

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

BETREUT VOM



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

**VERBUNDPROJEKT:
ZUSTANDSABHÄNGIGE PROZESSFÜHRUNG FÜR DIE ENERGIEEFFIZIENTE
UND RESSOURCENSCHONENDE PRODUKTION VON
KUNSTSTOFFFORMTEILEN
(ZUPREFF)**



im Rahmenkonzept des BMBF
„Forschung für die Produktion von morgen“

Bekanntmachung
„Energieeffizienz in der Produktion“

im Themenfeld
„Verbesserung der Energieeffizienz in der Fertigungstechnik“

Laufzeit: 01.05.2009 – 31.12.2012

ABSCHLUSSBERICHT



Hochschule **Rosenheim**
University of Applied Sciences



KraussMaffei
PEOPLE FOR PLASTICS



Fraunhofer
IPA

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt mit dem Förderkennzeichen 02P02040 wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Rahmenkonzeptes „Forschung für die Produktion von morgen“ gefördert und vom Projektträger Karlsruhe betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Autorenliste in alphabetischer Reihenfolge

Johannes Eben, Dipl.-Ing.	Hochschule Rosenheim
Hartmut Eigenbrod, Dipl.-Phys.	Fraunhofer IPA
Peter Karlinger, Prof.	Hochschule Rosenheim
Kerstin Krallmann, Dipl.-Ing.	Krallmann Gruppe
Stefan Kruppa, Dipl.-Ing.	Krauss Maffei
Joachim Neher, Dr.-Ing.	Fraunhofer IPA
Guido Peters, Dipl.-Ing.	gwk Gesellschaft Wärme Kältetechnik mbH
Reinhard Schiffers, Dr.-Ing.	Krauss Maffei
Martin Würtele, Dipl.-Ing.	Krauss Maffei

Die Dokumentation stellt die Ergebnisse aus einem Forschungs-Verbundprojekt dar. Verantwortlich für den Inhalt sind die jeweiligen Autoren.

Redaktion:

Guido Peters, Dipl.-Ing.	gwk Gesellschaft Wärme Kältetechnik mbH
--------------------------	---

Druck und Verbreitung:

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	4
1. Einleitung.....	6
2. Ziele, Lösungsansatz, Projektkonsortium.....	8
Projektziel.....	8
Lösungsansatz.....	9
Projektkonsortium.....	12
3. Ergebnisse.....	14
Versuchsreihen und Versuchsteile.....	14
Signaldatenerfassung und -verarbeitung.....	15
Segmentierte Werkzeugtemperierung.....	20
Zustandsabhängige Entformung.....	23
Schmelzezustandsüberwachung.....	28
Komponentenübergreifende Regelung.....	35
Energiebilanzierung.....	38
Energiemonitoring und Einstellerunterstützung.....	41
Demonstrator.....	44
4. Zusammenfassung.....	46
5. Ausblick.....	47
6. Danksagung.....	48
7. Veröffentlichungen und Vorträge.....	49

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektziel der zustandsorientierten Regelung des Gesamtsystems mit integriertem Energiemonitoring.....	8
Abbildung 2: Lösungsansatz inklusive aller Einzelkomponenten	11
Abbildung 3: Projektpartner und Teilprojekte	12
Abbildung 4: im Projekt verwendete Versuchs- und Demonstrationsbauteile	14
Abbildung 5: verwendete Versuchsmaschinen in Rosenheim sowie bei KraussMaffei und gwk	15
Abbildung 6: schematischer Aufbau und Hardwarekomponenten der Messleiste	16
Abbildung 7: Verlauf des Auswerfersignals, erfasst durch die beiden FU-Traces sowie die Messleiste	17
Abbildung 8: Zeitversatz bei der Aufzeichnung und resultierende Signale	17
Abbildung 9: DASyLab-Schaltbild zur Korrektur des Zeitversatzes	18
Abbildung 10: Hard- und Softwarekomponenten des Demonstrators zur Signalverarbeitung.....	19
Abbildung 11: Füllsimulation zur Ermittlung der kritischen Stellen für das Versuchswerkzeug.....	20
Abbildung 12: Vergleich zwischen werkzeuginheitlich und lokal angepasster Temperierung	20
Abbildung 13: auswerferseitiger Formeinsatz mit konturnaher Kühlung (oben) und aggregatseitiger Formeinsatz inklusive lokaler Temperierelemente an den Bindenähten	21
Abbildung 14: Vergleich konventioneller mit lokal dynamischer Temperierung.....	22
Abbildung 15: Düsenseitige Werkzeughälfte und Thermografieaufnahme mit deutlich sichtbaren Heizkeramiken (nach dem Aufheizen)	22
Abbildung 16: Versuchsequipment zur Zustandsabhängigen Entformung: NI-Messsystem sowie Rechner mit DASyLab zur Signalaufzeichnung und -verarbeitung	23
Abbildung 17: Zeitlicher Verlauf der wichtigsten Signale für die Zustandsabhängige Entformung.....	24
Abbildung 18: Schaltbild und damit abgeleitete Prozessphasen für die Charakterisierung der lokalen Temperierung.....	25
Abbildung 19: Streubreite der Druck- und Temperatursignale aus dem Werkzeug für zwei Versuchseinstellungen	25
Abbildung 20: DASyLab-Schaltbild zur Berechnung des Zustandsvektors für die Versuchsauswertung	26
Abbildung 21: verfolgter Ansatz zur dynamischen Ableitung von Zustandskenngrößen als Modelleingang.....	27
Abbildung 22: Schwankende Temperaturamplituden bei gleicher Einstellung sowie Projektion der Zustandsvektoren mehrerer Versuchseinstellungen	27
Abbildung 23: Rheologiedüse zur Schmelzecharakterisierung	29
Abbildung 24: Untersuchungen der Reproduzierbarkeit und Stabilität der Düsensensorik.....	30
Abbildung 25: erfasste Maschinen- und Düsensignale sowie abgeleiteter Viskositätsverlauf.....	30
Abbildung 26: Einfluss von Dosierhub und Zykluszeit auf die Schmelzetemperatur (am Beispiel von PP).....	31
Abbildung 27: Veränderung verschiedener Prozessgrößen bei Variation von Staudruck und Drehzahl	31
Abbildung 28: "verschobener" Zyklus für die Untersuchung der Schmelzeviskosität	32
Abbildung 29: Auswirkung von MFI- und Zykluszeit-Variation auf Viskosität und Clusterbildung.....	33
Abbildung 30: Messwerte und Prognose der Viskosität durch erstelltes Neuro-Fuzzy-Modell	33

Abbildung 31: Veränderung des Zustandsvektors bei schrittweiser Erhöhung der Zylindertemperatur mit farblicher Viskositätskenngröße sowie Leistungsaufnahme der Heizbänder.....	34
Abbildung 32: simultane Online-Visualisierung der Maschinensignale in Virtuos (links) und DASyLab (rechts)	35
Abbildung 33: Regelung des Formteilgewichts mit dynamischer Temperierung	37
Abbildung 34: Zustandsabhängige Regelung des Formteilgewichts anhand des Schmelzezustands über den Umschaltpunkt von Einspritzen auf Nachdruck bei einer Viskositätsänderung von 15 %	37
Abbildung 35: Vergleich werkstoffspezifischer Größen für verschiedene Standardmaterialien.....	38
Abbildung 36: erfasste energierelevante Messgrößen am Prozess	39
Abbildung 37: Energieflüsse (elektrisch und thermisch) in der Anlage	40
Abbildung 38: Sankey-Diagramm der ermittelten Energieflüsse und -bilanzen im Zylinder (anderes Material)	41
Abbildung 39: Einfluss der Heizbandisolierung auf Energieverbrauch	41
Abbildung 40: Excel-Werkzeug zur Offline-Ermittlung des einstellungsabhängigen Energieverbrauchs	42
Abbildung 41: Programmoberfläche der interaktiven Einstellerunterstützung zur energieeffizienten Prozesseinstellung.....	43
Abbildung 42: Demonstratormaschine mit segmentierter Werkzeugtemperierung und zustandsabhängiger kooperativen Regelung im Technikum der Fa. KraussMaffei Technologies GmbH	45
Abbildung 43: Vergleich Energieaufnahme Standardtemperierung und dynamische Temperierung..	45

1. Einleitung

In Deutschland sind im Bereich der Kunststoffverarbeitung ca. 2.750 Unternehmen tätig, die insgesamt einen Jahresumsatz von über 55 Mrd. € erwirtschaften. Ein Großteil der Unternehmen produziert thermoplastische Formteile für die Bereiche Automotive, Verpackung, Medizintechnik, Haushalt, Elektronik und sonstige technische Anwendungen. Von den im Jahre 2011 deutschlandweit verarbeiteten 13,5 Mio. Tonnen an Kunststoffen, was einem Wachstum von über 10 % gegenüber dem Vorjahr entspricht, entfallen laut GKV schätzungsweise 3 Mio. Tonnen auf das Spritzgießen und verwandte Verfahren. Allein für die Verarbeitung sind dafür 1 Milliarde kWh pro Jahr notwendig, was dem Jahresenergiebedarf von 285.000 Haushalten entspricht.

Die Produktion der Teile beim Spritzgießen erfolgt zyklisch. Potentiale zur Ressourcenschonung ergeben sich im Wesentlichen durch Vermeiden von Ausschuss, der Reduktion der Zykluszeit sowie durch eine Steigerung der Energieeffizienz von Einzelkomponenten und insbesondere des Gesamtsystems. Der Produktionsausstoß von Gutteilen je Zeiteinheit neben einer hohen Energieeffizienz stellen die entscheidenden Faktoren für eine wirtschaftliche Spritzgießfertigung dar.

Bei Spritzgießmaschinen werden insgesamt 81% der Energie für Temperierung und Heizung aufgewendet. Eine Erhöhung der Energieeffizienz in diesem Bereich hat somit enorme Auswirkungen auf den Gesamtprozess. Der Energieverbrauch ergibt sich durch das notwendige Aufschmelzen bei 165 - 350°C und das anschließende Abkühlen, wodurch die eingesetzte Energie quasi „vernichtet“ wird. Die teils tonnenschweren Werkzeuge sind auf eine einheitlich hohe Temperatur (bis 140°C) aufgeheizt, die sich nach der kritischsten Werkstückstelle richtet. Da das Werkzeug inklusive Temperierung und die Maschine autonom agieren, sind für eine gesicherte Produktion beidseitige Temperaturreserve eingestellt, um auch bei unvermeidlichen, oft materialbedingten Prozessschwankungen qualitativ ausreichende Produkte fertigen zu können. Spritzgießprozesse unterliegen dabei sehr unterschiedlichen material-, prozess- und umweltbedingten Einflüssen, die auch bei modernsten Fertigungsanlagen zu prozessbedingten Schwankungen und in Folge zu Abweichungen in der angestrebten Produktqualität führen. Durch die getrennten Regelungen der nicht gekoppelten Einzelprozesse für die Plastifizierung und die Werkzeugtemperierung sind für eine sichere Produktion Sicherheiten in Form von Temperatur- und Zeitreserven in beiden Systemen notwendig. Bei den für die Verarbeitung von Kunststoffen notwendigen hohen Temperaturen bedeutet dies eine doppelte Vergeudung von Ressourcen, da die Wärme erst eingebracht und anschließend nach der Formgebung wieder entzogen werden muss.

Ein weiterer Punkt ist die mangelnde Kenntnis des Anwenders über den tatsächlichen Energieverbrauch. Er hat kein Bewusstsein dafür, wie viel Energie genau benötigt wird und welche Parameter sich wie stark auf den Energieverbrauch auswirken. Insgesamt ist damit oft ein unnötig hoher Energieeinsatz verbunden.

Die heutige Qualitätsüberwachung dieser Fertigungsprozesse erfolgt meist durch zentral organisierte Prüfabläufe, die in jüngster Zeit teilweise durch eine prozessintegrierte Prüfung ausgewählter Signal- oder auch Qualitätsmerkmale ergänzt werden. Aufgrund der hohen Fertigungstaktraten und dem dadurch hohen Prüfaufwand erfolgt die Erfassung der Qualität auch hochwertiger Spritzgießprodukte in der Regel nach statistischen Vorgaben (SPC), also anhand von Stichproben, wobei die SPC in der Spritzgießfertigung aufgrund von meist geringen Stichproben im Verhältnis zu den gefertigten Stückzahlen schnell an ihre Grenzen stößt. Schwankungen oder gar Fertigungsprobleme aufgrund

unzureichender Qualität werden dadurch oft nur zeitversetzt erkannt, was durch die Sperrung der Produktion der letzten Stunden zu höherem Ausschuss führt. Der entstehende Materialverlust führt neben der Ressource Arbeitszeit auch durch den für die Materialherstellung und –verarbeitung eingebrachten kumulierten Energieaufwand zu großen Verlusten.

Bei immer weiter ansteigenden spezifischen Produktionskosten je Zeiteinheit, insbesondere am Produktionsstandort Deutschland, bedarf es einer Weiterentwicklung der o.g. Produktionsmethode hin zu deutlich rationaleren Ansätzen. Hierbei muss die Qualität zwar nach wie vor im Vordergrund stehen, jedoch sollten dabei kürzest mögliche Produktionszyklen mit möglichst geringem Energieaufwand und im Bedarfsfalle schnelle Eingriffe auf die Prozessparametrierung möglich werden. Das erfordert, dass die Prozessdaten überwacht und zustandsabhängig geregelt werden, um während des Produktionsprozesses unzulässige Schwankungen ausgleichen zu können. Hierdurch würde ein enormes Einsparpotential bei den Spritzgießbetrieben geschaffen. Beispielsweise würde eine 10% Reduzierung der Zykluszeit durch Verringerung der Kühlzeit alleine bei neu installierten Spritzgießprozessen zu ein Einsparpotential von ca. 100 Mio. € / Jahr bei vollständiger Verbreitung und Umsetzung einer zustandsabhängigen Prozessführung führen.

Durch das frühzeitige Erkennen von Prozessschwankungen und abgeleitete Maßnahmen in der Prozesssteuerung kann eine signifikant erhöhte Prozessstabilität erreicht werden. Durch die ganzheitliche Betrachtung der Prozesse inklusive der Einzelkomponenten Temperierung, Werkzeug, Material und Spritzgießmaschine durch den Einsatz von integrierten Regelsystemen, welche die Wechselwirkungen berücksichtigen, ist somit ein enormes Potential zur Ressourcenschonung gegeben. Insbesondere eine Steigerung der Energieeffizienz beim Spritzgießen ist aufgrund stark steigender Energiepreise und dem hohen Energieaufwand ein sehr aktuelles Thema mit sehr hohem Potential (z.B. Einsparungen von jeweils 30% bei der Kühlung und Maschinenheizung). Im Jahr 2000 mussten 1,8% des Gesamtumsatzes der Branche Kunststoffverarbeitung für Energie aufgewendet werden, wobei sich dieser Anteil angesichts der stark gestiegenen Energiekosten die letzten Jahre deutlich erhöht hat.

Viele technologisch führende Firmen aus dem Bereich der Kunststoffverarbeitung (Material, Anlagen- und Maschinenbau, Werkzeugbau, Verarbeitung) sind in Deutschland ansässig, und somit alle notwendigen Kompetenzen für eine erfolgreiche Projektbearbeitung. Für Produzenten von Kunststoffprodukten sind die Energiekosten am Standort Deutschland mit am höchsten in Europa. Dies führt zu einem enormen Kostendruck, weswegen der höchste Handlungsbedarf in Deutschland besteht. Viele der Kunststoffverarbeiter sind KMU, welche auch großen Anteil am Erhalt von Arbeitsplätzen in Deutschland haben.

2. Ziele, Lösungsansatz, Projektkonsortium

Projektziel

Das Spritzgießen ist durch die für die Verarbeitung notwendigen hohen Temperaturen ein energieintensives Verfahren. Dabei wird zuerst Wärmeenergie eingebracht, um die das Ausgangsmaterial in Form von Kunststoffgranulat zu erweichen (je nach Material zwischen ca. 180 und 300°C), anschließend wird durch Einspritzen der zähflüssigen Schmelze ins Werkzeug das gewünschte Produkt geformt und abschließend die Wärmeenergie dem Prozess wieder entzogen, damit das Produkt formstabil entnommen werden kann. Gesamtziel des Verbundprojektes ZuPrEff ist es, den Spritzgießprozess hinsichtlich der verschiedenen Energieflüsse und beeinflussender Faktoren detailliert zu untersuchen und durch verschiedene Maßnahmen und Entwicklungen die Energieeffizienz des Gesamtprozesses zu steigern.

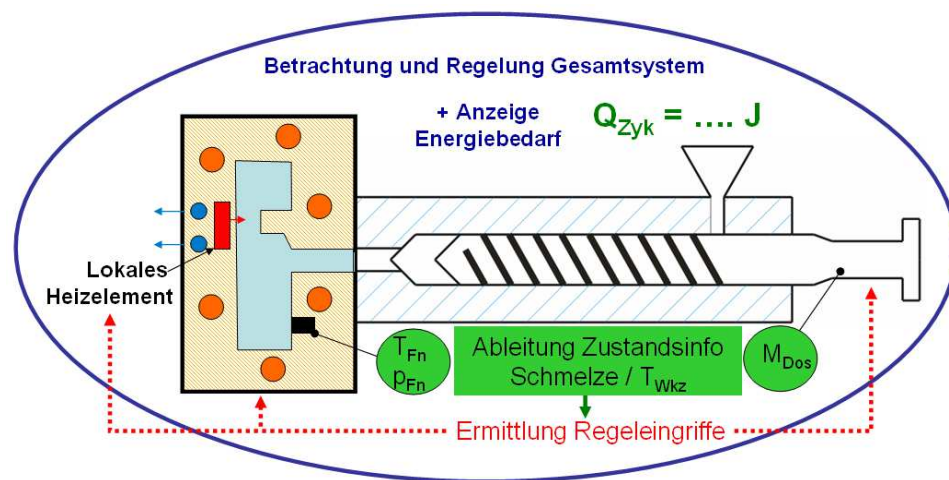


Abbildung 1: Projektziel der zustandsorientierten Regelung des Gesamtsystems mit integriertem Energiemonitoring

Die Energieeffizienz des Gesamtprozesses, bestehend aus Maschine und Werkzeug inklusive Temperaturierung, sollte einerseits durch maschinen- und werkzeugtechnische Entwicklungsmaßnahmen sowie die Entwicklung einer kooperativen Regelung der bisher autonomen Teilsysteme gesteigert werden. Zudem kann der Anwender durch die Realisierung eines Energiemonitorings den Energieverbrauch des Gesamtprozesses beurteilen. Neben Qualität- und Zykluszeit kann so auch die Energieeffizienz bei der Optimierung der Einstellung berücksichtigt werden, was durch Vorschläge der Steuerung zusätzlich unterstützt wird. Ergänzt wird dies durch den Aufbau einer umfangreichen Wissensbasis, welche Komponenten und Parameter sich auf den Prozess und insbesondere den Energieverbrauch auswirken.

Abschließend werden alle entwickelten Komponenten in einem Demonstrator zusammengeführt, an dem interessierten Kunden die Projektergebnisse auf Messen und auch nach Projektende z. B. im Anwendungslabor von Krauss Maffei präsentiert werden können.

Lösungsansatz

Die im beantragten Forschungsprojekt verfolgten Ansätze können den notwendigen Energieeinsatz auf mehrfache Weise reduzieren: einerseits kann durch entsprechende Entwicklungen der Anlagenhersteller und Werkzeugmacher die Energieeffizienz der Einzelkomponenten gesteigert werden. Andererseits kann der Anwender bei der Auswahl energetisch günstiger Komponenten als auch bei Einstellung von energie- und verbrauchsoptimalen Arbeitspunkten für die Produktion unterstützt werden.

Die **Steigerung der Energieeffizienz der Einzelkomponenten** soll durch ein Bündel an Maßnahmen erreicht werden, die auch nach erfolgter Verwertung der Projektergebnisse von Anlagen- und Werkzeugbauern durch Herstellung entsprechender Komponenten geleistet werden müssen.

Ein Punkt, der sich auch heute schon in vielen Entwicklungen widerspiegelt, ist der Einsatz energieeffizienter Komponenten in der Spritzgießmaschine. Exemplarisch sei der zunehmende Ersatz der Hydraulikmotoren durch elektrische Motoren für einzelne Achsen bis hin zum Aufbau von Vollelektrischen Maschinen genannt. Andere Maßnahmen wie Einsatz von Isolierungen, verschiedene Trocknervarianten etc. sind prinzipiell bekannt und ihre Wirksamkeit soll im Rahmen des Projektes quantifiziert werden. Die so gewonnenen Daten unterstützen den Anwender bei der **Auswahl der passenden Maschinenkomponenten**, die einen wesentlichen Einfluss auf die Energieeffizienz des Gesamtprozesses haben.

Ein weiterer wichtiger Ansatzpunkt ist die Werkzeugtemperierung und die Umsetzung einer **segmentierten Werkzeugtemperierung**. Diese umfasst neben verschiedenen temperierten Werkzeugzonen auch konturnahe und konturfolgende Kühlkanäle sowie spezifische Temperierelemente zur lokalen Temperierung. Solche Temperierelemente sind beispielsweise hochdynamische Werkzeugeinsätze mit integrierten Heiz- und Kühlfunktionen, die auch auf keramischen Werkstoffen basieren. Durch entsprechende „Aufrüstung“ der Werkzeuge in Kombination mit einer intelligenten Prozesssteuerung werden geringere Spritzdrücke und niedrigere Werkzeug- und Massetemperaturen möglich. Durch die Erwärmung und anschließende Abkühlung, welche durch das Prozessprinzip bedingt sind, bedeutet dies eine doppelte Energieersparnis. Insgesamt wird eine effektive Senkung der Grundtemperierung ermöglicht. Die Werkzeugmasse, die auf die durch die kritischste Bauteilstelle vorgegebene maximale Temperatur T_{Max} erwärmt werden muss, wird durch verschiedene, separat ansteuerbare konturnahe Werkzeugzonen mit lokalen Heiz- und Kühlelementen deutlich minimiert. Die kritischste Bauteilstelle hängt meist eng mit dem Fließweg-Wanddickenverhältnis zusammen. Solch kritischen Stellen können durch spezifische Temperierelemente (z.B. hochdynamische Werkzeugeinsätze mit integrierten Heiz-/ Kühlfunktionen) zielgerichtet auf das notwendige Temperaturniveau über der Werkzeuggrundtemperatur gehoben werden. Eine niedrigere Grundtemperatur reduziert auch die notwendige Kühlzeit und führt somit auch zu kürzeren Zykluszeiten. Durch den Aufbau einer segmentierten Werkzeugtemperierung ist somit angestrebt, die Energieeffizienz deutlich zu erhöhen. Durch die so ermöglichte Regelung der tatsächlichen Oberflächentemperatur wird ein Energie-Einsparpotential von 20% erwartet. Bei einem Gesamtanteil der Werkzeugtemperierung von 47% am Gesamtenergieverbrauch entspricht dies auf den gesamten Prozess bezogen einem Einsparpotential von 9,5%.

Ein weiterer Kernpunkt zur Erreichung der Ziele ist die **modellhafte Beschreibung von relevanten Schmelze- und Werkstückzuständen** in Abhängigkeit von Prozessschwankungen. Diese bilden sich in erfassten Sensorsignalen aus dem Werkzeug und der Plastifiziereinheit ab. Basierend auf

Versuchsreihen an einer Spritzgussanlage, die um notwendige Messtechnik sowie die zu erarbeitende segmentierte Werkzeugtemperierung erweitert wird, werden die Zusammenhänge zwischen Einflussgrößen (Material, Einstellparameter...), Prozesszustand und Auswirkung auf die Teilequalität erarbeitet und in verschiedene beschreibende Modelle überführt. Die durch die Sensoren erfassten Informationen ermöglichen durch entsprechende Modellierungsmethoden eine Überwachung des realen Schmelze- und Werkzeugzustands. Auftretende Prozessschwankungen bei Plastifizierung oder Werkzeugtemperierung können so erkannt und ausgeregelt werden.

Durch die Zustandsüberwachung von Schmelze und Werkzeug kann das Werkstück **zustandsabhängig entformt** werden, was zu einer Minimierung der Zykluszeit bei gleichzeitiger Erzielung konstant hoher Formteilqualität führt. Aufgrund physikalischer Zusammenhänge sinkt bei einer Reduzierung von Masse- bzw. Werkzeugtemperatur um jeweils 10°C die Kühlzeit um 5% bzw. 15%. Bei technischen Bauteilen beträgt die Kühlzeit im Mittel 2/3 der Zykluszeit, so dass sich insgesamt ein hohes Potential zur Steigerung der Produktivität ergibt und sich die notwendige Energie pro Teil verringert, da die für die Verarbeitung hohen Temperaturen niedriger sind und nur kürzer wirken.

Durch die **übergeordnete, komponentenübergreifende Regelung** werden Schwankungen in der Maschine, die sich insbesondere auf den Schmelzestand auswirken, durch zielgerichtete Reaktionen der Werkzeugtemperierung ausgeglichen. Hierfür ist eine segmentierte Werkstücktemperierung notwendig, die durch lokale Heiz- und Kühlelemente schnell reagieren kann. Schwankungen, die durch die temperaturbedingte hohe Trägheit der Einzelkomponenten nicht sofort ausgeglichen werden können, sollen durch komponentenübergreifende Regelansätze kompensiert werden. Z. B. kann eine geringere Schmelztemperatur durch eine kurzzeitige Erhöhung der Werkzeugtemperatur an den kritischen Stellen – möglich durch den segmentierten Aufbau der Temperierung – kompensiert werden. Dies führt zu einer signifikanten Erhöhung der Prozessstabilität und zudem kann auf diese Weise eine Verkürzung der Einfahrzeit erreicht werden. Insgesamt wird somit eine deutliche Senkung des produzierten Ausschusses erreicht, wodurch deutlichen Einsparungen in allen Ressourcenbereichen erzielt werden. Durch die verkürzten Anfahrzeiten und die optimale Prozessregelung wird eine geringere Quote an Fehlproduktionen erreicht, die sich nach Schätzungen auf bis zu 8% belaufen, was direkt mit einem Einsparpotential von 8% einhergeht. Für die Energie- und Ressourceneffizienz muss weiter auch die für die Herstellung des Materials und das Recycling bzw. die Entsorgung der Schlechteile notwendige Energie und Arbeitszeit berücksichtigt werden. Ein weiterer Benefit der erhöhten Prozessstabilität ist, dass auch die „doppelten Sicherheiten“ in Form von Temperaturreserve auf Werkzeug- und Maschinenseite reduziert werden können.

Als weiteres soll ein **Energiemonitoring** erarbeitet werden. Für das Energiemonitoring werden zuerst detaillierte Energiebilanzen des Gesamtprozesses aufgestellt, die die Abhängigkeiten von Prozessparametern und Umgebungsbedingungen berücksichtigen (z.B. Wärmeabstrahlung). Dadurch werden die Zusammenhänge abgebildet und die Potenziale von Optimierungsmaßnahmen können abgeschätzt werden. Die Energiebilanzen werden in ein Energiemonitoring überführt, welches neben dem Energieverbrauch der Maschine auch das Werkzeug und die Temperiereinrichtungen berücksichtigt. Eine Integration in die Steuerung der Maschine ermöglicht eine Aussage über den aktuellen Energieverbrauch und macht den Gesamtenergieverbrauch als Kenngröße für den Anwender zugänglich. Der Anwender kann den Prozess damit energieoptimal einstellen. Somit wird neben der heute üblichen Fixierung auf Qualität und Zykluszeit eine Optimierung der

Prozesseinstellung auch unter Energie- und Kostengesichtspunkten ermöglicht. Unterstützt wird er dabei durch eine erarbeitete Wissensbasis, die aus den Energiebilanzen Zusammenhänge zwischen Einstellparametern des Prozesses und dem Energiebedarf abbildet. Unter Berücksichtigung des Energieverbrauchs und den Maschinenparametern vorangegangener Zyklen werden dem Maschineneinrichter Hinweise zu einer energieeffizienteren Prozesseinstellung gegeben. Das Energiemonitoring ermöglicht es zudem, Veränderungen im Wärmehaushalt des Gesamtprozesses zu erkennen, die z.B. auf ein Zusetzen der Kühlkanäle oder auf einen sich verschlechternden Wärmeübergang zurückzuführen sind. Präventive Maßnahmen können damit eingeleitet und Produktionsausschuss und Stillstandszeiten effektiv vermieden werden.

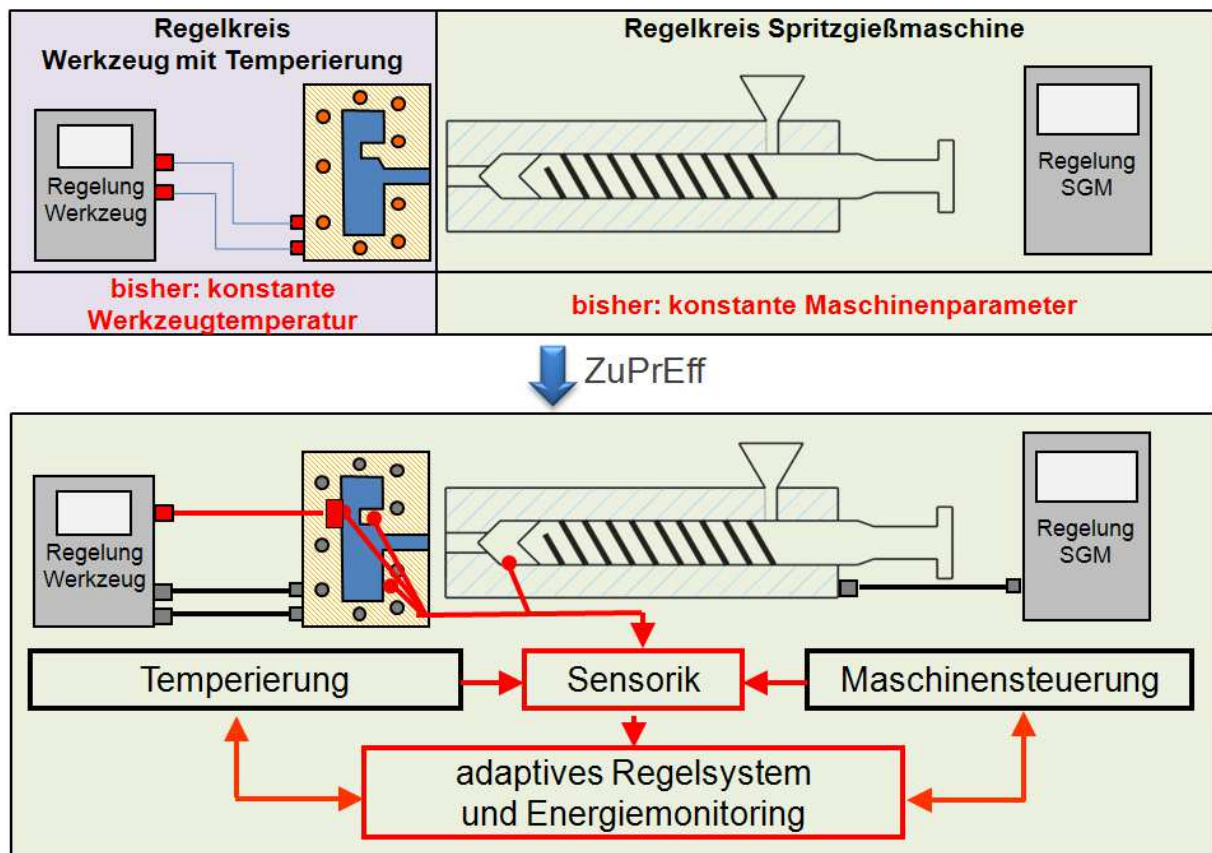


Abbildung 2: Lösungsansatz inklusive aller Einzelkomponenten

Der Lösungsansatz zur ganzheitlichen Prozessregelung ist in Abbildung 2 dargestellt. Da sich die angestrebten Verbesserungen auf das Verfahren des Spritzgießens beziehungsweise entsprechende Einzelkomponenten beziehen, können sie bei erfolgreicher Markteinführung auch bei allen Bauteilen, die mittels Spritzgießen gefertigt werden, zum Einsatz kommen. Die Bandbreite der Teile reicht dabei von wenigen hundertstel Gramm bis zu jenseits der 50 kg. Aus wirtschaftlichen und versuchstechnischen Gründen wird sich die Bauteilgröße der im Projekt verwendeten Versuchsteile in etwa bei Handtellergröße bewegen.

Projektkonsortium

Da die Projektinhalte den kompletten Spritzgießprozess mit allen wesentlichen Teilkomponenten als auch umfangreiche Versuchs- und Analysearbeiten beinhalten, müssen sich alle diese Punkte im Konsortium widerspiegeln. Das Projektkonsortium sowie die jeweilig bearbeiteten Teilprojekte des ZuPrEff-Projektes sind in Abbildung 3 dargestellt. Zur Erreichung der Projektziele ist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit aller Partner elementar.



Abbildung 3: Projektpartner und Teilprojekte

Die Firma Krallmann ist im Projekt für alle werkzeugtechnischen Fragen verantwortlich. Dies umfasst die Konstruktion und den Bau von Versuchs- und Demonstrationswerkzeugen, die Integration von Sensorik sowie die Mitarbeit beim Aufbau der segmentierten Werkzeugtemperierung. Da Krallmann auch eine eigene Spritzgießfertigung hat, können entsprechende Impulse und Rückmeldungen aus der Produktion einfließen.

Die Firma Krauss Maffei ist Hersteller von Spritzgießmaschinen, wobei das Maschinenspektrum verschiedenste Baureihen und Komponenten beinhaltet und bis zu Großmaschinen reicht. Der Beitrag von Krauss Maffei umfasst u. a. die Bereitstellung und Betrieb einer Versuchsmaschine, die Integration von Sensorik, Versuchsdurchführung und –auswertung insbesondere für die Schmelzestandsüberwachung und die Integration von Kommunikations- und Regelungsfunktionalität.

Die Firma gwK entwickelt und fertigt u. a. Temperiergeräte, Kühlanlagen, Kühltechnik und Kältemaschinen. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Temperiertechnik für die Maschinen- und Werkzeugkühlung beim Spritzgießen. Wesentliche Projektinhalte von gwK sind dabei die segmentierte Werkzeugtemperierung, die zustandsabhängige Entformung sowie die Entwicklung von Regelungsfunktionalitäten der lokalen Temperierelemente und das Energiemonitoring. Zudem ist gwK der Projektkoordinator des Verbundprojektes.

Die Hochschule Rosenheim bietet den Studiengang Kunststofftechnik an und hat damit die Expertise für alle Verfahrensfragen sowie die detaillierte Analyse des Gesamtprozesses. Durch die vorhandene Technikumseinrichtung können an der HS Rosenheim umfangreiche Versuchsreihen und Analysen durchgeführt werden. Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit ist die Energiebilanzierung und –auswertung.

Das Fraunhofer IPA beschäftigt sich seit vielen Jahren mit der Prozessüberwachung und Qualitätsprognose unter anderem beim Kunststoffspritzgießen. Daraus resultiert die Expertise in der Signalverarbeitung und –auswertung sowie der Modellbildung. Wesentliche Projektinhalte des Fraunhofer IPA sind die Auswertung von Versuchsreihen, die Modellierung für Werkzeug- und Schmelzestand und parameterabhängigem Energieverbrauch sowie Regelungsstrategien.

3. Ergebnisse

Versuchsreihen und Versuchsteile

Um die Projektziele erreichen zu können, waren umfangreiche Versuchsreihen eine wesentliche Basis für alle Arbeitspakete. Jeder Versuchsreihe gingen teils umfangreiche Analysen voraus, um die wesentlichen Einfluss- und Zielgrößen identifizieren und den Versuchsplan entsprechend gestalten zu können. Die verschiedenen verwendeten Versuchsteile sowie das Demonstrator-Werkzeug in Form des Projektlogos sind in Abbildung 4 zu sehen.

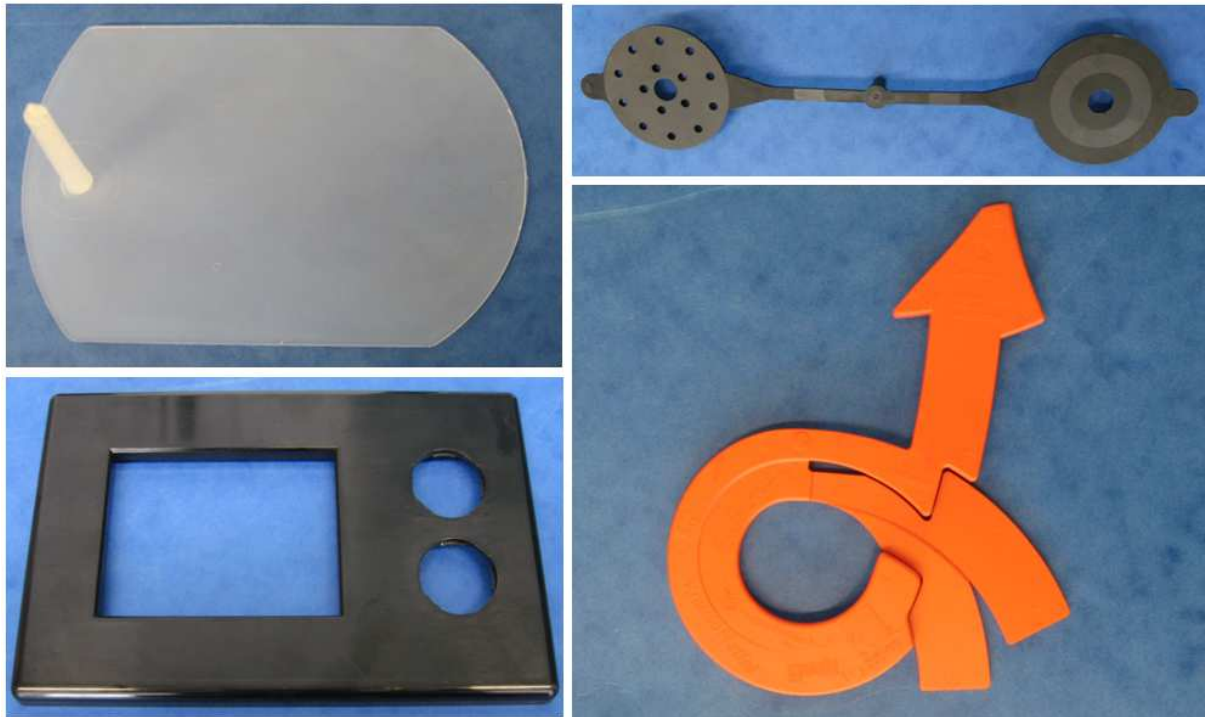


Abbildung 4: im Projekt verwendete Versuchs- und Demonstrationsbauteile

Die Auswahl bzw. Entwicklung der Versuchsteile erfolgte anhand erarbeiteter Kriterien für die einzelnen Projektteilziele. So war für die Versuche zur Energiebilanzierung und zur Analyse des Einflusses verschiedener Materialien und Prozessparameter auf den Energieverbrauch ein Versuchswerkzeug notwendig, bei dem Material und Prozessparameter über weite Bereiche variiert werden konnten. Deswegen wurde für diese Versuche ein einfaches Plattenbauteil gewählt. Anhand dieses Werkstücks wurden auch Vorversuche zur Eignung und Auswahl der Werkzeugsensorik für andere Werkzeuge durchgeführt. Auch die Qualifizierung gesamten Messtechnik, der Sensoren sowie der Messleiste (s. u.) erfolgte anhand dieses Werkzeugs. Die anderen Werkstücke waren so konzipiert, dass sie spezifische Schwierigkeiten wie glänzende oder strukturierte Oberflächen, Materialanhäufungen und Dome, Bindenähte oder Engstellen aufweisen. Damit wurden die Versuche für die segmentierte Werkzeugtemperierung, die zustandsorientierte Entformung sowie die komponentenübergreifende Regelung durchgeführt.



Abbildung 5: verwendete Versuchsmaschinen in Rosenheim sowie bei KraussMaffei und gwk

Da die einzelnen Projektpartner individuelle Schwerpunkte für die Versuchsreihen und Auswertungen hatten, wurden die Versuche bei verschiedenen Partnern mit unterschiedlichen Maschinen eingesetzt (siehe Abbildung 5). Die Maschinen und Werkzeuge wurden dabei jeweils mit bedarfsgerechter Sensorik und Messtechnik ausgerüstet.

Signaldatenerfassung und -verarbeitung

Die Signaldatenerfassung erfolgte entsprechend der verschiedenen Sensoren und Datenquellen. Die wesentlichen Datenquellen waren dabei:

- Sensoren im Spritzgießwerkzeug
- Mess- und Stellgrößen der Trockner- und Temperiergeräte (Temperaturen, Durchfluss, Ventilansteuerung, Ansteuerung der Heizkeramik...)
- Stell- und Messgrößen aus der Maschinensteuerung (Werkzeugposition, Plastifizierung, Schneckenposition, Digitalsignale)
- Messwerte aus den Frequenzumrichtern der Achsmotoren (Positionen, Momente)
- Sensorsignale der Rheologiedüse und externer DMS-Sensorik
- Messwerte von Leistungsmessgeräten

Die mit Abstand umfangreichste messtechnische Ausrüstung erfolgte an der Spritzgießmaschine im Technikum der Hochschule Rosenheim. Dies war notwendig, da hier sowohl die Qualifizierung von Sensorik, die Entwicklung und Erprobung der Rheologiedüse als auch Versuche zur Schmelzezustandsüberwachung und dem Energiemonitoring erfolgten. Für die Datenerfassung wurde basierend auf einer Erweiterung der Maschinensteuerung eine Messleiste entwickelt, mit der über 100 Signale aus unterschiedlichen Quellen mit einer Abtastrate von bis zu 2 ms erfasst werden konnten. Die Steuerung der Spritzgießmaschine basiert auf dem VARAN-System (echzeitfähiger Ethernetbus). Über eine VARAN-Kopplung inklusive steuerungstechnischer Anpassungen konnten die relevanten Maschinengrößen erfasst werden. Alle externen Sensoren und Signale wurden über

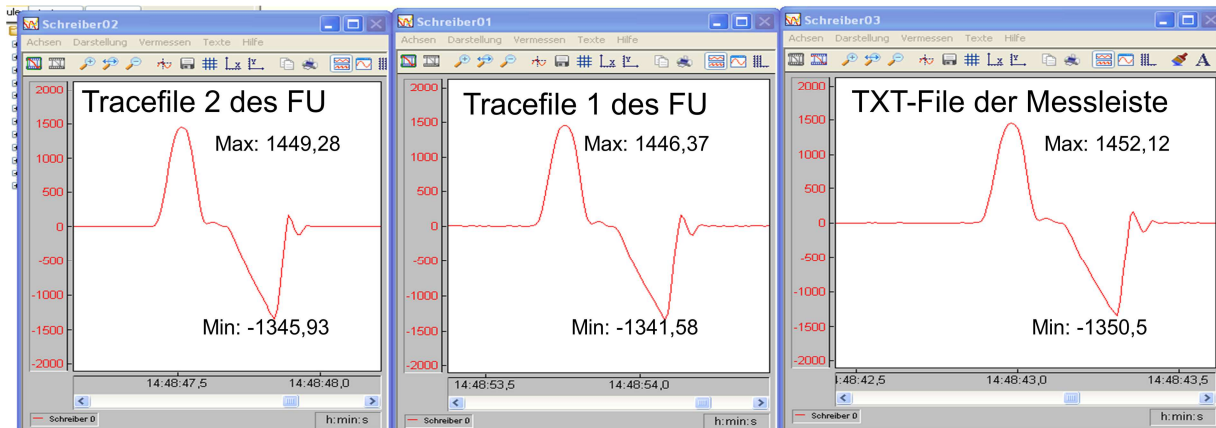


Abbildung 7: Verlauf des Auswerfersignals, erfasst durch die beiden FU-Traces sowie die Messleiste

Da die beiden FU-Logger sowie die Messleiste zeitlich nicht synchronisierbar sind und die Aufzeichnung manuell und dadurch mit variierendem Zeitversatz gestartet werden konnten, mussten die Signale bei der Auswertung erst zeitlich referenziert werden. Dafür wurde in allen drei Aufzeichnungsmodulen das Auswerfersignal als Referenzsignal mit erfasst. Aufgrund der fehlenden Synchronisierung und der verschiedenen Abtastraten (2 ms bzw. 5 ms) waren die Signale zwar nicht absolut deckungsgleich, konnten aber aufgrund des charakteristischen Signalverlaufs mittels in Matlab¹ und DASyLab² entwickelter Auswerteroutinen automatisiert einander zugeordnet werden. Die Verläufe des Auswerfersignals für alle drei Erfassungsmodule ist für einen Zyklus exemplarisch in Abbildung 7 dargestellt.

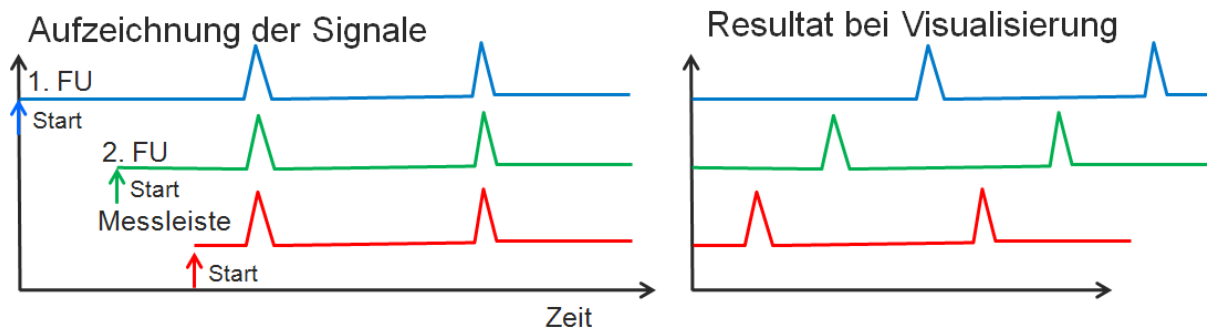


Abbildung 8: Zeitversatz bei der Aufzeichnung und resultierende Signale

Durch die Aufzeichnung mittels unterschiedlicher Rechnersysteme sowie manuellen Start ergeben sich variierende Zeitversätze zwischen den Signalquellen. Die sich dadurch ergebenden Signalverläufe bei der Visualisierung und Auswertung sind schematisch in Abbildung 8 aufgezeigt. Die Auswertung erfolgt fertigungszyklusbezogen anhand von Triggersignalen. Da die Triggersignale nur auf der Messleiste als Verlauf verfügbar sind, musste der Zeitversatz der beiden aufgezeichneten FU-Tracefiles korrigiert werden. Erst dann war eine Zuordnung der darin enthaltenen Leistungsaufnahmen zu Fertigungszyklen möglich. Das DASyLab-Schaltbild zur Korrektur des

¹ „Programmiersprache“ von The MathWorks zur Lösung mathematischer Probleme (www.mathworks.de)

² Messwerterfassungssoftware mit „grafisch programmierter“ Signalverarbeitung (www.dasylab.com)

Zeitversatzes ist in Abbildung 9 zu sehen. Dabei kommen neben DASyLab-eigenen Modulen auch mehrere speziell programmierte Module zum Einsatz, die über eine Erweiterungsschnittstelle in DASyLab integriert wurden. Damit war es möglich, alle Signale – unabhängig von ihrer Quelle – zeitlich zu synchronisieren und zyklusbezogen auszuwerten.

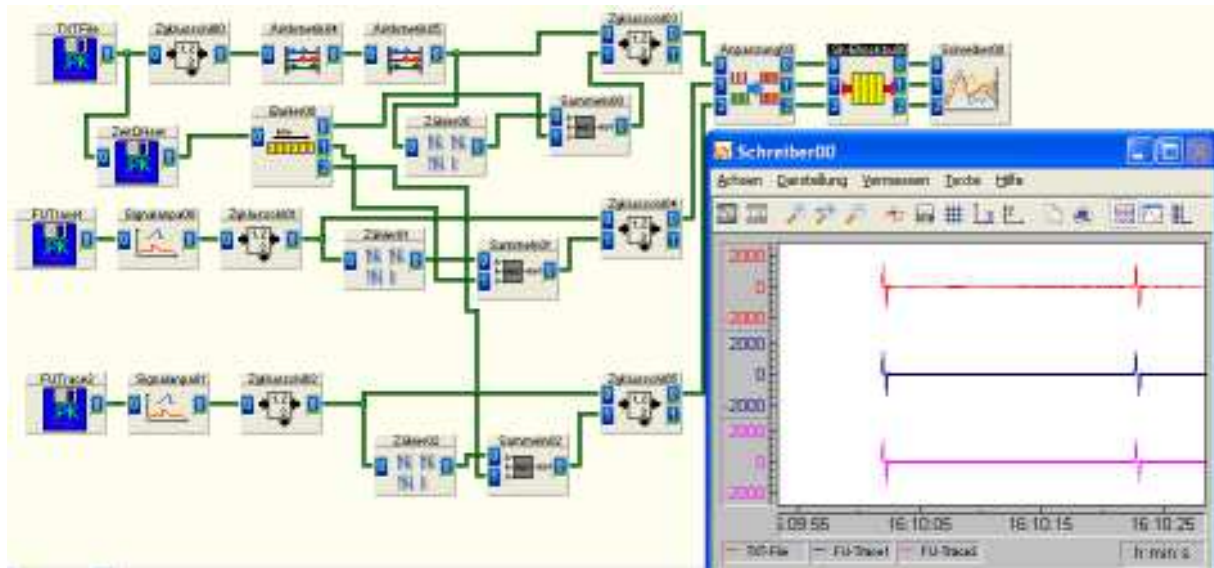


Abbildung 9: DASyLab-Schaltbild zur Korrektur des Zeitversatzes

Da die Aufzeichnung durch die Messleiste und die FU-Tracefiles dateibasiert ist, stehen die Verläufe erst nach der Versuchsdurchführung als Textfile zur Verfügung. Für die Auswertung von Zusammenhängen beim Energiemonitoring sowie der Schmelzestandsüberwachung war dies ausreichend. Für eine zustandsabhängige Reaktion und Generierung von Steuersignalen während des Zyklus, musste jedoch auch eine Online-Erfassung der Signale ermöglicht werden.

Die Umsetzung der Messleiste inklusive Validierung der Installation hat sich sowohl kosten- als auch zeitmäßig sehr aufwändig erwiesen, so dass sich die ursprünglich geplante Übertragung auf die weiteren Versuchsmaschinen als nicht praktikabel erwiesen hat. Da die Messleiste zudem nicht online-fähig ist, aber auch der notwendige Signalumfang für Teilaufgaben viel geringer war als in Rosenheim, wurden andere Möglichkeiten zur Datenerfassung erarbeitet.

Die Versuchsreihen zur segmentierten Werkzeugtemperierung und zur zustandsabhängigen Entformung wurden – da sie insbesondere mit den Teilprojekten Werkzeug (Fa. Krallmann) und Temperierung (Fa. gwK) – zusammenhängen, im Technikum in Kierspe durchgeführt. Als Datenbasis waren speziell Sensorsignale aus dem Werkzeug und der Temperierung sowie Triggersignale aus der Maschine von Relevanz. Die Messwertenerfassung erfolgte mittels eines CompactRIO-Systems von National Instruments mit USB-Kopplung. Dabei wurden die Sensorsignale über Analog-Module und Triggersignale über passende Digital-Module erfasst. Die Verarbeitung der Messwerte erfolgte mit DASyLab, welches um am IPA entwickelte Softwaremodule erweitert war. Zusätzlich wurden Stellgrößen der Maschine über eine OPC-Kopplung ausgelesen.

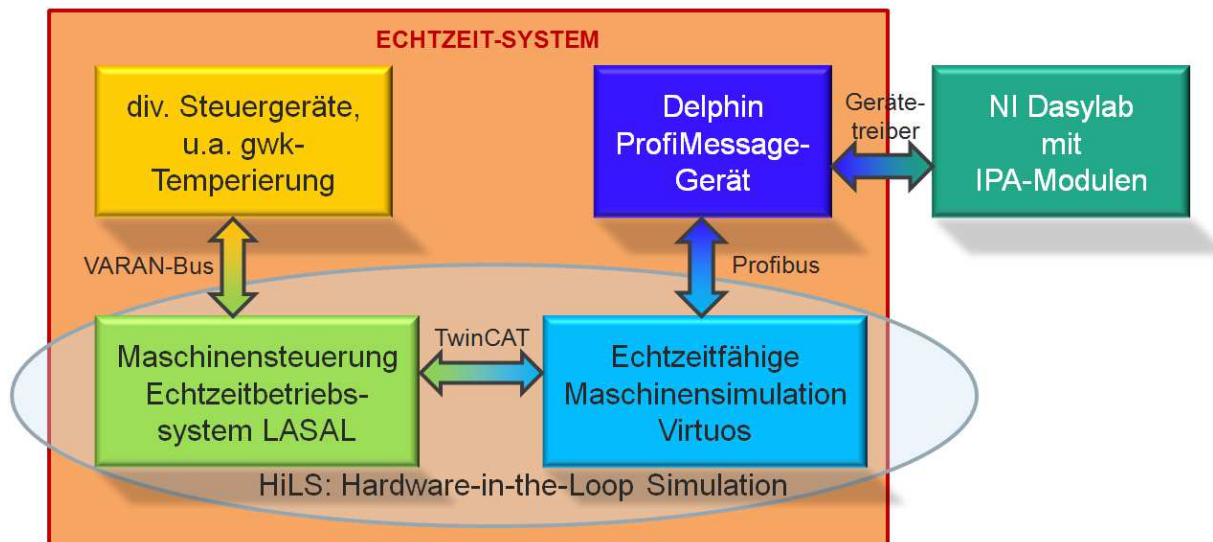


Abbildung 10: Hard- und Softwarekomponenten des Demonstrators zur Signalverarbeitung

Für die Entwicklungsarbeiten der Maschinensteuerung wird seit einiger Zeit bei Krauss Maffei eine Hardware-in-the-Loop-Simulation eingesetzt, die auf der echtzeitfähigen Maschinensimulation Virtuos³ der ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH basiert. Neue Steuerungsfunktionen können in einer real vorhandenen Steuerung entwickelt und erprobt werden, während die Spritzgießmaschine in Virtuos simuliert wird. Das Virtuos-System kann jedoch auch an eine reale Maschine gekoppelt werden. Es hat somit Zugriff auf alle verfügbaren Maschinengrößen und damit auch indirekt über den maschineninternen VARAN-Bus auf angeschlossene Peripheriegeräte. Innerhalb von Virtuos können so Maschinendaten visualisiert und auch Steuer- und Regeleingriffe abgeleitet und an die Maschinensteuerung übertragen werden – alles in Echtzeit. Über einen weiteren Baustein, der mit Profibus ebenfalls echtzeitfähig angekoppelt wird, können definierte Größen mit einem DASYLab-System ausgetauscht werden, welches um die am IPA entwickelten Module zur Kenngrößenverarbeitung und Modellierung erweitert wurde. Die Architektur und Komponenten des so entstandenen Gesamtsystems sind in Abbildung 10 dargestellt. Mit diesem System können alle für das Projekt notwendigen Daten erfasst, verarbeitet und beliebige Modellierungs- und Regelungsstrategien erprobt und umgesetzt werden. Es bildet somit die Basis für die Umsetzung der komponentenübergreifenden Regelung und den auch nach Projektende bei Krauss Maffei verfügbaren Demonstrator.

³ PC-Software zur Simulation von Maschinen mit angebundenen realen Steuerungen (www.isg-stuttgart.de)

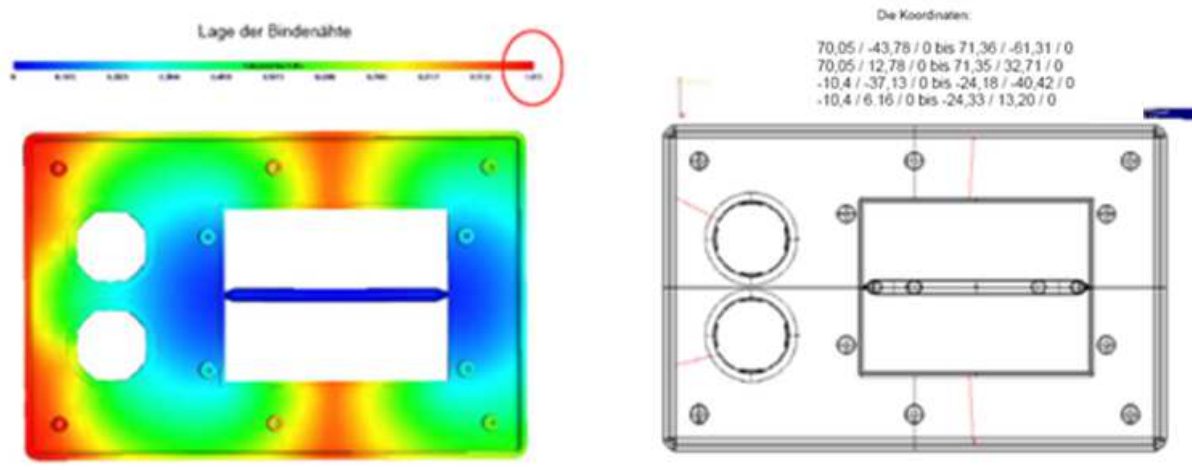


Abbildung 11: Füllsimulation zur Ermittlung der kritischen Stellen für das Versuchswerkzeug

Segmentierte Werkzeugtemperierung

Die Werkzeugtemperatur beim Spritzgießen richtet sich in der Regel nach der kritischsten Stelle des Werkzeugs und ist für das gesamte Werkzeug gleich hoch. Eine höhere Werkzeugtemperatur bedingt einerseits einen höheren Energieeinsatz, um das Werkzeug (Massen zwischen 5 kg bis mehrere Tonnen) zu erwärmen. Zudem erhöhen sich dadurch die Wärmeverluste durch Abstrahlung an die Umgebung. Andererseits führen höhere Werkzeugtemperaturen auch zu längeren Zykluszeiten, da aufgrund der geringeren Temperaturdifferenz. Ist die Temperatur jedoch nur geringfügig zu niedrig oder treten Viskositätsschwankungen des eingespritzten Kunststoffes auf, führt dies schnell zu nicht komplett gefüllten Teilen und sonstigen Fehlern wie sichtbaren Bindenähten oder Schlieren auf der Oberfläche. Infolge dessen wird in der Praxis die Temperatur immer etwas höher eingestellt, um auch bei Prozessschwankungen eine ausreichend stabile Produktion erreichen zu können.

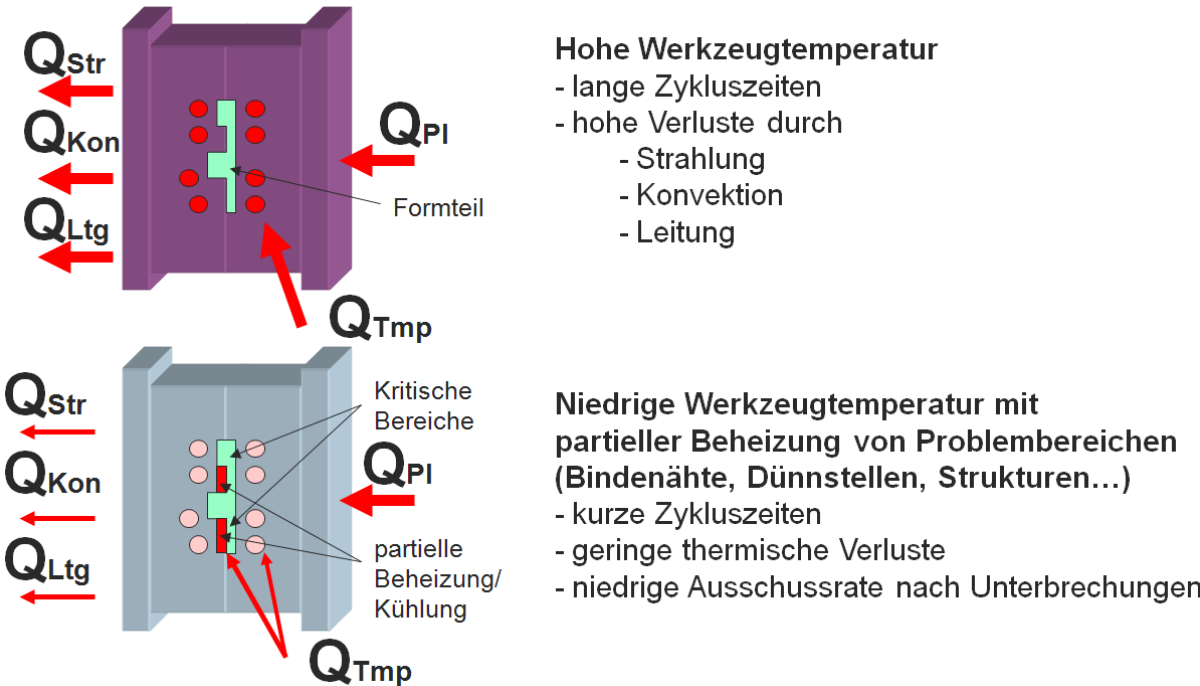


Abbildung 12: Vergleich zwischen werkzeuginheitlich und lokal angepasster Temperierung

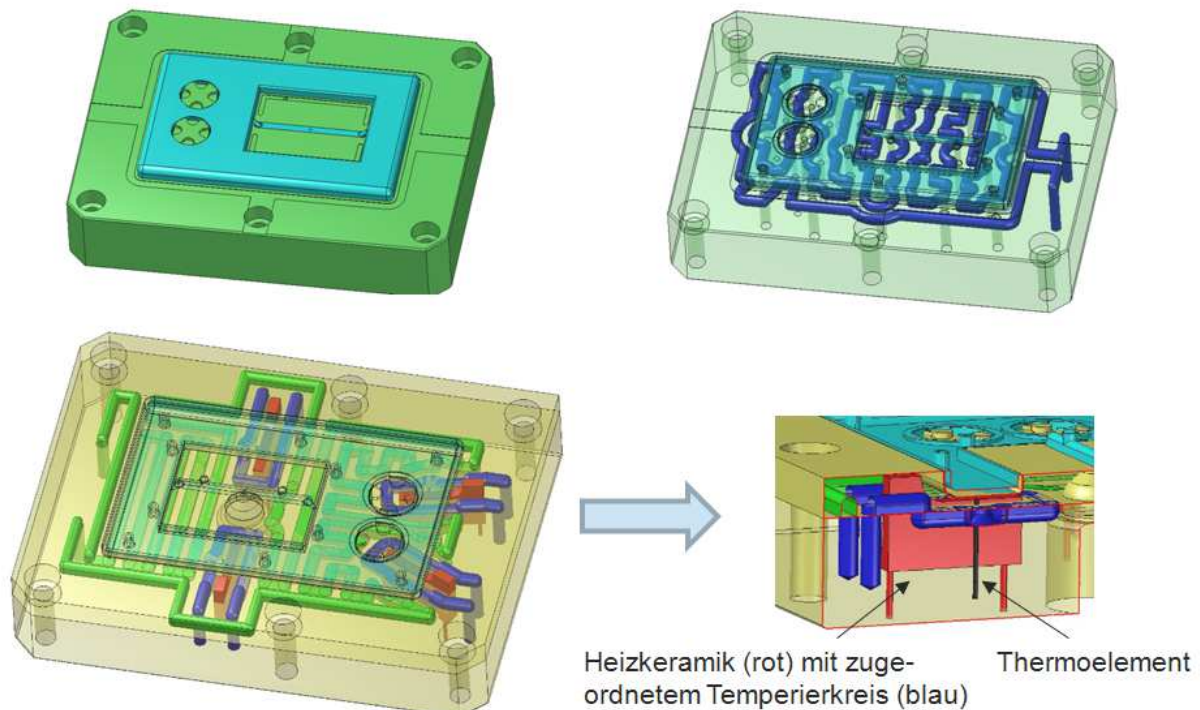


Abbildung 13: Auswerferseitiger Formeinsatz mit konturnaher Kühlung (oben) und aggregatseitiger Formeinsatz inklusive lokaler Temperierelemente an den Bindenähten

Durch die Ausrüstung des Werkzeugs mit einer segmentierten Werkzeugtemperierung können verschiedene Werkzeugbereiche entsprechend der tatsächlichen Anforderung unterschiedlich temperiert werden und nur kritische Bereichen werden mit einer entsprechenden hohen Werkzeugtemperatur gefahren. Große Teile des Werkzeugs können damit bei deutlich niedrigeren Temperaturen gefahren werden, die auch unterschiedliche Niveaus aufweisen können. An kritischen Bereichen – welche zuvor durch entsprechende Füllsimulationen ermittelt wurden (siehe Abbildung 11) – wurden lokal keramische Heizelemente mit separaten Kühlkanälen zur schnellen Temperaturabsenkung nach dem Einspritzen ins Werkzeug integriert. Die Heizelemente werden bei ausgeschalteter Kühlung auf ein einstellbares Temperaturniveau gebracht, während das Werkzeug noch geöffnet ist. Nach dem Einspritzen werden die Keramikelemente aktiv gekühlt, um möglichst schnell die Entformtemperatur erreichen zu können. Um zudem den Wärmeabtransport im gesamten Werkzeug gleichmäßig und schnell zu gestalten, wurden die Kühlkanäle konturnah ausgeführt. Dies wurde mittels eines speziellen Werkzeugaufbaus durch Fräsen und anschließender Vakuum-Fügetechnik realisiert (siehe Abbildung 13).

Eine weitere Maßnahme zur Reduktion der für die Temperierung notwendigen Energie war die Verwendung von Formeinsätzen, die mit möglichst guter thermischer Isolierung in das Stammwerkzeug eingebracht werden. Hintergrund war dabei wieder, die zu temperierenden Maßen möglichst zu minimieren. Ein direkter Vergleich einer Standardtemperierung mit der umgesetzten segmentierten Werkzeugtemperierung mit lokalen hochdynamischen Keramikheizelementen ist in Abbildung 14 zu sehen.

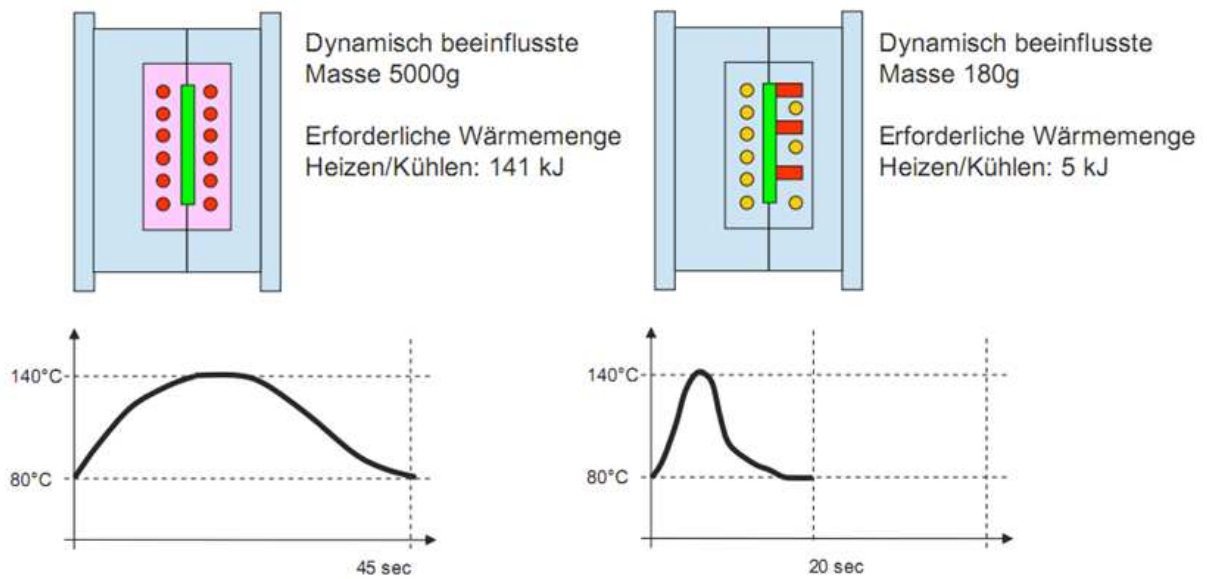


Abbildung 14: Vergleich konventioneller mit lokal dynamischer Temperierung

Des Weiteren wurde Druck- und Temperatursensorik ins Werkzeug integriert, um für die weiterführenden Arbeiten und Versuche entsprechende Informationen aus dem Werkzeug gewinnen zu können. Insbesondere für die Entwicklung einer zustandsabhängigen Entformung war dies notwendige Voraussetzung.

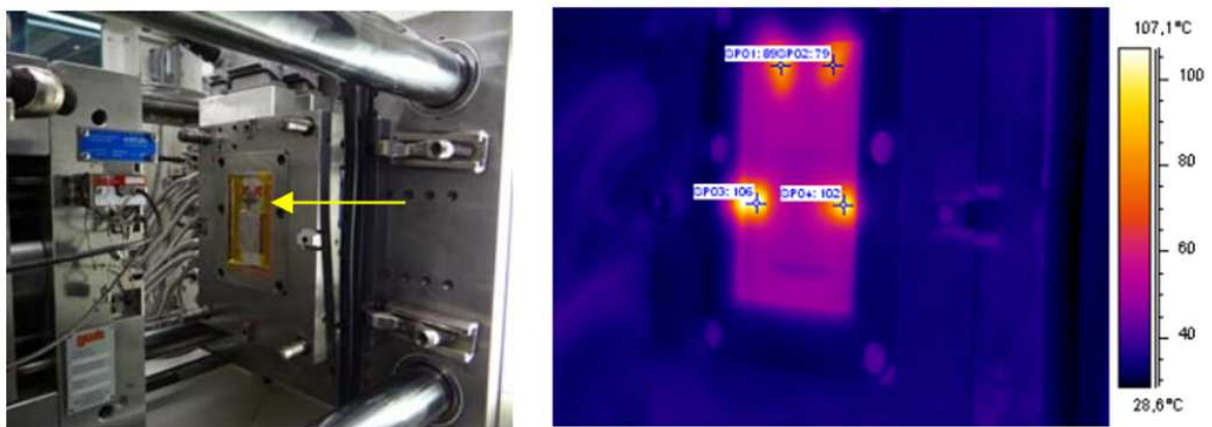


Abbildung 15: Düsenseitige Werkzeughälfte und Thermografieaufnahme mit deutlich sichtbaren Heizkeramiken (nach dem Aufheizen)

Neben der Energieeinsparung durch reduzierte Massen, angepasste und verschiedene Temperaturniveaus innerhalb eines Werkzeugs und die konturnahe Kühlung mit den Folgen einer reduzierten Zykluszeit dienen die lokalen Temperierelemente auch als Stellglieder im Rahmen der komponentenübergreifenden Regelung. Durch den Einsatz der Heizkeramiken können lokale Bereiche sehr schnell aufgeheizt werden, wobei die Zieltemperatur mittels des integrierten Thermoelements genau geregelt werden kann. Die lokale Temperierung ist anhand der Thermografieaufnahme in Abbildung 15 sehr deutlich zu erkennen. Bei Veränderungen der Schmelzeviskosität kann somit sehr schnell reagiert und der Störung durch Anpassung der Oberflächentemperatur entgegengewirkt werden.

Zustandsabhängige Entformung

Um trotz Schwankungen in der Fertigung eine ausreichende Prozesssicherheit erreichen zu können, werden bei heutigen Spritzgießprozessen mehrfach Sicherheiten eingebracht. Diese sind einerseits in den Temperaturreserve bei Werkzeugtemperierung und Schmelzaufbereitung zu finden, als auch in der Kühlzeit. Damit Spritzgießteile formstabil bleiben, können sie erst entformt werden, wenn nach einer entsprechenden Kühlzeit ein bauteilspezifisches Temperaturniveau insgesamt unterschritten ist. Die Kühlzeit wird dabei empirisch so eingestellt, dass auch bei auftretenden Prozessschwankungen, die sich u. a. in der materialchargenbedingten Viskosität, der wirksamen Werkzeugoberflächentemperatur, dem Einspritzverlauf oder der Schmelzetemperatur abbilden können, die Entformungstemperatur unterschritten wird. Nur so kann bei der heutigen Produktion Ausschuss vermieden und eine stabile Produktion erreicht werden. Verbunden ist dies jedoch mit erhöhtem Energieeinsatz in Form höherer Temperaturen und längerer Zykluszeiten.

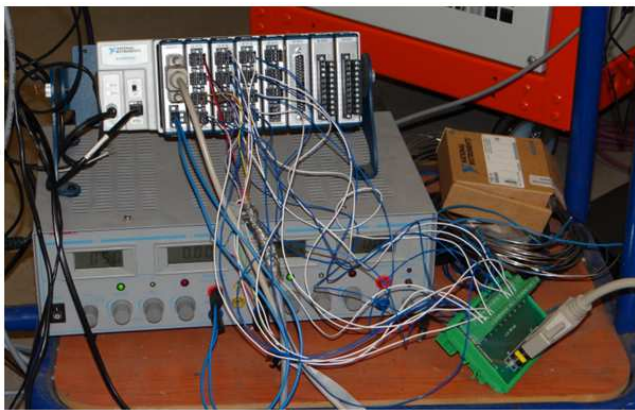


Abbildung 16: Versuchsequipment zur Zustandsabhängigen Entformung: NI-Messsystem sowie Rechner mit DASyLab zur Signalaufzeichnung und -verarbeitung

Grundidee der zustandsabhängigen Entformung innerhalb des Projektes war es, diesen „unnötigen“ Energieeinsatz zu minimieren, indem die auftretenden Prozessschwankungen direkt erfasst werden und daraus der frühestmögliche Entformzeitpunkt abgeleitet wird. Im Wesentlichen sollte also ein Übergang von konstanter Kühl- (und damit Zykluszeit) zu einer bedarfsabhängig variablen Kühlzeit erfolgen und so die Zykluszeit minimiert werden. Da die Bestimmung der Kühlzeit auf den erfassten Prozessschwankungen basiert, können auch die Temperaturreserve in der Plastifizierung und der Werkzeugtemperierung reduziert werden. Der Zusammenhang zwischen erfassten Werkzeugsignalen, Prozessschwankungen und tatsächlichem Werkstückzustand, der die Entformung bestimmt, sollte durch Versuchsreihen erfasst und in ein entsprechendes Modell überführt werden.

Thermodynamisch ist ein System durch das sogenannte pVT-Diagramm komplett beschrieben. Da sich das Volumen der Kavität bei Spritzgießen konstant ist, lässt sich der komplette Werkstückzustand theoretisch über Druck und Temperatur im Werkzeug beschreiben. Auch Änderungen oder Schwankungen im Prozess bilden sich in diesen beiden Werkzeugsignalen ab, weswegen diese beiden Größen für vielfältige Überwachungs- und Regelungsansätze beim Spritzgießen verwendet werden. Wichtig ist jedoch, dass die durch Werkzeugtemperatursensoren erfasste Temperatur nur die Kontakttemperatur der Schmelze darstellt, die deutlich unterhalb der eigentlichen Massetemperatur liegt. Die Kontakttemperatur ist dadurch geringer, dass sich die heiße Schmelze bei Kontakt mit dem deutlich kühleren Werkzeug an der Oberfläche sofort abkühlt und

anschließend komplexe Wärmeleitvorgänge abspielen. Zudem ist noch zu erwähnen, dass alle Messungen – insbesondere gilt dies für Temperaturen – systembedingten Ungenauigkeiten und Unsicherheiten unterliegen, die bei der Auswertung und Ableitung von Aussagen zumindest bedacht werden müssen. Exemplarisch seien Sensordrift, Messgenauigkeit des Sensors, Messrausch, Wandlergenauigkeit, Signal-Rausch-Verhältnis oder über großflächig nicht konstant homogene Werkstoffwerte wie Wärmeleitfähigkeit oder Wärmeeindringkoeffizienten genannt.

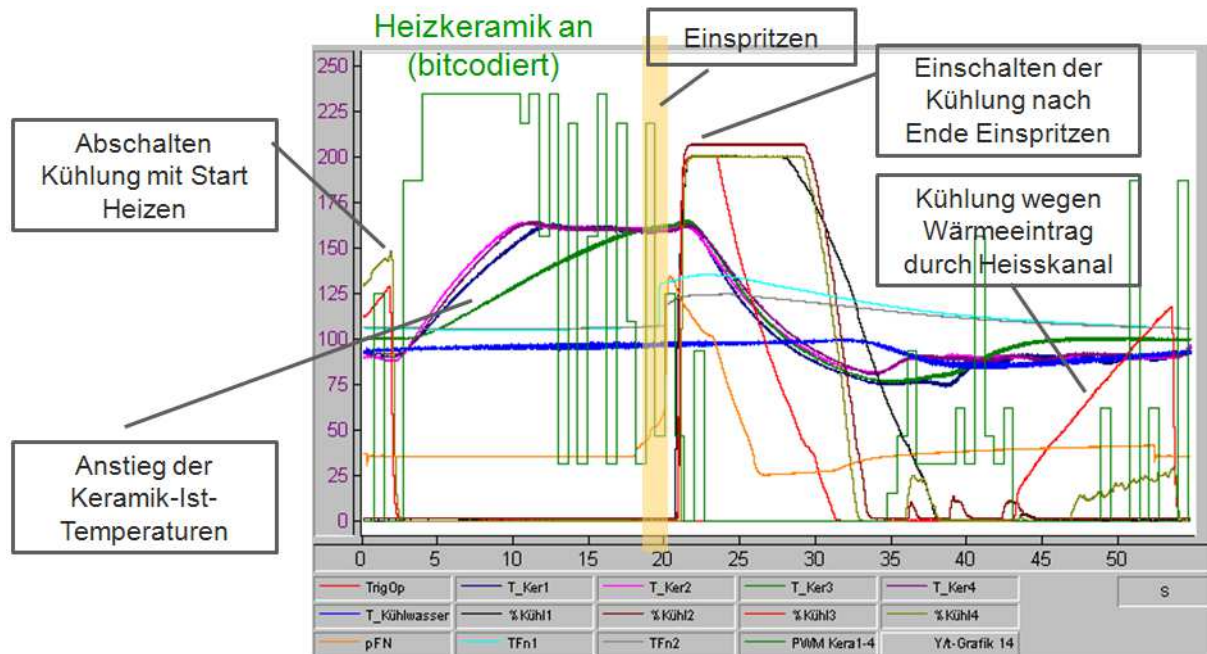


Abbildung 17: Zeitlicher Verlauf der wichtigsten Signale für die Zustandsabhängige Entformung

Neben den durch die Schmelze eingebrachten Viskositäts- und Temperaturschwankungen hat insbesondere die Werkzeugtemperierung einen großen Einfluss auf den Werkstückzustand, der den frühestmöglichen Entformungszeitpunkt definiert. Insbesondere die bei der segmentierten Werkzeugtemperierung eingesetzten Heizkeramiken haben aufgrund ihrer hohen Temperaturen und den schnell möglichen Temperaturänderungen einen großen Einfluss. Die Steuer- und Regelgrößen der lokalen Temperierung haben somit einen entscheidenden Einfluss und müssen sensortechnisch mit erfasst werden, um Änderungen in Druck- und Temperatursignalen aus dem Werkzeug interpretieren zu können. Die Temperier- und Regelgeräte wurden entsprechend aufgerüstet, so dass die gemessenen Temperaturen der Keramik und der Kühlkreismedien sowie die Eingriffsgröße der lokalen Temperierelemente (Heizen und Kühlen) aufgezeichnet werden können. Der zeitliche Verlauf für die erfassten Signale ist exemplarisch in Abbildung 17 dargestellt. Klar zu erkennen ist dabei die starke Ansteuerung der Heizkeramiken vor dem Einspritzen, verbunden mit einem Anstieg der gemessenen Ist-Temperaturen der Heizkeramik. Nach dem Einspritzen setzt die Kühlung ein und die Temperaturen sinken wieder. Auch sind Wechselwirkungen mit anderen Temperierkreisen – hier einem Heißkanal – daran zu erkennen, dass im späteren Verlauf die Kühlung wieder aktiviert wird.

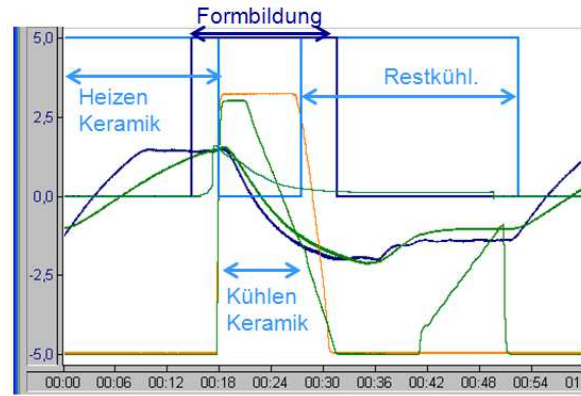
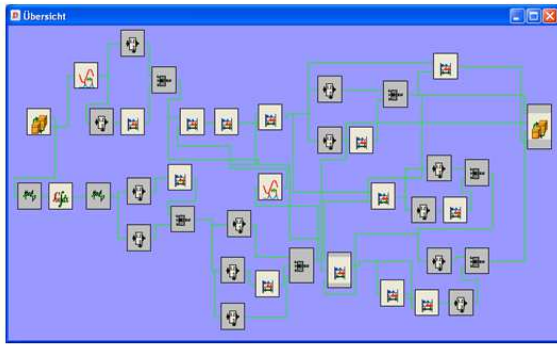


Abbildung 18: Schaltbild und damit abgeleitete Prozessphasen für die Charakterisierung der lokalen Temperierung

Für die Analysen wurden aus den Signalen relevante Kenngrößen extrahiert, die in einem nächsten Schritt die Eingangsdaten für die Modellierung bilden. Der Spritzgießprozess ist in verschiedene Phasen unterteilt (Einspritzen, Plastifizieren, Kühlen ...), in denen die einzelnen Signale unterschiedliche Informationen beinhalten können. Um hohe Modellgüten erzielen zu können, müssen bei der Bildung der Kenngrößen die verschiedenen Prozessphasen berücksichtigt werden. Anhand der Signale wurde deshalb über eine komplexe Signalverarbeitung der kontinuierliche Datenstrom in einzelne Zyklen zerlegt und die verschiedenen Prozessphasen anhand des Verhaltens und Wechselspiels verschiedener Signale online ermittelt. Das entsprechende Schaltbild sowie die Darstellung eines so unterteilten Fertigungszyklus sind in Abbildung 18 dargestellt.

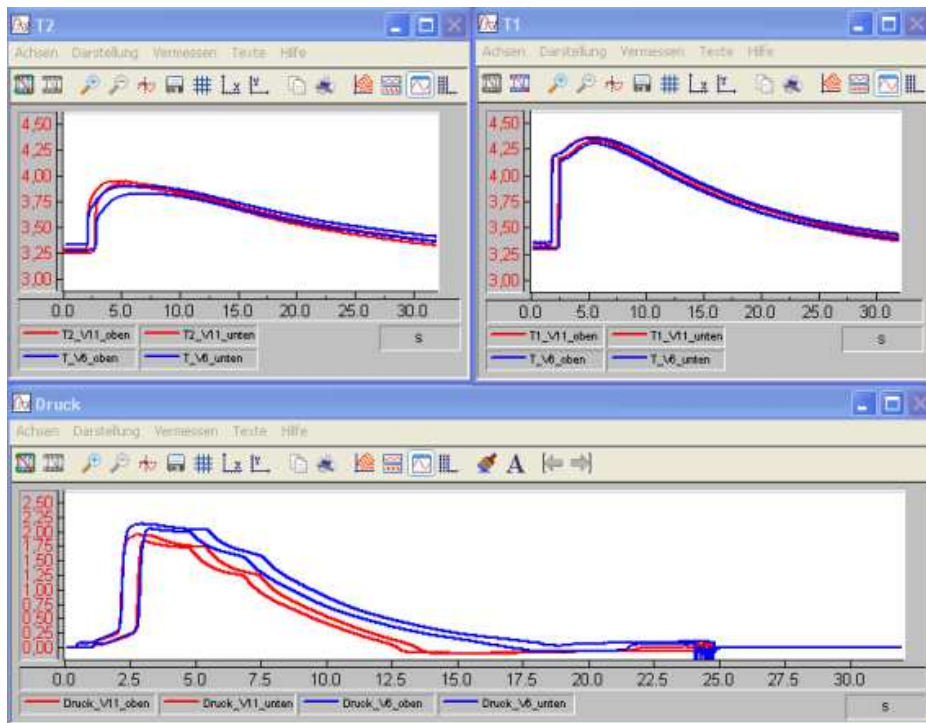


Abbildung 19: Streubreite der Druck- und Temperatursignale aus dem Werkzeug für zwei Versuchseinstellungen

Um die Schwankungen der Druck- und Temperatursignale im Werkzeug in Zusammenhang mit Viskositätsschwankungen und Prozessvariationen bringen zu können, mussten Versuchsreihen mit gezielt variierten Parametern durchgeführt werden. In Abbildung 19 ist exemplarisch der Verlauf und die Streubreite der Druck- und Temperatursignale aus dem Werkzeug für zwei verschiedene Einstellungen (Reduktion Massetemperatur und Reduktion Nachdruck) zu sehen. Deutlich zu erkennen sind die Variationsbereiche der Signalamplituden ebenso wie die zeitlichen Schwankungen. Letztere hatten in der Ursache darin, dass der Einspritzvorgang erst nach einem Freigabesignal der Temperiersteuerung erfolgt, wenn sich die Ist-Temperatur innerhalb eines vorgegebenen Fensters bewegt. Da die verschiedenen Temperiergeräte autark vom Spritzgießzyklus der Maschine sind, ist auch deren Regelverhalten nicht direkt an den Maschinenzyklus gekoppelt und kann so zu zeitlichen Variationen führen.

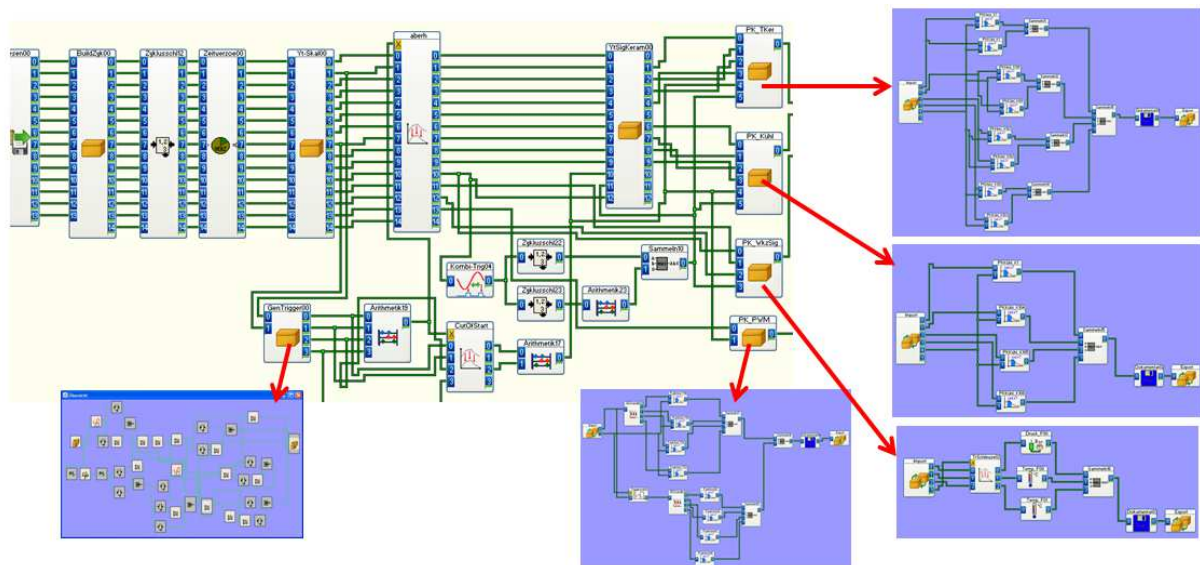


Abbildung 20: DASYLab-Schaltbild zur Berechnung des Zustandsvektors für die Versuchsauswertung

Für die Auswertung und Bewertung der Versuchszyklen und den Aufbau eines Modells, ist eine Beschreibung der Signalinformation durch Kenngrößen notwendig, die insgesamt einen sogenannten Zustandsvektor bilden. Ein solcher Zustandsvektor kann als Fingerabdruck eines Zyklus interpretiert werden. Das für diese Berechnung erarbeitete Schaltbild ist in Abbildung 20 dargestellt. Das Schaltbild besteht aus unabhängigen Modulen, die zur Erreichung der gewünschten Gesamtfunktionalität entsprechend verknüpft werden müssen. Das Schaltbild ist so aufgebaut, dass als Eingangsdaten entweder aufgezeichnete Versuchsdaten von einem Datenträger oder aber Online-Daten von der Messkarte verwendet werden können. Letzteres war für die Zielsetzung dieses Arbeitspunktes zwingend notwendig, um online während des Fertigungszyklus das Schaltsignal für die Entformung des Werkstücks an die Maschine geben zu können.

Als Modellierungsansatz für die zustandsabhängige Entformung wurden Neuronale Netze gewählt, da erste Auswertungen die vielfältigen Wechselwirkungen und nichtlinearen Zusammenhänge aufgezeigt haben. Neuronale Netze haben für solche Verhältnisse schon vielfach ihre Eignung erwiesen. Zudem existierten am IPA jahrelange Erfahrung und entsprechende Werkzeuge für die Modellierung und Anwendung dieser Modellstrukturen.

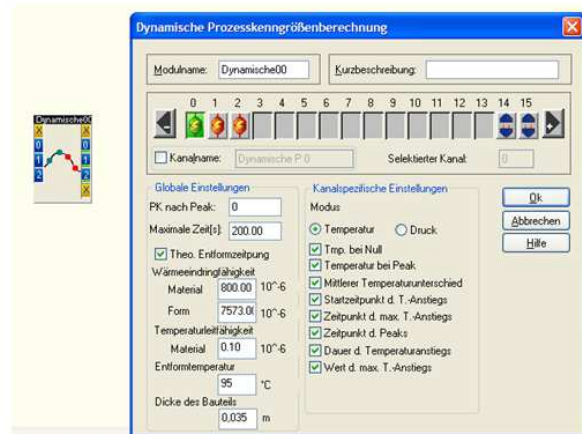
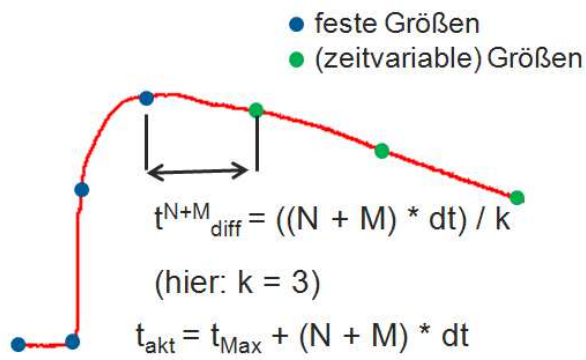


Abbildung 21: verfolgter Ansatz zur dynamischen Ableitung von Zustandskenngrößen als Modelleingang

Neuronale Netze benötigen in der Regel Eingangsvektor mit fester Dimension. D. h. für die Auswertung mittels der Modelle mussten aus den Signalen immer eine feste Anzahl von Kenngrößen generiert werden, die den Zyklusverlauf und damit das Erreichen des Entformzeitpunktes mit zunehmender Kühlzeit abbilden können. Der hierfür verfolgte Ansatz sowie das in DASyLab umgesetzte Modul sind in Abbildung 21 zu sehen. Druck- und Temperatursignale aus dem Werkzeug werden dabei unterschiedlich behandelt, da sie jeweils andere charakteristische Verläufe mit entsprechenden wichtigen Kenngrößen aufweisen. Dabei enthält die Gesamtheit der Druck- und Temperaturverläufe von Zyklusstart bis zum Maximum die wesentlichen Informationen über die Schmelze und damit den Wärmeeintrag ins Werkzeug. Aus diesem Abschnitt wird eine festgelegte Anzahl an Kenngrößen gewählt, die sich im weiteren Laufe des Zyklus nicht ändern. Der zweite Teil der Signale charakterisiert das Abkühlverhalten. Auch für diesen Abschnitt wird eine feste Anzahl an Zeitpunkten verwendet, um Kenngrößen abzuleiten. Jedoch sind diese Zeitpunkte variabel und richten sich nach der abgelaufenen Zeit zwischen Maximum und aktuellem Zyklusfortschritt. Die so zusammengesetzten Zustandsvektoren mit fester Länge werden in festen Zeitrastern (z. B. alle 200 ms) aus dem bisherigen Zyklusverlauf neu ermittelt und dem trainierten Modell als Eingangsdaten zur Verfügung gestellt. Dieses leitet daraus dann die Aussage ab, ob das Teil schon entformt werden kann oder nicht.

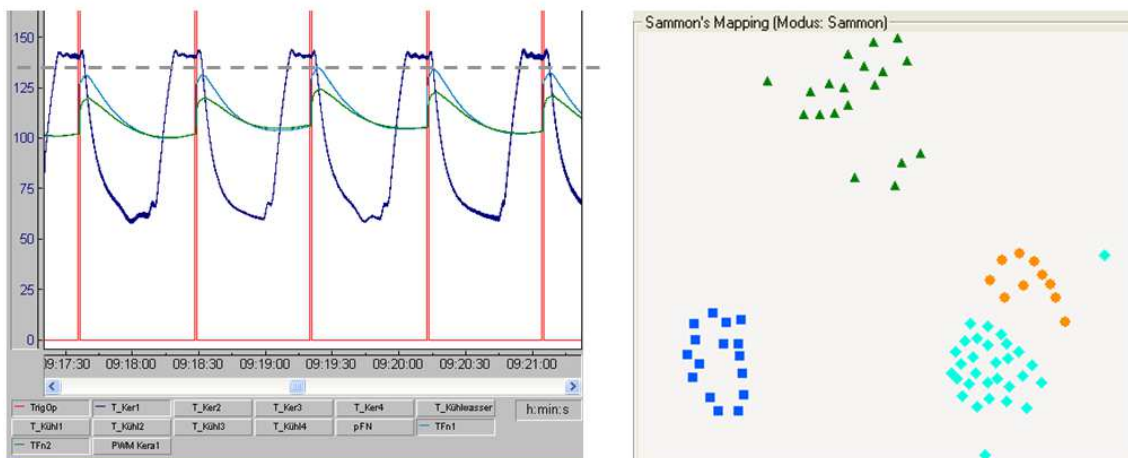


Abbildung 22: Schwankende Temperaturamplituden bei gleicher Einstellung sowie Projektion der Zustandsvektoren mehrerer Versuchseinstellungen

In Abbildung 22 (links) sind der Zeitverlauf der erfassten kavitätsbündigen Werkzeugwandtemperatur sowie die Temperatur einer Heizkeramik inklusive Einspritztrigger über mehrere Zyklen mit konstanter Einstellung visualisiert. Klar zu erkennen sind die schwankenden Maximalwerte. Die Schwankungen aufeinanderfolgender Zyklen innerhalb einer Einstellung sind auch in der Sammonsprojektion der zugeordneten Zustandsvektoren anhand der Streubreite der einzelnen Cluster klar zu erkennen (Abbildung 22, rechts). Dies wiederum bedeutet, dass aufeinanderfolgende Zyklen nicht hinreichend gleiche Prozesszustände aufweisen. Dies wäre ab notwendig, um die Kühlzeit sukzessive zu reduzieren und so den optimalen Entformzeitpunkt bestimmen zu können. Die Gewinnung dieser Daten war aber zwingende Voraussetzung für ein Modelltraining, da hierfür die Zielgröße (in diesem Fall „optimaler Entformzeitpunkt erreicht“) bekannt sein muss.

Als wesentliche Ursache hierfür wurden die bereits oben erwähnten zeitlichen Schwankungen identifiziert, die durch die Freigabegrenzen der Heizkeramiken herrühren. Diese Schwankungen führen zu unterschiedlichen Wärmeverlusten bei geöffnetem Werkzeug und erreicht der Prozess kein stabiles thermisches Gleichgewicht, was auch direkte Auswirkungen auf die Teilequalität haben kann. Die Erfahrung, dass schwankende Zykluszeiten (Schwankungen von unter einer Sekunde) sich auf das thermische Gleichgewicht und damit auf die Teilequalität auswirken können, wurden am IPA im Laufe des letzten Jahres auch in anderen Projekten bei der Fertigung von Präzisionsteilen gemacht. Die ursprüngliche Zielsetzung der zustandsabhängigen Entformung würde noch in viel stärkerem Maße schwankende Zykluszeiten (und damit oft unbekannte Auswirkungen auf die Teilequalität) nach sich ziehen. Die durch leicht kürzere Zykluszeiten erzielbaren Energieeinsparungen dürften die Energie- und Ressourcenbilanz des dadurch steigenden Ausschusses für die allermeisten Fälle nicht aufwiegen. Als Fazit bleibt steht somit, dass die zustandsabhängige Entformung im Hinblick auf eine stabile Produktion und insgesamt aufgestellte Ressourcenbilanz negativ ausfällt und somit in Zukunft nicht weiter verfolgt und verwertet werden wird.

Des Weiteren wurden durch die Auswertung der Versuche zur Zustandsabhängigen Entformung auch Erkenntnisse über den Einfluss der lokalen Temperierelemente auf die Viskosität gewonnen. Dadurch wurden Aussagen über die Beeinflussbarkeit und Steuerbarkeit der Viskosität durch die Heizkeramik möglich, was einen wesentlichen Faktor für die Entwicklung möglicher Regelstrategien bei der komponentenübergreifenden Regelung darstellt.

Schmelzezustandsüberwachung

Einen sehr wichtigen Einfluss auf Prozessstabilität, Werkstückqualität und auch den Energieverbrauch hat die Plastifizierung, d. h. das Aufschmelzen des Materials, um es ins Werkzeug einspritzen zu können. Der für das Aufschmelzen notwendige Energieeintrag erfolgt sowohl über die Drehbewegung des Dosiermotors, die durch Friktion (Reibung) in Wärme umgewandelt wird, als auch über externe Heizbänder. Die Temperatur der Heizbänder kann in der Steuerung eingestellt werden, so dass Temperaturprofile entlang des Plastifizieraggregats möglich sind. Wesentliches „Qualitätsmerkmal“ der Schmelze ist die erreichte Viskosität. Diese bestimmt maßgeblich die Reaktion des Systems beim Einspritzen (notwendige Kraft, Spitzendruck, Fließgeschwindigkeit...) und hat beispielweise wesentlichen Einfluss darauf, ob ein Werkstück – insbesondere bei kritischem Fließweg-Wandstärken-Verhältnis – überhaupt komplett gefüllt werden kann. Die Viskosität ist stark

temperaturabhängig – je höher die Temperatur, desto geringer ist die Viskosität. Idealerweise sollte die Schmelze beim Einspritzen immer dieselbe Viskosität aufweisen, was aufgrund vielfältiger Einfluss- und Störgrößen nicht der Fall ist. Einerseits haben schwankende Materialeigenschaften wie Schmelz-Volumenfließrate (MFI), Feuchte oder Korngröße Auswirkungen auf die Viskosität, insbesondere zwischen verschiedenen Materialchargen können deutliche Unterschiede insbesondere im MFI auftreten. Andererseits wird die Viskosität von eingestellten Prozessgrößen wie Temperatur(profil) der Heizbänder, Staudruck, Dosierdrehzahl und –zeit oder der Verweildauer des Materials im Zylinder – und damit auch durch Störzeiten – beeinflusst. Auch die Tatsache, dass die Regelkreise der Heizbänder autark und nicht zyklussynchron arbeiten, kann Schwankungen der Viskosität zur Folge haben.

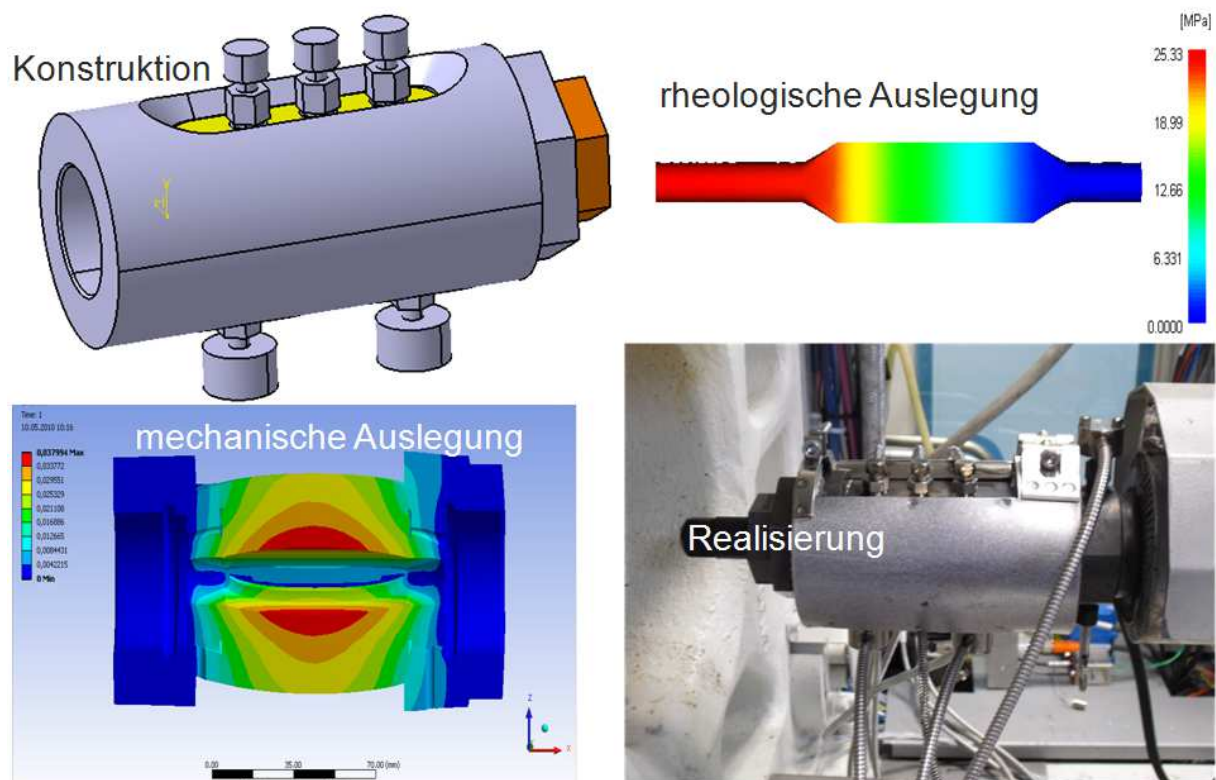


Abbildung 23: Rheologiedüse zur Schmelzecharakterisierung

Auch wenn die Viskosität eine sehr wichtige Größe ist, kann sie in einer Spritzgießmaschine nicht direkt erfasst oder gemessen werden. Messbar sind in erster Linie immer nur die Auswirkungen von Viskositätsschwankungen, die sich beispielsweise in unterschiedlichen Einspritzdrücken auswirken. Dann jedoch ist das Teil schon eingespritzt, so dass bei Schwankungen nicht mehr gegengesteuert werden kann. Ziel der Schmelzestandsüberwachung war es, aus erfassten Sensorsignalen der Maschine über entsprechende Modelle Aussagen über den aktuellen Schmelzestand ableiten zu können. Als Sensordaten dienen dabei insbesondere solche Größen, die Rückschluss auf die ins System eingebrachte Energie haben. Dies sind beispielsweise die Temperaturen der Heizbänder, deren Einschaltdauer inklusive Anschlussleistungen, die aufgenommene Leistung des Dosiermotors und erfasste Drehmomente beim Dosieren – über DMS am Schneckenchaft sowie aus Daten des Frequenzumrichters. In systematischen Versuchen wurden gezielt verschiedene Einflussfaktoren wie Materialkornung, MFI, Aggregattemperatur, Drehzahl, Staudruck u. a. variiert und auch Stillstandszeiten als Störgrößen untersucht.

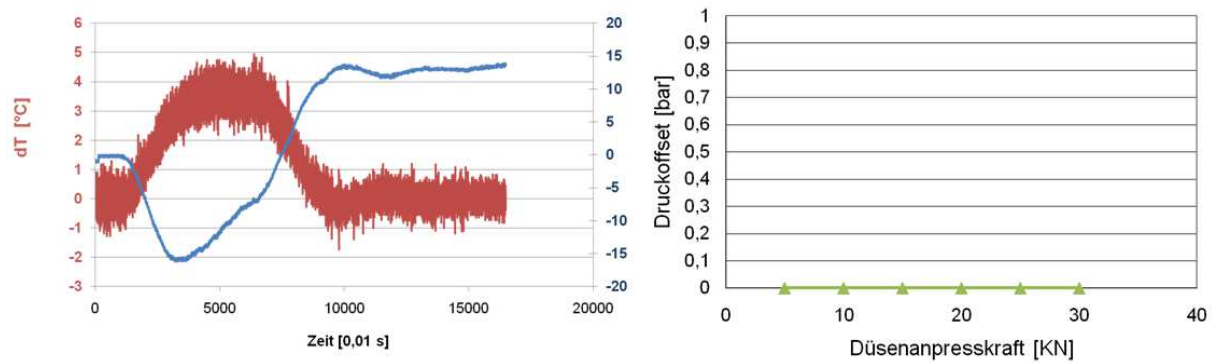


Abbildung 24: Untersuchungen der Reproduzierbarkeit und Stabilität der Düsensensorik

Für die Ermittlung der Viskosität als wesentliches Qualitätsmerkmal der Schmelze wurde eine Rheologiedüse eingesetzt. Diese wurde insbesondere durch Krauss Maffei und die Hochschule Rosenheim konstruiert und bezüglich der Anforderungen ausgelegt (siehe Abbildung 23). Die Rheologiedüse ist im Wesentlichen ein vor der Maschinendüse eingesetzter Strömungskanal mit definierter Geometrie und Sensoren für Druck- und Temperatur. Über den Druckabbau im Fließkanal können mittels der Einspritzgeschwindigkeit Scherpannung und (scheinbare) Viskosität ermittelt werden. Die Rheologiedüse sowie die enthaltenen Sensoren sind hohen thermischen und mechanischen Belastungen ausgesetzt. Es wurden deshalb speziell ausgelegte Sensoren der Firma Kistler eingesetzt, um möglichst viele der sich daraus ergebenden Störeinflüsse kompensieren zu können. Auch wurden umfangreiche Vorversuche zur Stabilität und Reproduzierbarkeit der Messung mit der Rheologiedüse inklusive mehrfacher Optimierungsschleifen durchgeführt (siehe Abbildung 24).

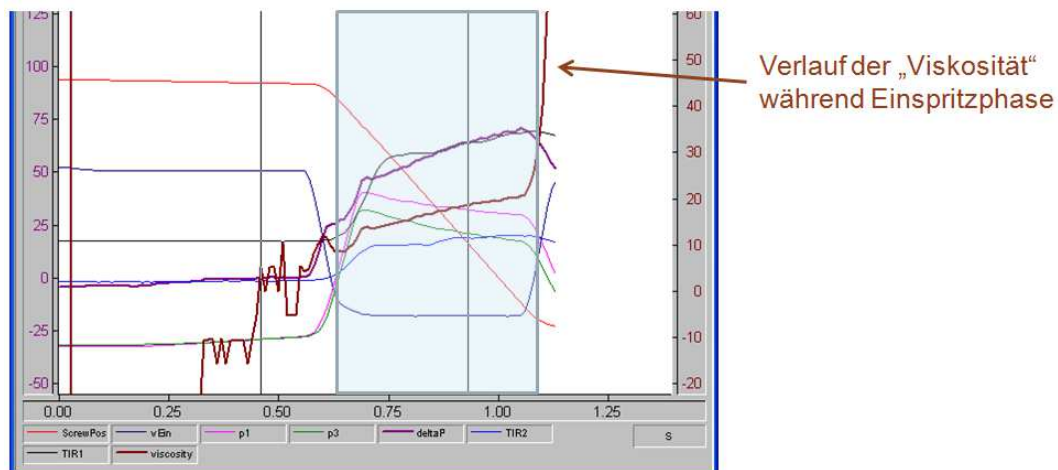


Abbildung 25: erfasste Maschinen- und Düsensignale sowie abgeleiteter Viskositätsverlauf

Um für die Versuche den Fließwiderstand eines Werkzeugs abzubilden aber gleichzeitig die Störeinflüsse einer schwankenden Werkzeugtemperatur zu eliminieren, wurde durch ein spezielles Druckstück ins Freie statt in ein Werkzeug gespritzt. Der Verlauf der verschiedenen Sensordaten sowie der Verlauf des daraus online berechneten Viskositätsverlaufs ist in Abbildung 25 zu sehen. Es ist klar zu erkennen, dass die Viskosität nicht konstant ist sondern sich während des

Einspritzens ändert. Als charakteristische Größe und damit Zielmerkmal für die Modellierung wurde der Mittelwert verwendet. Auch Druck- und Temperatursignale in der Düse sinken bzw. steigen während dem Einspritzen. Dies hängt u. a. mit Änderungen des Temperaturprofils über den Dosierhub, aber auch einer lokalen Temperaturerhöhung durch Reibungs- und Schererwärmung während des Einspritzens ab. Das Temperaturprofil und die tatsächlich erreichte Temperatur hängt vorwiegend von Prozesseinstellungen wie Zykluszeit und Dosierhub ab (siehe Abbildung 26).

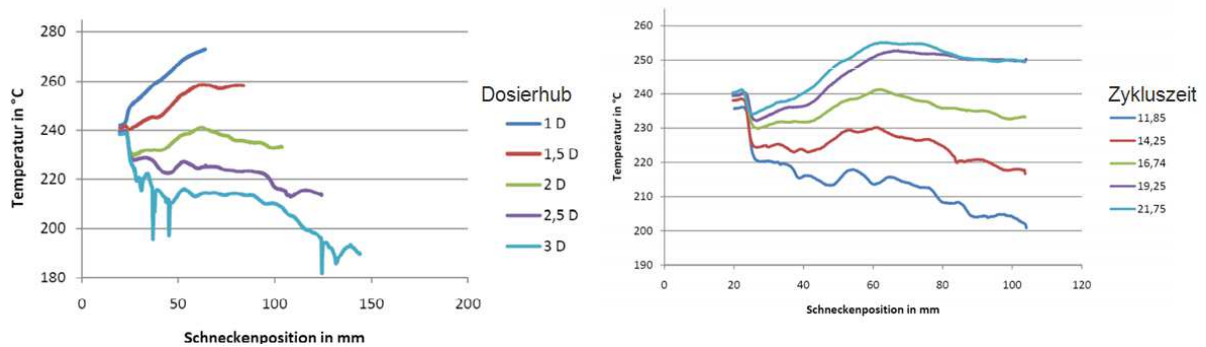


Abbildung 26: Einfluss von Dosierhub und Zykluszeit auf die Schmelzetemperatur (am Beispiel von PP)

Um eine Überwachung des Schmelzestands aufbauen zu können, waren die Existenz und Analyse der Zusammenhänge zwischen Einfluss- und Zielgrößen notwendig. In Abbildung 27 exemplarisch die Veränderung des erforderlichen Drehmoments sowie der durch die Rheologiedüse erfassten Größen Schmelzetemperatur und Viskosität bei Variation von Staudruck und Drehzahl bei Dosieren dargestellt. Es sind eindeutig die Einflüsse und teils auch nichtlinearen Zusammenhänge zu erkennen. Die Kenntnisse dieser Zusammenhänge ist auch wichtig, wenn ausgehend von einer Prognose des Schmelzestands ein Regeleingriff abgeleitet werden soll, um beispielsweise die Viskosität gezielt beeinflussen zu können.

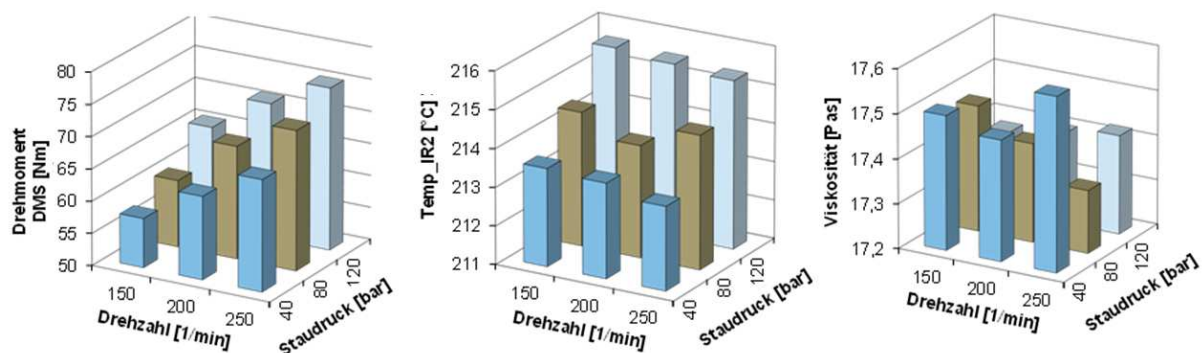


Abbildung 27: Veränderung verschiedener Prozessgrößen bei Variation von Staudruck und Drehzahl

Ein Spritzgießzyklus startet in der Regel mit dem Schließen des Werkzeugs, gefolgt von Einspritzen, Nachdruck, Dosieren, Restkühlzeit und Entformen. Die Viskositätsmessung kann nur während dem Einspritzen erfolgen, da nur hier die Schergeschwindigkeit und der Druckverlust über die Düse gemessen werden können. Das eingespritzte Material wurde aber bereits während des vorigen Zyklus aufdosiert, so dass Ursachen für Schwankungen der Viskosität eigentlich im vorigen Zyklus zu suchen sind. Für die Untersuchung von Wirkzusammenhängen ist es hilfreich, die Ursachen und resultierende Größen in einem „Block“ zusammenzufassen. Für die Auswertungen der

umfangreichen Versuchsreihen wurde ein neuer Block mit dem Umschalten auf Nachdruck begonnen. Die sich ergebenden Blöcke (oder Zyklen) sind anhand Triggersignalen und Schneckenposition in Abbildung 28 abgebildet. Diese Betrachtungsweise hat den Vorteil, dass beispielsweise auch Stör- oder Stillstandszeiten vor dem Einspritzen (Zyklus 2 in Abbildung 28), die sich durch die Wärmeeintrag der Heizbänder und Wärmeausgleichsvorgänge innerhalb des Aggregats auf die Viskosität auswirken, im selben Block wie die während dem Einspritzen ermittelte Viskosität ist.

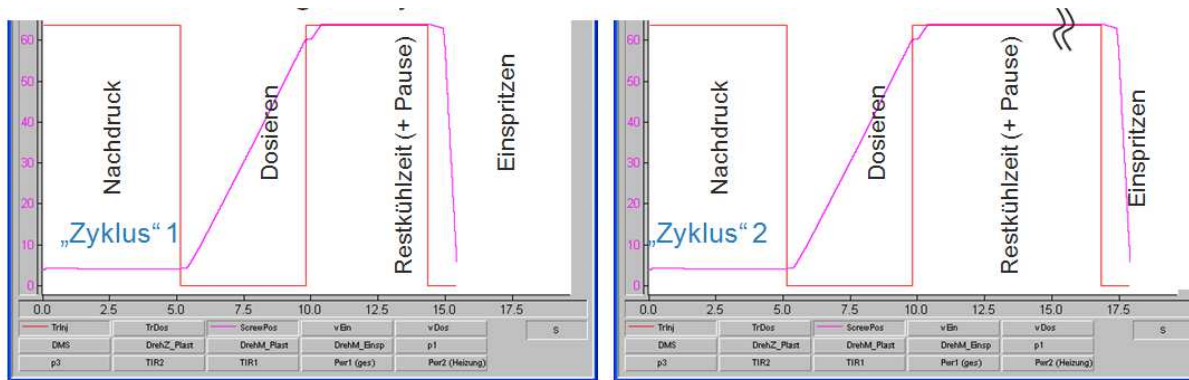


Abbildung 28: "verschobener" Zyklus für die Untersuchung der Schmelzeviskosität

Die in Abbildung 28 dargestellte Blockbetrachtung erfolgte für alle über die Messleiste erfassten Signale. Aus den verschiedenen Signalen wurden für die einzelnen Prozessphasen eine Vielzahl von Kenngrößen abgeleitet, die Aussagen über eingebrachte Energie oder auftretende Kräfte erlauben. So wurden neben Schneckenweg auch die Temperaturen und Einschalt Dauern der einzelnen Heizzonen, Leistungs- und Momentinformationen aus den Frequenzumrichtern oder Geschwindigkeiten und Positionen aus der Schnecke erfasst. Da im Plastifizieraggregat – abhängig auch vom Dosierhub – meist Kunststoffgranulat bzw. –schmelze für 3 – 8 Zyklen vorhanden ist, sind in dem so gebildeten Zustandsvektor die Energiemengen, die über die Heizbänder und Dosiermotor eingebracht wurden, neben dem aktuellen auch für die letzten vier Zyklen davor enthalten. Insgesamt wurde so pro Fertigungszyklus über 150 Kenngrößen gebildet, die zusammen die Vorgeschichte, die zum aktuellen Schmelzezustand geführt hat, beschreiben. Dieser Zustandsvektor wurde für alle Versuchszyklen gebildet und durch Projektionsmethoden und Clusterbildung, die schon bei der zustandsabhängigen Entformung eingesetzt wurden, analysiert.

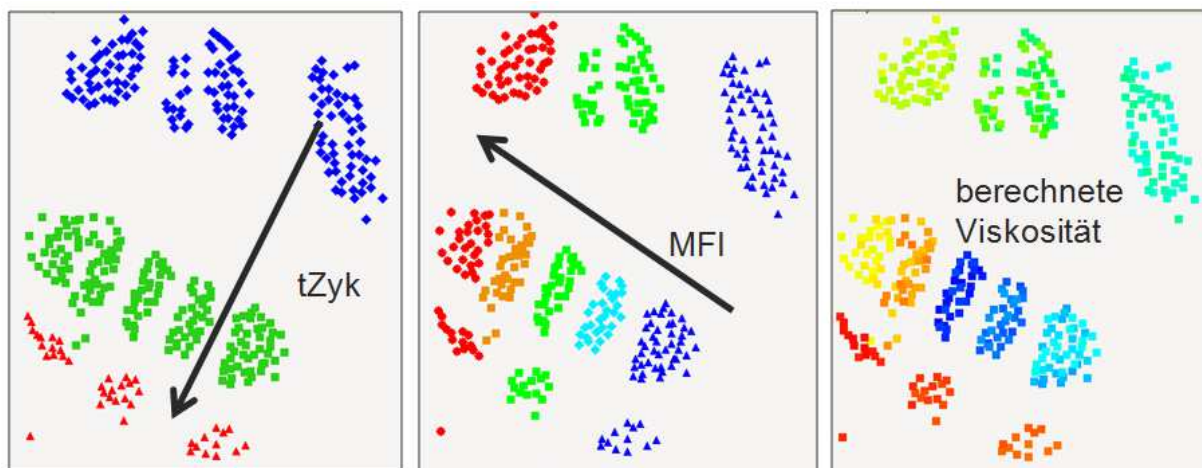


Abbildung 29: Auswirkung von MFI- und Zykluszeit-Variation auf Viskosität und Clusterbildung

Für die Untersuchung des Einflusses von verschiedenen MFI-Werten auf die Viskosität sowie deren Modellierbarkeit wurde gezielt ein Grundmaterial mit verschiedenen MFI-Werten verwendet. Für jede Einstellung wurden dann verschiedene Zykluszeiten gefahren, um insbesondere auch die Auswirkung der Heizbänder auf die Viskosität zu untersuchen. Die Projektion der Zustandsvektoren aller dieser Zyklen ist in Abbildung 29 zu sehen. Die verschiedenen Größen – MFI des eingesetzten Materials, Zykluszeit und berechnete Viskosität pro Zyklus – sind farbcodiert dargestellt. Aus den Diagrammen lassen sich verschiedene Ergebnisse ableiten:

- da sich die Zustandsvektoren nicht ändern, sondern nur die farbcodierte Zielgröße ändert, ist die Verteilung der Punkte immer identisch.
- eine Variation der Zykluszeit führt zu verschiedenen Clustern – ist also als Information in den Zustandsvektoren hinreichend enthalten
- verschiedene MFI-Werte bilden sich in verschiedenen Clustern ab, d. h. sie sind separierbar. Folglich enthalten die Zustandsvektoren implizit die Information über den MFI
- An der Farbe ist erkennbar, dass sich die Variation von Zykluszeit und/oder MFI deutlich auf die Viskosität auswirkt. Die einzelnen Cluster, wobei jeder die im Wesentlichen aus den Zyklen einer spezifischen Kombination von Zykluszeit und MFI gebildet wird, weisen jedoch sehr homogene Viskositäten auf und die Schwankungen sind deutlich kleiner als bei einer Parameteränderung.

Alle diese Punkte wirken sich auf die Modellierbarkeit aus und ein Modell für die Prognose der Viskosität einzig anhand der aus den erfassten Signalen gebildeten Zustandsvektoren ist mit hoher Güte möglich. Werden aus den Zustandsvektoren die Kenngrößen aus Signalen der Rheologiedüse oder dem DMS entfernt, zeigt sich ein entsprechendes Verhalten.

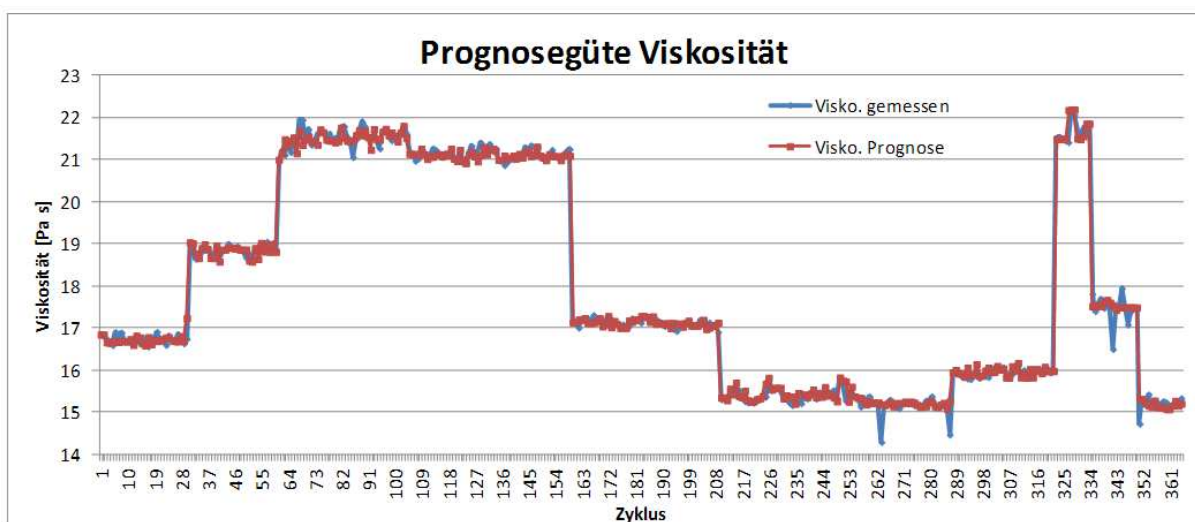


Abbildung 30: Messwerte und Prognose der Viskosität durch erstelltes Neuro-Fuzzy-Modell

In Abbildung 30 ist exemplarisch das Prognoseergebnis eines erstellten Neuro-Fuzzy-Modells zur Überwachung der Viskosität zu sehen. Für die bereits in Abbildung 29 dargestellte Versuchsreihe wurden der MFI des Ausgangsmaterials sowie die Zykluszeit in verschiedenen Kombinationen

variiert. Von diesen Versuchen wurde jeder dritte Zyklus für das Training des Neuro-Fuzzy-Modells verwendet. Anschließend wurde durch das Modell für alle Zyklen – d. h. zwei Drittel waren dem Modell völlig unbekannt – eine Prognose für die Viskosität berechnet und mit dem bei den Versuchen ermittelten realen Werten verglichen. Der Verlauf von gemessener und prognostizierter Viskosität ist in Abbildung 30 dargestellt. Insgesamt ergibt sich ein Korrelationskoeffizient von über 0,99 und damit eine sehr gute Prognosegüte.

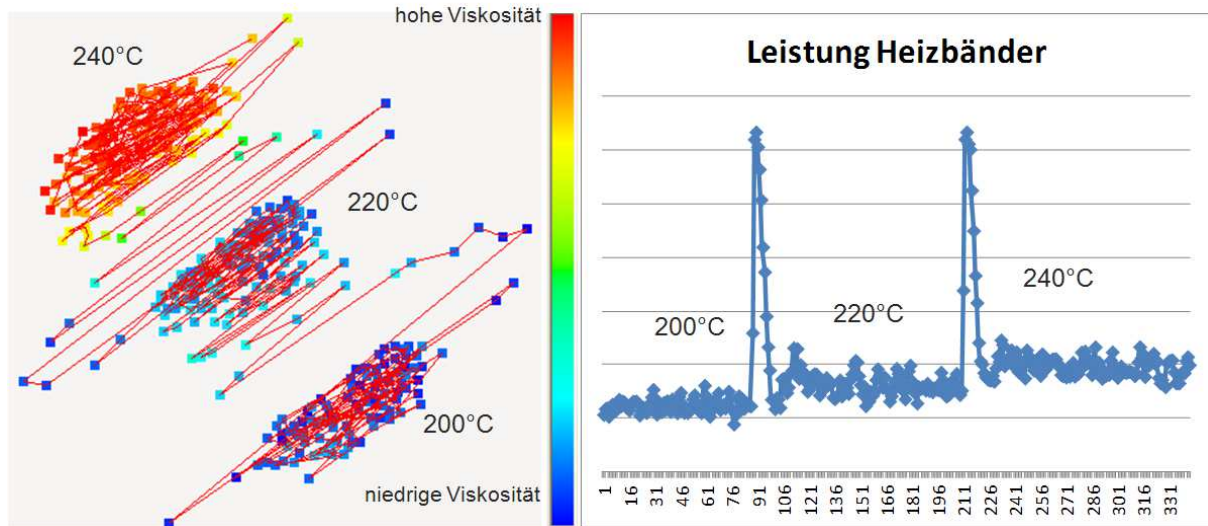


Abbildung 31: Veränderung des Zustandsvektors bei schrittweiser Erhöhung der Zylindertemperatur mit farblicher Viskositätskenngröße sowie Leistungsaufnahme der Heizbänder

In einer anderen Versuchsreihe wurde ausgehend von einer Grundeinstellung von 200°C die Temperatur der Heizbänder in zwei Schritten von je 20°C erhöht. In Abbildung 31 ist die damit verbundene Veränderung des Zustandsvektors dargestellt. Es sind ganz klar die drei Häufungspunkte, in denen der Prozess auf die eingestellte Temperatur eingeschwungen war, zu erkennen. Innerhalb dieser stationären Zustände ist die normale Prozessstreuung zu erkennen. Auch die Übergänge von einem Zustand zum nächsten sind anhand der Trajektorien mit eindeutiger Richtung und Drift klar zu erkennen. Anhand der Farbcodierung ist auch die Korrelation und relative Homogenität der Viskosität mit der Aggregattemperatur zu erkennen. Eine Modellbildung ist somit mit hoher Güte möglich. In Abbildung 31 rechts ist die aufgenommene Summenleistung der Heizbänder pro Zyklus aufgezeichnet. Es ist klar zu erkennen, dass höhere Schmelzetemperaturen mehr Energie benötigen und dass die Heizbänder im Übergang von einer Temperatur zu einer höheren stark aufheizen müssen.

Die durch die Vielzahl an Versuchen und Auswertungen gewonnenen Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen Schmelzequalität (insbesondere Viskosität) und verschiedenen Einflussparametern können für eine weitere Verbesserung und Regelung der Plastifizierung als auch für die Regelstrategie für die komponentenübergreifende Regelung verwendet werden.

Komponentenübergreifende Regelung

Die Versuche und Erkenntnisse aus der zustandsabhängigen Entformung und der Schmelzestandsüberwachung bilden die Grundlage für die Entwicklung einer Regelstrategie im Rahmen der komponentenübergreifenden Regelung. Dabei ermöglicht die segmentierte Werkzeugtemperierung die Stelleingriffe, um anhand des prognostizierten Schmelzestands eventuelle Störungen oder Schwankungen der Viskosität auszugleichen.

Beispielsweise kann sich durch eine geänderte Materialcharge die Viskosität der Schmelze ändern. Eventuell können diese Änderungen durch maschineninterne Regelkreise kompensiert werden, jedoch dauert dies aufgrund der großen Trägheiten und Totzeit relativ lange. Die entwickelte Schmelzestandsüberwachung ermöglicht es, diese Änderungen zu erkennen und für jeden Fertigungszyklus eine Aussage über die Viskosität des aufdosierten Materials ableiten zu können. Ist beispielsweise die Viskosität zu hoch, kann dies durch eine Erhöhung der Temperatur der lokalen Tempierelemente kompensiert werden und es werden trotzdem komplett gefüllte Teile erreicht.

Für die komponentenübergreifende Regelung ist es notwendig, dass alle Maschinenkomponenten und entwickelten Modelle Daten in Echtzeit austauschen können. Aufgrund der Vielzahl von Komponenten und Systemen sind verschiedene Datenschnittstellen und Bussysteme notwendig. Deren Kopplung und Austausch der Signale wurde schon im Abschnitt „Signalatenerfassung und –verarbeitung“ erläutert, eine Übersicht der Datenkopplung ist in Abbildung 10 dargestellt.

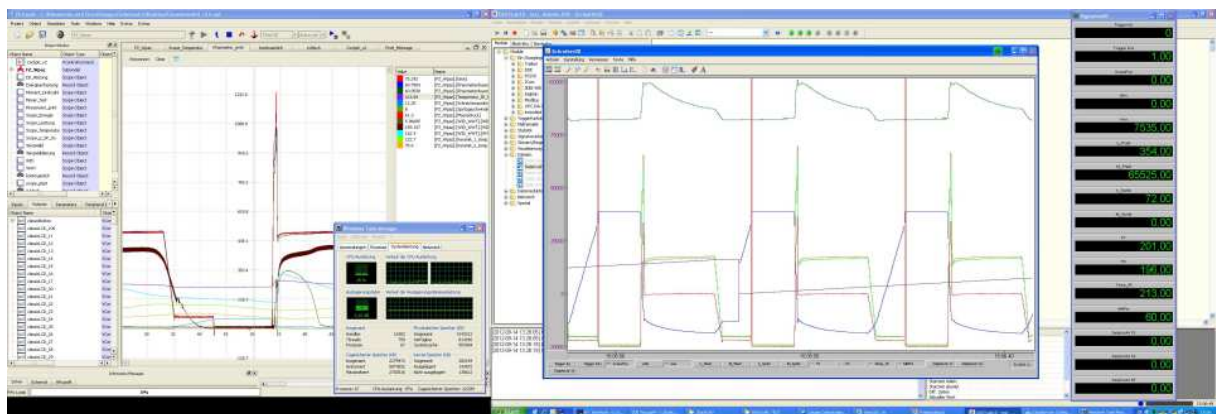


Abbildung 32: simultane Online-Visualisierung der Maschinensignale in Virtuos (links) und DASyLab (rechts)

Die Komponenten des Virtuos-Systems haben Zugriff auf alle Maschinensignale und Stellgrößen. Der Zugriff kann lesend als teils auch schreibend erfolgen (bei Schaltsignalen oder Einstellparametern). Über Virtuos werden die benötigten Maschinendaten ausgelesen und über die Delphin-Profisignal-Komponenten DASyLab als Eingangssignal in Echtzeit zur Verfügung gestellt. Bei Bedarf können die Signale zuvor vorverarbeitet, erweitert oder verknüpft werden. In DASyLab werden die Daten übernommen und können entsprechend der Anforderungen weiterverarbeitet werden. Daraus ist dann beispielsweise die Generierung von Schaltsignalen oder Ableitung von Prozesszuständen (Aggregat oder Werkzeug) möglich. Die simultane Erfassung und Verarbeitung der Daten in Virtuos und DASyLab ist in Abbildung 32 zu sehen, wobei aus Darstellungsgründen jeweils nur ein Ausschnitt der verfügbaren Maschinensignale als Zeitschrieb visualisiert wird.

In Virtuos ist es durch Verknüpfung von Signalen in Echtzeit auch möglich, Überwachungs- oder Regelalgorithmen auf Maschinenbasis, z. B. zur Optimierung der Plastifizierung, zu entwickeln und zu testen. Dabei können prinzipiell auch Zustandsdaten aus den entwickelten Modellen einfließen, die über die Delphin-Komponenten von DASyLab zur Verfügung gestellt werden können.

Auf einem PC mit Windows-Betriebssystem läuft die Messwertverarbeitungssoftware DASyLab. Diese erhält über die beschriebene Profibuskopplung mittels der Delphin-Komponenten Zugriff auf die Maschinensignale und kann diese zeitkontinuierlich erfassen. In DASyLab erfolgt die Anwendung der verschiedenen entwickelten Modelle. Dafür ist zuvor eine umfangreiche Vorverarbeitung der Signale notwendig. Aus den über Virtuos übertragenen Signalen werden entsprechend der in den vorigen Abschnitten beschriebenen Methoden zyklusorientierte Datenblöcke gebildet (siehe z. B. Abbildung 18 oder Abbildung 28). Diese beschreiben das Verhalten und die Dynamik des Prozesses für das dargestellte Zeitfenster, das beispielsweise einem oder auch mehreren Bauteilen entsprechen kann. Aus diesen Datenblöcken werden anschließend mittels entsprechender Verarbeitungsmodule Kenngrößen abgeleitet, die zu den beschreibenden Zustandsvektoren zusammengefasst werden (siehe beispielsweise Abbildung 20, Abbildung 29 und Abbildung 31). Diese Zustandsvektoren, die je nach Anwendung unterschiedlich zusammengesetzt sein können, dienen den verschiedenen Modellen als Eingangsdaten. Diese leiten dann daraus die entsprechenden Prognosen oder Zielgrößen ab.

Die Ausgabe der Modelle für die zustandsabhängige Entformung kann in kurzen Zeiträumen ausgewertet und bei Erreichen des Entformzeitpunkts ein entsprechendes Schaltsignal über Virtuos in Echtzeit an die Maschinensteuerung weitergeleitet werden. So kann ausgehend von einem modellgenerierten Steuersignal in DASyLab der Ablauf des aktuellen Fertigungszyklus direkt beeinflusst werden. Dadurch, dass der gesamte Signalaustausch durch Softwarekomponenten erfolgt, ist auch eine schnelle Anpassung der Verknüpfung verschiedener Datenquellen möglich.

Auch der aktuelle Schmelzezustand kann anhand entsprechender Modelle prognostiziert werden (siehe Abbildung 30). Die so abgeleiteten Zustandsdaten der Schmelze dienen als Eingangswerte für eine Regelstrategie, mit der eventuelle Schwankungen ausgeglichen werden können. Der Ausgleich von Schwankungen erfolgt durch Veränderung von Einstellparametern der Maschine, insbesondere durch Stellgrößen der segmentierten und dynamischen Werkzeugtemperierung. Über Virtuos und den maschineninternen VARAN-Bus können die so abgeleiteten Parameteränderungen in Echtzeit an die entsprechenden Steuergeräte, z. B. der Temperiergeräte, weitergereicht werden.

Die Implementierung von Regelstrategien kann sowohl in DASyLab als auch in Virtuos erfolgen. Somit ist prinzipiell auch der Aufbau kaskadierter Regelungskreise möglich. Einerseits kann die dynamische Werkzeugtemperierung zyklusbezogen angepasst werden und so auf Schwankungen der Schmelze reagieren. Gleichzeitig, z. B. bei geänderten Eingangsmaterialien als (länger anhaltende) Ursache für die Viskositätsschwankung, kann die Plastifizierung maschinenintern mittels entsprechender Regelkreise über mehrere Zyklen fortlaufend angeglichen und optimiert werden.

Die Versuche und Erkenntnisse aus der zustandsabhängigen Entformung und der Schmelzestandsüberwachung bilden die Grundlage für die Entwicklung einer Regelstrategie im Rahmen der komponentenübergreifenden Regelung. Dabei ermöglichen die segmentierte Werkzeugtemperierung und Spritzgießmaschine die Stelleingriffe, um anhand des prognostizierten Schmelzestands eventuelle Störungen oder Schwankungen der Viskosität auszugleichen.

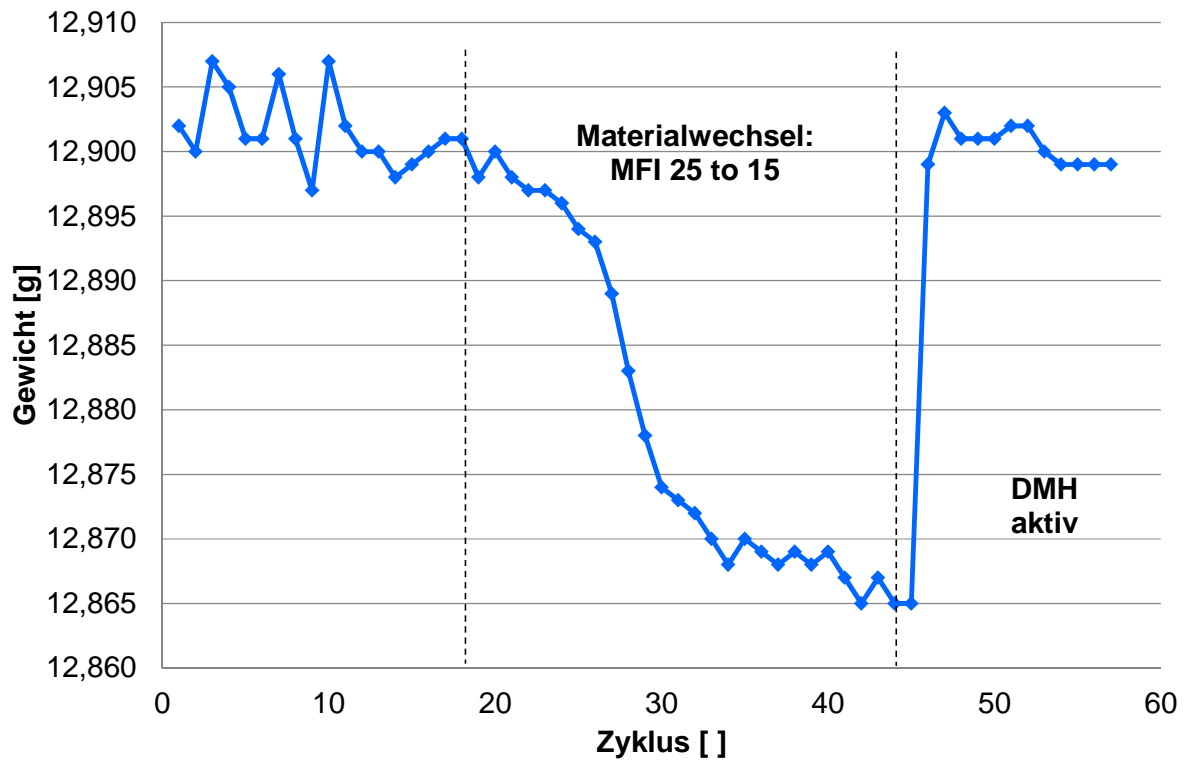


Abbildung 33: Regelung des Formteilgewichts mit dynamischer Temperierung

Dabei ermöglichen die segmentierte Werkzeugtemperierung und Spritzgießmaschine die Stelleingriffe, um anhand des prognostizierten Schmelzestands eventuelle Störungen oder Schwankungen der Viskosität auszugleichen.

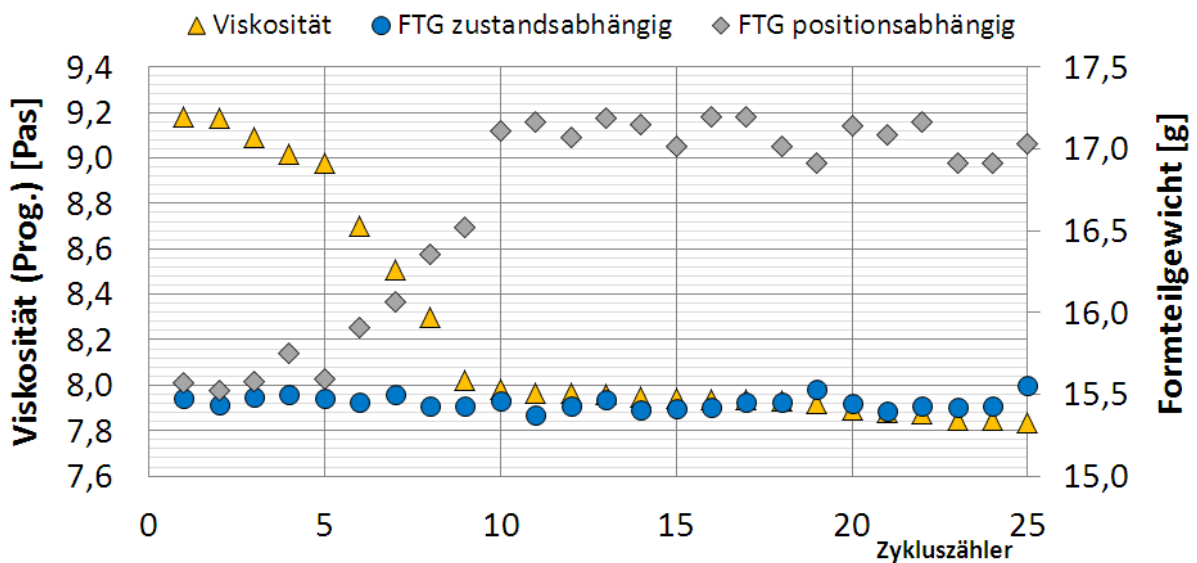


Abbildung 34: Zustandsabhängige Regelung des Formteilgewichts anhand des Schmelzestands über den Umschaltunkt von Einspritzen auf Nachdruck bei einer Viskositätsänderung von 15 %

Abbildung 33 zeigt die Wirkweise der kooperativen Regelung anhand des Formteilgewichts bei Änderung des zu verarbeitenden Materials. Das Fließverhalten ändert sich aufgrund einer Änderung des Rohstoffs. Dies wird mittels Schmelzestandsüberwachung erkannt. Eine Erhöhung der Formnesttemperatur bewirkt eine Änderung des Fließverhaltens und somit der Füllung der Kavität. In Abbildung 34 sind ebenfalls Formteilgewicht und Viskosität abgebildet. Der Einsatz der zustandsabhängigen Qualitätsregelung (blau) bewirkt eine konstante volumetrische Füllung der Werkzeugkavität, während bei einer positionsabhängigen Füllung (grau) Gewicht und Volumen zunehmen. Maßgeblich für eine Bestimmung des Schmelzequalität ist der gemessene Druck der Sensoren.

Energiebilanzierung

Für die Ermittlung von Energieverbräuchen und die Analyse von Wirkungsgraden, Wechselwirkungen und Abhängigkeiten sind zuallererst die Festlegung des Bilanzraums und seiner Systemgrenzen sowie der zu betrachtenden Medien / Energieträger notwendig. Mögliche Bilanzräume sind beispielsweise nur der Spritzzylinder, die Spritzgießmaschine oder der Gesamtprozess inklusive Werkzeug und Peripherie (d. h. Trockner, Temperiergeräte und Handling).

Der Energieverbrauch hängt dabei sehr stark vom konkreten Produkt und dem verwendeten Material ab. Verschiedene Kunststoff-Materialien weisen sehr unterschiedliche Schmelztemperaturen, Enthalpien und Viskositäten auf. Diese Werte sowie notwendige Verarbeitungstemperaturen im Zylinder und Werkzeug sind für die Standardwerkstoffe Polypropylen (PP), Polyamid (PA), Polycarbonat (PC) sowie Styrol-Acrylnitril (SAN) in Abbildung 35 dargestellt. Somit sind bei der Verarbeitung – auch abhängig von Werkstückgröße und Eigenschaften wie Fließweg-Wanddickenverhältnis – stark unterschiedliche Druck- und Temperaturniveaus notwendig. Diese spiegeln sich wiederum im Energieverbrauch wider, so dass verschiedene Prozesse nicht ohne weiteres einfach verglichen werden können. Ein direkter Vergleich zweier Prozesse ist maximal für „ähnliche“ Produkte auf „ähnlichen“ Maschinen valide. Es kann jedoch aufgrund der gleichen physikalischen Wirkprinzipien davon ausgegangen werden, dass die prinzipiellen Zusammenhänge zwischen Einstellung und Energieverbrauch (z.B. Erhöhung der Temperatur bedeutet mehr Heizenergie und mehr Kühlleistung) erhalten bleiben. Somit sind allgemeine Aussagen über Zusammenhänge möglich, die jedoch bezüglich ihrer Absolutwerte und der Größen der Effekte auf jeden Prozess angepasst werden müssen – beispielsweise über entsprechende Skalierungs- oder Gewichtungsfaktoren.

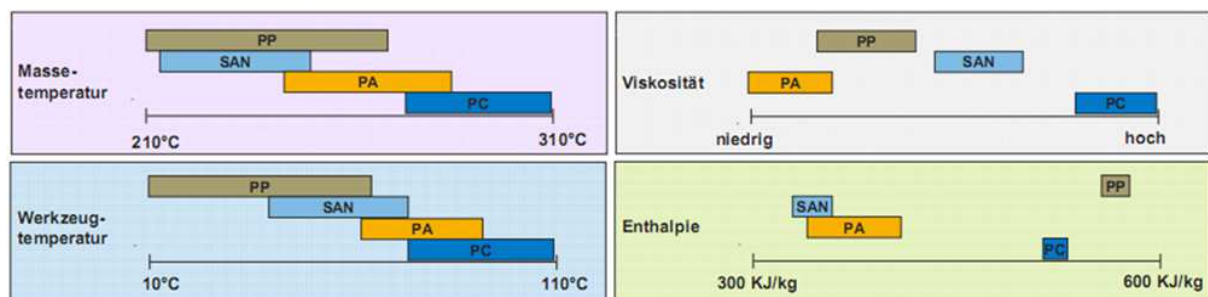


Abbildung 35: Vergleich werkstoffspezifischer Größen für verschiedene Standardmaterialien

Um den Spritzgießprozess inklusive der Wechselwirkungen der Parameter und dem Einfluss der Peripherie beurteilen zu können, umfasste der Bilanzraum im Projekt die Gesamtmaschine inklusive Trockner und aller Temperiergeräte. Als Energieströme mussten neben dem elektrischen Verbrauch auch die über Kühl- und Heizkreisläufe ein- und ausgebrachten Wärmeströme erfasst werden. Hierfür wurde im Rahmen des Projektes eine umfangreiche Messtechnik realisiert (siehe Abschnitt „Signaldatenerfassung und -verarbeitung“ und Abbildung 6), um alle Größen in ausreichender Qualität erfassen zu können. Um zudem den Zusammenhang zu eingestellten Prozesseinstellungen in den Signalen abzubilden, wurden weitere Größen wie Werkzeug- oder Schneckenbewegungen sowie Druck- und Temperatursignale mittels einer Rheologiedüse erfasst. In diesen Signalen bilden sich Veränderungen der Einstellparameter (Verfahrgeschwindigkeiten, Nachdruck, etc.) direkt ab, so dass stets eindeutige Zuordnungen gegeben sind. Einen Überblick über die erfassten Größen, die Wirkzusammenhänge sowie die Messorte gibt die Abbildung 36. Anhand der Farben sind elektrische Größen sowie Zu- und Abflüsse der Temperiermedien zu erkennen. Aufgrund der teils geringen Durchflussraten gekoppelt mit pulsartiger Zu- und Abnahme haben sich verfügbare Durchflussmesssysteme aufgrund ihrer Trägheit als zu ungenau erwiesen, so dass bei einigen Versuchsreihen die Volumenströme manuell durch Auslitern mit Wassereimern erfolgte.

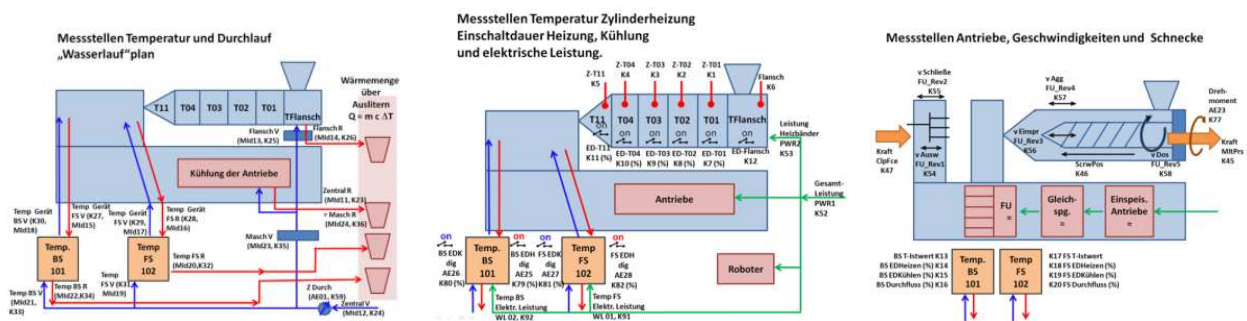


Abbildung 36: erfasste energierelevante Messgrößen am Prozess

Anhand dieser umfangreichen Messtechnik konnten in umfangreichen Versuchsreihen eine Vielzahl von Zusammenhängen genauer untersucht werden. Einige ermittelte Energiedaten – teils für unterschiedliche Materialien – sowie deren Verteilung auf Komponenten und Energieflüsse sind exemplarisch in Abbildung 37 und Abbildung 38 dargestellt.

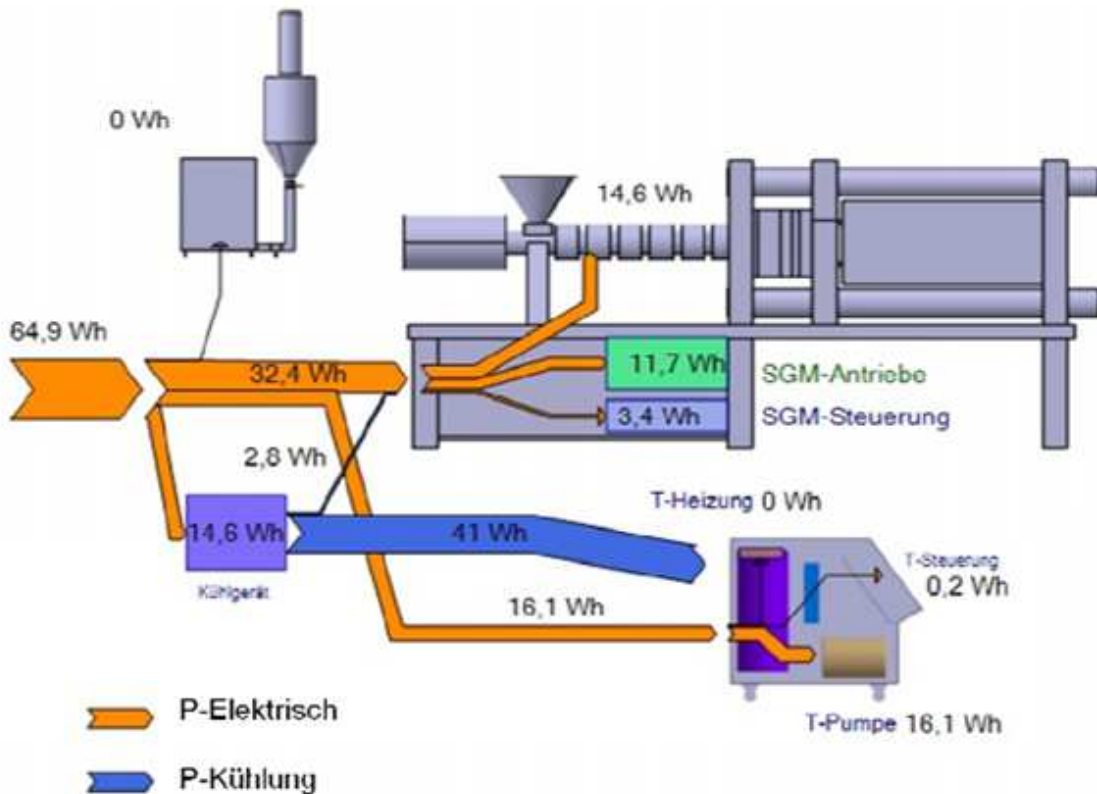


Abbildung 37: Energieflüsse (elektrisch und thermisch) in der Anlage

Neben der Aufteilung der Energieflüsse konnte so auch die Auswirkungen verschiedener Maßnahmen zur Senkung des Energieverbrauchs untersucht werden. Eine Maßnahme ist die Reduktion der Wärmeverluste durch Konvektion und Strahlung vom Werkzeug sowie dem Zylinder in die Maschine und die Umgebung. Die Energieverluste durch die Heizbänder können zum einen durch ein relativ einfaches Abschirmblech reduziert werden, da damit die Konvektion signifikant reduziert wird. Durch eine Isolierung der Heizbänder kann der Energieverbrauch nochmals deutlich gesenkt werden. Insgesamt sind durch solche Maßnahmen – insbesondere abhängig von den materialspezifischen Verarbeitungstemperaturen – bis zu 30% Einsparungen möglich. Die Leistungsaufnahme der Heizbänder in Abhängigkeit der Temperatur und der Isoliermaßnahme sowie entsprechende Thermographieaufnahmen sind in Abbildung 39 dargestellt. Die Ergebnisse wurden auch bereits durch mehrere Veröffentlichungen in einschlägigen Fachzeitschriften und Vorträge auf Fachtagungen verbreitet (siehe Abschnitt 7. Veröffentlichungen). In andere Untersuchungen wurden verschiedene Trocknervarianten und eine Werkzeugisolierung hinsichtlich der Auswirkungen auf den Energieverbrauchs untersucht.

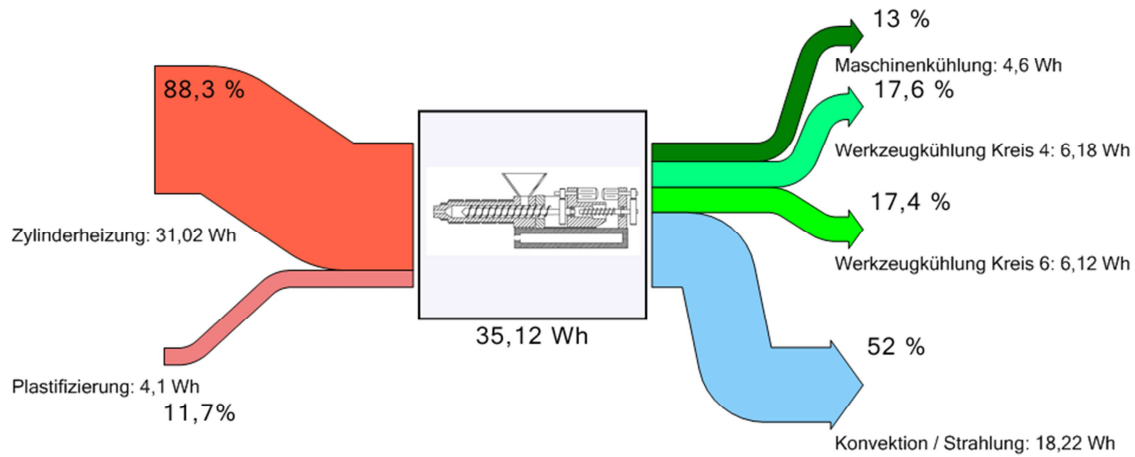


Abbildung 38: Sankey-Diagramm der ermittelten Energieflüsse und -bilanzen im Zylinder (anderes Material)

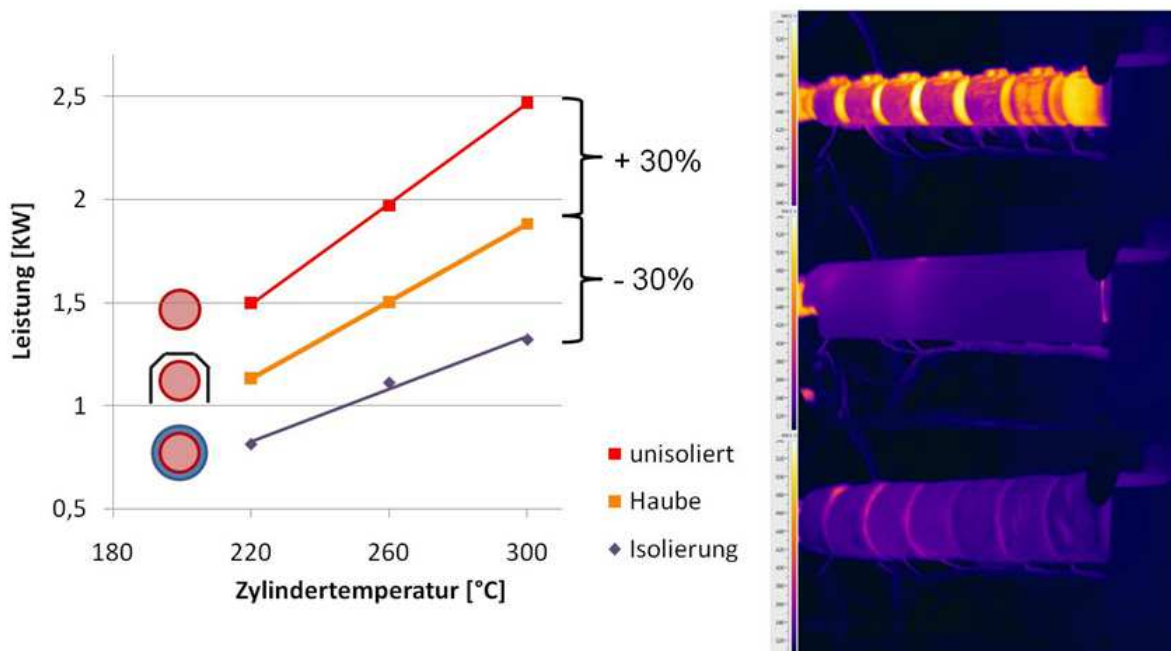


Abbildung 39: Einfluss der Heizbandisolierung auf Energieverbrauch

Energiemonitoring und Einstellerunterstützung

Basierend auf den Versuchsreihen mit variierten Einstellparametern wurden für die Maschine verschiedene Regressionsmodelle aufgestellt, die den Energieverbrauch in Abhängigkeit der Maschineneinstellung beschreiben. Die verschiedenen Teilversuchsreihen und die sich daraus ergebenden Modelle orientierten sich dabei am Prozessablauf. Der Prozess wurde in Teilaufgaben wie Werkzeugbewegung, Schließe, Grundlast, Aufschmelzen, Nachdruck etc. aufgeteilt, die jeweils unabhängig voneinander ablaufen. Für jede Teilaufgabe wurden die auf den Energieverbrauch einwirkenden Parameter ermittelt und variiert. Durch diese Aufteilung waren die Einzelversuche nur

von wenigen Parametern abhängig. Die Gesamtenergie eines Prozesses ergibt sich dann aus der Summe der Einzelmodelle, die teilweise mit der resultierenden Zykluszeit gewichtet werden.

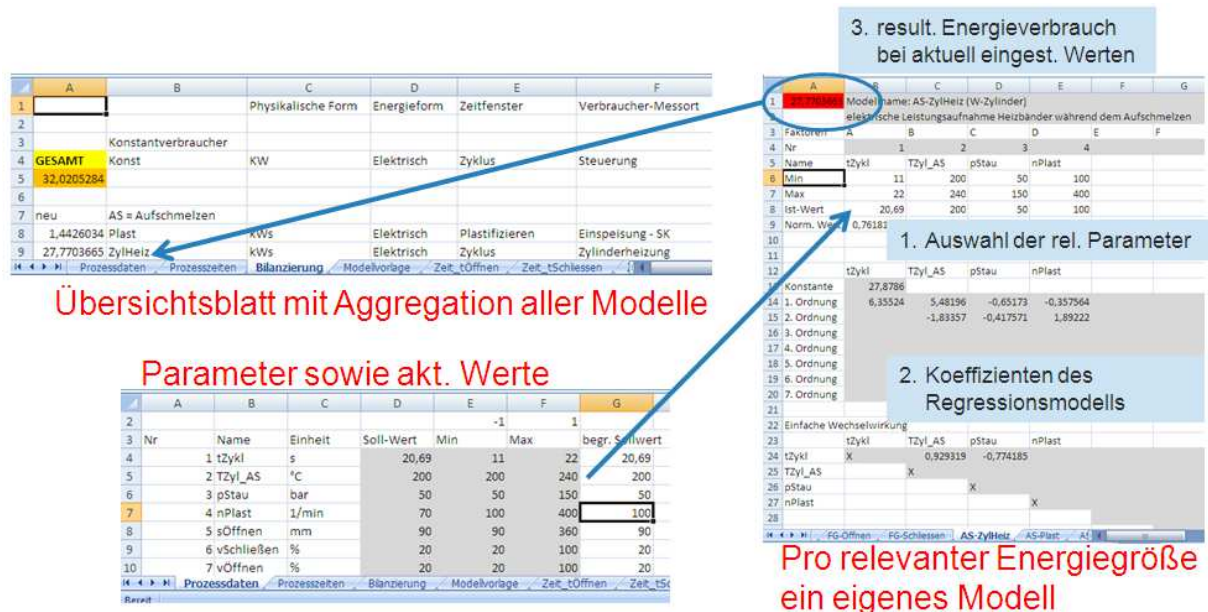


Abbildung 40: Excel-Werkzeug zur Offline-Ermittlung des einstellungsabhängigen Energieverbrauchs

Die Einzelmodelle wurden in einem ersten Schritt in einem großen Excel-Sheet zusammengefasst. Das erste Tabellenblatt listet alle im Gesamtmodell berücksichtigten Parameter inklusive der jeweiligen, dem Versuchsplan resultierenden Wertebereiche auf. Hier können für die einzelnen Parameter Werte manuell vorgegeben und angepasst werden. Im nächsten Tabellenblatt werden die Ergebnisse der Einzelmodelle, die sich auf den nachfolgenden Blättern befinden, zusammengefasst und zum Gesamtverbrauch aggregiert. Die nachfolgenden Blätter enthalten die für die einzelnen Maschinenmodule und Teilabläufe ermittelten Regressionsmodelle. Diese holen sich die aktuellen Parameterwerte aus dem ersten Tabellenblatt, verknüpfen sie mit den Modellparametern und stellen den resultierenden Teilenergieverbrauch für die weitere Verarbeitung zur Verfügung. Durch manuelle Änderung der Parameterwerte auf der ersten Seite werden automatisch alle Modelle angepasst und der Gesamtenergieverbrauch ermittelt. Somit können auch offline mit dem Excel-Werkzeug die Zusammenhänge ohne Spezialsoftware er- und vermittelt werden. Einen Überblick dazu gibt Abbildung 40.

Da das Gesamtmodell entsprechend modular aufgebaut ist, kann es im Prinzip bei Austausch einzelner Maschinenkomponenten entsprechend einfach angepasst werden. Wird beispielsweise die Schließe der Maschine gegen eine größere ausgetauscht, muss nur das Modell für den bewegungsabhängigen Energiebedarf an die größere Schließe angepasst werden; die anderen Teilmodelle haben weiterhin Gültigkeit.

Das Gesamtmodell bildet den Zusammenhang zwischen Prozesseinstellung und dem Energieverbrauch dar. Durch manuelle Variation der Parameter kann der resultierende Energieverbrauch ermittelt werden – eine darauf aufbauende Optimierung ist jedoch sehr umständlich und ist nur sehr bedingt geeignet, den Maschineneinrichter bei der energieoptimierten Prozesseinstellung zu unterstützen. Sehr wichtig ist auch die Tatsache, dass bei Spritzgießprozessen

die optimale Einstellung nicht existiert, sondern immer ein Kompromiss zwischen den Zielgrößen Zykluszeit (und damit Produktivität), Qualität und Energieverbrauch ist. Dabei ist vor allem die Qualität ein Merkmal, das bei der Einrichtung durch den Einrichter beurteilt und die Prozesseinstellung entsprechend iterativ angepasst wird. Die Bestimmung einer Prozesseinstellung einzig anhand der Minimierung des Energieverbrauchs kann nicht funktionieren, da zwischen Einstellung und Qualität ein starker Zusammenhang besteht, der in der Regel (im Vorfeld) nicht modelliert werden kann. Die ausschließliche Betrachtung des Energieaufwands würde beispielsweise zu einem starken Absenken von Nachdruck und Temperaturen führen. Die dann notwendige Gesamtenergie wäre zwar gering, allerdings wäre es nicht mehr möglich, gefüllte Teile zu erhalten, was jedoch eine absolute Mindestanforderung an die Teilequalität ist.

Um unter diesen Randbedingungen eine energieeffiziente Prozesseinstellung zu finden, sind einerseits rechnergestützte Optimierungsverfahren als auch die Interaktion mit dem Einrichter notwendig. Die Benutzeroberfläche der entwickelten Optimierungssoftware ist in Abbildung 41 zu sehen.

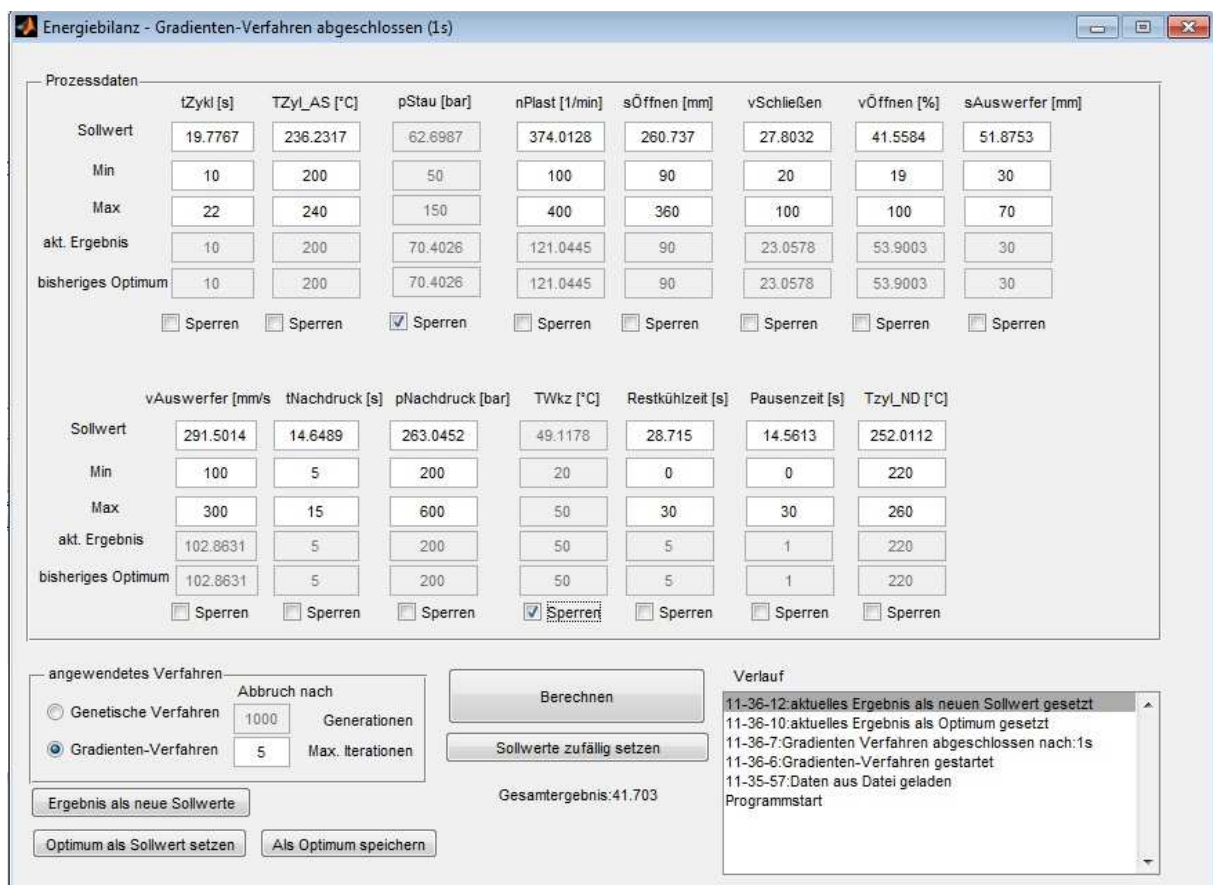


Abbildung 41: Programmoberfläche der interaktiven Einstellerunterstützung zur energieeffizienten Prozesseinstellung

Die Software ist in Matlab realisiert und basiert auf dem Modell der Excel-Tabelle, welches zum Programmstart eingelesen wird. Somit ist eine konsistente Datenbasis geschaffen, die – wie oben erläutert – auch verändert oder an geänderte Maschinenausrüstung angepasst werden kann. Für alle im Modell beinhalteten Parameter können die Variationsbreiten sowie der Startwert vorgegeben. Ausgehend von dieser Starteinstellung wird eine (moderat) veränderte Einstellung vorgeschlagen, die

laut mit weniger Energieaufwand verbunden ist. Die Bestimmung der neuen Einstellung erfolgt anhand eines Minimierungsverfahrens, welches nach kurzer Laufzeit abgebrochen wird. Als Verfahren wurden dabei ein Gradientenverfahren sowie genetische Algorithmen umgesetzt. Die ermittelte Einstellung wird dem Einsteller als nächster Schritt vorgeschlagen. Dieser kann anhand der resultierenden Qualität sowie der erfolgten Änderungen entscheiden, was die Ausgangslage für den nächsten Optimierungsschritt ist. Anhand der beurteilten Qualität sowie seiner eigenen Erfahrungen kann er einzelne Parameter verändern oder von der weiteren Optimierung ausnehmen. Über eine entsprechende Schaltfläche wird der nächste Iterationsschritt gestartet. Ein so gefundenes (lokales) Minimum kann abgespeichert und bei Bedarf wieder darauf zugegriffen werden.

Mit diesem Tool ist es somit möglich, den Einsteller interaktiv bei einer Optimierung der Prozesseinstellung hinsichtlich des Energieverbrauchs (aber unter Berücksichtigung der Qualität) zu unterstützen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich die im Projekt erarbeitete Wissensbasis aus drei Bereichen zusammensetzt:

1. „konstruktive“ Maßnahmen zur Energieeinsparung (z. B. Zylinderisolierung) und vergleichende Bewertung von Komponenten wie verschiedene Trocknervarianten beim Aufbau eines Prozesses. Diese wirken sich auf den Gesamtenergieverbrauch aus und sind nicht mehr beeinflussbar, sobald die Produktion startet.
2. Abbildung des Zusammenhangs zwischen Parametereinstellung und Energieverbrauch in einem Gesamtmodell. Dieses ist für jeden Prozess und jede Maschine anzupassen und ist stark abhängig von der gewählten Ausrüstung des Prozesses.
3. Einem darauf basierenden Optimierungsmodul, welches durch Interaktion mit dem Einrichter die erzielte Teilequalität abbildet und auch durch gezielte Parametervariation und –sperrung den Einbezug des Erfahrungswissen des Einrichters ermöglicht.

Demonstrator

Grundlage des Demonstrators ist eine Spritzgießmaschine der AX-Baureihe von Krauss Maffei. Diese wurde mit den für die komponentenübergreifende Regelung notwendigen Komponenten aufgerüstet. Dies betrifft insbesondere die Erweiterung mit der Echtzeitsimulationsumgebung Virtuos und der Datenverarbeitung DASyLab sowie den notwendigen Schnittstellen (siehe Abschnitt „Signaldatenerfassung und -verarbeitung“ und Abbildung 10 mit der Systemstruktur).

Gesamtintegration und Demonstratorerstellung wurde seit Dezember 2011 im Technikum der Krauss Maffei Technologies GmbH vorgenommen und eine Versuchs- und Demonstratormaschine des Typs KM 100/380 AX aufgebaut. Die Maschine wurde nur noch mit der nötigsten messtechnischen Ausrüstung ausgestattet, um eine Überführung in die industrielle Praxis zu ebnen. Redundante Messsignale aus zusätzlicher Sensorik sollten nicht weiter Verwendung finden.



Abbildung 42: Demonstratormaschine mit segmentierter Werkzeugtemperierung und zustandsabhängiger kooperativen Regelung im Technikum der Fa. Krauss Maffei Technologies GmbH

Vergleich elektr. Energieaufnahme: Standard / Dynamic Mold Heating

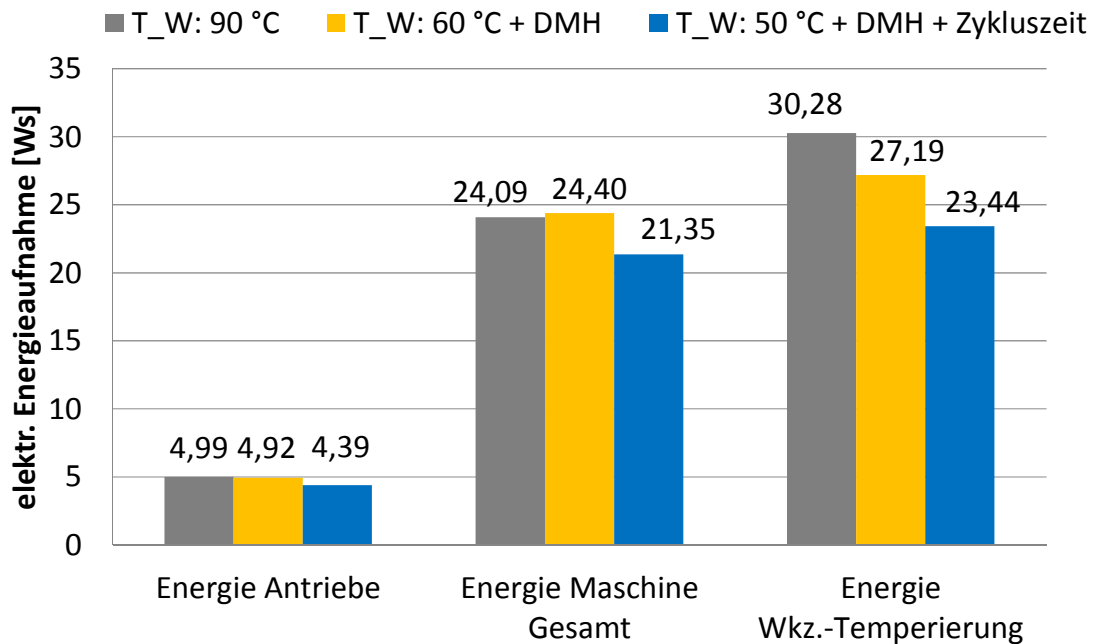


Abbildung 43: Vergleich Energieaufnahme Standardtemperierung und dynamische Temperierung

Überwachung und Dokumentation der Energie- und Wärmeflüsse in der Produktionszelle und deren Optimierung konnten anhand des Demonstrators gezeigt werden. Ebenfalls ist eine online Prognose des Schmelzustands möglich. Die kooperative Regelung ermöglicht im Demonstrator eine zustandsabhängige Prozessführung auf der Basis maschineninterner Daten. Chargenschwankungen, instationärer Effekte beim Wiederanfahren und nach Pausenzeiten können so autonom kompensiert werden.

Abbildung 43 zeigt einen Vergleich von konventioneller und dynamischer Temperierung. Es konnte eine Energieeinsparung von rund 18 % durch Anpassung der Temperier-Strategie erzielt werden (Polycarbonat, voll-elektrische SGM).

Die Projektergebnisse können prinzipiell auf alle mittels Kunststoffspritzguss hergestellten Werkstücke angewendet werden. Bedingung ist ein Teilegewichte von ca. 0,05 g bis > 50 kg. Allein in Deutschland werden pro Jahr ca. 2,5 Millionen Tonnen Kunststoffe durch Spritzgießen auf ca. 250.000 installierten Anlagen verarbeitet. Der Weltmarkt beläuft sich auf ca. 65.000 Anlagen pro Jahr, wobei deutsche Firmen einen Anteil von ~22% aufweisen.

4. Zusammenfassung

Im Rahmen des Verbundprojektes wurde die Energie- und Ressourceneffizienz im Spritzgießprozess durch zwei Ansätze gesteigert: Zum einen wurde eine regelungstechnische Kopplung zwischen Spritzgießmaschine und -werkzeug realisiert und zum anderen ein Energie-Monitoring für den Gesamtprozess erarbeitet. In der aufgebauten Demonstratormaschine konnte eine Energieersparnis von ca. 40 % gegenüber einem herkömmlichen Fertigungsprozess realisiert werden.

Die Energieeffizienz des Gesamtprozesses, bestehend aus Maschine und Werkzeug inklusive Temperierung, wurde durch maschinen- und werkzeugtechnische Entwicklungsmaßnahmen, sowie durch die Entwicklung der kooperativen Regelung der bisher autonomen Teilsysteme gesteigert. Mittels der entwickelten Werkzeugtechnik und einer lokalen dynamischen Formtemperierung war es möglich das Temperaturniveau der Stammform abzusenken und auf gleichbleibendem Qualitätsniveau Formteile zu produzieren.

Ein Kernpunkt der erreichten Ziele war die modellhafte Beschreibung der Schmelzequalität in Abhängigkeit von diversen Prozessschwankungen. Diese bilden sich in erfassten Sensorsignalen aus dem Werkzeug und der Plastifiziereinheit ab. Basierend auf durchgeführten Versuchsreihen an verschiedenen Spritzgießmaschinen, die um Messtechnik sowie einer segmentierten Werkzeugtemperierung erweitert worden waren, wurden die Zusammenhänge zwischen Einflussgrößen (Material, Einstellparameter...), Prozesszustand und Auswirkung auf die Formteilqualität erarbeitet und in ein beschreibendes Modell überführt. So konnte zu jedem Zeitpunkt der Zustand relevanter Prozessgrößen (z.B. Schmelzeigenschaften) abgeleitet werden und zur Regelung dieser Zustandsgrößen verwendet werden.

Eine Steigerung der Prozessstabilität wurde indes durch einen zielgerichteten regelungstechnischen Eingriff in die Prozessführung ermöglicht. Das Überwachen des Schmelzezustands hat eine Korrektur – abhängig von den Umgebungsbedingungen – der Formfüllung ermöglicht. Dies wurde zum einen durch ein Anpassen des Temperaturniveaus der kavitätsternen Heizelemente und zum anderen durch eine Änderung der Schneckenbewegung erreicht. Anfallender (Anfahr-)Ausschuss und somit Ressourceneinsatz konnte erheblich verringert und bisher notwendige Temperaturreserven reduziert werden.

Das Energie-Monitoring ermöglichte ein Einbeziehen aller im Spritzgießprozess beteiligten Komponenten und damit eine energetische Bewertung direkt an der Spritzgießmaschine. Prozesseinstellungen konnten nun auf Energieaspekte hin bewertet und zur Optimierung herangezogen werden. Neben Qualität- und Zykluszeit konnte so auch die Energieeffizienz bei der Optimierung der Einstellung berücksichtigt werden. Es wurden zunächst detaillierte Energiebilanzen

des Gesamtprozesses aufgestellt, die die Abhängigkeiten von Prozessparametern und Umgebungsbedingungen berücksichtigten. Dadurch wurden die Zusammenhänge abgebildet und die Potenziale von Optimierungsmaßnahmen konnten abgeschätzt werden. Die Energiebilanzen wurden in das Energie-Monitoring überführt, welches neben dem Energieverbrauch der Maschine auch das Werkzeug und die Temperiereinrichtungen berücksichtigte. Eine Integration in die Steuerung der Maschine ermöglichte eine Aussage über den aktuellen Energieverbrauch und der Anwender konnte den Prozess energieoptimal einstellen. Unterstützt wurde er dabei durch eine erarbeitete Wissensbasis, die aus den Energiebilanzen Zusammenhänge zwischen Einstellparametern des Prozesses und dem Energiebedarf abbildete. Unter Berücksichtigung des Energieverbrauchs und den Maschinenparametern vorangegangener Zyklen wurden dem Maschineneinrichter Hinweise zu einer energieeffizienteren Prozesseinstellung gegeben.

5. Ausblick

Um die behandelten Arbeitsinhalte weiter voranzutreiben ist eine engere Vernetzung der Spritzgießproduktionszelle und der gesamten Produktionslinie näher zu betrachten. Eine Verknüpfung von Produktionsdaten im Formgebungsprozess mit Daten aus der Materialvor- und Nachbehandlung oder Veredelung der Formteile findet weiterhin nicht statt. So werden Defekte und Qualitätsmängel an Bauteilen meistens erst nach einer möglichen Veredelung festgestellt und nicht mit Störgrößen aus vorangegangenen Prozessen in Zusammenhang gebracht.

So ist zunächst eine globalere Erfassung von Sensordaten sinnvoll. Mittels einer intelligenten Kombination und Erstellung von relevanten Kennzahlen würden somit leistungsfähige Instrumente geschaffen, um die einzelnen Prozessphasen besser zu überwachen. Die unterschiedlichen Anlagen im Produktionsprozess könnten in Echtzeit gegenseitig auf die Signale der jeweils installierten Sensorik zugreifen und autonom auf Störungen im Prozess durch ein Nachstellen von Parametern reagieren. Gleichzeitig könnte das Monitoring der vernetzten Produktionskomponenten in Echtzeit eine Aussage über die Formteilqualität in den unterschiedlichen Prozessphasen und den Energieverbrauch treffen.

Entsprechend der relevanten Störgrößen, Qualitätsanforderungen und Prozessinformationen ist es sinnvoll Mechanismen zu entwickeln, die ein autonomes Eingreifen in den Prozess ermöglichen und diesen somit stabilisieren. Hier steht eine zustandsabhängige Prozessführung im Vordergrund, die mittels Informationen über Umgebung und vorbehandelten Rohstoff, regelnd den Prozess in situ stabilisiert oder nachführt. Genannt sind hier Möglichkeiten der Einflussnahme in der Schmelzaufbereitung durch eine Regelung der Schmelzequalität in der Plastifiziereinheit der Spritzgießmaschine oder eine Anpassung der Schneckenhubführung auf Grund von diversen kombinierten Sensorsignalen. Generell gilt es zusätzliche Sensorik in der laufenden Produktion stärker zu vermeiden und auf bereits vorhandene Signale zurückzugreifen, diese aber effizienter auszunutzen.

Die erzielten Projektergebnisse zeigen ein deutliches Energie-Einsparpotential auf. Die Energiekosten in der Spritzgussproduktion stellen einen entscheidenden Anteil der Fertigungskosten dar. Durch die Veränderte Vorgehensweise wird ein großes Einsparpotential unter Beibehaltung der Qualität ermöglicht. Zusätzlich ist aufgezeigt worden, dass Prozessfenster erweitert werden können, was

nicht nur bedeutet dass weniger Ausschuss produziert wird, sondern auch indem die Möglichkeiten zur Herstellung von qualitativ hochwertigen Produkten erweitern werden können.

Diese Einsparungen sind für eine Branche im internationalen Wettbewerb in einem Hochlohnland wie Deutschland überlebensnotwendig. Im Hinblick auf den weltweiten Rückgang der Ressourcen sind diese Maßnahmen unabdingbar.

Die im Projekt entwickelten neuen Technologien fanden auf diesem Hintergrund einen guten Anklang. Ein zunehmendes Interesse an den neuen Möglichkeiten konnte in allen Gesprächen mit potentiellen Kunden festgestellt werden.

Die neuen Technologien sind, im Vergleich zu den herkömmlichen Möglichkeiten, mit erhöhten Investitionen verbunden. Da die Fertigungsmittel im Spritzguss, speziell die Spritzgießwerkzeuge, für jeden Artikel individuell sind muss hier einschränkend erwähnt werden, dass diese neuen Möglichkeiten zunächst nur für Fertigungsserien mit großen Stückzahlen zum Einsatz kommen oder bei der Möglichkeit einer Erweiterung des heute Herstellbaren.

Daraus abgeleitet ergibt sich die Aufgabenstellung die neuen Technologien ebenfalls in kleine flexible und adaptive Einheiten umzugestalten, welche auch für unterschiedlichste Spritzgießwerkzeuge /Komplettsysteme eingesetzt werden können. Diese Systeme könnten wirtschaftlich als Anbaueinheit auch für kleinere Produktionslosgrößen eingesetzt werden.

6. Danksagung

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Rahmenkonzeptes „Forschung für die Produktion von morgen“ gefördert und vom Projektträger Karlsruhe betreut.

Die Förderkennzeichen der Partner sind:

02PO2040 gwk Gesellschaft Wärme Kältetechnik mbH, Kierspe

02PO2041 Krauss Maffei Technologies GmbH, München

02PO2042 Gebr. Krallmann GmbH, Hiddenhausen

02PO2043 Hochschule Rosenheim

02PO2044 FhG-IPA, Stuttgart

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Wir bedanken uns für die Unterstützung bei allen Fördereinrichtungen und die exzellente Betreuung durch Herr Noll und seine Kollegen / innen.

7. Veröffentlichungen und Vorträge

- [1] J. Eben: Posterpräsentation auf der VDI-Jahrestagung Spritzgießen, 22./23.2.2011, Baden-Baden
- [2] J. Neher: IPA-Tagung „Energieeffizienz in der Produktion“, 18. März 2011, Stuttgart
- [3] J. Neher: Ingenieurbüro Hannebaum, Fachtage Spritzgießtechnik 2011, 24. März 2011, Aalen
- [4] S. Kruppa: „Energiesparoptionen seitens des Maschinenhersteller“, Service-Symposium, Verl, 10.05.2011
- [5] Prof. Karlinger, J. Eben, u.a. „Der Schlüssel zum geringeren Verbrauch“, S. 22-25, in: Kunststoffe 6/2011
- [6] Prof. Karlinger, J. Eben, u.a. „Maximale Prozesstransparenz in der Kunststoffverarbeitung“, S.108-111, in: Plastverarbeiter 10/2011
- [7] Prof. Karlinger, J. Eben: „Energieeffizienz und Qualität beim Spritzgießen“, Ingenieurbüro Hannebaum, Fachtage Spritzgießtechnik 2012, 21. März 2012, Aalen
- [8] K. Krallmann: „Das Spritzgießwerkzeug als Prozessbaustein“, 15.-30.4.2013, Hiddenhausen, Technologietage Krallmann Gruppe.
- [9] ZuPrEff Abschlussveranstaltung 11.04.2013, München