die Verbesserung von Bauteileigenschaften bei gleichzeitiger Gewährleistung der Verarbeitbarkeit der Formmasse. Gefüllte Formmassen befinden sich während der Verarbeitung in einem Mischzustand aus Feststoffen und Polymerschmelzen. Da die meisten Füllstoffe inkompressible Feststoffe sind, kommt es zu starken Wechselwirkungen zwischen den Füllstoffen. Das Fließverhalten gefüllter Polymere ist daher sowohl durch die strukturviskosen Eigenschaften der Polymere als auch durch die Interaktionen zwischen den Füllstoffen sowie zwischen Füllstoff und Polymer geprägt. Diese Wechselwirkungen werden wesentlich durch Art, Form und Konzentration der Füllstoffe beeinflusst. Dies führt teilweise zu Viskositätsunterschieden und damit Schwankungen im Prozess [BBO+07, BHM19, Zha22].

Neben Füllstoffen kommen noch geringe Mengen von Additiven, Farbstoffen, Gleit- oder Trennmittel zum Einsatz. Die gelbliche Verfärbung von Phenolformmassen werden mithilfe von Ruß dunkel gefärbt [BHM19, Zha22]. Gleit- und Trennmittel tragen einerseits zur Verbesserung der Fließeigenschaften bei und verringern andererseits die Haftung der Formmassen an Maschinen- und Werkzeugoberflächen.

Prozessführung im Spritzgießen

Das Duroplast-Spritzgießen ermöglicht die reproduzierbare Herstellung von funktions-integrierten Formteilen mit hervorragenden Eigenschaften. Aufgrund der hohen Anfälligkeit für Prozessschwankungen durch Umwelt- und Lagerbedingungen sowie Chargen-schwankungen, ist eine stetige Prozessüberwachung notwendig. Um Prozessschwankungen auszugleichen, folgt eine manuelle Anpassung durch geschultes Personal, was zu einem hohen personellen Aufwand mit subjektiven Qualitätsergebnissen führt [Höe14]. Eine modellprädikative Regelung des Duroplast-Spritzgießprozesses könnte Prozessschwankung durch stetige Anpassung der Stellgrößen bereits im Prozess anpassen.

Im folgenden Kapitel wird zunächst der konventionelle Spritzgießprozess mit Fokus auf das Spritzgießen von rieselfähigen Duroplasten vorgestellt. Zudem werden die Störeinflüsse auf die Reproduzierbarkeit und die Auswirkung auf die Bauteilqualität diskutiert. Abschließend werden Regelungskonzepte zur Prozessführung über eine Werkzeuginnendruckregelung beschrieben.

Konventioneller Spritzgießprozess

Das konventionelle Spritzgießen ist ein zyklischer Fertigungsprozess zur reproduzierbaren Herstellung von funktionsintegrierten Kunststoffformteilen. Der Prozessablauf wird durch maschineninterne Regelkreise so geregelt, dass die Maschinengrößen reproduzierbare Verläufe aufweisen [JM04]. Dies führt bei identischen Prozessbedingungen zu identischen Bauteilen über alle Zyklen hinweg [TBF+18]. Für die Bauteilmasse und die geometrischen Abmessungen ist ein ideal eingestellter Umschaltzeitpunkt zwischen Einspritz- und Nachdruckphase essenziell [CZH21]. Ein optimaler Umschaltzeitpunkt kann sich durch Störungen im Prozess verschieben und muss demnach stetig überwacht und notfalls angepasst werden. Die Überwachung des idealen Umschaltzeitpunkts erfolgt bei vorhandener Sensortechnik über den Werkzeuginnendruck. Der Werkzeuginnendruckverlauf gibt Aufschluss über die Position des idealen Umschaltzeitpunkts. Beispielsweise kann eine Spitze im Werkzeuginnendruckverlauf nach der Kompressionsphase auf einen verspäteten Umschaltzeitpunkt zwischen Einspritz- und Nachdruckphase hindeuten. Dadurch können Spritzgrate im Bauteil sichtbar werden. Neben optischen Markierungen beeinflusst ein verspäteter Umschaltzeitpunkt auch die Orientierung und die Eigenspannungen im Formteil negativ [Jar19]. Ein verfrühter Umschaltzeitpunkt hingegen wird durch einen Werkzeuginnendruckabfall in der Kompressionsphase deutlich. Dies führt zu einer Verlangsamung der Fließfront und einer wesentlichen Füllung der Kavität durch den Nachdruck. Daraus resultieren

anisotrope Orientierungen, Umschaltmarkierungen und bei zu geringem Ausgleich der Schwindung Einfallstellen am Bauteil [Jar19].

Das schneckenpositionsabhängige Umschalten zwischen Einspritz- und Nachdruckphase hat sich nahezu vollständig etabliert. Ein einstellig prozentualer Anteil der Spritzgießmaschinen schaltet werkzeuginnendruckabhängig um. Die Reproduzierbarkeit beider Verfahren ist ähnlich hoch [KVV+10]. Durch das Umschalten an einem vorher definierten Positionswert der Schnecke wird der Prozess durch Dosier- und Materialschwankungen sowie Änderungen im Schließverhalten der Rückstromsperre maßgeblich beeinflusst [Sch11]. Die Prozessdaten müssen demnach stets überwacht werden, damit Veränderungen im Prozessablauf detektiert und manuell durch geschultes Personal angepasst werden können. Beim werkzeuginnen-druckabhängigen Umschalten wird beim Erreichen eines definierten Schwellwerts des Werkzeuginnendrucks umgeschaltet. Dadurch können Schwankungen in der Einspritzphase, die z.B. durch die Änderung des Schließverhaltens der Rückstromsperre entstehen, kompensiert werden [SKM14]. Nachteilig ist die hohe Viskositätsabhängigkeit des Verfahrens und der notwendige Einsatz von teurer Sensortechnik [KVV+10, Sch11].

Spritzgießen rieselfähiger Duroplaste

Das Spritzgießen von rieselfähigen Duroplasten ist vom Verfahrensablauf dem konventionellen Spritzgießen von Thermoplasten sehr ähnlich. Der große Unterschied liegt in der Temperaturführung von Werkzeug und Einspritzaggregat. Um ein vorzeitiges Vernetzen im Zylinder zu vermeiden, darf die Zylindertemperatur je nach Material 60 °C bis 90 °C nicht überschreiten [BBO+07, Höe14, Zha22]. Der Zylinder wird zu diesem Zweck mit Wasser oder Öl temperiert [BBO+07, Zha22]. Duroplast-Spritzgießmaschinen sind zudem mit eigens für die Duroplastverarbeitung angepassten Schnecken ausgestattet. Diese haben nur zwei Zonen mit geringerer Gangtiefe, damit die Kompression des Materials gering gehalten wird. Zudem wird beim Duroplast-Spritzgießen in den meisten Fällen ohne Rückstromsperre und Nadel-verschlussdüse gearbeitet. Die Schnecken sind mit einem Längen-zu-Durchmesser-Verhältnis von 12 bis 15 im Vergleich zum Thermoplast-Spritzgießen kürzer [BBO+07]. Die Werkzeugtemperatur beim Duroplast-Spritzgießen ist mit 150 °C bis 200 °C wesentlich höher als beim Thermoplast-Spritzgießen. Das Werkzeug wird entweder elektrisch oder über eine Ölheizung temperiert [BBO+07, Höe14, Zha22].

Rieselfähige Formmassen werden durch die Rotationsbewegung der Schnecke transportiert und durch die Dissipation und Wärmeleitung des Zylinders plastifiziert. Hierbei darf die reaktive Masse nicht vernetzen, weshalb die Zylindertemperatur deutlich geringer eingestellt wird als beim Thermoplast-Spritzgießen [BBO+07, Eng15, Zha22]. Der Aushärtegrad der Formmasse soll im Aggregat möglichst geringgehalten und anschließend im Werkzeug schnell erhöht werden [BBO+07, Zha22]. Die nötige Vernetzungsenergie wird durch die hohe Temperierung des Werkzeugs bereitgestellt. Die Formteile können bei hohen Temperaturen entformt werden, da diese durch die Vernetzung eine hohe Formbeständigkeit unter Wärme aufweisen [BBO+07]. Zum Zeitpunkt der Entformung ist das Bauteil noch nicht vollständig ausgehärtet. Das Bauteil vernetzt aufgrund der hohen Temperatur bei der Entformung während des Abkühlprozesses an der Luft weiter aus [Eng15, Zha22]. Die aufgeschmolzene Formmasse ist meist sehr niedrig viskos, wodurch große Fließweg-Wanddickenverhältnisse erreicht werden können. Allerdings kann es zu Gratbildung kommen, wenn die Passung der Maschine und des Werkzeugs nicht ausreichend genau (Trennfugen Duroplaste < 0,001 mm) ist [BBO+07, HMMM18].

Durch das umgekehrte Temperaturprofil im Zylinder und im Werkzeug entsteht ein für das Duroplast-Spritzgießen spezifischer Werkzeuginnendruckverlauf [Eng15, Höe14, Zha22]. Nachdem die Kavität nahezu voll-

ständig gefüllt wurde, schaltet die Schnecke analog zum konventionellen Spritzgießprozess von der geschwindigkeitsgeregelten Einspritzphase zur druckgeregelten Nachdruckphase um. Dieses Umschalten führt in der Regel zu einer Erhöhung des Werkzeuginnendrucks durch die weitere Förderung des Materials [Eng15, Zha22]. Der Nachdruck verdichtet die Masse innerhalb der Kavität [Eng15, Zha22]. Während beim Thermoplast-Spritzgießprozess die Verarbeitungsschwindigkeit ausgeglichen wird, wird beim Duroplast-Spritzgießen die Formmasse in der Kavität fast nur verdichtet. Während des Vernetzens findet aufgrund der Reaktion eine thermisch bedingte Ausdehnung statt, weshalb der Werkzeuginnendruck nach dem Umschalten weiter ansteigt [Eng15, Zha22].

Durch die deutlich höhere Werkzeugwandtemperatur wird die Viskosität der Masse an der Wand unmittelbar reduziert. Dadurch bildet sich eine niederviskose Randschicht, die zum Wandgleiten führen kann [Eng15, Zha22]. Hierbei unterscheiden sich beide Spritzgießverfahren, da beim Thermoplast-Spritzgießen von einer Werkzeugwandhaftung ausgegangen wird [Eng15, HM17, Zha22]. Das Fließprofil der Duroplaste beim Spritzgießen unterscheidet sich je nach Füllstoffart. In Abbildung 1 sind beide gängigen Fließprofile abgebildet.

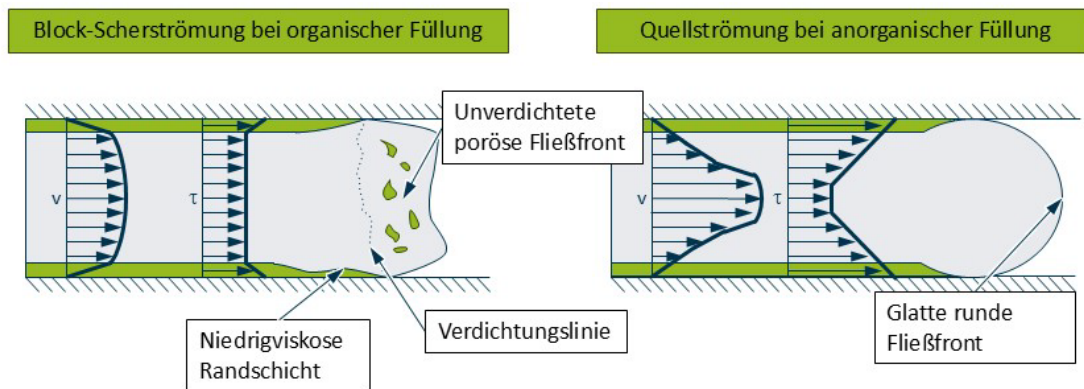


Abbildung 1: Strömungsprofile beim Duroplast-Spritzgießen je Füllstoff

Formmassen mit organischen Füllstoffen bilden vorwiegend eine Block-Scherströmung aus (vgl. Abbildung 1, links) [Eng15, Zha22]. Im Übergangsbereich zwischen der niederviskosen Randschicht und der hochviskosen Formmasse liegt eine sehr hohe Schergeschwindigkeit vor. Dies kann zu einem Abreißen der Formmasse in diesem Bereich führen, da die hochviskose Formmasse im Kernbereich eine hohe Schmelzefestigkeit durch das Schmelze-Füllstoff-System besitzt [Eng15, Zha22]. Die kältere, hochviskose Formmasse eilt in der Mitte voraus und hat einen porösen und unverdichteten Zustand [Eng15, Zha22]. Mit steigendem Fließweg oder bei reduzierten Wandstärken werden höhere Fließwiderstände in der Schmelze aufgebaut. Dadurch bildet sich eine Verdichtungslinie, ab der ein kontinuierlicher Wandkontakt vorliegt [Eng15, Zha22]. Bei anorganisch gefüllten Formmassen (z. B. Glasfasern und Glaskugeln) liegt vorwiegend eine Quellströmung vor (vgl. Abbildung 1, rechts). Organische Füllstoffe nehmen im Gegenteil zu anorganischen Füllstoffen das Harz nicht auf und können sich im flüssigen Harz mit geringem Widerstand bewegen. Dadurch ist die Schmelzefestigkeit der hochviskosen Formmasse im Kernbereich geringer als bei organischen Formmassen. Dies führt zu geringeren Schergeschwindigkeiten und damit auch zu keinem Abreißen zwischen Randschicht und Kernbereich [Eng15, Zha22]. Daraus resultiert ein moderater Druckanstieg während der Füllphase, was bei einem werkzeuginnendruckgesteuerten Umschaltverfahren zu Herausforderungen führen kann.

Störeinflüsse auf die Reproduzierbarkeit von Spritzgießprozessen

In der Serienproduktion treten trotz unveränderten Maschineneinstellungen und idealem Regelverhalten der Maschine Prozessschwankungen auf. Diese werden durch Störeinflüsse auf den Prozess ausgelöst. Typische

Störeinflüsse beim Spritzgießen sind Änderungen im thermischen Haushalt der Maschine, Material- und Umweltveränderungen sowie der Verschleiß von Maschinenkomponenten und Werkzeug [BSS+09, Kaz09, KW09]. Diese Veränderungen im Prozess müssen angepasst werden, wenn die resultierende Bauteilqualität zu stark von den Mindestanforderungen abweicht. Aus der Wechselwirkung zwischen Maschinenparametern und den Störgrößen können Prozessgrößen abgeleitet werden, die eine direkte Korrelation zur Bauteilqualität aufweisen. Diese Prozessgrößen beschreiben zum Beispiel den Zustand der Schmelze im Aggregat und im Werkzeug und eignen sich daher ideal zur Prozessüberwachung und -steuerung [JM04].

Bei der Klassifizierung der Störeinflüsse kann zwischen einmaligen und zyklusübergreifenden Störeinflüssen unterschieden werden. Einmalige Störeinflüsse sind zufällige Prozessschwankungen, die von Schuss zu Schuss variieren können. Diese können zum Beispiel durch Verunreinigungen im Material oder durch unterschiedlichem Schließverhalten der Rückstromsperre entstehen [Gor09, PGS12]. Zyklusübergreifende Prozessschwankungen führen zu einer dauerhaften Veränderung des Prozesses und damit auch zu dauerhaften Qualitätsschwankungen. Diese können beispielsweise durch den Wechsel der Materialcharge entstehen. Die Materialcharge kann sich hinsichtlich ihrer Viskosität, der Zusammensetzung, der Molekulargewichtsverteilung und des Restfeuchtegehalts unterscheiden [Kud97, KW09].

Zu den maschinenbedingten Prozessschwankungen gehören alle Veränderungen, die direkt durch die Maschine bedingt sind wie das zeitabhängige Maschinenverhalten sowie mögliche Deformationen der Maschine und des Werkzeugs. Zudem kann das aufdosierte Schmelzevolumen durch die Dekompression am Ende der Dosierphase variieren, da eine gewisse unbekannte Menge an Schmelze aus dem Schneckenorraum zurückfließen kann [HK23]. Somit verändert sich der Schmelzeffluss in die Kavität für jeden Spritzgießzyklus [JM04]. Veränderungen des Schließverhaltens der Rückstromsperre treten nur beim Thermoplast-Spritzgießen auf, da beim Duroplast-Spritzgießen auf eine Rückstromsperre verzichtet wird. Gleiches gilt für die Variation des Schmelzevolumens durch Dekompression, da beim Duroplast-Spritzgießen keine Dekompression nach dem Dosieren stattfindet [HK23, MBH+90]. Durch das hohe Druckniveau beim Duroplast-Spritzgießprozess, kann es zu Deformationen an der Maschine oder am Werkzeug kommen [BBO+07].

Materialbedingte Prozessschwankungen resultieren aus Veränderungen des eingesetzten Materials. Diese Veränderungen können bereits bei der Verarbeitung verschiedener Chargen des gleichen Materials auftreten. Chargenschwankungen resultieren aus schwankenden Produktionsbedingungen, Rezepturveränderungen des Materialherstellers sowie unzureichender Vermischung von Materialchargen. Diese haben einen direkten Einfluss auf die rheologischen, thermischen und optischen Eigenschaften des Materials. Insbesondere rheologische Veränderungen haben einen direkten Einfluss auf den Spritzgießprozess und damit auf die Bauteilqualität [Fra19]. Eine höhere Viskosität bedingt einen höheren Einspritzdruck und verschiebt dadurch die ideale Position des Umschaltpunkts zwischen Einspritz- und Nachdruckphase [Hei14]. Besonders anfällig für Chargenschwankungen sind rieselfähige Duroplaste. Diese führen zu stetigen Veränderungen des Prozessverlaufs und damit zur Verschiebung des idealen Umschaltpunkts. Schwankungen der Zylinder- und Werkzeugtemperatur resultieren aus Mess- und Regelschwankungen. Sie entstehen durch das träge Übertragungsverhalten und betragen aufgrund der langsamen Temperaturveränderung von Stahlkomponenten nur wenige Grad [HG15]. In den Kühlkanälen des Werkzeugs können sich über die Zeit je nach Kühlmedium mineralische Ablagerungen und Korrosionsschichten entwickeln, die die Kühlleistung lokal verringern. Die verringerte Kühlleistung resultiert aus einem effektiv geringeren Kühlkanaldurchmesser und der dadurch verringerten Möglichkeit zur Wärmeabfuhr oder Wärmezufuhr [HG15, Gri10]. Dadurch verlängert sich die Kühlzeit und die Ausschussquote. Dies kann jedoch durch Beschichtungen, korrosionsbeständige Stähle, regelmäßige

Werkzeugwartungen oder eine Vorbehandlung des Kühlmediums verhindert werden [HG15, Gri10]. Prozessschwankungen können auch durch Umgebungseinflüsse entstehen. So führen höhere Umgebungstemperatur und eine höhere relative Luftfeuchtigkeit zu schwereren Bauteilen beim Thermoplast-Spritzgießen [WK08]. Abweichende Umgebungseinflüsse haben einen direkten Einfluss auf die resultierende Bauteilqualität beim Duroplast-Spritzgießen. Eine höhere relative Luftfeuchtigkeit führt unter anderem zum Anstieg der Materialfeuchte der Formmasse. Durch eine höhere Materialfeuchte resultiert eine höhere Fließfähigkeit und eine höhere Reaktivität [Sch18]. Um konstante Bauteilqualitäten auch bei variierenden Umwelteinflüssen zu gewährleisten, wurde vom Labor für Fertigungssysteme der TH Köln, Köln, ein selbstlernendes Duroplast-Analyseverfahren entwickelt [URL21]. Das künstliche neuronale Netzwerk ist auf die Verarbeitungsmaschine angepasst und erfasst 23 verschiedene Produktionsparameter. Daraus kann eine Vorhersage mit einer Genauigkeit von 97,8 % über die Viskosität des Materials getroffen werden [URL21].

Ein wesentlicher Störeinfluss bei der Produktion von spritzgegossenen Formteilen aller Werkstoffklassen sind Produktionsunterbrechungen und die daraus resultierenden Anfahrvorgänge. Ungeplante Unterbrechungen können z. B. eintreten, wenn Bauteile nicht richtig entformt werden und diese manuell entfernt werden müssen. Durch den Maschinenstillstand nimmt die Verweilzeit der Kunststoffschmelze erheblich zu. Dies kann zum Abbau der Polymerketten im Schneckenorraum führen [BBO+07, BHM19]. Bei duroplastischen Formmassen existiert hingegen die Möglichkeit zur Vernetzung im Schneckenorraum, was eine manuelle Reinigung der Düsenspitze notwendig macht. Die Schmelzequalität wird durch eine zusätzliche Verweilzeit negativ beeinflusst, weshalb die Bauteile der ersten Anfahryklen aufgrund potenzieller Qualitätsunterschiede als Ausschuss klassifiziert werden [Bic12].

Prozessführung über eine Werkzeuginnendruckregelung

Bei konventionellen marktüblichen Spritzgießmaschinen werden die Maschinengrößen hauptsächlich über PID-Regler geregelt. Durch die direkte Regelung von Prozessgrößen können Prozessschwankungen und Störungen jedoch effektiver ausgeglichen werden. Aufgrund der dadurch resultierenden erhöhten Prozessstabilität können die optimalen Grenzen des Prozessfensters besser ausgenutzt werden. Für die Regelung von Prozessgrößen werden aufgrund des nichtlinearen Materialverhaltens fortgeschrittenere Regelungsansätze benötigt. Ansätze hierfür sind iterativ lernende Regelungen (ILR) und modellprädiktive Regelungen (MPR) [Hor24, TBF+18, Vuk24].

Bisher wurden ILR nur zur Regelung des Werkzeuginnendruckes in der Nachdruckphase eingesetzt [HAH+17, LWN+10]. Die MPR wurde bereits für die Einspritzphase [Dub01] und die Nachdruckphase [RSH+14], als auch für die Restkühlphase [PDS06] untersucht. Zudem gibt es Ansätze, die die Einspritz- sowie Nachdruckphase kombiniert über den Werkzeuginnendruck regeln [Gru05, MS09]. Dennoch findet zwischen beiden Prozessphasen ein diskreter Umschaltvorgang statt. Der erste Ansatz bei dem beide Phasen über den Werkzeuginnendruck als Regelgröße geregelt wurde, umfasst einzelne Modelle für die jeweiligen Phasen, zwischen denen bei Erreichen eines Schwellenwerts am angussfernen Werkzeuginnendrucksensor geschaltet wird [SAV+19]. Bei allen Verfahren werden die einzelnen Phasen über eigene Prozessmodelle definiert.

Eine phasenübergreifende Werkzeuginnendruckregelung über eine MPR wurde in Zusammenarbeit zwischen dem IKV und dem IRT entwickelt [Hor24, Vuk24]. Bei einer MPR werden dynamische Modelle des zu regelnden Prozesses verwendet, um das zukünftige Prozessverhalten zu präzisieren. Unter Berücksichtigung der Prädiktion sowie einer Echtzeitoptimierung berechnet die MPR eine optimierte Stellgröße [Hor24, Vuk24]. Mit einer MPR kann somit eine höhere Prozessstabilität erreicht und Prozessschwankungen effektiv ausgeglichen werden. Der modellprädiktive Ansatz dieser Arbeiten wurde um eine pVT-Optimierung und eine

automatisierte Siegelpunktbestimmung ergänzt. Das hinterlegte pvT-Modell bildet eine prozessnahe Beschreibung des Material-verhaltens ab. Dadurch können materialbedingte Störeinflüsse durch das Abtasten ausgeglichen werden. Durch die automatisierte Siegelpunktbestimmung wird die Nachdruckzeit anhand der Steigung des Schneckendruckverlaufs je Zyklus angepasst. Durch die pvT-Optimierung und der automatisierten Siegelpunktbestimmung können Qualitätsveränderungen durch thermische und materialbedingte Störeinflüsse effektiv reduziert werden. Insgesamt konnte mit diesem Ansatz die Ressourceneffizienz gesteigert und die Arbeitsbelastung von geschultem Personal reduziert werden [Hor24, Vuk24]. Diese Art der Prozessführung wurde bislang nur für Thermoplaste angewendet und untersucht. Durch material- und maschinenseitige Unterschiede zwischen dem Thermoplast- und Duroplast-Spritzgießen kann dieses Konzept nicht exakt übernommen werden. Zum einen muss das unterschiedliche Fließverhalten beim hinterlegten Prozessmodell berücksichtigt werden und zum anderen müssen maschinenseitige Unterschiede, wie das Fehlen einer Rückstromsperre, Betrachtung finden.

Zwischenfazit

Duroplastische Formmassen eignen sich aufgrund ihrer zahlreichen guten Material-eigenschaften und den vergleichsweise niedrigen Materialkosten zu Kunststoffen mit ähnlichem Eigenschaftsprofil hervorragend für industrielle Anwendungen [HT08, URL13]. Das Duroplast-Spritzgießen ermöglicht die reproduzierbare Serienfertigung von funktions-integrierten Formteilen mit guten mechanischen, thermischen und elektrisch isolierenden Eigenschaften. Die Verarbeitung von duroplastischen Formmassen ist jedoch mit einigen materialseitigen, maschinellen und umweltbedingten Störeinflüssen verbunden, die bei der Verarbeitung eine große Expertise und geschultes Maschinenpersonal voraussetzt. Das Potenzial von duroplastischen Formteilen kann verstärkt für industrielle Anwendungen nutzbar gemacht werden, wenn Störeinflüsse im Prozess automatisiert kompensiert werden. Die vorgestellten Störeinflüsse haben einen direkten Einfluss auf den Verarbeitungsprozess. Dadurch schwankt die Bauteilqualität über die Serienproduktion und führt zu einer hohen Ausschussrate. Im schlimmsten Fall führen Störeinflüsse zu Produktionsstopps, bei denen eine manuelle Anpassung der Maschinengrößen vorgenommen und der Prozess erneut angefahren werden muss. Deshalb sind beim Duroplast-Spritzgießen eine stetige Überwachung und die Kontrolle des Prozesses zwingend erforderlich. Zur Detektion von Prozessschwankungen werden häufig protokollierte Werte relevanter Prozessgrößen betrachtet. Diese Messwerte besitzen jedoch keine direkte Korrelation zur resultierenden Bauteilqualität [GM16, HHV+23]. Viel eher müssen Prozessgrößen über den gesamten Spritzgießzyklus analysiert werden, um den Zustand der reaktiven Masse in der Kavität durch Anpassungen im Prozess konstant zu halten und damit die Qualitätsschwankungen zu senken. In vergangenen Forschungsarbeiten wurde eine phasenübergreifende Werkzeuginnen-druckregelung für das Thermoplast-Spritzgießen erfolgreich entwickelt. Damit ist es möglich verschiedene Störeinflüsse im Prozess zu erkennen und die Bauteilqualitätsschwankungen sowie den Ausschuss zu reduzieren [Hor24, Vuk24]. Für das Duroplast-Spritzgießen sind derartige Reglungsansätze noch nicht erforscht. Ein auf das Spritzgießen von rieselfähigen Formmassen angepasster Reglungsansatz in Anlehnung an [Hor24] und [Vuk24] soll im Rahmen dieses Vorhabens untersucht werden, wobei eine Analyse der Reglerperformance anhand unterschiedlicher Kriterien und die Bewertung der Übertragbarkeit sowie der Wirtschaftlichkeit erfolgt.

1.5 Arbeitspaket 2: Konstruktion eines Werkzeugeinsatzes

Dieser Abschnitt umfasst die Beschreibung der in den Versuchen eingesetzten Werkzeug- und Anlagentechnik inklusive des konstruierten Werkzeugeinsatzes und die Charakterisierung der verwendeten Materialien. Um das Vorgehen im Projekt nachvollziehbar darzustellen, wird dieses Arbeitspaket vor Arbeitspaket 1 dargestellt.

Werkzeug- und Anlagentechnik

Die verwendete Anlagentechnik besteht im Wesentlichen aus einer konventionellen Spritzgießmaschine, dem Spritzgießwerkzeug, den verschiedenen für diese Arbeit relevanten Werkzeugeinsatzes und abschließend der externen Anlagentechnik sowie Software zur Erfassung der Prozessdaten. Hinzu kommen Peripheriegeräte wie Temperiergeräte. Die einzelnen Komponenten werden im Folgenden erläutert.

Spritzgießmaschine und –werkzeug

Die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Spritzgießmaschine ist eine vollelektrische Allrounder 370 A 600-290 von der Arburg GmbH + Co KG., Loßburg. Sie verfügt über eine Spritzeinheit mit einem Schneckendurchmesser von 30 mm und eine wirksame Schneckenlänge L/D von 15. Die Schließeinheit verfügt über eine variable Werkzeug-einbauhöhe von 200 - 400 mm mit einer maximalen Schließkraft von 600 kN [NN22]. Weitere nennenswerte Maschinendaten werden in Tabelle 1 aufgelistet.

Technische Daten	Einheit	Wert
max. Schneckenweg	[mm]	150
max. Dosiervolumen	[cm ³]	144
max. Einspritzdruck	[bar]	2.000
max. Einspritzvolumenstrom	[cm ³ /s]	269,39
max. Nachdruck	[bar]	1.600
Schneckenumfangsgeschwindigkeit	[m/min]	60

Tabelle 2: Technische Daten Arburg 370 A 600-290 [NN22]

Das verwendete Spritzgießwerkzeug ist ein Wechselformwerkzeug mit modularem Aufbau. Die Kavität inklusive der Kühlkanalgeometrie ist Teil eines Wechselformeinsatzes und kann beliebig ausgetauscht werden. Somit ist die Untersuchung von verschiedenen Bauteil-geometrien bei gleichem Stammwerkzeug möglich. Auf der Düsenseite des Werkzeugs kommen zwei Sensoren zur Messung des Werkzeuginnendrucks zum Einsatz, die angussnah sowie -fern positioniert sind. Der angussnahe Sensor ist ein Druck- und Temperatursensor des Typen 6190CA der Firma Kistler Instrumente AG, Winterthur, Schweiz, wohingegen der angussfern positionierte Sensor ein Drucksensor des Typen 6157C von Kistler Instrumente AG ist. Die Werkzeug- und Aggregattemperierung erfolgt über zwei separate Temperiergeräte des Typs 300L der Regloplas AG, St. Gallen, Schweiz. Aufgrund der hohen Werkzeugtemperatur, die für die Bereitstellung der nötigen Vernetzungsreaktion von Duroplasten nötig ist, werden beide Werkzeughälften mit Öl temperiert. Die Einzugszone des Einspritzaggregats wird über ein Temperiergerät des Modells GWK teco cs 160 der gwk Gesellschaft Wärme Kältetechnik mbH, Meinerzhagen, temperiert.

Verwendete Bauteilgeometrien und Materialien

Im Rahmen dieser Arbeit werden drei Bauteilgeometrien mit unterschiedlicher Komplexität untersucht. In Abbildung 2 sind diese inklusive der Sensorpositionen abgebildet.

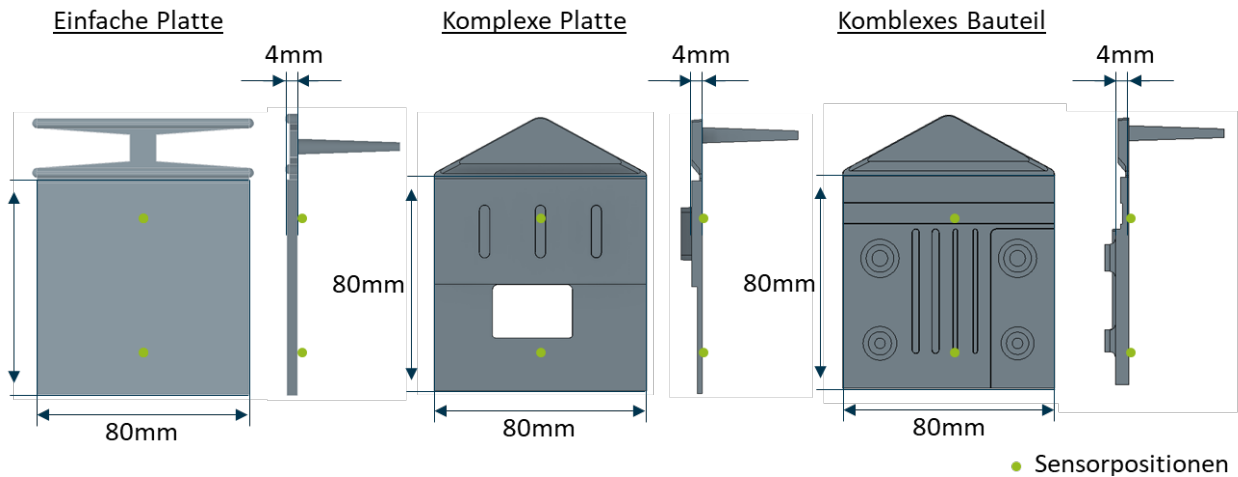


Abbildung 2: Verwendete Bauteilgeometrien

Jede Bauteilgeometrie besitzt die Grundmaße $80 \times 80 \times 4 \text{ mm}^3$ und wird über einen Stangen- und Filmanguss gefüllt. Die „einfache Platte“ (vgl. Abbildung 2, links) hat ein Schussvolumen ohne Anguss von $25,6 \text{ cm}^3$. Beide Sensoren sind mittig entlang der Platte positioniert. Die „komplexe Platte“ (vgl. Abbildung 2, Mitte) hat im oberen Bereich eine Dicke von 4 mm und nach dem Dickensprung eine Dicke von 2 mm. Dort sind drei Rippen positioniert bei denen Entformungsschrägen vorgesehen sind. Zudem ist mittig eine rechteckige Einsparung positioniert, die die Schmelzefront teilt, sodass sich eine Bindungsnaht ergibt. Das Bauteil wird ebenfalls über ein Filmanguss gefüllt und hat ein Bauteilvolumen von $22,40 \text{ cm}^3$. Das „komplexe Bauteil“ (vgl. Abbildung 2, rechts) verfügt über verschiedene kunststofftechnisch relevante Funktionselemente, wie Rippen, Dome und Dickensprünge auf. Die vier Rippen weisen Wanddicken von 1,5 mm bis 2,5 mm auf und sind mit Entformungsschrägen versehen. Auf der Platte sind vier Dome rechtwinklig zueinander angeordnet. Die Dome haben einen Durchmesser von 4 mm bis 6 mm und verfügen ebenfalls über Entformungsschrägen. Das komplexe Bauteil verfügt über einen Dickensprung von 4 mm auf 2 mm. Für diese Bauteil-geometrie wird ein das gleiche Angusssystem wie für das zweite Bauteil verwendet. Dabei verfügt es über ein Schussvolumen von $27,5 \text{ cm}^3$.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden zwei verschiedene Phenol-Formaldehyd-Kondensationsharze (PF) der Firma Bakelite Synthetics, Atlanta, USA, verwendet, die sich anhand ihrer Füllstoffkonfiguration unterscheiden. Das Material PF1110 ist eine Phenolformmasse, die anorganisch gefüllt und mit Glasfasern verstärkt ist. Es weist einen niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten, eine sehr hohe Druckfestigkeit und eine hohe Steifigkeit auf. Anwendung findet PF1110 vor allem als Kfz-Motoranbauteile, Bremskolben, Pumpenteile und Riemenscheiben [NN22a]. Des Weiteren wird PF6680 untersucht, das sich durch eine geringe Abrieb und eine gute Medienbeständigkeit auszeichnet. Es ist sowohl mit Glaskugeln als auch mit -fasern gefüllt und wird überwiegend für Kolben- sowie Führungselemente eingesetzt. [NN22b] Beide Materialien zeichnen sich zusätzlich, wie für Phenolharze üblich, durch eine gute Dimensionsstabilität und einer Hochtemperaturbeständigkeit aus [NN22a, NN22b]. Das PF1110 hat einen relativ hohen Füllstoffgrad im Vergleich zum PF6680. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Eigenschaften von PF1110 und PF6680 ist in Tabelle 2 einzusehen.

Eigenschaften	Einheit	Prüfbedingung	PF1110	PF6680
Schüttdichte (Formmasse)	[g/cm ³]	-	0,8	0,78
Verarbeitungsschwindigkeit	[%]	-	0,15	0,25
Dichte	[kg/m ³]	-	2.050	1.710
Zugfestigkeit	[MPa]	(5 mm/min)	120	115
Biege-E-Modul	[MPa]	-	25.000	14.500
Formbeständigkeitstemperatur	[°C]	(8,00 MPa)	195	170

Tabelle 2: Eigenschaften von PF1110 und PF6680 im Vergleich [NN22a, NN22b]

Eine Übersicht der gängigsten Einstellgrößen und die für diese Materialien üblichen Kennwerte ist in Tabelle 3 aufgelistet.

Einstellgröße	Einheit	PF1110	PF6680
Massetemperatur	[°C]	80 – 100	80 – 100
Werkzeugtemperatur	[°C]	160 – 190	160 – 190
Härtezeit	[s]	10 - 20	10 – 20
Staudruck	[bar]	5 – 20	5 – 20
Nachdruck	[-]	60 % des Spritzdruckes	60 % des Spritzdruckes

Tabelle 3: Gängige Einstellgrößen beim Spritzgießen von PF1110 und PF6680

Die unterschiedlichen Füllstoffe und Füllstoffgehalte von PF1110 und PF6680 machen sich in einem stark unterschiedlichen Füllverhalten (vgl. Abbildung 3) während der Füllphase bemerkbar. Dies sollte während der Füllung zu unterschiedlichen lokalen Druckniveaus in der Kavität führen. Damit stellen die beiden Materialien einen spannenden Vergleich für einen Prozess mit alternativem Prozessregelungskonzept dar.

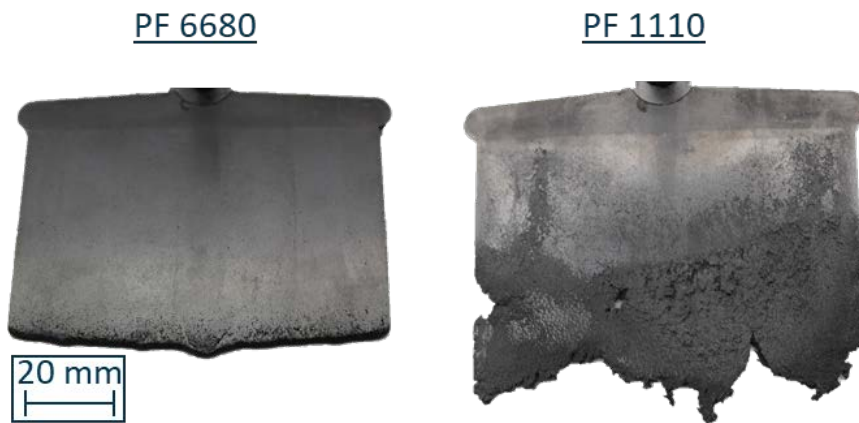


Abbildung 3: Vergleich des Füllverhaltens zwischen PF 6680 und PF 1110

Messverfahren zur Bestimmung der Bauteilqualität

Zur Auswertung der Versuchsreihen werden verschiedene Analysen durchgeführt. Diese erlauben die Reglerperformance hinsichtlich der resultierenden Bauteileigenschaften und der Prozessdaten zu bewerten. Zunächst wird die Herangehensweise der Messung der Formteildicke und der Formteilmasse beschrieben. Anschließend erfolgt eine Einführung über die Messung der Oberflächengüte und der Maßgenauigkeit. Ferner folgt eine Erläuterung zur Probenpräparation von Zugstäben aus den hergestellten Platten und eine Beschreibung der Vorgehensweise bei der Durchführung der Zugversuche. Abschließend wird die Auswertung der Prozessdaten und die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der Regler beschrieben.

Messung der Formteildicke

Die Messung der Formteildicke dient in erster Linie zur Identifizierung der resultierenden Maßhaltigkeit der verschiedenen Versuchskörper. Die Messung der Formteildicke wird mit einer digitalen Bügelmessschraube IP65 der Firma Mitutoyo, Kawasaki, Japan, durchgeführt. Die Messgenauigkeit der Bügelmessschraube beträgt $\pm 2 \mu\text{m}$. Aufgrund der unterschiedlichen Bauteilgeometrie wird die Messung an unterschiedlichen Punkten vorgenommen. Eine genaue Übersicht der Messpunkte je Bauteil ist in Abbildung 4 dargestellt.

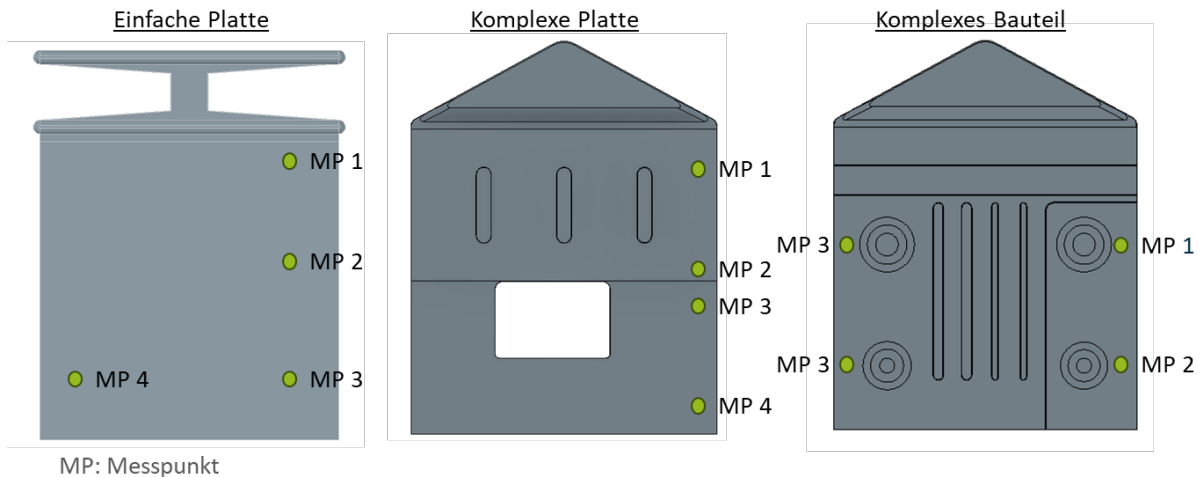


Abbildung 4: Übersicht über die Messpunkte (MP) für die Dickenmessung je Bauteilgeometrie

Messung der Formteilmasse

Ein weiterer Indikator für die Prozessstabilität ist die Formteilmasse. Durch die Formteilmasse können zudem Aussagen über das Füllverhalten, dem Materialeinsatz dem Schwindungsverhalten und der Maßhaltigkeit getätigt werden. Für die Messung der Formteilmasse wird eine Waage des Typs Signum 3 der Sartorius AG, Göttingen, verwendet. Die Waage misst mit einer Genauigkeit von 0,01 g. Vor der Messung wird das Angussystem der Formteile mit einer Präzisionssäge entfernt, um die Vergleichbarkeit der Proben sicherzustellen. Aus den Einzelweltergebnissen wird ein Mittelwert und die Standardabweichung ermittelt. Zudem wird zur Beurteilung der Prozessstabilität die Bauteilmasse je Schuss betrachtet.

Messung der Oberflächenqualität anhand des Glanzgrades

Die Oberflächenqualität wird an der glatten Rückseite der Prüfkörper mit dem Spectro-Guide der Firma BYK-Gardner GmbH, Geretsried, gemessen. Dafür wird bei jeder Platte in der Mitte drei Werte (links, mittig, rechts) gemessen. Für die Messung des Glanzes werden jeweils zehn Bauteile gemessen.

Messung der Maßgenauigkeit

Für die Messung der Maßgenauigkeit der Formteile werden 3D-Aufnahmen mithilfe des GOM ScanCobot der Carl Zeiss IQS Deutschland GmbH, Oberkochen, getätigt. Das System vergleicht die vollständige 3D-Ist-Geometrie des Bauteils mit dem CAD-Modell, wodurch die Bewertung der Maßhaltigkeit dieser Bauteile möglich wird. Über das mitgelieferte Computerprogramm ZEISS INSPECT der Carl Zeiss IQS Deutschland GmbH können Messpositionen für das optische Messsystem festgelegt und Polygonnetze aus Punktwolken erstellt werden. Mehrere Kameras und Sensoren erfassen den Winkel der Lichtreflektion des Objekts oder die Veränderung des Lichtmusters, wodurch eine entsprechende 3D-Aufnahme des Objekts entsteht [NN23, NN24].

Im Rahmen der Maßhaltigkeitsuntersuchungen werden drei Versuchsteile pro Prozess (konventionell, PID-Regler, MPR, siehe Kap. 7.2) sowohl für die „komplexe Platte“ als auch das „komplexe Bauteil“ vermessen. Die Maßhaltigkeit wird anhand ausgewählter Bauteilstrukturen analysiert. Hierzu zählen unter anderem die

Abstände zwischen Rippenstrukturen und Kanten, die Höhe und der Durchmesser von Domstrukturen und die Ebenheit spezifischer Flächen. Eine Übersicht der Messstrecken für beide Bauteilgeometrien ist in Abbildung 5 einzusehen. Aus den entsprechenden Abweichungswerten wird pro Regelungskonzept ein Mittelwert gebildet, der zum Vergleich herangezogen wird. Bei Messstrecke 5 und 10 werden jeweils die Höhe des Dickensprungs gemessen. Die Rippenhöhenunterschiede zwischen der linken und mittigen Rippe bei der komplexen Platte werden in Messstrecke 6 analysiert. Messstrecke 7 dient zur Beurteilung des Höhenunterschieds zwischen der mittigen und rechten Rippe.

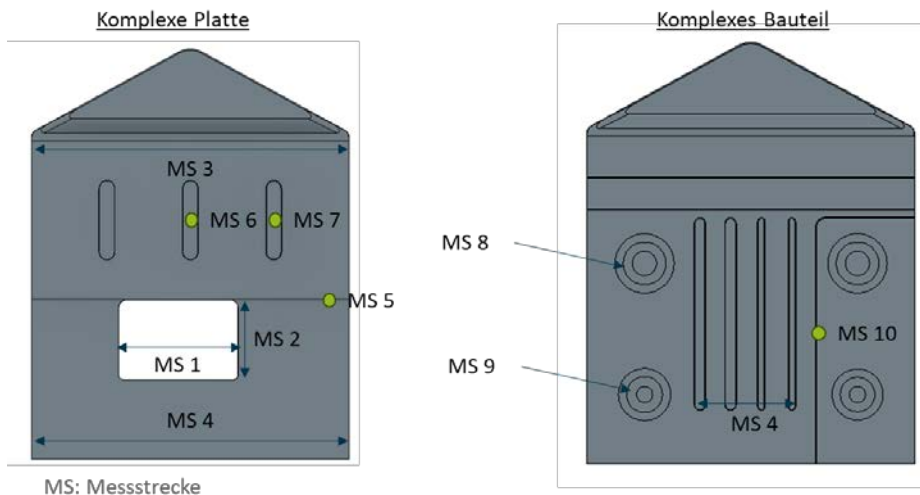


Abbildung 5: Übersicht über die Messstrecken je Bauteilgeometrie

Messung der mechanischen Eigenschaften

Die Zugprüfung zur Identifizierung von Zugfestigkeit und E-Modul werden an einer AllroundLine Z150 der Firma ZwickRoell GmbH & Co. KG, Ulm, durchgeführt. Zudem wird die Kraftmessdose HMB Typ U3 und ein Dehnungsaufnehmer des Typs MultiXtens von ZwickRoell bei den Versuchen verwendet. Alle Versuche werden bei einer Nennlast von 10 kN durchgeführt. Die Geschwindigkeit zur Zugmodulbestimmung sowie die Prüfgeschwindigkeit beträgt 5 mm/min. Hierfür werden aus der „einfachen Platte“ für jedes Material fünf Zugstäbe in und quer zur Fließrichtung gefräst.

Die Zugstäbe werden entsprechend der Vorgaben gemäß DIN EN ISO 527-2:2012 gefräst. Aufgrund der einschränkenden Geometrie der „einfachen Platte“ von 80x80x4 mm³ kommen für diese Untersuchung nur Zugstäbe des Typs 1BA mit einem Reduktionsfaktor 1:2 in Frage. Zur Herstellung der Prüfkörper wird die Platte in drei gleichmäßige Streifen unterteilt. Da die mechanischen Kennwerte sowohl in als auch quer zur Fließrichtung ermittelt werden, werden zwei Platten in und zwei quer zur Fließrichtung präpariert sowie anschließend beschriftet. Diese Streifen werden im nächsten Schritt von einer CPM 4030 der isel Germany GmbH, Eichenzell, in die entsprechende Zugprüfkörperform gefräst. Dabei ergibt sich ein Probekörper mit einer Dicke von 4 mm, einer Breite in der Mitte von 5 mm mit einer Toleranz von 0,5 mm in positiver sowie negativer Richtung. Die Länge der Probekörper beträgt 60 mm [NN12]. Aufgrund der vorgegebenen Plattendicke weicht die Dicke des Zugkörpers um 2 mm von der Norm ab. Hierdurch kann ein negativer Einfluss auf die Prüfkonstanz resultieren.

Rauigkeitsmessung

Zur Messung der Rauheit wird auf das Tastschnittverfahren zurückgegriffen. Dabei wird ein Fühler über die zu messende Oberfläche über eine definierte Strecke geführt und misst die Abweichungen auf der Oberfläche. Zur Messung wird das MarSurf M 310 der Firma Mahr GmbH, Göttingen, verwendet. Die spezifizierte

Messlänge beträgt 15 mm mit einer Messgeschwindigkeit von 0,5 mm/s und dem Tastertyp 350 µm. Nach DIN EN ISO 21920-2:2022-12 wird die maximale Höhe R_z und der arithmetische Mittelwert der Höhe R_a gemessen. Dabei wird die maximale Höhe von der Einzelabschnittlänge abhängig gemacht, während die arithmetisch gemittelte Höhe auf der Länge der Messtrecke basiert [NN22c].

1.6 Arbeitspaket 1: Untersuchungen zur Formteilqualität beim Duroplast-Spritzgießen

Das Spritzgießen von Duroplasten basiert wegen den komplexen Eigenschaften, insbesondere der hohen Sensitivität bzgl. Störeinflüsse im Prozess oder der Lagerung und das Fließ-Härtungs-Verhalten, auf manuellen iterativen Einstellverfahren und fordert einen hohen Wissens- und Erfahrungsstand des Personals. Eine einfache Regelung des Spritzgießprozesses über das pVT-Verhalten, wie es bei Thermoplasten die gängige Praxis darstellt, ist durch die zusätzliche Abhängigkeit der Materialeigenschaften vom Fortschritt der Vernetzungsreaktion nicht möglich. Das Ziel ist demnach zunächst die Identifikation des Einflusses der Maschinen- und Prozessgrößen auf die Bauteilqualität, um auf dieser Basis ein reproduzierbares Regelungskonzept zur Erhöhung der Automatisierung zu entwickeln. Dazu wurden im Vorhinein Qualitätsmerkmale definiert, um einen Bewertungsrahmen zu schaffen. Als Grundlagen dient eine Umfrage aus der Industrie, die im Rahmen des zweiten projektbegleitenden Ausschusses (PA) durchgeführt wurde und die die Wichtigkeit der einzelnen Qualitätsmerkmale bewertet (vgl. Abb. 12). Die ausgewählten Qualitätsuntersuchungen werden in Kapitel 1.5 ausführlich dargestellt.

Erarbeitung eines Prozessfensters

Die praktischen Versuche erfolgen zunächst am Bauteil „einfache Platte“ (vgl. Kapitel 1.5). Es erfolgt im ersten Schritt die Bestimmung eines Prozessfensters und eines Zentralpunktes für die Einflussanalyse der einzelnen Maschinenparameter. Die Prozesseinstellungen für den Zentralpunkt orientieren sich an den Herstellervorgaben und es erfolgt ein iteratives Screening der Prozessparameter [NN22b]. Dabei wird folgender Zentralpunkt (vgl. Tab. 4) für die Untersuchungen erarbeitet.

Werkzeugtemperatur [°C]	Düsentemperatur [°C]	Umschalt- punkt [cm ³]	Einspritzvolu- menstrom [cm ³ /s]	Nachdruck- rampe [s]	Nachdruck [bar]	Vernet- zungszeit [s]
190	90	10	20	0,55	500	80

Tabelle 4: Einstellungen Zentralpunkt

Beschreibung und Erläuterung der Versuchspläne

Ziel des Versuchsplans ist es, die Einflüsse der Maschinenparameter und somit möglicher Regelparameter auf die Zielgrößen zu finden. Dabei soll der Kostenaufwand möglichst gering bleiben. Es werden verschiedene Maschinenparameter identifiziert, die sich grundsätzlich für die Regelung des Duroplast-Spritzgießprozesses eignen (vgl. Tabelle 4).

Um einen vertretbaren zeitlichen Rahmen für die Versuche einzuhalten, wurde ein teil-faktorieller Versuchsplan gewählt. Dieser hat gegenüber einem vollfaktoriellen Versuchsplan den Vorteil, dass mehr Faktoren in weniger Versuchspunkten untersucht werden können. Dies geht aber mit dem Nachteil einher, dass die Faktoren miteinander interagieren [Kle20].

Bei dem verwendeten Versuchsplan handelt es sich um einen 2^{7-3} -Versuchsplan. Die -3 wurde gewählt, um den zeitlichen Rahmen der Versuchsreihe auf einen Tag zu beschränken, um den Einfluss weiterer Einflussfaktoren wie Lagerung des Materials und anderen Umgebungsvariablen zu minimieren. Die oberen und unteren Werte des Versuchsplans wurden symmetrisch um den Zentralpunkt gewählt, wodurch sich der Versuchsplan in Tabelle A.1 im Anhang ergibt. Die Anzahl der Formteile pro Versuchspunkt konnte auf Basis einer ersten kleinen Versuchsreihe auf fünf Teile pro Punkt begrenzt werden, da die Ergebnisse ausreichend reproduzierbar sind. Weiterhin wurden zwischen den Versuchspunkten, nach dem Umstellen der Parameter, zehn Übergangsteile gewählt, um dem Prozess genügend Zeit zum Einschwingen zu geben.

Die Untersuchungen ergaben, dass einige Versuchspunkte (VP 3, VP 7, VP 14) nicht prozess-sicher gefahren werden können, da es zu verschiedenen Fehlerbildern wie nicht vollständig gefüllten Bauteilen oder Entformungsproblemen der Bauteile kommt. Bei den Versuchspunkten (VP 5, VP 6, VP 8, VP 13, VP 14, VP 15) sinkt das Restmassepulster bis auf 0 cm^3 ab, weshalb diese Punkte ebenfalls von der Auswertung ausgeschlossen werden. Dennoch können aus den Daten durch den Vergleich einzelner Versuchspunkte grundlegende Erkenntnisse über die Einflussfaktoren auf die Bauteilqualität gewonnen werden. Jedoch können keine Wechselwirkungen bestimmt werden.

Einfluss der Maschinenparameter auf die Bauteilqualität

Die Formteildicke wird als Indikator für die Maßhaltigkeit bewertet. Während der Auswertung werden sowohl die Größe der Effekte bestimmt als auch eine Signifikanzanalyse ($\alpha = 5\%$) durchgeführt sowie eine Darstellung mittels Pareto-Diagrammen genutzt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Nachdruckhöhe, der Einspritzvolumenstrom und die Werkzeugtemperatur einen signifikanten Einfluss auf die Formteildicke haben (siehe Abbildung 6.).

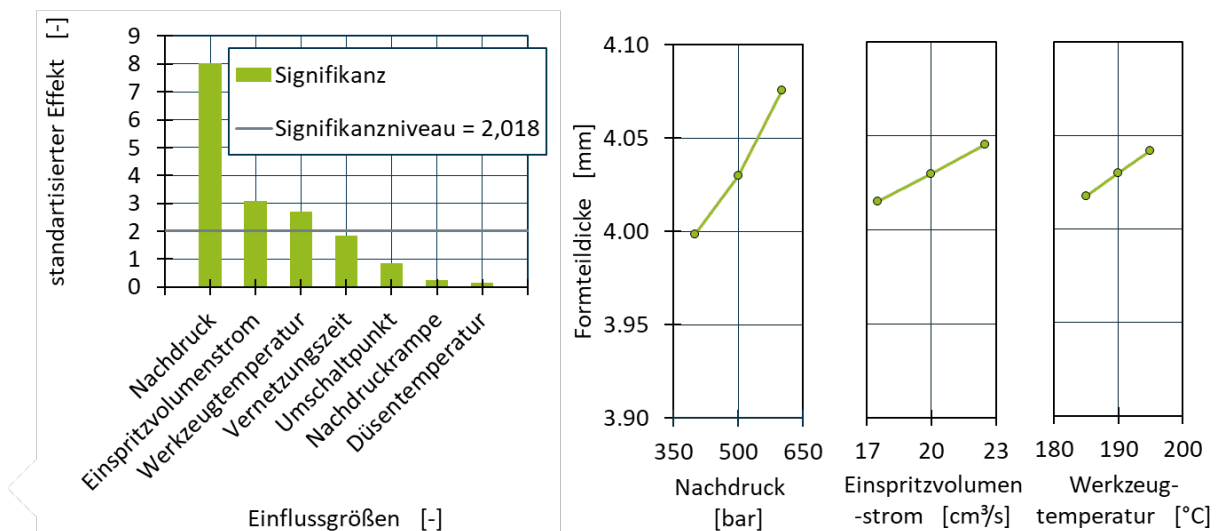


Abbildung 6: Einflussfaktoren auf die Formteildicke

Anhand der Effektdiagramme der drei signifikanten Einstellungsgrößen in Abbildung 6, rechts lassen sich die Effekte weiter veranschaulichen. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass eine Erhöhung der gewählten Einstellungen sich positiv auf die Formteildicke auswirkt und somit eine Erhöhung dieser erreicht werden kann. Bei der Einspritzgeschwindigkeit und der Werkzeugtemperatur ist dieser Effekt im betrachteten Bereich nahezu linear.

Identisch zur vorangegangenen Auswertung der Formteildicke werden die statistischen Verfahren bei der Auswertung der Formteilmasse genutzt. Dieses gilt neben der Dimensions-stabilität als wichtiger Parameter zur Indikation von Prozessschwankungen. Im vorliegende Pareto-Diagramm in Abbildung 7 ist erkennbar, dass bis auf die Nachdruckrampe alle Maschinen- und Prozessgrößen einen signifikanten Einfluss auf die Formteilmasse haben, da sie über dem Signifikanzniveau von 2,02 liegen.

Anhand der Effektdiagramme der drei signifikantesten Einstellungsgröße in Abbildung 7 lässt sich der Einfluss der einzelnen Einstellungen auf die Formteilmasse abschätzen. Eine Erhöhung der drei signifikanten Größen Nachdruck, Vernetzungszeit und Werkzeugtemperatur bewirkt eine Erhöhung der Masse. Die Faktoren Düsentemperatur und Nachdruckrampe weisen einen negativen Einfluss auf.

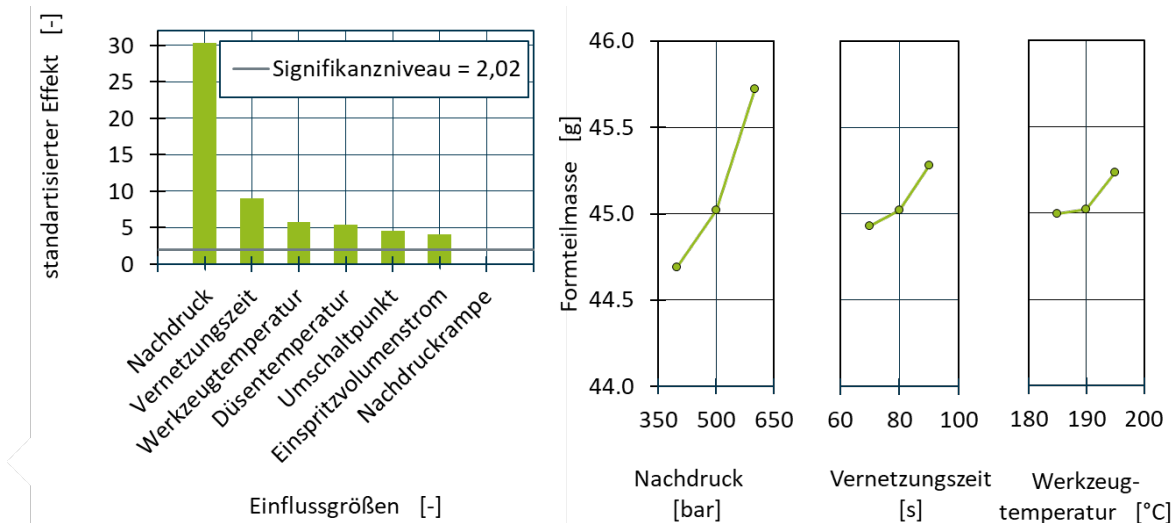


Abbildung 7: Einflussfaktoren auf die Formteilmasse

Aus den Versuchen zur Identifizierung der wichtigsten Prozessanforderungen beim Spritzgießen von Duroplasten lassen sich einige allgemeine Schlussfolgerungen für zukünftige Versuche ziehen. Es muss für eine gleichbleibende Zykluszeit gesorgt werden, damit die Verweilzeit der Restmasse im Plastifizierzylinder nicht zu hoch ist und somit im nächsten Schritt zu einer Beeinträchtigung der nächsten Formteile führt. Dies ist eine der häufigsten Ursache für schlecht produzierte Formteile.

Die Einstellungsgröße Nachdruckhöhe weist einen besonders starken Einfluss bezüglich der allgemeinen Qualität auf. Sie ist nahezu jedem Qualitätsmerkmal von Bedeutung und stellt vor allem bei priorisierten Bauteilqualitätsmerkmalen eine besonders signifikante Größe dar, weshalb der Nachdruck in weiteren Versuchen genauer überprüft werden sollte. Daneben stellen die Düsen- und Werkzeugtemperatur wichtige Einstellungen dar. Der Umschaltpunkt und der Einspritzvolumenstrom besitzen nach den durchgeführten Versuchen nur einen geringen Einfluss; ausgenommen auf die Formteildicke des Formteils. Die Nachdruckrampe besitzt ebenfalls eine hohe Signifikanz in den meisten Qualitätskriterien.

Ableitung geeigneter Regelgrößen

Neben dem Einfluss variierten Parameter muss zusätzlich bewertet werden, inwieweit sich diese für eine robuste Echtzeitregelung des Duroplast-Spritzgießprozesses eignen. Die variierten Temperaturen (Werkzeug- und Aggregattemperatur) weisen zwar einen signifikanten Einfluss auf die Formteilmasse auf, allerdings sind beide Temperaturen träge, sodass keine Regelung einzelner Maschinenzyklen über die Temperatur möglich ist. Sie können maximal für die Regelung zyklusübergreifender Trends herangezogen werden, was

jedoch nicht das Ziel dieses Forschungsprojektes darstellt. Weiterhin stellen sowohl der Umschaltzeitpunkt als auch die Nachdruckrampe nur einen Zeitpunkt, bzw. ein sehr kurzes Zeitintervall dar und eignen sich daher nicht für die alleinige Regelung des gesamten Spritzgießzyklus. Auch die Vernetzungszeit ist nicht als Regelgröße geeignet, da Sie erst nach Abschluss der qualitätsbestimmenden Phasen erfolgt.

Demnach eignen sich vor allem Nachdruck und Einspritzvolumenstrom zur Regelung des Prozesses. Aus diesem Grund werden Nachdruck und Einspritzvolumenstrom in einem weiteren Validierungsversuchsplan genauer untersucht. Da die Nachdruckrampe den Übergang zwischen der geschwindigkeitsgeregelten Einspritzphase und der druckgeregelten Nachdruckphase beeinflusst, wird diese dennoch weiter betrachtet, um z. B. Informationen über geeignete Druckreferenzverläufe ableiten zu können. Damit ergibt sich der folgende Versuchsplan mit Zentralpunkt (CP):

	Nachdruck [bar]	Nachdruckrampe [s]	Einspritzvolumenstrom [cm³/s]
CP	550	0,75	20
1	500	0,50	15
2	600	0,50	15
3	500	1,00	15
4	600	1,00	15
5	500	0,50	25
6	600	0,50	25
7	500	1,00	25
8	600	1,00	25
CP	550	0,75	20

Tabelle 5: Versuchsplan zweite Versuchsreihe

Für den Einspritzvolumenstrom wird ein größeres Intervall gewählt, um so eine bessere Einschätzung der Einflussnahme zu erhalten. Dabei wird ausgehend vom Zentralpunkt mit 20 cm³/s eine Variation von 5 cm³/s gewählt. Das Intervall der Nachdruckrampe und des Nachdrucks wird verringert, da beide Größen maschinenseitig limitiert sind. Dadurch wird eine genauere Einschätzung der Einflussnahme auf die Qualität erhofft. Es ergibt sich bei der Nachdruckrampe ausgehend vom Zentralpunkt bei 0,75 s eine Variation um 0,25 s. Der Nachdruck wird mit einem Intervall von 50 bar um den Zentralpunkt von 550 bar eingestellt.

Auch im weiterführenden Versuchsplan weist der Nachdruck den größten Einfluss auf die Formteildicke auf. Der Einfluss der Nachdruckrampe ist ebenfalls signifikant (vgl. Abbildung 8).

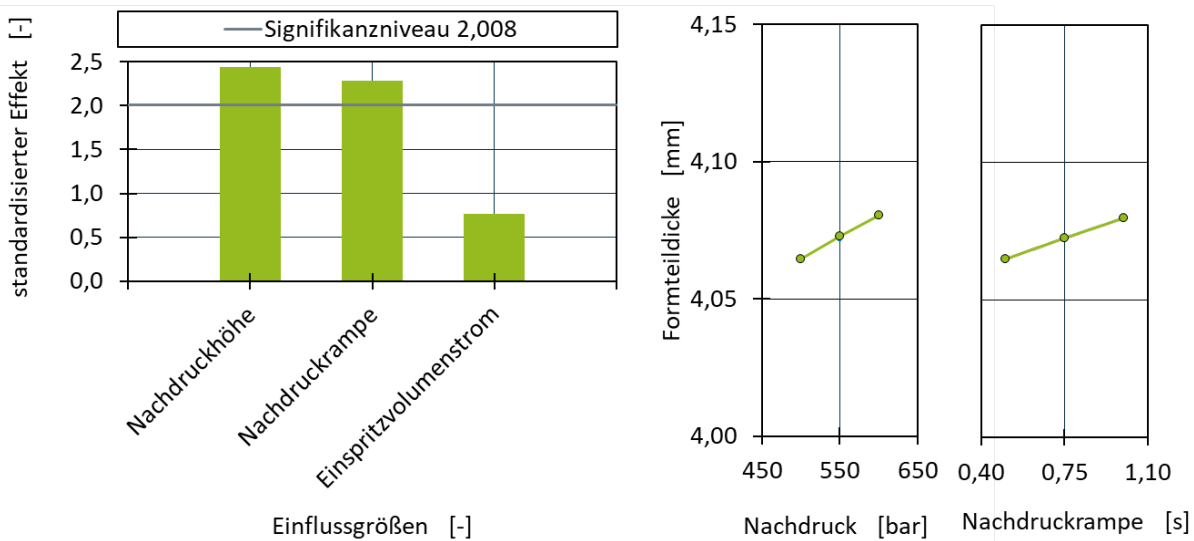


Abbildung 8: Effektdiagramme für das Qualitätsmerkmal Formteildicke

An den Effektdiagrammen des Nachdrucks und der Nachdruckrampe auf die Formteildicke in Abbildung 8 lässt sich erkennen, dass eine möglichst hohe Formteildicke mit jeweils hoher Einstellung des Nachdruckes auf 600 bar und der Nachdruckrampe mit einer Länge von 1 s erzielt wird. Dies ist auf das längere Umstellen von der Einspritz- auf die Nachdruckphase zurückzuführen, weshalb mehr Masse in die Kavität gelangt und unter hohem Druck vernetzt werden kann.

In den durchgeführten Versuchsreihen konnten wichtige Erkenntnisse zur Erstellung eines Regelungskonzepts gewonnen werden. Es werden einzelne direkte Auswirkungen gezeigt und die Maschineneinstellungen mit dem größten Einfluss konnten identifiziert werden. Zusätzlich konnten weitere Erkenntnisse bezüglich der Optimierung des gesamten Spritzgießprozess gewonnen werden. Die Nachdruckphase in Form des Nachdrucks und der Nachdruckrampe besitzt einen großen Einfluss auf die Formteilqualität. Ein hoher Nachdruck und eine längere Nachdruckrampe erweisen sich als vorteilhaft für die meisten Qualitätsmerkmale. Allerdings sind beide Parameter in ihrem Einstellungsintervall maschinenseitig begrenzt, weshalb eine Überprüfung eines Einstellungsintervalls oberhalb der maschinenseitigen Begrenzung nicht untersucht werden kann, um die Erkenntnisse zu bekräftigen. Ebenso besitzen die Düsen- und Werkzeugtemperatur einen hohen Einfluss auf die Formteilqualität. Es bedarf dahingehend eines genauen und kleinen Temperaturintervalls, welches im Spritzprozess eingehalten werden muss. Die Temperatur kann aufgrund der hohen Wärmekapazität nur sehr langsam auf Sollwertänderungen reagieren. Aufgrund des trägen Übertragungsverhaltens sollte diese daher im Vorhinein durch weitere Versuche untersucht und eingestellt werden.

1.7 Arbeitspaket 3: Entwicklung eines Qualitätsmodells

Da der Zusammenhang zwischen den Qualitäts- und den Prozessgrößen physikalisch schwierig modellierbar ist, wird in diesem Kapitel ein datenbasierter Zusammenhang zwischen den Prozess- und den Qualitätsgrößen hergestellt. Übergeordnetes Ziel des Qualitätsmodells ist es, einen geeigneten Prozessgrößenverlauf vorzugeben, welcher durch den in Abschnitt 1.8 beschriebenen Prozessgrößenregler eingeregelt werden soll. Der Gesamtregelkreis besteht damit aus einer Kaskadierung eines überlagerten Qualitäts- und eines unterlagerten Prozessregelkreises.

Korrelation zwischen den Qualitätsgrößen

Eine initiale Analyse untersucht die Wechselwirkungen zwischen den Qualitätsgrößen. Dabei wird untersucht, inwieweit die einzelnen Qualitätsgrößen voneinander beeinflusst werden und ob es möglich ist, diese unabhängig voneinander einzustellen. Dazu werden die Korrelationen mithilfe der Kendall'schen Rangkorrelationskoeffizienten [KMH+22] berechnet und in Tabelle 6 dargestellt.

d	1,000	...	...	...	...	...
m	0,439	1,000	...	...	...	...
G_V	0,104	-0,058	1,000	...	...	...
G_R	0,006	0,092	0,493	1,000	...	...
R_a	0,090	-0,045	-0,070	-0,091	1,000	...
R_z	0,060	-0,018	-0,112	-0,118	0,772	1,000
	d	m	G_V	G_R	R_a	R_z

Tabelle 6: Kendall'sche Rangkorrelationskoeffizienten für die Bauteilqualitäten (rot: starke Korrelation, orange: mittel-starke Korrelation, blau: schwache Korrelation)

Neben der starken Korrelationen zwischen den Rauheitswerten (R_a und R_z) und der mittel-starke Korrelation zwischen dem gemessenen Glanzgrad auf der Vorder- und Rückseite des Bauteils (G_V und G_R), lässt sich ebenfalls eine mittlere Korrelation zwischen der Bauteil-masse (m) und der gemessenen Bauteildicke (d) feststellen. Ebenfalls lässt sich erkennen, dass mit abnehmender Rauheit auch der Glanz des Bauteils steigt. Diese Korrelationen wurden zuvor erwartet, bestätigen allerdings auch die Sinnhaftigkeit der durchgeführten Messungen. Zusätzlich kann gezeigt werden, dass Qualitätsgrößen nicht unabhängig voneinander eingestellt werden können, sondern miteinander korrelieren.

Dimensionsreduktion mittels Singulärwertzerlegung

Da nur wenige Messungen zur Verfügung stehen, ist es für die Erstellung des Qualitätsmodells zwingend erforderlich, nur die wesentlichen Einflussgrößen als Eingang in das Qualitätsmodell zu berücksichtigen. Ebenfalls werden die Prozessgrößenverläufe mit einer Frequenz von 125 Hz abgetastet. Um die Dimension der Eingangsgrößen zu reduzieren, wird in einem ersten Schritt eine Dimensionsreduktion mithilfe der Singulärwertzerlegung (SVD) durchgeführt [BJ17].

In Abbildung 9 werden zwei gemessene Werkzeuginnendruckverläufe mit Approximationen von zweiter Ordnung verglichen. Der Werkzeuginnendruckverlauf lässt sich durch die Singulärwertzerlegung bei bereits zwei SVD-Gewichten mit einem absoluten mittleren Fehler von 8,9 bar approximieren, was in den nachfolgenden Untersuchungen als ausreichend genau angesehen wird.

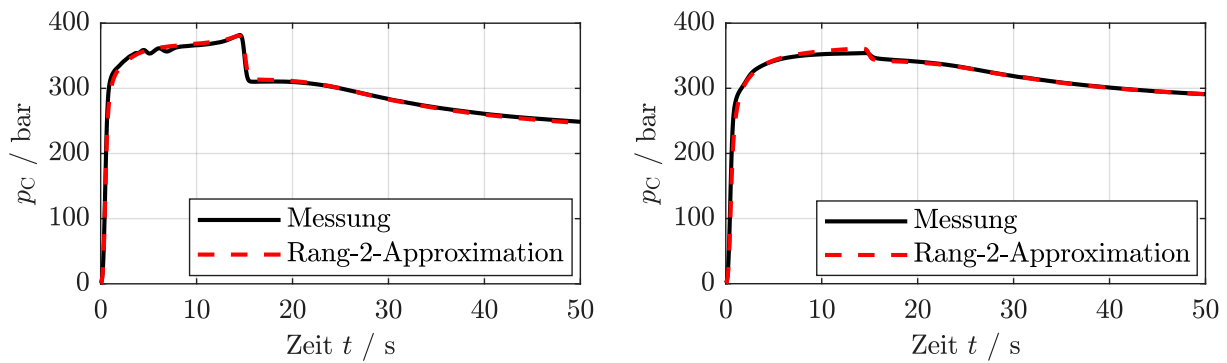


Abbildung 9: Vergleich zwischen reduziertem und gemessenem Werkzeuginnendruckverlauf

Die Dimensionsreduktion der Verläufe mittels Singulärwertzerlegung bietet gegenüber der Bestimmung von gebräuchlichen Kenngrößen (wie dem Werkzeuginnendruckintegral) den Vorteil, dass dieser Zusammenhang eindeutig umkehrbar ist. Mithilfe der gewonnenen Kennzahlen kann so der ursprüngliche Verlauf rekonstruiert werden. Ebenfalls kann eine klare Aussage darüber getroffen werden, wie viele Kennzahlen benötigt werden, um den Prozessgrößenverlauf beschreiben zu können. Die nahezu verlustfreie Reduktion auf nur zwei Kennzahlen ist aufgrund der qualitativen Ähnlichkeit der untersuchten Kurvenverläufe möglich.

Globale Sensitivitätsanalyse

Um die wichtigsten Einflussgrößen für die Qualitätsmodelle bestimmen zu können, wird eine globale Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Das Konzept der Sensitivitätsanalyse ist in Abbildung 10 veranschaulicht. Der Analyseprozess benötigt ein Modell, welches die Eingangsvariablen mit dem Ausgang (bspw. die Bauteilmasse) verknüpft. Als Modell wird eine Polynomiale Chaos Expansion (PCE) mit einer Legendre-Polynom-Basis verwendet und mittels Kreuzvalidierung eine Modellselektion durchgeführt [MSL24]. Modelle, die nicht zur Überanpassung neigen, ließen sich nur mit einem Polynomgrad erster Ordnung erstellen, sodass in den nachfolgenden Untersuchungen auch nur Sobol-Indizes erster Ordnung und damit lediglich Haupteffekte untersucht werden können.

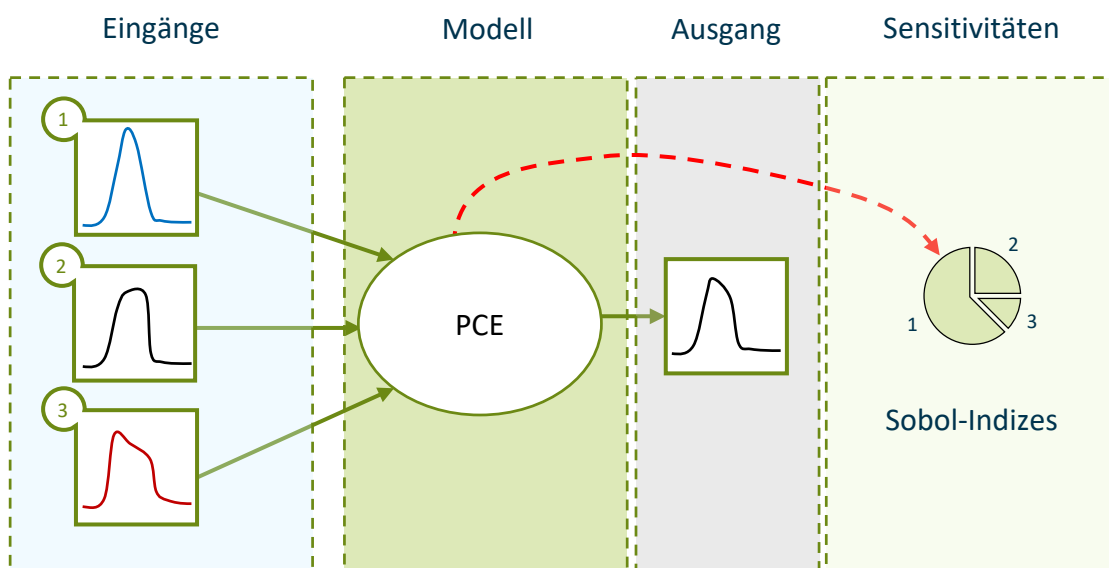


Abbildung 10: Schematische Abbildung einer globalen Sensitivitätsanalyse

Als Eingänge in die Modelle wurden die in Tabelle 7 dargestellten Eingangsgrößen verwendet. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse werden in Abbildung 11 dargestellt. Dabei werden die Sobol-Indizes erster Ordnung dargestellt.

Formelzeichen	Beschreibung
p_{W1}	Erstes Gewicht aus der SVD für den Werkzeuginnendruckverlauf
p_{S1}	Erstes Gewicht aus der SVD für den Schneckendruckverlauf
p_{S2}	Zweites Gewicht aus der SVD für den Schneckendruckverlauf
v_e	Einspritzvolumenstrom
V_d	Dosiervolumen

Tabelle 7: Eingangsgrößen für die Sensitivitätsanalyse

Herauszustellen ist der nahezu direkte Zusammenhang zwischen der Bauteilmasse und dem Werkzeuginnendruck, der in den nachfolgenden Kapiteln für die Erstellung eines Qualitätsmodells verwendet wird. Außerdem ist ein Zusammenhang zwischen den Einflussgrößen der beiden Rauheitswerte zu erkennen. Dieser Zusammenhang erscheint sinnvoll, da in Abschnitt 1.7 bereits eine starke Korrelation dieser Größen nachgewiesen werden konnte. Der Glanz der Rückseite hängt ebenfalls fast ausschließlich vom Werkzeuginnendruck ab, was sich mit den subjektiven Erfahrungen bei Experimenten mit unterschiedlich hohen Werkzeuginnendrücker deckt. Die Sobol-Indizes für den Glanz der Vorderseite zeigen allerdings einen weniger eindeutigen Zusammenhang. Eine mögliche Erklärung könnten Beschädigungen oder leichte Kratzer der Kavität sein, die bei einer lokal gemessenen Größe stark ins Gewicht fallen.

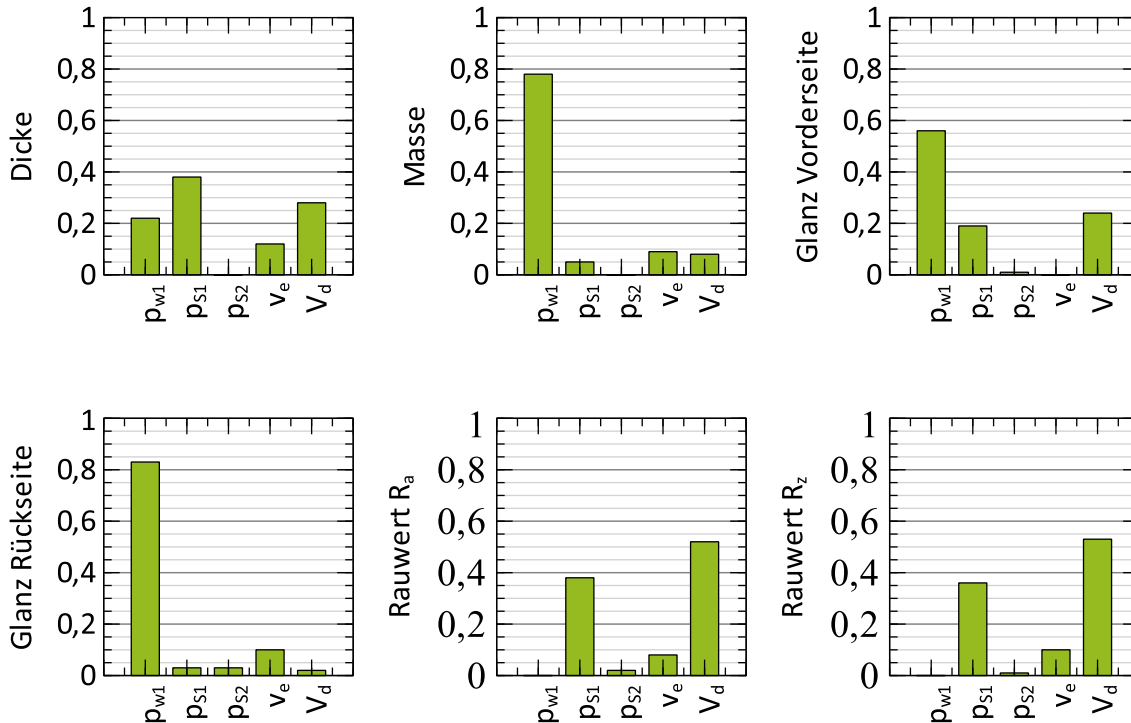


Abbildung 11: Sobol-Indizes erster Ordnung für die Bauteilqualität als Funktion der Eingänge

Erstellung von Qualitätsmodellen

Um den Zusammenhang zwischen den Qualitätsgrößen und den Prozessgrößenverläufen herzustellen, werden Gaußprozessregressionsmodelle verwendet. Diese Methode ist speziell für eine geringe Anzahl an Datenpunkten geeignet und bietet neben der Vorhersage des Funktionswertes auch eine Prädiktion über die Unsicherheit [RW06]. Die Nutzung eines probabilistischen Modellierungswerkzeugs ist in diesem Beispiel besonders zielführend, da die Messungen der Qualitäten bei gleichen Versuchseinstellungen stark schwanken und demzufolge als Zufallsvariable mit Mittelwert und Standardabweichung modelliert werden müssen. Ebenfalls lassen sich diese Modelle komfortabel durch neue Messpunkte erweitern. Die Modelle werden auf zwei unterschiedliche Arten trainiert. Zunächst werden bei Missachtung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse die Modelle mit allen Eingangsgrößen trainiert. In einem zweiten Schritt wird eine sogenannte Feature-Selektion durchgeführt, bei der lediglich die drei Eingänge mit dem größten Sobol-Index Berücksichtigung finden. Dabei wird eine elffache Kreuzvalidierung durchgeführt. Die gemittelten absoluten Fehler (MAE) werden in Tabelle 8: Gemittelte absolute Fehler der Modelle bei elffacher Kreuzvalidierung

dargestellt. Darin ist zu erkennen, dass die Feature-Selektion dazu führt, dass die reduzierten Modelle eine höhere Genauigkeit aufweisen. Grund dafür ist, dass keine Eingänge in das Modell einfließen, welche den Ausgang nicht oder unwesentlich beeinflussen.

Qualitätsmerkmal	MAE ohne Feature-Selektion	MAE mit Feature-Selektion
Dicke [mm]	0,0130	0,0102
Masse [g]	0,0567	0,0564
Glanz Vorderseite [-]	3,6211	3,5195
Glanz Rückseite [-]	4,3361	4,2017
Rauwert R_a [μm]	0,3142	0,3067
Rauwert R_z [μm]	2,5910	2,4714

Tabelle 8: Gemittelte absolute Fehler der Modelle bei elffacher Kreuzvalidierung

Schließen des Qualitätsregelkreises und Erstellen einer Strategie für die Berücksichtigung neuer Messdaten

Eigenschaftsschwankungen des Materials und andere Prozessstörungen machen es notwendig, die Qualität der Bauteile während der Produktion zu erfassen und mit diesen das zugrundeliegende Qualitätsmodell zu aktualisieren. Dabei bieten aktuellere Messungen bei zeitlich veränderlichen Prozessbedingungen einen höheren Informationsgehalt, sodass diese bei der Modellaktualisierung höher gewichtet werden müssen.

Diese Berücksichtigung der Zeitvarianz wird durch eine Multiplikation der bisherigen Kernel-Funktion mit einem Wiener-Kernel umgesetzt. Dies bietet den Vorteil, dass bei großem zeitlichem Abstand zwischen den Messungen kein sogenanntes Back-to-Prior-Forgetting auftritt [BVT22]. In Bereichen des Qualitätsmodells, die lange nicht aktualisiert wurden, bleibt der Mittelwert der aktuellen Prädiktion unbeeinflusst. Die Unsicherheit an diesen Stellen steigt aber zeitlich linear an. Wenn neue Messungen an diesen Stellen vorliegen, orientiert sich das Modell eher an den aktuellen Messungen, ohne allerdings die gesammelten Informationen aus der Vergangenheit komplett zu missachten.

Da die Qualitätsgröße in regelmäßigen Abständen an den Qualitätsregler zurückgegeben werden muss und keine automatisierte Qualitätsmesszelle zur Verfügung steht, wird zu einer ersten Machbarkeitsstudie die Masse als angestrebte Qualitätsgröße herangezogen. Diese lässt sich mit begrenztem Aufwand nach jedem Zyklus messen, um das Modell zu aktualisieren.

Hinzu kommt, dass die Masse ebenfalls ein relevantes Qualitätsmerkmal darstellt, welches ebenfalls mit den anderen Qualitätsgrößen korreliert. In Abbildung 12 werden die Umfrage-ergebnisse des zweiten projektbegleitenden Ausschusses (PbA) zur Relevanz der Qualitätsmerkmale des Duroplast-Spritzgießens dargestellt.

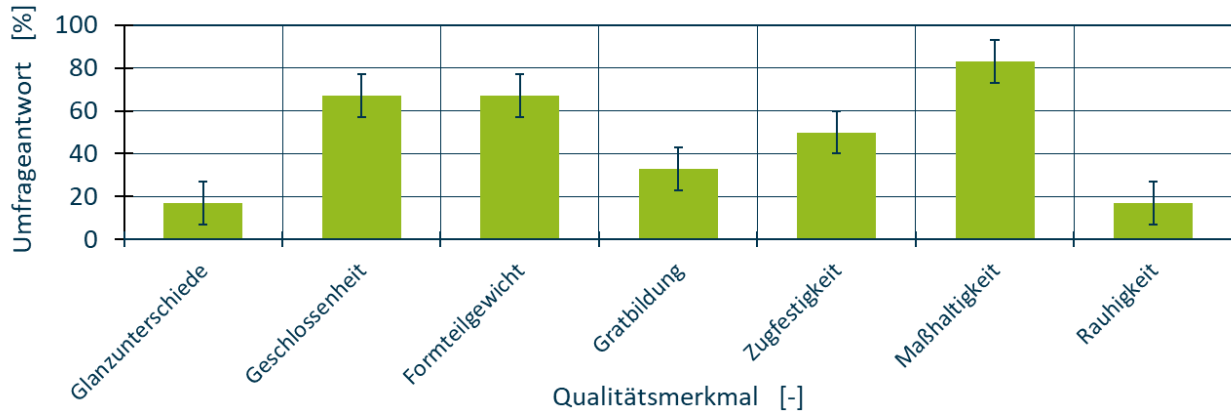


Abbildung 12: Umfrageergebnisse zur Relevanz unterschiedlicher Qualitätsgrößen beim Spritzgießen von Duroplasten basierend auf dem zweiten projektbegleitenden Ausschuss

Berücksichtigung zyklusübergreifender Effekte

Zyklusübergreifende Effekte entstehen durch das Restmassepolster, welches nach einem Zyklus im Schneckenorraum verbleibt und weiter vernetzt. Dieses mischt sich beim Dosieren mit dem frischen und unvernetzten Material und nimmt damit Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften für den nächsten Zyklus. Ziel muss daher sein, den Einfluss dieses Restmassepolsters zu minimieren und für jeden Zyklus konstant zu halten. Folglich sollte ein möglichst niedriges und konstantes Restmassepolster angestrebt werden. Direkten Einfluss auf das Restmassepolster nimmt das Dosiervolumen, das somit als weitere Stellgröße für den Qualitätsregelkreis betrachtet wird.

Aufbau des Qualitätsreglers

Der vollständige Qualitätsregelkreis ist in Abbildung 13 visualisiert. Referenzgrößen wie die Soll-Bauteilmasse m^{ref} und das Soll-Restmassepolster $V_{\text{res}}^{\text{ref}}$ werden als Eingänge in den Qualitätsregelkreis benötigt.

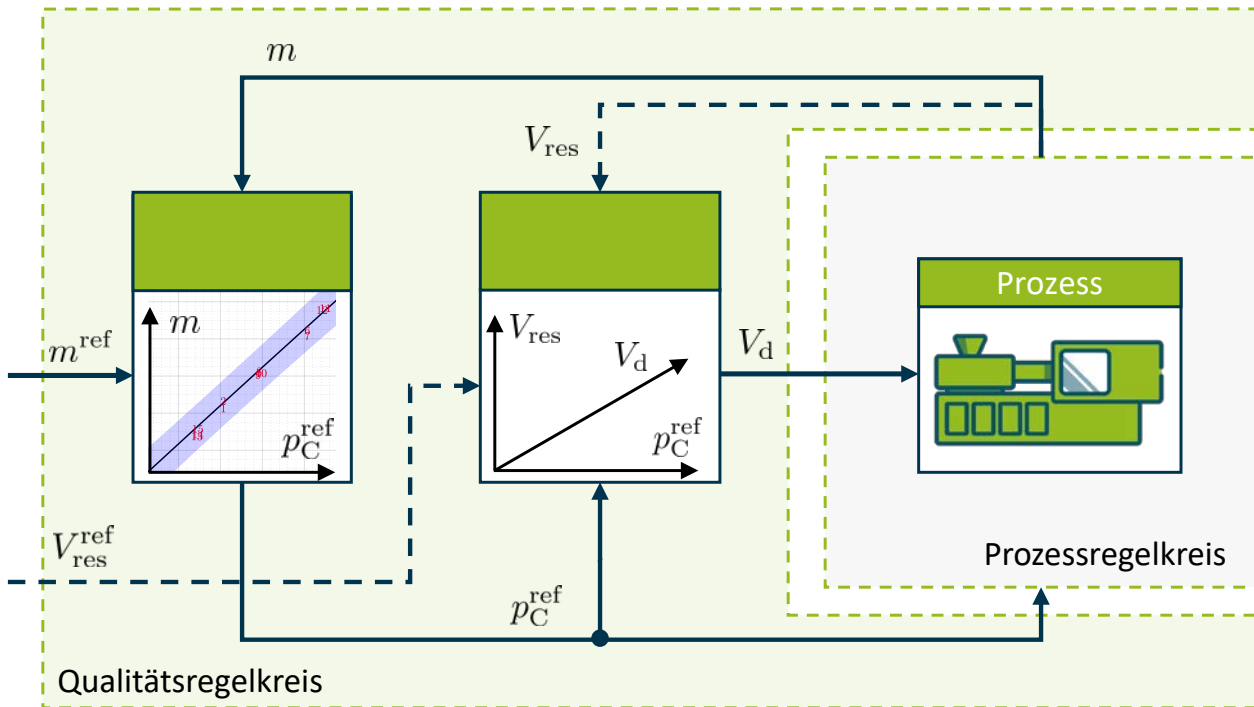


Abbildung 13: Aufbau des vollständigen Qualitätsreglers

Anschließend wird mithilfe der Soll-Bauteilmasse und dem bestehenden Qualitätsmodell eine Werkzeuginnendruckreferenz p_C^{ref} errechnet. Anhand dieser Werkzeuginnendruckreferenz und dem geforderten Restmassepolster wird mit einem Restmassemmodell ein geeignetes Dosiervolumen V_d berechnet. Nach dem Zyklus werden die Bauteilmasse m und das Restmassepolster V_{res} bestimmt, welche zur Aktualisierung der Modelle zurückgeführt werden.

Modell für die Bauteilmasse

In Abschnitt 1.7 konnte durch die globale Sensitivitätsanalyse gezeigt werden, dass die Bauteilmasse fast ausschließlich durch den Werkzeuginnendruck beeinflusst wird. Um die Dimensionalität des Modells gering zu halten, wird das Werkzeuginnendruckreferenz-Niveau als einziger Eingang im Bauteilmassenmodell berücksichtigt. Als Prior für den Gaußprozess wird ein linearer Zusammenhang zwischen der Bauteilmasse und der Werkzeuginnendruck-Niveau angenommen. Es konnte ebenfalls gezeigt werden, dass kein Zusammenhang zwischen der Bauteilmasse und dem Dosiervolumen besteht, sodass die Aufteilung in ein Bauteilmassen- und Restmassenmodell sinnvoll erscheint.

Modell für das Restmassepolster

Das Modell für das Restmassepolster beinhaltet mehrere Eingangsgrößen. Als Eingänge werden das Dosiervolumen und der Werkzeuginnendruck verwendet. Durch den Kompressionsmodul des Materials kann ebenfalls eine analytische Abschätzung gefunden werden, welche als Prior für das Modell dient. Dabei wird angenommen, dass die Drücke innerhalb der Kavität und dem Schneckenorraum am Ende des Zyklus von vergleichbarer Größenordnung sind. Mithilfe der Definition des Kompressionsmoduls und einem zusätzlichen Term, der die Leckage abbilden soll, wird die Approximation

$$V_{\text{res}} = V_{\text{dos}} e^{-\frac{1}{K}(p_C^{\text{ref}} - p_0)} - V_{\text{cav}} - K_{\text{leak}} p_C^{\text{ref}} \quad (1)$$

gefunden. Berücksichtigung finden die Kompressibilität des Materials $1/K$, das Dosier-volumen V_{dos} und das Kavitätswolumen V_{cav} . Die übrigen unbekannt Parameter (K_{leak}, p_0) werden in jedem Schritt durch eine Optimierung aktualisiert und die Abweichung zwischen analytischem Modell und der Realität durch das Gaußprozessregressionsmodell abgebildet.

Ergebnisse der Bauteilmassenregelung

Die erste experimentelle Untersuchung der Bauteilmassenregelung wird in Abbildung 14 dargestellt. Das Modell wird ohne a-priori-Wissen initialisiert. Demzufolge müssen im ersten Schritt Identifikationsversuche durchgeführt werden.

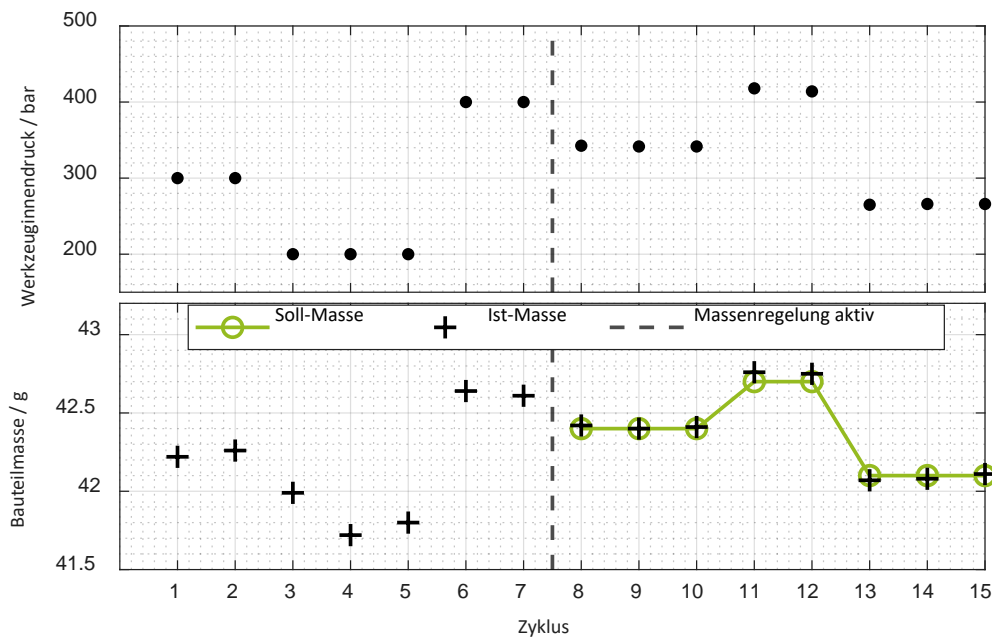


Abbildung 14: Ergebnisse der Bauteilmassenregelung (Ab Zyklus 8 wird die Massenregelung aktiviert)

Dies geschieht innerhalb der ersten sieben Zyklen. Dabei werden drei unterschiedliche Werkzeuginnendruck-Niveaus durch den Prozessregler eingeregelt und für zwei bzw. drei Iterationen gehalten. Der Grund für das Halten der Druckniveaus liegt darin begründet, dass dem Modell genug Informationen vorliegen sollen, um die Unsicherheit bei gleichen Werkzeuginnendruckniveaus errechnen zu können. Ab Zyklus 8 wird versucht, definierte Bauteilmassen einzuregeln. Der Qualitätsregler folgt den vorgegebenen Bauteilmassen sehr genau und nimmt ebenfalls Korrekturen vor, wenn die geforderte Bauteilmasse nicht getroffen wird.

In Abbildung 15 ist das durch den Qualitätsregler identifizierte Modell dargestellt. Dieser errechnet, dass ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen der Bauteilmasse und der Werkzeuginnendruckreferenz die wahrscheinlichste Erklärung für die aufgenommenen Daten ist. Ebenfalls prädiziert das Modell eine Unsicherheit, mit der Aufschluss darüber gewonnen werden kann, welche Genauigkeit bei der Bauteilmassenregelung erzielt werden kann.

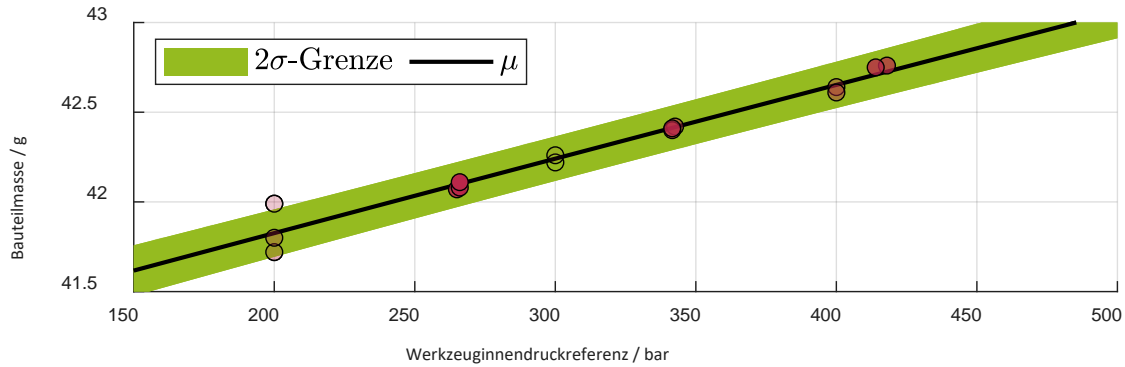


Abbildung 15: Gaußprozessregressionsmodell für die Bauteilmasse in Abhängigkeit von der Werkzeuginnendruckreferenz

Bei Zyklus 4 und 5 (s. Abbildung 14) tritt eine Besonderheit auf. Die Bauteile aus den Versuchen waren aufgrund des geringen Druckniveaus nicht vollständig gefüllt und die Masse unterschied sich damit deutlich von Zyklus drei, welcher bei gleichem Druckniveau durchgeführt wurde, aber das Bauteil vollständig gefüllt war. Das Modell hält Zyklus 3 aufgrund der Berücksichtigung der Zeitvarianz als unwahrscheinlich. Dies führt dazu, dass sich dieser Punkt außerhalb der 2σ -Grenze befindet (s. Abbildung 15).

Ergebnisse der kombinierten Regelung von Bauteilmasse und Restmassepolster

Die in Abbildung 13 dargestellte Regelkreisstruktur beinhaltet eine weitere Stell- und Regelgröße. In diesem Fall wird das Dosiervolumen durch die Wahl eines definierten Restmassepolsters durch das Restmassemodell errechnet und vor jedem Zyklus an der Maschine eingestellt.

Die Ergebnisse dieser Regelung sind in Abbildung 16 veranschaulicht. Auch in diesem Fall wird das Modell während des Versuches initialisiert und trainiert. Dazu kommen sechs unterschiedliche Experimente zum Einsatz, bei denen sowohl die Werkzeuginnendruckreferenz als auch das eingestellte Dosiervolumen variiert werden. In diesem Beispiel ist der Regelkreis ebenfalls in der Lage der Referenz zu folgen. In Zyklus 9 wird das geforderte Restmassepolster kaum getroffen. An dieser Stelle erfolgt zum ersten Mal ein Einstellen des Dosiervolumens unter 50 cm^3 . In diesem Fall muss das Modell extrapolieren, da zu diesem Zeitpunkt keinerlei Informationen in diesem Bereich vorliegen. In diesem Experiment sind allerdings deutlich höhere Abweichungen zwischen der Soll- und der gemessenen Bauteilmasse als in Abschnitt 1.7 zu erkennen, die auf die ständige Änderung des Soll-Restmassepolsters und den sich damit ändernden zyklusübergreifenden Effekten zurückzuführen sind.

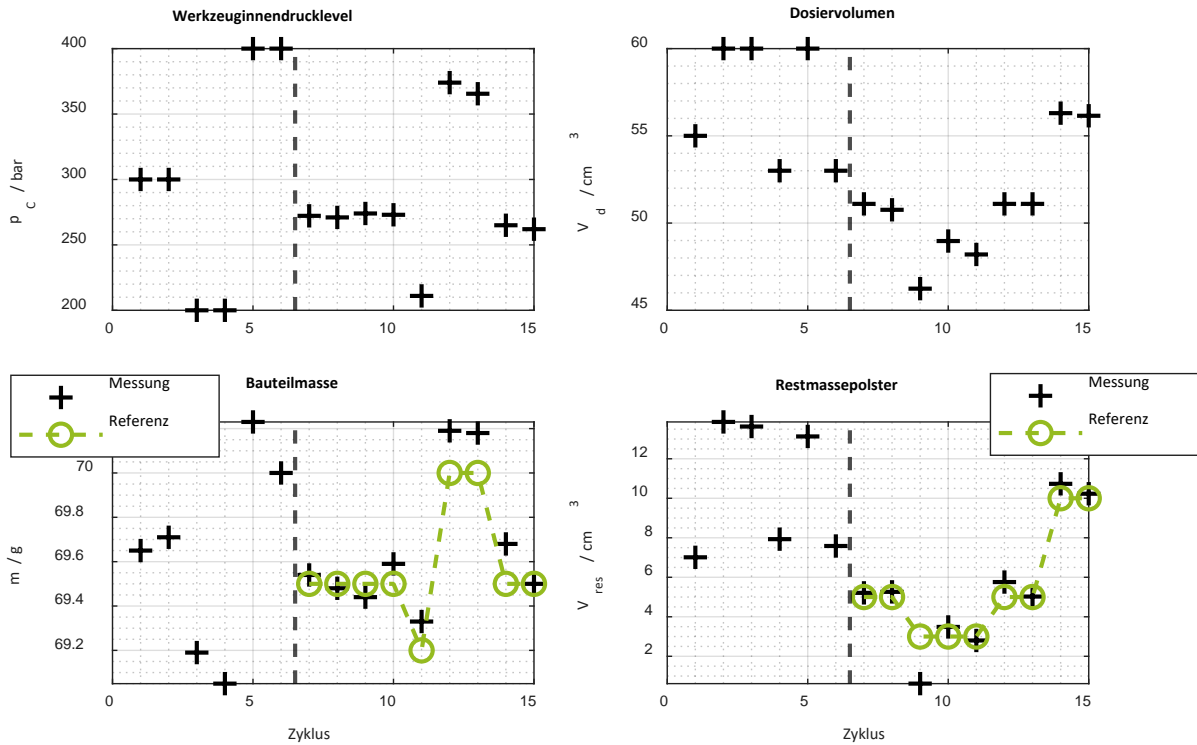


Abbildung 16: Ergebnisse der kombinierten Regelung aus Masse und Restmassepolster; Ab Zyklus 7 (gestrichelte Linie) ist die Regelung aktiv

In der Realität wäre eine sich ständig ändernde Referenz für das Restmassepolster ungewöhnlich. Wie bereits erläutert, erscheint es sinnvoll, das Restmassepolster möglichst konstant bei einem niedrigen Wert zu halten, um zyklusübergreifende Effekte zu minimieren. Die Ergebnisse zeigen, dass eine gleichzeitige Regelung der Bauteilmasse und des Restmassepolsters bei geringem initialen Identifikationsaufwand möglich ist.

1.8 Arbeitspaket 4: Entwicklung einer Prozessregelung

Ziel dieses Arbeitspaketes ist der Entwurf einer modellbasierten Regelung. Dieser liegt ein mathematisches Modell zu Grunde, welches den Prozess möglichst genau abbilden soll und gleichzeitig in Echtzeit zur Berechnung der Stellgröße verwendet werden kann.

Übliche Modellierungsmethoden werden oft in die folgenden Klassen unterteilt.

- **White-Box-Modelle:** Das Simulationsmodell besteht vollständig aus physikalischen Gleichungen, so dass das Modellverhalten vollständig erklärbar ist.
- **Black-Box-Modelle:** Das Modell wird vollständig aus Messdaten gewonnen. Interne Strukturen sind unzugänglich und das Modellverhalten ist nicht erklärbar.
- **Gray-Box-Modelle:** Kombination aus beiden Modellklassen. Die Grundlage bildet eine erklärbare Modellstruktur.

Beim Spritzgießen von Duroplasten kommt es häufig dazu, dass Materialeigenschaften unbekannt sind. Das liegt vor allem daran, dass diese nicht nur durch den Druck und die Temperatur beeinflusst werden, sondern auch maßgeblich vom Fortschritt der Vernetzungsreaktion α abhängen. Hinzu kommen Unterschiede in Zusammensetzung und Lagerung. Da das vorherige Vermessen der Materialeigenschaften in der Praxis einen

Demnach wird die Gleichung zu

$$\frac{dp_S}{dt} = \frac{K_S}{V_S} [v_S - Q_C - Q_L + \dot{S}_S] \quad (4)$$

vereinfacht und die übrigen Terme in einem Parameter \dot{S}_S zusammengefasst. Dieser Quellterm wird in einem späteren Schritt durch den Ausgang des künstlichen neuronalen Netzes ersetzt.

Die Differentialgleichung für den Druckaufbau innerhalb der Kavität des Werkzeugs

$$\frac{dp_C}{dt} = \frac{K_C}{m_C} \left(\dot{m}_C - \rho_C \frac{dV_M}{dt} + \frac{m_C}{K_C} \left(\frac{\partial p}{\partial \alpha} \right)_{\rho, E} \frac{d\alpha_C}{dt} + \frac{\gamma_p}{c_p} [\dot{m}_C (h_S - h_C) + \dot{q}_C^D + \dot{q}_C + \dot{q}_C^R] \right) \quad (5)$$

ist strukturell sehr ähnlich und kann ebenfalls aus der allgemeinen Form der Energiegleichung (Gl. 2) hergeleitet werden.

Der Term dV_M/dt beschreibt die Volumenänderung des Materials. Dieser ist schwierig zu modellieren und vor allem entscheidend von der Form der Kavität abhängig. Während der Füllphase ist dieser Term größer als Null. Wenn das Bauteil volumetrisch vollständig gefüllt ist, fällt dieser Term auf Null, da sich das Material nicht weiter ausbreiten kann.

Nach den bereits oben beschriebenen Vereinfachungen lässt sich aus Gleichung 5 die folgende Gleichung ermitteln:

$$\frac{dp_C}{dt} = \frac{K_{\text{mix}}(\varphi)}{V_C} (Q_C + \dot{S}_C). \quad (6)$$

Dabei wird angenommen, dass sich der Kompressionsmodul während der Füllphase durch

$$K_{\text{mix}} = \frac{K_C K_{\text{Air}}}{\min(\varphi, 1) K_{\text{Air}} + (1 - \min(\varphi, 1)) K_C} \quad (7)$$

aus dem Kompressionsmodul der reaktiven Masse K_C und der in der Kavität verbleibenden Luft K_{Air} ergibt. Damit wird der oben beschriebene Term dV_M/dt ersetzt. Dies entspricht einer Reihenschaltung des Kompressionsmoduls der Luft und des Materials. Für die Integration der beiden Druckaufbaugleichungen (Gl. 4 und Gl. 6) müssen zudem noch die Volumenströme Q_C und Q_L berechnet werden. Die Berechnung basiert auf Grundlage des Hagen-Poiseuille-Gesetzes:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta L} (p_S - p_C) = C \Delta p \quad (8)$$

Duroplaste sind meist scherverdünnend und lassen sich nicht direkt mit der angegebenen Gleichung 8 beschreiben. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass die Scherrate proportional zur negativen Volumenänderung des Schneckenorraums v_S ist. Eine Berechnung des Parameters C aus den experimentellen Messdaten liefert den in Abbildung 18 dargestellten Zusammenhang.

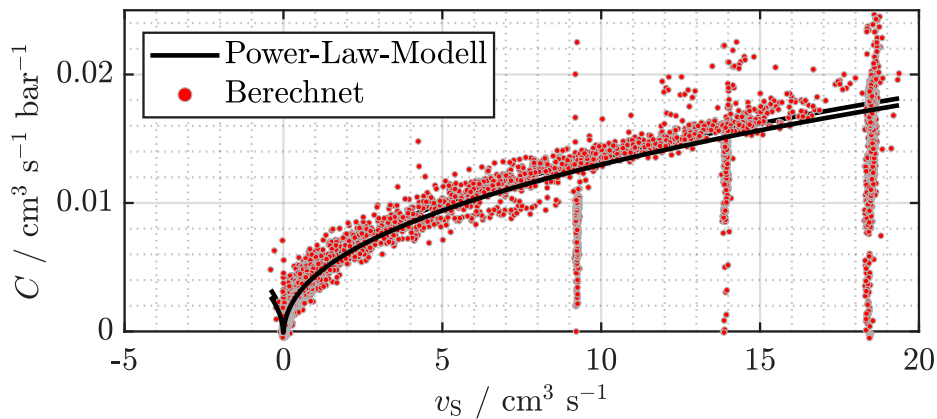


Abbildung 18: Zusammenhang zwischen dem Parameter C und der durch die Schnecke verursachten Volumenstrom v_s

Aus diesem Grund werden der Parameter und damit das Durchströmungsgesetz durch

$$C = C_1 |v_s|^n \quad (9)$$

beschrieben. Dieser Zusammenhang ist ebenfalls in Abbildung 18 dargestellt und bildet die aus den Versuchsdaten errechneten Werte sehr genau ab.

Es müssen zwei Volumenströme berechnet werden. Dabei beschreibt Q_C den Volumenstrom, welcher in die Kavität eindringt, und Q_L den Leckagevolumenstrom, welcher durch das Fehlen der Rückstromsperre in den Einzugsbereich der Schnecke gelangt. Die Gleichungen werden als strukturell ähnlich angenommen, sodass die Volumenströme durch

$$Q_C = C_C |v_s|^n (p_S - p_C) \quad (10)$$

$$Q_L = C_L |v_s|^n (p_S) \quad (11)$$

beschrieben werden. Dabei wird angenommen, dass im Einzugsbereich der Schnecke ungefähr der Umgebungsdruck herrscht. Die Differentialgleichung zur Berechnung des Schneckenraumvolumens

$$\frac{dV_S}{dt} = -v_s \quad (12)$$

muss ebenfalls integriert werden. Zur Berechnung des volumetrischen Füllgrads der Kavität φ , welcher für die Berechnung des effektiven Kompressionsmoduls aus Gleichung 7 benötigt wird, wird der eintretende Volumenstrom mit Bezug auf das Bauteilvolumen integriert

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{Q_C}{V_C} \quad (13)$$

Kapitel 8 fasst alle verwendeten Formelzeichen mitsamt ihrer Dimension und Bedeutung nochmals zusammen.

Erweiterung um einen datengetriebenen Ansatz

Um bisher nicht-modellierte Effekte berücksichtigen zu können oder der Zeitvarianz der Parameter der Druckaufbaugleichungen Rechnung zu tragen, wird zudem ein künstliches neuronales Netz verwendet. Dieses ist dem eigentlichen Systemmodell vorgeschaltet (vgl. Abbildung 19) und berechnet neben den Quelltermen \dot{S}_S und \dot{S}_C aus den hergeleiteten Druckaufbaugleichungen (Gl. 4 und Gl. 6) auch die unbekannt Materialparameter. Die durch das neuronale Netz veränderten Parameter umfassen die Kompressionsmodule K_S

und K_C und die Parameter C_C und C_L für die Berechnung der Volumenströme (Gl. 10 & Gl. 11). Diese Parameter und Quellterme werden als Funktion der Drücke, des Füllgrads der Kavität, der Schneckengeschwindigkeit und der Zeit modelliert.

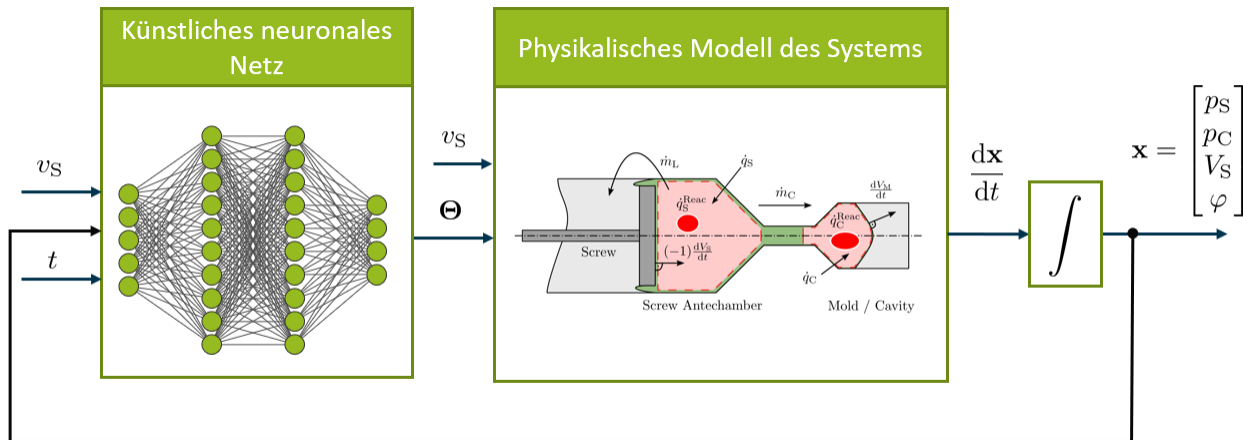


Abbildung 19: Schematische Übersicht über das entwickelte Gray-Box-Modell

Da die Systemgleichungen gewöhnliche Differentialgleichungen sind, müssen diese numerisch integriert werden. Dies wird in diesem Fall durch ein Runge-Kutta-Schema vierter Ordnung durchgeführt. Für das Trainieren des Modells wird unter Verwendung automatischer Differentiation mit dem Open-Source-Tool CasADi [AGH+18] der Gradient der Parameter hinsichtlich einer quadrierten L2-Kostenfunktion berechnet. Die Parameter des neuronalen Netzes werden mithilfe eines Adam-Optimierers aktualisiert.

Um die Echtzeitfähigkeit des Modells zu testen, werden die Ausführungsgeschwindigkeiten der beiden Modelle miteinander verglichen. Bei einer Anzahl von vier verdeckten Schichten und einer Neuronen-Anzahl von zehn Neuronen pro Schicht, ist die Ausführungs-geschwindigkeit 2,2-mal so hoch wie die des White-Box-Modells.

Validierung der Modelle anhand von Versuchsdaten

Zum Training werden drei zufällig aus der Summe der Versuche ausgewählte Spritzgießzyklen verwendet und das erhaltene Modell an verbleibenden 12 Experimenten hinsichtlich der Vorhersagegenauigkeit beurteilt. In Abbildung 20 sind zwei beispielhafte Experimente dargestellt. Die durchschnittliche Verbesserung des Modells durch das Hinzufügen des neuronalen Netzes liegt bei 32 % unter Verwendung des Fehlermaßes des mittleren Standardfehlers (RMSE). An den beiden Beispielen wird ein Problem des Modells deutlich. Beim Experiment mit 400 bar Nachdruck wird der Punkt des Werkzeuginnendruckanstiegs sehr gut getroffen. Beim Versuch mit 200 bar Nachdruck prädiziert das Modell den Druckanstieg allerdings zu früh, was hohe relative Abweichungen des Werkzeuginnendrucks zur Folge hat. Die Prädiktion des Punktes der vollständigen Kavitätsfüllung bleibt damit eine zentrale Herausforderung für die Bildung eines sinnvollen Reglermodells.

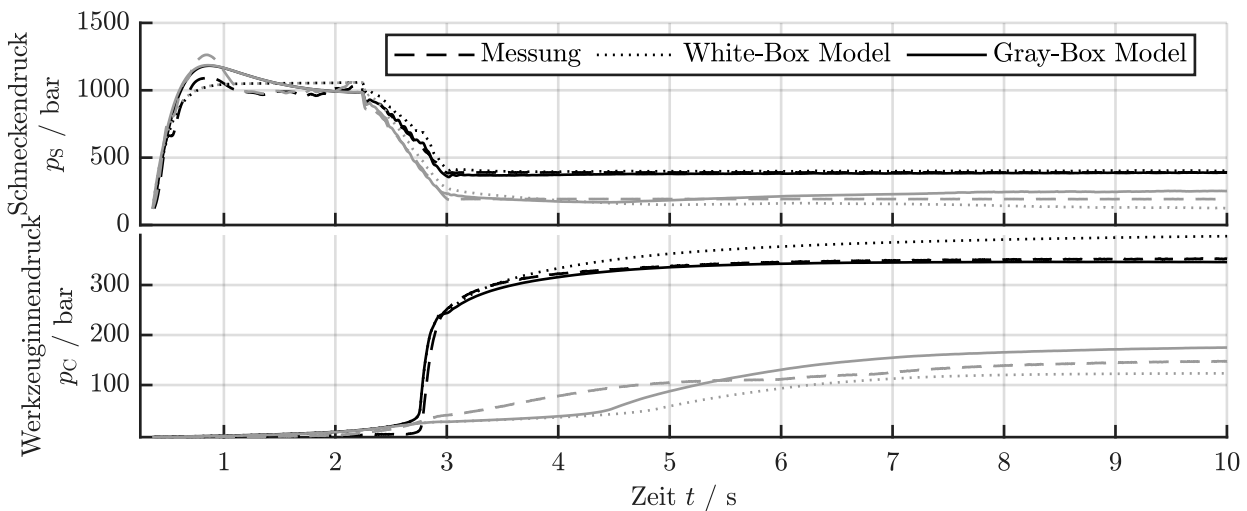


Abbildung 20: Vergleich zwischen Messungen und den erstellten Prozessmodellen

Entwicklung eines Beobachters

Um dem zuvor beschriebenen Problem der Ermittlung des Zeitpunktes der Kavitätsfüllung gerecht zu werden, kommt ein sogenanntes Interacting Multiple Model Filter (IMM) zum Einsatz. Hierfür wird das Modell in zwei Teilmodelle unterteilt (vgl. Abb. 21). Es wird zwischen einem Modell für die Einspritz- und einem Modell für die Nachdruckphase unterschieden. Mithilfe des durch die Schnecke verdrängten Volumens kann eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit für den Modellwechsel und dem damit verbundenen Werkzeuginnen-druckanstieg getroffen werden. Dafür wird in jedem Zeitschritt eine Prädiktion mit beiden Modellen durchgeführt, die mit den Messungen verglichen werden. A-priori-Wissen wird dabei eingebracht, indem eine Wahrscheinlichkeit $P(\Delta V_S)$ für den Druckanstieg als Funktion des durch die Schnecke verdrängten Volumens ΔV_S vorgegeben wird. Diese Wahrscheinlichkeit wird über eine Gaußverteilung modelliert.

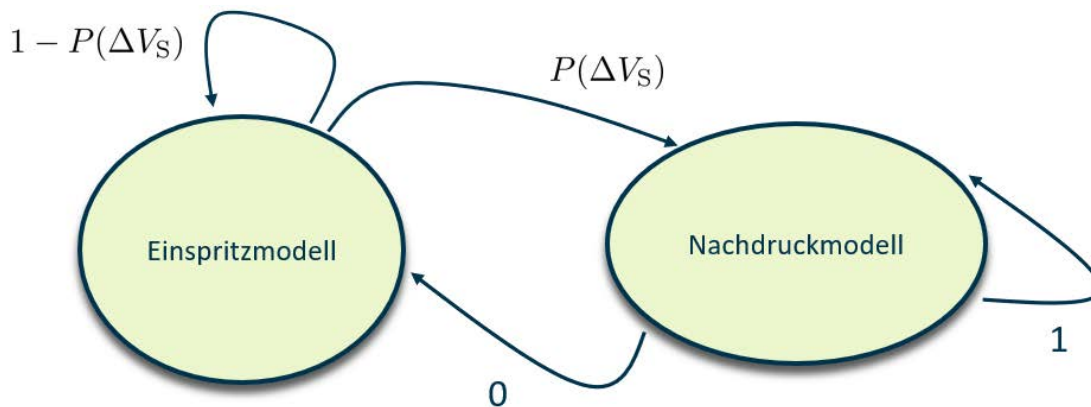


Abbildung 21: Gesamtmodell bestehend aus zwei Teilmodellen mit Übergangswahrscheinlichkeiten

Die Wahrscheinlichkeit $P(\Delta V_S)$ wird im Prozessregler ebenfalls berücksichtigt und dient im Regler zum Umschalten zwischen den beiden Teilmodellen. Das A-priori-Wissen kann dann nach jedem Zyklus aktualisiert werden.

Entwicklung einer modellprädiktiven Prozessregelung

Aufgrund der Echtzeitanforderungen durch die verwendete Hardware wird ein linear-zeitvarianter modellprädiktiver Regler entwickelt. Dieser linearisiert das Modell in jedem Zeitschritt über dem Prädiktionshori-

zont. Anschließend werden die Matrizen für das quadratische Problem gebildet, mithilfe derer die quadratische Optimierung auf der Echtzeit-hardware durchgeführt werden kann. Um die Anzahl der Optimierungsvariablen zu senken, wird zusätzlich vom Konzept des sog. Move-Blockings Gebrauch gemacht. Bei einer Abtastzeit von 8 ms und einem Move-Blocking-Faktor von drei ergeben sich ein Prädiktionshorizont von 0,360 s und ein Stellhorizont von 0,096 s. Anschließend wurde eine Simulationsumgebung in Matlab/Simulink der Firma MathWorks, Natick, USA, entwickelt in der durch Parameter-änderungen des Simulationsmodells gezielt Störungen in den Prozess eingebracht werden können. Diese Simulationsumgebung ermöglicht den simulativen Vergleich und die einfache Entwicklung und das Testen neuer Regler-Implementierungen. Insgesamt wurden in diesem Projekt mehrere unterschiedliche Regler-Implementierungen untersucht:

- MPR mit Extended Kalman-Filter (Vorversuche),
- MPR mit Interacting Multiple Model (IMM)-Filter (Hauptversuche),
- MPR mit Extended-Kalman-Filter und automatischer Anpassung des Punktes der Kavitätsfüllung
- Proportional-Integral-Differential-Regler (PID-Regler) als einfacher Vergleich zu den modellprädiktiven Regelungen.

In Abbildung 22 ist der Aufbau der Prozessregelung visualisiert, welche aus der modell-prädiktiven Regelung (MPR), dem Beobachter und der Spritzgießmaschine besteht. Der Beobachter errechnet aus den an der Maschine gemessenen Größen einen Systemzustand und im Falle des IMM auch eine Wahrscheinlichkeit für einen Druckanstieg innerhalb der Kavität. Der ermittelte Systemzustand dient in der modellprädiktiven Regelung als Ausgangs-punkt der Optimierung. Mithilfe dieses Zustandes optimiert die MPR einen Stellgrößenverlauf, von dem der erste Wert als Steuerspannung an den Umrichter übergeben wird. Dieser Ablauf wird alle 8 ms wiederholt.

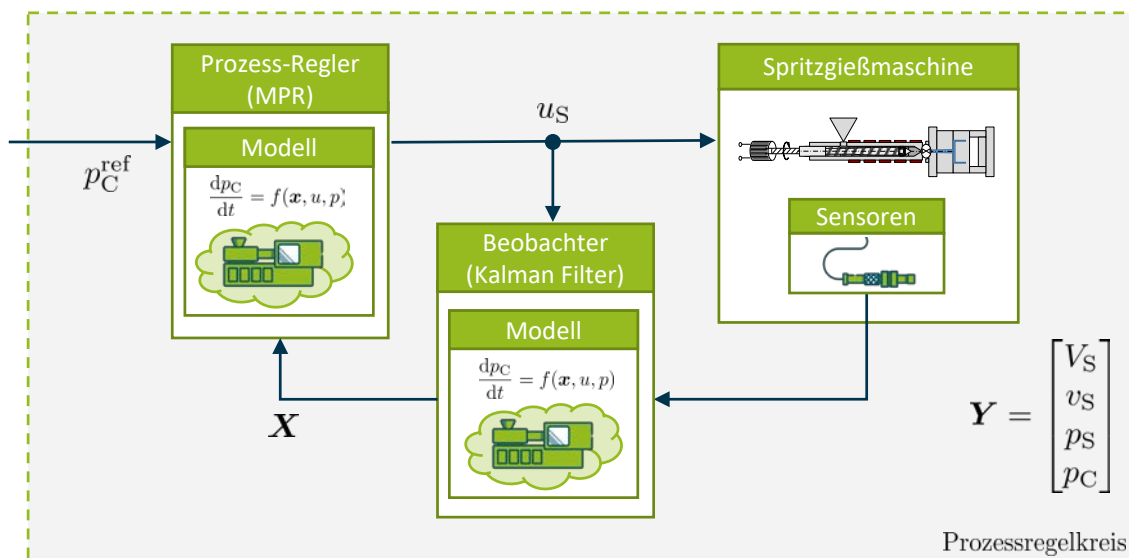


Abbildung 22: Der Aufbau des Prozessregelkreises bestehend aus MPR, Strecke (Spritzgießmaschine) und Beobachter (Kalman Filter)

Externe Anlagentechnik und Software

Zur Implementierung der externen Regelung des Spritzgießprozesses wird unterschiedliche Soft- und Hardware benötigt. Diese muss sowohl für die Aufzeichnung von Prozessdaten als auch zur Prozessregelung geeignet sein.

Die simultane Abfrage von Sensor- und Maschinendaten erfolgt über drahtlose Schnittstellen. Hierbei ermöglicht das Protokoll „Message Queue Telemetry Transport (MQTT) den Datentransfer selbst bei hohen Latenzen und niedrigen Bandbreiten [DC19]. Die Sensor- und Maschinendaten werden über eine Software „Apache Kafka“ der Apache Software Foundations, Forest Hill, USA, an das Topic eines MQTT-Brokers übertragen. Die gesammelten Daten des MQTT-Brokers können über die Software LabVIEW 2020 SP1 der Firma National Instruments (NI), Austin, USA, abgerufen werden. Die vorhandene LabVIEW-Umgebung ist in vorangegangenen Arbeiten am IKV zur phasenlosen Prozessregelung entwickelt worden [Hor24, Vuk24]. Zur Speicherung der Daten besteht eine direkte Anbindung zu einer SQL-Datenbank.

Die Regelung erfolgt über einen Real Time Controller NI PXI-8108 mit dem eingebautem FPGA-Modul NI PXI-782R des Herstellers NI und findet in Echtzeit mit einer Abtastrate von 125 Hz statt. Die verwendeten Regler wurden mithilfe der Software MATLAB/Simulink implementiert und über C-Code in LabVIEW eingebunden. Die Vorgabe von externen Spannungssignalen zur direkten Regelung des Einspritzvolumenstroms bzw. der Schneckengeschwindigkeit wird über den verbauten Servovomrichter AMKASYN KW der Firma AMK Arnold Müller GmbH, Kirchheim unter Teck, ermöglicht.

Messsignale des Regelkreises

Der extern geregelte Spritzgießprozess beginnt mit der konventionellen Maschinenregelung und gibt bei Erreichen des Umschaltkriteriums die Regelung an einen externen Regler ab. Der PID-Regler übernimmt die Regelung bei Erreichen eines Werkzeuginnendruck von 5 bar. Die MPR hingegen regelt den Prozess ab einem Schneckendruck von 120 bar, um bereits vor dem Auftreten der vollständigen Kavitätsfüllung prädiktiv die Schnecke verzögern zu können. Für die externe Regelung benötigen beide Regler Messsignale, um den begonnenen Prozess regeln zu können. Diese Messsignale werden über die gesamte Laufzeit dauerhaft aufgenommen. Eine Übersicht der gemessenen Signale bietet Tabelle 9.

Messsignale	Einheit
Schnecken spannung	[V]
Schnecken volumenstrom	[cm ³ /s]
Schnecken position	[cm]
Schnecken druck	[bar]
Werkzeug innendruck	[bar]

Tabelle 9: Verwendete Messsignale des externen Reglers

1.9 Arbeitspaket 5: Implementierung an einer Technikumsmaschine

Ziel dieses Kapitels ist die Anwendung und Bewertung einer MPR beim Duroplast-Spritzgießen anhand vordefinierter Kriterien, wie der Regelabweichung. Hierfür wird die entwickelte MPR mit der konventionellen Prozessführung und einem PID-Regler verglichen. Dabei werden die in Kapitel 1.5 vorgestellten Formteile und Materialien eingesetzt. Über Versuchsreihen wird die Regelgüte, der Einfluss der MPR auf die resultierenden Bauteileigenschaften, sowie die möglichen prozesseitigen Grenzen der MPR ermittelt und analysiert.

Einstellung des Spritzgießprozesses

Um den Einfluss der Prozessführung mittels MPR bewerten zu können, muss zunächst ein geeigneter Vergleichsprozess, d. h. ein konventioneller Spritzgießprozess eingestellt werden. Dazu fließen die Erkenntnisse aus Kapitel 1.6 in die Prozesseinstellung ein. Vor allem bei den Temperaturen, der Vernetzungszeit sowie den Dosierparametern kann auf das zuvor erlangte Wissen zurückgegriffen werden. Im Vergleich zu Kapitel 1.6 werden der Einspritzvolumenstrom sowie das Druckniveau zunächst niedriger gewählt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass eine sichere Prozessführung gewährleistet werden soll und Maschinen- oder Werkzeugschäden durch die über die MPR gesteuerte Prozessführung vermieden werden sollen. Auch führt z. B. ein verringerter Einspritzvolumenstrom zu einer langsameren Bauteilfüllung und vereinfacht damit die Prozessregelung über die verschiedenen Regelungsansätze. Dieser Aspekt sollte bei der Anwendung beachtet und das Regelverhalten bei schnellerer Bauteilfüllung vor Anwendung geprüft werden. Der konventionelle Vergleichsprozess wird daher nach Tabelle 10 eingestellt.

Prozessparameter	Einheit	Einstellung		
		Einfache Platte	Komplexe Platte	Komplexes Bauteil
Werkzeugtemperatur	[°C]	190		
Aggregattemperatur	[°C]	90		
Einzugszonentemperatur	[°C]	55		
Dosiervolumen	[cm ³]	62	48	37
Umschaltpunkt	[cm ³]	10	13	6
Einspritzvolumenstrom	[cm ³ /s]	10		
Nachdruck	[bar]	400		
Nachdruckzeit	[s]	10		
Staudruck	[bar]	30		
Vernetzungszeit	[s]	75		

Tabelle 10: Spritzgießparameter bei konventioneller Regelung

Bauteilspezifische Parameter wie das Dosiervolumen und der Umschaltpunkt werden je Bauteilgeometrie in Vorversuchen ermittelt. Dabei wird der Prozess so eingestellt, dass ein möglichst geringes Restmassepolster verbleibt. Ein zu großes Restmassepolster könnte über die Vernetzungszeit des Formteils bereits im Schneckenraum vernetzen und zu einem Produktionsstopp führen. Der Staudruck, der Dekompressionshub und die Dosiergeschwindigkeit werden über Voruntersuchungen so gewählt, dass die reaktive Masse innerhalb der Plastifiziereinheit ausreichend für den Spritzgießprozess vorbereitet wird, jedoch nicht innerhalb der Schnecke vernetzt.

Einstellung der verwendeten Regler

In diesem Abschnitt werden die Parametrierungen und Übergabekriterien für die verwendeten Prozessregler beschrieben.

Einstellung des PID-Reglers

Bei Erreichen eines definierten Übergabekriteriums wird der Duroplast-Spritzgießprozess vom PID-Regler übernommen, wobei nur der P-Anteil des Reglers verwendet wird, um ein möglichst robustes Regelergebnis zu erhalten. Aus praktischen Vorversuchen hatte sich ebenfalls gezeigt, dass kein I-Anteil für das Erreichen einer stationären Genauigkeit erforderlich ist. Das Übergabekriterium für die PID-Regelung ist das Erreichen

eines Werkzeug-innendruckes von 5 bar. Der PID-Regler regelt die Schneckenspannung anhand des Werkzeug-innendruckes. Nach der Übernahme regelt der PID-Regler entsprechend der in Tabelle 11 definierten Parameter den Spritzgießprozess. Dabei findet der Spritzgießprozess bis zum Übernahmekriterium ($p_c = 5$ bar) entsprechend den Einstellgrößen des konventionellen Prozesses (vgl. Tabelle 10) statt. Dies betrifft vor allem die Einstellgrößen, die einen direkten Einfluss auf die Dosierung haben (z. B. Dosiergeschwindigkeit, Staudruck, Dekompressionshub) sowie der Werkzeug- und Aggregatstemperatur.

Parameter	Einheit	Einstellwert
K_P	[V/bar]	0,005
K_I	-	0
K_D	-	0
max. Schneckenspannung	[V]	0,1
min. Schneckenspannung	[V]	-0,5
Abtastzeit	[s]	0,008
Druckreferenz	[bar]	300
Länge der Referenz	[s]	10

Tabelle 11: Reglerparametrisierung des PID-Reglers (an der Maschine durch iteratives und händisches Einstellen gefunden)

Die ausgegebene Schneckenspannung ist proportional zur Differenz zwischen Soll- und Ist-Werkzeuginnendruck. Über die minimale und maximale Schneckenspannung wird dem PID-Regler eine Spannungsgrenze vorgegeben. Dies dient in erster Regel zum Schutz der Plastifiziereinheit. Eine Spannung von -0,5 V entspricht einem Einspritzvolumen von circa $13 \text{ cm}^3/\text{s}$ und ist damit vergleichbar zu den Einstellungen des konventionellen Spritzgießprozesses. Ein positiver Spannungswert entspricht einer Beschleunigung der Schnecke nach hinten. Mit einer Abtastzeit von 8 ms werden die Systemgrößen an den PID-Regler übergeben und die Regelgrößen dementsprechend aktualisiert. Die Länge der Druckreferenz entspricht der Nachdruckzeit beim konventionellen Spritzgießen. Die Werkzeuginnendruckreferenz wurde entsprechend dem Werkzeuginnendruck beim konventionellen Duroplast-Spritzgießen gewählt. Ein konventioneller Nachdruck von 400 bar führt aufgrund von Druckverlusten über den Fließweg zu einem Werkzeuginnendruck von 300 - 350 bar.

Einstellung der modellprädiktiven Regelung

Ähnlich wie beim PID-Regler übernimmt die MPR die Regelung nach Erreichen des Übernahme-kriteriums, welches bei der MPR das Erreichen eines Schneckendruckes von 120 bar ist. Auch hier wird vorher über die konventionelle Maschinenregelung eingespritzt, weshalb die Einstellgrößen identisch zum konventionellen Prozess sind. Durch eine Übernahme der Regelung bei einem Schneckendruck von 120 bar übernimmt die MPR den Prozess früher als der PID-Regler. Die Einstellparameter der MPR sind folgend in Tabelle 12 einzusehen.

Parameter	Einheit	Wert
max. Schneckenspannung	[V]	0,1
min. Schneckenspannung	[V]	-0,5
R_{MPR} (grad)	-	1.000
Q_{Kalman} (U-init)	-	5
Abtastzeit	[s]	0,008
Druckreferenz	[bar]	300
Länge der Referenz	[s]	10
Maximal zulässiger Schneckendruck	[bar]	1.500

Tabelle 12: Reglerparametrisierung der MPR

Um eine vergleichbare Grundlage zu den restlichen Reglerkonzepten zu schaffen, wurden reglerunabhängige Werte möglichst nicht verändert. Analog zum PID-Regler wurde die gleiche Schneckenspannungsbegrenzung zum Schutz der Spritzgießmaschine implementiert. Die Druckreferenz sowie die Länge der Referenz wurden ebenfalls in Anlehnung an den konventionellen Prozess und den PID-Regler gewählt. Für beide MPR-Versionen wird mit einer Abtastzeit von 8 ms ein neues Stellsignal entsprechend der Werkzeuginnendruckreferenz und dem Systemzustand berechnet. Die Bestrafung für eine Stellgrößenänderung wird über einen Gewichtungsfaktor R_{MPR} eingestellt. Je höher dieser Wert ist, desto mehr wird eine Veränderung der Schneckenspannung in der Kostenfunktion der MPR bestraft. Der maximal zulässige Schneckendruck beträgt 2.000 bar. Bei Erreichen dieses Wertes gibt der Regler eine Spannung von Null aus, um die Maschine vor potentiellen Schäden zu schützen. Der Einstellfaktor für das Kalman-Filter Q_{Kalman} beschreibt die Varianz des Prozessrauschens für den Stözzustand. Dadurch kann eingestellt werden, wie schnell das Modell durch den Stözzustand korrigiert werden soll. Je höher dieser Wert ist, desto größer ist die Anpassung am Modell.

1.10 Arbeitspaket 6: Bewertung der Regelung an praxisnahen Formteilen

Neben den prüfkörperabhängigen Qualitätskriterien ist ein reproduzierbarer Prozess wesentlich für die erfolgreiche Implementierung der MPR. Die Analyse der Verläufe von Einspritzvolumenstrom und Werkzeuginnendruck ermöglichen es, jeden einzelnen Schuss zu bewerten und die Veränderung der Prozessverläufe über die Zyklen zu analysieren. Die Kostenfunktionen sind in Abbildung 23 einzusehen. Folgende Kostenfunktionen und Prozesswerte sind wesentlich:

- J_{os} – Integral zwischen Werkzeuginnendruckreferenz und Druckspitze
- $J_{os,max}$ – Höhe der Druckspitze
- J_e – Fläche der Abweichung von der Werkzeuginnendruckreferenz
- J_p – Höhe der ersten Schwingung entlang der Referenz
- $J_e + J_{os}^2$ – Flächenintegral zwischen Referenz und Werkzeuginnendruck
- p_{Smax} – Schneckendruckmaximum
- p_{WzInt} – Integral des Werkzeuginnendrucks

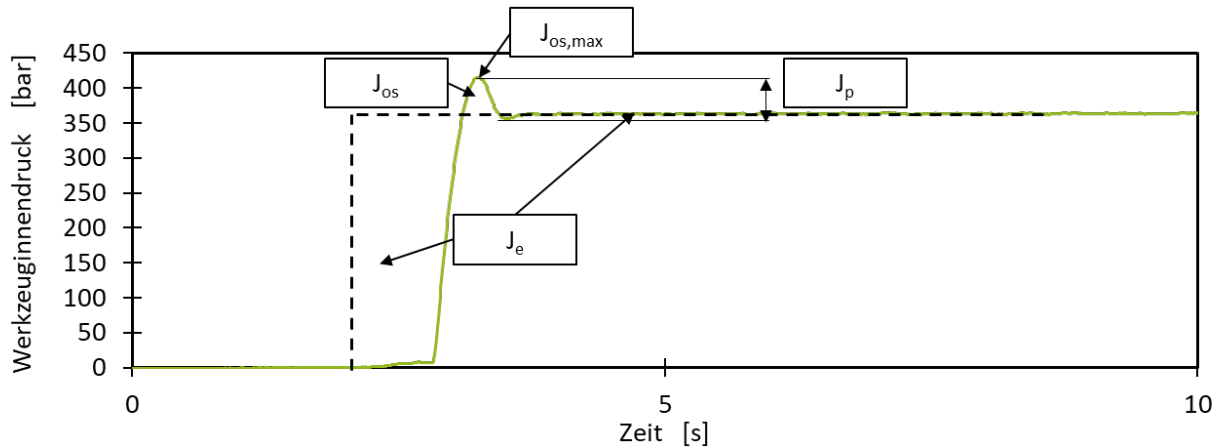


Abbildung 23: Übersicht der berechneten Kostenfunktionen

Die Analyse der Prozessdaten werden für alle Versuchsreihen für die MPR und den PID-Regler durchgeführt. Für die Prozessdaten der konventionellen Versuchsreihen werden lediglich $J_{os,max}$, p_{Smax} und p_{WzInt} ermittelt, da die restlichen Kostenfunktionen lediglich auf ein Werkzeuginnendruckverlauf entlang einer Referenz anwendbar sind. Dies ist bei der konventionellen Prozessführung nicht der Fall. Die vorgestellten Kennwerte werden direkt aus den Prozessdaten mithilfe eines MATLAB-Skripts automatisiert ausgelesen. Im Rahmen dieser Untersuchungen werden die Stetigkeit und die Stabilität über die Zyklen hinweg beurteilt. Ferner wird das Maß des Überschwingens analysiert. Dieses Maß ist ein Indikator für die Regelgüte. Zudem können sensible Strukturen wie Sensorik oder Einlegebauteile durch hohe Druckspitzen beschädigt werden.

Bewertung der modellgestützten prädiktiven Regelung

Nach Einstellen der MPR und des PID-Reglers erfolgt eine vollumfängliche Analyse der Regelgüte und des Einflusses der Prozessführungsstrategie auf verschiedene Bauteileigenschaften. Wie beschrieben, werden die Kostenfunktionen als Bewertungskriterium für die Prozessstabilität ausgewertet. Anschließend werden die resultierenden Bauteildicken und die -masse für alle drei Regelungskonzepte (Konv., PID, MPR) analysiert.

In den sogenannten Referenzversuchen erfolgt zunächst ein direkter Vergleich der Prozessführungskonzepte unter den in Tabelle 10 bis Tabelle 12 gelisteten Prozessparametern. Zur weiteren Bewertung der Regelung bei verschiedenen Randbedingungen erfolgt anschließend sowohl eine Variation der Werkzeug- und Aggregattemperatur als auch eine Variation der Druckreferenz. Mithilfe dieser Untersuchungen sollen die individuellen Grenzen der MPR ermittelt werden. Der PID-Regler wird für diese Versuchsreihen nicht mit einbezogen. Weiterhin werden die resultierenden Bauteileigenschaften ausgewertet und vor allem der Einfluss der MPR auf die Oberflächengüte und den Bauteilverzug analysiert. Bei der darauf folgenden Untersuchung der mechanischen Eigenschaften wird ein Vergleich zwischen allen drei Regelungskonzepten ausgewertet. Abschließend wird das Anfahrverhalten und die Reaktionsfähigkeit der MPR auf Chargenschwankungen vorgestellt und bewertet.

Bewertung der Regelgüte mittels Kostenfunktion-Analyse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Kostenfunktion-Analyse vorgestellt. Dadurch wird eine Beurteilung der Reproduzierbarkeit und der Abweichung vom Referenzverlauf möglich. Hierbei werden, wie bereits beschrieben, erst die Kennwerte (maximaler Werkzeuginnendruck $J_{os,max}$, Schneckendruckmaximum p_{Smax} und Werkzeuginnendruckintegral p_{WzInt}) ausgewertet, die einen Vergleich zwischen der MPR und der konventionellen Prozessführung ermöglichen. Zunächst werden die Ergebnisse der Referenzversuche für das PF1110

ausgewertet. Hierfür wird die komplexe Platte als Bauteilgeometrie verwendet. In Abbildung 24 ist die Veränderung des Werkzeuginnendruckintegrals über die Zyklen für die MPR und die konventionelle Regelung abgebildet. Zudem kann auf der rechten Seite der Abbildung die Mittelwerte der Schneckendruckmaxima abgelesen werden.

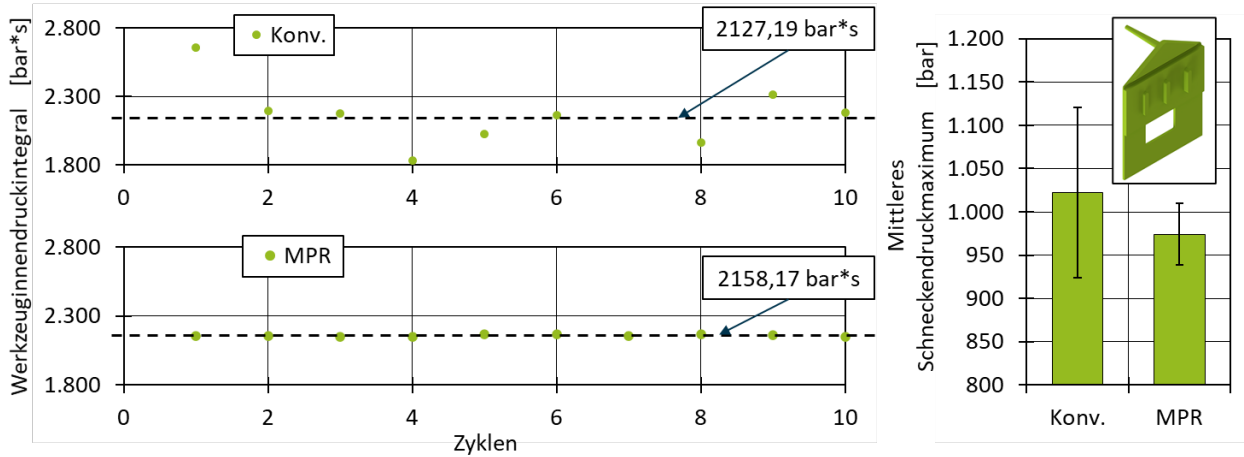


Abbildung 24: Kennwertanalyse der Hauptversuche für die konventionelle Prozessführung und die MPR (PF1110)

Die Ergebnisse zeigen, dass die Standardabweichung der Werkzeuginnendruckintegrale bei konventioneller Prozessführung deutlich größer als bei Einsatz der MPR ist. Mithilfe der MPR kann bei diesem Prozesspunkt die Standardabweichung des Werkzeuginnendruckintegrals von 243,5 bar s auf 6,42 bar s reduziert werden. Die MPR ist in der Lage, über die Versuchsreihe hinweg prozessstabil reproduzierbare Prozessverläufe zu ermöglichen. Der durchschnittliche maximale Schneckendruck ist für die MPR auf einem ähnlichen Niveau, wobei auch eine geringere Schwankung bei der MPR zu erkennen ist. Die leichte Verringerung könnte auf den etwas höheren Einspritzvolumenstrom der MPR zurückzuführen sein, die sich positiv auf die Fließfähigkeit während der Einspritzphase auswirkt. Zusammenfassend konnte durch die MPR eine deutlich bessere Prozessstabilität mit leicht geringeren Schneckendruck-maxima erreicht werden. In Abbildung 25 ist der maximale Werkzeuginnendruck über die Zyklen für MPR und konventionelle Regelung dargestellt.

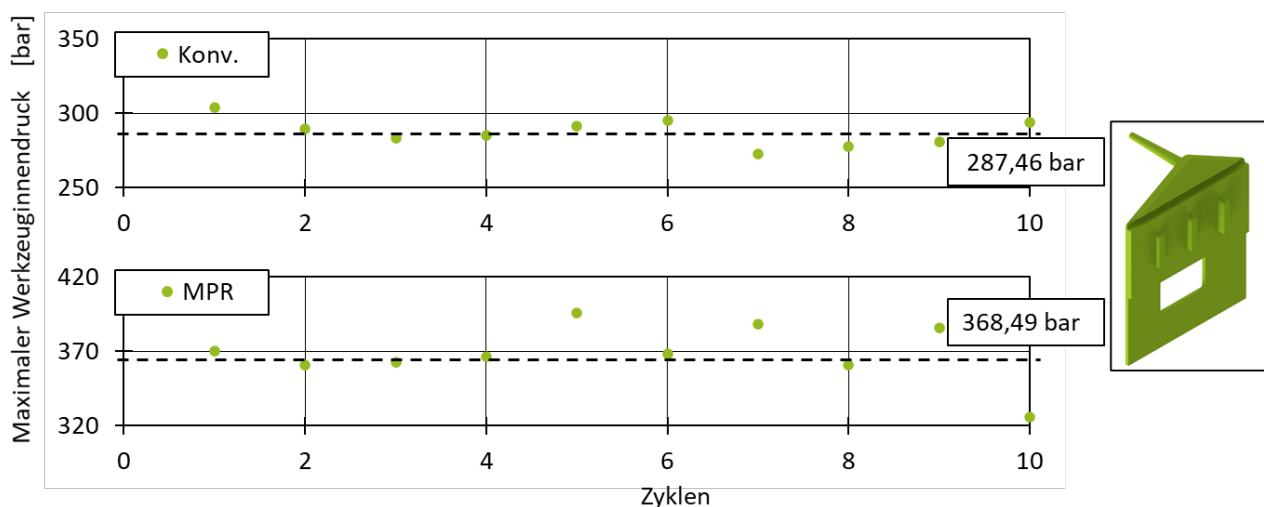


Abbildung 25: Maximaler Werkzeuginnendruck für die konv. Prozessführung und die MPR

Die Schwankungen des maximalen Werkzeuginnendruckes befinden sich für beide Prozessführungskonzepte auf einem ähnlichen Niveau. Der höhere, maximale Werkzeuginnendruckwert der MPR resultiert aus dem Überschwingen des Werkzeuginnendruckes über die Referenz. Das Überschwingen gilt es durch eine weitere

Optimierung der MPR zu minimieren. Ansätze dafür werden in Kapitel 1.10 vorgestellt. In Abbildung 26 ist die Veränderung des Werkzeuginnendruckintegrals über die 10 Zyklen im Vergleich für den PID-Regler und die MPR dargestellt. Rechts in der Abbildung ist das Schneckendruckmaximum inklusive der Standardabweichung aufgeführt.

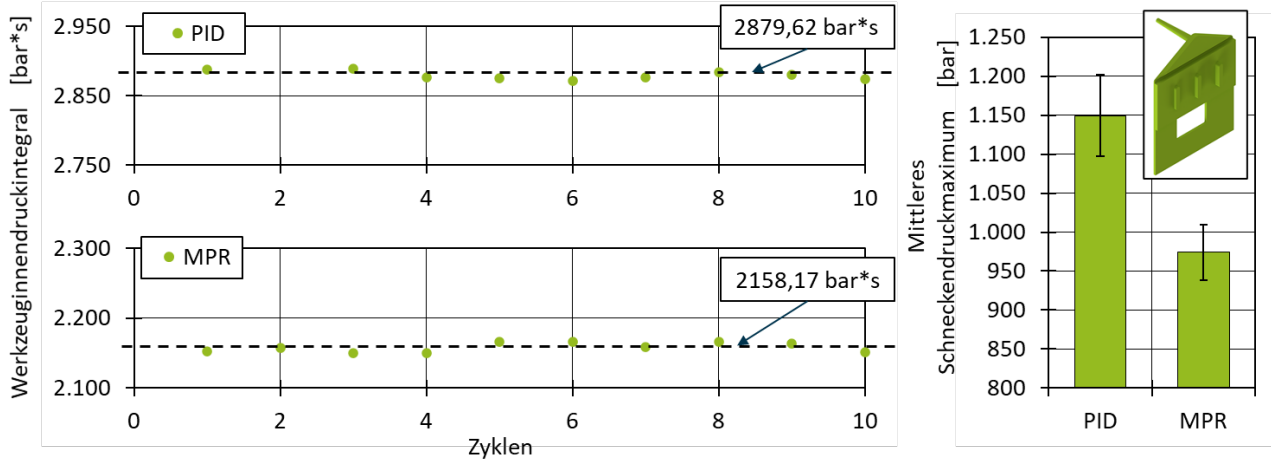


Abbildung 26: Kennwertanalyse für den PID-Regler und die MPR (PF1110)

Bei Betrachtung der Entwicklung des Werkzeuginnendruckintegrals über die Zyklen wird eine ähnlich große Schwankungsbreite für beide Regelungskonzepte deutlich. Sowohl mit dem PID-Regler als auch mit der MPR können reproduzierbare Werkzeuginnendruckintegrale realisiert werden. Das höhere Werkzeuginnendruckintegral des PID-Reglers ist durch das spätere Übernahmekriterium bei 5 bar Werkzeuginnendruck und der damit verbundenen, längeren Druckhaltephase zu erklären. Der durchschnittlich maximale Schneckendruck ist bei der MPR geringer als beim PID-Regler. Dieser Wert schwankt zudem weniger als beim PID-Regler, was anhand des Vergleichs der Standardabweichung deutlich wird. Die Regelgüte kann anhand der Kostenfunktionen J_p und J_{os} bewertet werden. Diese Kostenfunktionen sind über die Zyklen für beide alternativen Regelungskonzepte in Abbildung 27 aufgeführt.

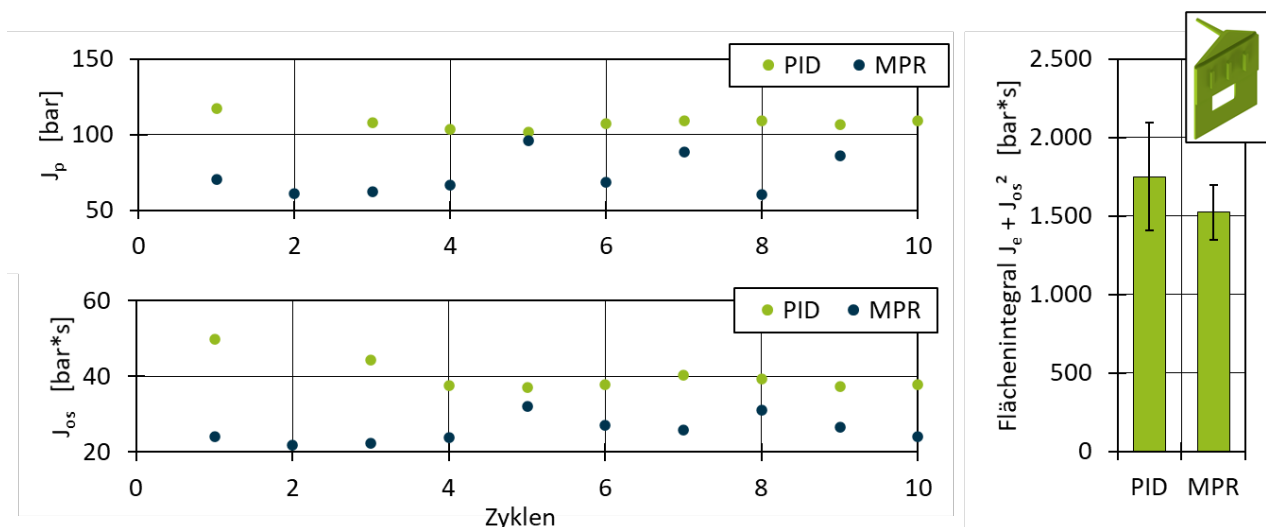


Abbildung 27: Kostenfunktionsanalyse für den PID-Regler und die MPR (PF1110)

Die Überschwinghöhe J_p befindet sich beim PID-Regler auf einem generell höheren Niveau als bei der MPR. Gleiches gilt für die eingeschlossene Fläche oberhalb der Referenz J_{os} . Dies resultiert aus dem trägen Regelverhalten des PID-Reglers und der besseren Fähigkeit zur Antizipation des Prädiktionshorizonts der MPR. Gleichzeitig ist das höhere Überschwingen auch eine Erklärung für das erhöhte Schneckendruckmaximum

des mittels PID-Regler geregelten Prozesses in Abbildung 27. Vergleichbare Ergebnisse werden für das komplexe Bauteil (Kapitel 1.5) mit dem Material PF6680 erzielt. In Abbildung 28, links ist die Veränderung des Werkzeuginnendruckintegrals über die Zyklen für die MPR und die konventionelle Regelung abgebildet. Auch hier wird eine höhere Schwankung des Werkzeuginnendruckintegrals bei der konventionellen Prozessführung deutlich. Mit der MPR ist demnach auch bei einer weiteren komplexen Bauteilgeometrie bei Verwendung eines anderen Materials ein stabilerer Prozess mit einer besseren Reproduzierbarkeit möglich. Im Vergleich zu den Versuchen mit PF1110 ist ein deutlich größerer absoluter Unterschied zwischen den konventionellen und den mittels MPR geregelten Versuchen erkennbar, was auf die veränderte Bauteilgeometrie zurückzuführen ist.

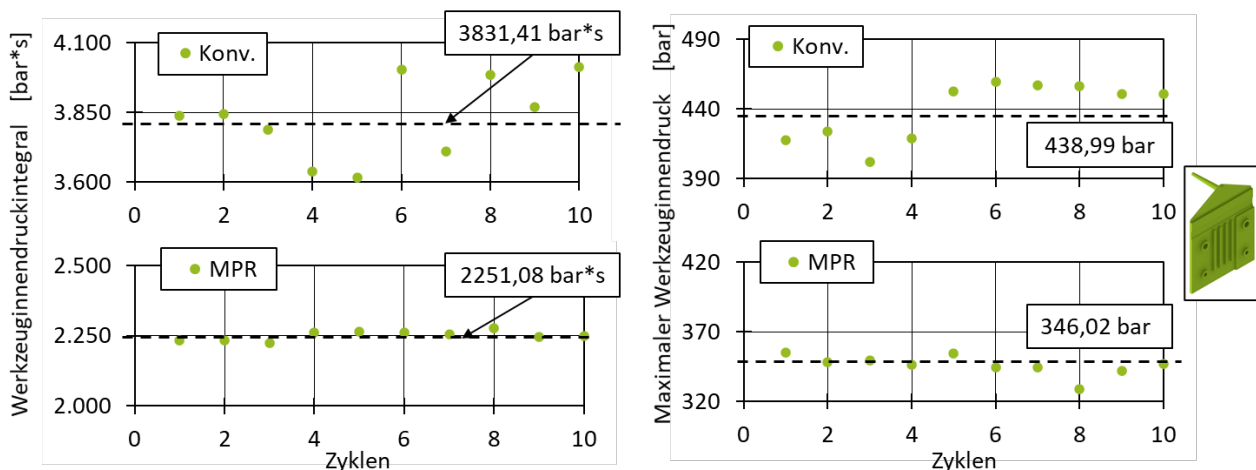


Abbildung 28: Kennwertanalyse der Hauptversuche für die konventionelle Prozessführung und die MPR (PF6680)

In weiteren Versuchen sollte für eine bessere Vergleichbarkeit die Dauer der Druckreferenz für die MPR angepasst werden. Eine höhere Schwankungsbreite fällt auch bei Betrachtung des maximalen Werkzeuginnendruckes über die Zyklen auf. Dieser ist in Abbildung 28, rechts zu sehen. Im Vergleich zum PID-Regler weist die MPR auch bei dieser Bauteilgeometrie unter Verwendung eines Alternativmaterials eine höhere Reproduzierbarkeit auf. Dies ist in Abbildung 29 zu sehen. Hier sind die Werkzeuginnendruckintegrale über die Zyklen für PID-Regler und MPR dargestellt. Es muss jedoch beachtet werden, dass bei einem höheren Absolutwert auch höhere absolute Schwankungen zu erwarten sind. Rechts ist das durchschnittliche Schneckendruckmaximum abgebildet.

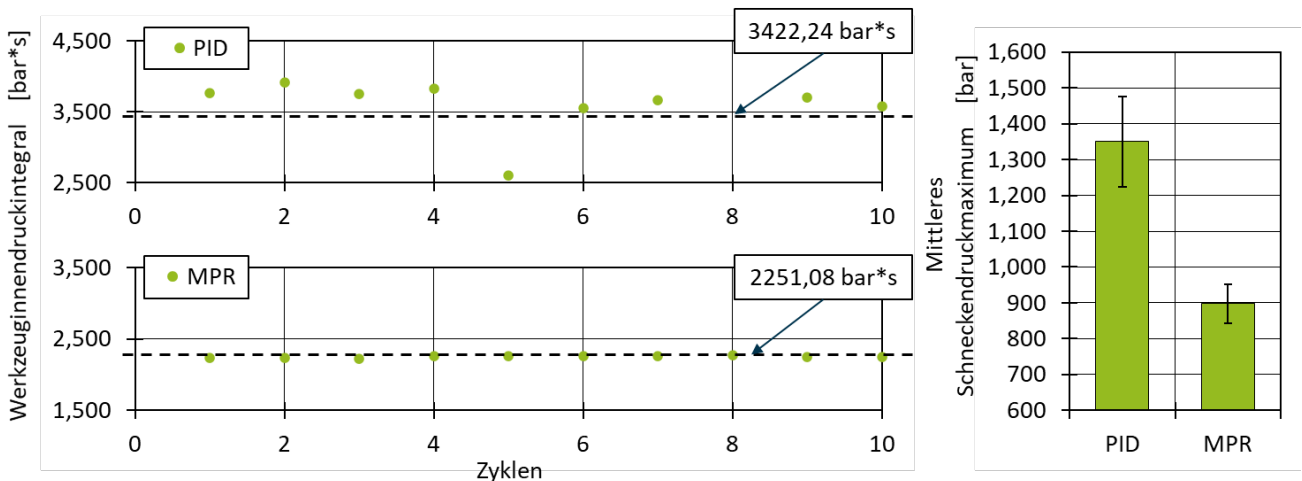


Abbildung 29: Kennwertanalyse der Hauptversuche für den PID-Regler und die MPR (PF6680)

Aufgrund des anderen Übernahmekriteriums liegt für den PID-Regler absolut ein deutlich höheres Werkzeuginnendruckintegral vor. Zusammenfassend gelingt es der MPR effektiv den Prozess entsprechend der Referenz zu regeln und den Werkzeuginnendruck konstant zu halten. Auch im Vergleich zum PID-Regler wird eine höhere Prozessstabilität material-übergreifend deutlich.

Ergebnisse der Formteilmasse und der Formteildicke

In diesem Kapitel werden die resultierende Bauteilmasse und der Bauteildickenverlauf für PF1110 sowie PF6680 ausgewertet. In dieser Versuchsreihe wurden alle Regelungskonzepte an zwei verschiedenen, komplexen Bauteilgeometrien verwendet. Die Mittelwerte der Bauteilmasse für alle drei Regelungskonzepte sind in Abbildung 30 dargestellt.

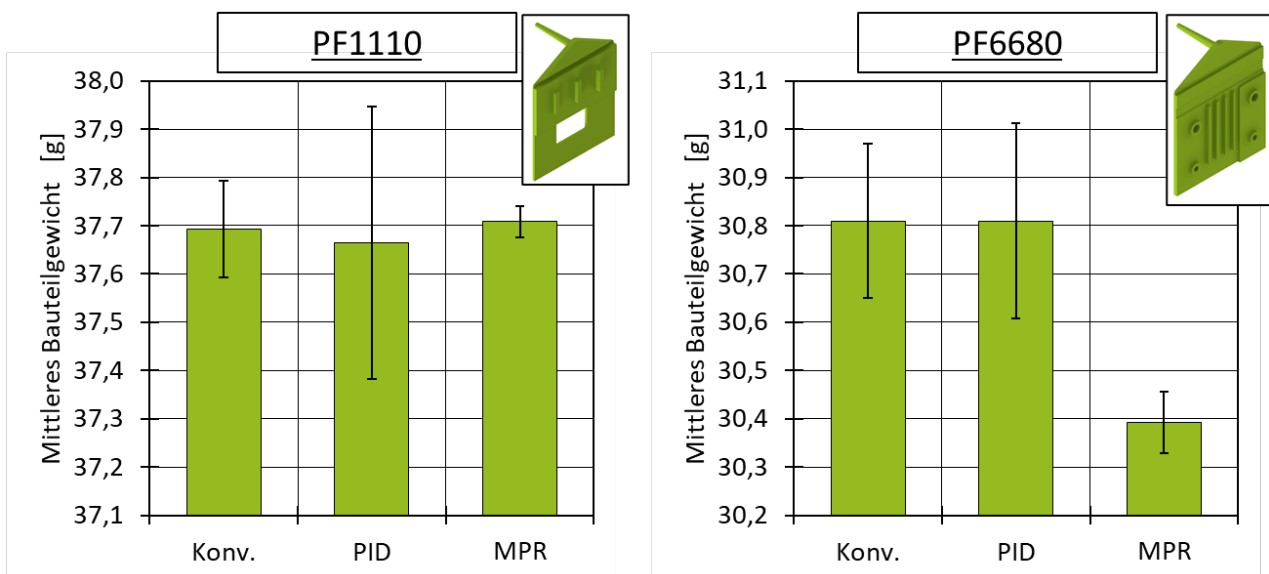


Abbildung 30: Mittlere Bauteilmasse für alle Regelungskonzepte (PF1110 und PF6680)

Die mittlere Bauteilmassen befinden sich für PF1110 für alle drei Regelungskonzepte auf einem ähnlichen Niveau. Auffällig ist jedoch die geringe Standardabweichung bei der Bauteilmasse für die MPR. Diese beträgt lediglich 0,09 g. Demnach konnte aufgrund des stetigen Prozessverlaufs durch die MPR die Bauteilmasse genauer eingestellt werden. Ähnliche Erkenntnisse werden bei Betrachtung von Abbildung 30, rechts deutlich. Hier sind die mittleren Bauteilmassen für das PF6680 bei Verwendung des komplexen Bauteils dargestellt. Die mittlere Bauteilmasse für die MPR ist leicht geringer, was auf das niedrigere Druckniveau sowie das

geringere Werkzeuginnendruckintegral in der Kavität zurückzuführen ist (vgl. Abbildung 28 und 29). Um ein ähnliches Massenniveau zu erreichen, kann die Druckreferenz der MPR erhöht werden, bzw. vor allem die Druckhaltedauer aufgrund des unterschiedlichen Übernahmekriteriums verlängert werden. Durch die MPR kann auch die Schwankung um die mittlere Bauteilmasse reduziert werden.

In Abbildung 31 ist die Bauteildicke entlang des Bauteils für alle drei Regelungskonzepte dargestellt. Die Daten beziehen sich auf die komplexe Platte und das Material PF1110. Die Wanddickenunterschiede zwischen MP 1 und MP 2 sowie MP 3 und MP 4 resultieren aus den Wanddickensprüngen der komplexen Bauteilgeometrie. Die Abnahme ist bei allen Prozessführungskonzepten auf einem ähnlichen Niveau und es können keine signifikanten Dickenunterschiede zwischen den Prozessführungskonzepten festgestellt werden.

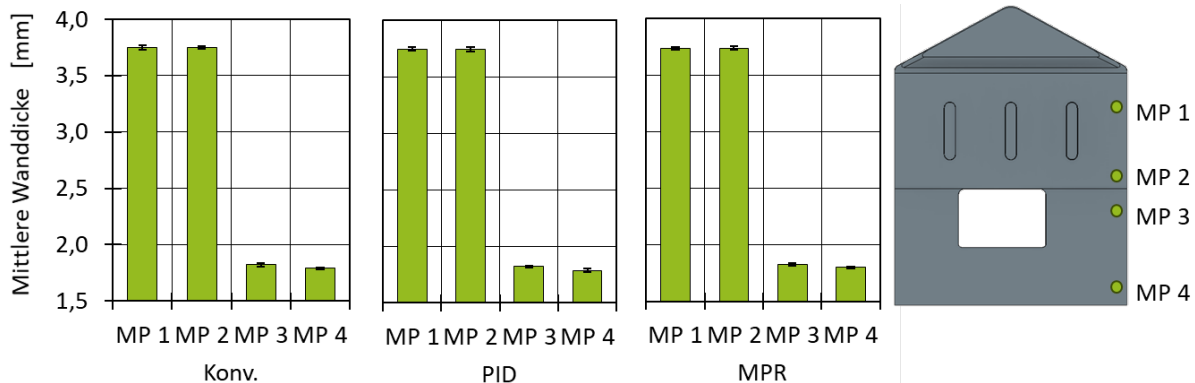


Abbildung 31: Mittlere Wanddicke für alle Regelungskonzepte (PF1110)

Diese Erkenntnisse werden auch bei Betrachtung der anderen komplexen Bauteilgeometrie deutlich. Diese sind für das PF6680 in Abbildung 32 einzusehen. Zusammenfassend können mit der MPR vergleichbare Bauteileigenschaften hinsichtlich der Bauteildicke realisiert werden.

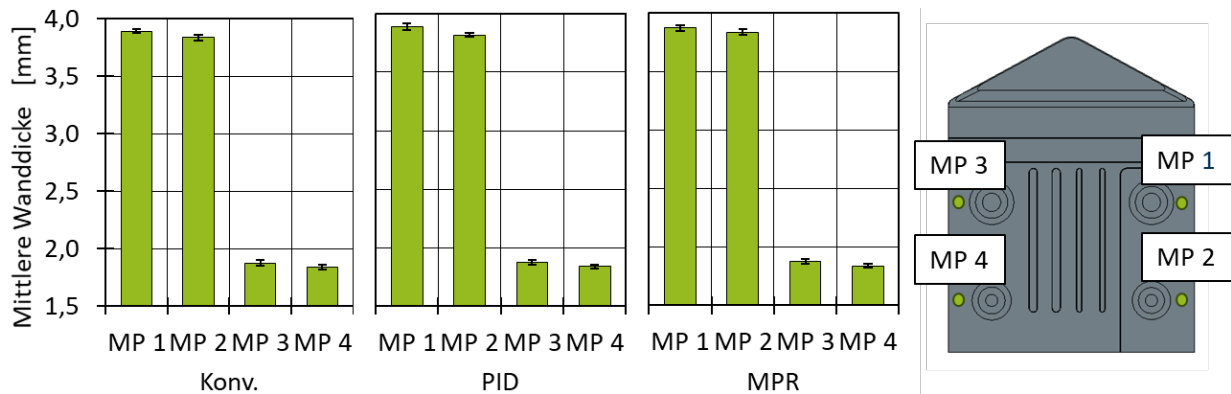


Abbildung 32: Mittlere Wanddicke für alle Regelungskonzepte (PF6680)

Untersuchungen zum Einfluss von Temperaturvariation auf die Regler-Performance

Der Einfluss der thermischen Randbedingungen wird anhand einer Variation der Werkzeug- und Aggregattemperatur untersucht. Die Werkzeugtemperatur ist der entscheidende Faktor bei der Aufbringung der benötigten Vernetzungsenergie beim Duroplast-Spritzgießen [Eng15, Höe14]. Eine Schwankung der Werkzeugtemperatur hat wesentlichen Einfluss auf die Vernetzungsdichte und damit direkt auf die Bauteilqualität. Die Aggregattemperatur ist wesentlich für die Realisierbarkeit des Duroplast-Spritzgießprozesses [Eng15, Höe14].

Ausgangslage für die gewählten Parametergrenzen bilden die Datenblätter beider Materialien [NN22a, NN22b]. Es ergibt sich demnach ein vollfaktorieller 2²-Versuchsplan (Tabelle 13), welcher anschließend statistisch ausgewertet wird. Je Versuchspunkt werden fünf Prüfkörper pro Regelung hergestellt. Aufgrund der hohen Zykluszeit werden fünf Zyklen zur Auswertung herangezogen. Die restlichen Einstellparameter sind entsprechend Tabelle 10 bis Tabelle 12 gewählt.

Prozessparameter	Einheit	-	+
Werkzeugtemperatur T_{Wkzg}	[°C]	190	210
Aggregattemperatur T_{Agg}	[°C]	90	100

Tabelle 13: Parameter und Faktorstufen des Versuchsplans zur Temperaturvariation

Im Rahmen der Versuche konnten jedoch für die niedrige Aggregattemperatur von 90 °C keine Bauteile hergestellt werden. Grund dafür ist die Schneckendruckbegrenzung, die als Sicherheitsfeature in die MPR eingebaut ist. Bei der geringen Aggregattemperatur kommt es demnach aufgrund unzureichender Viskositätsverringerung während Plastifizierung und Einspritzen zu einem Druckanstieg auf einen Schneckendruck auf mindestens 2.000 bar, was zu einem Abbruch des Prozesses führt. Es wird daher nur der Einfluss der Werkzeugtemperatur auf die Regelgüte ausgewertet. In Abbildung 33 sind die Mittelwerte der Überschwinghöhe J_p , die eingeschlossene Fläche oberhalb der Referenz J_{os} sowie dem Flächenwert $J_e + J_{os}^2$ für beide Versuchspunkte aufgeführt.

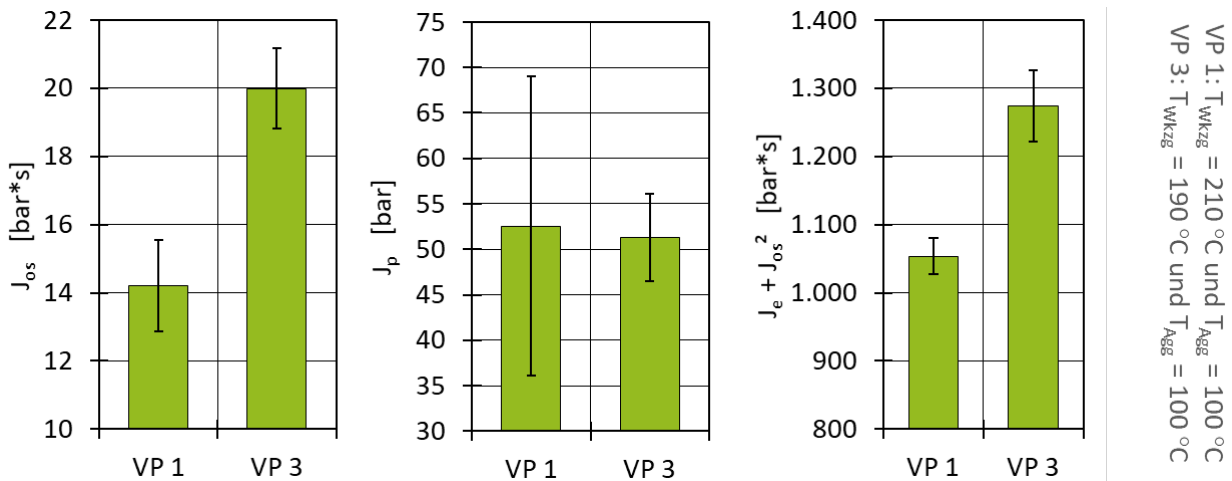


Abbildung 33: Kostenfunktionsanalyse der MPR für VP 1 (++) und VP 3 (-+)

Durch die höheren Werte für J_{os} und $J_e + J_{os}^2$ wird deutlich, dass durch niedrigere Werkzeugtemperaturen und vermutlich durch die damit verbundene höhere Materialviskosität eine größere Abweichung von der Referenz stattfindet. Während der Formteillfüllung kommt es durch die geringere Werkzeugtemperatur zu einem langsameren Anstieg der Viskosität. Eine Aussage über die Reglerstabilität bei niedrigen Aggregattemperaturen kann demnach erst getroffen werden, wenn die Abbruchbedingung angepasst wird.

Untersuchungen zum Einfluss von Druckvariation auf die Regler-Performance

Um die Stabilität der MPR bei unterschiedlichen Produktionsbedingungen überprüfen zu können, wird die Reglerperformance bei unterschiedlichen Referenzen ausgewertet. Dafür wird sowohl das Druckniveau als auch die Länge der Referenz in einem 2²-Versuchsplan mit Sternpunkt variiert. Hierfür wird das PF6680 und die „komplexe Platte“ sowohl mit der MPR als auch der konventionellen Regelung verwendet. Auch hier werden je Versuchspunkt fünf Prüfkörper hergestellt. Der Versuchsplan wird anschließend statistisch ausgewertet. In Tabelle 14 sind die Grenzen des Versuchsplans einzusehen.

Prozessparameter	Einheit	-	0	+
Höhe der Druckreferenz (MPR)	[bar]	200	300	400
Nachdruck (Konv. Regelung)	[bar]	300	400	500
Zeit	[s]	5	10	15

Tabelle 14: Parameter und Faktorstufen des Versuchsplans zur Druckvariation

Die Nullpunkte des Versuchsplans ergeben sich aus den Einstellungen der Referenzversuche (Tab. 7.1). Für die konventionelle Regelung und die MPR ergeben sich analog zur Prozesseinstellung/ Regler-Parametrisierung unterschiedliche Druckniveaus. Diese ergeben sich aus den unterschiedlichen Regelungskonzepten. Bei der MPR wird direkt der Werkzeuginnendruck geregelt. Durch den konventionellen Nachdruck wird in erster Linie die Höhe des druckabhängigen Einspritzvorganges eingestellt. Aus dem eingestellten Nachdruck resultiert anschließend aufgrund von Druckverlusten ein geringerer Werkzeuginnendruck. Um ein vergleichbares Werkzeuginnendruckniveau aufrechtzuerhalten, wird der Nachdruck um 100 bar erhöht. Die Grenzen des Versuchsplans wurden in Voruntersuchungen auf Realisierbarkeit geprüft. Unterhalb einer Druckreferenz von 200 bar bei 5 s ist die Produktion von Prüfteilen nicht mehr sinnvoll möglich. Daher wird diese Einstellung als Minimum des Versuchsplans gewählt. Aus der entsprechenden Symmetrie des Versuchsplans entlang des Nullpunkts ergibt sich ein Maximum von 400 bar bei 15 s. Für den konventionellen Prozess ergibt sich ein Minimum von 300 bar bei 5 s und ein Maximum von 500 bar bei 15 s. Durch die Auswertung des Versuchsplans kann der Einfluss verschiedener Druckprofile auf die Regelungsgüte der MPR ermittelt werden. Im Rahmen dieser Auswertung wird der Einfluss der Referenzhöhe und -zeit auf die eingeschlossene Fläche oberhalb der Referenz J_{os} und der Überschwinghöhe J_p ermittelt. In Abbildung 34 ist das resultierende Pareto-Diagramm und die Haupteffekte beider Einstellungsparameter für die Fläche J_{os} aufgeführt.

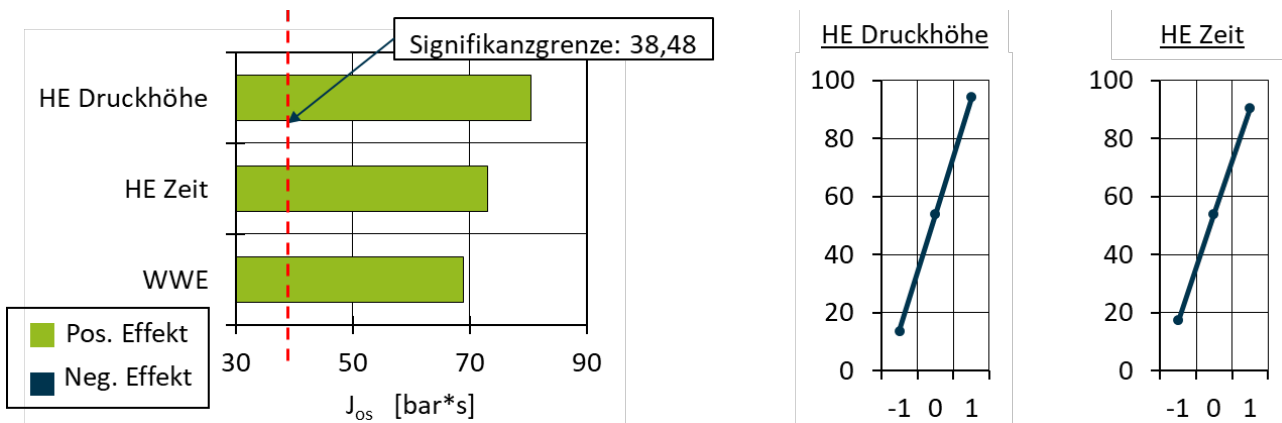


Abbildung 34: Pareto-Diagramm und Effektanalyse der MPR für J_{os}

Sowohl die Referenzhöhe als auch die Referenzzeit haben einen Einfluss auf die Fläche J_{os} . Dieser ist für alle Effekte bei einer Sicherheit von über 99 % signifikant. Demnach ist die Regler-abweichung bei höheren Referenzdrücken und längeren Referenzzeiten größer. Grundsätzlich ist dieser Effekt erwartbar, da höhere Absolutwerte auch mit höheren absoluten Abweichungen einhergehen. Bezogen auf die Überschwinghöhe J_p hat lediglich die Referenzhöhe einen signifikanten Effekt auf das erste Überschwingen. Höhere Druckreferenzen haben einen verringernden Effekt auf das erste Überschwingen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass für das Erreichen eines höheren Druckniveaus bei gleicher Füllgeschwindigkeit mehr Zeit benötigt wird. Dies führt dazu, dass die MPR mehr Zeitschritte während des im Duroplast-Spritzgießens steilen Druckanstieges zur

Berechnung neuer Stellwerte hat und somit frühzeitig auf den Druckanstieg reagieren kann. Die Druckhalte-
dauer bzw. Dauer der Referenz keinen signifikanten Einfluss auf das Überschwingen. Dies entspricht den Er-
wartungen, da die Druckhaltezeit nach dem Druckanstieg folgt und diesen nicht beeinflusst.

Ergebnisse der resultierenden Oberflächengüte

Die Glanzeigenschaften eines Duroplast-Bauteils sind wesentlich abhängig von der Prozess-führung. So hat
das Füllverhalten aber auch die Werkzeugtemperatur einen signifikanten Einfluss auf den Glanz an der Ober-
fläche. Ein hoher Glanz resultiert unter anderem aus einem hohen und gleichmäßigen Druck in der Werk-
zeugkavität [BBO+07]. Je nach Anwendung ist der Oberflächenglanz von hoher Bedeutung. Da das Füllver-
halten bei alternativen Reglungskonzepten von der konventionellen Prozessführung abweichen kann, muss
die MPR in der Lage sein einen ausreichenden Glanz realisieren zu können. Im Rahmen dieses Abschnittes
werden die Ergebnisse aus der Glanzmessung (vgl. Kapitel 1.5) für alle drei Reglungskonzepte ausgewertet.
In Abbildung 35 ist der mittlere Glanz für alle drei Reglungskonzepte dargestellt.

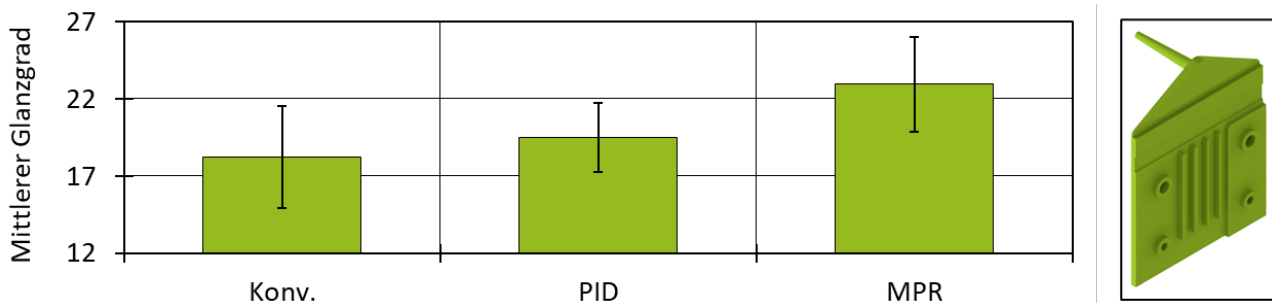


Abbildung 35: Mittlerer Glanzgrad je Reglungskonzept (PF6680, komplexes Bauteil)

Die dargestellten Ergebnisse sind die Mittelwerte der gemessenen Glanzwerte je Bauteil, wobei keine statis-
tisch signifikanten Erkenntnisse gewonnen werden können. Mit der MPR können durchschnittlich geringfügig
höhere Glanzwerte erreicht werden. Die geringsten Glanzwerte werden mit der konventionellen Prozessfüh-
rung realisiert. Die Standard-abweichung ist bei allen drei Regelungskonzepten auf einem ähnlichen Niveau.
Der geringere Glanzgrad der konventionellen Prozessführung könnte durch das geringere Druckniveau über
die Komprimierungsphase entstehen. Dadurch kommt es zu einer geringeren Anpressung an die Kavitäts-
wand, woraus ein geringerer Glanz entsteht.

Ergebnisse der Verzugsuntersuchungen

Duroplastische Formteile zeichnen sich durch eine sehr gute Maßhaltigkeit auf. Da die Maßhaltigkeit der
Formteile eines der wesentlichen Materialvorteile von Duroplasten ist, darf die MPR diese nicht negativ be-
einflussen. Im Rahmen dieses Kapitels wird die Maßhaltigkeit der komplexen Platte (PF1110) und des kom-
plexen Bauteils (PF6680) analysiert. Die Messpunkte für die Maßhaltigkeit sind Kapitel 1.5 zu entnehmen. Er
werden die Ergebnisse für die komplexe Platte und PF1110 vorgestellt bewertet. In Abbildung 36 sind die
Mittelwerte der Abweichungen von der Soll-Geometrie für den Fließwiderstand in der Mitte sowie die Plat-
tenbreite vor und nach dem Dickensprung dargestellt. Die dargestellten Ergebnisse werden mit allen drei
Prozessführungskonzepten generiert. Die Abweichung der Aussparung in der Mitte (Messstrecke 1) ist für
alle drei Reglungskonzepte auf ähnlichem Niveau. Bei Messstrecke 2 ist die Abweichung der MPR auf glei-
chem Niveau wie bei der konventionellen Prozessführung. Auffällig wird die vergrößerte Standardabwei-
chung der MPR. Hinsichtlich der Plattenbreite oberhalb des Dickensprungs weicht die MPR geringer vom
Sollwert ab als bei der konventionellen Prozessführung. Die geringste Abweichung von Messstrecke 3 ist
beim PID-Regler zu vermerken. Bei Messstrecke 4 weicht die MPR am stärksten vom Sollwert ab.

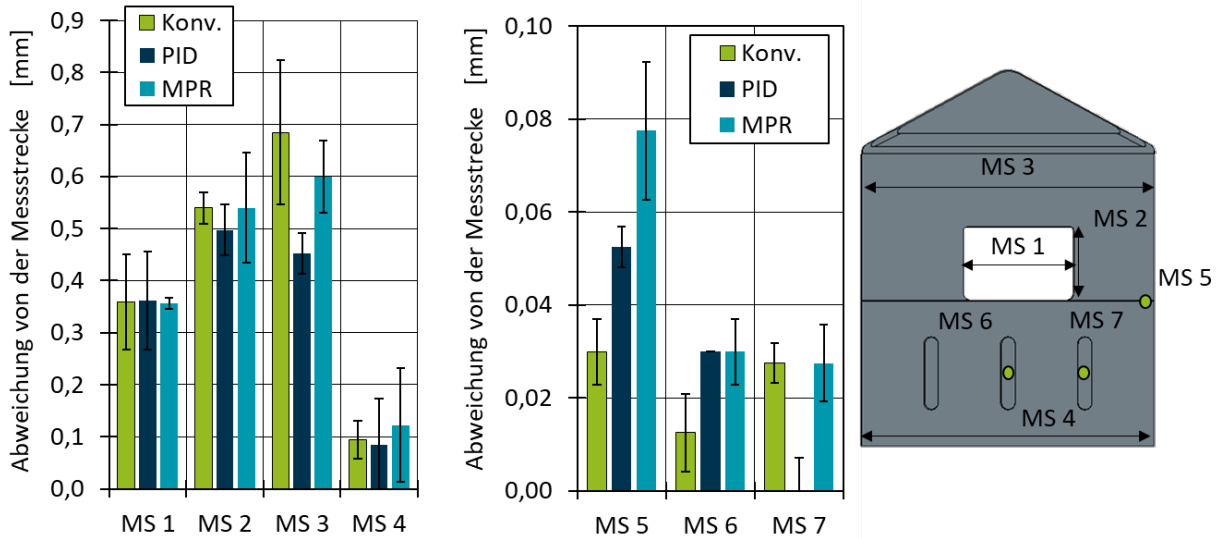


Abbildung 36: Ergebnisse der Maßhaltigkeitsuntersuchung für Messstrecke 1-4 je Regelungskonzept

Die Abweichung von der Dickensprunghöhe (Messstrecke 5), der erste Rippenhöhenunterschied (Messstrecke 6) sowie der zweite Rippenhöhenunterschied (Messstrecke 7) sind im rechten Diagramm einzusehen. Bei Betrachtung der Abweichung von der Dickensprunghöhe wird die größere Abweichung vom Sollwert für die MPR deutlich. Die Abweichung der beiden Rippenunterschiede ist auf einem vergleichbaren Niveau wie beim PID-Regler (Messstrecke 6) und der konventionellen Prozessführung (Messstrecke 7). Zusammenfassend kann durch den Einsatz der MPR keine klar verbesserte Maßhaltigkeit aber auch keine bauteilübergreifenden negativen Effekte festgestellt werden.

Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Regelungskonzepte auf die mechanischen Eigenschaften

Zu den materialseitigen Vorteilen von duroplastischen Formmassen zählen ihre hohe Festigkeit und Steifigkeit. Daher gelten Sie als Substitutionsoption für Metallbauteile [BHM19]. Obwohl beide Eigenschaften wesentlich durch die Wahl des Materials (Harz und Füllstoffe) eingestellt werden können, kann über den Formfüllungsvorgang und damit über die Füllstofforientierung Einfluss auf die Festigkeit sowie Steifigkeit genommen werden. Durch die Verwendung der MPR dürfen diese Eigenschaften nicht negativ beeinflusst werden. Im Rahmen dieser Untersuchung werden die resultierende Zugfestigkeit und das E-Modul entsprechend Kapitel 1.5 ausgewertet und analysiert.

In Abbildung 37 ist die durchschnittliche Zugfestigkeit und das durchschnittliche E-Modul in Fließrichtung für die konventionelle Prozessführung, den PID-Regler und die MPR dargestellt.

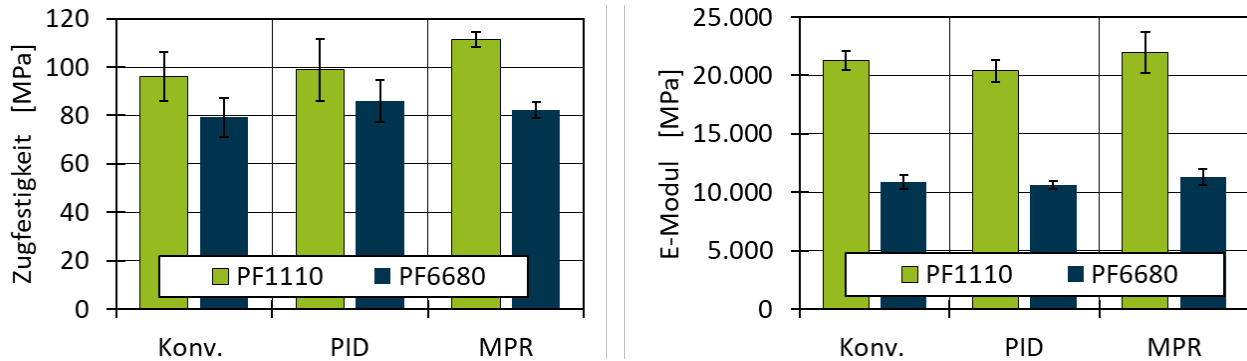


Abbildung 37: Mittlere Zugfestigkeit und E-Modul in Fließrichtung (PF1110 und PF6680)

Die Zugfestigkeit in Fließrichtung befindet sich bei der konventionellen Regelung und beim PID-Regler für das PF1110 auf einem ähnlichen Niveau. Die MPR weist höhere Zugfestigkeiten auf. Bei Betrachtung der Standardabweichungen fällt die niedrige Abweichung vom Mittelwert auf. Demnach konnte mithilfe der MPR konstantere Zugfestigkeiten in Fließrichtung für das PF1110 erreicht werden. Das höchste E-Modul wird mit der MPR erreicht. Hier fällt jedoch die höhere Standardabweichung auf. Zusammenfassend können durch die MPR material-übergreifend vergleichbare oder leicht verbesserte mechanische Eigenschaften in und quer zur Fließrichtung generiert werden.

Untersuchungen hinsichtlich des Anfahrverhaltens und der Chargenschwankungen

Aufgrund der thermischen Eigenschaften von rieselfähigen Formmassen birgt der Anfahrprozess einige Herausforderungen, die von alternativen Regelungskonzepten gelöst werden müssen. Dabei kann die Stabilisierung des Anfahrprozesses durch eine MPR mithilfe des Antizipierens des Materialverhaltens sowie der stetigen Optimierung von Prozessparametern unterstützt werden. Dadurch können die gewünschten Bauteileigenschaften schneller erreicht werden, was zu geringerem Ausschuss führt. Dieses Prozesshandling erlaubt auch die schnelle Reaktion auf Chargenschwankungen. Im Rahmen dieses Kapitels wird das Anfahrverhalten zwischen der MPR und der konventionellen Prozessführung verglichen und bewertet. Hierbei werden die Kennwerte zur Beurteilung der Prozessstabilität herangezogen. Um die resultierenden Bauteileigenschaften beurteilen zu können, wird anschließend die Bauteilmasse ausgewertet. Ferner erfolgt die Untersuchung einer simulierten Chargenschwankung. Hierbei werden analog zur bereits beschriebenen Auswertung zunächst die Kennwerte des Prozesses (Werkzeuginnendruck-integral) analysiert und anschließend die resultierende Bauteilmasse beurteilt. In Abbildung 38 ist das Werkzeuginnendruckintegral über mehrere Spritzgießzyklen für die MPR und die konventionelle Regelung dargestellt.

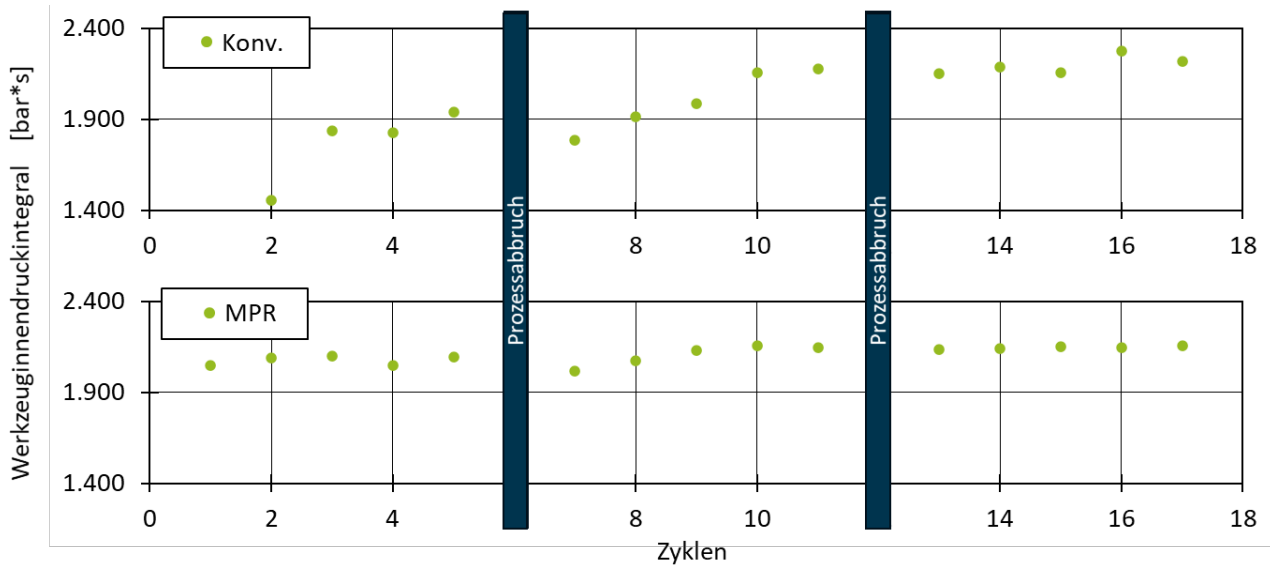


Abbildung 38: Werkzeuginnendruckintegral bei der Untersuchung des Anfahrverhaltens für beide Regelungskonzepte (PF1110)

Nach fünf Probekörpern wurde der Prozess für beide Regelungskonzepte über den Not-Aus- manuell unterbrochen. Bei der konventionellen Regelung wird ein zunehmendes Werkzeug-innendruckintegral über die Zyklen deutlich. Innerhalb der ersten fünf Zyklen lässt sich ein erster Anstieg des Flächenintegrals feststellen. Nach der ersten Unterbrechung wird das vorige Niveau des Werkzeuginnendruckintegrals erst bei Zyklus 9 erreicht. Durch die zweite Unterbrechung wird jedoch keine wesentliche Abweichung vom Niveau des Werkzeuginnendruckintegrals vor der Unterbrechung deutlich. Die Werkzeuginnendruckintegrale bei der MPR sind über alle Zyklen trotz der Unterbrechungen nahezu konstant. Ein geringfügiger Anstieg des Werkzeuginnendruckintegrals lässt sich dennoch erkennen. Nichtsdestotrotz ist die MPR in der Lage einen reproduzierbaren und stabilen Prozess beim Anfahren und trotz weiterer Unterbrechungen zu gewährleisten. Das beschriebene Phänomen spiegelt sich auch in der Bauteilmasse wider. Diese sind in Abbildung 39 für beide Regelungskonzepte dargestellt.

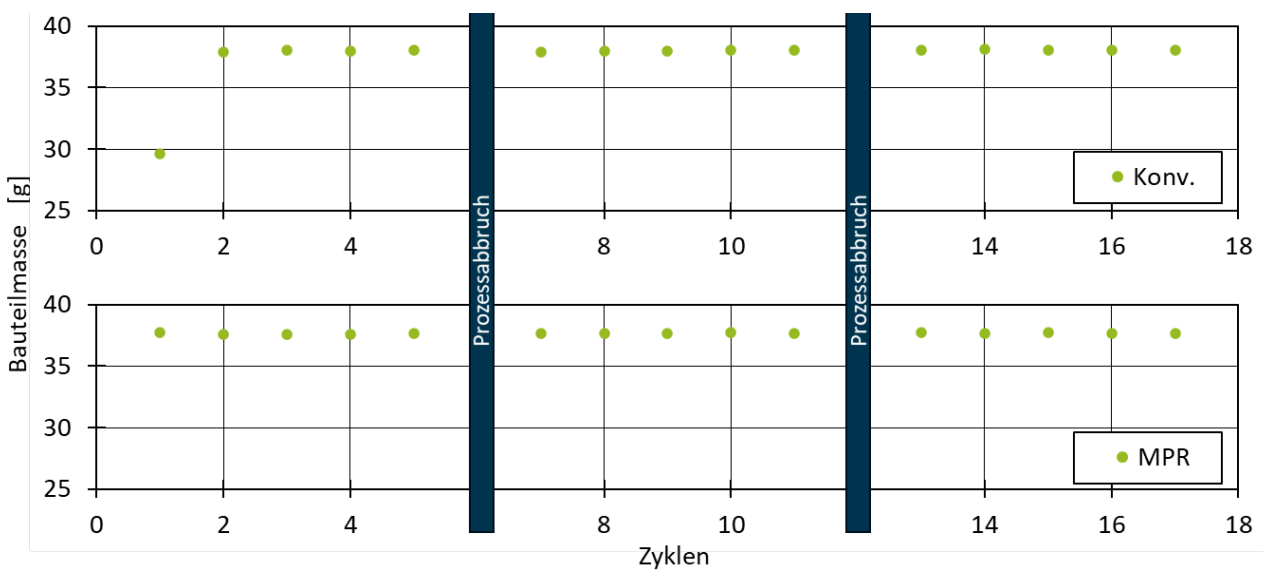


Abbildung 39: Bauteilmasse bei der Untersuchung des Anfahrverhaltens für beide Regelungskonzepte

Bei der MPR kann ab dem ersten Zyklus bereits eine reproduzierbare Bauteilmasse realisiert werden. Die MPR ist demnach in der Lage schneller einen stabilen und reproduzierbaren Prozess einzustellen. Die Ausschussquote kann damit effektiv minimiert werden.

Ergebnisse der Untersuchung zur Chargenschwankung

Ein wesentliches Problem beim Duroplast-Spritzgießen ist das unterschiedliche Materialverhalten aufgrund von Chargenschwankungen. Das im IMM-Filter hinterlegte Systemmodell ermöglicht eine flexible Anpassung an Veränderungen im Systemzustand. Dies bietet vor allem die Möglichkeit auf Viskositätsveränderungen durch Chargenschwankungen zeitnah zu reagieren. Die Fähigkeit auf Chargenschwankungen reagieren zu können, soll im Rahmen der Chargenschwankungsuntersuchungen geprüft werden. Hierfür kommt die „komplexe Platte“ und sowohl das PF1110 als auch das PF6680 zum Einsatz. In Vorbereitung zu dieser Untersuchungsreihe wurde je Material ein Prüfkörper inklusive Angussystem gewogen. Die gemessene Bauteilmasse wird zur Abschätzung der benötigten Dosiermenge verwendet. Ziel ist es, mit der entsprechenden Dosiermenge zehn Prüfteile je Material herzustellen. Das resultierende Dosiergewicht für PF1110 ergibt sich zu 500 g und für PF6680 zu 450 g. Zunächst wird die Schnecke komplett vom Altmaterial befreit. Hierfür wird auch die Düsenspitze entfernt und das bereits vernetzte Material entfernt. Anschließend wird das PF1110 in den Granulattrichter gegeben und einmalig manuell aufdosiert. Nach einer Verweilzeit von einer Minute wird der Prozess gestartet und die resultierenden Prüfkörper entnommen. Nach den ersten acht Bauteilen wird PF6680 in den Granulattrichter gegeben. Der Übergang zwischen beiden Materialien simuliert eine Chargenschwankung. Die Prüfkörperproduktion endet, wenn keine weiteren Prüfkörper hergestellt werden können. Diese Prozedur wird anschließend für die MPR wiederholt. Das Werkzeuginnendruckintegral für die Untersuchung zur Chargenschwankung ist für beide Regelungskonzepte in Abbildung 40 einzusehen.

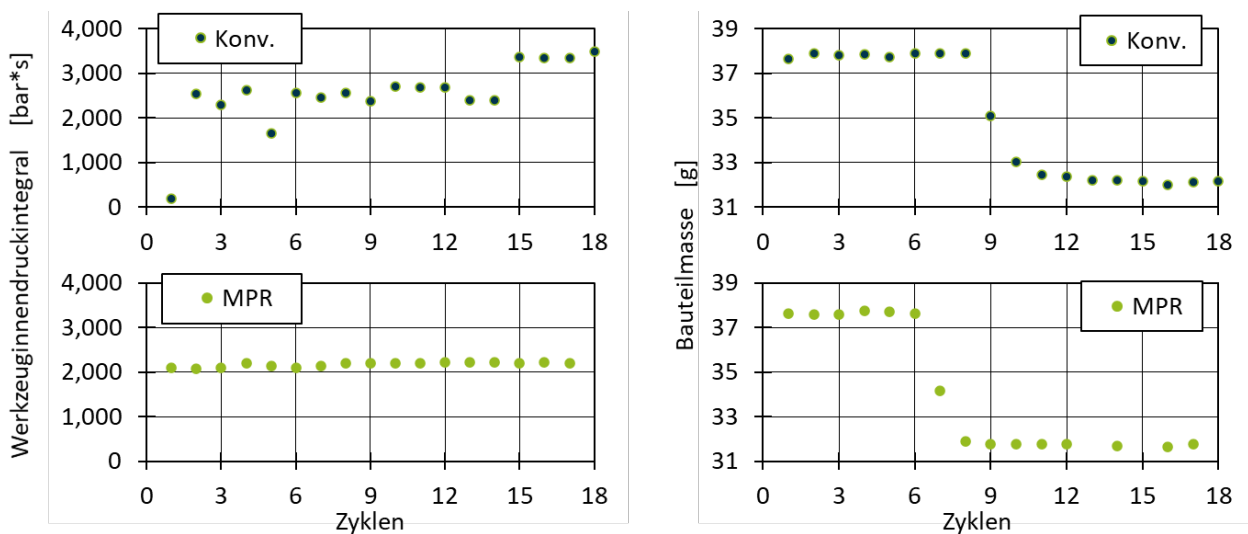


Abbildung 40: Werkzeuginnendruckintegral und Bauteilmasse bei der Untersuchung der Reaktionsfähigkeit bei Chargenschwankung für beide Regelungskonzepte

Auch hier wird das bereits beschriebene Muster deutlich. Die Werkzeuginnendruckintegrale bei der konventionellen Prozessführung schwanken über alle Zyklen deutlich stärker als bei der MPR. Durch den Materialwechsel kommt es zu unterschiedlichen Viskositätseigenschaften der reaktiven Masse im Schneckenraum. Die konventionelle Regelung kann diese schwankenden Eigenschaften nicht berücksichtigen, weshalb unterschiedliche Werkzeuginnendruckintegrale resultieren. Die MPR hingegen ist in der Lage die Prozessgrößen mithilfe des hinterlegten Prozessmodells zu antizipieren und ein gleichmäßiges Werkzeuginnendruckintegral über nahezu alle Prozesspunkte zu gewährleisten. Dies zeigt sich auch bei der resultierenden Bauteilmasse.

Bei der konventionellen Regelung wird der Materialwechsel bei Zyklus 9 und 10 deutlich. Der Materialwechsel bei der MPR hingegen bei Zyklus 7 und 8. Hierbei ist zu erkennen, dass bei konventioneller Prozessführung

die Bauteilmasse nach dem Materialwechsel sich zwar einem reproduzierbaren Wert annähert, die Massenschwankungen jedoch höher sind. Die MPR hingegen ist in der Lage, die Bauteilmasse sowohl vor dem Materialwechsel als auch nach dem Materialwechsel konstant zu halten bzw. schnell einzuregeln. In Zyklus 13 und 15 wird diese konstante Bauteilmasse jedoch aus bisher nicht geklärten Gründen verfehlt. Eine Erklärungsmöglichkeit könnten vernetzte Materialreste vom vorangegangenen Zyklus im Angussystem darstellen, die die Füllung behindern. Die MPR ist demnach in der Lage auf Chargenschwankungen passend zu reagieren und weiterhin einen stabilen Prozess zu garantieren. Die MPR weist zusammenfassend ein besseres Anfahrverhalten auf als die konventionelle Prozessführung. Die entstehenden Bauteile weisen früher eine konstante Bauteilmasse auf. Zudem ist die MPR in der Lage effektiv auf Chargenschwankungen zu reagieren. Trotz dessen, dass Ausschussbauteile existieren, wird bei den restlichen Bauteilen eine konstante Bauteilmasse deutlich.

Anpassung der Regelung bei zeitlich veränderlicher Systemdynamik

Chargenwechsel sowie weitere prozessseitige Störungen bewirken eine zeitliche Veränderung des Prozesses und somit der Systemdynamik. Da die MPR auf einem mathematischen Modell des Prozesses beruht, ist es erforderlich, dass die Regelung sich diesen Veränderungen ebenfalls anpasst.

Für eine Anpassung der MPR wurden zwei unterschiedliche Ansätze in der Simulation bzw. der Praxis untersucht. Der erste Ansatz verwendet eine Black-Box-Optimierung auf Basis der Bayes'schen Optimierung (BO). Nach jedem Zyklus erfolgt eine Bewertung der erzielten Regelgüte anhand einer Kostenfunktion. Ein Gaußprozess-Regressionsmodell (GPR) wird anschließend genutzt, um die Kosten in Abhängigkeit der zu optimierenden Parameter zu modellieren. Auf dieser Grundlage wählt eine Akquisitionsfunktion neue vielversprechende Reglerparametrierungen aus. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist der hohe Aufwand bei hochdimensionalen Parameterräumen.

Der zweite untersuchte Ansatz beschäftigt sich mit der Nachidentifikation des Systemverhaltens nach jedem Zyklus. Da der MPR ein mathematisches Modell des Prozesses zugrunde liegt, können dessen Parameter ebenfalls nach jedem Zyklus an das reale Prozessverhalten angepasst werden. Durch Linearisierung, Modellfehler und fehlende Kenntnis über die sogenannten Terminal Costs, ist es allerdings möglich, dass sich trotz eines perfekten Modells, keine optimale Regelgüte einstellt. In solchen Fällen können Parameter gefunden werden, die zwar das Systemverhalten präziser abbilden, jedoch zu einer Verschlechterung der Regelgüte führen.

Selbsteinstellung über lokale Bayes'sche Optimierung

Wie zuvor beschrieben, treten bei diesem Verfahren große Herausforderungen auf, wenn der zu optimierende Parameterraum hochdimensional ist. Der Regler besitzt allerdings eine Vielzahl von unterschiedlichen zu optimierenden Einstellparametern. Um diesem Problem entgegenzuwirken, wurde eine sogenannte Gradienten-informierte Bayes'sche Optimierung (GIBO) implementiert und in der Simulation untersucht.

Um ein sinnvolles GPR-Modell der Kosten in Abhängigkeit der Parameter zu lernen, ist eine große Anzahl von Versuchen notwendig, die gerade zu Beginn der Optimierung auch zu deutlich verschlechterter Regelgüte führen können. Je höher die Dimension des zu untersuchenden Parameterraums ist, desto langsamer werden Anpassungen am Regler vorgenommen. Vor dem Start der Optimierung bedarf es zudem noch einer initialen Voruntersuchung, um zweckmäßige Hyperparameter des GPR-Modells finden zu können. Die Zeitvarianz des Prozesses kann auch Probleme bereiten, da das aufgestellte Modell gegebenenfalls während der Optimierung bereits seine Gültigkeit verliert.

Viele der zu optimierenden Parameter beziehen sich auf physikalische Größen, deren Werte sich auch mithilfe von Methoden der Systemidentifikation gewinnen lassen. Aus diesem Grund und den bereits vorgestellten Nachteilen der Black-Box-Optimierung, wurde dieser Ansatz nur in der Simulation untersucht.

Zyklische Adaption des Prozessmodells

In der Vernetzungszeit, in der der Prozessregler keine Stellgröße ausgibt, wird mithilfe eines stochastischen Gradienten-Abstiegsverfahrens (SGD) das Modell unter Zuhilfenahme des letzten Zyklus optimiert. Dazu wird der aufgezeichnete Prozessverlauf in kleine Abschnitte unterteilt (0.6 s), für die der Gradient der Abweichung zwischen Modell und der Realität hinsichtlich der Modellparameter berechnet wird. Wie in Kapitel 1.8 beschrieben, ist der Punkt der Kavitätsfüllung besonders wichtig für die Güte der Prädiktion des Reglermodells. In Abbildung 41 wird dieser Punkt in Abhängigkeit des eingespritzten Volumens zyklisch optimiert. Dazu ist der Werkzeuginnendruck zusammen mit der Schneckenspannung dargestellt. Im ersten Zyklus ist die Kenntnis über den Punkt der Kavitätsfüllung suboptimal. Der Regler beginnt bei der gezeigten Parametrierung die Schnecke schon vor dem Auftreten des Druckanstiegs zu verzögern. Da der Beobachter einen Störzustand beinhaltet, wird die Schnecke erneut beschleunigt. Wenn der Druckanstieg auftritt, überschießt der Druck die Druckreferenz deutlich. Im zweiten Zyklus ist der Punkt der vollständigen Füllung bereits optimiert worden und Druck- und Spannungsverlauf zeigen nicht mehr die genannten Probleme. Es tritt kein starkes Überschießen der Druckreferenz auf und der Spannungsverlauf der Schnecke ist glatter, was zu geringeren Schneckenbeschleunigungen und damit zu einer geringeren Belastung der Schnecke und des Antriebs führt.

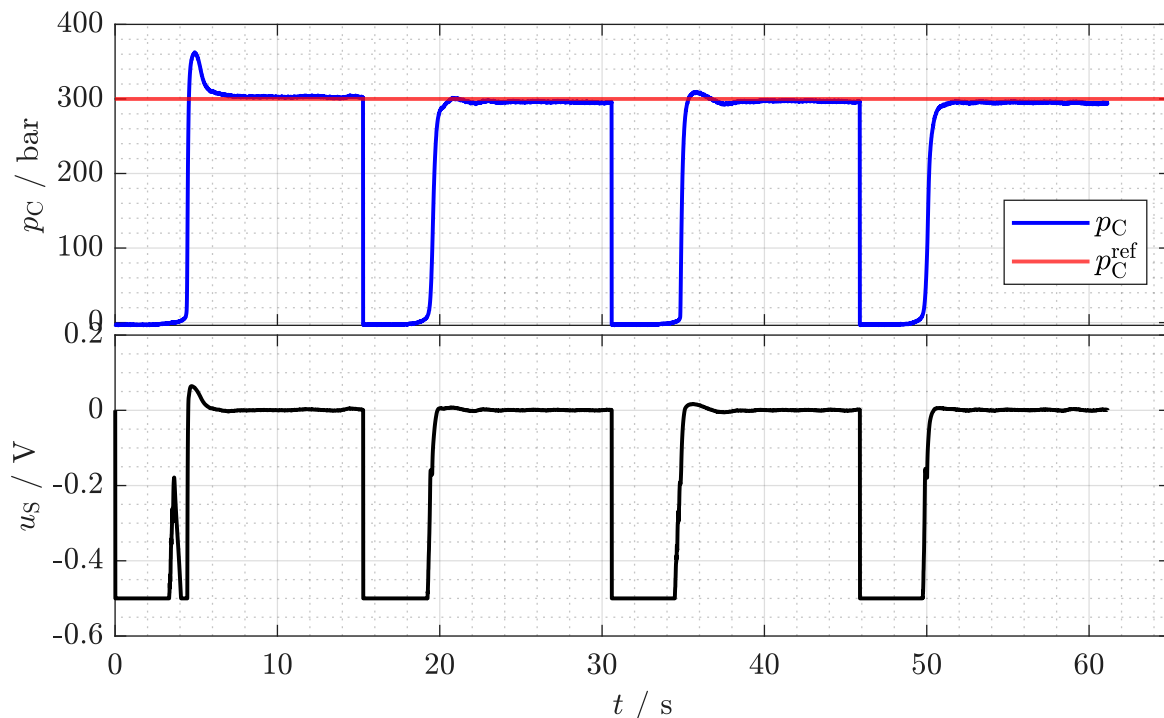


Abbildung 41: Erste Ergebnisse einer lernenden Regelung durch die Optimierung des Punktes der Kavitätsfüllung

1.11 Fazit der Projektergebnisse und Ausblick

Der Spritzgießprozess ist durch hohe Energie, Material- und Maschinenkosten geprägt. Durch die Umstellung auf eine alternative Regelungsstrategie muss ein wirtschaftlicher Vorteil resultieren, welcher die Grundlage für die breite Akzeptanz der Industrie darstellt. Demnach ist die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der MPR von großer Bedeutung. Die bisherigen Erkenntnisse machen deutlich, dass durch die MPR eine präzise und

dynamische Anpassung der Prozessparameter möglich ist. Dies hat zur Folge, dass reproduzierbare und stabile Prozessverläufe realisierbar sind, mit denen eine hohe Konstanz der Bauteileigenschaften möglich ist. Dadurch könnte die Ausschussrate gesenkt werden, was sowohl Materialkosten reduziert als auch den Aufwand für Nachbearbeitung und Ausschussentsorgung minimiert. Durch einen geringeren Ausschuss sinken auch die Energiekosten pro Bauteil, was bei steigenden Produktionskosten einen erheblichen Vorteil zur konventionellen Regelung darstellt. Hinsichtlich der Produktqualität ist es mit der MPR möglich vergleichbare Produkteigenschaften wie durch die konventionelle Prozessführung zu realisieren. Die resultierende Bauteilmasse kann präzise eingestellt werden und Bauteilmassenschwankungen verringert werden. Die Maßhaltigkeit, die Oberflächenqualität sowie die mechanischen Eigenschaften werden durch die MPR nicht negativ beeinflusst. Zudem ist durch die MPR eine Verkürzung der Anlaufzeit möglich. Durch das stetige Antizipieren des Prozesszustandes und die aktive Regelung von Prozessgrößen ist eine geringere Anlaufzeit bei der MPR gegeben. Ferner gelingt es, der MPR aktiv Chargenschwankungen anzupassen und konstante Bauteilqualitäten nach der Schwankung zu realisieren. Durch die verringerte Anlaufzeit und die aktive Anpassung an Chargenschwankungen kann der Personalaufwand für den Spritzgießprozess effektiv verringert werden. Die MPR ist außerdem in der Lage den Werkzeuginnendruck präzise zu regeln. Dadurch können Druckspitzen vermieden werden. Beim Einsatz von Einlegeteilen, Inserts und Sensorik können diese ohne potentielle Schäden durch zu hohe Drücke umspritzt werden. Zu hohe Drücke können zudem zu Schäden am Werkzeug führen. Bei korrekter Einstellung der MPR können diese vermieden werden, sodass die Lebensdauer des Werkzeugs erhöht werden kann. Dadurch werden die Investitionskosten für Ersatzteile und Reparaturen reduziert. Außerdem verteilt sich durch eine längere Lebensdauer des Werkzeugs die hohen Investitionskosten auf mehr Bauteile, so dass sich die Investition schneller amortisieren. Gleiches gilt für die Investitionskosten für die externe Anlagentechnik, die für die MPR benötigt wird.

In nachfolgenden Untersuchungen können neben dem Druckniveau der Druckreferenz auch die Dauer dieser sowie weitere Profilformen wie Druckrampen und Sprünge betrachtet und deren Einfluss auf die Formteilqualität analysiert werden. Weiterhin sollte das Qualitätsmodell um weitere Qualitätsmerkmale erweitert und die Bauteilqualität über eine automatisierte, integrierte Messzelle in den Prozess zurückgeführt werden.

Der Ansatz der Nachidentifikation des Prozessmodells zeigt vielversprechende Ergebnisse und sollte daher weiterverfolgt werden. Zu untersuchen sind insbesondere die Übertragbarkeit auf andere Kavitätsgeometrien und Materialien.

2 Verwendung der Zuwendung

Zur Durchführung des Forschungsprojekts wurden 22 Personenmonate wissenschaftlich-technisches Personal vom IKV und 28,8 Personenmonate wissenschaftlich-technisches Personal vom IRT über die gesamte Laufzeit eingesetzt.

Mit der Bearbeitung des Forschungsvorhabens waren zwei wissenschaftliche Mitarbeiter sowie studentische Hilfskräfte über der Projektlaufzeit beschäftigt und wurden dem Arbeitsaufwand entsprechend eingesetzt. Die wissenschaftlichen Mitarbeiter waren erforderlich, um die wissenschaftliche Fragestellung zu erarbeiten, die Problemstellungen in Abstimmung mit Vertretern aus Wirtschaft und Industrie zu diskutieren und Studierende zu betreuen, die im Rahmen des Projekts wissenschaftliche Arbeiten durchführten.

Im Vorhaben wurde folgende Geräte beschafft:

- Werkzeugsensorik:
 - Werkzeuginnendruck-/Temp. Sensor Typ: 6190CA0,8
 - 2 x Werkzeuginnendrucksensor Typ: 6157CCUMRKFO,8
 - Mantel-Thermoelement Typ: 6196A100

Die beschaffte Sensorik wurde zur Messung der Regelgröße (Werkzeuginnendruck) eingesetzt und war somit notwendig für die Durchführung des Projektes.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Wie aus den Kapiteln 1.5 bis 1.11 hervorgeht, sind im Rahmen des Forschungsprojekts umfangreiche Untersuchungen durchgeführt worden. Die Vielzahl der durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die geleistete Arbeit und der Einsatz der Ressourcen angemessen und notwendig waren. Notwendige Anpassungen in den Arbeitspaketen haben nicht zu einer Reduktion des Arbeitsumfangs geführt, sondern es wurden einzelne Maßnahmen durch geeignetere Maßnahmen ersetzt, weshalb der Umfang der Forschungsarbeiten sich nicht verändert hat. Es sind weitere Untersuchungen zur Weiterentwicklung des Prozesses notwendig, um das Potenzial des Verfahrens vollständig zu nutzen.

Insgesamt konnte die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit bestätigt werden.

4 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Die kunststoffverarbeitende Industrie in Deutschland stellt mit ca. 7.100 Unternehmen einen der bedeutendsten Wirtschaftszweige dar. Im Jahr 2020 erwirtschafteten die 322.000 Mitarbeiter dieser Branche einen Umsatz von etwa 61,5 Mrd. €. Ein großer Teil dieser Betriebe ist der Gruppe der kleinen und mittelständischen Unternehmen zuzurechnen. Etwa 2.300 dieser Unternehmen beschäftigen sich direkt oder indirekt mit dem Spritzgießen [URL19, URL21].

Die produzierenden Unternehmen in Deutschland befinden sich im Spannungsfeld zwischen stetig steigenden Anforderungen an innovative Produkte und gleichzeitig steigendem Kostendruck. Um auch zukünftig am Standort Deutschland fertigen zu können und Arbeitsplätze langfristig zu sichern, müssen bestehende Fertigungsprozesse durch neue Strategien noch wirtschaftlicher gestaltet und die Qualität der hergestellten Bauteile stetig verbessert werden. In diesem Zusammenhang können die erzielten Forschungsergebnisse durch den intensiven Ergebnistransfer in die Wirtschaft gewinnbringend von KMU genutzt werden.

Durch den Erkenntnisgewinn zur Anwendung einer modellgestützten prädiktiven Regelung beim Spritzgießen von Duroplasten konnten breite Erkenntnisse über den Einsatz einer Prozessregelung bei der Duroplastverarbeitung gewonnen werden. Nach weiteren Untersuchungen und einer Industrialisierung der entwickelten Lösung kann ein Wettbewerbsvorteil für deutsche KMU generiert werden.

Die Breite des potenziellen Nutzerkreises der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erarbeitenden Technologie spiegelt sich auch in den Tätigkeitsfeldern der im Projektbegleitenden Ausschuss mitwirkenden Unternehmen wider.

4.1 Wissenschaftlich-technischer Nutzen

Anhand der Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben wird es kleinen und mittelständischen Betrieben möglich, Duroplaste mit einer höheren Prozesskonstanz zu verarbeiten. Dadurch kann z. B. die prozesssichere und schadensfreie Umspritzung von sensiblen Einlegeteilen oder Sensorik ermöglicht und die Ausschussquote reduziert werden. Auch können gegebenenfalls neue Sensorik oder Einlegeteile aufgrund der neuen Prozessüberwachung und Regelung eingesetzt werden.

Im Rahmen der Untersuchungen konnte das Potential einer auf dem Werkzeuginnendruck basierenden Prozessregelung für Duroplaste bestätigt und z. B. die Schwankung der Bauteilmasse reduziert werden. Dennoch bedarf es weiterer Forschung und Entwicklung sowie einer Überführung in eine für die industrielle Praxis geeigneten Regelungslösung, ehe die modell-prädiktive Prozessregelung für das Duroplast-Spritzgießen etabliert werden kann. Vor allem die Benutzeroberfläche und die Richtlinien zur Reglerparametrisierung stellen weiteren Entwicklungsbedarf dar.

4.2 Wirtschaftlicher Nutzen

Mithilfe der in diesem Forschungsvorhaben erforschten Erkenntnisse zur Anwendung einer modellgestützten prädiktiven Regelung beim Spritzgießen von Duroplasten wird für die kunststoffverarbeitende Industrie die

Möglichkeit geschaffen, Duroplast-Formteile mit gesteigerter Prozesskonstanz und unter Überwachung, bzw. Regelung des Werkzeuginnen-druckes wirtschaftlich zu verarbeiten. Vor allem für das Umspritzen von Einlegeteilen stellt dies einen Vorteil dar, der sich sowohl in neuen Produktmöglichkeiten als auch einer geringeren Ausschussquote sowie schnelleren Anfahrprozessen positiv auf die Wirtschaftlichkeit der Duroplast-Spritzgießverarbeitung auswirkt. Damit ist mit einer direkten Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit, insbesondere der KMU, zu rechnen.

Zahlreiche Spritzgießverarbeiter von Duroplasten sind kleine und mittlere Unternehmen, die als Zulieferer zunehmend von der Großindustrie, wie Automobilherstellern oder Elektronik-konzernen, abhängig sind [WKK15]. Gerade für diese KMU ist die Möglichkeit zur ressourceneffizienten Produktion durch Nutzung des Duroplast-Spritzgießens ein wesentlicher Wettbewerbsvorteil gegenüber der Konkurrenz aus Niedriglohnländern.

5 Wissenstransfer in die Wirtschaft

5.1 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Zur Sicherstellung des Transfers der Forschungsergebnisse in die Wirtschaft wurden verschiedene Maßnahmen während der Laufzeit des Projekts durchgeführt. Diese werden im Folgenden dargestellt.

Maßnahme: Projektbegleitender Ausschuss	Zeitraumen: 05.04.2022, 18.06.2023, 20.11.2024
<p><i>Im Rahmen der Projektlaufzeit haben drei Treffen des projektbegleitenden Ausschusses stattgefunden. Die differenzierte Zusammenstellung aus Verarbeitern mit einem breiten Produktspektrum, Materialherstellern, Werkzeug- und Maschinenbauern hat geholfen, alle für die Wirtschaft wichtigen Aspekte zu bestimmen. Über die Treffen des Ausschusses hinaus fand ein reger Austausch mit den Mitgliedern statt, um die Erkenntnisse zu diskutieren und zu transferieren.</i></p> <p><i>Zum ersten Online-Treffen wurden die fünf externen Teilnehmer begrüßt und haben das geplante Forschungsvorhaben ausführlich diskutiert. Dabei wurde die Ausrichtung der Arbeitspakete intensiv besprochen und angepasst. Beim zweiten, hybriden Treffen mit fünf anwesenden Teilnehmern und sechs weiteren Online-Teilnehmern ergaben sich ausführliche Diskussionen über das weitere Vorgehen. Im abschließenden, dritten, ebenfalls hybriden Treffen mit 12 externen Teilnehmern aus der Industrie am IKV sowie neun weiteren Online-Teilnehmern wurden die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse breit diskutiert und das gewonnene Wissen transferiert. Auch im Nachgang zu diesem Treffen gab es einen regen Austausch zum Ergebnistransfer. Detaillierte Berichte zu den Treffen des PA liegen vor.</i></p>	
Maßnahme: Wissenschaftliche Publikationen	
<p><i>Durch Publikationen in Fachzeitschriften werden die Ergebnisse einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Mehrere Publikationen sind in Arbeit, erscheinen jedoch erst nach Ende der Projektlaufzeit (s. unten).</i></p>	
Maßnahme: Hinweise in der Fachpresse	Zeitraumen: Kontinuierlich während der Laufzeit
<p><i>Informationen über das Projekt wurden durch Pressemitteilungen in Fachzeitschriften veröffentlicht:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Regelung für mehr Qualität beim Duroplast-Spritzgießen, Plastverarbeiter 09 (2024), S. 77</i> ▪ <i>Vorstellung im IKV Jahresbericht 2024 für die ca. 300 Mitgliedsfirmen des IKV</i> 	
Maßnahme: Dialog mit Fachpersonal der Wirtschaft	Zeitraumen: Kontinuierlich während und nach der Projektlaufzeit

Innerhalb des Projektzeitraumes wurden die Ergebnisse auf Messen im Dialog mit Fachpersonal der Wirtschaft diskutiert. Zu den Messen zählt die Fakuma 2024 in Friedrichshafen sowie das 32. Internationale Kolloquium Kunststofftechnik 2024 in Aachen. Hierbei konnten die Technologie und die erzielten Ergebnisse vielen Unternehmen vorgestellt und erste Ansätze für eine Weiterentwicklung in bilateralen Forschungsprojekten generiert werden.

Im Rahmen der jährlich stattfindenden Fachbeiratsgruppen des IKV wurde das Projekt am 06. November 2023 in einem Vortrag vorgestellt und mit Vertretern der Industrie diskutiert.

Maßnahme:

Akademische Lehre / Personaltransfer

Zeitraumen:

Während der Laufzeit / nach Abschluss

Einige der Untersuchungen, die im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführt wurden, sind durch die Unterstützung von Studierenden entstanden. So konnten mehrere wissenschaftliche Arbeiten durch Studierende angefertigt werden. Darüber hinaus sind die erzielten Ergebnisse in die Ausbildung junger Ingenieure eingeflossen, in dem die Ergebnisse Bestandteil der Lehrveranstaltung „Kunststoffverarbeitung III“ und „Maschinelles Lernen in der industriellen Regelungstechnik“ sind.

Im Rahmen des Projekts wurden insgesamt 2 Masterarbeiten, 1 Bachelorarbeit und 2 Projektarbeiten am IKV und am IRT verfasst.

IKV:

- *Anwendung und Bewertung einer modellgestützten prädiktiven Regelung (MPR) beim Spritzgießen von Duroplasten, Cihan Koyuncu, Masterarbeit*
- *Identifikation von Anforderungen an die Prozessführung im Duroplast-Spritzgießen zur Steigerung der Produktqualität und Produktivität, Yannick Ollig-Gaul & Joshua Schällich, Projektarbeit*

IRT:

- *Modellprädiktive Regelung des Duroplastspritzgießens basierend auf einem lernenden Grey-Box-Prozessmodell, Paul Grabowski, Masterarbeit*
- *Datengetriebenes Qualitätsmodell für das Kunststoffspritzgießen von Duroplasten, Jannis Rehnig, Christian Pohl, Projektarbeit*
- *Automatische Einstellung und Parametrierung eines modellprädiktiven Reglers für das Duroplast-Spritzgießen, Christian Pohl, Bachelorarbeit*

Maßnahme:

Beratung von Unternehmen

Zeitraumen:

Während der Laufzeit / nach Abschluss

Nach der Projektlaufzeit des Forschungsvorhabens kam ein Unternehmen mit konkreten Fragestellungen zur Steigerung der Prozesskonstanz auf das IKV Aachen zu. Die erzielten Ergebnisse stehen als Basis für eine Beratung und Diskussion zur Verfügung.

Maßnahme: Durchführung von Testreihen am IKV	Zeitraumen: Während der Laufzeit / nach Abschluss
<i>Unternehmen, die auf Basis der Ergebnisse Anwendungen evaluieren möchten, ohne die modulare Werkzeugtechnik zu beschaffen, haben die Möglichkeit, das am IKV vorhandene Equipment sowie die im IRT entwickelte Prozessregelung zur Durchführung von Testreihen für Vorserienanwendungen zu nutzen.</i>	
Maßnahme: Vorträge und Posterpräsentationen	Zeitraumen: Während der Laufzeit
<i>Die Ergebnisse des Forschungsprojektes wurden auf 12. Internationalen Duroplasttagung Iserlohn vom 23.-24. Mai 2023 vorgestellt.</i>	
Maßnahme: Forschungsbericht	Zeitraumen: 1. Quartal nach Abschluss des Forschungsvorhabens
<i>Die Ergebnisse sind in zwei Zwischenberichten sowie in dem vorliegenden Forschungsbericht zum Forschungsvorhaben zusammengefasst. Dieser Forschungsbericht steht interessierten Unternehmen zur Verfügung, wodurch die erzielten Ergebnisse für die Öffentlichkeit zugänglich sind</i>	

5.2 Einschätzung der Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzeptes

Innerhalb der drei Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses, der Darstellung der Ergebnisse auf den IKV-Fachbeiratsgruppensitzungen sowie durch den direkten Dialog mit Fachpersonal der Wirtschaft war es möglich, den Projektfortschritt und die Projektergebnisse kontinuierlich und direkt Vertretern interessierter Industrieunternehmen zu kommunizieren und mit diesen zu diskutieren. Durch Hinweise in der Fachpresse, wissenschaftlichen Publikationen in Form von Veröffentlichungen, dem Forschungsbericht sowie durch Vorträge und Posterpräsentationen konnte zusätzlich ein breites Fachpublikum angesprochen werden. Die gewonnenen Erkenntnisse sind darüber hinaus in die Lehre eingeflossen, um angehenden Ingenieuren potenzielle Möglichkeiten neuer Technologien und Verfahren vorzustellen. Sowohl in Lehrveranstaltungen als auch studentischen Arbeiten konnten sich die Studierenden umfassend mit der Thematik vertraut machen und ihre ingenieurtechnischen Fähigkeiten vertiefen.

Mit dem breitgefächerten Transferkonzept konnte somit das Ziel erreicht werden, die im Rahmen des Forschungsvorhabens erarbeiteten Ergebnisse einem breiten industriellen Nutzerkreis vorzustellen und als Grundlage für weitere Entwicklungsarbeiten zur Verfügung zu stellen.

6 Durchgeführte Transfermaßnahmen

Alle durchgeführten Transfermaßnahmen sind in Kapitel 5 umfassend dargelegt.

7 Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Maßnahme: Vorträge und Posterpräsentationen	Zeitraumen: Nach Abschluss
<p><i>Es erfolgt eine Präsentation der Prozessregelung auf der Konferenz: 11th Vienna International Conference on Mathematical Modelling, 2024 unter dem Titel:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Control-Oriented Gray-Box Modeling for Thermoset Injection Molding. 	
Maßnahme: Wissenschaftliche Publikationen	Zeitraumen: Nach Abschluss
<p><i>Im Laufe des Jahres 2025 ist noch eine weitere Publikation über die Projektergebnisse geplant. Diese wird in der Kunststoffe 04/2025 erscheinen.</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Mascher, M.; Ahlers, J.; Vallery, H.; Hopmann, C.: Entwicklung eines Regelungskonzeptes zur Steigerung der Produktqualität beim Duroplast-Spritzgießen, <i>Kunststoffe 4</i> (2025) <p><i>Die genannte Konferenzvorstellung ist mit einer Veröffentlichung der Ergebnisse (Peer-Reviewed) im Konferenzband verbunden. Die Veröffentlichung trägt ebenfalls den Titel:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Ahlers, J.; Schulte, C.; Mascher, M.; Zimmermann, C; Vallery, H.; Hopmann, C.; Stemmler, S.: Control-Oriented Gray-Box Modeling for Thermoset Injection Molding. <i>11th Vienna International Conference on Mathematical Modelling</i>, Wien, 2025 	
Maßnahme: Dissertation	Zeitraumen: Nach Abschluss des Forschungsvorhabens
<p><i>Herr Jens Ahlers strebt eine Promotion zu dem beantragten Forschungsthema an.</i></p>	

8 Abkürzungen, Formelzeichen, Indizes

8.1 Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
3D	Dreidimensional
APC	Adaptive Process Control
CAD	Computer-Aided Design
EKF	Extended Kalman Filter
E-Modul	Elastizitätsmodul
EP	Epoxidharz
Gew.-%	Gewichtsprozent
GPR	Gauß-Prozess-Regression
Grad	Gewichtungsfaktor
IKV	Institut für Kunststoffverarbeitung
ILR	Iterativ lernender Regler
IMM	Interacting Multiple Model
IRT	Institut für Regelungstechnik
Kend	Learning Operator
KI	Künstliche Intelligenz
L/D	Länge/Durchmesser
MF	Melaminformaldehydharze
MPC	Model based predictive control
MPR	Modellgestützte prädiktive Regelung
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
NI	National Instruments
CP	Zentralpunkt
D	Durchmesser
DSC	Differential scanning calorimetry
DV	Dosiervolumen
FPGA	Field Programmable Gate Arrays
L	Länge
MPR	Modellprädiktiver Regler
PF	Phenolharzformmasse

PID-Regler	Proportional-Integral-Differential-Regler
R	Rauheit
VP	Versuchspunkt
ZFR	Zwei-Freiheitsgrad-Regler
α	Signifikanzniveau

8.2 Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
J	[-]	Kostenfunktion
K	[-]	PID-Parameter
m	[g]	Masse
p	[bar]	Druck
PT	[-]	Verzögerungsglied
Q	[-]	Varianzfaktor des Prozessrauschens für den Störzustand
R	[-]	Gewichtungsfaktor für Stellgrößenänderungen
T	[°C]	Temperatur
U	[-]	Stellgröße
X	[-]	Zustandsvektor
Y	[-]	Regelgröße
θ	[-]	Reglerparameterstanz
a	[mm]	Höhe
b	[mm]	Breite
c	[mm]	Tiefe
m	[g]	Masse
V	[mm ³]	Volumen
ρ	[Kg/m ³]	Dichte
p_s	[bar]	Druck im Schneckenorraum
p_c	[bar]	Werkzeuginnendruck
K	[bar]	Isentroper Kompressionsmodul
α	[-]	Vernetzungsgrad des Materials
γ_p	[1/K]	Isobarer Wärmeausdehnungskoeffizient
c_p	[J/(kg K)]	Isobare Wärmekapazität
q^D	[W]	Durch Dissipation eingebrachte Wärme

q	[W]	Durch Heizung eingebrachter Wärmestrom
q^R	[W]	Wärme durch exotherme Vernetzungsreaktion
Q_S	[cm ³ /s]	Veränderungsrate des Volumens durch Schneckenbewegung
Q_C	[cm ³ /s]	Volumenstrom vom Schneckenorraum in die Kavität
Q_L	[cm ³ /s]	Volumenstrom durch Leckage
η	[Pa s]	Dynamische Viskosität
R	[mm]	Repräsentativer Radius der Düse
ϕ	[-]	Füllgrad der Kavität
L	[mm]	Abstand zwischen den Punkten der Druckmessung
dV_M/dt	[cm ³ /s]	Änderung des Vol. der reaktiven Masse in der Kavität
h	[J /kg]	Spezifische Enthalpie

8.3 Indizes

Index	Bedeutung
1	1. Ordnung
Agg	Aggregat
Bt	Bauteilgewicht
D	Differenzierender PID-Parameter
Dos	Dosiergewicht
e	Abweichung von der Werkzeuginnendruckreferenz
I	Integrierender PID-Parameter
Kalman	Kalman-Filter
Konv	Konventionell
MPR	Modellgestützte prädiktive Regelung
os	Überschwingfläche
os,max	Höhepunkt der Überschwingfläche
P	Verstärkender PID-Parameter
ref	Referenz
s	Schneckenspannung
Smax	Schneckendruckmaximum
Wkzg	Werkzeug
WzInt	Werkzeuginnendruckintegral
a	Arithmetischer Mittelwert des Rauheitsprofils

Z

Maximale Höhe des Rauheitsprofils

9 Literaturverzeichnis

- [AGH+18] ANDERSSON, J.; GILLIS, J.; HORN, G.; RAWLINGS, J.; DIEHL, M.: *CasADi – A software framework for nonlinear optimization and optimal control*, *Mathematical Programming Computation*, 2018
- [BBO+07] BAUR, E.; BRINKMANN, S.; OSSWALD, T.A.; SCHMACHTENBERG, E.: *Saechting Kunststoff Taschenbuch*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2007
- [BHM19] BAUR, E.; HARSCH, G.; MONEKE, M.: *Werkstoff-Führer Kunststoffe*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2019
- [Bic12] BICHLER, M.: *Prozessgrößen beim Spritzgießen*. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag, 2012
- [BJ17] BRUNTON, S.; KUTZ, N.: *Data Driven Science & Engineering, Machine Learning, Dynamical Systems, and Control*, 2017
- [BSS+09] BASTIAN, M.; STITZ, S.; SCHINK, K.; DEUBEL, C.: Quality Problems during Mold Start-Up? *Kunststoffe International* 99 (2009) 6, S. 13-16
- [BVT22] BRUNZEMA, P.; VON ROHR, A.; TRIMPE, S.: On Controller Tuning with Time-Varying Bayesian Optimization, 61st IEEE Conference on Decision and Control, 2022
- [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
- [DC19] DINCULEANĂ, D.; CHENG, X.: Vulnerabilities and Limitations of MQTT Protocol Used between IoT Devices. *Applied Sciences* 9 (2019) 5, S. 848
- [Dub01] DUBAY, R.: Predictive Control of Cavity Pressure During Injection Filling. *Journal of Injection Molding Technology* 5 (2001) 2, S. 72-79
- [Eng15] ENGLISCH, S.: *Strukturbildung bei der Verarbeitung von glasfasergefüllten Phenolformaldehydharzformmassen*. Technische Universität Chemnitz, Dissertation, 2015
- [Fra19] FRANKLAND, J.: *Understanding Viscosity in Extrusion*. *Plastics Processing* 2016, URL: <https://www.ptonline.com/articles/understanding-viscosity-in-extrusion>
- [GM16] GIEßAUF, J.; MAIER, C.: Wie reproduzierbar ist die Reproduzierbarkeit? *Kunststoffe* 106 (2016) 6, S. 62-66
- [Gor09] GORNIK, C.: Abgeleitete Kenngrößen zur Optimierung nutzen. *Kunststoffe* (2009) 9, S. 30-34
- [Gra24] GRABOWSKI, P.: *Modellprädiktive Regelung des Duroplastspritzgießens basierend auf einem lernenden Grey-Box-Prozessmodell*. Institut für Regelungstechnik, RWTH Aachen, Masterarbeit, 2024 – Betreuer: J. Ahlers
- [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
- [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
- [Hei14] HEINZLER, J.: *Modellgestützte Qualitätsregelung durch eine adaptive, druckgeregelte Prozessführung beim Spritzgießen*. Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2014
- [HG15] HOPMANN, C.; GRÜMER, B.: Vorhersage robuster Prozesse während der Produktenwicklung. In: Institut für Kunststoffverarbeitung (Hrsg.): *IKV-Fachtagung „Industrie 4.0 – (R)evolution in der Kunststoffverarbeitung“*, 2015
- [HHV+23] HORNBERG, K.; HOPMANN, C.; VUKOVIC, M.; STEMMLER, S.; ABEL, D.: Compensation of batch fluctuations of post-consumer recycle in injection molding by phase-unifying process control. In: Society of Plastics Engineers (Hrsg.): *Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings*. Denver, USA, 2023

- [HM17] HOPMANN, C.; MICHAELI, W.: *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2017
- [HMMM18] HOPMANN, C.; MENGES, G.; MICHAELI, W.; MOHREN, P.: *Spritzgießwerkzeuge*. München: Carl Hanser Verlag, 2018
- [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
- [Hor24] HORNBERG, K.: *Phasenübergreifende Regelung des Werkzeuginnendruckes zur Erhöhung der Reproduzierbarkeit im Spritzgießen*. RWTH Aachen, Dissertation, 2024
- [Höe14] HÖER, M.: *Einfluss der Material- und Verarbeitungseigenschaften von Phenolharzformmassen auf die Qualität spritzgegossener Bauteile*. Technische Universität Chemnitz, Dissertation, 2014
- [HT08] HOSTER, B.; THIENEL, P.: Leichtbau trotz den Widrigkeiten – Hochleistungsduroplaste im Motorraum. *Lightweight Design* 1 (2008) 2, S. 17-21
- [Jar19] JAROSCHEK, C.: *Spritzgießen für Praktiker*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2019
- [JM04] JOHANNABER, F.; MICHAELI, W.: *Handbuch Spritzgießen*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2004
- [Kaz09] KAZMER, D. O.: *Plastics manufacturing systems engineering. A systems approach*. Cincinnati, Ohio: Hanser Publications, 2009
- [Kai11] KAISER, W.: *Kunststoffchemie für Ingenieure*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2011
- [KMH+22] KAPTEIN, MAURITS; HEUVEL, EDWIN VAN D.: *Statistics for Data Scientists*. 1. AUFLAGE. SPRINGER CHAM, 2022. – ISBN 978–3–030–10531–0
- [Kud97] KUDLIK, N.: *Reproduzierbarkeit des Kunststoff-Spritzgießprozesses*. RWTH Aachen, Dissertation, 1997 – ISBN: 3-89653-412-4
- [KVV+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
- [LWN+10] LI, C.; WANG, F.; NIU, D.; LIU, Y.: 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 Volumenstromübertragungsverhalten in der Einspritzphase. *Plastverarbeiter* 41 (1990) 9, S. 186-195
- [MLS24] MARELLI, S. ; LAMAS, C. ; KONAKLI, K. ; MYLONAS, C. ; WIEDERKEHR, P. ; SUDRET, B.: UQLAB USER MANUAL – SENSITIVITY ANALYSIS / CHAIR OF RISK, SAFETY AND UNCERTAINTY QUANTIFICATION, ETH ZURICH, SWITZERLAND. 2024 (v2.1-106). – FORSCHUNGSBERICHT. – REPORT UQLAB-V2.1-106
- [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
- [NN12] N.N.: *DIN EN ISO 527-2:2012-06: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen (ISO 527-2:2012)*. Berlin: Beuth Verlag, 2012
- [NN22] N.N.: *Allrounder 370 A*. Datenblatt, ARBURG GmbH + Co KG, Loßburg, 2022
- [NN22a] N.N.: *Phenolharzformmasse PF 1110*, Datenblatt, Bakelite Synthetics, Iserlohn, 2022
- [NN22b] N.N.: *Phenolharzformmasse PF 6680*, Datenblatt, Bakelite Synthetics, Iserlohn, 2022
- [NN23] N.N.: *ScanBox Optische 3D-Messmaschine für die Produktionskontrolle*, Broschüre, Carl Zeiss IQS Deutschland GmbH, Oberkochen, 2023

- [NN24] N.N.: *Triangulation in der Messtechnik*. URL: <https://www.zeiss.de/messtechnik/entdecken/themen/triangulation.html>, 12.10.2024
- [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
- [RG15] RASCHKE, K.; GEHDE, M.: *Strukturbauteile im Powertrain: Entwicklung eines duroplastischen Motorträgers mit Langfaserverstärkung*. 2015
- [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
- [RW06] RASMUSSEN, C.; WILLIAMS, C.: *Gaussian Processes for Machine Learning*, MIT Press, 2006
- [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] SCHÖSSLER, M.: *Duroplastische Anwendungen im Motorenbereich*. Mannheim, 2011
- [Sch18] SCHEFFLER, T.: *Werkstoffeinflüsse auf den Spritzgussprozess von hochgefüllten Phenol-Formaldehydharz-Formmassen*. Technische Universität Chemnitz, Dissertation, 2018
- [SKM14] SCHIFFERS, K.; KRUPPA, S.; MOSER, S.: Für jeden Schuss der richtige Umschaltzeitpunkt. *Kunststoffe* 104 (2014) 11, S. 58-63
- [TBF+18] THOMBANSEN, U.; BUCHHOLZ, G.; FRANK, D.; HEINISCH, J.; KEMPER, M.; PULLEN, T.; REIMER, V.; ROTSHEYN, G.; SCHWENZER, M.; STEMMLER, S.; ABEL, D.; GRIES, T.; HOPMANN, C.; KLOCKE, F.; POPRAWA, R.; REISGEN, U.; SCHMITT, R.: Design framework for model-based self-optimizing manufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 97 (2018), S. 519-528
- [URL13] N.N.: *Mediendichtes Umspritzen elektronischer Bauelemente*. URL: <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/mediendichtes-umspritzen-elektronischer-bauelemente-a-400078/>, 02.04.2013
- [URL21] N.N.: *Duroplast Analyseverfahren: selbstlernend für bessere Produktqualität*. URL: <https://www.kunststoff-zeitschrift.at/news/duroplast-analyseverfahren-selbstlernend-fuer-bessere-produktqualitaet/>, 15.02.2021
- [Vuk24] VUKOVIC, M.: *Cross-Phase Injection Molding Control for Thermoplastics Processing*. RWTH Aachen, unveröffentlichte Dissertation, 2024 – ISBN: /
- [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*
- [WTH18] WIELAND, C.; TOPIC, N.; HIRZ, J.: Mehr Präzision für störungsanfällige Frühvernetzer. *Kunststoffe* 12 (2018), S. 38-41
- [YF16] YANG, X.; FRAZIER, C.E.: Influence of organic fillers on rheological behavior in phenol-formaldehyde adhesives. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 66 (2016), S.
- [Zha22] ZHAO, Y.: *Zur Untersuchung der Bindenaht beim Spritzgießen von duroplastische Formmassen auf Epoxidharzbasis*. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2022
- [NN22c] N.N.: DIN EN ISO 21920-2:2022-12, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Profile - Teil 2: Begriffe und Kenngrößen für die Oberflächenbeschaffenheit. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2022
- [URL19] N.N.: *KUNSTSTOFFVERARBEITENDE INDUSTRIE IN DEUTSCHLAND WÄCHST WEITER*. URL: <https://www.plastverarbeiter.de/84380/KUNSTSTOFFVERARBEITENDE-INDUSTRIE-IN-DEUTSCHLAND-WAECHST-WEITER/>, 07.03.2019
- [URL21] N.N.: *Kunststoffverarbeitung 2020*. URL: <https://www.gkv.de/de/statistik/>, 17.02.2021

[WKK15] WITTEN, E.; KRAUS, T.; KÜHNEL, M.: *Composite-Marktbericht 2015*. Firmenschrift: Industrievereinigung verstärkte Kunststoffe (AVK), 2015

10 Anhang

10.1 Versuchsplan der ersten Versuchsreihe

	Werkzeug- temperatur [°C]	Düsen-tem- peratur [°C]	Umschalt- punkt [cm ³]	Einspritz-volumen- strom [cm ³ /s]	Nach- druck- rampe [s]	Nach- druck [bar]	Vernetzungs- zeit [s]
CP	190	90	10	20,0	0,55	500	80
1	185	85	9	17,5	0,1	400	70
2	185	85	9	22,5	1,0	400	90
3	185	85	11	17,5	1,0	600	70
4	185	85	11	22,5	0,1	600	90
5	185	95	9	17,5	1,0	600	90
6	185	95	9	22,5	0,1	600	70
7	185	95	11	17,5	0,1	400	90
8	185	95	11	22,5	1,0	400	70
9	195	85	9	17,5	0,1	600	90
10	195	85	9	22,5	1,0	600	70
11	195	85	11	17,5	1,0	400	90
12	195	85	11	22,5	0,1	400	70
13	195	95	9	17,5	1,0	400	70
14	195	95	9	22,5	0,1	400	90
15	195	95	11	17,5	0,1	600	70
16	195	95	11	22,5	1,0	600	90

Tabelle A.1: Versuchsplan erste Versuchsreihe