



Fakultät für Maschinenwesen
Lehrstuhl für Medizintechnik

Drahtlose Temperaturmessung zur kontinuierlichen Prozessüberwachung in Kunststoffspritzgussteilen

Matthias Zeppenfeld

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh

Prüfende der Dissertation:

1. Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lüth
2. Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler

Die Dissertation wurde am 08.04.2019 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 07.02.2020 angenommen.

Kurzbeschreibung

In dieser Arbeit wird ein System bzw. Verfahren vorgestellt und untersucht, durch das drahtlos mit einem bauteilintegrierten Sensorelement sowohl während als auch nach der Herstellung im Inneren von Kunststoffspritzgussteilen Temperaturwerte erfasst und vorteilhaft angewendet werden können.

Die Notwendigkeit zur Überwachung, Regelung und Dokumentation des Spritzgießprozesses und des weiteren Bauteillebenszyklus wird zur Steigerung der Produktivität bzw. Qualität und zur Prozessvalidierung immer bedeutsamer (Alig, I. *et al.*, 2010), (Yang, Y. *et al.*, 2016). Weitere Motivation zur Entwicklung des präsentierten Systems ergab sich aus einer detaillierten Analyse des Stands der Technik und Forschung. Dabei zeigen die bekannten modellbasierten Verfahren zur Beschreibung des Spritzgießprozesses Einschränkungen. Besonders für die bisher noch herausfordernde Modellierung der Schmelztemperatur als einer der Haupteinflussparameter im Spritzgießprozesses werden experimentelle Methoden weiter forciert (Praher, B. *et al.*, 2014), (Gordon, G. *et al.*, 2015), (Hopmann, C. *et al.*, 2017c). Besonders bei der Produktion hochwertiger Kunststoffbauteile ist die Integration von Sensorik in den Spritzgießprozess vorteilhaft (Bühning-Polaczek, A. *et al.*, 2014), (Yang, Y. *et al.*, 2016). Diese Sensorik wird bisher meist drahtgebunden auf Seiten der Spritzgießmaschine bzw. im Formwerkzeug verbaut und ist somit nur während bzw. eingeschränkt nach der Entformung in der Lage, die Temperatur am und vor allem im Kunststoffbauteil zu bestimmen.

Aus dieser Motivation heraus wurden zur Trennung der Sensorik von der Spritzgießmaschine bzw. dem Spritzgusswerkzeug passive Radio Frequency Identification (RFID) Sensor-Einlegeteile in Spritzgussbauteile eingespritzt. Durch eine interne, im Werkzeug verbaute, und eine zusätzliche externe Antenne wurde die Energieversorgung, die Kommunikation und die kombinierte Messung der Temperatur aus dem Bauteilinneren während und nach der Spritzgießverarbeitung mit dem gleichen Sensorelement realisiert.

Im Sinne des Product Life Cycle Monitoring wird eine kontinuierliche, bauteilintegrierte *Prozessüberwachung* bzw. Qualitätskontrolle des Kunststoffbauteils von Beginn der Herstellung an über den gesamten Lebenszyklus ermöglicht und kann auch auf dem im Kunststoffbauteil befindlichen RFID-Chip dokumentiert werden (*Prozessdokumentation*). Durch die Erweiterung der Temperaturüberwachung zur *Prozessregelung* wird flexibel auf Änderungen in der besonders qualitätsrelevanten Schmelztemperatur reagiert und ein möglichst direktes Qualitäts-Feedback von Bauteileigenschaften an die Spritzgießmaschine umgesetzt.

Somit kann auch die Kunststofftechnik dem Trend der Individualisierung, Funktionsintegration und Vernetzung von modernen Werkstücken und Produktionswerkzeugen von passiven hin zu aktiven Objekten mit integrierter Sensorik und der Fähigkeit zur Datenerfassung/-weitergabe folgen (McEwen, A. *et al.*, 2014, S. 73), (Hopmann, C. *et al.*, 2017b), (Zäh, M. *et al.*, 2017, S. 295), (Denkena, B. *et al.*, 2017, S. 323).

Abstract

This thesis examines a procedure by which temperature values can be recorded wirelessly with a component-integrated sensor element in the interior of plastic injection molded parts both during and after production.

The need to monitor, control and document the injection molding process and the subsequent component life cycle is becoming more and more important to increase productivity and quality as well as for process validation (Alig, I. *et al.*, 2010), (Yang, Y. *et al.*, 2016). Further motivation for the development and investigation of the presented system resulted from a detailed analysis of the state of art. At this, the known model-based methods for describing the injection molding process show some limitations. Particularly for the still challenging modeling of the melt temperature as one of the main influencing parameters in the injection molding process, experimental methods are being further promoted (Praher, B. *et al.*, 2014), (Gordon, G. *et al.*, 2015), (Hopmann, C. *et al.*, 2017c). Especially for the production of high-quality plastic components the integration of sensors into the injection molding process is advantageous (Bühning-Polaczek, A. *et al.*, 2014), (Yang, Y. *et al.*, 2016). Up to now, mostly wire-based sensor technology has been installed to the injection molding machine or in the mold. With these stationary sensors the temperature determination at or inside the plastic part is only possible during molding and just to a limited extent after demolding.

Based on this motivation and to separate the sensor from the injection molding machine and mold, passive Radio Frequency Identification (RFID) sensor transponders were overmolded and integrated into injection molded plastic parts. With an internal antenna integrated into the mold and an additional external antenna, the power supply, communication, and measurement of the temperature from the inside of the component during and after injection molding was realized with the same sensor element.

According to Product Life Cycle Monitoring, a continuous, component-integrated *process monitoring* or quality control of the plastic component is realized from the start of production over the entire life cycle and can also be documented on the RFID chip inside the plastic component (*process documentation*). The extension of this temperature monitoring approach for *process control* allows a flexible response to changes in the melt temperature, which is highly relevant for part quality. Hence a direct quality feedback of component properties to the injection molding machine is implemented.

As a result, plastics technology can also follow the trend of individualization, function integration, interconnection and transfer of modern workpieces and production tools from passive to active objects with integrated sensor technology and the ability to acquire and transfer data (McEwen, A. *et al.*, 2014, S. 73), (Hopmann, C. *et al.*, 2017b), (Zäh, M. *et al.*, 2017, S. 295), (Denkena, B. *et al.*, 2017, S. 323).

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	1
2. PROBLEMSTELLUNG.....	3
2.1. PRINZIP KUNSTSTOFFSPRITZGIEßEN	3
2.2. PRINZIP MONTAGESPRITZGIEßEN	5
2.3. PROZESSPARAMETER UND EINFLÜSSE BEIM SPRITZGIEßEN	6
2.4. TECHNISCHE PROBLEMSTELLUNG	11
3. STAND DER TECHNIK UND FORSCHUNG.....	12
3.1. TECHNISCHE TEMPERATURMESSVERFAHREN	12
3.2. TEMPERATURÜBERWACHUNG WÄHREND DES SPRITZGIEßENS	16
3.2.1. <i>Modellbasierte Verfahren</i>	18
3.2.2. <i>Thermoelemente</i>	19
3.2.3. <i>Thermografie</i>	22
3.2.4. <i>Fluoreszenz-Spektroskopie</i>	25
3.2.5. <i>Ultraschall-Tomografie</i>	25
3.2.6. <i>RFID-Sensoren</i>	27
3.3. TEMPERATURMESSUNG NACH DEM SPRITZGIEßPROZESS	30
3.4. STEUERUNG UND REGELUNG DES SPRITZGIEßPROZESSES MITTELS TEMPERATUR-MESSUNG	32
4. KRITISCHE BEURTEILUNG DES STANDS DER TECHNIK UND FORSCHUNG.....	33
5. ANSATZ UND KONZEPT	37
6. ERWARTETE VORTEILE UND FUNKTIONEN DER LÖSUNG.....	39
7. BESCHREIBUNG DER LÖSUNGSSTRUKTUR.....	40
8. BESCHREIBUNG DER LÖSUNGSPROZESSE	48
8.1. PROZESSÜBERWACHUNG.....	48
8.2. PROZESSREGELUNG.....	51
9. ABGRENZUNG UND UNTERSCHIEDSMERKMALE DER LÖSUNG.....	55
10. LABOR- UND GERÄTEAUFBAU	56
10.1. SPRITZGIEßMASCHINEN UND WERKSTOFFE	56
10.2. SPRITZGUSSFORMTEILE UND WERKZEUGE.....	57
10.2.1. <i>RFID-Sensor-Werkzeug mit Plattenprüfkörper</i>	58
10.2.2. <i>Wechselwerkzeug für Biegestreifen zur Ermittlung der Bauteilstabilität</i>	61
10.3. PROZESSPARAMETER	61
10.4. RFID-INFRASTRUKTUR	63
10.5. INTEGRATION IN DEN SPRITZGIEßPROZESS.....	64
10.5.1. <i>Anschluss konventionelle Prozessüberwachung</i>	64
10.5.2. <i>Integration: Spritzgießmaschine KM 50 EX</i>	64
10.5.3. <i>Integration: Spritzgießmaschine Arburg Allrounder 420 C</i>	65
10.5.4. <i>Software</i>	66
10.6. SPRITZGIEßSIMULATION	68

11. BESCHREIBUNG DER MESSVERFAHREN	69
11.1. TEMPERATURMESSUNG MITTELS RFID-SENSOR-TRANSPONDER.....	69
11.2. KONVENTIONELLE PROZESSÜBERWACHUNG	70
11.3. MESSUNG RFID-SPEZIFISCHER PARAMETER	71
11.4. BAUTEILMAßHALTIGKEIT	72
11.5. BAUTEILSTABILITÄT	72
11.6. DYNAMISCHE DIFFERENZ-THERMOANALYSE (DSC)	73
11.7. LICHTMIKROSKOPIE	73
11.8. THERMOGRAFIE.....	74
11.9. STATISTISCHE AUSWERTUNG.....	74
12. EXPERIMENTE UND ERGEBNISSE	75
12.1. SYSTEMVERIFIKATION	75
12.1.1. <i>Sensorqualifikation</i>	75
12.1.2. <i>Kommunikation während und nach der Spritzgießverarbeitung</i>	80
12.1.2.1. Drahtloser Übertragungsweg	80
12.1.2.2. Kommunikation während des Spritzgießens	82
12.1.3. <i>Temperaturmessung während und nach der Spritzgießverarbeitung</i>	86
12.1.3.1. Kontakt Transponder/Kunststoff	86
12.1.3.2. Temperaturmessung während des Spritzgießprozesses.....	88
12.1.3.3. Temperaturmessung nach dem Spritzgießprozess	95
12.1.4. <i>Regelung des Spritzgießprozesses</i>	98
12.1.4.1. Entformungstemperatur.....	99
12.1.4.2. Kühlzeitregelung	100
12.2. BAUTEILVERIFIKATION.....	102
12.2.1. <i>Auswirkungen auf die Bauteilmaßhaltigkeit</i>	102
12.2.2. <i>Auswirkungen auf die Bauteilstabilität</i>	104
13. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	109
LITERATURVERZEICHNIS.....	113
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	125
DANKSAGUNG	127
BETREUTE STUDIENARBEITEN, STUDENT. MITARBEITERINNEN UND MITARBEITER.....	127
EIGENE PUBLIKATIONEN	129

1. Einleitung

In allen Bereichen der Kunststoffverarbeitung hat die Prozessüberwachung in den vergangenen Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen, mit dem Ziel eine Steigerung der Produktivität zu erreichen, Vorgaben bei der Prozessvalidierung zu erfüllen und letztlich eine ausreichende Bauteilqualität zu sichern (Alig, I. *et al.*, 2010), (Yang, Y. *et al.*, 2016). Zusätzlich werden im Kontext einer immer stärkeren Vernetzung der physischen und virtuellen Welt, oft mit den Schlagwörtern *Internet of Things* oder im industriellen Umfeld mit *Industrie 4.0* bezeichnet, auch die zusätzliche Individualisierung (McEwen, A. *et al.*, 2014, S. 73), Funktionsintegration und Vernetzung von anspruchsvollen technischen Kunststoffmassenbauteilen eine immer größere Rolle spielen (Hopmann, C. *et al.*, 2017b), (Seul, T. *et al.*, 2017), (Wortberg, J. *et al.*, 2017). Dies folgt den steigenden Anforderungen an moderne Werkstücke und Produktionswerkzeuge von passiven hin zu aktiven Objekten mit integrierter Sensorik und der Fähigkeit zur Datenerfassung und -weitergabe, um eine effektivere Qualitätsüberwachung, eine belastungsgerechte Prozessanpassung und eine insgesamt flexiblere Fertigung zu ermöglichen (Zäh, M. *et al.*, 2017, S. 295), (Denkena, B. *et al.*, 2017, S. 323).

Eine Massenfertigung dieser, vor allem thermoplastischen, Kunststoffbauteile wird durch das hochautomatisierbare und hochreproduzierbare Kunststoffspritzgießverfahren ermöglicht. Um dem Trend einer zusätzlichen Funktionsintegration in Kunststoffbauteile zu folgen, werden Einlegeteile aus unterschiedlichen Werkstoffen im sogenannten Hybrid- oder Montagespritzgießen in den Kunststoff eingebettet (Heinle, M., 2014). Durch das Umspritzen von einfachen Metallbauteilen wie Buchsen oder Gewindeeinsätzen bis hin zur Integration elektronischer Bauelemente wie z. B. Chips für die Radio Frequency Identification (RFID) oder ganzer elektronischer Baugruppen werden funktionskombinierte Bauteile mit niedrigem spezifischem Bauteilgewicht bei gleichzeitig geringem Nachbearbeitungs- bzw. Montageaufwand geschaffen. Zur Überwachung, Steuerung und Dokumentation der Qualität bei der Produktion hochwertiger Kunststoffbauteile ist die Integration von Sensorik in den Spritzgießprozess notwendig (Bühning-Polaczek, A. *et al.*, 2014), (Yang, Y. *et al.*, 2016). Besonders durch die bisher noch herausfordernde Modellierung der Schmelztemperatur als einer der Haupteinflussparameter im Spritzgießprozess werden experimentelle Methoden weiter forciert (Praher, B. *et al.*, 2014), (Gordon, G. *et al.*, 2015), (Hopmann, C. *et al.*, 2017c). Diese Messungen werden bisher drahtgebunden auf Seiten der Spritzgießmaschine bzw. im Formwerkzeug realisiert.

Ziel:

In dieser Arbeit wird eine Möglichkeit zur bauteilintegrierten, drahtlosen Prozessüberwachung mittels passiver RFID-Sensor-Tags im Sinne des Product Life Cycle Monitoring untersucht. Hierbei ist durch Trennung der Sensorik von der Spritzgießmaschine bzw. dem Werkzeug eine kombinierte Messung der Temperatur aus dem Bauteilinneren während der Herstellung und Verwendung mit dem gleichen Sensorelement möglich. Somit kann eine kontinuierliche Kontrolle bzw. Überwachung der Qualität des Kunststoffbauteils von Beginn der Herstellung an über den gesamten Lebenszyklus stattfinden und auch auf dem im Kunststoffbauteil befindlichen Chip dokumentiert werden. Diese zusätzlichen Informationen aus dem Bauteilinneren bieten einen Mehrwert für den ganzen Produktlebenszyklus, da sie zusätzlich dem Nachweis der spezifikationsgerechten Verarbeitung, Lagerung und Verwendung des Kunststoffbauteiles dienen. Zusätzlich kann das Kunststoffbauteil seinen eigenen Entstehungsprozess mittels der integrierten Sensorik und der Rückkopplung an die angeschlossene Auswertungs-/Steuerungsperipherie bzw. an die Spritzgießmaschine individuell von Schuss zu Schuss selbst beeinflussen. Durch direkte Prozessanpassungen können somit sensible Einlege-

teile vor zu hoher Beanspruchung geschützt und die Bauteilqualität auch bei schwankenden Prozessparametern sichergestellt werden.

Ein zusätzlicher Vorteil entsteht durch die Möglichkeit einer Individualisierung der Großserienproduktion durch das Beschreiben der Chips während des Herstellungsprozesses. Diese Bauteilidentifikation von Beginn der Herstellung an ist vor allem für die in der Medizintechnik geforderte Unique Device Identification (FDA Fed. Reg. 78(185), 2013), (EU Reg. 2017/745, 2017), d. h. der individuellen Nachverfolgung jedes Medizinproduktes, von Bedeutung.

Die Technologie der Radio Frequency Identification zur Trennung von Spritzgusswerkzeug und Sensorik wurde gewählt, da die mit Sensorfunktionalität ausgestatteten Transponder sich auch auf kleinem Bauraum kabellos und passiv mit Energie versorgen lassen und zudem automatisiert auslesbar bzw. beschreibbar sind. Die vollständige Integration der kompletten Sensorik in anspruchsvolle, technische und somit höherpreisige Kunststoffbauteile erscheint durch den sich fortsetzenden Trend immer weiter fallender Preise für passive RFID-Transponder (Eggmann, K. *et al.*, 2016) aufgrund besserer Technologien und steigender Stückzahlen auch wirtschaftlich sinnvoll möglich (siehe Abb. 1-1).

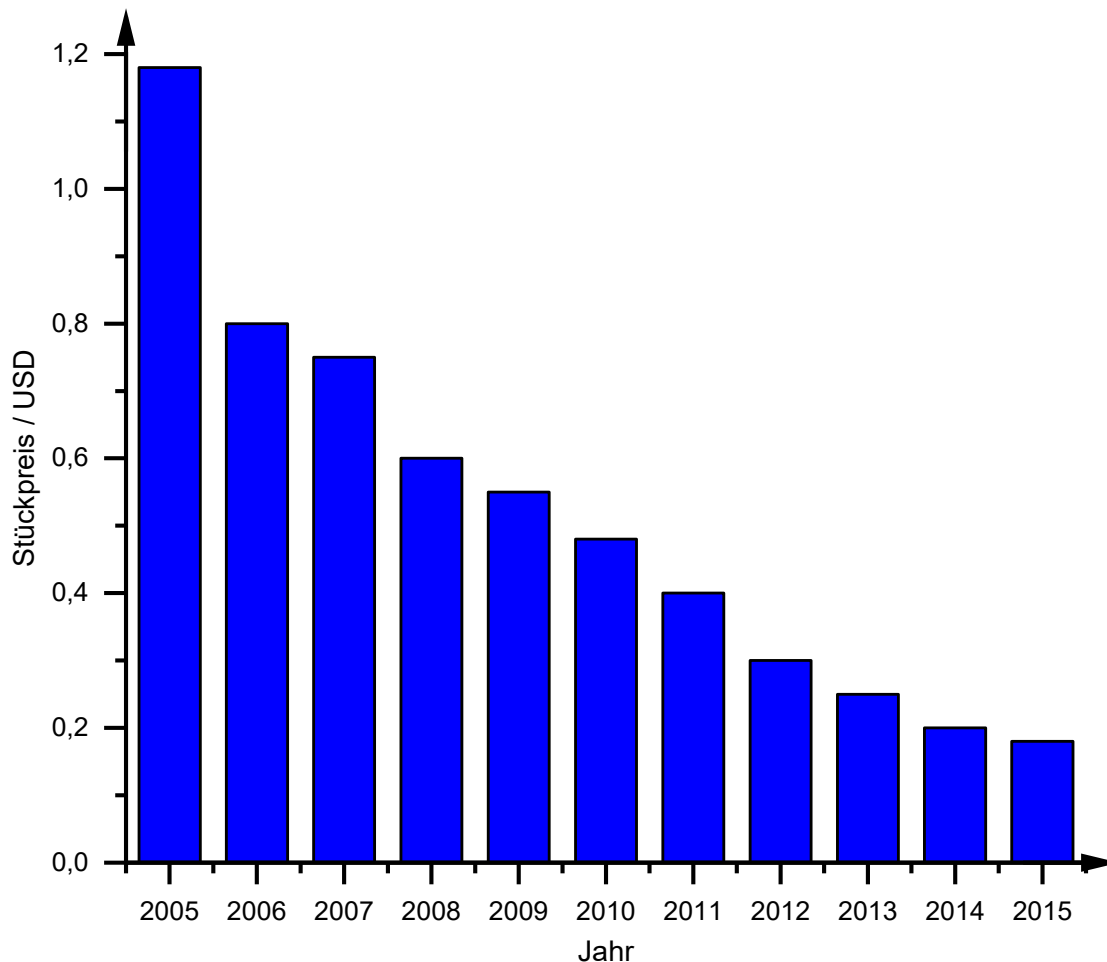


Abb. 1-1: Preisentwicklung passiver RFID-Transponder in US-Dollar nach (Eggmann, K. *et al.*, 2016).

2. Problemstellung

Im folgenden Kapitel werden das Prinzip des Kunststoffspritzgießens und die dabei relevanten Einflüsse auf den Prozess vorgestellt. Da vor allem die Temperatur eine wesentliche Rolle als Einflussparameter im Spritzgießprozess spielt, werden zum Abschluss des Kapitels die technischen Probleme bei deren Messung beschrieben und anschließend aktuelle Möglichkeiten zur technischen Temperaturmessung im Allgemeinen und speziell während des Spritzgießens im Abschnitt *Stand der Technik und Forschung* detailliert erläutert.

2.1. Prinzip Kunststoffspritzgießen

Das Verfahren des Kunststoffspritzgießens hat seine Anfänge bereits im 19. Jahrhundert, wobei die erste in Serie gebaute Spritzgießmaschine der noch heute meistverwendeten horizontalen Bauart mit vom Bediener aus rechtsseitiger Spritzeinheit und linksseitiger Schließeinheit auf die Firma Eckert & Ziegler im Jahr 1926 zurückgeht (Johannaber, F. *et al.*, 2004, S. 13). Seit 1956 das noch heute verwendete Schubschneckenkonzept eingeführt wurde (Bühning-Polaczek, A. *et al.*, 2014, S. 724), ist sowohl die Spritzgießmaschinenteknik als auch die Prozesstechnik ständig erweitert und optimiert worden. Das Spritzgießverfahren zeichnet sich vor allem durch den direkten und meist nachbearbeitungsfreien Weg vom Rohstoff zum fertigen Bauteil aus. Dies ermöglicht eine vollautomatisierbare und somit wirtschaftliche Produktion großer Stückzahlen mit einer hohen Reproduzierbarkeit auch bei komplexen Bauteilen. Das erreichbare Bauteilgewicht liegt dabei zwischen 10^{-6} bis 10^2 kg (Hopmann, C. *et al.*, 2017a, S. 144). Der Verband europäischer Kunststoffverarbeiter PlasticsEurope¹ gibt für 2017 eine weltweite Produktionsmenge von 348 Mio. t Kunststoff an, wobei der Hauptanteil auf thermoplastische Kunststoffe entfällt. In Bezug auf die erreichte Wertschöpfung bei der Fertigung technisch anspruchsvoller Bauteile liegt der Anteil der Spritzgießverarbeitung im Vergleich zu anderen Kunststoffverarbeitungsverfahren bei ungefähr 70 % (Bühning-Polaczek, A. *et al.*, 2014, S. 709). Wichtige Begriffe und Definitionen rund um das Spritzgießen sind in der DIN 24450 erfasst (DIN 24450, 1987).

Der Aufbau einer Standardspritzgießmaschine der horizontalen Bauart gliedert sich dabei in die Schließeinheit mit dem entsprechenden Spritzgusswerkzeug, eine Plastifizier- bzw. Einspritzeinheit mit Materialeinzug sowie den notwendigen Antrieben, Steuerungs- und Bedieneinheiten. Dies alles ist angeordnet auf dem Maschinenbett. Innerhalb der Plastifiziereinheit dient beim Standardspritzgießen eine 3-Zonen-Schnecke dem Aufschmelzen und Homogenisieren der als Schüttgut in Granulatform verfügbaren Thermoplaste. Die Schnecke unterteilt sich von der Schnecken spitze mit der dazugehörigen mechanischen Rückstromsperre weiter in die Meteringszone, die Kompressionszone und die Einzugszone. Unterstützt wird der dissipative Aufschmelzvorgang zwischen Zylinderwand und der sich drehenden Schnecke mit den darauf eingebrachten Schnecken gängen durch Konvektion von den außen am Plastifizierzylinder montierten Heizbändern. Typische Bereiche für die Verarbeitungstemperatur thermoplastischer Kunststoffe liegen zwischen 130 und 425 °C (Baur, E. *et al.*, 2007, S. 297/733). Für die Bewegung der Maschinenkomponenten und das Aufbringen der Schließkräfte haben sich hauptsächlich hydraulische oder elektrische, z. B. mit Kniehebelmechanik ausgestattete

¹ PlasticsEurope - Association of Plastics Manufacturers: „Plastics – the Facts 2018, An analysis of European plastics production, demand and waste data“, URL: <https://www.plasticseurope.org/en/resources/market-data>, Abrufdatum: 04.01.2019.

bzw. hybride Antriebskonzepte etabliert. Zusätzliche Peripheriesysteme wie zum Beispiel Trockner für das Granulat, Werkzeugtemperiergeräte oder Handling-Systeme unterstützen den Spritzgießprozess und sorgen für möglichst konstante und wirtschaftliche Fertigungsbedingungen. (Johannaber, F. *et al.*, 2004), (Bonten, C., 2014), (Bühring-Polaczek, A. *et al.*, 2014), (Hopmann, C. *et al.*, 2017a)

Das diskontinuierliche Verfahren des Spritzgießens gliedert sich im Wesentlichen in fünf Prozessschritte auf (siehe Abb. 2-1). Nach dem Schließen des Formwerkzeuges erfolgt mit angelegter Plastifiziereinheit das geschwindigkeitsgeregelte Einspritzen der zuvor bereits aufdosierten Kunststoffschmelze mittels einer axialen Bewegung der Schnecke bis zur volumetrischen Füllung der Kavität. Eine mechanische Rückstromsperre verhindert dabei das Zurückfließen der aufplastifizierten Kunststoffschmelze aus dem unter Druck stehenden Schnecken-
vorraum in die Schneckengänge. Der zum Einspritzen notwendige, meist mehrere hundert bis tausend bar umfassende Druck wird während des Einspritzvorganges über die Düse an das Werkzeug übertragen (Baur, E. *et al.*, 2007, S. 288). Zum Ausgleichen der Volumenschwindung beim Abkühlen der Schmelze, initiiert durch das Auftreffen auf die kältere Werkzeugwand, wird ein druckgeregelter, gegenüber dem Einspritzen reduzierter Nachdruck aufgebracht, bis der Anschnitt zum Bauteil versiegelt ist. Dadurch steigt der Fließwiderstand stark an und kein weiteres Material kann in die Kavität gefördert werden (= Siegelpunkt). Während der Restkühlzeit, die ein gleichmäßiges Abkühlen des Formteils garantieren soll, wird gleichzeitig wieder für den nächsten Schuss Material durch eine axiale und rotatorische Bewegung der Schnecke bei nun geöffneter Rückstromsperre in den Schnecken-
vorraum aufdosiert. Beim Dosieren sollten dabei mittels geeigneter Wahl der Schneckendrehzahl und des Staudruckes zu große Schergeschwindigkeiten vermieden, aber dennoch ein zeitsparender Prozess realisiert werden. Die Bereitstellung des Dosiervolumens, zusammengesetzt aus dem Schussvolumen und dem Restmassepolster, sollte über einen Dosierweg erfolgen, der ungefähr das Ein- bis Dreifache des Schneckendurchmessers beträgt (Bühring-Polaczek, A. *et al.*, 2014, S. 712). Dies geschieht unter Aufbau des Staudruckes, welcher auch für die Homogenisierung und die Entlüftung Richtung Granulateinzug notwendig ist. Nach der Bereitstellung einer ausreichenden Schmelzemenge wird die Schnecke entlastet, um eine Dekomprimierung der Schmelze zu ermöglichen. Nach Erreichen der Entformungstemperatur und der vollständigen Erstarrung wird das Werkzeug geöffnet und das nun formstabile Bauteil ausgeworfen. Je nach verarbeitetem Material und gewünschtem Prozessablauf kann optional das Plastifizieraggregat zur thermischen Trennung wieder vom Werkzeug abgehoben werden. Die zeitliche Kombination der einzelnen Prozessschritte, welche sich von wenigen Sekunden bis zu mehreren Minuten summieren können, wird als Zykluszeit bezeichnet und ist ein wesentlicher Faktor für die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens. (Johannaber, F. *et al.*, 2004), (Baur, E. *et al.*, 2007), (Bonten, C., 2014), (Bühring-Polaczek, A. *et al.*, 2014), (Hopmann, C. *et al.*, 2017a)

Zur Herstellung von Kunststoffbauteilen im Spritzgießverfahren ist ein Spritzgusswerkzeug notwendig, welches meist erst bei der Fertigung großer Stückzahlen oder entsprechend hochpreisiger Bauteile wirtschaftlich ist. Das Spritzgusswerkzeug steht dabei im Mittelpunkt der Bauteilherstellung. Es ermöglicht den gezielten Fluss der strukturviskosen Schmelze durch das Angussystem in die eingearbeiteten Kavitäten, widersteht durch seine stabile Auslegung dem Einspritzdruck und gibt somit dem erstarrenden Kunststoffbauteil seine Form. Die Werkzeugwand aus Stahl bzw. bei kleineren Stückzahlen auch aus Aluminium und die darin eingearbeiteten Kühlkanäle sorgen für eine gleichmäßige Wärmeabfuhr über ein durchgeleitetes Temperierfluid. Übliche Werkzeugtemperaturen im Thermoplastspritzgießen liegen zwischen 10-230 °C (Baur, E. *et al.*, 2007, S. 733). Die Integration weiterer Funktionselemente, wie beweglicher Schieber ermöglicht die Herstellung von Hinterschnitten oder sogar Gewinden im Bauteil. Mechanische oder pneumatische Auswerfer erlauben ein erleichtertes und automatisiertes Entformen.

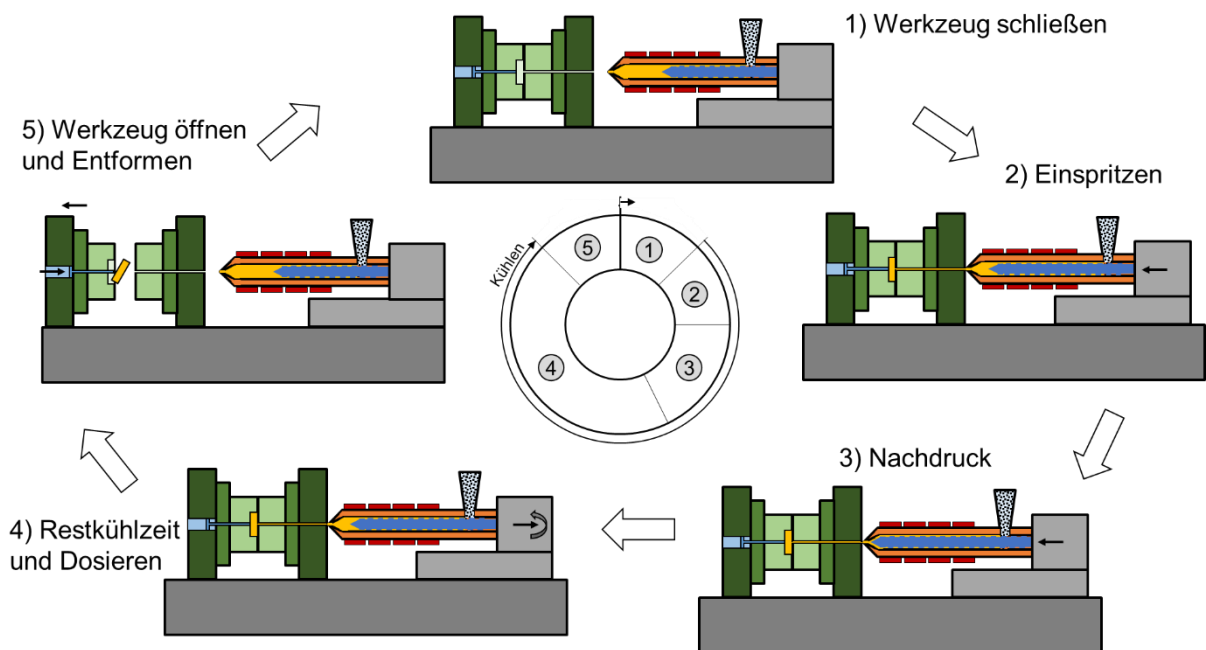


Abb. 2-1: Schematischer zeitlicher Verlauf der Prozessschritte beim Kunststoffspritzgießen.

2.2. Prinzip Montagespritzgießen

Funktionsintegrierte Kombinationen aus Kunststoffkomponenten und Metallen oder elektronischen Bauelementen durch Verbund-/Hybrid-/Montagespritzguss werden mittels im Werkzeug platzierter Einlegeteile realisiert. Dies wird nach DIN 8580 (DIN 8580, 2003) dem Fügen durch Urformen bzw. Einbetten (Umspritzen) zugeschrieben und meist über die in Abb. 2-2 schematisch dargestellte Insert-, Outsert- oder Hybridtechnik realisiert (Bühning-Polaczek, A. *et al.*, 2014, S. 877). Bei der Insert-Technik bildet die Kunststoffmatrix die tragende Hauptkomponente, in die einzelne Einsätze (z. B. Gewindebuchsen) eingebettet werden. Beim Umspritzen oder Anspritzen von Funktionselementen (z. B. Schnappverbindungen) an größere, meist vorstrukturierte metallische Elemente wie Bleche oder Platinen spricht man von der Outsert-Technik. Die Hybrid-Technik kombiniert die Verfahren der Blechumformung und des Kunststoffspritzgusses und nutzt so vorteilhafte Eigenschaften beider Verbundpartner, z. B. im Leichtbau durch die Versteifung profilförmiger Metallteile wie dünner Bleche mit Kunststoffrippen. Neben den funktionellen Vorteilen steigt auch die Wirtschaftlichkeit durch den hohen Automatisierungsgrad, den Wegfall von Montageschritten oder durch den selektiven Einsatz von teureren Materialkomponenten nur in bestimmten Bereichen. Dadurch kann zum Beispiel ein niedriges spezifisches Bauteilgewicht bei gleichzeitig guten mechanischen Eigenschaften erreicht werden. Allen drei Techniken ist gemeinsam, dass das zu integrierende Einlegeteil im Werkzeug positioniert und gehalten werden muss, was bedingt durch die Berührungspunkte mit dem Werkzeug nur eine teilweise Ummantelung mit Kunststoff erlaubt. Eine vollständige Integration des Einlegeteils ist z. B. durch erneutes Überspritzen des bereits erstarrten Kunststoffbauteiles inklusive Einlegeteil durch bewegliche Schieber im Werkzeug (Egger, P., 2007) oder durch bereits angebrachte/angespritzte Halteelemente aus Kunststoff am Einlegeteil möglich. (Johannaber, F. *et al.*, 2004), (Bühning-Polaczek, A. *et al.*, 2014, S. 877)

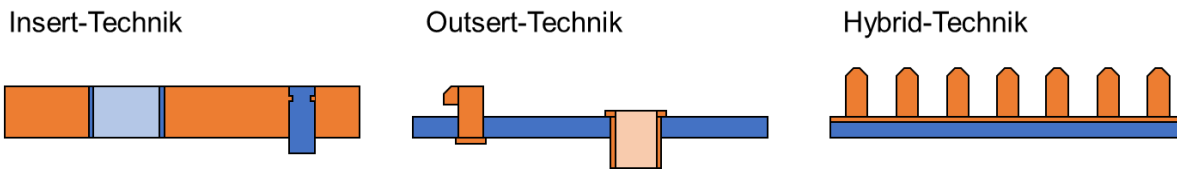


Abb. 2-2: Kombination von Metall- (blau) und Kunststoffkomponente (orange) im Montagespritzguss.

Die Eigenschaften dieser funktionsintegrierten und montagefreien Hybridbauteile, welche vor allem in Zusammenhang mit metallischen Einlegeteilen bekannt sind (Amancio-Filho, S. T. *et al.*, 2009), (Grujicic, M., 2014), (Lyu, M.-Y. *et al.*, 2015), kommen zunehmend auch für die Integration von elektronischen Komponenten in Kunststoffe in Frage. Hierbei kann der Vorteil eines hohen Freiheitsgrades in der Formgebung mit intelligenten Funktionen in den Kunststoffbauteilen, wie zum Beispiel Datenspeicherung oder Sensorik, ergänzt werden. Durch Folienhinterspritzung überspritzen Alajoki *et al.* auf Polyethylenterephthalat-Folie aufgedruckte Elektronik mit Polycarbonat (Alajoki, T. *et al.*, 2009). Weigelt kombiniert ebenfalls auf Polycarbonat-Folien gedruckte Elektronik mit einer Überspritzung aus Polycarbonat (Weigelt, K., 2013). Heinle präsentiert umfangreiche Untersuchungen zum Montagespritzgießen mechatronischer Komponenten, d. h. der direkten Überspritzung bestückter Platinen mit thermoplastischen Kunststoffen (Heinle, M., 2014). Frettlöh und Kollegen integrieren flache, spulenförmige RFID-Tags sowohl in duroplastisches Melamin mittels Hinterpresstechnik als auch in thermoplastisches PP mittels Spritzgießen (Frettlöh, V., 2015), (Frettlöh, V. *et al.*, 2016). Industriell bekannte Anwendungen sind zum Beispiel das Einspritzen von RFID-Etiketten in PE oder PP zur Kennzeichnung von Transportbehältern (Dreckschmidt, R., 2012) und die Integration von RFID-Tags in Behälter zur Laborautomation (Eggmann, K. *et al.*, 2016). Bisher auftretende Probleme bei der Integration von Elektronikkomponenten in Kunststoffe äußern sich meist bedingt durch die im Spritzguss herrschenden hohen Drücke und Temperaturen in mechanischen, thermischen und thermo-mechanischen Belastungen, z. B. durch Verzug, auf die sensiblen Einlegeteile (Weser, S., 2010), (Heinle, C. *et al.*, 2010), (Heinle, M. *et al.*, 2015). Zudem stellen Überspritzungen, Bindenähte und schwindungsbedingte Haftungsprobleme bzw. Undichtigkeiten Herausforderungen dar (Heinle, C. *et al.*, 2009). Dies wird unter anderem durch Oberflächenstrukturierung, eine geeignete Kunststoffauswahl, z. B. mit niedriger Viskosität und geeigneter Polarität, eine Vorwärmung des Inserts, Haftvermittler oder Oberflächenaktivierung durch Plasmaverfahren gelöst (Johannaber, F. *et al.*, 2004), (Vetter, M. *et al.*, 2011), (Bühning-Polaczek, A. *et al.*, 2014), (Frey, P. *et al.*, 2015a), (Frey, P. *et al.*, 2015b), (Kleffel, T. *et al.*, 2017).

2.3. Prozessparameter und Einflüsse beim Spritzgießen

Bedingt durch das strukturviskose Verhalten der makromolekularen Formmasse wird die Formteilbildung beim komplexen Verfahren des Spritzgießens durch verschiedene Parameter beeinflusst. Nach Johannaber und Michaeli (Johannaber, F. *et al.*, 2004, S. 312) können bis zu 85 verschiedene Prozessparameter Einfluss auf den Spritzgießprozess haben. Diese Einflüsse lassen sich in werkstoff-, maschinen-, werkzeug- und bauteilspezifische Parameter unterteilen und haben erhebliche Auswirkungen auf das Spritzgießergebnis bzw. das gefertigte Bauteil.

Der Kunststoffwerkstoff an sich weist ein komplexes Verhalten auf, welches unter anderem durch den Molekülkettenaufbau, das Kristallisations- und Relaxationsverhalten, Wasseraufnahme, Additive und Füllstoffe beeinflusst wird. Die zu beachtenden technischen Faktoren umfassen vor allem die Bauteilgeometrie, das daraus resultierende Werkzeugdesign und die für die maßgerechte Fertigung notwendigen Prozessparameter. Dies ist vor allem an der volumetrischen Schwindung als Differenz zwischen Kavitäts- (V_K) und Formteilmolumen (V_F) bzw. als Differenz zwischen spezifischen Volumen bei Umgebungsdruck (v_1) und bei Erreichen der Umgebungstemperatur (v_U) sichtbar. Die Ursache ist im Verhalten des Kunststoffes unter Druck und Temperatur begründet und wird am pV_T -Diagramm verständlich (siehe Abb. 2-3 und Formel 2-1, 2-2). Aus dem schmelzeartigen Zustand bei Umgebungsdruck (1) startet die volumetrische Formfüllung (1-2) und, eine Kompression der Schmelze bis zum maximalen Werkzeuginnendruck (2-3) bis zur Versiegelung des Anschnitts (4). Danach beginnt der isochore Druckabbau bis zum Umgebungsdruck (5, $T_{1\text{bar}}$), ein Abkühlen des Bauteils im Werkzeug bis zu seiner Entformungstemperatur (6, T_E) und außerhalb der Form bis zur Umgebungstemperatur (7, T_U). (Johannaber, F. *et al.*, 2004), (Kulkarni, S., 2017)

Die Gesamtschwindung des Kunststoffbauteiles setzt sich dabei zusammen aus der Verarbeitungsschwindung, welche nach DIN EN ISO 294-4 (DIN EN ISO 294-4, 2003) bzw. DIN 16742 (DIN 16742, 2013) in einem Zeitraum von 16-24 h nach der Herstellung aus der Differenz des Kavitätsmaßes (L_K) und des Formteilmaßes (L_F) gemessen wird, und der anschließenden Nachschwindung während Lagerung und Einsatz des Bauteiles (siehe Formel 2-3). Die Verarbeitungsschwindung wird dabei erheblich von der Bauteil-/Werkzeuggeometrie, dem Werkstoff und den Verarbeitungsparametern beeinflusst (Annicchiarico, D. *et al.*, 2014). Geometrische Einflussgrößen umfassen beispielsweise das Fließweg-Wanddicken-Verhältnis oder die Verteiler- und Anschnittgeometrie. Auch das Spritzgusswerkzeug beeinflusst die Schwindung, zum Beispiel ist die Schwindung in Fließrichtung meist niedriger als quer dazu. Eine stärkere Schwindung ist auch am Fließwegende zu beobachten, was durch die reduzierte Nachdruckwirkung erklärt werden kann. Zusätzlich kann eine äußere, durch geometrische Bedingungen im Werkzeug hervorgerufene, oder innere, durch Füllstoffe oder Molekülorientierungen resultierende Schwindungsanisotropie für unterschiedliche Abkühlbedingungen, Behinderung der Schwindung oder Eigenspannungen im Bauteil sorgen. (Johannaber, F. *et al.*, 2004), (Menges, G. *et al.*, 2007), (Meyer, B.-R. *et al.*, 2013), (Annicchiarico, D. *et al.*, 2014)

$$\text{Volumenschwindung im } pV_T\text{-Diagramm: } S_V = \frac{v_1 - v_U}{v_1} \times 100\% \quad \mathbf{2-1}$$

$$\text{Volumenschwindung am Formteil: } S_V = \frac{V_K - V_F}{V_K} \times 100\% \quad \mathbf{2-2}$$

$$\text{Verarbeitungsschwindung: } VS = \frac{L_K - L_F}{L_K} \times 100\% \quad \mathbf{2-3}$$

mit V_K : Kavitätsvolumen, L_K : Kavitätsmaß, V_F : Formteilmolumen, L_F : Formteilmaß, v_1 : spez. Volumen bei Umgebungsdruck, v_U : spez. Volumen bei Umgebungstemperatur

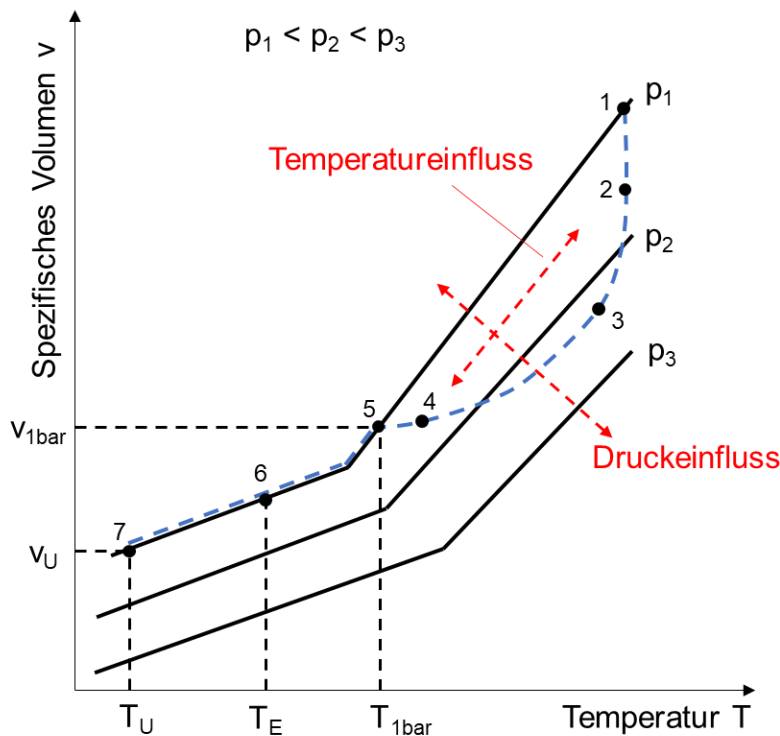


Abb. 2-3: Diagramm für den Zusammenhang zwischen Druck, spezifischem Volumen und Temperatur (pvT) während des Spritzgießens eines teilkristallinen Thermoplasten. Angepasst nach (Bühning-Polaczek, A. *et al.*, 2014, S. 783).

Hinsichtlich der für den Spritzgießprozess relevanten Prozessparameter identifiziert die Literatur Haupteinflussfaktoren und bewertet vor allem die Prozesstemperaturen und die Nachdruckparameter als kritisch für die Schwindung und die korrekte Bauteilbildung. Diese Faktoren lassen sich nach Annicchiarico und Alcock (Annicchiarico, D. *et al.*, 2014) bzw. Moser (Moser, S. *et al.*, 2009) unterteilen in die, aus an der Maschine einstellbaren, Zylindertemperatur resultierende Schmelze-/Formmasstemperatur, die am externen Temperiergerät vorgegebene Werkzeugtemperatur, die Einspritzgeschwindigkeit, die Nachdruckhöhe sowie -dauer und die Kühlzeit. Kulkarni berichtet zusätzlich von weiteren Einflüssen durch den sich aufbauenden Druck in der Einspritzphase, den Umschaltzeitpunkt zwischen Einspritzen und Nachdruck, den Nachdruckparametern an sich, und dosierabhängigen Einflüssen wie Schnecken-drehzahl, Staudruck und dem Schussgewicht (Kulkarni, S., 2017). Diese Einschätzungen der geschilderten Einflussparameter konnte auch durch eigene Untersuchungen nachvollzogen werden (Zeppenfeld, M. *et al.*, 2017c).

Die gewählte Einspritzgeschwindigkeit ist entscheidend für die volumetrische Formfüllung und auch für Qualitätsmerkmale wie Molekülorientierung, Oberflächen oder Kristallinität des Formteiles. Je nach gewählter Geschwindigkeit wird durch Strömungsverluste in Düse, Anguss, Anschnitt und Kavität auch Scherwärme in die Formmasse induziert, was zu einer Temperaturerhöhung führt. Johannaber und Michaeli geben pro 100 bar Druckverlust einen Temperaturanstieg von ca. 3-4 °C an (Johannaber, F. *et al.*, 2004, S. 320). Die Wanddicke des Formteiles bestimmt auch die erforderliche Einspritzgeschwindigkeit. So wird bei dünnen Teilen relativ schnell und bei dickwandigen Bauteilen eher langsam eingespritzt. Der sich in der Einspritzphase aufbauende Druck wirkt einer konstanten Einspritzgeschwindigkeit entgegen und kann bei ungenügender Maschinenregelung einen zusätzlichen Einfluss darstellen (Kulkarni, S., 2017, S. 139). Die auftretenden Schergeschwindigkeiten bewegen sich beim

Spritzgießen meist zwischen 10^1 - 10^4 1/s (Wang, M.-L. *et al.*, 2018, S. 162), wobei sich das Temperaturmaximum im Bauteil immer im Bereich des Schergeschwindigkeitsmaximums befindet (Bühning-Polaczek, A. *et al.*, 2014, S. 715).

Am Ende der volumetrischen Werkzeugfüllung steigt der Druck in der Kavität durch die Kompression der Schmelze sprunghaft an. An diesem Punkt muss von geschwindigkeitsgeregeltem Einspritzen auf druckgeregelten Nachdruck umgeschaltet werden, um eine Überlastung der Schließeinheit bzw. des Werkzeuges oder ein Überspritzen zu vermeiden (Kulkarni, S., 2017, S. 140). Durch ihre großen Anteile an der Kompensierung der Volumenkontraktion des Kunststoffes beim Abkühlen bilden die Nachdruckhöhe und die Nachdruckzeit weitere wichtige Prozessparameter beim Spritzgießen. Die Nachdruckhöhe richtet sich dabei nach den Druckverhältnissen in der Einspritzphase und wird meist zwischen 30-70 % des erreichten Einspritzdruckes gewählt (Bühning-Polaczek, A. *et al.*, 2014, S. 783). Der Nachdruck wird solange aufrechterhalten bis der Siegelpunkt erreicht ist, d. h. keine Formmasse mehr in die Kavität gefördert werden kann. Dabei wird zusätzlich zwischen Kompensations- und Haltephase unterschieden (Kulkarni, S., 2017, S.139). Ein direkter Zusammenhang zwischen Formteilbildungsprozess und Druckverlauf in der Kavität lässt sich durch einen an der Kavitätinnenwand mit geeigneter Drucksensorik erfassbaren Werkzeuginnendruck ableiten. Dieser korreliert mit dem Schussgewicht und gibt Hinweise auf Schwindung, Verzug, die resultierende Maßhaltigkeit und mögliche Formteilfehler. Aus diesem Grund wird der Werkzeuginnendruck oft zur Prozessüberwachung und als Regelparameter für die Nachdruckumschaltung verwendet (Bühning-Polaczek, A. *et al.*, 2014, S. 803). Bedingt durch die entscheidende Bedeutung der Nachdruckumschaltung und deren Wiederholgenauigkeit auf das Schussgewicht und die Bauteilqualität spielt die Überwachung und Regelung dieses Punktes besonders bei technischen und hochpräzisen Bauteilen vermehrt eine Rolle. Da zur Druckmessung im Werkzeug teure Sensorik benötigt wird, wurden in den vergangenen Jahren verstärkt maschinenseitige Systeme wie die iQWeightControl® (Engel Austria GmbH, Österreich) und die Adaptive Process Control® (KraussMaffei Technologies GmbH, München) entwickelt. Diese Systeme bieten eine kontrollierte und angepasste Nachdruckumschaltung auf Basis von Maschinendaten wie dem Druckverlauf während des Einspritzens (Schiffers, R. *et al.*, 2014), (Pillwein, G. *et al.*, 2012). So lässt sich mit diesen Regelungssystemen auf sich verändernde Maschinenparameter, Chargen-/Materialschwankung oder sich ändernde Produktionsbedingungen wie Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit reagieren.

Nach Auftreffen der Schmelze auf die temperierte Werkzeugwand beginnt die Formmasse abzukühlen. Die Zeitspanne bis zum quasi-statischen Zustand des Bauteiles und der daraufhin erfolgenden Bauteilentformung wird (physikalische) Kühlzeit genannt und beträgt ca. $2/3$ der Zykluszeit. Dabei korreliert die Kühlzeit quadratisch mit der Wandstärke des Bauteiles. Die Zeit, welche der Maschine als Wartezeit nach Beendigung des Nachdruckvorgangs vorgegeben wird, bezeichnet man als Restkühlzeit. Eine zu gering gewählte Restkühlzeit und eine Entformung vor der dimensionsstabilen Erstarrung kann ein verändertes Kristallisationsverhalten, einen erhöhten Verzug oder Verformungen am Bauteil durch die Auswerfer hervorrufen. Die Kühlzeit hängt von der Werkzeugtemperierung, dem verwendeten Werkstoff, den Verarbeitungsbedingungen und der Bauteilgeometrie ab. (Johannaber, F. *et al.*, 2004), (Bendada, A. *et al.*, 2007), (Schiller, G. F., 2018)

Nach Formel 2-4 kann die Kühlzeit t_k für eine Entformungstemperatur in Bauteilmitte $\widehat{\vartheta}_E$ aus der Differentialgleichung der eindimensionalen instationären Wärmeleitung abgeleitet werden (Johannaber, F. *et al.*, 2004, S. 375).

$$t_k = \frac{s^2}{a \pi^2} \ln \left(\frac{4}{\pi^2} \frac{\vartheta_M - \vartheta_W}{\widehat{\vartheta}_E - \vartheta_W} \right) \quad 2-4$$

mit: s = Plattendicke, a = Temperaturleitfähigkeit, ϑ_M = Massetemperatur beim Einspritzen, ϑ_W = Werkzeugwandtemperatur, $\widehat{\vartheta}_E$ = Entformungstemperatur in Formteilmitte

Für die Formteilqualität haben besonders die vorherrschenden Prozesstemperaturen eine entscheidende Bedeutung. Die Schmelzetemperatur bezeichnet die Temperatur der Formmasse (Massetemperatur) im vorderen Teil des mehrere Heizzonen umfassenden Zylinders, welche dann über die Düse in die Kavität eingespritzt wird. Dabei ändert sich durch die Konvektionswärme im Zylinder, die zusätzlich durch Schneckendrehzahl und Staudruck beeinflusste Friktion und durch entsprechende hohe Temperatur und Verweilzeit auch Eigenschaften wie Viskosität, Enthalpie und das spezifische Volumen der Kunststoffschmelze. Folglich wird die vorderste Heizzone gerade so eingestellt, dass durch eine niedrige Schmelzeviskosität der Einspritzvorgang optimal möglich ist, aber keine thermische Schädigung der Moleküle auftritt. Beachtet werden muss, dass sich die Massetemperatur wesentlich auf den Druckverlauf in der Kavität und somit auch auf das Schwindungspotential auswirkt. So ergibt eine höhere Temperatur der Schmelze eine gesteigerte Druckübertragung in die Kavität, einen höheren Werkzeuginnendruck und eine veränderte Schwindung des Bauteiles. Um die Schmelzetemperatur als wesentlichen Faktor im Spritzgießprozess auch für die Qualität des Spritzgussbauteiles besser zu beurteilen, wird oft eine Druck- oder Temperaturüberwachung des Schmelzezustands im Düsenbereich und vor allem im Werkzeug vorgenommen. Zu beachten ist jedoch, dass die Schmelzetemperatur durch unterschiedliche Temperaturverteilungen und durch Abkühlvorgänge einer der am schwierigsten zu überwachenden Parameter beim Spritzgießen ist (Kulkarni, S., 2017, S. 163). (Johannaber, F. *et al.*, 2004)

Die Werkzeugtemperatur beeinflusst wesentlich die Formteiloberfläche, den Einspritz- und Nachdruckvorgang, die Abkühlbedingungen der Formmasse und somit auch deren Kristallisation und Schwindung. Eine Reduzierung der Werkzeugtemperatur verringert besonders bei teilkristallinen Kunststoffen die Kristallisation und die Verarbeitungsschwindigkeit, kann aber eine verstärkte Nachkristallisation und -schwindung zur Folge haben. Durch eine gleichmäßige Temperierung sollen örtlich unterschiedliche Abkühlbedingungen vermieden werden, was insbesondere durch spezielle konturnahe Temperierkanalgeometrien auch für Bereiche mit Masseanhäufungen erreicht werden kann. Da die Temperierung der Kavitätinnenwand indirekt über in das Werkzeug eingebrachte Bohrungen und ein externes Temperiergerät realisiert wird, entsteht meist eine zeitliche Verzögerung in der Temperierung und ein periodischer Wechsel zwischen eingestellter Werkzeugwandtemperatur und der Kontakttemperatur beim Auftreffen der Schmelze. Die Werkzeugwandtemperatur wird als weiterer Qualitätsindikator deswegen oft durch in der Werkzeugwand platzierte Sensorik überwacht. Durch diese Art der Temperaturmessung kann auch die genaue Position der Schmelze innerhalb der Kavität bestimmt werden (Steinko, W. *et al.*, 2008). Die Wandtemperatur steht zusätzlich in Zusammenhang mit dem Abkühl- bzw. Kristallisationsverhalten in der Kavität, der maximal möglichen Fließweglänge, realisierbaren Wandstärken, der Abformgenauigkeit, Oberflächengüte und mechanischen Eigenschaften des Formteiles. Höhere Werkzeugwandtemperaturen erlauben dabei eine langsamere Wärmeabfuhr, ein vor allem bei teilkristallinen Thermoplasten geordnetes, kristallines Gefüge und die Vermeidung von eingefrorenen Spannungen. Sie erhöhen jedoch die Zykluszeit durch eine Verzögerung der Erstarrung der Kunststoffschmelze. (Menges, G. *et al.*, 2007), (Johannaber, F. *et al.*, 2004), (Hopmann, C. *et al.*, 2017a), (Bühning-Polaczek, A. *et al.*, 2014, S.802)

2.4. Technische Problemstellung

Die Prozessüberwachung gewinnt in allen Bereichen der Kunststoffverarbeitung durch wirtschaftliche Bestrebungen und Qualitätsvorgaben immer mehr an Bedeutung. Nach Yang et al. (Yang, Y. *et al.*, 2016, S. 251) ist speziell bei der Fertigung von Kunststoffbauteilen mittels Spritzgießen die Online-Qualitätsüberwachung des Prozesses von entscheidender Bedeutung. Besonders bei technisch anspruchsvollen und stark beanspruchten Bauteilen ist die Prozessüberwachung zur Qualitätskontrolle oft unabdingbar und gewinnt mit der Integration anspruchsvoller, sensibler und hochpreisiger Einlegeteile weiter an Bedeutung.

Besonders die direkt im Prozess integrierbaren und bauteilnahen, sogenannten In-line Messmethoden rücken immer mehr in den Fokus (Alig, I. *et al.*, 2010), (Yang, Y. *et al.*, 2016). Neben der Messung von Werkzeuginnendrücken ist vor allem die Temperatur in Form der Werkzeugwandtemperatur und der Schmelzetemperatur ein bedeutender Prozessparameter (Bühning-Polaczek, A. *et al.*, 2014, S. 800). Dabei ist die Überwachung der Temperatur bei der Einrichtung des Prozesses und zur Prozesskontrolle/-optimierung sowohl von wirtschaftlichem als auch wissenschaftlichem Interesse, um neben dem Abkühlverhalten z. B. Molekülorientierung, Kristallisation, Schmelzeviskosität, Eigenspannungen oder das Schwindungs-/Verzugsverhalten des Kunststoffes und somit die finale Bauteilqualität einschätzen und beeinflussen zu können (Menges, G. *et al.*, 2007), (Bühning-Polaczek, A. *et al.*, 2014), (Yang, Y. *et al.*, 2016), (Kulkarni, S., 2017). Insbesondere die Temperatur der Schmelze bzw. Formmasse wird in der Literatur als entscheidend für das Schwindungsverhalten während (Verarbeitungsschwindung) und nach (Nachschwindung) dem Spritzgießen angesehen (Johannaber, F. *et al.*, 2004), (Steinko, W. *et al.*, 2008), (Kazmer, D. O., 2009), (Meyer, B.-R. *et al.*, 2013), (Yang, Y. *et al.*, 2016), (Kulkarni, S., 2017).

Dies verdeutlicht wie wichtig eine genaue Überwachung der Temperaturen, insbesondere der Schmelzetemperatur zur Qualitätsüberwachung im Spritzgießprozess ist. Wegen der beim Spritzgießen auftretenden hohen Kühlraten, dem komplexen Wärmetransfer und den Kristallisationsprozessen ist der Prozess durch Modelle nur schwer zu beschreiben (Praher, B. *et al.*, 2014), (Gordon, G. *et al.*, 2015), (Hopmann, C. *et al.*, 2017c). Dies macht eine messtechnische Verifizierung unumgänglich. D. h. Kenntnisse über die genauen Temperaturverhältnisse im realen Bauteil während des Spritzgießprozesses unterstützen bei der Modellbildung und dessen Optimierung bzw. Evaluation. Jedoch zeigt sich die direkte Messung der Schmelzetemperatur im Spritzgießprozess als aufwändig, da die notwendige Sensorik starken Belastungen ausgesetzt wird (Johannaber, F. *et al.*, 2004, S. 962). Außerdem ist nicht nur eine Messung der Temperatur während des Spritzgießprozesses notwendig. Auch die Erfassung der sich nach der Entformung verändernden Wärmeleit-/Abkühlbedingungen, welche sich über Nachschwindung und Bauteilverzug auf die Maßhaltigkeit auswirken, bleibt von Bedeutung (Kulkarni, S., 2017), (Meyer, B.-R. *et al.*, 2013). D. h. eine Überwachung der Temperatur des Formteiles ist auch nach der Entformung sinnvoll, da die Schwindungsrate direkt proportional zur Temperatur des Formteiles korreliert (Kulkarni, S., 2017, S. 107) und somit auch während der Abkühlung und weiteren Lagerung nachvollzogen werden könnte.

Da die Kühlzeit ca. 80 % der Zykluszeit ausmacht (Dubay, R. *et al.*, 2006) erweist sich eine möglichst schnelle und effektive Bauteilkühlung für eine hohe Produktivität als erforderlich. Dabei ist aber auch eine optimale Entformung des Kunststoffteiles nach kompletter Erstarrung für Dimensionsstabilität, Verzugsverhalten, Haftung und Steifigkeit bzw. Festigkeit des Kunststoffbauteiles entscheidend (Johannaber, F. *et al.*, 2004). Über eine Messung der Schmelzetemperatur im Formteil könnte somit der Erstarrungsvorgang, die notwendige Kühlzeit und die geeignete Entformungstemperatur der Kunststoffschmelze beurteilt werden.

3. Stand der Technik und Forschung

Wie in Abschnitt 2 gezeigt sind Temperaturen essenzielle Prozessparameter beim Kunststoffspritzgießen. In diesem Abschnitt werden aktuelle Ansätze zur bauteilnahen Modellierung und Messung der Schmelze- bzw. Formmasstemperatur während und nach der Spritzgießverarbeitung vorgestellt. Dazu werden zuerst allgemein Möglichkeiten zur Messung von Temperaturen im technischen Umfeld beschrieben. Für die konkrete Temperaturüberwachung des Kunststoffbauteiles während des Formbildungsprozesses und danach sind Verfahren und die dazugehörige Literatur berücksichtigt, welche als Stand der Technik bezeichnet werden können oder durch verschiedene Forschungsgruppen evaluiert wurden.

3.1. Technische Temperaturmessverfahren

Bei der Temperatur, als eine der wichtigsten technisch-physikalischen Größen handelt es sich um eine intensive Größe, welche nur indirekt nach Wandlung in eine andere Größe gemessen werden kann. Die thermodynamische Temperatur T definiert sich aus dem von Lord Kelvin interpretierten Carnotschen Kreisprozess oder nach Planck. Sie kann durch primäre Messung, über natürliche Konstanten beschriebene physikalische Zusammenhänge, oder sekundäre Messung mit Kalibrierung an definierten Temperaturfixpunkten erfolgen. Ein Kelvin als Basiseinheit der thermodynamischen Temperatur T ist dabei nach der Internationalen Praktischen Temperaturskala IPTS-48 über den Tripelpunkt des Wassers T_{WTP} definiert, ist aber auch nach moderner Definition über die Boltzmann-Konstante ableitbar. (Bernhard, F., 2014)

$$1 K = \frac{T_{WTP}}{273,16}$$

Da jedoch die primäre Messung der thermodynamischen Temperatur, z. B. über Gasthermometer, mit einem großen experimentellen Aufwand und einer hohen Messunsicherheit verbunden ist wird meist auf praktikablere Temperaturskalen wie die Celsius-Skala zurückgegriffen. Die Celsius-Temperatur ϑ als praktischere messtechnische Größe ist über die Basiseinheit Kelvin definiert. Da Temperaturdifferenzen in Kelvin und Celsius betragsmäßig gleich sind, wird empfohlen diese in der Basiseinheit Kelvin anzugeben. Gemessene Temperaturdifferenzen werden meist mit ΔT , Temperaturmessfehler mit δT bezeichnet. (Bernhard, F., 2014)

$$\vartheta = T - T_0 \qquad T_0 = 273,15 K$$

Bei den Temperaturmessverfahren wird zwischen unmittelbaren und mittelbaren Verfahren unterschieden. Unmittelbare Verfahren nutzen eine andere Messgröße, z. B. über auftretende Thermospannungen, am gleichen Objekt, um dessen Temperatur abzubilden und beeinflussen das Messobjekt somit nicht. Da oft die Bedingungen für eine unmittelbare Messung wie die ausreichende Messbarkeit, zeitliche Konstanz, Unempfindlichkeit und Homogenität der temperaturbeschreibenden weiteren Stoffeigenschaft nicht gegeben ist, wird mittelbar durch thermische Kopplung, z. B. mit Berührungsthermometern, gemessen (Bernhard, F., 2014). Thermometer folgen dabei den Gesetzen des Wärmetransportes, was einen genügend langen und intensiven Wärmeaustausch zwischen Messobjekt und Thermometer bzw. der Umgebung bedingt. Da dieser Wärmeaustausch neben der Wärmeleitung auch über Konvektion bzw. Wärmestrahlung erfolgen kann, ist nicht unbedingt ein mechanischer Kontakt mit dem Messobjekt notwendig. Das erste Glied der Messkette ist dabei der Temperatursensor, auch Pri-

märwandler genannt, welcher meist den arithmetischen Mittelwert der Temperatur am Sensor in eine Abbildungsgröße umwandelt. Darauf folgen der Sekundär- und eventuell weitere Wandler, die eine weitere Verstärkung oder Umwandlung des Signals vornehmen. Ein Linearisierungs- bzw. Digitalisierungselement vor der eigentlichen Messwertverarbeitung hilft bei der Skalierung und der Korrektur systematischer Messfehler. Absolute und relative Messfehler bei Berührungsthermometern entstehen vor allem durch Einflüsse auf den Wärmeaustausch zwischen Messobjekt und Thermometer bzw. der Umgebung. So kann die thermische Kopplung zur Umgebung und zum Messobjekt ein durch die Temperaturwechselgeschwindigkeit beeinflusstes, dynamisches oder statisches Messverhalten hervorrufen, welches z. B. durch herstellungsbedingte Unterschiede von Sensorkennlinie zu Sollkennlinie, Sensordrift, Kalibrierfehler oder Nichtlinearitäten beeinflusst wird. Thermische Rückwirkungen durch den Sensor, d. h. eine Änderung der Energiebilanz des Messobjektes, Alterung, Umgebungseinflüsse, wie z. B. Vibrationen oder Feuchte, Einflüsse durch Temperatenausgleich sowie Wärmeableitung oder Eigenerwärmung durch am Sensor umgesetzte Leistung können weitere Fehler verursachen. Der Gesamtmessfehler ergibt sich dabei durch Addition aller Einzelkomponenten, was auch Übertragungsleitungen, Transmitter, Verstärker und Analog-Digital-Wandler und weitere Bauelemente der Messkette miteinschließt. (VDI/VDE 3511, 1996), (DIN 16160, 1990), (Bernhard, F., 2014)

Tabelle 1: Orientierende Übersicht über relevante Möglichkeiten der technischen Temperaturmessung. In Klammern sind zulässige (meist kurzzeitige) Einsatzbereiche angegeben.

Typ	Messprinzip	Messbereich / °C
Flüssigkeitsthermometer	Thermometrische Flüssigkeit	-200 ... 1000 ^{2, 3}
Metall-Ausdehnung	Thermobimetall	-50 ... 400 ²
Gas-Thermometer	Gasexpansion	-60 (-200) ... 600 (700) ²
Thermoelement	Peltier-/Thompson-/Seebeck-Effekt	-200 ... 1700 ²
Widerstandsthermometer	Widerstandsänderung	-200 – 850 (1100) ²
Thermistor	Widerstandsänderung	-50 (100) ... 200 (400) ³
Flüssigkristalle	Änderung optischer Eigenschaften	-30 – 115 ³
Elektronische (IC) Sensoren	Spannungsänderung in Halbleitern	-75 ... 150 ² (200)
Akustische Verfahren	Änderung Schallgeschwindigkeit	-200 ... 1700 ²
Faseroptische Sensoren	Änderung optischer Eigenschaften	-200 ... 1700 ²
Strahlungsthermometer	Elektromagnetische Strahlung	-100 ... 3500 ⁴
Thermografie	Direkte Infrarotstrahlung	-50 ... 1500 ²
Pyrometer	Strahlungsvergleich	0 ... 3000 ⁵

² (Bernhard, F., 2014, S. 5)

³ (Fonseca, G. E. *et al.*, 2009)

⁴ (VDI/VDE 3511, 1996)

⁵ (Kazmer, D. O., 2009)

Zur konkreten Bestimmung der Temperatur wurden verschiedenste Arten von Thermometern, beruhend auf unterschiedlichen physikalischen Effekten, entwickelt. Mechanische Berührungsthermometer, wie z. B. Metall-Ausdehnungsthermometer, Flüssigkeits-Glasthermometer oder Flüssigkeits-/Gasdruck-Federthermometer nutzen das Prinzip der Längen- bzw. Volumenänderung von Festkörpern, Flüssigkeiten oder Gasen bei Temperaturänderung und werden meist bei Einzelmessstellen bzw. als redundante Messsysteme zu anderen Thermometertypen genutzt. Dabei zeichnen diese Thermometer vor allem die Hilfsenergiefreiheit, ihre Zuverlässigkeit und Messgenauigkeit, die geringen Beschaffungs- und Wartungskosten und die Unbeeinflussbarkeit durch elektrische oder magnetische Felder aus. (Bernhard, F., 2014)

Zu den Temperaturmessverfahren, die auf elektrischen Effekten beruhen, gehören unter anderem Widerstandsthermometer, Thermoelemente, Rauschthermometer, frequenzanaloge Temperatursensoren und elektronische Temperatursensoren. Ein prinzipieller Unterschied zu den mechanischen Berührungsthermometern besteht in der Notwendigkeit einer Energieversorgung und der Möglichkeit einer direkten elektronischen Datenweiterverarbeitung. Widerstandsthermometer nutzen die Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von der Temperatur und werden wegen ihrer verschiedenen Bauformen und Genauigkeiten um $\pm 0,01$ °C (Fonseca, G. E. *et al.*, 2009) gerne im industriellen Umfeld, z. B. bei Tieftemperaturanwendungen, genutzt. Als Werkstoffe werden hauptsächlich Platin, aber z. B. auch Nickel, Kupfer, Rhodium-Eisen, Silizium, Germanium oder Carbon verwendet. Übliche Ausführungen umfassen Drahtmesswiderstände, Folien-/Flachmesswiderstände in Dickschicht- bzw. Dünnschichtbauweise, Nutenwiderstandsthermometer, Halbleiter-Widerstandsthermometer oder Thermistoren mit negativem (NTC) oder positiven (PTC) Temperaturkoeffizienten. Thermistoren bestehen meist aus Halbleitern, Metalloxiden oder Oxidkeramiken und zeichnen sich durch ihre geringen Kosten und Abmessungen, eine hohe Empfindlichkeit, Genauigkeiten um $\pm 0,01$ - $0,05$ °C (Fonseca, G. E. *et al.*, 2009) und einen größeren Widerstandsbereich verglichen mit Metall-Widerstandsthermometern aus. Die Eigenerwärmung stellt bei Widerstandsthermometern die wichtigste Fehlerursache dar.

Die thermoelektrische Temperaturmessung mit Thermoelementen basiert auf der Entstehung einer Thermospannung bei Temperaturänderung beruhend auf dem Peltier-, Thomson- oder Seebeck-Effekt mit Genauigkeiten um $\pm 0,4$ % (Fonseca, G. E. *et al.*, 2009). Die Verbindung zweier thermoleitender Materialien, z. B. Metalle, Halbleiter oder Supraleiter zu einer Leerschleife, ermöglicht die Messung eines elektrischen Potentials zwischen zwei Vergleichsstellen. Eine häufig eingesetzte Bauform kombiniert eine Vergleichs- und Anschlussstelle und ermöglicht somit eine kompakte Bauform. Als Kombinationsmaterialien werden oft Edelmetalle wie Platin, Nichtedelmetalle wie Eisen, Kupfer, Kupfer-Nickel bzw. Nickel-Chrom-Verbindungen oder hochtemperaturresistive Metalle wie Wolfram eingesetzt. Vorteile von Thermoelementen sind ein geringer Messfehler, eine schnelle Reaktion auf Temperaturänderungen und ihre kompakte Bauform, weswegen sie häufig zur Messung der Werkzeugwandtemperatur im Kunststoffspritzgießen genutzt werden. (Bernhard, F., 2014)

Weitere Temperaturmessverfahren mit elektrischem Messprinzip umfassen auf der Nyquist-Gleichung basierende Rauschthermometer, welche bei extremen industriellen Bedingungen zum Einsatz kommen, aber einen großen messtechnischen Aufwand mit sich bringen. Ebenfalls zu erwähnen sind frequenzanaloge Temperatursensoren, welche sich die temperaturabhängige Änderung einer Frequenz zu Nutze machen. Ein Anwendungsbeispiel sind akustische Oberflächenwellen-Sensoren, die sich durch eine störungsarme Signalübertragung, einfache Digitalisierbarkeit und die Möglichkeit zur drahtlosen Signalübertragung auszeichnen. Ebenfalls zu den frequenzanalogen Verfahren zählt die akustische Temperaturmessung, welche die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Temperatur nutzt. Dabei muss beachtet werden, dass die Schallgeschwindigkeit, z. B. in einer Flüssigkeit, auch von der Dichte und somit nicht nur von der Temperatur, sondern auch vom Druck abhängig ist. Es wird zwischen

nichtresonanten, z. B. durch Laufzeitmessung eines Ultraschallpulses und resonanten Verfahren unterschieden, welche über die oszillatorische Anregung eines Fluides in einem Rohr arbeiten. Anwendungsgebiete für akustische Messverfahren liegen meist in problematischen Umgebungen, z. B. bei sehr niedrigen oder hohen Temperaturen, aggressiven Medien oder starker Strahlung. Ein konkretes Beispiel hierfür ist die Schallstrahl-/Temperatur-Tomografie zur Temperaturmessung in Verbrennungsräumen. (Bernhard, F., 2014)

Die auch in dieser Arbeit genutzten, auf Halbleiterstrukturen wie Dioden oder Transistoren basierenden elektronischen Temperatursensoren bieten den Vorteil, dass sie durch ihre Miniaturisierbarkeit auch in komplexe Schaltkreise mit direkter Signalweiterverarbeitung und entsprechend geringer Störanfälligkeit integrierbar sind. Die Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit eines Halbleiters vom Übertritt von Elektronen bzw. Löchern in das Leitungsband wird genutzt, um wahlweise bei konstanter Stromstärke oder dem Umschalten zwischen zwei Stromstärken eine Spannung zu messen (siehe Abb. 3-1). Diese Messung der Flussspannung/Durchlassspannung am p-n-Übergang einer Diode oder der Basis-Emitterspannung eines Transistors bei Temperaturänderung dient dabei als Referenz und Abbildungsgröße der Temperatur, welche ungefähr mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ bestimmt werden kann (Fonseca, G. E. *et al.*, 2009). Durch das vorteilhafte lineare Verhältnis zwischen Spannung und Temperatur werden einige Bauarten dieser Sensoren auch als „Proportional To Absolute Temperature“ (PTAT) Sensoren bezeichnet. (Bernhard, F., 2014), (Stiny, L., 2016)

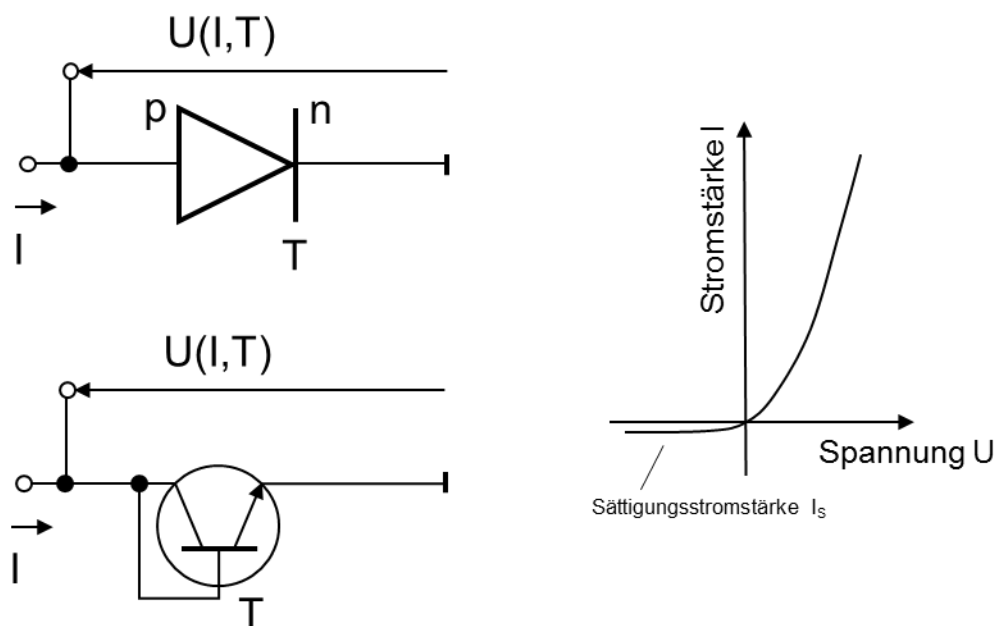


Abb. 3-1: Symbolbild einer Diode bzw. eines Transistors und schematischer Verlauf der U-I-Kennlinie des p-n-Übergangs. Zur Temperaturbestimmung wird die temperaturabhängige Durchlassspannung $U(I, T)$ am p-n-Übergang genutzt. Angepasst nach (Bernhard, F., 2014, S. 1087).

Eine auf optischen Prinzipien beruhende Messmethode nutzen faseroptische Thermometer, z. B. Lumineszenz-Temperatursensoren, Strahlungsthermometer mit Faseroptik, Raman-Temperatursensoren oder Messungen über Faser-Bragg-Gitter. Vorteile sind die hohe Messempfindlichkeit, Genauigkeiten um $\pm 0,1$ °C (Fonseca, G. E. *et al.*, 2009), Einsatzmöglichkeiten in rauen Umgebungen, die Unempfindlichkeit gegen elektromagnetische Felder, die geringe Wärmekapazität und somit auch geringe Wärmeableitung der Faseroptiken.

Eine weitere Möglichkeit der Temperaturmessung kann über eine Bestimmung der bei Erwärmung vom Messobjekt emittierten elektromagnetischen Strahlung erfolgen. Diese nach dem fotometrischen Grundgesetz arbeitenden Strahlungsthermometer ermöglichen berührungs- und rückwirkungsfreie Temperaturmessungen von -200° bis zu 3500° Celsius, z. B. an beweglichen oder empfindlichen Objekten. Die strahlungsphysikalischen Eigenschaften, d. h. der Grad der Absorption, Transmission oder Reflexion am zu messenden Objekt spielen dabei eine besondere Rolle. So wird bei transparenten oder semitransparenten Körpern die Strahlung nicht nur von der Oberflächentemperatur beeinflusst, sondern die Temperatur tieferliegender Schichten kann ebenfalls detektiert werden. Dies ist hingegen bei nichttransparenten Stoffen nicht möglich. Mögliche Einflüsse durch Fremdstrahlung, vor allem durch die Umgebung, müssen ebenfalls beachtet werden. Im Gegensatz zu der bei den Strahlungsthermometern begrenzten Messfläche ermöglichen thermografische Messmethoden die Messung und bildliche Darstellung örtlicher Temperaturverteilungen mit Genauigkeiten um ± 2 °C (Fonseca, G. E. *et al.*, 2009). Die Strahlung aus dem Infrarot-Bereich wird zur besseren Visualisierung in den sichtbaren Bereich umgewandelt. Diese Methode wird dabei meist für die Erkennung von Temperaturdifferenzen, zum Beispiel bei der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, eingesetzt. Bei sehr hohen Temperaturen über 2000 K, wie in Plasmen oder Lasern, kommt die spektroskopische Temperaturmessung zum Einsatz. Diese Methode nutzt die Messung der Strahldichte eines sehr schmalen Wellenlängenbereiches, der bei diesen Temperaturen in Form von Spektrallinien ausgesandt wird. (Bernhard, F., 2014)

Somit stehen eine Vielzahl von Verfahren zur technischen Temperaturmessung, mit teilweise aufwendigen Prüf- und Kalibrierverfahren, unterschiedlichen Messbereichen sowie spezifischen Messunsicherheiten zur Verfügung, deren geeignete Auswahl auf den Anwendungsfall abgestimmt werden muss. Eine orientierende Übersicht ist in Tabelle 1 dargestellt.

3.2. Temperaturüberwachung während des Spritzgießens

Aktuell verfügbare oder sich in Entwicklung befindliche Verfahren zur mittelbaren, bauteilnahen Temperaturmessung während des Spritzgießprozesses können in invasive oder nichtinvasive Ansätze unterschieden werden (Hopmann, C. *et al.*, 2017c), (Ogorodnyk, O. *et al.*, 2018). Die Invasivität bezeichnet dabei das Eindringen des notwendigen Messwertaufnehmers (Sensors), z. B. von Berührungsthermometern, optischen oder akustischen Systemen in die Kunststoffschmelze. Zusätzlich bieten auch modellbasierte Ansätze, wie numerische Simulation, die Möglichkeit einer qualitativen Einschätzung des Formteilbildungsprozesses, können aber nicht die reale Messung ersetzen (Praher, B. *et al.*, 2014), (Gordon, G. *et al.*, 2015), (Hopmann, C. *et al.*, 2017c). Eine Übersicht über aktuell im Stand der Technik und Forschung vorhandene Verfahren ist in Abb. 3-2 dargestellt. Hierbei ist anzumerken, dass während des Spritzgießprozesses bisher vor allem lokal begrenzte Messmethoden, wie Thermoelemente oder thermografische Sensoren zur Anwendung kommen. Methoden zur Messung von Temperaturprofilen während des Prozesses befinden sich noch im Forschungsstadium (Abeykoon, C., 2016), (Hopmann, C. *et al.*, 2017c). Die messtechnisch erforschten Analysemethoden sind in Tabelle 2 kommentiert.

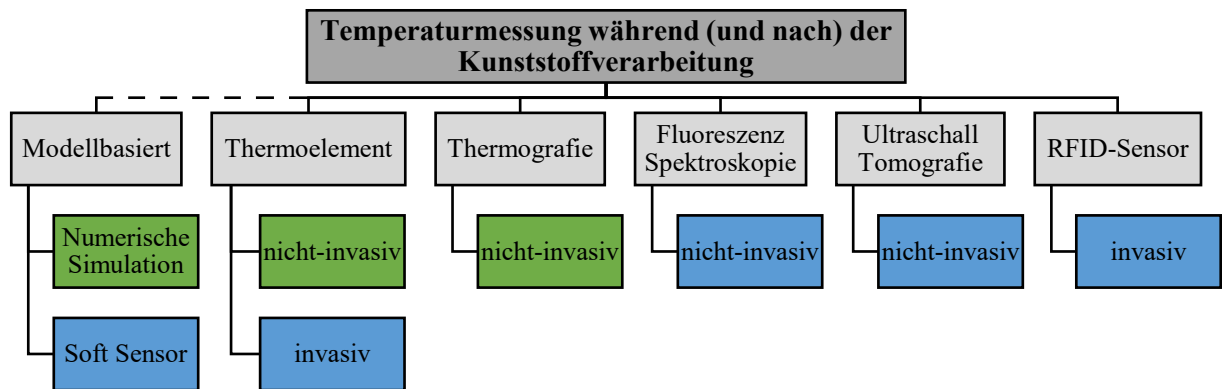


Abb. 3-2: Auszug aktuell als Stand der Technik verfügbarer (grün markiert) oder im Forschungsstadium befindlicher (blau markiert) Möglichkeiten zur Überwachung der Bauteiltemperatur während und teilweise auch nach (v.a. mittels Thermografie) der Kunststoffverarbeitung bzw. dem Spritzgießprozess.

Tabelle 2: Überblick über messtechnische Methoden aus dem Stand der Technik und Forschung zur Messung der Temperatur während und nach der Spritzgießverarbeitung ($|t|$ = gemessene Temperatur in °C).

Messmethode	Temperaturmessung		Messbereich / °C	Genauigkeit	Kommentar
	während Prozess	nach Prozess			
Thermoelement	Nicht-invasiv, werkzeuggestanden	/	< 450 ⁶	$\pm 1,5 \text{ °C}^6 \pm 0,25\%^7$ $\cong \pm 1,75 \text{ °C}$ ($ t = 100 \text{ °C}$)	Lokale Messung am Bauteilrand, Einflüsse durch Werkzeugmaterial
Thermoelement	Invasiv, drahtgebunden	Drahtgebunden	< 320 ⁸	N.A.	Beeinflussung Schmelzfluss und Entformung
Thermografie	Nicht-invasiv, werkzeuggestanden	An Bauteiloberfläche	50–400 ⁹	$\pm (0,003 * t + 2)^9$ $\cong \pm 2,3 \text{ °C}$ ($ t = 100 \text{ °C}$)	Profilmessung nahe Bauteilrand, Materialabhängig (nur bei (teil-) Transparenz)
Fluoreszenz Spektroskopie	Nicht-invasiv, werkzeuggestanden	/	180–300 ¹⁰	$\pm 1,5 \text{ °C}^{10}$	Profilmessung nahe Bauteilrand, Materialabhängig (nur bei (teil-) Transparenz)
Ultraschall Tomografie	Nicht-invasiv, werkzeuggestanden	/	< 220 ¹¹	N.A.	Profilmessung möglich, Prozessabhängig (bis Einsetzen Schwindung)

⁶ Kistler Instrumente AG, p-T-Sensor 6188AA (Thermoelement Typ K nach DIN EN 60584-1 Klasse 1), 2011.

⁷ Reproduzierfehler (ohne Absolutfehler), Kistler Instr. AG, Mehrkanaltemperaturverstärker Typ 2205A, 2011.

⁸ Verlorener Thermodraht (SKZ, 2013, S. 42).

⁹ Micro-Epsilon Messtechnik GmbH, Berührungslose Infrarot-Temperatursensoren Typ CTM-3SF-22-C3, URL: <https://www.micro-epsilon.de/download/products/cat-thermometer/dax--thermoMETER-CTM3--de.html>, Ab-rufdatum: 21.08.2018.

¹⁰ (Bur, A. J. et al., 2001).

¹¹ (Hopmann, C. et al., 2017c).

3.2.1. Modellbasierte Verfahren

Im Bereich des Spritzgießprozesses ist von modellbasierten Verfahren meist im Zusammenhang mit der Spritzgießsimulation als Kombination von rheologischer und mechanischer Simulation die Rede. Diese wird im Zuge der Werkzeugauslegung und Fertigungsvorbereitung durchgeführt, um Konstruktionsiterationen zu reduzieren, frühzeitig Prozesszustände zu erkennen, und somit insgesamt schnellere Entwicklungszyklen und eine höhere Wirtschaftlichkeit bei der Spritzgießfertigung zu erreichen (Steinko, W. *et al.*, 2008), (Meyer, B.-R. *et al.*, 2013), (Bühning-Polaczek, A. *et al.*, 2014), (Wang, M.-L. *et al.*, 2018).

Für die Simulation kann nach verschiedenen numerischen Methoden vorgegangen werden (Wang, M.-L. *et al.*, 2018, S. 141): der Finiten-Differenzen-Methode (FDM), der Finiten-Volumen-Methode (FVM) und der Finiten-Elemente-Methode (FEM). Im Gegensatz zum 2,5D-Schalenmodell mit Parameter für die Wanddicke gilt das 3D-Volumenmodell mit Aufteilung in kleine Volumenelemente als genauer, da weniger geometrische Vereinfachungen vorgenommen werden müssen (Meyer, B.-R. *et al.*, 2013, S. 131), (Wang, M.-L. *et al.*, 2018, S. 153). Bei den vollständigen 3D-Netzen wird das Modell des Werkzeuges und des Bauteiles in Prismen-, Hexaeder-, Pyramiden- oder Tetraeder-Elemente unterteilt und somit, je nach Feinheitgrad des Netzes, möglichst genau an die reale Geometrie angenähert (Wang, M.-L. *et al.*, 2018, S. 153). Danach kann an den jeweiligen Knotenpunkten individuell, z. B. die Temperatur, Drücke, Viskosität und Ausdehnungskoeffizienten berechnet und zu allen benachbarten Knoten in Relation gesetzt werden. Essenziell für ein hinreichend präzises Ergebnis sind neben der geeigneten Beschreibung des Spritzgießprozesses auch die zur Verfügung stehenden Parameter der Simulation, vor allem exakte und vollständige Materialdaten des verwendeten Kunststoffes (Meyer, B.-R. *et al.*, 2013). Neben Einflüssen durch Umgebungsbedingungen oder Faserorientierungen betreffen die oft ungenauen Werkstoffkennwerte besonders die Qualität der Schwindungsanalyse (Stein, A., 2018). Laut Bühning-Polaczek besteht generell für teilkristalline Kunststoffe der größere simulative Aufwand, aber auch die meiste Erfahrung (Bühning-Polaczek, A. *et al.*, 2014, S. 716). Anonymisierte Benchmarkstudien zeigen deutliche Abweichungen zwischen Simulationsprogrammen verschiedener Systeme und Anbieter (Stein, A., 2018). Kommerziell erhältliche Simulationstools sind z. B. Cadmould® (simcon kunststofftechnische Software GmbH, Würselen), Moldflow® (Autodesk Inc., USA) Sigmasoft® (SIGMA Engineering GmbH, Aachen), Moldex3D® (CoreTech System Co. Ltd., Taiwan), 3D Timon® (Toray Engineering Co. Ltd., Japan) und Rem3D® (Transvalor S.A., Frankreich) (Stein, A., 2018).

Der Spritzgießprozess wird zur Simulation in volumetrische Formfüllung, Nachdruckphase und Kühlphase unterteilt. Dadurch können rheologische Vorgänge im Spritzgießprozess wie z. B. der Vorgang der Formfüllung dargestellt werden, was eine Optimierung des Anspritzpunktes, die Einstellung des Nachdruckprofils, die Detektion von Einfallstellen, Lufteinschlüssen und Faserausrichtung oder die Erkennung von Bindenähten ermöglicht. Die mechanische Komponente der Simulation erlaubt durch Analyse der Temperaturverteilung eine Darstellung von Schwindung und Verzug in Folge der abkühlungsbedingten Volumenkontraktion oder auch die Detektion von Auswirkungen auf das Spritzgusswerkzeug oder Einlegeteile, wie z. B. Werkzeugdurchbiegung oder druckbedingten Versatz von Kernen und Einlegeteilen. Somit kann die Spritzgießsimulation, z. B. durch Parameterstudien mit der Design of Experiments-Methode entscheidend zur Formteil- und Prozessoptimierung und somit auch zur Reduzierung der Zykluszeit beitragen. Trotz der immer noch vorhandenen Abweichungen zur Realität wird die Spritzgießsimulation insgesamt in der Literatur auch wegen sich stetig verbessernder Simulationsmodelle schon seit längerer Zeit als hilfreiches Instrument zur Prozessanalyse gesehen (Johannaber, F. *et al.*, 2004, S. 307), (Steinko, W. *et al.*, 2008, ab S. 374), (Mey-

er, B.-R. *et al.*, 2013, ab S. 131), (Bühning-Polaczek, A. *et al.*, 2014, S. 794), (Stein, A., 2018). Auch bei der Umspritzung von elektrischen Einlegeteilen, wie z. B. Dioden, kann die Spritzgießsimulation Temperatur- und Druckbelastungen aufzeigen und eventuell auftretende Fehler wie aufschmelzende Lotstellen oder Spannungen bzw. thermisch bedingten Verzug zwischen Kunststoff, Bauteil und Leiterplatte visualisieren (Menges, G. *et al.*, 2007, ab S. 528). Für eine moderne Werkzeugkonstruktion und –auslegung sind Simulationstools mittlerweile unverzichtbar (Stein, A., 2018). Nach Bühning-Polaczek (Bühning-Polaczek, A. *et al.*, 2014, S. 719) ist somit auch der entsprechende wirtschaftliche Mehraufwand gerechtfertigt. (Meyer, B.-R. *et al.*, 2013, ab S. 131), (Bühning-Polaczek, A. *et al.*, 2014, ab S.716)

Ein weiterer bekannter Ansatz zur modellbasierten Beschreibung der Schmelzetemperatur in der Kunststoffverarbeitung ist der Einsatz eines Soft-Sensors bei der Extrusion (Abeykoon, C., 2016). Diese Art eines virtuellen Sensors soll die bei fragilen Sensorbauteilen im Bereich der Düse des Extrusionszylinders auftretenden Probleme, wie z. B. die schwierige Einbausituation oder die Beeinflussung des Schmelzestroms, umgehen. Dabei ist der Einsatz eines solchen Soft-Sensors ein bekanntes Vorgehen, welches vor allem bei schwer zugänglichen chemischen Prozessen in Reaktoren oder Destillationskolonnen zur Qualitätskontrolle, Prozessdiagnostik und Regelung eingesetzt wird. Durch die von Abeykoon präsentierte Kombination eines dynamischen Prozessmodells mit einem integrierten Feedback-Mechanismus über einen im Extrusionszylinder verbauten Infrarot-Temperatursensor gelingt die Vorhersage eines Schmelzetemperaturprofils an der Extruderdüse.

3.2.2. Thermoelemente

Zur Messung der Temperatur während des Spritzgießprozesses wird in der industriellen Praxis meist entweder indirekt über im Werkzeugstahl eingebettete Sensorik oder direkt über einen punktuellen Kontakt zur Kunststoffschmelze die sogenannte Werkzeugwandtemperatur bestimmt (Johannaber, F. *et al.*, 2004). Zur direkten Messung der Temperatur am Formteilrand werden durch eine Aussparung in der Werkzeugwand ein oder mehrere Thermoelemente mit Messspitzen von minimal 0,6 mm Stirnflächendurchmesser (Steinko, W. *et al.*, 2008, S. 462) im Spritzgusswerkzeug verbaut (siehe Abb. 3-3). Die Sensoren haben nur über ihre Stirnfläche Kontakt zur Formmasse in der Werkzeugkavität und sind meist nur durch einen kleinen punktuellen Abdruck, ähnlich den Auswerfermarkierungen, am finalen Bauteil erkennbar. Bekannte Anbieter solcher Sensoren sind beispielsweise die Kistler Instrumente AG (Winterthur, Schweiz) oder die Priamus System Technologies AG (Schaffhausen, Schweiz). Die erreichten Genauigkeiten liegen dabei beispielsweise bei einem, auch in dieser Arbeit verwendeten, Kistler 6188AA¹² Thermoelement vom Typ K nach DIN EN 60584-1 Klasse 1 (DIN EN 60584-1, 2013, S. 14) im Bereich von $\pm 1,5$ °C für den Sensor und zusätzlichen $\leq \pm 0,25$ % Reproduzierfehler des Temperaturverstärkers¹³. Aus den Messergebnissen steht vor dem Auftreffen der Schmelze auf die Sensoroberfläche der exakte Wert der Werkzeugtemperatur zur Verfügung (siehe Abb. 3-4). Der folgende Temperatursprung und die resultierende maximale Werkzeugwandtemperatur kann zur Prozesssteuerung verwendet werden. Das über die Messzeit ableitbare Werkzeugwandtemperaturintegral beschreibt die Wärmeabfuhr des Prozesses und lässt Rückschlüsse auf die optimale Kühlzeit zu (Steinko, W. *et al.*, 2008, S. 462). Vorteile dieser Messmethode mittels Thermoelement sind die robusten, verschleißarmen Sensoren, die kurze Ansprechzeit und die nicht-invasive Messung der Temperatur, durch die der Formteilbildungsprozess nicht beeinflusst wird. Konstruktionsbedingt kann mit einem einzelnen Thermoelement eine punktuelle Messung vorgenommen werden. Durch die Platzie-

¹² Kistler Instrumente AG, p-T-Sensor 6188AA, 2011.

¹³ Kistler Instrumente AG, Mehrkanaltemperaturverstärker Typ 2205A, 2011.

ung mehrerer Sensoren entlang des Fließweges können außerdem Aussagen zur Viskosität der Schmelze getroffen werden. (Johannaber, F. *et al.*, 2004), (Steinko, W. *et al.*, 2008), (Menges, G. *et al.*, 2007), (Schiller, G. F., 2018)

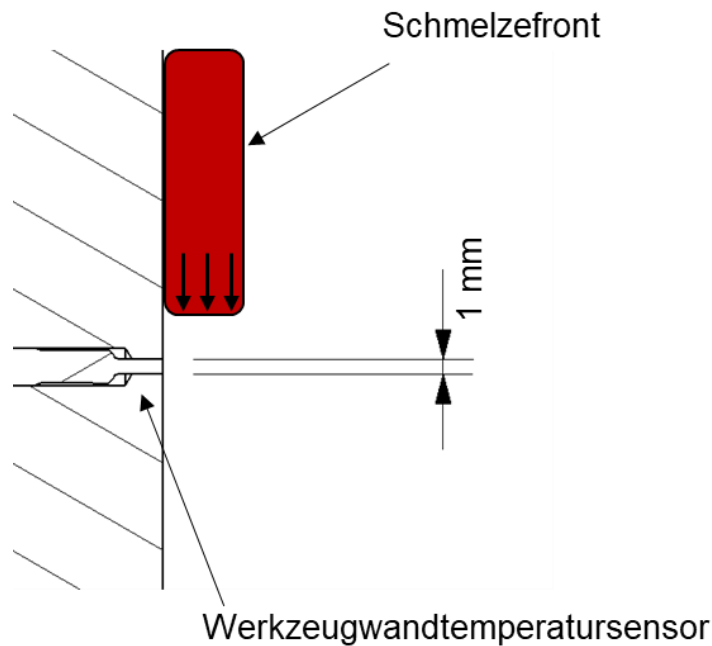


Abb. 3-3: Typische Einbausituation eines Sensors zur Messung der Werkzeugwandtemperatur im Spritzgusswerkzeug. Hier dargestellt als kombinierte Ausführung auch zur Messung des Werkzeuginnendrucks (Typ 6188AA, Kistler Instrumente AG, Winterthur, Schweiz).

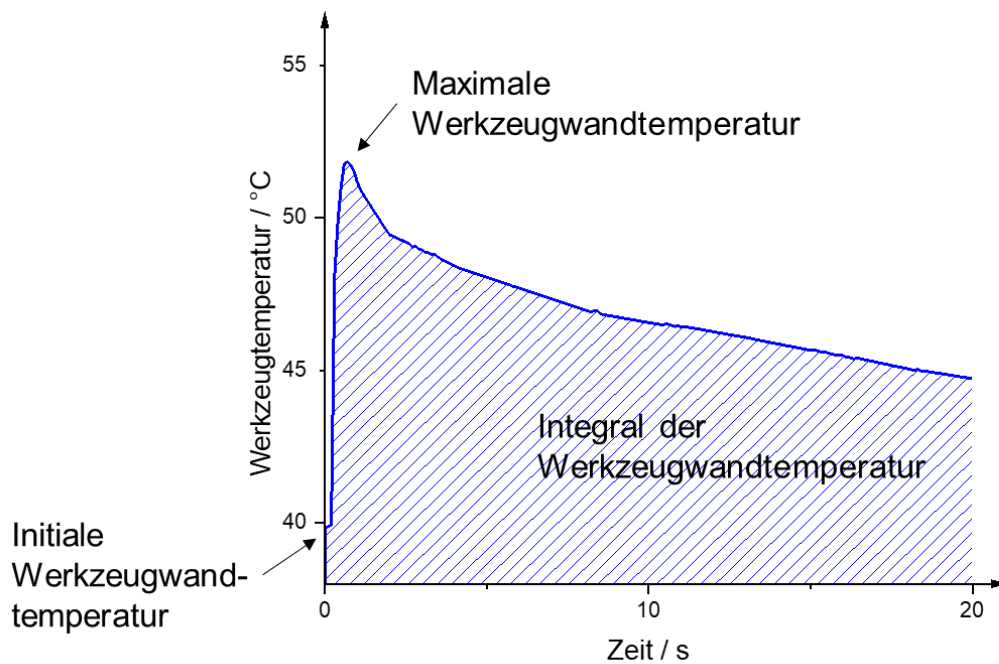


Abb. 3-4: Typischer Verlauf der Werkzeugwandtemperatur nach (Steinko, W. *et al.*, 2008, S. 463).

Im Gegensatz zu den üblichen nicht-invasiven Sensoren am Bauteilrand beschreibt Kazmer eine invasive Messung der Schmelzetemperatur mittels Thermoelmenten zur Prozess- bzw. Qualitätsüberwachung als vorteilhaft (Kazmer, D. O., 2009, S. 171). Damit können detailliertere Informationen während des gesamten Formteilbildungs- und Abkühlungsprozesses auch aus dem zuletzt erstarrenden Bauteilinneren ermittelt werden. Dieser Ansatz wird auch durch mehrere Forschungsgruppen umgesetzt, aber meist ohne die explizite Angabe von Messungenauigkeiten präsentiert.

Farouq bzw. Nicolazo und Kollegen von der Universität Nantes versprechen sich durch die invasive Messung der Temperatur während des Spritzgießens und nach der Entformung ein besseres Verständnis der Verarbeitungs-/Nachschwindungsprozesse, des Verzuges und der im Bauteil verbleibenden Eigenspannungen (Farouq, Y. *et al.*, 2005), (Nicolazo, C. *et al.*, 2010). Umgesetzt wird diese invasive Temperaturmessung mit einer durch die Werkzeugwand in die Kavität geführten, 0,8 mm dicken und 40 mm langen Hohlzahn in der ein 80 µm dickes Thermoelment vom Typ K in verschiedenen Höhen einer Polystyrol- oder Polypropylen-schmelze platziert werden kann. Die eingespritzte, kabelgebundene Sonde verbleibt auch nach der Entformung im Bauteil, womit eine Messung der Bauteilabkühlung ermöglicht wird. Durch Vergleich mit numerischen Simulationen wurden dabei vor allem Aussagen zur Kristallisation und dem Wärmeübergang zum Spritzgusswerkzeug getroffen.

Liu *et al.* erweitern dieses Konzept durch die Verteilung von neun Messsonden über einen 33x33 mm quadratischen Bauteilquerschnitt (Liu, S.-J. *et al.*, 2009). Hierbei werden ebenfalls durch Hohlzähne (Durchmesser 1,1 mm, Länge 80 mm) 0,7 mm dicke Thermoelmentsonden geführt. Somit erfolgt die Temperaturmessung nicht nur punktuell, sondern ermöglicht über die verschiedenen Messpositionen die Aufstellung eines Temperaturfeldes, welches auch während der Abkühlung des Bauteiles im Werkzeug (aber nicht außerhalb) gemessen werden kann. Durch Abgleich der experimentellen Daten mit einer numerischen Simulation des Wärmeübergangs stellen Liu *et al.* (Liu, S.-J. *et al.*, 2009) dabei eine zu vernachlässigbare Beeinflussung des Temperaturfeldes durch die Messsonden in der Kavität fest. Trotz dieser Feststellung diskutieren unter anderem Nicolazo *et al.* (Nicolazo, C. *et al.*, 2010), Hopmann *et al.* (Hopmann, C. *et al.*, 2017d) und Launey *et al.* (Launay, J. *et al.*, 2014) Probleme bei invasiven Temperaturmessungen durch sensorbedingte Beeinflussung des Temperaturfeldes innerhalb der Polymerströmung, z. B. durch Scherung.

Eine weitere Messung der Schmelzetemperatur in der Formteilmittelpunkt gelingt durch die Einspannung eines verlorenen, d. h. im Formteil verbleibenden, Thermodrahts am Fließwegende quer durch die Kavität und anschließende Umspritzung mit Polyamid 66, Polyethylen (PEHD), Polycarbonat oder Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) (SKZ, 2013). Die Schweißstelle der beiden unterschiedlichen Drähte liegt dabei auf halber Breite in der Mitte des Formteils und ermöglicht eine Messung der Schmelzetemperatur, welche im Vergleich zur Simulation und zur eingestellten Zylindertemperatur nur um wenige Grad abweicht und auch bei den teilkristallinen Kunststoffen eine Detektion des Kristallisationsbeginns erlaubt.

Eine zusätzliche Möglichkeit der drahtgebundenen Temperaturmessung beim Montagespritzgießen von Schaltungsträgern beschreibt Heinle (Heinle, M., 2014). Hierbei werden drahtgebundene, 0,2 mm dicke Thermoelmente des Typs K im zu umspritzenden Einlegeteil platziert um somit Aussagen über die Temperaturbelastung des Einlegeteiles zu treffen. Messabweichungen durch die Thermoelmente werden hierbei mit $\pm 0,0075 \cdot |t|$ zuzüglich 1,2 °C Abweichung durch den Messaufbau (entspricht $\pm 2,85$ °C bei 200 °C Umgebungstemperatur) angegeben.

Weitere interessante Ansätze zur invasiven Temperaturmessung von Schmelzeströmungen wurden bei der Extrusion von Polymeren untersucht. Der Einsatz von Thermoelment-Netzen in unterschiedlichen Ausführungen platziert im Schmelzestrom wird von mehreren Autoren beschrieben (Brown, E. C. *et al.*, 2004), (Vera-Sorroche, J. *et al.*, 2013). Diese netzartigen

Thermoelemente finden aber auch beim Spritzgießen Anwendung. So verwendet z. B. Sombatsompop et al. (Sombatsompop, N. *et al.*, 2000) ein Netz aus 0,63 mm starken Chrom- und Aluminiumdrähten zur Temperaturmessung im Plastifizierzylinder. Bruker et al. (Bruker, I. *et al.*, 1987) zeigen die Anordnung von 10 Thermoelementen auf einem Balken quer zur Strömung in einem Extrusionszylinder. Dies wird von Launay et al. (Launay, J. *et al.*, 2014) ebenfalls für die Extrusion aufgegriffen, indem ein strömungsoptimiertes, doppel-elliptisches Flügelfeld mit Thermoelementen an den Flügelspitzen in Strömungsrichtung des Polymers platziert wird.

Die beschriebenen invasiven Messmethoden mittels Thermoelement bedingen, dass der kostenintensive, drahtgebundene Sensor nach der Erstarrung des Materials in diesem enthalten und somit verloren ist. Aus diesem Grund wird versucht einen als Massenprodukt fertigen Sensor herzustellen, welcher im Formteil verbleiben kann. Bekannt sind Dünnschicht-Thermoelemente („*integrated thermocouples sensor*“ (ITS)), bei denen mittels photolithografischer Methoden metallische Schichten, z. B. auf Polyimid-Substraten, abgeschieden werden. Yokoi et al. erzeugen 15 Cu-Ni Thermoelemente auf einem 0,1 mm dicken Polyimid-Film zur Temperaturmessung während des Spritzgießens von Polystyrol (Yokoi, H. *et al.*, 1992). Eine Weiterentwicklung dieser Sensorik mit 12 Thermoelementen auf Basis einer 0,1 mm dicken Zirkonoxid-Keramik wird im Zusammenhang der Analyse eines Heißkanal-Angussystems verwendet (Yokoi, H. *et al.*, 2016). Debey et al. umspritzen ebenfalls 0,2-0,5 mm dicke, entgegen der Strömungsrichtung angeordnete Polyimid-Substrate mit 10 Thermoelementen in einer 2 mm hohen Kavität mit Polypropylen (Debey, D. *et al.*, 1997). Ein ähnlicher Ansatz wurde vom Forschungszentrum Karlsruhe GmbH mit einem Ti-Cr Thermoelementarray auf einer 125 µm dicken Zirkonoxidsubstrat verfolgt (Amberg, J. *et al.*, 2003). Das Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik (IST) präsentiert ebenfalls ein sensorisches Dünnschichtsystem, aufgebaut aus einer piezoresistiven Sensorschicht, einer Isolations- und Verschleißschicht und einer lithographisch strukturierten Chromschicht auf einem Stahlsubstrat zur Messung der Kraft- und Temperaturverteilung auf der Werkzeugoberfläche in der Trennebene eines Spritzgusswerkzeuges (Biehl, S. *et al.*, 2015).

3.2.3. Thermografie

Die Thermografie oder Infrarot-Temperaturmessung ist eine nicht-invasive Möglichkeit, die Temperatur bzw. die Infrarotstrahlung einer Polymerschmelze im Spritzgusswerkzeug zu erfassen. Bei dieser Messmethode wird die vom zu messenden Objekt ausgestrahlte thermische Energie in Wellenlängenbereichen von ca. 0,7-14 µm erfasst (Steinko, W. *et al.*, 2008, S. 260). Je nach Kunststoffart verändert sich auch dessen Emissionsgrad und der zu messende Wellenlängenbereich. Eine Herausforderung bei der thermografischen Temperaturmessung ist zusätzlich die Ortsauflösung, da durch Transmissionsstrahlung aus anderen Bauteilbereichen und deren temperaturabhängiger Absorption das Messergebnis beeinflusst werden kann und somit nur die Messung einer Durchschnittstemperatur über einen bestimmten Bauteilbereich möglich ist. Die meisten am Markt erhältlichen Systeme arbeiten wegen der besseren möglichen Sensorempfindlichkeit und Messgenauigkeit im sogenannten fernen Infrarot-Wellenlängenbereich von ca. 7-13 µm. Zur Messung der Schmelzetemperatur in der Wand des Plastifizierzylinders, in dessen Düsenbereich oder in der Werkzeugkavitätswand wird hinter Saphirglas direkt ein infrarotempfindlicher Sensor platziert. Andererseits kann die Wärmestrahlung auch mittels Lichtleiter an eine externe Auswerteeinheit weitergeleitet und dort in eine temperaturproportionale Spannung umgewandelt werden. Die Messbereiche solcher direkt in der Werkzeugwand verbauten Sensoren sind in der Literatur zwischen 50 °C bis

ca. 430 °C angegeben (Johannaber, F. *et al.*, 2004, S. 963), (Menges, G. *et al.*, 2007, S. 691) und kommen auch bei Drücken über 2000 bar zum Einsatz (Johannaber, F. *et al.*, 2004, S. 962). Die Sensoren werden dabei prinzipiell ähnlich den Thermoelementen in Abb. 3-3 verbaut. Neben den schnellen Ansprechzeiten von unter 10 ms (Johannaber, F. *et al.*, 2004, S. 964) bietet die thermografische Messmethode außerdem den Vorteil, dass auch nach dem Einsetzen der Schwindung und dem Ablösen des Bauteiles von der Werkzeugwand noch Temperaturwerte von der Bauteiloberfläche erfasst werden können. Dies ist mit den im Kapitel 3.2.2 beschriebenen Thermoelementen nicht möglich (siehe Abb. 3-5). Ebenfalls bieten IR-Temperatursensoren ein schnelleres Ansprechverhalten als Thermoelemente und können eine höhere maximale Temperatur erfassen. (Johannaber, F. *et al.*, 2004), (Menges, G. *et al.*, 2007), (Steinko, W. *et al.*, 2008)

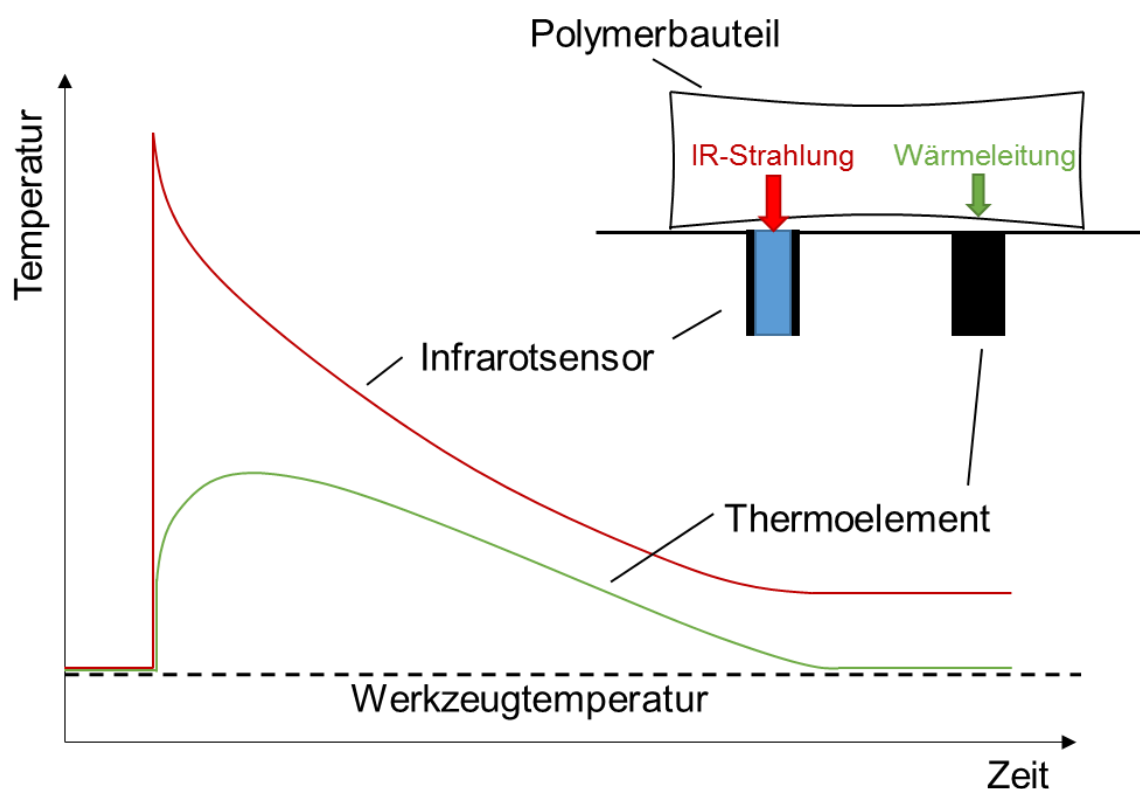


Abb. 3-5: Schematischer Vergleich der aufgezeichneten Temperaturkurven von einer thermografischen und einer mittels Thermoelement gewonnenen Temperaturkurve. Das Thermoelement wird dabei stark durch das umgebende, kühlere Werkzeugmaterial beeinflusst. Die Infrarotstrahlung aus dem Polymerbauteil dringt auch nach Einsetzen der Schwindung noch zur Sensoroberfläche.

Kommerziell erhältliche Systeme zum Einbau in das Spritzgusswerkzeug und mit direktem Schmelzekontakt werden zum Beispiel von der Firma Omega Engineering, Inc. (Norwalk, USA), der Futaba Corporation (Mobara, Japan) oder der Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG (Ortenburg, Deutschland) angeboten. Das Omega OS4000 System¹⁴ bietet laut Hersteller einen Messbereich von 150-1600 °C, eine Ansprechzeit von 1 ms und eine Genau-

¹⁴ Omega Engineering, Inc., High Speed Industrial Fiber Optic Infrared Transmitter, URL: https://www.omega.com/temperature/pdf/OS4000_SERIES.pdf, Abrufdatum 15.06.2018.

igkeit von ± 1 % der gemessenen Temperatur ($\pm 0,01 \cdot |t|$). Die EPSSZL-Serie¹⁵ von Futaba verspricht eine Ansprechzeit von 8 ms und Messungen im Bereich von 60-430 °C. Der CTM-3SF-22-C3 Infrarot-Tempersensor von Micro-Epsilon Messtechnik GmbH (Ortenburg) mit einer Systemgenauigkeit von $\pm(0,003 \cdot T_{\text{Mess}} + 2 \text{ °C})$ wird ebenfalls zur Temperaturmessung beim Spritzgießen verwendet (SKZ, 2013).

In der wissenschaftlichen Fachliteratur finden sich weitere Untersuchungen zur Infrarotmessung. So diskutieren schon Lai und Rietveld die Anwendung eines IR-Pyrometers zur Beschreibung des Bauteilabkühlverhaltens im Spritzgießprozess (Lai, G.-Y. et al., 1996). Der eingesetzte Vanzetti 2020 Sensor (Omega Engineering, Inc., USA) lieferte Messergebnisse bis minimal ca. 93 °C. Durch Versuche mit verschiedenen stark pigmentiertem Polystyrol konnte die Abhängigkeit der Temperaturmessung vom Transparenzgrad bzw. dem Absorptionsgrad des Polymers festgestellt werden, d. h. bei stärker transparentem Material wurde mehr infrarote Strahlung aus dem Bauteilinneren detektiert.

Thomas und Bur analysieren das durch eine optische Faser und ein Saphirfenster in die Kavität geleitete und dort reflektierte Licht eines HeNe-Lasers (Thomas, C. L. et al., 1999). Durch die sich mit dem einströmenden und abkühlenden Polypropylen verändernde Lichtintensität können Rückschlüsse auf das Kristallisationsverhalten in Zusammenhang mit Temperatur und Druck gezogen werden. Dieser Ansatz wird von Bendada et al. durch die Verwendung eines hohlen Lichtleiters und eines entsprechenden Detektors zur direkten Messung der Temperatur erweitert (Bendada, A. et al., 2003), (Bendada, A. et al., 2007). Dadurch werden Übertragungsverluste reduziert und auch bisher meist mit dieser Methode nicht messbare Temperaturen nahe der Raumtemperatur erfasst. Zudem gelingt es durch eine ausreichende Ortsauflösung gezielt zwischen Messung der Durchschnittstemperatur aus dem Bauteil und dessen Oberfläche zu unterscheiden. Als Polymer wird für die Untersuchungen wegen seiner hohen Druck-/Temperaturempfindlichkeit und seiner teilweisen Transparenz ebenfalls Polypropylen ausgewählt.

Die Entwicklung eines kombinierten Druck- und Temperatursensors wird von Gordon und Kazmer et al. mit dem sogenannten „*multivariate sensor*“ präsentiert, um eine Möglichkeit zur Prozessüberwachung und direkten Qualitätskontrolle während des Spritzgießprozesses zur Verfügung zu stellen (Gao, R. X. et al., 2014), (Gordon, G. et al., 2015). Durch Kombination eines piezo-keramischen Ringes mit einem thermophilen Infrarotsensor hinter einer Zinkselenid-Scheibe gelingt die direkte Erfassung des Werkzeuginnendruckes, der Werkzeugwandtemperatur und der Temperatur einer transparenten Polystyrolschmelze. Indirekt sind zudem auch die Schmelzegeschwindigkeit und die Viskosität ermittelbar. Als wesentlicher Vorteil gegenüber vergleichbaren kommerziellen thermografischen Systemen zeigt sich die Messmöglichkeit bei Temperaturen auch unter 80 °C, womit trotz einigen Abweichungen auch das komplette Abkühlverhalten des Polymers erfassbar ist.

Yokoi et al. ermöglichen über die Anordnung von fünf optischen Futaba EPSSZL Sensoren radial in einer drehbaren, kreisförmigen Kavitätswand die Aufnahme eines Temperaturprofils über den Einspritzvorgang (Yokoi, H. et al., 2016). Somit können stagnierende Bereiche im Schmelzefluss eines Heißkanal-Angussystemes ermittelt und Rückschlüsse auf das bekannte Phänomen der dort auftretenden Fließmarken gezogen werden.

¹⁵ Futaba Corporation, Ejector Pin Type Resin Temperature Sensor EPSSZL series, URL: https://www.futaba.co.jp/en/precision/mold_marshall/temperature/epsszl.html, Abrufdatum 15.06.2018.

3.2.4. Fluoreszenz-Spektroskopie

Eine weitere, den optischen Messverfahren zuzuschreibende nicht-invasive Methode zur Bestimmung der Temperatur im Spritzgießprozess ist die Fluoreszenz-Spektroskopie. Im Gegensatz zu den bereits beschriebenen Thermoelementen oder der Thermografie ist die Temperaturbestimmung über temperatursensitive, fluoreszierende Additive eher zum Stand der Forschung zu zählen. Aktuell ist keine technisch relevante Lösung bekannt, die auch in die industrielle Spritzgießfertigung Einzug gehalten hat.

In der Literatur wird die Fluoreszenz-Spektroskopie neben z. B. Ansätzen zur Kontrolle der Aushärtezeit von Harzsystemen (Neff, R. A. *et al.*, 1997), vor allem von Bur und Kollegen zur Prozessüberwachung während des Spritzgieß- (Bur, A. J. *et al.*, 1994) oder Extrusionsprozesses (Bur, A. J. *et al.*, 2001) und bei der Kapillarrheometrie (Bur, A. J. *et al.*, 2004) eingesetzt. Im Detail wird die Methode gezielt zur Darstellung von Kristallisationsvorgängen, zur Sichtbarmachung von Scherhitzungen und auch zur Temperaturmessung sowie der Analyse von Temperaturregelsystemen sowohl bei Thermoplasten als auch bei Duroplasten verwendet. Dazu wird dem Polymer ein fluoreszierendes Additiv in Gewichtsanteilen von 10-100 ppm zugemischt und die Polymer-Additiv-Schmelze dann mittels Xenonbogenlampe oder Laser über einen Lichtleiter mit einer konfokalen Optik hinter einem Saphirfenster direkt während des Verarbeitungsprozesses angeregt. Die sich je nach Temperatur ändernde fluoreszierende Lichtintensität wird mittels eines Detektors abgegriffen, durch eine zuvor mit einem Standardthermoelement bestimmten Kalibrationskurve abgeglichen und als Temperatur in Echtzeit ausgegeben. Durch geeignete Optik, d. h. Verschiebung des Fokuspunktes, ist es zudem möglich, ein Temperaturprofil zu erfassen. Je nach Verfahren können verschiedene fluoreszierende Additive zum Einsatz kommen. Zum einen werden sogenannte molekulare Motoren mit einer beweglichen Endgruppe eingesetzt, welche bei steigender Temperatur mit einer Abnahme der Fluoreszenz reagieren (z. B. DMA-DPH). Andererseits kommen umweltsensitive oder laseraktive Additive (z. B. BPP) oder Additive zum Einsatz, deren Fluoreszenz charakterisiert ist über temperaturabhängige, eindeutig ausgeprägte Banden in bestimmten Wellenlängenbereichen („fluorescent band definition dye“, z. B. BOS, Perylen oder BTBP). Jedoch degradieren einige Additive, wie z. B. BPP, bei Temperaturen über 220 °C, weswegen zur Untersuchung von Polymerschmelzen auf die bis 300 °C stabilen Additive wie BOS, Perylen oder BTBP zurückgegriffen wird (Bur, A. J. *et al.*, 2001), (Bur, A. J. *et al.*, 2004). In der betrachteten Literatur liegen die gemessenen Schmelzetemperaturen meist in Bereichen zwischen 180-300 °C, bei Migler *et al.* sogar bis hin zu 25 °C und die Messgenauigkeiten je nach Additiv bei $\pm 1,5$ °C (BPP), ± 2 °C (Perylen) oder ± 3 °C (BOS) (Bur, A. J. *et al.*, 2001), (Bur, A. J. *et al.*, 2004). Bei der Untersuchung reaktiver Formmassen wird eine Genauigkeit von $\pm 3,5$ °C erreicht (Bur, A. J. *et al.*, 2004).

3.2.5. Ultraschall-Tomografie

Eine ebenfalls dem Stand der Forschung zuzuordnende Methode, die Schmelzetemperatur im Spritzgusswerkzeug kontaktlos und in Echtzeit als Profil zu bestimmen, ist die Ultraschall-Tomografie. Dieses Verfahren der Schallstrahl-Tomografie zählt zu den in Kapitel 3.1 bereits erwähnten akustischen Temperaturmessverfahren und basiert auf der temperaturabhängigen Laufzeit eines Ultraschallimpulses (Bernhard, F., 2014, S. 1129). Mehrere Forschergruppen beschäftigen sich mit der Untersuchung dieses Verfahrens entweder zur Messung von Drücken und Temperaturen im Düsenorraum oder zur Beurteilung von Füllgrad und Abkühlverhalten in der Werkzeugkavität.

Eine Anwendung der Ultraschallmesstechnik im Spritzgießprozess untersuchen Brown et al. (Brown, E. C. *et al.*, 2002). Hierbei messen sie, zusätzlich zu konventioneller Drucksensorik und Infrarot-Temperatursensorik im Düsenbereich einer Plastifizierschnecke die Transmission einer ausgesendeten Ultraschallwelle, d. h. die Laufzeit, durch die Polyethylenschmelze hin zu einem Detektor. Mit Hilfe des Pulse-Echo-Verfahrens, d. h. mit einem kombinierten Ultraschallwandler bzw. -Sensor, detektieren Brown et al. zusätzlich an einem Spritzgusswerkzeug Ultraschallsignale/-echo durch eine Kavität während des Spritzgießzyklus. Diskutiert wird vor allem die Schalllaufzeit im Vergleich zu den Messungen mit in der Zylinderwand eingebetteten Druck-/Temperatursensoren. Dabei wird über Probleme bei der Kalibration des Ultraschallwandlers aufgrund der druckabhängigen Schalllaufzeit und der hohen Drücke im Düsenbereich berichtet, was eine konkrete Temperaturmessung nicht ermöglicht.

Fronimidis et al. (Fronimidis, D. *et al.*, 2005) setzen die Ultraschalltechnik ebenfalls zur Prozessüberwachung ein, um gezielt Phasenübergänge in der Schmelze zu erkennen und den Erstarrungsprozess nachvollziehen zu können. Dazu platzieren sie einen Ultraschalltransmitter gegenüber einer rechteckigen Kavität sowie einen Receiver im Aluminiumwerkzeug und messen die Transmission des ausgesendeten Ultraschallsignales (4 MHz). Die Untersuchungen zeigen einen Zusammenhang zwischen der Dämpfung bzw. der Geschwindigkeitsänderung der Ultraschallwelle und Änderungen in der mittels Thermoelementen/Piezosensorik gemessenen Werkzeugtemperatur und dem Werkzeuginnendruck. Somit gelingt es, einzelne Prozessphasen während des Spritzgießens mit Polycarbonat und Polypropylen zu identifizieren, z. B. den Beginn des Einspritzvorgangs und das Einsetzen der Schwindung.

Hopmann und Kollegen beschäftigen sich aktuell in verschiedenen Veröffentlichungen mit der Ultraschall-Tomografie beim Spritzgießen (Hopmann, C. *et al.*, 2014), (Hopmann, C. *et al.*, 2016), (Hopmann, C. *et al.*, 2017c), (Hopmann, C. *et al.*, 2017d),

Das Vorgehen gleicht einem von Praher et al. entwickelten Verfahren zur Temperaturmessung im Düsenvorraum eines Plastifizierzylinders mit Hilfe von fünf zylindrisch angeordneten Ultraschall-Signalgebern und -Detektoren (Praher, B. *et al.*, 2013), (Praher, B. *et al.*, 2014). Ziel dabei ist, mit Hilfe einer nichtinvasiven Temperaturmessmethode zusätzliches Verständnis für die Plastifizierung im Allgemeinen und die Verifikation numerischer Simulation im Spritzgießprozess zu gewinnen. Dazu werden insgesamt ein Ultraschalltransmitter und fünf Receiver am Plastifizierzylinder montiert. Durch zum Zylinderinneren hin konvex geformte Einsätze aus Polyetheretherketon (PEEK) vor den Ultraschallsonden gelingt es, einerseits die sensible Sensorik vor der heißen Schmelze abzuschirmen, andererseits eine fächerförmige Ultraschallwelle in die Schmelze abzugeben. Erste Vorversuche wurden mit Wasser durchgeführt (Praher, B. *et al.*, 2013) und später durch Messung mit Polypropylen ergänzt (Praher, B. *et al.*, 2014).

Diesen vielversprechenden Ansatz hin zur berührungslosen Bestimmung eines zweidimensionalen Schmelze-Temperaturprofiles entwickeln Hopmann et al. weiter für die Temperaturbestimmung im Spritzgusswerkzeug. Dabei geben sie als Motivation ebenfalls die, aufgrund der hohen Kühlraten und des komplexen Wärmetransfers im Spritzgusswerkzeug, bisher in Modellen unzureichende Beschreibung der Schmelzetemperatur an (Hopmann, C. *et al.*, 2017c). Zudem wird Kritik an Messungen mit Berührungssensoren aufgrund von Beeinflussung des Temperaturfeldes geäußert und somit eine berührungslose Messmethode gefordert. Die Umsetzung der angestrebten Messung der Ultraschalllaufzeit gelingt mit einem Messaufbau, welcher aus einem Polyamid-Hohlzylinder (Innenradius 30 mm) mit zwei eingesetzten Stempeln besteht. Dabei kann die Polypropylenschmelze aus dem mit Kupfer ummantelten Heizbereich in den Messbereich mit einem sendenden Ultraschallwandler und sieben empfangenden Detektoren verschoben werden (Hopmann, C. *et al.*, 2016), (Hopmann, C. *et al.*, 2017d). Die radial angeordneten, kommerziellen Ultraschallsonden sind entweder mit Messing- oder PEEK-Einsätzen gegenüber der Schmelze abgeschirmt. Diese Untersuchung mündet in der

Entwicklung eines Spritzprägewerkzeuges mit einer zylindrischen Kavität (Radius 15 mm, Höhe 25 mm) um die, gekoppelt an linsenförmige PEEK-Elemente, 20 Ultraschallwandler/-sensoren mit einer Anregungsfrequenz von 2 MHz radial angeordnet sind (Hopmann, C. *et al.*, 2017c). Dabei werden die temperaturempfindlichen Sensoren bei Werkzeugtemperaturen unterhalb 60 °C eingesetzt. Bei der Messung der empfangenen Amplituden der Ultraschallwelle, die sich durch das schmelzeförmige Polymer bewegen, wird von einer räumlichen Auflösung von 3,5 mm² berichtet.

Weitere Einsatzmöglichkeiten für die Ultraschall-Tomografie werden im Zusammenhang mit dem Umspritzen von Einlegeteilen untersucht. So stellen Hopmann *et al.* (Hopmann, C. *et al.*, 2014) durch die Integration eines Ultraschallwandler/-sensors in das Werkzeugmaterial eine Möglichkeit zur Detektion von Einlegeteilverformung und Verbunddichtigkeit online während des Spritzgießprozesses vor. Durch Einsatz des Impulse-Echo-Verfahrens und dem Vergleich von Laufzeiten an zwei Messpunkten, d. h. durch ein unterschiedliches resultierendes Echo, kann beispielsweise die prozessbedingte Verkippung eines Einlegeteils bestimmt werden. Die Beurteilung von Materialverbunden im Spritzgießen, z. B. bei zu geringer Haftung des Polymers am Einlegeteil, wurde durch die Störung der Ultraschallübertragung an der Grenzschicht ermittelt. Jedoch stellt sich auch hier wieder das Problem der Druck- und temperaturabhängigen Ultraschalllaufzeit, welches sich laut den Autoren durch teilweise uneindeutige Analysen der Einlegeteilverformung äußert.

Bei der Extrusion wird die Ultraschall-Tomografie durch Halmen *et al.* (Halmen, N. *et al.*, 2017) zur Visualisierung der Verteilung von Füllstoffen, z. B. Ruß oder Titandioxid, in einer Polypropylenschmelze, genutzt. Hierbei fallen vor allem Aussagen hinsichtlich einer räumlichen Auflösung von 2 mm auf, welche trotz der radialen Anordnung von 40 Sensoren nur im Zentrum des Extrusionszylinders erreicht werden können.

3.2.6. RFID-Sensoren

Die drahtlose Kommunikation mittels eines elektromagnetischen Feldes bzw. Wellen im Radiofrequenzbereich, d. h. die Radio Frequency Identification (RFID)-Technologie, bietet gekoppelt mit aktiven oder passiven Sensoren die Erfassung von Umgebungsparametern auch an schwer zugänglichen Orten. Definitionsgemäß handelt es sich bei einem RFID-Sensor um einen Messfühler, welcher mit Hilfe eines RFID-Transponders und eines Schreib-/Lesegerätes Konfigurationsdaten empfängt, optional die gewonnenen Sensordaten zwischenspeichert und die Daten bei Abruf an das Schreib-/Lesegerät (Reader) übermittelt (Dienelt, S., 2009). Das RFID-System, besteht aus einem/mehreren Schreib-Lesegerät(en) mit galvanisch gekoppelten Antenne(n), Empfänger(n) (auch Transponder bzw. Tag) und einer übergeordneten informationstechnischen Infrastruktur (RFID-Middleware) aus Datenbank, Applikationsserver und Software (siehe Abb. 3-6) (Finkenzeller, K., 2015). Dadurch können ohne Sichtkontakt drahtlos mehrere Objekte erfasst werden.

Anwendungsbereiche sind vor allem die Schnittstelle zwischen Material- und Informationsfluss, z. B. in der Logistik und im Bereich Industrie 4.0 (Denkena, B. *et al.*, 2017, S. 310). Weitere Anwendung findet die RFID-Technologie aber auch zur Verbesserung der Effizienz oder Qualität beim Infrastrukturmanagement in der Medizintechnik (Yao, W. *et al.*, 2012), (Fosso Wamba, S. *et al.*, 2013). Zusätzlich wird RFID zum Auffinden von Krankenhausinfrastruktur und zur Rückverfolgung von Medizinprodukten über die Unique Device Identification (UDI) (Gross, T. P. *et al.*, 2012), welche seit 2017 auch gesetzlich vorgeschrieben ist (FDA Fed. Reg. 78(185) 2013), (EU Reg. 2017/745, 2017).

Auch die Kombination mit Sensorik, z. B. zur Temperaturmessung im medizintechnischen Umfeld wird untersucht (Amendola, S. *et al.*, 2016).

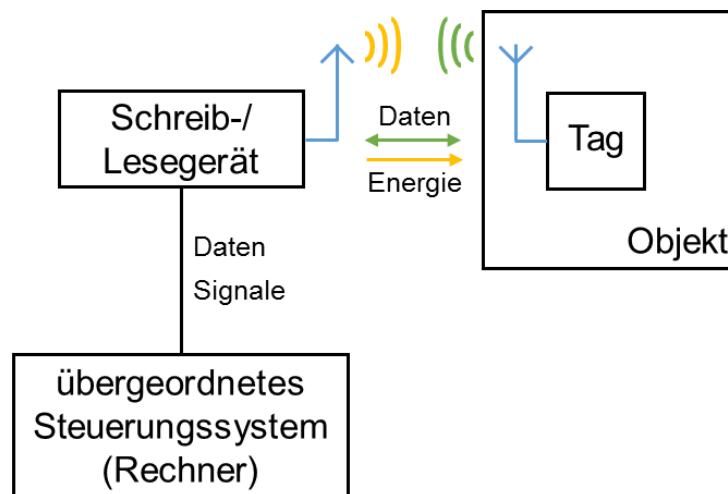


Abb. 3-6: RFID-System bestehend aus einem oder mehreren Schreib-/Leseinheit(en) (auch Reader), passivem Empfänger(n) (auch Transponder/Tag) und peripherer Informationsverarbeitung. Angepasst nach (Denkena, B. *et al.*, 2017, S. 309).

Der Daten- und Energieaustausch erfolgt im Nahfeld durch ein elektromagnetisches Feld, welches durch einen stromdurchflossenen Leiter (Antenne) aufgebaut wird. Im Falle eines kompatiblen Transponderschwingkreises findet eine induktive Anregung und somit die Induzierung einer Spannung statt. Im Fernfeldbereich bestimmen vom Nahfeld abgelöste elektromagnetische Wellen den Daten- und Energieaustausch. Die Fernfeldgrenze ergibt sich aus der Antennenlänge und der dazu passenden optimalen Wellenlänge und hängt zudem von der Frequenz und dem Abstand zum Empfänger ab. Bei der Auslegung des RFID-Systems muss auf elektromagnetische Felder, mechanische/thermische/chemische Belastungen, witterungsbedingte Einflüsse (z. B. Luftfeuchtigkeit) und Störobjekte (wie z. B. reflektierende/leitende Oberflächen, absorbierende Materialien) geachtet werden. Dabei sind Transponder, abhängig von Wellenlänge und Hindernisgröße, im induktiv gekoppelten Nahfeld meist robuster gegenüber dem Schattenwurf von Störobjekten als im Fernfeld. Die Transponder/Tags bestehen aus Mikrochip bzw. Antenne und können entweder nach ihrer Arbeitsfrequenz (siehe Tabelle 3) oder ihrer Bauart bzw. Energieversorgung unterschieden werden. Verglichen mit passiven, durch den Reader mit Energie versorgten Empfängern zeichnen sich aktive Transponder mit eigener Energieversorgung in Form einer Batterie durch eine höhere Reichweite aus. Dies geht jedoch mit größeren Abmaßen, einer geringeren Lebensdauer, einer größeren Empfindlichkeit gegenüber Umgebungseinflüssen (v.a. Temperatur) und höheren Produktions- bzw. Stückkosten einher. Als Sonderform gelten semi-passive Transponder mit eigener Energieversorgung, welche aber durch ein Signal vom Reader nur bei Bedarf aktiviert werden. Die Wahl der Arbeitsfrequenz erfolgt je nach Anwendung, wobei eine höhere Frequenz auch höhere Datentransferraten und Lesereichweiten ermöglicht, aber auch höhere Störanfälligkeiten gegenüber Metallen und Flüssigkeiten bedingt. (Miles, S. B. *et al.*, 2008), (Dienelt, S., 2009), (Günthner, W. A. *et al.*, 2011), (Finkenzeller, K., 2015)

Tabelle 3: RFID-Frequenzbänder, Wellenlänge und Abstand bis zum Einsetzen des Fernfeldes (Näherung). (Günthner, W. A. *et al.*, 2011), (Finkenzeller, K., 2015)

Bezeichnung	Frequenz(band)		Wellenlänge	Fernfeldabstand
Low Frequency (LF)	125 kHz		2400 m	354 m
High Frequency (HF)	13,56 MHz		22 m	3,5 m
Ultra High Frequency (UHF)	Nordamerika	902 - 928 MHz	0,33 – 0,32 m	0,06 m
	Europa	865 - 868 MHz	0,35 m	
	China	917 – 922 MHz	0,33 m	
Microwave (MW)	2,45 GHz		0,12 m	0,02 m
Microwave (MW/SHF)	5,8 GHz		0,05 m	0,01 m

Für die international einheitliche Nutzung der Radiofrequenztechnologie und somit auch von RFID-Sensor-Systemen setzen sich verschiedene Standardisierungsorganisationen ein, wie die International Organization for Standardization (ISO) in Zusammenarbeit mit der International Electrotechnical Commission (IEC) oder die EPCglobal-Organisation als Initiative der Global Standards One (GS1). Diese vereinheitlichen die verwendeten Frequenzen, Bandbreiten und Modulation sowie die Kommunikationsprotokolle, Übertragungsverfahren, Anti-Kollisions- Mechanismen und Speicherbereiche. Teilweise unterscheiden sich die Luftschnittstellenstandards durch unterschiedliche, länderspezifisch vergebene Frequenzbereiche. Für die UHF Frequenz wurde der EPCglobal UHF Class 1 Gen 2-Standard (GS1 EPCglobal, 2013) auch als ISO/IEC 18000-6 (ISO/IEC 18000-6, 2013) übernommen (O'Connor, M. C., 2006). Zudem hat sich im Bereich der UHF-Technologie die RAIN RFID-Organisation zum Ziel gesetzt umfassende Standards bis hin zur Verknüpfung mit Cloud-Netzwerken anzubieten.

Zur externen Ankopplung bzw. Integration in einen RFID-Transponder ist prinzipiell jede Art von Sensor-Typ denkbar, der physikalische Messgrößen wie Temperatur, Druck, Feuchte, Beschleunigung, Lichtstärke erfasst (Dienelt, S., 2009). Zusätzlich zum genannten ISO/IEC 18000-6-Standard ist für RFID-Reader auch der IEEE-1451.7-Standard (ANSI/IEEE 1451.7, 2010) für die Erweiterung der Sensorfunktionalität einzuhalten. Im festen Speicher des Sensors werden die Sensor-Eigenschaften wie Typ, Art des Messwertes, Auflösung, Toleranz, Grenzwerte und das Output-Datenformat festgelegt. Die Speicherung der Messdaten kann entweder im freien Speicher des Transponders oder Sensors erfolgen, die Nachbearbeitung der Daten wird je nach System im Transponder, im Schreib-/Lesegerät oder durch nachgeschaltete Hard- und Software erledigt. Verbunden mit einem aktiven Transponder bietet sich die Verwendungsmöglichkeit als Datenlogger. Bei passiven Tags wird entweder ein komplett passiver Sensor verwendet oder die Hilfsenergie muss aus dem Readerfeld gewonnen werden. Hierbei gilt die Messung der Temperatur als eines der erprobtesten Anwendungsfelder für RFID-Sensoren (Yin, J. *et al.*, 2010), (Virtanen, J. *et al.*, 2011), (Fernández-Salmerón, J. *et al.*, 2015), (Bibi, F. *et al.*, 2017). Generell wird aber der Markt für RFID-Sensoren noch als unausgereift beschrieben, vor allem was die Auswahlmöglichkeiten an Sensor-Typen angeht (Bibi, F. *et al.*, 2017). (Dienelt, S., 2009), (Finkenzeller, K., 2015)

3.3. Temperaturmessung nach dem Spritzgießprozess

Zusätzlich zur Messung der Temperatur im Spritzgusswerkzeug während der Formteilbildung sind auch die thermischen Verhältnisse sowohl des Werkzeuges als auch des Bauteiles zum Entformungszeitpunkt von wissenschaftlicher und wirtschaftlicher Bedeutung. Die Erfassung der wärmetechnischen Bedingungen hilft beim Einfahren eines neuen Spritzgusswerkzeuges bei der Beurteilung der Temperierung bzw. Entdeckung eventueller Temperierfehler und lässt Rückschlüsse auf das Abkühlverhalten zu. Trotz Simulationsanalyse des Spritzgusswerkzeuges hinsichtlich seines thermischen Verhaltens kann es z. B. durch sich zusetzende Temperierkanäle zu unerwarteten Temperaturunterschieden am Werkzeug und somit auch zu thermisch bedingten Formteilfehlern kommen. Dies äußert sich auf Seiten des Formteils meist in mangelhafter Qualität bzgl. der Oberfläche, einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften durch einen veränderten Kristallisationsgrad oder einer schwindungs-/verzugsbedingten Beeinträchtigung der Maßhaltigkeit. Eine geeignete Analyse der Formteilmessung nach dem Spritzgießprozess spiegelt die wärmetechnischen Verhältnisse des Spritzgusswerkzeuges wieder. Dadurch können Prozessparameter wie die Werkzeugtemperatur oder die Kühlzeit, und dadurch auch die Zykluszeit, überwacht und optimiert werden. Um Temperaturinhomogenitäten am Werkzeug und auch am frisch entformten Bauteil zu erkennen, kommen meist thermografische Messmethoden zum Einsatz (siehe Abb. 3-7). Dazu werden z. B. als Peripheriegerät an das Werkzeug montierte Wärmebildkameras verwendet. Industrielle Anbieter solcher Systeme sind zum Beispiel die Optris GmbH (Berlin), Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG (Ortenburg), TROTEC GmbH & Co. KG (Heinsberg) oder FLIR Systems, Inc. (Wilsonville, USA). Die Messbereiche bei externen Kameras reichen bis über 2000 °C (Steinko, W. *et al.*, 2008, S. 259) bei Genauigkeiten von ± 1 °C (Menges, G. *et al.*, 2007, S. 702). Vorteilhaft ist die problemlose nachträgliche Montage dieser Überwachungssysteme, z. B. an das Werkzeug oder den Entnahmeroboter, die somit ohne Nachbesserungen am Werkzeug eingesetzt werden können. Eine kontinuierliche Überwachung der Temperatur zum Entformungszeitpunkt ist dabei am gebräuchlichsten, um eine automatische Schlechtheilauaussortierung zu realisieren (Menges, G. *et al.*, 2007). (Johannaber, F. *et al.*, 2004), (Menges, G. *et al.*, 2007)

Die Überwachung des entformten Bauteiles ist ebenfalls relevant, um den Abkühlvorgang und die Lagerungsbedingungen zu erfassen. So hält Kulkarni (Kulkarni, S., 2017, S. 107) eine Überwachung der Temperatur des Formteiles auch nach der Entformung für sinnvoll, da die Schwindungsrate direkt proportional zur Temperatur des Formteiles ist und somit auch während der Lagerung nachvollzogen werden kann. Da vorhandene Werkstoffdaten als Informationsquelle oft nicht ausreichen, ist besonders in Bezug auf die Maßhaltigkeit des Kunststoffbauteiles eine Quantifizierung der Nachschwindung bezogen auf Situation und Zeit gefordert (Meyer, B.-R. *et al.*, 2013, S. 107). Zusätzliche normative Anforderungen zur Überwachung temperaturbeeinflusster Anwendungsbedingungen, d. h. der Nutzungs- und Lagerungsbedingungen, im Hinblick auf die Bauteilmaßhaltigkeit ergeben sich zum Beispiel aus der DIN EN ISO 294-1/4 (DIN EN ISO 294-1, 2017), (DIN EN ISO 294-4, 2003) oder der DIN 16742 (DIN 16742, 2013).

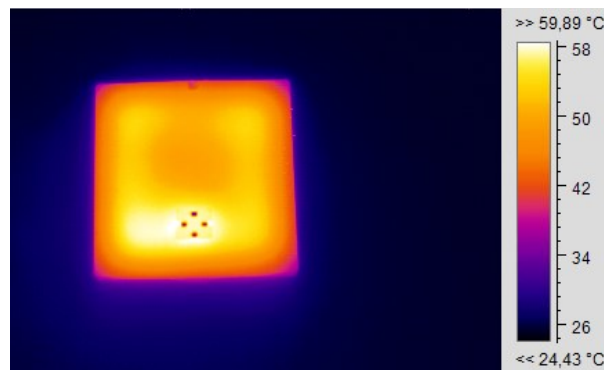


Abb. 3-8: Thermografische Aufnahme eines Plattenbauteils ($40 \times 40 \times 4 \text{ mm}^3$) aus Polypropylen (PP) mit umspritztem Einlege teil nach der Entformung mit einer Trotec IC080LV Wärmebildkamera.

Auch in der Forschung ist die Messung der Bauteiltemperatur nach der Entformung von Interesse. Farouq et al. (Farouq, Y. *et al.*, 2005) bzw. Nicolazo et al. (Nicolazo, C. *et al.*, 2010) untersuchen den Abkühlprozess von Bauteilen aus PS oder PP mittels eines eingespritzten Thermoelementes (siehe Abschnitt 3.2.2). Bula et al. (Bula, K. *et al.*, 2016) nutzen die IR-Thermografie zur Qualitätsprüfung, zur Analyse des Wärmetransports und der Struktur des Kunststoffbauteiles. Durch diese thermische Überwachung des Spritzgusswerkzeuges und der unterschiedlich starken PP-Bauteile (1 und 3 mm dick) in den einzelnen Kavitäten zum Entformungszeitpunkt können eine unbalancierte Kühlung und somit Ursachen für Verzug erkannt und anschließend optimiert werden. Somit werden zum Beispiel höhere Temperaturen bei größerer Wandstärke (1 vs. 3 mm), ein Aufheizen am Anschnitt durch Scherung, ein heißeres Bauteil bei Verringerung der Kühlzeit oder ein kontinuierliches Ansteigen der Werkzeugtemperatur im Laufe der Produktion sichtbar. Allerdings wird auch über Einflüsse auf die Messung durch Reflektion der Werkzeugoberfläche berichtet.

Auch Bendada et al. (Bendada, A. *et al.*, 2007) und Meola et al. (Meola, C. *et al.*, 2002) setzen das nicht-zerstörende, kontaktlose Prüfverfahren der IR-Thermografie wegen der einfachen Anwendbarkeit und der Möglichkeit zur Erzeugung eines 2D-Flächenbildes zur Visualisierung von Temperaturänderungen, Temperaturanstiegen und zur Effizienzanalyse des Kühlsystems ein. Schwalme empfiehlt, die Anwendung der Thermografie neben der genauen In-line-Kontrolle des Werkzeuges bzw. Bauteiles auch zur Regelung der Werkzeugtemperierung (Schwalme, G., 2014), (Schwalme, G., 2017). Es wird aufgezeigt, dass die Temperaturmessung am entformten Kunststoffbauteil stark mit der Werkzeugtemperatur zusammenhängt und durch die Emissivität des Kunststoffes von ca. 95 %, d. h. eine nur relativ langsame Temperaturänderung bei der Abkühlung, auch eine hinreichend genaue Temperaturanalyse an der Bauteiloberfläche erfolgen kann. Durch den Vergleich von IR-Bildern zweier aufeinanderfolgender Zyklen und den Einsatz eines PID-Reglers kann somit eine Regelung der Werkzeugtemperatur über die peripheren Temperiergeräte ermöglicht werden und ein optimal vernetztes Qualitätssicherungssystem und modernes Produktionssystem im Kontext der Industrie 4.0 aufgebaut werden.

3.4. Steuerung und Regelung des Spritzgießprozesses mittels Temperaturmessung

Wie bereits in Kapitel 2 erläutert, ist das Messen, Überwachen und Aufzeichnen von Prozessparametern zur Bedienerinformation und zur Verwendung als Steuer-/Regelgrößen ein wesentliches Element in der Spritzgießproduktion für die Erreichung der geforderten Prozesskonstanz und -reproduzierbarkeit. Der Unterschied zwischen Steuern und Regeln wird an der Fähigkeit festgemacht, nicht vorausbestimmte und beeinflussbare Störgrößen zu kompensieren, d. h. die zu regelnde Größe wird, anders als bei einer wirkungsoffenen Steuerung, ständig überwacht, mit der gewählten Führungsgröße verglichen und durch den geschlossenen Regelkreis angeglichen. Nach Karbasi und Reiser (Karbasi, H. *et al.*, 2006) sollte der Spritzgießprozess idealerweise durch drei sich überlagernde Regelkreise optimiert werden (siehe Abb. 3-9). Die Regelung der Maschinenparameter, wie Geschwindigkeiten, Drücke und Temperaturen als erste Stufe wird unterstützt durch die Messung und Optimierung direkter, bauteilnaher Prozessparameter, z. B. über den Werkzeuginnendruck oder die Werkzeugwandtemperatur. Als finaler Regelkreis ergänzt schließlich die Analyse und Rückführung der Bauteilqualität den Prozess. (Johannaber, F. *et al.*, 2004), (Steinko, W. *et al.*, 2008), (Ogorodnyk, O. *et al.*, 2018)

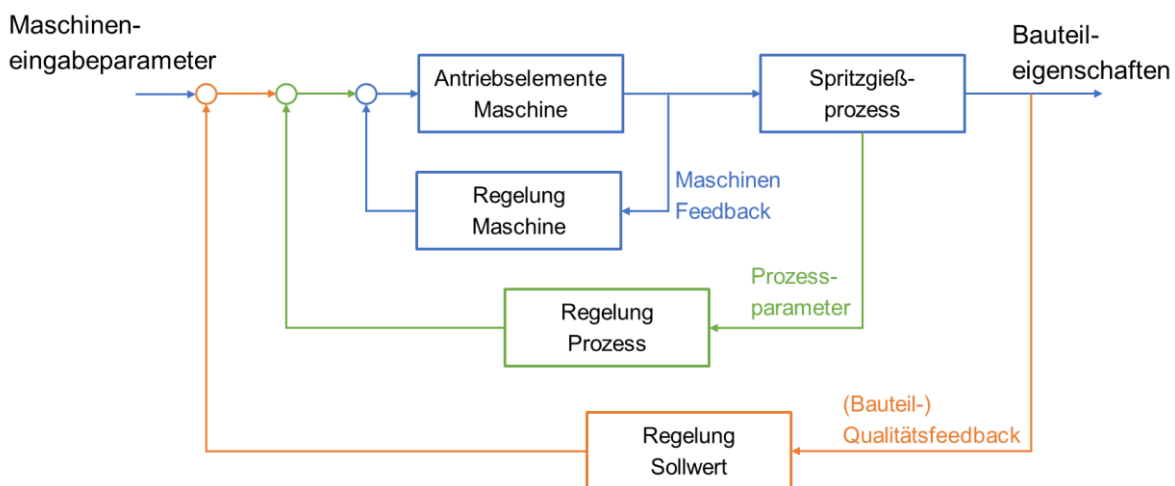


Abb. 3-9: Sich überlagernde Regelkreise zur Optimierung der Bauteileigenschaften im Spritzgießprozess. Angepasst nach (Karbasi, H. *et al.*, 2006) und (Ogorodnyk, O. *et al.*, 2018).

Als Regelgrößen im Spritzgießprozess sind, neben den Prozessdrücken, vor allem Temperaturen von Bedeutung, insbesondere Masse- und Werkzeugtemperatur (Johannaber, F. *et al.*, 2004, S. 955). Eine erweiterte Anwendung der in Abschnitt 3.2.2 erläuterten Messung der Werkzeugwandtemperatur ist die Echtzeitsteuerung des Umschaltens zwischen geschwindigkeitsgeregeltem Einspritzen und druckgeregeltem Nachdrücken mittels eines am Fließwegende positionierten Thermoelements (Steinko, W. *et al.*, 2008, S. 468). Die Wichtigkeit von Temperaturregelungen im Spritzgießprozess verdeutlicht sich für die Werkzeugwandtemperatur, deren Ansteigen um 1,0 °C auch die Kühlzeit um 2 % verlängert (Menges, G. *et al.*, 2007, S. 701). Eine richtige Temperaturkontrolle und Temperierung kann somit die Wirtschaftlichkeit um 20-40 % erhöhen (Menges, G. *et al.*, 2007, S. 701).

4. Kritische Beurteilung des Stands der Technik und Forschung

Aus dem in Abschnitt 3 „Stand der Technik und Forschung“ gegebenen Überblick wird im Folgenden eine Einschätzung der aktuellen Methoden zur formteilnahen Temperaturmessung während und nach der Spritzgießverarbeitung gegeben sowie noch bestehende Herausforderungen und Optimierungspotential aufgezeigt. Wie dargestellt, kommen neben der modellbasierten Methodik zur Bestimmung der Schmelztemperatur im Spritzgusswerkzeug verschiedene invasive bzw. nicht-invasive Konzepte wie Thermoelemente, Thermografie, Fluoreszenz-Spektroskopie oder Ultraschall-Tomografie zum Einsatz (siehe auch Abb. 3-2 und Tabelle 2). Hinsichtlich der Messverfahren sind nur die thermoelementbasierte und thermografische Temperaturmessung als industriell etabliert zu betrachten. Alle anderen erwähnten Verfahren sind aktuell Gegenstand der Forschung.

Trotz der vielen Vorteile moderner *modellbasierter Verfahren* zur Beschreibung des Spritzgießprozesses werden diese in der Literatur vor allem bei komplexen Bauteilen noch als problematisch eingestuft und zudem eine Verifikation durch reale Messungen gefordert. Eine Vielzahl von für die Simulation wichtigen geometrischen und prozessbezogenen Daten ergeben sich meist erst nach Ende der Werkzeugkonstruktion bzw. bei der Abmusterung des Werkzeuges, was die Genauigkeit des Simulationsergebnisses einschränken kann (Meyer, B.-R. *et al.*, 2013, ab S. 131). Dies betrifft vor allem die Einschätzung von Schwindung und Verzug am späteren Formteil, welche aufgrund der oft vielfältigen und schwierig vorzugebenden Einflussgrößen und Randbedingungen vorab meist nur qualitativ bewertbar ist (Bühning-Polaczek, A. *et al.*, 2014, S. 722). Vor allem bei schwierig zu füllenden, komplexen Geometrien (Stein, A., 2018) oder aufwändigen Angussystemen bei Mehrkavitäten-Werkzeugen zeigt sich weiterer Entwicklungsbedarf bei den Simulationsprogrammen, was sich meist durch Nachbesserungen bei der Werkzeugabmusterung bemerkbar macht (Menges, G. *et al.*, 2007, S.125), (Bühning-Polaczek, A. *et al.*, 2014, S. 793). Steinko diskutiert die mangelhafte Übertragbarkeit von Absolutaussagen der Simulation auf die Praxis und gibt z. B. für die mittels Wärmebildkamera überprüfbare Simulationsgenauigkeit der Werkzeugtemperierung eine Differenz von 2-3 K als Unterschied zwischen Simulation und Realität an (Steinko, W. *et al.*, 2008, ab S. 374). Eine zusätzliche Evaluation und Optimierung der Spritzgießsimulation durch experimentelle Methoden wird auch durch andere Autoren weiterhin für notwendig befunden (Gordon, G. *et al.*, 2015), (Praher, B. *et al.*, 2014), vor allem hinsichtlich der Ermittlung genauer Temperaturen in der Schmelze (Hopmann, C. *et al.*, 2017c). So schätzen Gordon *et al.* (Gordon, G. *et al.*, 2015) eine rein modellbasierte Prozessoptimierung bisher als schwierig ein. Hopmann und Kollegen (Hopmann, C. *et al.*, 2016), (Hopmann, C. *et al.*, 2017d), (Hopmann, C. *et al.*, 2017c) betonen in mehreren Veröffentlichungen die Problematik einer modellbasierten Beschreibung der Schmelztemperatur und fordern zusätzlich eine messtechnische Analyse. Als Grund werden die komplexen und hochdynamischen thermischen Vorgänge im Spritzgusswerkzeug genannt, die z. B. durch die hohen auftretenden Kühlraten, den komplexen Wärmetransfer und durch Kristallbildung beeinflusst werden. Auch bei der Modellbildung durch einen Soft-Sensor basierten Ansatz (Abeykoon, C., 2016) wird von nicht näher definierten Abweichungen bei bestimmten Prozessbedingungen berichtet. Zudem muss vor der Erstellung des Soft-Sensors die Abhängigkeit der modellierten, stellvertretenden Zielgröße von einer realen Schlüsselprozessvariablen ebenfalls experimentell gezeigt werden, was in diesem Fall mit einem Netz aus Thermoelementen über den Zylinderquerschnitt und einem IR-Sensor realisiert wurde.

Die optischen Verfahren zur nicht-invasiven Temperaturmessung wie die *Thermografie* oder die *Fluoreszenz-Spektroskopie* bieten je nach eingesetztem Kunststoff die Möglichkeit, auch im Formteilinneren Temperaturen zu messen. Jedoch ist dies nur bei – zumindest teilweise – transluzenten Formmassen möglich. Zusätzlich wird bei thermografischen Methoden von einem erheblichen messtechnischen Aufwand und Know-How sowie von materialabhängigen Messunsicherheiten je nach Emissionsgrad berichtet (Johannaber, F. *et al.*, 2004), (Menges, G. *et al.*, 2007), (Steinko, W. *et al.*, 2008), (Launay, J. *et al.*, 2014). Konkret bestehen beim Einsatz von Infrarot-Temperatursensoren Herausforderungen mit einer ausreichenden Transmission durch den Kunststoff, wodurch meist nur die Formteiloberflächentemperatur bestimmt wird (SKZ, 2013). Zur exakten, quantitativen Temperaturmessung muss das Emissionsverhalten des Kunststoffes beachtet und idealerweise der Emissionsgrad geeicht werden. Infolge transmittierter oder reflektierter Strahlung und des sich ändernden Emissionskoeffizienten macht es einen Unterschied, ob die thermografische Messung im geschlossenen Werkzeug oder bei der Entformung an Luft durchgeführt wird. Eine Beeinflussung der Messung durch vom umgebenden Werkzeugmaterial abgegebene Strahlung ist zusätzlich zu beachten. Launay *et al.* kritisieren im Zusammenhang mit der Infrarotpyrometrie in der Extrusion die geringe Eindringtiefe ins Material und berichten von Messabweichungen von mehreren Grad bei unzureichender Korrektur je nach Emissionsgrad, Spektralband und Sensorposition (Launay, J. *et al.*, 2014). Zusätzlich ist der Einsatz solcher thermografischer Sensoren durch die Umgebungstemperatur, d. h. die Werkzeugtemperatur, limitiert, welche 150 °C nicht überschreiten sollte.

Die *Fluoreszenz-Spektroskopie*, als weiteres optisches Messverfahren, erfordert eine aufwendige Additivierung des Kunststoffes mit temperatursensitiven, fluoreszierenden Zusätzen. Zudem sind auch die Druck- und Temperatureinflüsse auf das fluoreszierende Additiv zu beachten (Bur, A. J. *et al.*, 2001). Bei unzureichender Fehlerkorrektur wird für die Fluoreszenz-Spektroskopie von mehreren Grad Temperaturabweichung berichtet (Launay, J. *et al.*, 2014). Als Hauptkritikpunkt dieser Methode gilt aber die notwendige Transparenz der Formmasse gegenüber dem fluoreszierenden Licht (Praher, B. *et al.*, 2013).

Als vielversprechender Ansatz zur prozessintegrierten, kontaktlosen Temperaturbestimmung über den gesamten Bauteilquerschnitt werden die ultraschallbasierten Messverfahren, d. h. die *Ultraschall-Tomografie*, diskutiert. Bei der Erfassung von Temperaturprofilen haben dabei allerdings weitere Parameter Einfluss auf den Brechungsindex, z. B. sind auch die Dichte und der Druck in der Polymerschmelze von entscheidender Bedeutung, was zu einer komplizierten Messung und Auswertung führen kann (Launay, J. *et al.*, 2014). In der Literatur wird konkret von der schwierigen Kalibration der Ultraschallwandler und -empfänger aufgrund der, zusätzlich zur Temperaturabhängigkeit, druck- und materialabhängigen Schalllaufzeit berichtet (Yang, Y. *et al.*, 2008), (Praher, B. *et al.*, 2013), (Hopmann, C. *et al.*, 2017c). Zudem stellt sich heraus, dass die Ultraschall-Tomografie durch die im Werkzeug verbaute Sensorik nur während des Spritzgießprozesses und auch nur bei idealer Schalleinkopplung gelingt (Fronimidis, D. *et al.*, 2005). Das abkühlbedingte Ablösen der Schmelze von der Werkzeugwand markiert dabei eine Grenze der Ultraschallmessung, da aufgrund des auftretendes Luftspaltes die Ultraschallwelle nicht mehr verlustfrei übertragen werden kann. Bei aktuellen Ansätzen (Hopmann, C. *et al.*, 2017c) ist auch im Spritzprägeverfahren eine Datenerfassung durch die sich während der Abkühlphase verschlechternde Schalleinkopplung nur bis zum schwingungsbedingten Ablösen des Kunststoffes von der Kavitätswand möglich. Aufgrund der inhomogenen Polymerschmelze, der vielen sich überlagernden Einflussparameter, deren Einfluss auf die Schalllaufzeit und aufgrund der komplizierten Messstrecke über Puffermaterial, Schmelze und erneuten Puffer ist bisher nur eine Messung der Schallamplituden und keine direkte Messung der Schalllaufzeit bzw. eine folgende Umrechnung in ein Temperaturprofil

realisiert. Der Fokus liegt noch auf einer Optimierung der räumlichen Auflösung (Hopmann, C. *et al.*, 2017c). Auch bei weiteren, aktuellen Ansätzen wird eine konkrete Messung der Temperatur in den praktischen Versuchen nicht aufgezeigt und die Messgenauigkeit des Systems, angegeben mit einem absoluten Fehler von $<0,5$ °C, nur simulativ bestimmt (Praher, B. *et al.*, 2013), (Praher, B. *et al.*, 2014). Die Ultraschall-Tomografie kann funktionsbedingt also nicht während des kompletten Prozesses einen durchgehenden zeitlichen Messverlauf realisieren, d. h. die Temperaturerfassung wird nur bis zum Einsetzen der Schwindung und, durch die werkzeuggestützte Sensorik, auch nicht nach der Entformung stattfinden. Trotz dieses chancenreichen Ansatzes zur Messung der Temperatur im Schnittprofil bestehen somit noch Einschränkungen, die dem industriellen Einsatz der Ultraschall-Tomografie erschweren.

Die in Kapitel 3.2.2 beschriebenen, als Werkzeugwandtemperatursensoren eingesetzten, *nicht-invasiven Thermoelemente* besitzen den Nachteil, dass sie nur am Übergang zwischen Werkzeug und Kavität, d. h. nur am Formteilrand und nicht im Bauteilinneren, messen können. Zudem wird die Temperaturbestimmung stark durch das umgebende Werkzeugmaterial beeinflusst und das schwindungsbedingte Ablösen von der Werkzeugwand verhindert eine kontinuierliche Messung während der Abkühlung (Johannaber, F. *et al.*, 2004), (Steinko, W. *et al.*, 2008), (Menges, G. *et al.*, 2007), (Schiller, G. F., 2018). D. h. durch die hohe Wärmeleitfähigkeit der im Werkzeugbau eingesetzten Stähle bzw. Aluminiumlegierungen und die zur Reduzierung von Verzug und Zykluszeit optimal ausgelegte Temperierung des Werkzeuges soll die Wärme der Polymerschmelze möglichst schnell und gleichmäßig abtransportiert werden. Dadurch wird auch die Aussagekraft der im Werkzeugmaterial eingebetteten Thermoelemente limitiert. Somit messen die Thermoelemente nur einen Mittelwert aus Schmelztemperatur am Bauteilrand bzw. der Werkzeugmaterialtemperatur, was die Bedeutung der Messantwort verringert. Aus diesen Gründen sind die Werkzeugwandtemperatursensoren laut Johannaber zur Messung der genauen Schmelztemperatur, besonders im Bauteilinneren, nicht geeignet (Johannaber, F. *et al.*, 2004, S. 341).

Eine auch für opake Materialien zuverlässige Temperaturmessung in der Formteilmittte während des gesamten Spritzgießprozesses gelingt bisher nur, wie in Abschnitt 3.2.2 vorgestellt, mit werkzeuggestützten *invasiven Thermoelementen* (Farouq, Y. *et al.*, 2005), (Liu, S.-J. *et al.*, 2009), (Nicolazo, C. *et al.*, 2010), (SKZ, 2013) oder Dünnschicht-Thermoelementen (Yokoi, H. *et al.*, 2016). Einzelne drahtgebundene Ausführungen (Farouq, Y. *et al.*, 2005), (Nicolazo, C. *et al.*, 2010) bieten auch aus dem Werkzeug entnehmbare Sonden für eine Temperaturmessung nach der Entformung, stehen aber aus dem Bauteil heraus und sind weiterhin kabelgebunden. Somit ist das Formteil direkt an das Messgerät gebunden, was nicht nur die Entformung des Bauteiles aus dem Werkzeug erschwert, sondern auch wegen der notwendigen Entfernung der teuren Messsonden aus dem Bauteil eine weitere Verwendung des Kunststoffbauteiles in Kombination mit der Messung ausschließt. Eine Messung der Bauteiltemperatur auch nach der Entformung ist allerdings, wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, auch zur Überwachung der Lagerung und Erfassung bzw. besseren Einschätzung der temperaturabhängigen Eigenspannungen, Verzug und Nachschwindung sinnvoll (Kulkarni, S., 2017, S.107).

Die direkte, invasive Messung der Schmelztemperatur im Spritzgießprozess ist aufgrund der starken dauerhaften Belastungen auf eine fest im Werkzeug installierte Sensorik herausfordernd (Johannaber, F. *et al.*, 2004, S. 962). Somit wird ein Einsatz dieser Messmethodik über „verworfen“, d. h. im Bauteil verbleibende und somit nur einem Spritzgießzyklus ausgesetzt, weniger robusten und folglich auch preiswerteren Sensoren, interessant. Trotz dieser Forderung von Karbasi *et al.* (Karbasi, H. *et al.*, 2006) nach Reduzierung der Instrumentations- und Werkzeugkosten durch drahtlose Sensorik zum Auslesen von Qualitätsvariablen aus dem Spritzgusswerkzeug ist bisher keine kabellose Messmethode umgesetzt und erprobt, die eine

kombinierte Temperaturmessung während und nach der Spritzgießverarbeitung erlaubt. Das Prinzip der drahtlosen Temperaturmessung während des Spritzgießprozesses mittels RFID-Sensoren ist in einer Patentanmeldung erwähnt und dokumentiert (Pitschenender, W. *et al.*, 2004).

Zur *Temperaturmessung nach der Entformung* aus dem Spritzgusswerkzeug wird das Verfahren der Infrarot-Thermografie verwendet. Als Nachteil bzw. Herausforderung bei der Aufnahme von Infrarotbildern direkt am Spritzgusswerkzeug wird die spiegelnde Werkzeugoberfläche genannt, was oft nur durch eine aufwendige Beschichtung mit Antireflexionspray oder einer Vergleichsmessung bezogen auf eine schwarze Referenzfolie mit definiertem Emissionsgrad kompensiert werden muss (Johannaber, F. *et al.*, 2004), (Menges, G. *et al.*, 2007). Außerdem gelten dieselben Voraussetzungen wie bei der In-line-Thermografie (beschrieben in Abschnitt 3.2.3) zur Beachtung des korrekten Emissionsgrades, vor allem bei quantitativen Messungen. Als zusätzlich kritisch für die Messung mittels IR-Thermografie nach der Entformung werden Einflüsse durch erzwungene Konvektion in der Produktionshalle oder zu geringe Temperaturdifferenzen zwischen Hintergrund und Bauteil gesehen, d. h. bei normalen Umgebungsbedingungen sollte die Formteilmperatur mindestens 50 °C betragen (Schwalme, G., 2014), (Schwalme, G., 2017). Zusätzlich wird empfohlen, mehrere Ansichten des Bauteils thermografisch zu erfassen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass alle im Stand der Technik und Forschung ermittelten experimentellen Ansätze aufgrund der hohen Sensorkosten mit werkzeuggebundener Sensorik arbeiten und somit nur während bzw. eingeschränkt nach dem Spritzgießprozess in der Lage sind, die Temperatur am Bauteil mit demselben Sensorelement zu bestimmen.

Hinsichtlich der Optimierung des Kunststoffspritzgießens durch *Prozessregelung* wird ein Qualitäts-Feedback von Bauteileigenschaften an die Maschine empfohlen (siehe auch Abb. 3-9) (Karbasi, H. *et al.*, 2006), (Ogorodnyk, O. *et al.*, 2018). Meist wird die Produktqualität des Kunststoffbauteils indirekt über Maschinenparameter, wie z. B. Geschwindigkeiten, Drücke und Temperaturen beschrieben, da aktuelle Spritzgießmaschinen nur eingeschränkte Möglichkeit besitzen, das Bauteil direkt zu überwachen (Wang, M.-L. *et al.*, 2018, S. 162). Generell wird aber empfohlen, die Prozessfähigkeit bzw. die Regelkonstanz des Spritzgießprozesses über möglichst formteilnahe und somit besonders qualitätsrelevante Prozessdaten, z. B. aus dem Spritzgusswerkzeug zu bestimmen (Steinko, W. *et al.*, 2008, S. 475), (Karbasi, H. *et al.*, 2006), (Ogorodnyk, O. *et al.*, 2018).

5. Ansatz und Konzept

Ansatz der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung und Untersuchung einer Lösung zur drahtlosen, kontinuierlichen Temperaturerfassung aus dem Inneren des Spritzgussbauteiles während Herstellung und Verwendung des Kunststoffspritzgussteiles mit demselben Sensorelement. Aufgrund der Möglichkeit zur kabellosen und passiven Energieversorgung wurde dazu die Radio Frequency Identification (RFID)-Technik gewählt.

Als konkrete Aufgabenstellung leitet sich die Entwicklung und Konstruktion eines Spritzgusswerkzeuges mit integrierter RFID-Antenne ab, um RFID-Temperatur Sensoren mit verschiedenen Kunststoffen mittels Insert-Technik umspritzen und drahtlos während des Prozesses auslesen zu können. Durch eine zusätzliche externe RFID-Antenne wird auch eine Temperaturmessung mit demselben, im Bauteil verbleibenden Sensor nach der Entformung ermöglicht. Experimente sollen den Nachweis erbringen, dass eine Kommunikation und damit die drahtlose Temperaturmessung mit passiven RFID-Sensor-Tags während und nach der Spritzgießverarbeitung möglich ist. Zudem soll durch die im Bauteil verbleibende Temperatursensoren über eine einseitige Regelung der Spritzgießmaschine erreicht werden den Abkühlprozess und den Zeitpunkt der Bauteilentformung zu beeinflussen. Es sollen zusätzlich Belastungen des Spritzgießprozesses auf den sensiblen Einlegesensor beachtet und dessen Auswirkungen auf die Bauteilmaßhaltigkeit und Formteilstabilität untersucht sowie bewertet werden.

Der iterative Entwicklungsprozess zur Konzept-/Prozessentwicklung und zur Umsetzung der drahtlosen, kontinuierlichen Temperaturmessung wird in Abb. 5-1 beschrieben und ist an das in der VDI-Richtlinie 2206 vorgeschlagene V-Modell (VDI 2206, 2004) zur Entwicklung mechatronischer Systeme angelehnt.

Die Anforderungen an das Messsystem ergaben sich hauptsächlich aus den Randbedingungen des Spritzgießverfahrens. Ein erster Entwurf der Messvorrichtung, bestehend aus RFID-Schreib-/Leseinheit, Antenne und Transponder ist vorab getestet und schließlich gemäß dem 3-Säulenmodell zur Entwicklung im Kunststoffspritzguss (Steinko, W. *et al.*, 2008, S. 374) und weiterer üblicher Gestaltungsregeln (Menges, G. *et al.*, 2007), (Kazmer, D., 2016) für den Spritzgussformenbau als Werkzeugprototyp umgesetzt worden. Bei der Entwicklung des Spritzgusswerkzeuges wurde wegen der besonderen wirtschaftlichen Relevanz auf die Verarbeitbarkeit von Standard- bzw. technischen Thermoplasten fokussiert, was Belastungen mit Temperaturen bis zu 260 °C und mehreren hundert bar Druck zur Folge hat. Zusätzliche Anforderungen waren die Kompatibilität bzw. ein geringer Integrationsaufwand des Systems in die bestehende Anlageninfrastruktur. Die Auslesesoftware wurde auf MATLAB-Basis (The MathWorks, Inc., Natick, USA) programmiert. Die anschließende Systemintegration in den Spritzgießprozess und die Verifizierung des entwickelten Werkzeuges beinhaltete den Zusammenschluss aller Einzelkomponenten aus Soft- und Hardware, die Überprüfung der Kommunikationsfähigkeit des Messsystems, die eigentliche Temperaturmessung und die Weiterentwicklung zur Regelfähigkeit der gesamten Spritzgießmaschine. Optimierungen an Software oder Spritzgusswerkzeug wurden iterativ vorgenommen.

Die finale Bauteilverifizierung untersucht den Kontakt zwischen RFID-Sensor-Tag und Kunststoffformteil und Auswirkungen des Einlegeteils auf die Maßhaltigkeit und Stabilität des Kunststoffbauteils. Der Entwicklungsprozess und die experimentelle Verifizierung wurde durch geeignete Modellbildung, z. B. Spritzgießsimulation, begleitet.

Einzelne Untersuchungen zur Prozessüberwachung bzw. Prozessregelung beim Kunststoff-spritzgießen und zur Maßhaltigkeit von Spritzgussbauteilen mit/ohne Einlegeteile wurden vorveröffentlicht (Zeppenfeld, M. *et al.*, 2016), (Zeppenfeld, M. *et al.*, 2017d), (Zeppenfeld, M. *et al.*, 2017b), (Zeppenfeld, M. *et al.*, 2019a/b).

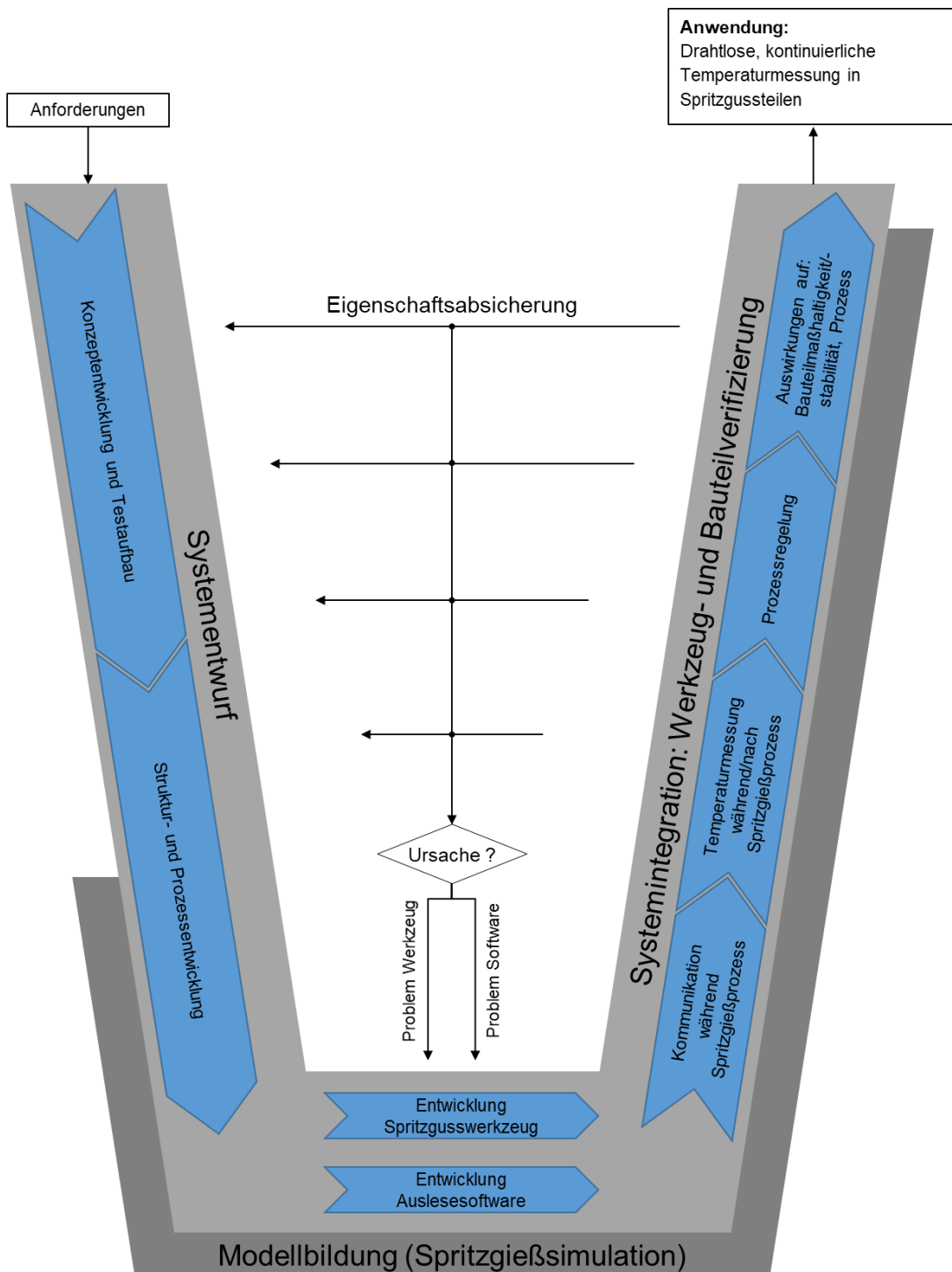


Abb. 5-1: Iterativer Entwicklungsprozess zur Umsetzung der drahtlosen Temperaturmessung während und nach der Spritzgießverarbeitung bestehend aus Systementwurf, Systemintegration inklusive Werkzeugverifizierung und abschließender Bauteilverifizierung.

6. Erwartete Vorteile und Funktionen der Lösung

Durch die angestrebte Trennung von Spritzgusswerkzeug und Sensorik, im Sinne der kombinierten und kontinuierlichen *Prozessüberwachung* des Formteiles, wird eine drahtlose Temperaturmessung im Spritzgussbauteil während und nach seiner Herstellung mit demselben Sensor umgesetzt. Die im Bauteil verbleibende Sensorik ermöglicht es zusätzlich, das Kunststoffbauteil in seinem weiteren Lebenszyklus, beispielsweise während der Lagerung und einer konkreten Anwendung, zu überwachen.

Mittels des im RFID-Sensor-Tag integrierten Datenspeichers wird außerdem eine im Bauteil integrierte, automatisierbare und elektronisch auslesbare, d. h. ohne Sichtkontakt auskommende *Prozessdokumentation* dargestellt. Somit ist eine umfassende Kontrolle der Bauteilqualität und die komplette Prozess-/Bauteildokumentation von Beginn des Fertigungsprozesses an möglich. Dies erscheint vor allem aufgrund der stetig wachsenden Anforderungen hinsichtlich Kennzeichnungspflicht und Nachverfolgbarkeit von Medizinprodukten, d. h. auch entsprechender Kunststoffartikel, im Zuge der Einführung der *Unique Device Identification* in USA und Europa vorteilhaft (FDA Fed. Reg. 78(185), 2013), (EU Reg. 2017/745, 2017).

Die Umsetzung einer *Prozessregelung* basierend auf im Spritzgießbauteil eingesetzter und verbleibender Sensorik erlaubt eine Optimierung des Spritzgießprozesses aus dem Bauteil heraus. So macht nach Dubay et al. (Dubay, R. et al., 2006) die Kühlzeit ca. 80 % der Zykluszeit aus. Aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist somit eine möglichst schnelle und effektive Kühlung für eine hohe Produktivität erforderlich, welche aber natürlich auf Anforderungen an die Bauteilqualität hinsichtlich Schwindung/Verzug, d. h. einem Einfluss auf die Maßhaltigkeit bzw. Festigkeit, Rücksicht nehmen muss. Durch die umgesetzte adaptive Anpassung der Restkühlzeit kann der Nachweis der kompletten Bauteilerstarrung bei Entformung erbracht werden. Somit wird ein Beitrag geleistet, die durch Ogorodnyk et al. (Ogorodnyk, O. et al., 2018) geforderte und bisher unzureichend gelöste Rückführung von qualitäts- und bauteilspezifischen Parametern in den Spritzgieß-Regelkreislauf nach Karbasi und Reiser (Karbasi, H. et al., 2006) zu ergänzen. Dadurch kann auch eine Optimierung des gesamten dreistufigen Spritzgieß-Regelkreises und somit der Bauteilqualität durch die Rückführung bauteilnaher Prozessparameter während des Spritzgießens durch das formteilintegrierte Messelement erreicht werden (siehe mittlerer/äußerer Regelkreis in Abb. 3-9).

7. Beschreibung der Lösungsstruktur

Der Systementwurf bzw. die Vorrichtung zur Realisierung einer kontinuierlichen drahtlosen Temperaturmessung umfasst im Wesentlichen folgende Elemente:

- Spritzgießmaschine
- Spritzgusswerkzeug
- RFID-UHF-Schreib-/Lesegerät
- RFID-UHF-Antennen (intern im Werkzeug und extern)
- RFID-UHF-Sensor-Tag zur Temperaturmessung
- Hard-/Software zur Auswertung
- Optionale konventionelle Prozessüberwachung (Druck, Temperatur)

Die Verknüpfung der genannten Systemkomponenten ist in Abb. 7-1 dargestellt. Die handelsübliche Spritzgießmaschine benötigt als einzige Anforderung zur Verbindung mit dem RFID-UHF-Schreib-/Lesegerät und der zusätzlichen konventionellen Prozessüberwachung programmierbare Ein- und Ausgänge. Die parallel und optional zwischen Werkzeug und Spritzgießmaschine geschaltete konventionelle Prozessüberwachung dient als Referenz zur Kontrolle bzw. Optimierung der Prozessparameter und der Verifizierung des Systems. Als Hauptelement des Systems dient das hier entwickelte Spritzgusswerkzeug mit der integrierten RFID-Antenne im Ultra High Frequency Frequenzband und der dazugehörige $5 \times 5 \times 3,2 \text{ mm}^3$ RFID-Sensor-Tag mit Temperaturmessfunktion. Dieses Frequenzband wurde aufgrund der guten Standardisierung und der hohen Datenübertragungsraten im Vergleich mit anderen RFID-Frequenzbändern gewählt. Zusätzlich sind die Antennenbauformen und die verfügbaren UHF-Transponder durch den praktikablen UHF-Wellenlängenbereich geometrisch ausreichend klein, um sie in ein Spritzgussbauteil von wenigen Millimetern Stärke integrieren zu können. Zusätzliche Anforderungen an den RFID-Sensor-Transponder waren neben den Abmaßen eine hohe Beständigkeit gegenüber thermischen und mechanischen Belastungen, die integrierte Temperatursensorik, eine geeignete Lesereichweite sowohl in metallischer als auch nicht-metallischer Umgebung sowie die passive Funktionsweise. Die Kommunikation während des Spritzgießprozesses mit dem in der Kavität befindlichem Sensor-Tag wurde durch ein Dielektrikum aus Polyetheretherketon (PEEK) im Übertragungsweg zu einer im Werkzeug integrierten Antenne realisiert. Nach der Entformung diente eine weitere extern angebrachte Antenne zur Überwachung des Formteiles. Der Prototyp, die dazugehörigen Komponenten und der Laboraufbau sind in Kapitel 10 detailliert beschrieben.

Zwischen den einzelnen Systemkomponenten findet während und nach der Herstellung des Spritzgussteiles ein kontinuierlicher Datenaustausch statt, wobei dem RFID-Schreib-Lesegerät (Reader) und der daran gekoppelten Auswertehard-/software eine zentrale Rolle im Signalfluss zukommt. In Richtung Spritzgießmaschine werden Signale zur Identifikation einzelner Prozessschritte und Befehle zur Steuerung bzw. Regelung von Maschinenfunktionen ausgetauscht. Die Kommunikation zwischen Reader und Sensor-Transponder umfasst den Austausch von Kalibrationsdaten, die Signaloptimierung über Messung der Received Signal Strength (RSSI) als Indikator der Signalstärke und die eigentlichen Messdaten. Zusätzlich kann der 128 bit EPC-Speicher des Tags beschrieben und somit zur Prozessdokumentation genutzt werden. Der detaillierte Signalfluss bzw. Prozessablauf ist in Abschnitt 8 detailliert dargestellt.

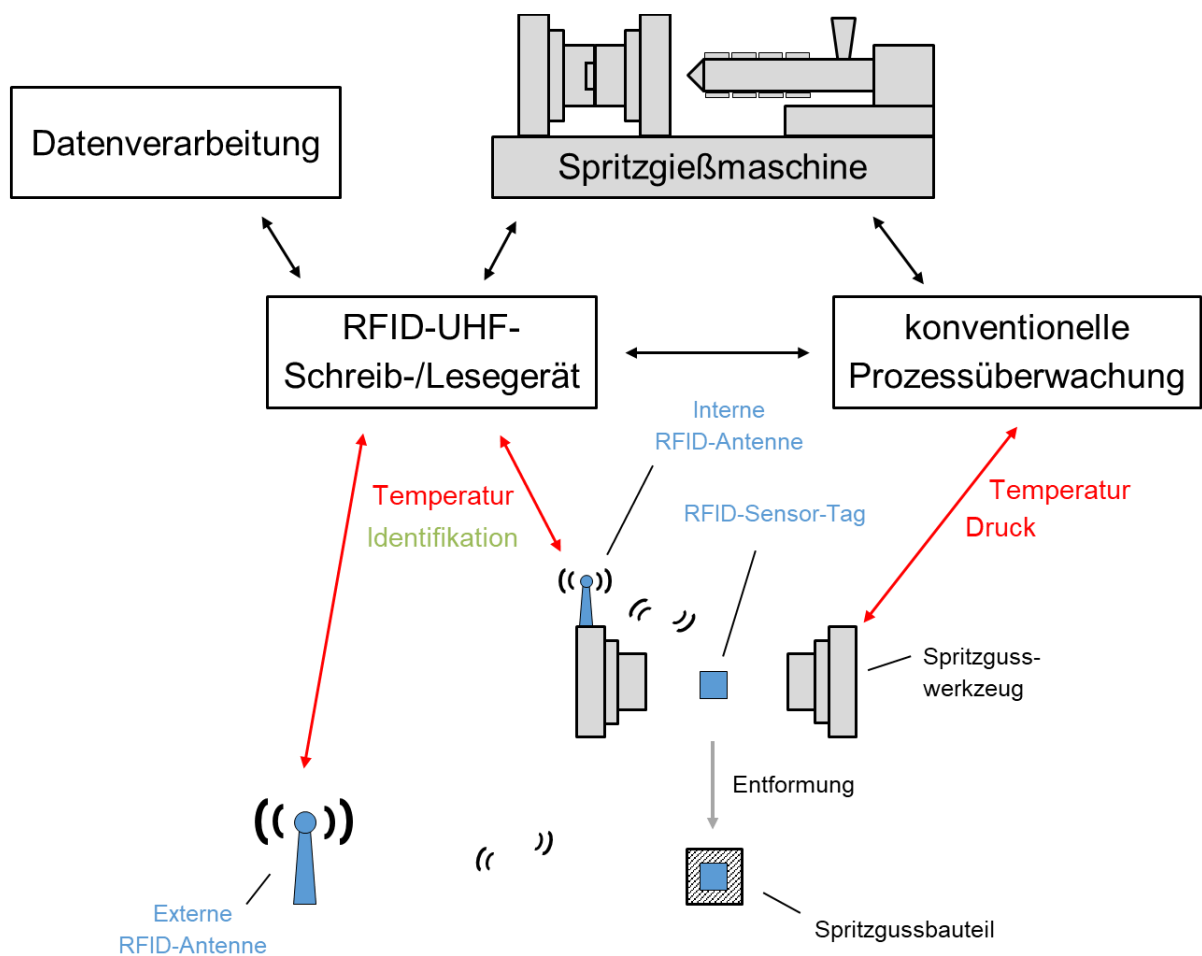


Abb. 7-1: Struktur des Systems bzw. der Vorrichtung zur kombinierten und kontinuierlichen, drahtlosen Temperaturmessung bei der Herstellung und Verwendung von Kunststoffspritzgussteilen. Die konventionelle Prozessüberwachung dient dabei der Referenzmessung von im Prozess auftretenden Drücken und Temperaturen. (Zeppenfeld, M. *et al.*, 2019a/b)

Im Folgenden wird die Einbau- und Messsituation während dem Spritzgießprozess beschrieben. Um den thermischen Widerstand zur temperierten Werkzeugwand möglichst groß und damit den Wärmeableitungsfehler möglichst klein zu halten, wurde der Sensor-Tag (Bodenfläche $5 \times 5 \text{ mm}^2$), wie von Bernhard vorgeschlagen (Bernhard, F., 2014, S. 241), auf einer möglichst kleinen Fläche (4 Auflagepunkte mit $1 \times 1 \text{ mm}^2$) in einem wärmeisolierenden Material gelagert. Dieser Einsatz aus Polyetheretherketon (PEEK) mit einer Wärmeleitfähigkeit von $0,25 \text{ W/mK}$ (Baur, E. *et al.*, 2007, S. 747) entkoppelt bzw. isoliert den Sensor thermisch zur Werkzeugwand aus Aluminium. Wie von Johannaber in Bezug auf die Temperaturmessung im Spritzgießprozess gefordert (Johannaber, F. *et al.*, 2004, S. 967), gewährleistet die hier gewählte Einbausituation somit einen geringen Einfluss der Umgebung auf den Sensor. Durch die Vertiefung unter dem Sensor-Tag wird ein komplettes Umströmen gewährleistet, was zusätzlich zur Position des Sensor-Chipsatzes direkt auf dem RFID-Transponder eine fast komplette Umspritzung und somit eine möglichst direkte Kopplung zum Messmedium erlaubt (siehe Abb. 7-2).

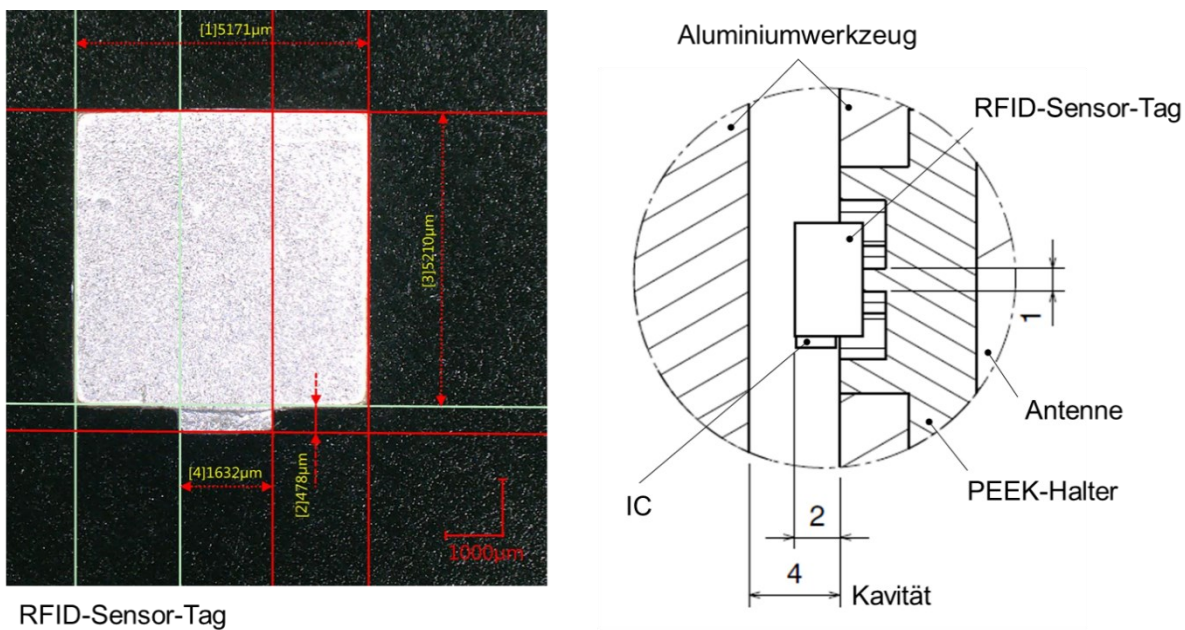


Abb. 7-2: Passiver RFID-Sensor-Transponder vom Typ Boson Magnus[®] S3 (links). Einbausituation des RFID-Sensor-Tags im Prototypenwerkzeug (rechts, Maße in mm): Der Sensor-Tag ist zur thermischen Isolation mit der Umgebung auf möglichst kleiner Fläche (insgesamt 4 Auflagepunkte) komplett im PEEK-Einsatz gelagert.

Für die Modellierung der Messsituation in der Kavität wird ein laminares Fließverhalten der hochviskosen Schmelze angenommen (Bonten, C., 2014, S. 286), (Wang, M.-L. *et al.*, 2018, S. 159). Die beim Einspritzen in die Kavität auftretende Quellströmung bewirkt an der Fließfront ein gleichmäßiges Geschwindigkeitsprofil. Nach Johannaber (Johannaber, F. *et al.*, 2004, S. 962) lässt sich der Strömungs- und Temperaturverlauf wie bei kreisförmigen Strömungsquerschnitten in Rohrströmungen beschreiben. Da Polymerschmelzen meist eine kleine Reynoldszahl ($Re \approx 10^{-5}$) aufweisen (Osswald, T. A. *et al.*, 2006, S. 234) verhält sich die Geschwindigkeitsverteilung w wie bei laminarer Rohrströmung näherungsweise nach der Hagen-Poiseuille'schen Gleichung (siehe Formel 7-1 und 7-2) (Böswirth, L. *et al.*, 2014, S. 178). Somit folgt auch ein Temperaturprofil wie in zweiseitig begrenzten Strömungen mit thermischer Kopplung zur Werkzeugwand (Bernhard, F., 2014, S. 198).

Eine Erweiterung für Strömungen in engen, flachen Kanälen (Höhe \ll Länge), wie sie bei der Werkzeugfüllung im Spritzgießen auftreten, stellt das Hele-Shaw-Modell dar (siehe Formel 7-3) (Osswald, T. A. *et al.*, 2006, S. 237). Unter Beachtung der hauptsächlich in Bauteilwandstärke/-dicke (z) stattfindenden Wärmeableitung über die Werkzeugwand ergänzt sich das Modell zu Formel 7-4 (Osswald, T. A. *et al.*, 2006, S. 239).

$$w = \frac{p_1 - p_2}{4\eta l} (R^2 - r^2) \quad 7-1$$

$$w_{max} = \frac{p_1 - p_2}{4\eta l} R^2 \quad 7-2$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0 \quad 7-3$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \eta \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} \right)^2 \quad 7-4$$

mit w: Geschwindigkeitsverteilung, p: Druck vor (1) bzw. hinter (2) gedachtem Strömungselement, R: Rohrradius, r: radiale Position im Rohr, η : dynamische Viskosität, l: Rohrlänge, ρ : Dichte, S: Strömungsleitfähigkeit, C_p : spezifische Wärme bei konstantem Druck, u: Strömungsgeschwindigkeit, T: Temperatur, t: Zeit, x/y: Richtung parallel/quer zur Strömung, z: Dickenrichtung

Der im Spritzgusswerkzeug platzierte RFID-Sensor-Tag erfährt dabei, wie generell beim Umspritzen von Einlegeteilen bzw. dem Umströmen eines Körpers, Schubspannungen in tangentialer und Druck in normaler Richtung zu seiner Oberfläche (Heinle, M., 2014, S. 24). Daraus ergibt sich der Gesamtströmungswiderstand nach Formel 7-5, 7-6 und 7-7 (Böswirth, L. *et al.*, 2014, S. 217). Da der Sensor sich als stumpfer Körper angeströmt mit Schmelze von kleiner Reynoldszahl betrachten lässt, überwiegt in diesem Fall der Reibungswiderstand (Böswirth, L. *et al.*, 2014, S. 225).

Zu beachten ist aber, dass bei ungleichmäßigem Überströmen ein Kernversatz des Einlegeteils möglich ist (Heinle, M., 2014, S.25). In der Kavität des Spritzgusswerkzeugs bildet sich an der im Vergleich zur Schmelze kälteren Werkzeugwand im weiteren Einspritzvorgang eine erstarrte Hautschicht aus. An der Grenze zur immer noch im geschmolzenen Zustand befindlichen Hauptströmung zeigt sich eine erhöhte Scherrate und somit auch eine dissipative Temperaturerhöhung, wobei das Temperaturmaximum auch an der Stelle des Schergeschwindigkeitsmaximums liegt (Bühning-Polaczek, A. *et al.*, 2014, S. 715), (Heinle, M., 2014, S. 22). Insgesamt bildet sich somit über den Kavitätsquerschnitt, wie auch in Abb. 7-3 dargestellt, ein parabolisches Geschwindigkeitsprofil in der Hauptströmung aus (Johannaber, F. *et al.*, 2004, S. 185), (Heinle, M., 2014, S. 22).

$$\text{Druckwiderstand} \quad F_P = \int_0 \quad p \times dO \times \sin \varphi \quad 7-5$$

$$\text{Reibungswiderstand} \quad F_R = \int_0 \quad \tau \times dO \times \cos \varphi \quad 7-6$$

$$\text{Gesamtwiderstand} \quad F_W = F_P + F_R \quad 7-7$$

mit: p: Druck, τ : Schubspannung, dO: Flächenelement, φ : Winkel Flächenelement zur Anströmrichtung

$$Nu = 7,54 \times \left(\frac{Pr}{Pr_W} \right)^{0,11} = 7,54 \times \left(\frac{Pr}{\frac{\eta_W h}{\lambda_M}} \right)^{0,11} = 1,9121 \quad 7-10$$

$$\alpha = \frac{Nu \lambda_M}{h} = 114,7260 \frac{W}{m^2 K} \quad 7-11$$

mit: $\rho_M = 784,31 \frac{kg}{m^3}, \eta_M = 2,508 Pas, \nu_M = 0,0032 \frac{m^2}{s},$

$$\eta_W = 6,55 \times 10^5 Pas$$

$$u_M = 0,05 \frac{m}{s}, h = 4 mm, c_M = 1,95 \frac{kWs}{kg K}, \lambda_M = 0,24 \frac{W}{mK}$$

mit ρ_M = Dichte Medium, η_M = dynamische Viskosität Medium, ν_M = kinematische Viskosität Medium, c_M = spezifische Wärmekapazität Medium, u_M = Strömungsgeschwindigkeit Medium, h = Höhe Kavität α = Wärmeübergangskoeffizient, λ_M = Wärmeleitfähigkeit Medium, η_W = dynamische Viskosität im Wandbereich

Laut Literatur verhalten sich die, z. B. bei der Temperaturmessung im Plastifizierzylinder zum Einsatz kommenden, Messglieder in Form verschiedener Thermosonden näherungsweise wie ein System erster Ordnung (Johannaber, F. *et al.*, 2004, S. 966). Wie auch bei anderen im Spritzgießprozess eingesetzten Messsensoren zu beobachten (Johannaber, F. *et al.*, 2004, S. 967), beeinflusst der Wärmeübergang zwischen Umgebung und Sensor sowie dessen thermische Masse auch die Ansprechzeit des Sensors. Dadurch besitzt eine Messsonde im Schmelzestrom eine etwas längere Zeitkonstante τ für ihre Sprungantwort als ein in der Zylinderwand verbautes, meist kleineres Thermoelement (Johannaber, F. *et al.*, 2004), S. 967. Der verzögerte Wärmetransport am Temperatursensor, verursacht durch thermische Widerstände bzw. Wärmekapazitäten, kann nach Bernhard (Bernhard, F., 2014, S. 327) mit der in Formel 7-12 angegebenen Übergangsfunktion (Sprungantwort mit Eingangssprung = 1) beschrieben werden (siehe auch Abb. 7-4).

Übergangsfunktion

$$h(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \quad 7-12$$

mit t : Zeit, τ : Zeitkonstante

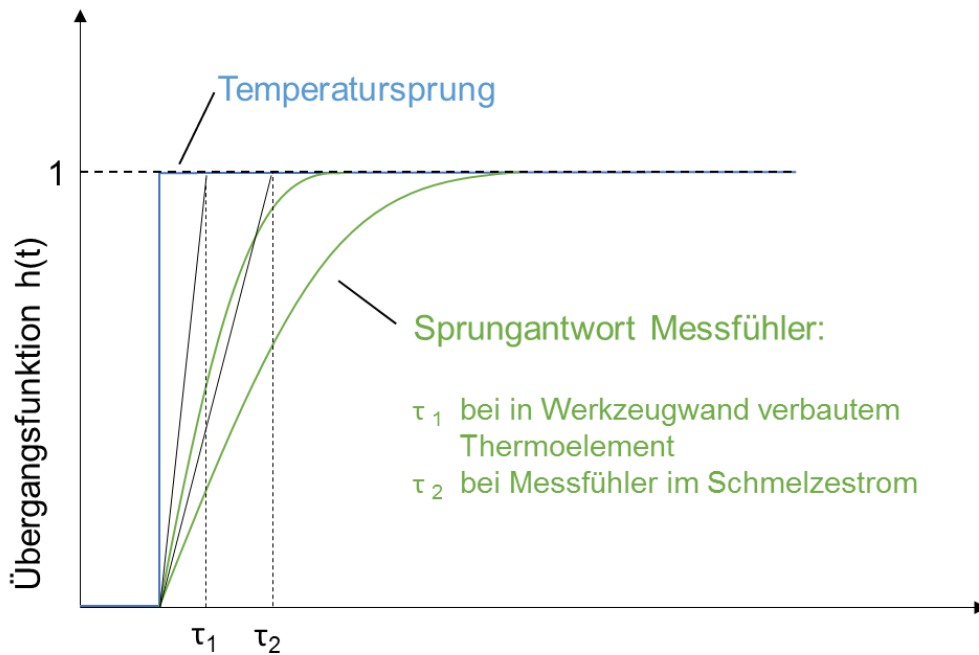


Abb. 7-4: Übergangsfunktion $h(t)$ von Berührungsthermometern nach einem sprunghaften Temperaturanstieg. Durch die aus Stabilitätsgründen meist größere thermische Masse benötigt ein Messfühler im Schmelzestrom eine etwas längere Zeitkonstante τ für seine Sprungantwort. Angepasst nach (Johannaber, F. *et al.*, 2004, S. 967) und (Bernhard, F., 2014, S. 327).

Die Messkette des hier verwendeten Temperatursensors lässt sich nach Bernhard (Bernhard, F., 2014, S. 59), wie in Abb. 7-5 dargestellt, modellieren und beschreibt den Wärmeübergang zwischen dem schmelzeflüssigen, strömenden Messobjekt (Polypropylenschmelze) und dem festen Berührungsthermometer durch Konvektion und Wärmeleitung. Dies beinhaltet die Folgen der Eigenerwärmung und entstehende thermische Messfehler durch Rückwirkung des Sensors auf das Messobjekt bzw. einen Wärmestrom vom Sensor durch thermische Kopplung an die Umgebung.

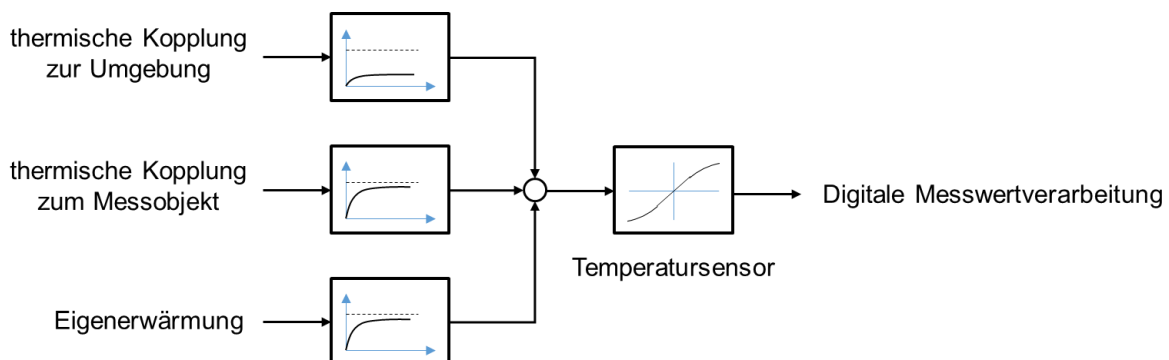
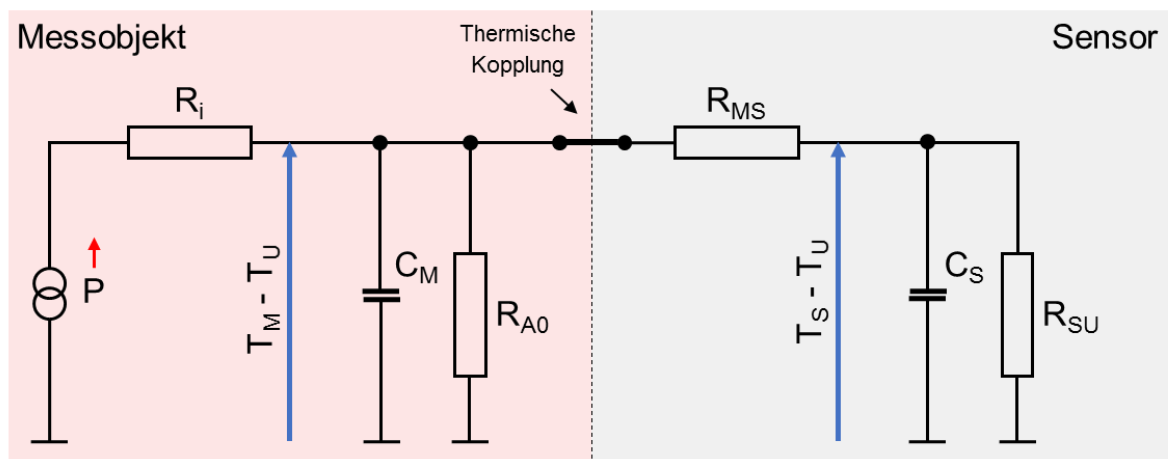


Abb. 7-5: Signalfussplan und Verhalten eines Berührungsthermometers. Angepasst nach (Bernhard, F., 2014, S. 59).

Der thermische Messfehler setzt sich nach Bernhard (Bernhard, F., 2014, S. 67) als Summe aus mehreren thermischen Teilfehlern ΔT zusammen. Dabei ist die hier vorgestellte Temperaturmessung als Kombination einer Messung in einem Fluid (erzwungene Konvektion und Wärmeleitung) und einer anschließenden Bestimmung der Temperatur in einem Festkörper (Wärmeleitung) zu betrachten. Die Modellierung der Temperaturmessung in der Schmelze beinhaltet dabei Messfehler durch Temperatursgleich, Änderung des äußeren thermischen Widerstands durch die Kopplung Messobjekt/Thermometer und durch Wärmeableitung zur Umgebung. Bei strömenden Medien begrenzt sich der Gesamtmessfehler, da dabei von einer Rückwirkungsfreiheit des Sensors auf die Temperatur des Mediums ausgegangen wird (Bernhard, F., 2014, S. 200). Deswegen ist bei der Temperaturmessung in Fluiden hauptsächlich ein Messfehler durch Wärmeableitung zu betrachten (Bernhard, F., 2014, S. 197). Ein eventueller Fehler durch adiabatischen Aufstau (Recovery-Effekt) tritt meist nur bei sehr schnell strömenden Gasen, z. B. bei Strömungsgeschwindigkeiten von 100 m/s auf (Bernhard, F., 2014, S. 254-256), und ist bei der hier an der Spritzgießmaschine vorgegebenen Einspritzgeschwindigkeit von 0,05 m/s zu vernachlässigen. Der Messfehler im Festkörper reduziert sich durch die hier umgesetzte, fast vollständige Umspritzung des Sensors, da nur eine minimale Kopplung des Sensors zur Umgebung über die 4 mm² kleine Fläche der Werkzeughalterung besteht.

Theoretisch kann eine Abschätzung des thermischen Messfehlers auf dem in Abb. 7-6 dargestellten thermo-elektrischen Thermometermodell erfolgen (Bernhard, F., 2014, S. 76). Aufgrund der instationären Bedingungen im Spritzgießprozess, vor allem bedingt durch die strukturviskose Polymerschmelze und durch die komplexen Abkühlvorgänge an der Werkzeugwand, werden die durchgeführten Temperaturmessungen durch Modellbildung mittels Spritzgießsimulation verglichen.



mit: P = Leistung Wärmequelle (Messobjekt), T_M = Temperatur Medium, T_S = Temperatur Sensor, T_U = Temperatur Umgebung, R_i = thermischer Innenwiderstand Messobjekt, C_M = Wärmekapazität Messobjekt, C_S = Wärmekapazität Sensor, R_{MS} = therm. Widerstand Messobjekt/Sensor, R_{A0} = Wärmeübergangswiderstand Messobjekt/Umgebung, R_{SU} = Wärmeübergangswiderstand Sensor/Umgebung

Abb. 7-6: Thermo-elektrisches Thermometermodell zur Abschätzung des thermischen Messfehlers. Angepasst nach (Bernhard, F., 2014, S. 76).

8. Beschreibung der Lösungsprozesse

Um die in Abschnitt 6 beschriebenen Vorteile und Funktionen zu realisieren, sind neben dem reinen Lesen bzw. Beschreiben des RFID-Transponders zur Dokumentation und Identifizierung im Wesentlichen die Prozessüberwachung und Prozessregelung relevant. Die dafür notwendigen Prozessabläufe bzw. Signalflüsse werden im Folgenden vorgestellt (siehe auch (Zeppenfeld, M. *et al.*, 2017a)). Der genaue Anschlussplan an die Spritzgießmaschine und die weitere Peripherie sind in Kapitel 10 beschrieben.

8.1. Prozessüberwachung

Der Prozessablauf zur Überwachung der Temperatur im Spritzgießprozess mittels RFID-Sensor-Tags ist in Abb. 8-1 dargestellt. Er ist im Vergleich zur Prozessregelung (siehe Abschnitt 8.2) für eine erleichterte Bedienung und einen schnelleren Programmablauf vereinfacht.

Zu Beginn des Prozesses wird ein Sensor-Tag in das Spritzgusswerkzeug eingelegt. Bei dem in dieser Arbeit präsentierten Prototypenwerkzeug erfolgt dieser Schritt, ebenso wie die Initiierung des Spritzgießzyklus, im halbautomatischen Betrieb durch Schließen des Werkzeuges und Starten des Messprogrammes zur besseren Kontrolle und aus Sicherheitsgründen manuell. Durch entsprechende Robotik könnte das Einlegen des Transponders und auch der Zyklus- und Messstart automatisiert werden. Nach Schließen des Werkzeuges wird durch Auslesen des im Transponder fest hinterlegten *Electronic Product Code* (EPC) und des *Tag Identifiers* (TID) geprüft, ob eine einwandfreie Kommunikation mit dem RFID-Tag möglich ist. Anhand des TID wird auch ermittelt, ob es sich um einen Transponder mit Sensorfunktionalität handelt. Bei einem Transponder ohne Sensorfunktionalität ist somit auch ein reines Beschreiben mit produkt- bzw. produktionsspezifischen Daten zur besseren Identifizierung oder zu Dokumentationszwecken möglich. Die Signalstärke wird durch Messung des beim verwendeten RFMicron Magnus[®] S3 Chip bereitgestellten *on-Chip Received Signal Strength Indicator* (on-Chip RSSI) ermittelt (siehe auch Kapitel 10) und kann anschließend durch Anpassung der Ausgangsleistung der Reader-Antenne optimiert werden.

Anschließend werden die Kalibrierungsdaten des Temperatursensors ausgelesen und der Einspritzvorgang des schmelzeflüssigen Kunststoffes durch ein Signal vom Reader an die Spritzgießmaschine freigegeben. Die Spritzgießmaschine gibt folgend ein Signal an die konventionelle Prozessüberwachung, wodurch auch der Messstart der internen Temperaturmessung im Spritzgusswerkzeug mittels RFID-Sensor-Tag und der Referenzmessung des Werkzeuginnen-drucks und der Werkzeugwandtemperatur synchronisiert wird. Zur Minimierung des Messrauschens werden jeweils drei Messungen des Sensor-Tags gemittelt. Als Variante kann auch der on-Chip RSSI während des Zyklus gemessen werden, um die Kommunikation zwischen Tag und Reader zu beurteilen. Eine kombinierte Messung von Temperatur und RSSI geht allerdings zu Lasten der Messfrequenz.

Nach Ablauf der an der Spritzgießmaschine vorgegebenen Zykluszeit und der entsprechend angepassten Messzeit werden Datum, Uhrzeit, EPC, Antennenleistung, gemessene Temperaturcodes und die daraus errechneten Temperaturwerte in Grad Celsius automatisch gespeichert und das Spritzgusswerkzeug geöffnet. Die Entnahme des Formteils erfolgt manuell und kann durch eine weitere externe Temperaturmessung am nun im Bauteil integrierten Sensor-Tag mittels einer zweiten RFID-UHF-Antenne ergänzt werden. Bei dieser externen Messung

außerhalb des Spritzgusswerkzeuges wird ebenfalls wieder die Kommunikation geprüft und die Antennenausgangsleistung optimiert.

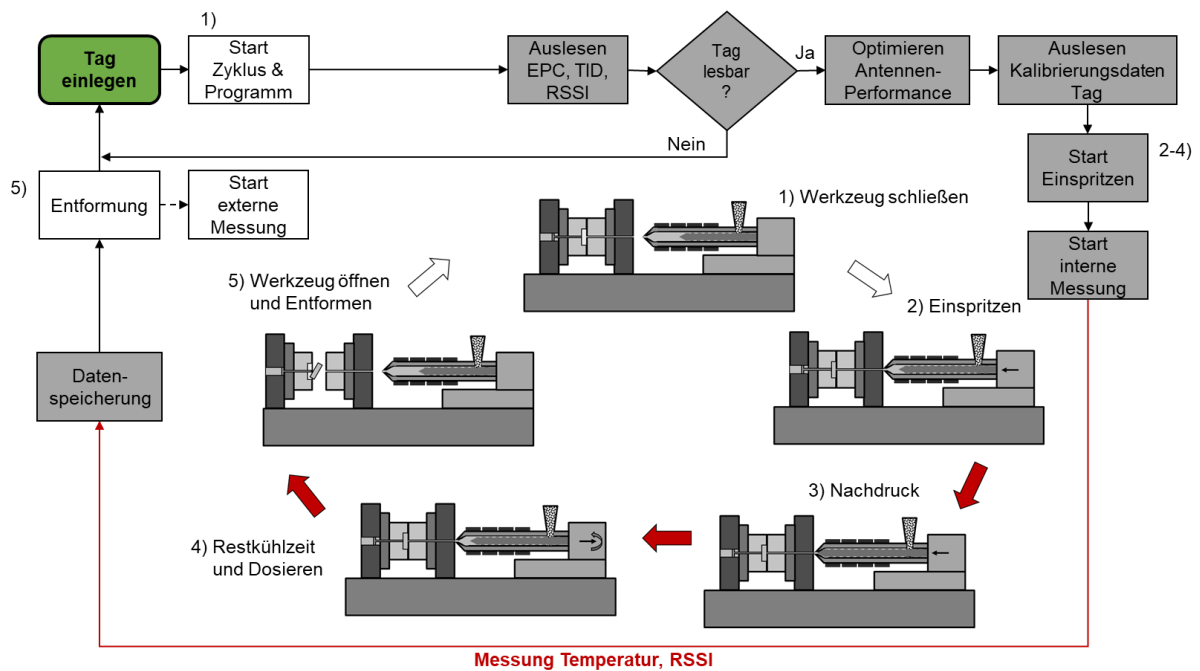


Abb. 8-1: Prozessablauf der Temperaturüberwachung im Spritzgusswerkzeug. Der Prozess beginnt mit dem manuellen (weiß hinterlegte Felder) Einlegen eines RFID-Sensor-Tags und dem Schließen des Werkzeuges. Der Spritzgießzyklus und das Messprogramm laufen in Folge automatisiert ab (grau hinterlegte Felder). Optional kann das entformte Bauteil auch anschließend weiter überwacht werden (externe Messung).

In Abb. 8-2 wird der zwischen Spritzgießmaschine, RFID-Lese-/Schreibgerät, konventioneller Prozessüberwachung, Spritzgusswerkzeug und externer Datenverarbeitung ablaufende Signalfluss für die während des Spritzgießvorganges stattfindende Temperaturüberwachung beschrieben. Die zentrale Einheit bilden dabei der RFID-UHF-Reader und der damit gekoppelte Computer mit dem in Abschnitt 10 beschriebenen Messprogramm. Die zusätzliche zentrale Prozessüberwachung dient als Referenz und kommuniziert mit der Spritzgießmaschine mit 24 V DC Signalspannung über deren programmierbare Ein-/Ausgänge (Betriebsdatenerfassung (BDE)) und über ihre Ladungseingänge mit der kabelgebundenen Sensorik im Spritzgusswerkzeug. Im Signalfluss wird aus Sicht des Readers und der Prozessüberwachung zwischen Ausgabebefehlen und Eingabesignalen unterschieden, welche einerseits zur Steuerung der Spritzgießmaschine, aber auch als Triggersignal zur Messoptimierung und zur Datenspeicherung dienen. Die Kommunikation des Readers mit der Spritzgießmaschine erfolgt über dessen digitale *General Purpose Input/Output* (GPIO) Anschlüsse, ebenfalls mit einer 24 V DC Signalspannung. Die Verbindung zum RFID-Transponder wird über die UHF-Antenne realisiert, die mittels üblicher TNC-Anschlüsse an den Reader gekoppelt ist. Als Erweiterungsmöglichkeit wird in Abb. 8-3 die externe, anschließend an den Spritzgießzyklus weitere externe Überwachung des Kunststoffbauteils mittels einer zweiten Antenne präsentiert.

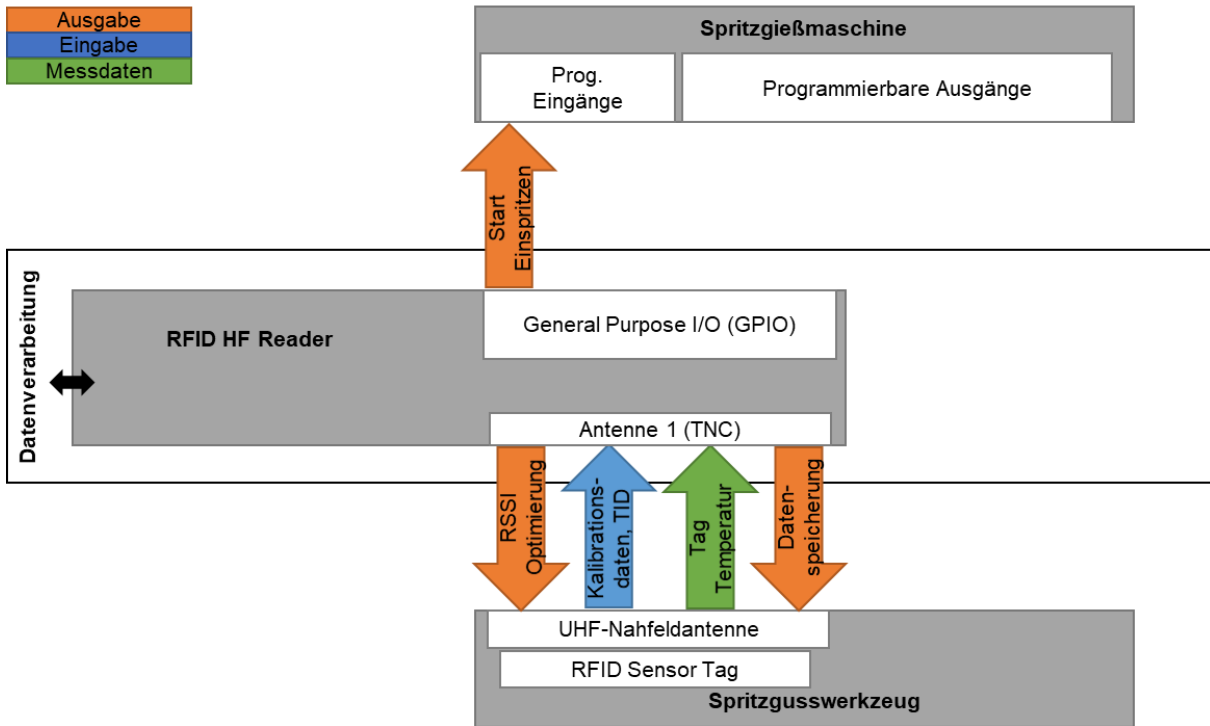


Abb. 8-2: Signalfluss zur Prozessüberwachung der Temperatur im Spritzgusswerkzeug

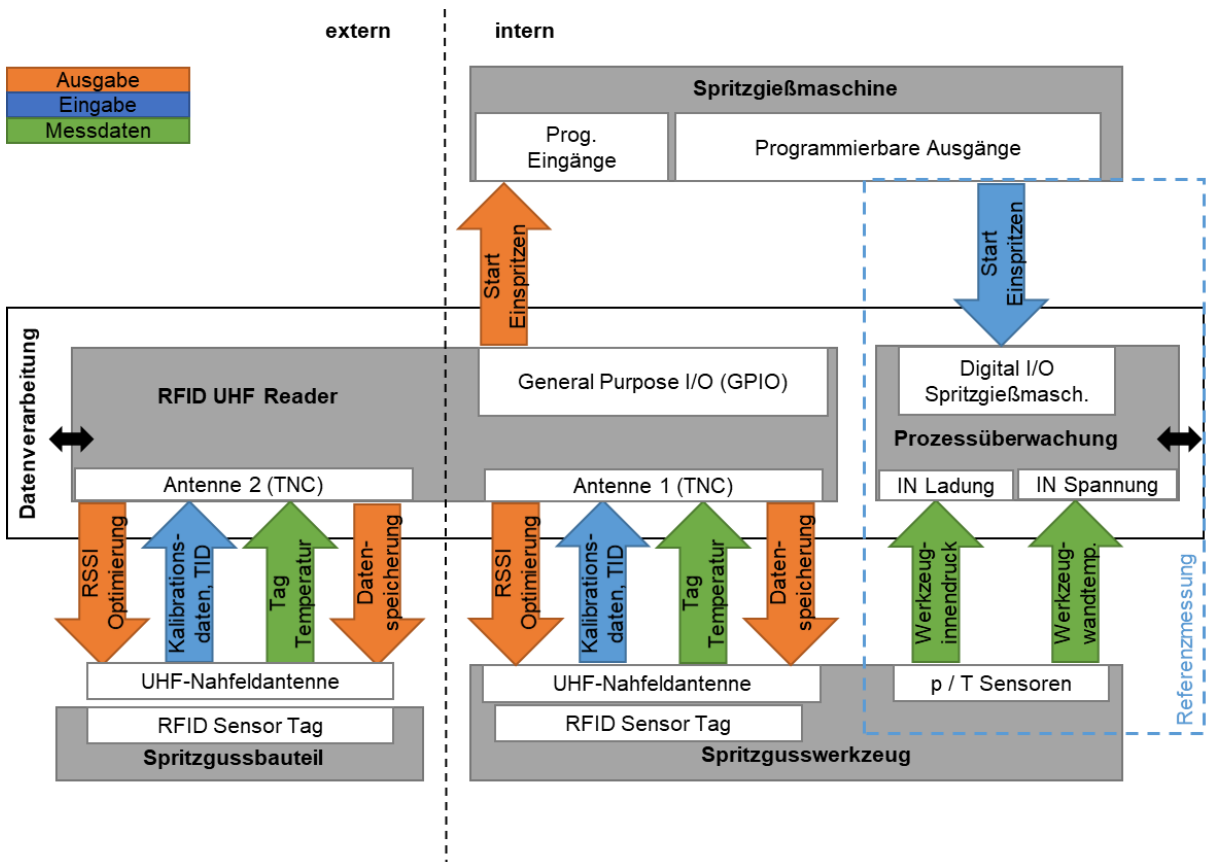


Abb. 8-3: Signalfluss zur Prozessüberwachung der Temperatur im Spritzgusswerkzeug und der kombinierten Überwachung eines entformten Spritzgussbauteils. Eine konventionelle drahtgebundene Prozessüberwachung dient zur Referenzmessung.

8.2. Prozessregelung

Die im vorigen Kapitel vorgestellte Temperaturüberwachung während der Formteilbildung kann zu einer Regelung des Abkühlprozesses erweitert werden (siehe Abb. 8-4). Diese ermöglicht eine möglichst kurze Restkühlzeit bei gleichzeitiger Sicherstellung der Bauteilqualität.

Dazu wird der in Abb. 8-1 präsentierte Ablauf zur Prozessüberwachung neben zusätzlichen Kontrollabfragen zur Werkzeugposition durch ein Regelement ergänzt, welches laufend während des Prozesses die aktuell gemessene Schmelze- bzw. Bauteiltemperatur (T_{Mess}) in der Kunststoffmasse mit einer vorgegebenen Entformungstemperatur bzw. Solltemperatur (T_{Soll}) vergleicht. Bei Unterschreiten dieser kunststoffabhängigen Erstarrungstemperatur, welche z. B. aus Literatur, Simulation oder Messung mittels Differenzkalorimetrie (DSC) ermittelt werden kann, wird die Werkzeugöffnung freigegeben, die Kühlzeit im Werkzeug somit beendet und das Bauteil kann entformt werden. Dadurch ist eine konstante Entformungstemperatur und eine komplette Erstarrung des Formteils auch bei äußeren Störeinflüssen, z. B. durch Schwankungen in Schmelzetemperatur oder Werkzeugtemperatur, sichergestellt.

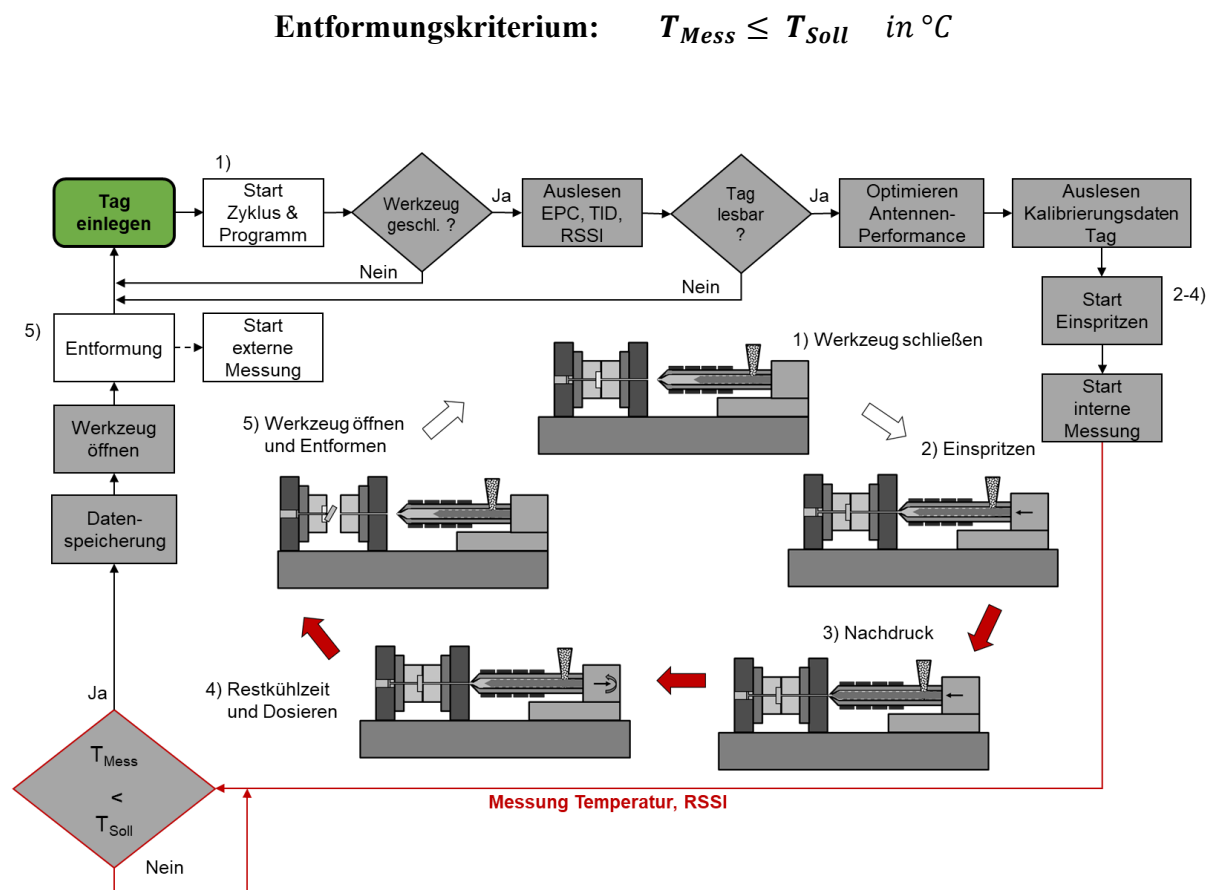


Abb. 8-4: Prozessablauf der Temperaturregelung im Spritzgusswerkzeug. Zusätzlich zur Prozessüberwachung wird die Restkühlzeit durch Vergleich der aktuellen Schmelze- bzw. Bauteiltemperatur (T_{Mess}) mit einer vorgegebenen, materialabhängigen Entformungstemperatur (T_{Soll}) geregelt.

Durch den vor allem bei dickwandigen Kunststoffteilen hohen Anteil der Restkühlzeit an der gesamten Zykluszeit ist die Regelung einer Restkühlzeit von meist mehreren Sekunden auch hinsichtlich der erreichbaren Messfrequenz der RFID-Sensor-Tags unproblematisch. Nach der Entformung findet eine Datenspeicherung sowohl peripher als auch in begrenztem Umfang auf dem Transponder selbst statt. Ein neuer Electronic Product Code (EPC) mit einer Transponder-abhängigen maximalen Länge von 128 bit (entspricht 32 Hexadezimalstellen) wird im frei beschreibbaren Speicherbereich des Transponders gespeichert. Dieser EPC wird genutzt, um beispielsweise feste produktionsspezifische Daten wie die Herstellerkennung, die verwendete Spritzgießmaschine, das verwendete Spritzgusswerkzeug und den verwendeten Kunststoff zu speichern. Ebenfalls werden bauteilspezifische Daten wie die Produktionszeit, das Datum, die Zyklusnummer und die während des Spritzgießzyklus gemessene Maximaltemperatur zur Prozessdokumentation hinterlegt. Eine weitere externe Überwachung der Bauteilabkühlung an Luft ist anschließend an den Spritzgießzyklus möglich. Dazu wird der in Abb. 8-5 für die Regelung erweiterte Signalfluss analog zu Abb. 8-3 um den externen Teil mit einer zweiten Antenne ergänzt. Supplementär für die Regelung sind das Eingangssignal „Werkzeug geschlossen“ bzw. „Start Kühlzeit“ und der Ausgabebefehl „Werkzeug öffnen“ zwischen Spritzgießmaschine und RFID-Reader in den Signalflussplan in Abb. 8-5 eingefügt.

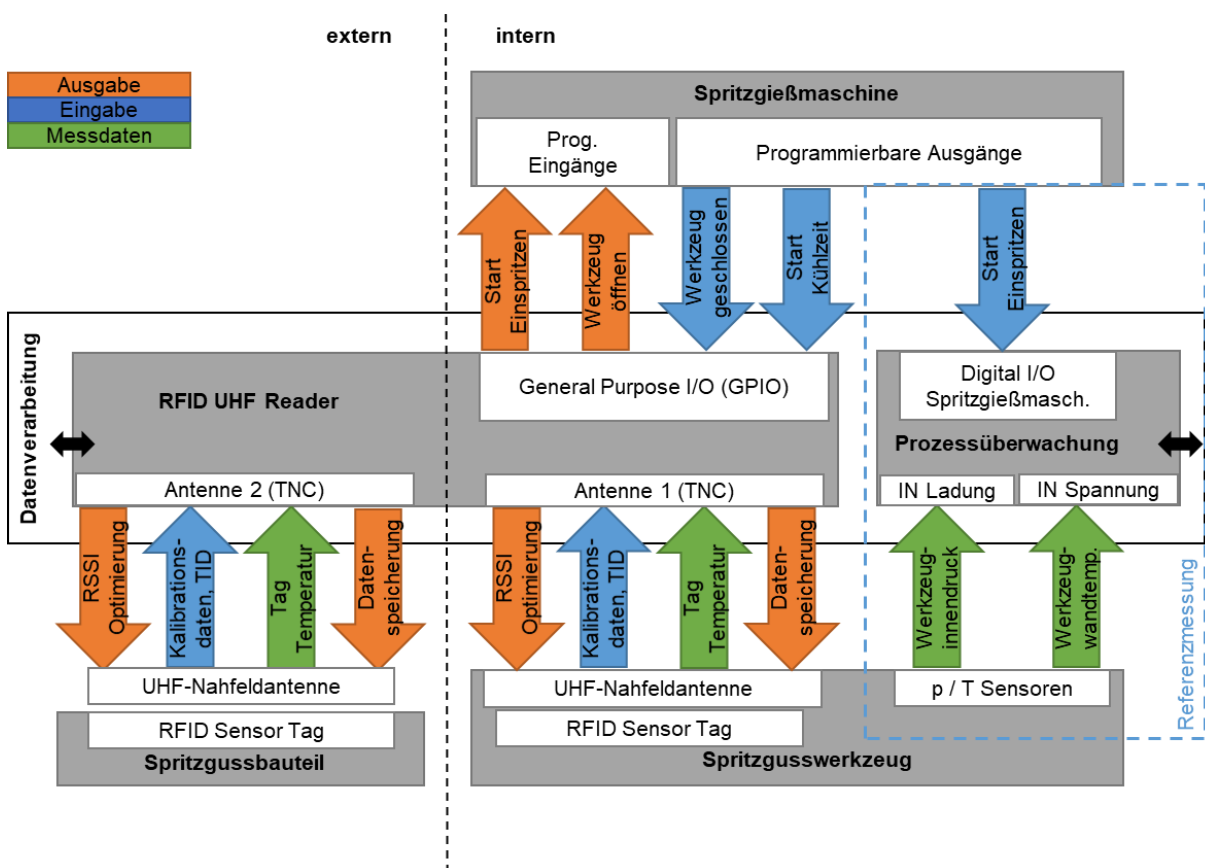


Abb. 8-5: Signalfluss zur Regelung des Abkühlprozesses und der Entformungstemperatur des Spritzgussbauteiles. Eine weitere, externe Überwachung des Bauteils ist analog zur Prozessüberwachung ebenfalls möglich.

Der Regelkreis zur Anpassung der Restkühlzeit ermöglicht es, den Spritzgießprozess zeitlich derart zu beeinflussen, dass sich die Temperatur des Kunststoffteiles bei der Entformung wie vorgegeben einstellt. Dabei dient die vorgegebene Entformungstemperatur als Ersatzparameter für die Bauteilqualität in Form von Maßhaltigkeit und Festigkeit. Diese einseitige Regelung, bei der die Kühlzeit kontinuierlich abläuft und somit die Bauteiltemperatur nur verringert und nicht wieder erhöht werden kann, ähnelt in ihrem Prinzip Verweilzeitregelungen wie sie bei Batchprozessen in der Verfahrenstechnik zur Anwendung kommen, beispielsweise zur Determinierung einer kontinuierlich ablaufenden Reaktion.

Nach Lunze (Lunze, J., 2016) zeichnet sich die Regelung als Steuerung eines sich zeitlich ändernden und somit dynamischen Systems in einem geschlossenen Kreis aus. Im Fall der hier vorgestellten Anwendung stellt der Spritzgießprozess bestehend aus Spritzgießmaschine und Spritzgusswerkzeug mit externem Temperiergerät ein solches System dar (siehe Abb. 8-6). Als Führungsgröße w wird dabei die nicht zeitabhängige Solltemperatur zum Zeitpunkt der Entformung (auch Entformungstemperatur) vorgegeben. Durch Rückführung der durch den RFID-Sensor-Tag messbaren Istgröße $y_m(t)$ in Form der aktuellen Schmelztemperatur wird die Regelgröße $y(t)$ zeitlich beeinflusst, um somit das Regelungsziel zu erreichen. Die am Stellglied, d. h. der Spritzgießmaschine, von außen durch die analogen Eingänge beeinflussbare Stellgröße $u(t)$ und an die Strecke weitergegebene wirksame Stellgröße $u_R(t)$ ist dabei die Restkühlzeit in Sekunden. Die Regelabweichung $e(t)$ ergibt sich als Differenz aus Führungsgröße und Regelgröße. D. h. solange die Messtemperatur größer als die Entformungstemperatur ist, verlängert sich die Restkühlzeit. Somit kann der Regler wie folgt beschrieben werden:

$$e(t) = w - y(t) \quad 8-1$$

$$e(t) = \text{Solltemperatur} - \text{Messtemperatur}(t) \quad 8-2$$

Fall „kein Regeleingriff“: $T_{\text{Mess}} > T_{\text{Soll}}$

$$e(t) = \text{Solltemperatur} - \text{Messtemperatur}(t) < 0 \quad 8-3$$

$$\text{Ausgang/Steuergröße: } u(t) = 0 \quad 8-4$$

Fall „Regeleingriff“: $T_{\text{Mess}} \leq T_{\text{Soll}}$

$$e(t) = \text{Solltemperatur} - \text{Messtemperatur}(t) > 0 \quad 8-5$$

$$\text{Ausgang/Steuergröße: } u(t) = 1 \quad 8-6$$

Bei der hier beschriebenen Anwendung kann die Übertragungsfunktion des Regelkreises als Proportionalglied (P-Glied) mit einer der Eingangsgröße proportionalen Ausgangsgröße beschrieben werden. Das bei Unterschreiten der Entformungstemperatur vom RFID-Lese-/Schreibgerät ausgegebene digitale, sprunghafte Signal am Eingang der Spritzgießmaschine kann theoretisch als sogenannter Dirac-Impuls angenähert werden. Bernhard (Bernhard, F., 2014, S. 59) gibt an, dass sich das vom Messglied (Sensor) ermittelte Temperatursignal bei der Messung mit Berührungsthermometern aus einem durch thermische Kopplung zur Umgebung, zum Messobjekt und einem durch Eigenerwärmung entstandenem Anteil mit PT_n -ähnlichem Verhalten zusammensetzt (siehe Abb. 7-5). Somit können die hard- und softwarebedingten, nicht genau quantifizierbaren zeitlichen Verzögerungen bei der Signalumsetzung zwischen externer Datenverarbeitung, Reader und Spritzgießmaschine bei der Modellierung der Regeleinrichtung durch ein proportional wirkendes Verzögerungsglied, einem sogenannten PT_n -Glied, dargestellt werden.

Das eigene dynamische Verhalten des Stellglieds Spritzgießmaschine trägt mit seinen maschinenspezifischen nichtlinearen Eigenschaften zu einer zeitlich verzögerten Umsetzung der Werkzeugöffnung und der Bauteilentformung und folglich zu einer zusätzlichen Zeitverzögerung der Regelung bei. Die den Regelkreis beeinflussenden Störgrößen $d(t)$ setzen sich neben den vorherrschenden Umgebungsbedingungen oder dem verwendeten Ausgangsmaterial vor allem aus den im Spritzgießprozess auftretenden und teilweise gekoppelten Prozessparametern, wie z. B. Massetemperatur, Werkzeugtemperatur und auftretenden Drücken, zusammen (siehe auch Kapitel 2.3 Prozessparameter und Einflüsse beim Spritzgießen). Durch die vorgestellte Regelung können mögliche Schwankungen der Prozessparameter in ihrer Wirkung auf die Entformungstemperatur ausgeglichen werden, die Restkühlzeit entsprechend angepasst und die Bauteilqualität, repräsentiert durch die Entformungstemperatur, konstant gehalten werden.

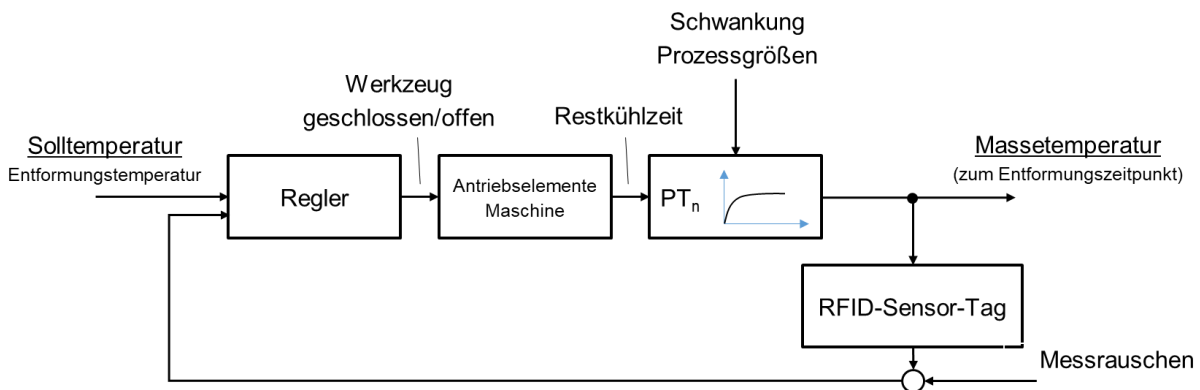


Abb. 8-6: Anwendungsspezifisch angepasste Struktur des Regelkreises. Angepasst nach (Lunze, J., 2016).

9. Abgrenzung und Unterscheidungsmerkmale der Lösung

Als Abgrenzung zu den in Abschnitt 6 dargestellten Vorteilen/Funktionen und der in Kapitel 7 bzw. 8 dargestellten Umsetzung ist festzuhalten, dass im Zuge dieser Arbeit keine Entwicklung von RFID-Sensor-Transpondern hinsichtlich Funktionalität, Größe und Reichweite erfolgt. Um die Umsetzung und die erzielten Ergebnisse nachvollziehbar zu gestalten, werden ein kommerziell erhältlicher, etablierter und ausreichend dokumentierter RFID-Sensor-Tag und eine dazu passende Antenne eingesetzt. Dies ergab für diese Arbeit eine eingeschränkte Auswahl an für den Spritzgießprozess größtmäßig relevanten und gleichzeitig robusten, passiv versorgbaren RFID-Tags mit integrierter Temperatursensorik und in Frage kommender Antennen. Zudem zog diese Auswahl auch Grenzen in der Sensorfunktionalität, d. h. der maximalen IC Betriebstemperatur von 150 °C nach sich.

Aufgrund der großen Vielfalt an thermoplastischen Kunststoffen musste im Zuge dieser Arbeit eine geeignete Auswahl getroffen werden. Zur Evaluation des vorgestellten Systems wurde Polypropylen (PP) als verbreiteter Standard-Kunststoff und der technische Kunststoff Polybutylenterephthalat (PBT) ausgewählt. Eine Übertragbarkeit der damit erzielten Ergebnisse auf andere Thermoplaste muss anhand der erforderlichen Schmelztemperatur und der resultierenden Viskosität geprüft werden.

Unterscheidungsmerkmale zu bisherigen, im Stand der Technik und Forschung (siehe Kapitel 3) bekannten Lösungen sind vor allem die bauteilnahe Kombination aus Prozessdokumentation, Prozessüberwachung und Prozessregelung, die durch folgende Funktionen charakterisiert ist:

- Drahtlose Temperaturmessung im Spritzgussbauteil
- Trennung von Spritzgusswerkzeug und Sensorik
- Kombinierte und kontinuierliche Überwachung des Bauteils während und nach Herstellung mit demselben Sensorelement
- Nutzen der RFID-Sensor-Tags im weiteren Lebenszyklus
- Optimierung des Spritzgießprozesses aus dem Bauteil heraus, d. h. Regelung der Restkühlzeit und Nachweis der kompletten Bauteilerstarrung
- Möglichkeit zur umfassenden Kontrolle der Bauteilqualität: Komplette und lückenlose Bauteilidentifikation bzw. Prozess-/Bauteildokumentation von Beginn des Fertigungsprozesses an

Die Messung mittels RFID-Sensor-Transpondern wird dabei nach Abb. 3-2 den invasiven Messmethoden zugeordnet und von anderen bekannten Verfahren unterschieden. Die drahtlose, kombinierte Messung während und nach der Spritzgießverarbeitung mit demselben Sensorelement ist dabei der wesentliche Unterschied zu den in Abschnitt 3.2 und 3.3 vorgestellten bisherigen Methoden und Lösungen anderer Arbeitsgruppen. Der Ansatz einer Kommunikation mit RFID-Sensor-Transpondern während des Spritzgießens ist in einer Patentanmeldung erwähnt und dokumentiert (Pitschenender, W. *et al.*, 2004).

10. Labor- und Geräteaufbau

Zur detaillierten Beschreibung der in Kapitel 7 und 8 vorgestellten Lösungsstruktur und -prozesse sind neben den verwendeten Spritzgießmaschinen und der notwendigen Peripherie vor allem das entwickelte Spritzgusswerkzeug sowie die Formeinsätze und Formteile von entscheidender Bedeutung. Außerdem werden die verwendeten thermoplastischen Kunststoffe und die für die Verarbeitung gewählten Prozesseinstellungen dokumentiert.

10.1. Spritzgießmaschinen und Werkstoffe

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei verschiedene Typen von Spritzgießmaschinen verwendet. Das vorgestellte System zur Temperaturmessung während des Spritzgießprozesses mittels RFID-Sensor-Transpondern ist sowohl an einer elektrischen Spritzgießmaschine des Typs KM 50 EX (KraussMaffei Technologies GmbH, Allach) mit einem Arbeitsvermögen¹⁶ des Spritzaggregats nach EUROMAP 1 (EUROMAP 1, 1983) von 55 als auch an einer hydraulischen Maschine vom Typ Allrounder 420 C 1300 (ARBURG GmbH & Co KG, Loßburg) mit einem Arbeitsvermögen von 150 verifiziert worden (siehe Tabelle 4). Die an das jeweilige Schussgewicht angepassten Plastifizieraggregate weisen einen Düsendurchmesser von 2 mm auf und sind mit einer 3-Zonen-Schnecke ausgestattet. Beide Maschinen besitzen programmierbare Ein-/Ausgänge zum Anschluss der RFID-Infrastruktur und der konventionellen Prozessüberwachung.

Die zusätzlich notwendige externe Peripherie umfasste den Granulattrockner Heliomat 2T WINsystem2 (HELIOS GmbH, Rosenheim), das Temperiergerät HB-160 U1 des Herstellers (HB-Therm AG, Schweiz) für die Wassertemperierung des RFID-Sensor-Werkzeuges und ein Temperiergerät Typ 300S4 (Regloplas AG, Schweiz) zur Öltemperierung des Spritzgusswerkzeuges für Schwindungs- und Biegeprüfkörper. Das System zur konventionellen Prozessüberwachung, d. h. für die Erfassung des Werkzeuginnendruckes und der Werkzeugwandtemperatur, wird in Abschnitt 11.2 vorgestellt.

Als Versuchswerkstoffe für die in Abschnitt 12 präsentierten Experimente wurden teilkristalline Thermoplaste gewählt. Im Vergleich zu amorphen Thermoplasten stellt die stärkere Schwindung teilkristalliner Thermoplaste und die sprunghafte Erstarrung aufgrund der einsetzenden Kristallisation eine größere Herausforderung bei der Bauteilauslegung und Verarbeitung dar.

Tabelle 4: Technische Daten der verwendeten Spritzgießmaschinen

Maschine	KM 50 EX		Arburg Allrounder 420 C
Antriebstyp	Vollelektrisch		Hydraulisch
Arbeitsvermögen / cm ³ * kbar	55		150
Schließkraft max. / kN	500		1300
Schneckendurchmesser / mm	15	22	25
Hubvolumen max. / cm ³	15,9	34,2	54
Spritzdruck max. / bar	2600	1606	2500
Wirksame Schneckenlänge	18,0	18,1	24

¹⁶ Arbeitsvermögen nach (EUROMAP 1, 1983) = max. Hubvolumen (cm³) * max. Spritzdruck (kbar)

Mit Polypropylen (PP) wurde ein teilkristalliner Standard-Thermoplast aus der Gruppe der Polyolefine als Hauptwerkstoff für die Spritzgießversuche verwendet. PP, als einer der weltweit meistverwendeten Kunststofftypen weist transparente bis opake optische Eigenschaften auf und hat eine höhere Festigkeit, Steifigkeit und Kristallit-Schmelzetemperatur bei geringerer Dichte als das ebenfalls weitverbreitete Polyethylen (Baur, E. *et al.*, 2007, S. 470), (Kaiser, W., 2011, S. 254). Dank der sehr großen Vielfalt an verfügbaren Typen und deren spezifischen Eigenschaften bietet sich PP für eine Vielzahl von Anwendungen an, z. B. in der Verpackungsindustrie, aber auch für technisch anspruchsvolle Teile im Automobilbereich oder in der Medizintechnik. Das hier gewählte Block-Copolymer vom Typ PHC31 (SABIC, Saudi-Arabien) eignet sich aufgrund der guten Fließeigenschaften, der schnellen Erstarrung und des breiten Einstellfensters für Masse- und Werkzeugtemperatur gut zur Verarbeitung im Spritzgießen, um Bauteile mit geringem Verzug und hoher Formbeständigkeit herzustellen. Die detaillierten Materialkennwerte sind in Tabelle 5 dargestellt.

Zusätzlich wurde Polybutylenterephthalat (PBT), ein teilkristalliner, polarer, technischer Thermoplast aus der Gruppe der Polyalkylenterephthalate (gesättigte Polyester), zum Vergleich und Ausblick herangezogen. PBT zeichnet sich durch eine opak weiße Farbe, hohe Festigkeit und Steifigkeit, sein gutes Gleit- und Verschleißverhalten sowie geringe Wasseraufnahme aus (Baur, E. *et al.*, 2007, S. 549), (Kaiser, W., 2011, S.328). Aus diesen Gründen wird PBT häufig für technische Kunststoffbauteile mit hohen Anforderungen an Maßhaltigkeit, elektrische Isolationseigenschaften und Zeitstandfestigkeit verwendet. Bei dem für diese Arbeit eingesetzten Typ handelt es sich um Ultradur® B4520 (BASF, Ludwigshafen).

Tabelle 5: Eigenschaften der gewählten teilkristallinen Thermoplaste

	Polypropylen (PP)¹⁷	Polybutylenterephthalat (PBT)¹⁸
Typ	PHC31	Ultradur® B4520
Dichte / g/cm ³	0,905	1,300
E-Modul / MPa	1300	2500
Verarbeitungsschwindigkeit / %	parallel: 1,5 quer: 1,5	parallel: 1,5 quer: 1,7
Schmelze-Massefließrate (MFR) / g/10min	15 (bei 230 °C, 2,16 kg)	27,3 (bei 250 °C, 2,16 kg)

10.2. Spritzgussformteile und Werkzeuge

Insgesamt wurden zwei verschiedene Typen Spritzgussformteile hergestellt. Die RFID-Sensor-Transponder sind zu 40x40x4 mm³ Plattenprüfkörpern im entwickelten RFID-Sensor-Werkzeug umspritzt worden (Zeppenfeld, M. *et al.*, 2017a). Diese Plattenprüfkörper wurden auch zur Untersuchung der Maßhaltigkeit verwendet. Zur Ermittlung des Einflusses auf die

¹⁷ SABIC, PP PHC31 Global Technical Data Sheet, URL:https://www.sabic.com/en/products/documents/sabic-pp_phc31_global_technical_data_sheet/en, Abrufdatum: 15.03.2019.

¹⁸ BASF, Ultradur® B4520 Product Information, URL:<http://iwww.plasticsportal.com/products/dspdf.php?type=astm¶m=Ultradur+B+4520>, Abrufdatum: 15.03.2019.

Bauteilstabilität wurden $80 \times 10 \times 4 \text{ mm}^3$ Biegestreifen in einem auswechselbaren Formeinsatz in einem vorhandenen Wechselrahmenwerkzeug gefertigt. Die Plattenprüfkörper sind dabei angelehnt an die DIN EN ISO 294-3 (DIN EN ISO 294-3, 2003) und die Biegestreifen wurden entsprechend DIN EN ISO 178 (DIN EN ISO 178, 2013) ausgeführt.

10.2.1. RFID-Sensor-Werkzeug mit Plattenprüfkörper

Das entwickelte Werkzeug besteht aus einer düsen- und einer kavitätsseitigen Innenplatte in einem vorhandenen Trägerrahmen (siehe Abb. 10-1) und wurden mit der CAD-Software Catia V5R20 von Dassault Systèmes (Vélizy-Villacoublay, Frankreich) konstruiert. Beide Innenplattenaufbauten wurden wegen des Zeitvorteils bei der zerspanenden Bearbeitung sowie aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu Stahl und der deswegen höheren Dynamik des Temperaturverlaufs aus Aluminium ausgeführt. Aluminiumwerkzeuge stellen vor allem für Prototypen eine erprobte technologische Alternative zu aufwändigeren Stahlwerkzeugen dar (SKZ, 2013).

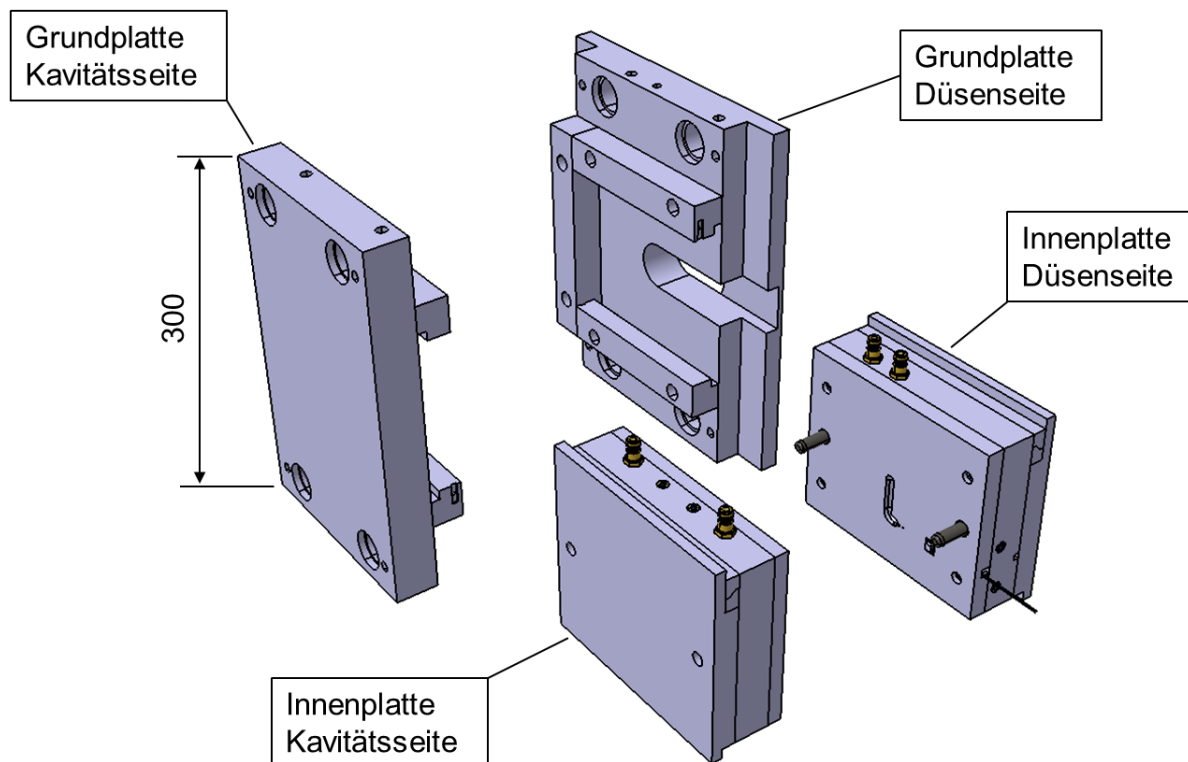


Abb. 10-1: RFID-Sensor-Werkzeug mit Wechselrahmen (Maße in mm).

Die düsen- und kavitätsseitige Innenplatte ist für die Integration der RFID-Nahfeldantenne, des Einsatzes für den RFID-Sensor-Tag aus hochtemperaturbeständigen Polyetheretherketon (PEEK) und des anschnittnahen, konventionellen Werkzeuginnendruck- und Werkzeugwandtemperatursensors aus drei Platten aufgebaut (siehe Abb. 10-2). Die zweite, kavitätsseitige Innenplatte (siehe Abb. 10-3) beinhaltet die 4 mm tiefe, quadratische Formhöhle mit einem integrierten Werkzeuginnendrucksensor auf Höhe des Sensor-Transponders und nimmt die über den Anguss einströmende Polymerschmelze als Quellströmung auf. Die Temperierkanäle wurden jeweils in die mittlere Platte integriert. Das Spritzgusswerkzeug ermöglicht zudem eine mög-

lichst einfache und ortsfeste Positionierung des Sensor-Transponders, auch während des Einspritzens unter hohem Druck und stellt ein zuverlässiges Auslesen sicher. D. h. im PEEK-Einsatz wird der RFID-Sensor-Tag für den Umspritzvorgang fixiert, was eine Positionierung in der Mitte des 4 mm dicken Formteils erlaubt (siehe Schnitt A-A in Abb. 10-4). Durch den Einsatz aus einem Dielektrikum mit niedriger relativer Permittivität ϵ_r und somit hoher Durchlässigkeit für elektrische Felder ist eine Kommunikation zwischen Transponder und Antenne über den Übertragungsweg aus 4 mm starkem PEEK und zusätzlich 1 mm Luft bzw. Schmelze auch während des Spritzgießprozesses möglich. PEEK gilt wegen seiner hohen kurzzeitigen (bis zu 300 °C) und dauernden Gebrauchstemperatur (bis zu 250 °C) (Baur, E. *et al.*, 2007, S. 758) bei Prototypenwerkzeugen als gängiges Abschirmmaterial zwischen Schmelze und empfindlicher Sensorik (Praher, B. *et al.*, 2013), (Hopmann, C. *et al.*, 2017d). Der Einsatz könnte aber bei Serienfertigung durch eine noch robustere Keramik ersetzt werden. Das auf dem Sensor-Transponder befindliche IC-Bauteil ist während des Spritzgießprozesses aufgrund der besseren Datenübertragungsrate quer zur Polymerströmung ausgerichtet. Das entstehende Formteil weist einen punktförmigen Anschnitt zur leichteren Abtrennung des Bauteils vom Anguss auf (siehe Abb. 10-4).

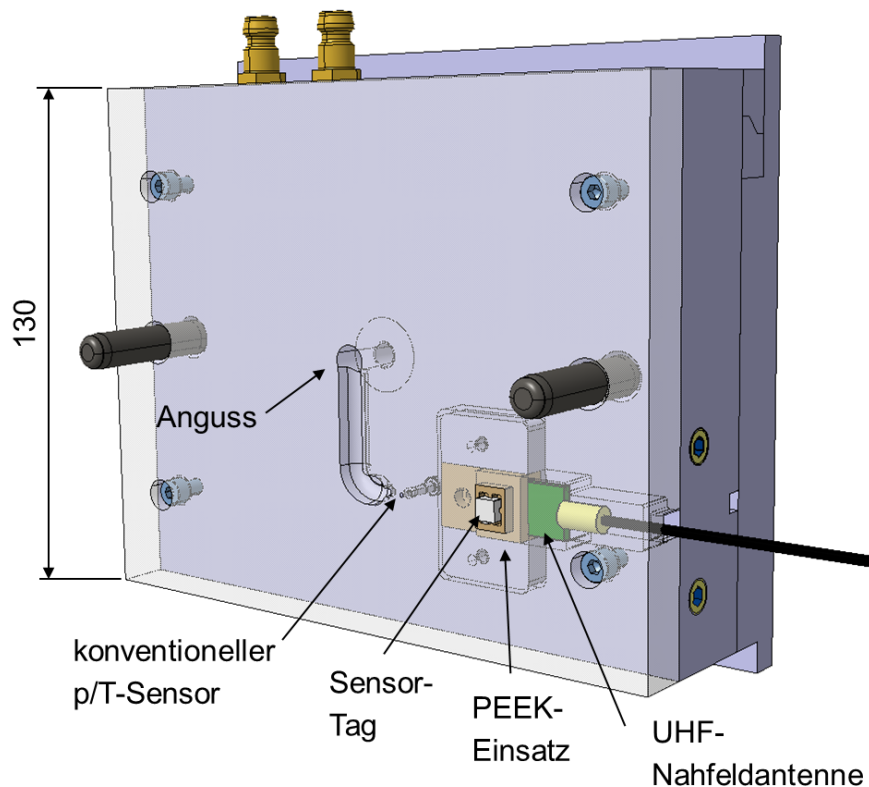


Abb. 10-2: Düsenseitige Innenplatte mit integrierter Nahfeldantenne, dem Sensor-Tag im hochtemperaturbeständigen, strahlungsdurchlässigen PEEK-Einsatz und einem anschnittnahen, konventionellen Innendruck- und Wandtemperatursensor in der Werkzeugwand (Maße in mm).

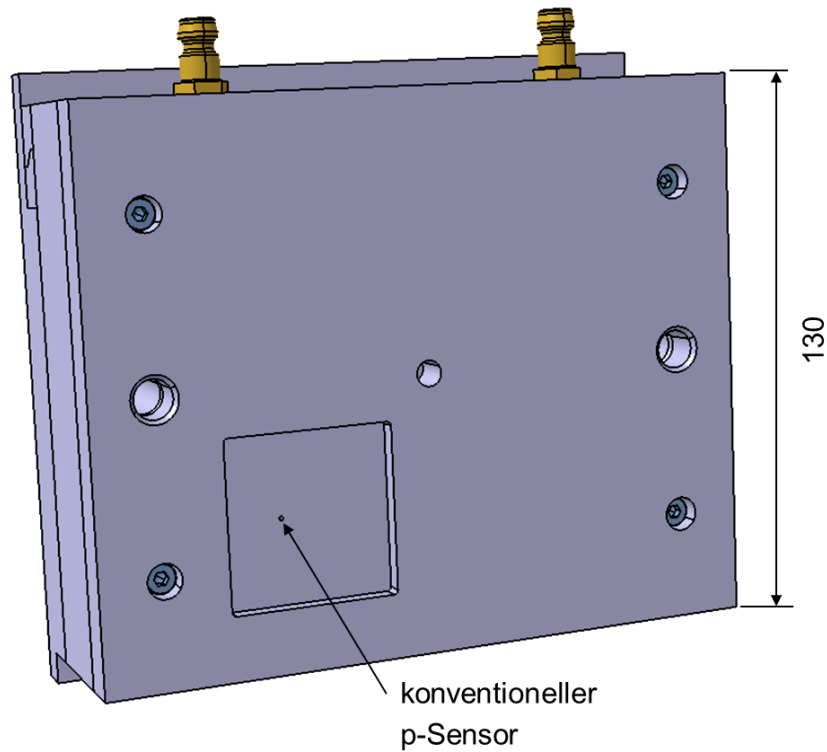


Abb. 10-3: Kavitätsseitige Innenplatte mit 4 mm tiefer Formhöhle und einem konventionellen Innendrucksensor auf Höhe des Sensor-Tag (Maße in mm).

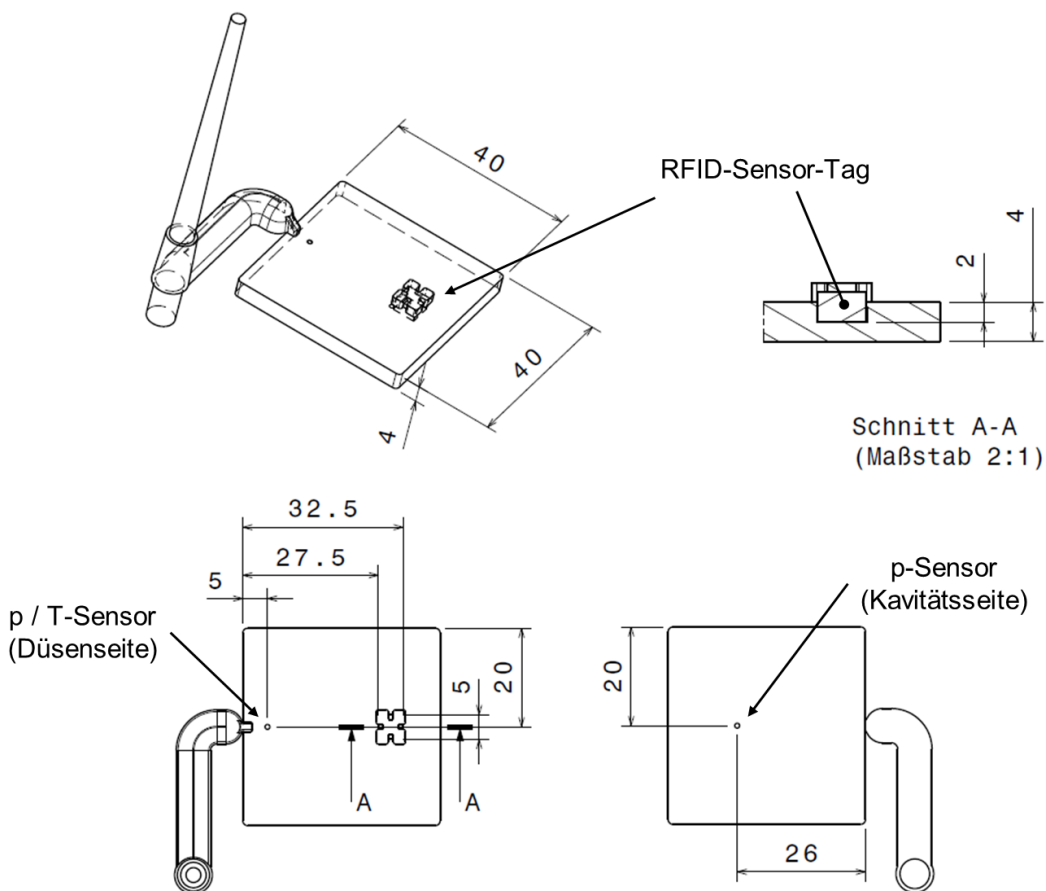


Abb. 10-4: Plattenförmiges Formteil mit integriertem RFID-Sensor-Transponder und Angussverteiler (Maße in mm).

10.2.2. Wechselwerkzeug für Biegestreifen zur Ermittlung der Bauteilstabilität

Zur Ermittlung des Einflusses des eingelegten Sensor-Elementes auf die Bauteilstabilität wurden $80 \times 10 \times 4 \text{ mm}^3$ Biegestreifen entsprechend DIN EN ISO 178 (DIN EN ISO 178, 2013) gefertigt. Mittels des PEEK-Einsatzes aus dem RFID-Sensor-Werkzeug und einem weiteren, zur Kavitätsgrundfläche planen Einsatzes war es möglich, Einlegeteile sowohl in Bauteilmitte (Position 1) als auch dezentral (Position 2) ähnlich wie beim RFID-Sensor-Werkzeug zu überspritzen. Dabei wurden als Ersatz für die kostenintensiven Sensor-Tags quadratische Aluminiumeinlegeteile ($5 \times 5 \times 3,2 \text{ mm}^3$) mit identischer Geometrie verwendet. Das Bauteil wurde über einen Bandanguss gefüllt.

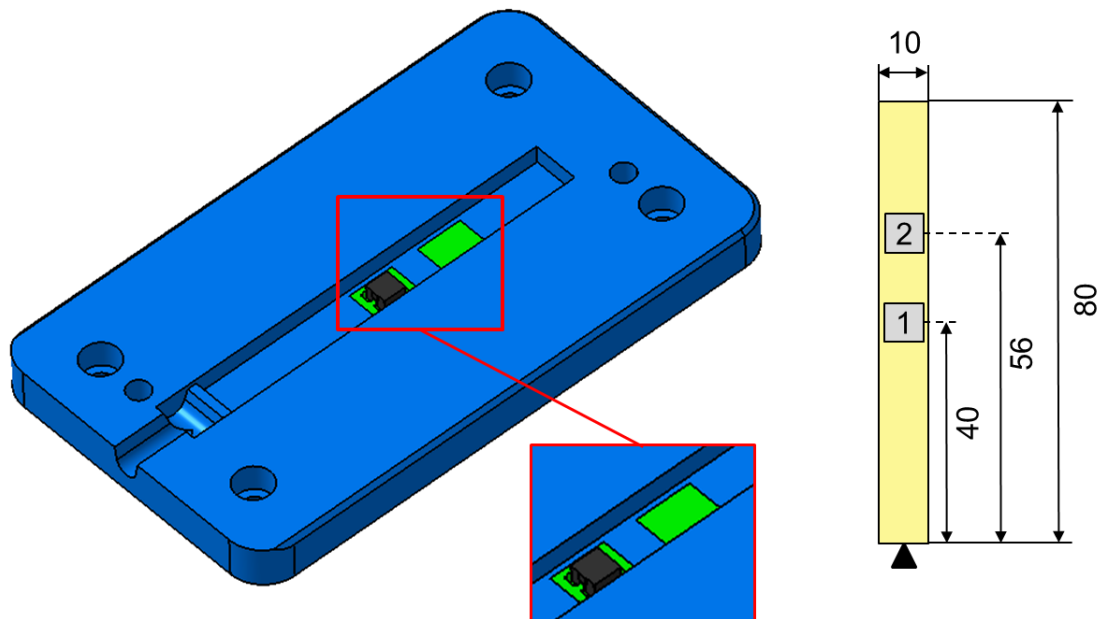


Abb. 10-5: Werkzeugeinsatz zur Herstellung von Biegestreifen ($80 \times 10 \times 4 \text{ mm}^3$) angelehnt an DIN EN ISO 178 (Maße in mm).

10.3. Prozessparameter

Die für die Spritzgießverarbeitung relevanten Prozessparameter wurden je nach verwendetem Probekörper und Werkstoff gewählt. Die individuellen Granulattrocknungszeiten und die Masse- bzw. Werkzeugtemperaturen sind entsprechend den Verarbeitungsdatenblättern des Materials festgelegt. Maschinen- und werkzeugspezifische Einstellungen, wie z. B. Plastifizierweg und -geschwindigkeit, Staudruck, Einspritzgeschwindigkeit oder Umschaltzeitpunkt, wurden durch Spritzgießsimulation und Abmusterung des jeweiligen Werkzeuges an der Maschine ermittelt. So ist der Nachdruck abhängig vom maximalen Einspritzdruck bestimmt worden. Die Nachdruckzeit ergab sich durch die Versiegelung des Anschnitts, was an einem konstanten Bauteilgewicht sichtbar wurde. Die erforderliche Restkühlzeit resultierte aus der Bauteildicke.

Insgesamt wird hinsichtlich der Prozessparameter zwischen den beiden Thermoplasten PP und PBT sowie den zwei vorgestellten Spritzgusswerkzeugen bzw. Prüfkörpern unterschieden. Letztere umfassen zum einen das RFID-Sensor-Werkzeug mit Plattenprüfkörper (siehe Tabelle 6), welches der Umspritzung der Sensor-Transponder diente. Der Einfluss des Einlegeteiles auf die Bauteilmaßhaltigkeit ist ebenfalls am Plattenprüfkörper bestimmt worden.

Dazu wurden die Prüfkörper mit den umspritzten Einlegeteilen mit Referenzbauteilen ohne Sensor-Tag verglichen, bei denen der Dosierweg entsprechend dem Einlegeteilvolumen und dem Schneckendurchmesser an der Arburg-Maschine um 0,041 mm erhöht wurde. Zum anderen wurde das Wechselwerkzeug für Biegestreifen zur Ermittlung der Bauteilstabilität genutzt (siehe Tabelle 7).

Tabelle 6: Prozessparameter bei der Umspritzung des RFID-Sensor-Tag im entwickelten RFID-Sensor- Werkzeug

Maschine	KM 50 EX	Arburg Allrounder 420C	
Antriebstyp	Vollelektrisch	Hydraulisch	
Material	PP	PP	PBT
Vortrocknen	80° / 2h	80° / 2h	120° / 4h
Massetemperatur / °C	220	220	260
Werkzeugtemperatur / °C	45	45	60
Plastifizierweg / mm	38	30	30
Schneckendrehzahl / U/min	150	114 / 150	100
Schneckenrückholung / mm	2	2	2
Staudruck / bar	50	50	50
Einspritzgeschwindigkeit / mm/s	50	50	50
Nachdruckumschaltung / mm (wegabhängig)	10	10	10
Nachdruck / bar	150	150	200
Nachdruckzeit / s	8	8	8
Kühlzeit / s	spezifisch nach Versuch		

Tabelle 7: Prozessparameter bei der Fertigung der Biegestreifen zur Ermittlung der Bauteilstabilität

Maschine	Arburg Allrounder 420C	
Antriebstyp	Hydraulisch	
Material	PP	PBT
Vortrocknen	80° / 2h	120° / 4h
Massetemperatur / °C	220	260
Werkzeugtemperatur / °C	45	60
Plastifizierweg / mm	24	27
Schneckendrehzahl / U/min	150	100
Schneckenrückholung / mm	2	2
Staudruck / bar	50	50
Einspritzgeschwindigkeit / mm/s	50	50
Nachdruckumschaltung / mm (wegabhängig)	10	10
Nachdruck / bar	150	300
Nachdruckzeit / s	10	6
Kühlzeit / s	30	30

10.4. RFID-Infrastruktur

Das RFID-System besteht insgesamt aus den drei Bestandteilen RFID-UHF-Schreib-/Lesegerät, RFID-UHF-Antenne und RFID-Sensor-Tag. Als Schreib-/Lesegerät wurde der Kathrein RFID-UHF-Reader RRU4 (Kathrein-Sachsen GmbH, Mühlau) gewählt, welcher mit einer Kathrein Firmware auf einem ARM 9 Prozessor betrieben wird und nach den Protokollen EPCglobal UHF Class 1 Gen 2 (GS1 EPCglobal, 2013) und ISO 18000-6C (ISO/IEC 18000-6, 2013) arbeitet. Das Gerät besitzt zwei 8-polige, A-kodierte Digitalschnittstellen GPIO (General Purpose Input Output) zur Kommunikation mit Peripheriegeräten. Die Antennen-Schnittstelle arbeitet im UHF-Frequenzbereich von 865 bis 868 MHz mit einer maximalen Ausgangsleistung am Antennenport von +33 dBm bei einer Nenn-Impedanz von 50 Ω . Als Kommunikations-Schnittstelle zu einem PC wird der 10/100 Mbit/s Ethernet-Anschluss genutzt. Der Zugriff auf den Reader erfolgt über die von Kathrein mitgelieferte Anwendersoftware „Reader Start v2“ bzw. mithilfe des Kathrein-Burgstädt Reader-Protokolls¹⁹. Die für die Temperaturmessung verwendeten 5x5x3,2 mm³ passiven UHF-Sensor-Transponder vom Typ Boson S3 (RTEC Systems Pte Ltd., Singapur) und deren Einbau-/Messsituation im Werkzeug werden in Abschnitt 11.1 detailliert beschrieben. Für eine optimale Kommunikation zwischen Reader und Transponder wurden die Konfigurationsparameter entsprechend angepasst (siehe Tabelle 8). Die Sendeleistung ist hinsichtlich eines optimalen on-Chip RSSI für den Magnus[®] S3-Tag optimiert, die Frequenz ist entsprechend dem europäischen UHF-Standard gewählt und der Antennengewinn richtete sich nach der Empfehlung für Nahfeldantennen gemäß dem Kathrein Konfigurationshandbuch²⁰.

Für die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche wurde sowohl als interne, im Spritzgusswerkzeug verbaute, als auch als externe Antenne die 32x10 mm² messende UHF-ANT-NearField-I-V1 Nahfeldantenne (RF-Embedded GmbH, Oberaudorf) genutzt. Die hier verwendete Antenne besitzt eine Impedanz von 50 Ω , ist ausgelegt für den Frequenzbereich von 840 bis 960 MHz und wurde mittels TNC-SMA-Adapters mit dem TNC-Anschluss des Readers verbunden. Der theoretische Fernfeldabstand r_f , d. h. die Ablösung der Feldlinien und somit die Grenze des Nahfeldes, berechnet sich mit der Wellenlänge λ , Frequenz f und Vakuums-Lichtgeschwindigkeit c nach Formel 10-1 und 10-2 (Finkenzeller, K., 2015, S. 138). Somit wird der Sensor-Transponder im Spritzgusswerkzeug bei einem Abstand von 5 mm zur Antenne im Nahfeld angesprochen.

$$\text{Wellenlänge bei 865 MHz} \quad \lambda = \frac{c}{f} = 346,58 \text{ mm} \quad \mathbf{10-1}$$

$$\text{Fernfeldabstand} \quad r_f \geq \frac{\lambda}{2\pi} = 55,16 \text{ mm} \quad \mathbf{10-2}$$

mit λ : Wellenlänge, c : Vakuums-Lichtgeschwindigkeit, f : Frequenz, r_f : Fernfeldabstand

¹⁹ Kathrein-Sachsen GmbH, Kommunikationsprotokoll der Kathrein RFID UHF-Reader RRU4: Kathrein-Burgstädt Reader-Protokoll Version 2.55, 2016.

²⁰ Kathrein-Sachsen GmbH, Konfigurations-Handbuch der Kathrein RFID UHF-Reader RRU4, Version 2.55, 2016.

Tabelle 8: Basisparameter zur Konfiguration des UHF-RFID-Schreib-/Lesegerätes.

Sendeleistung	20,25 dBm
Frequenz	865 MHz
Antennengewinn	5,25 dBic

10.5. Integration in den Spritzgießprozess

Um die beschriebene Prozessüberwachung und Prozessregelung zu realisieren, ist eine Verknüpfung der Spritzgießmaschine, des Kathrein RFID-Schreib-/Lesegerätes mit den zugehörigen Antennen sowie optional der zusätzlichen konventionellen Prozessüberwachungseinheit Kistler CoMo Injection (Kistler Group, Schweiz) notwendig (Zeppenfeld, M. *et al.*, 2017a). Die zentrale Einheit bildet dabei der RFID-Reader, welcher über Ethernet mit einer externen Datenverarbeitungseinheit (PC) verbunden ist und über diese gesteuert wird.

10.5.1. Anschluss konventionelle Prozessüberwachung

Das verwendete Kistler CoMo Injection-System (Kistler Group, Schweiz) besitzt unterschiedliche Ladungseingänge für den Anschluss von Drucksensoren sowie differentielle Spannungseingänge (0-10 V) zur Verknüpfung mit der Temperatursensorik. Über den Anschluss *Digital I/O Molding Machine* mit einem digitalen Eingang und zwölf digitalen Ausgängen ist ein Anschluss an die Spritzgießmaschine möglich. Die digitalen Ausgänge können zur Ansteuerung von Peripheriegeräten wie Ausschussweichen oder zur Auslösung von Echtzeitaktionen an der Spritzgießmaschine genutzt werden. Der digitale Eingang des CoMo Injection wird bei entsprechender Einstellung an der Maschine bei Beginn des Einspritzvorgangs über PIN 1 mit 24 V beschaltet. In Kombination mit PIN 2 als Bezugspunkt (Ground) wird die ansteigende Flanke zur Initiierung der Messung von Werkzeuginnendruck und Werkzeugwandtemperatur genutzt. Das CoMo Injection-System ist zur Datenerfassung mit der entsprechenden Kistler-Software über Ethernet mit einem Notebook verbunden.

10.5.2. Integration: Spritzgießmaschine KM 50 EX

Die Spritzgießmaschine vom Typ KM 50 EX (Anschlussmodul X52), der RRU4 UHF-Reader und das CoMo Injection-System (Anschlussmodul X51/500 und X52/PIN 6) werden über ihre entsprechenden digitalen Ein- und Ausgänge miteinander verbunden (siehe Abb. 10-6). Dabei wird die 24 V DC Signalspannung (OUT_CMN) für die beiden digitalen, schaltbaren Ausgänge (OUT 0, 1) des Readers von der Spritzgießmaschine bezogen (PIN 13). Somit war es möglich, bei Ansteuerung der Reader-Ausgänge ein Signal an die frei programmierbaren Eingänge der Spritzgießmaschine (Pin 14, 15) zu übertragen und mit entsprechenden Einstellungen das Einspritzen oder die Werkzeugöffnung freizugeben. Die digitalen Eingänge des Readers (IN 0, 1) wurden mit den potentialfreien digitalen Ausgängen der Spritzgießmaschine (PIN 2, 4) verbunden, welche über die Bedienseite „Produktionssignale Betriebsdatenerfassung (BDE)“ der KM 50 EX MC5-Steuerung über entsprechend definierte Aktionen mit 24 V beschaltet werden können. Dies ermöglicht, Signale wie „Werkzeug geschlossen“ (BDE 1)

oder „Start Kühlzeit“ (BDE 2) an den Reader weiterzugeben. Die Bezugsmasse (0 V) für die digitalen Readereingänge liefert über den Eingang INP-CMN die Spritzgießmaschine (PIN 500). Laut Reader-Handbuch²¹ erfolgt die Beschaltung der digitalen Ein- und Ausgänge des Readers dabei galvanisch getrennt von dessen Betriebsspannung.

Über die Betriebsdatenerfassung der Spritzgießmaschine (BDE 3) und den zugehörigen Ausgang (PIN 6) wird der Start des Einspritzens an die CoMo Injection-Prozessüberwachung weitergegeben und somit dessen Datenaufzeichnung gestartet. Das Bezugspotential an PIN 2 liefert der X51/500 Anschluss der Spritzgießmaschine.

Die zusätzliche Verbindung des Notebooks mit dem Reader und den beiden RFID-Antennen mittels TNC-Kabeln zum gewünschten Antennenport des Readers ergänzt den Aufbau.

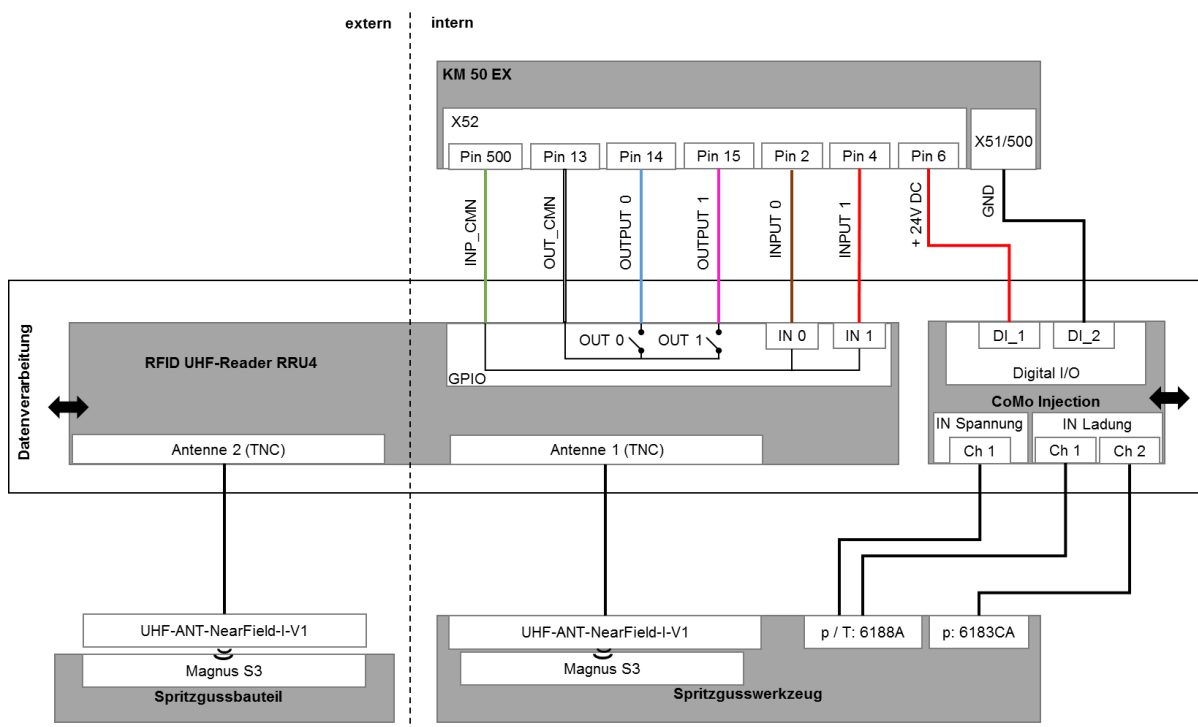


Abb. 10-6: Schaltplan zum Anschluss an die Spritzgießmaschine vom Typ KM 50 EX.

10.5.3. Integration: Spritzgießmaschine Arburg Allrounder 420 C

Die Verknüpfung mit der Spritzgießmaschine vom Typ Arburg Allrounder 420 C erfolgt analog zum Vorgehen bei der Maschine vom Typ KM 50 EX. Bei der Verkabelung zum Reader ist das Anschlussmodul +B11-X003F zu verwenden. Ein- und Ausgänge der Spritzgießmaschine können in der Ablaufprogrammierung der Arburg SELOGICA-Steuerung mit entsprechenden Maschinenaktionen verknüpft werden. Die konventionelle Prozessüberwachung ist über das Modul +B11-X004F (PIN D32 und D28) anzusprechen. Der Schaltplan ist entsprechend in Abb. 10-7 dargestellt.

²¹ Kathrein-Sachsen GmbH, Konfigurations-Handbuch der Kathrein RFID UHF-Reader RRU4, Version 2.55, 2016.

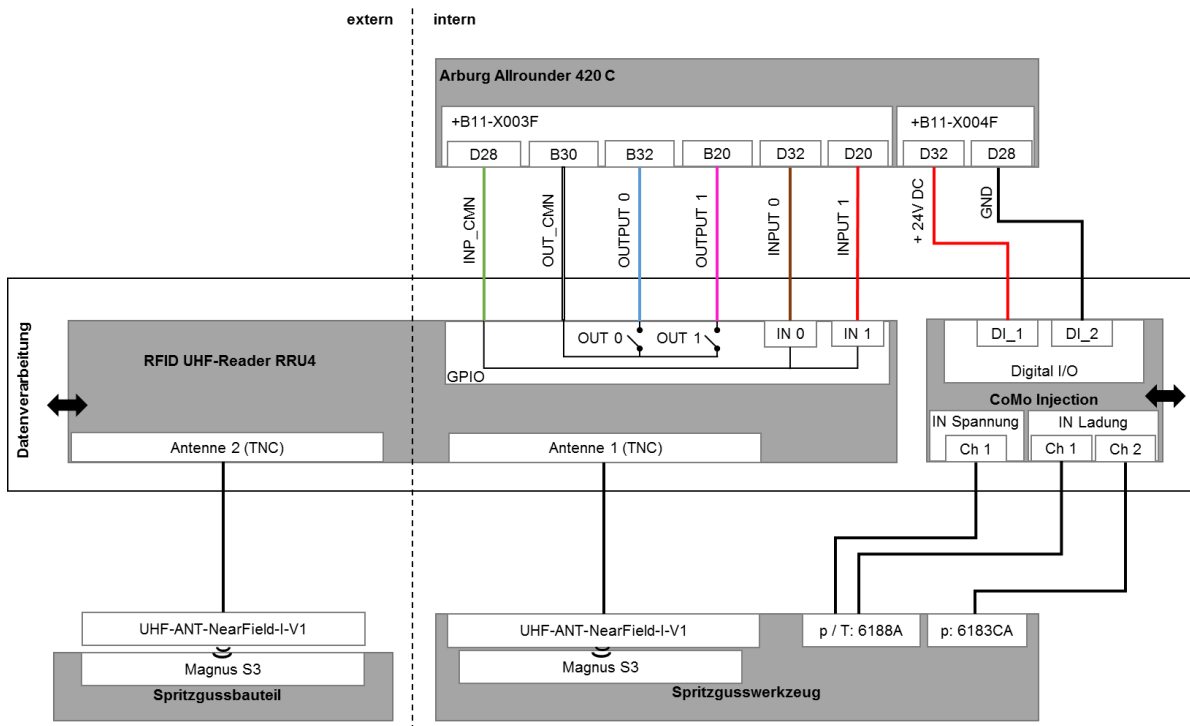


Abb. 10-7: Schaltplan zum Anschluss an die Spritzgießmaschine vom Typ Arburg Allrounder 420 C.

10.5.4. Software

Die Ansteuerung des Kathrein RFID-UHF-Readers RRU4, über den sowohl die Spritzgießmaschinen als auch der Sensor-Transponder angesprochen werden, erfolgte mit Hilfe des Programms Matlab (R2017a, MathWorks Inc., USA) inklusive der Instrument Control Box auf einem mittels TCP/IP-Verbindung verknüpften Computer. Die Kommunikation mit dem Reader erfolgt entsprechend dem Kathrein Konfigurationshandbuch RRU4 v2.55²² mit einem Matlab Instrument Treiber auf Basis des Kathrein-Burgstädt Reader-Protokolls v2.55²³ (KBRP) nach den Protokollen EPCglobal UHF Class 1 Gen 2 (GS1 EPCglobal, 2013) bzw. ISO 18000-6C (ISO/IEC 18000-6, 2013). Nach Initialisierung und Konfiguration entsprechend der Parameter aus Tabelle 8 wird der Reader, je nach Befehl im Normal Mode oder Direct Mode, z. B. für alle EPCglobal UHF Class 1 Gen 2 Funktionen, wie Select, Inventory oder Access, betrieben. Select-Kommandos dienen dabei zur Auswahl, Inventory-Befehle zur Inventarisierung und Erfassung sowie Access-Befehle für den Zugriff, Auslesen oder Beschreiben des Tags (siehe Tabelle 9).

²² Kathrein-Sachsen GmbH, Konfigurations-Handbuch der Kathrein RFID UHF-Reader RRU4, Version 2.55, 2016.

²³ Kathrein-Sachsen GmbH, Kommunikationsprotokoll der Kathrein RFID UHF-Reader RRU4: Kathrein-Burgstädt Reader-Protokoll Version 2.55, 2016.

Tabelle 9: Wichtige EPCglobal UHF Class 1 Gen 2 Befehle (GS1 EPCglobal, 2013) zum Auswählen bzw. Zugriff auf den Sensor-Tag.

EPCglobal Class 1 Gen 2 Operations	Befehl	Funktion
Select	Select	Auswahl bestimmter Tag-Populationen anhand vom Benutzer festgelegter Kriterien Generierung von on-Chip RSSI und Temperaturcode
Inventory	Query	Initiierung und Spezifizierung der Tag-Inventarisierung
	QueryAdjust	Anpassung einzelner Parameter der Tag-Inventarisierung
	QueryRep	Verringerung des Slot-Counters eines Tags; Anfordern einer 16-bit-Zufallszahl
	ACK	Bestätigen eines einzelnen Tags durch Zurücksenden der vom Tag erhaltenen Zufallszahl
	NAK	Versetzen eines Tags in den Wartezustand
Access	Req_RN	Anweisung an Tag zum Senden einer neuen Zufallszahl
	Read	Lesen bestimmter Speicherbereiche Generierung von on-Chip RSSI, Kalibrierungsdaten und Temperaturcode
	Write	Beschreiben bestimmter Speicherbereiche
	Kill	Permanentes Deaktivieren eines Tags
	Lock	Festlegen eines Passwortes für Schreib- und/oder Lesezugriff auf bestimmte Speicherbereiche

Die Kommunikation des Readers mit dem RFID-Sensor-Tag basiert auf den Anwendungshinweisen für das Auslesen²⁴ und die Temperaturmessung²⁵ mit dem Magnus[®] S3 IC (RFMicron Inc., USA). Mit EPCglobal UHF Class 1 Gen 2 Select-Kommandos wurden zuerst on-Chip Received Signal Strength Indicator (RSSI) und Temperaturcode über eine Zeitspanne von 3 ms mit aktivierter Reader-Antenne für eine ausreichende Energieversorgung generiert und anschließend mittels Read-Kommando ausgelesen. Dabei wird der Temperaturcode über ein Select-Kommando mit leerer Maske erzeugt. Im Gegensatz zum direkt auslesbaren on-Chip RSSI musste der ermittelte Temperaturcode mit Hilfe der zuvor aus dem USER-Speicher des individuellen Tags ausgelesenen Kalibrierungsdaten noch in Grad Celsius umgerechnet werden. Die Dezimalwerte der Kalibrierdaten und deren linearer Zusammenhang werden dabei mit dem aktuell ausgelesenen Temperaturcode verrechnet.

²⁴ RFMicron Inc., Application Note AN002P36: Reading Magnus S Sensors, 2016.

²⁵ RFMicron Inc., Application Note AN006: Sensor and Temperature Measurements, 2016.

10.6. Spritzgießsimulation

Für die parallel zum Systementwurf bzw. der -integration durchgeführte Modellbildung wurde die Software Moldflow Insight Ultimate 2016-2019 (Autodesk, USA) verwendet. Dazu ist das Modell des Spritzgusswerkzeuges inklusive Verteilerkanälen, Werkzeugplatten, Kühlkanälen, Formteil und RFID-Sensor-Tag-Einlegeteil mit CATIA V5 V5R20 (Dassault Systèmes, Frankreich) vereinfacht und in Moldflow importiert worden. Für die FEM-Analyse des Werkzeuges wurde der 3D-Netztyp genutzt. Das Kunststoffformteil, das Einlegeteil und das Kühlsystem bzw. die Kavitätssinnenseite des Spritzgusswerkzeuges im Kontakt zum Formteil sind mit einer Kantenlänge von 0,5 mm vernetzt. Zur Werkzeugaußenseite hin nimmt die Kantenlänge der Vernetzung kontinuierlich bis zu 1,5 mm zu.

Aus der Moldflow-Datenbank wurden die Materialien für das Aluminium-Werkzeug, den PEEK-Halter und den Sensor-Tag mit den entsprechenden Wärmeleitfähigkeiten definiert. Die Materialdaten für den Sensor entsprechen hierbei den Werten üblicher dielektrischer Keramiken (Kollenberg, W., 2009, S. 100). Für die Kunststoffe sind die jeweils verfügbaren Typen SABIC® PP PHC31-81 und PBT Ultradur® B4520 ausgewählt worden. Die Daten der Spritzgießmaschinen wurden ebenfalls aus der Moldflow-Datenbank bezogen und mit den Datenblättern abgeglichen. Die Prozessparameter sind gemäß den realen Versuchsbedingungen gewählt (siehe Abschnitt 10). Die Reihenfolge der Analyse umfasste Temperierung (FEM), Füllung, Nachdruck und Verzug. Dabei wurde die Einspritzgeschwindigkeit als konstant vorgegeben, die Umschaltung auf Nachdruck erfolgte bei einer volumetrischen Formfüllung von 99 % wobei die Nachdruckhöhe mit 50 % des Einspritzdruckes definiert wurde. Die Füll-, Nachdruck und Abkühlzeit war mit 60 s eingestellt.

Die mittels der Simulation ausgewerteten Positionen mittig an allen Bauteilaußenflächen bzw. in der Mitte des RFID-Sensor-Einlegeteils und am Kunststoffformteil sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Untersuchte Positionen bzw. Knoten im/am Sensor-Einlegeteil oder am Kunststoffformteil

Teil	Position	Knoten
Einlegeteil (RFID-Sensor-Tag)	Strömungszugewandte Seite	N131
	Strömungsabgewandte Seite	N361958
	Strömungsparallel seitlich	N3673
	Strömungsparallel seitlich (Gegenseite)	N198
	Einlegeteilmitte	N3801
	Einlegeteilunterseite	N362457
	Einlegeteiloberseite	N362164
Kunststoffformteil	Bauteilrand (Kavitätssseite, Höhe Einlegeteil)	N8171
	Bauteilmitte	N267062

11. Beschreibung der Messverfahren

Im folgenden Abschnitt werden die Messverfahren für die in Kapitel 12 präsentierten Experimente beschrieben. Allgemeine Anwendung bei der Fertigung der Spritzgussprobekörper und deren Lagerung finden die DIN EN ISO 294-1/4 „Spritzgießen von Probekörpern aus Thermoplasten“ (DIN EN ISO 294-1, 2017), (DIN EN ISO 294-4, 2003) und die DIN 16742 „Kunststoff-Formteile – Toleranzen und Abnahmebedingungen“ (DIN 16742, 2013).

11.1. Temperaturmessung mittels RFID-Sensor-Transponder

Auf die Wahl eines geeigneten Typs von RFID-Sensor-Transponder wurde bei der Festlegung des Temperaturmessverfahrens besonders Wert gelegt. Dabei stand die Verwendung eines frei erhältlichen, etablierten, ausreichend dokumentierten und mit passiver Energieversorgung ausgestatteten Chipsatzes mit integrierter Temperatursensorik im Vordergrund. Die an den RFID-Sensor-IC konnektierte Antenne, welche maßgeblich die Größe des Tags bestimmt, sollte eine adäquate Lesereichweite bei möglichst kleinen Abmaßen bieten. Möglichst hohe Temperaturbeständigkeit, Robustheit gegen mechanische Belastung und die Beschreibbarkeit bzw. Lesbarkeit sowohl in metallischer als auch nicht-metallischer Umgebung waren weitere Anforderungen.

Zur drahtlosen Temperaturmessung wurden deshalb passive Boson Magnus[®] S3-Tags²⁶ (RTEC Systems Pte Ltd., Singapur) basierend auf einem Magnus[®] S3 Sensor-Chipsatz²⁷ (RFMicron Inc., USA) mit einer Arbeitsfrequenz im UHF-Bereich (860 - 960 MHz) eingesetzt. Die RFID-Transponder weisen Abmessungen von 5x5x3,2 mm³ (siehe Abb. 7-2) bei einem Gewicht von 0,4 g auf. Der Transponder besteht hauptsächlich aus einer beschichteten, dielektrischen Keramik mit einer hohen dielektrischen Leitfähigkeit und einer Wärmeleitfähigkeit von 37 W/mK, welche als Mikrowellen Resonator und Antenne dient. Auf der keramischen Antenne ist seitlich der Sensor-IC montiert. Die maximale Einbau- bzw. Montage-temperatur beträgt laut Datenblatt 150 °C, und es sind ca. 10000 Schreib-/Lesezyklen durchführbar. Die Messgenauigkeit beträgt laut Hersteller $\pm 0,3$ °C bei 0 bis +50 °C und ± 1 °C im Bereich von -40 bis +85 °C. Der Boson Magnus[®] S3-Transponder wurde auch wegen seines adaptiven RFID front end (RF Micron Chameleon[™] Technologie²⁸) gewählt, welches automatisch die Eingangsimpedanz des IC bzw. der Transponderantenne anpasst, um den Tag auf wechselnde Frequenzen und Umgebungsbedingungen abzustimmen. Zudem stellt der Chip einen 5 bit on-Chip RSSI (Received Signal Strength Indicator)-Code zur Verfügung, welcher als Indikator für die Systemleistung die vom Transponder empfangene Signalstärke zurückgibt. Der standardmäßig zwischen 0 und 31 liegende on-Chip RSSI-Wert ermöglicht bei höheren Werten eine höhere Empfangsleistung und bei niedrigeren Werten eine geringere Verzerrung des Signals. Für eine genaue Temperaturbestimmung wird in der hier präsentierten Lösung, wie vom Hersteller empfohlen, die Sendeleistung des Readers in 0,25 dBm Schritten optimiert, so dass sich ein on-Chip RSSI zwischen 13 und 21 einstellt. Durch diese Wahl des oberen Grenzwertes wird eine Beeinflussung des Temperaturcodes vermieden und durch den unteren Grenzwert die Gefahr von Fehllösungen reduziert.

²⁶ RTEC Systems Pte Ltd., Product Data Sheet RTEC Boson[®], URL:

<http://www.rfid.com/En/Home/ProductDetail/id/31>, Abrufdatum 28.11.2016.

²⁷ RF Micron Inc., RFMicron Magnus[®] S3 IC, Product Brief Overview, URL: <http://rfmicron.com/magnus-s3/>, Abrufdatum 28.11.2016.

²⁸ RF Micron Inc., Chameleon[™] Technology Enables Low-Cost Sensors, URL: <http://rfmicron.com/chameleon-technology-enables-low-cost-sensors/>, Abrufdatum 19.09.2016.

Der im IC integrierte Temperatursensor generiert einen 12 bit Temperaturcode, welcher in eine Temperatur in Grad Celsius umgerechnet wird. Bei der Prozessregelung werden jeweils drei Messwerte gemittelt, um Messrauschen zu unterdrücken. Dabei basiert der hier verwendete elektronische Temperatursensor, wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, auf der temperaturabhängigen Beweglichkeit freier Ladungsträger im Halbleitermaterial und der Flussspannung/Durchlassspannung am p-n-Übergang des enthaltenen Dioden-/Transistorelements als primäre Abbildungsgröße der Temperatur (siehe auch Abb. 3-1) (Rokhsaz, S. *et al.*, 2015), (Bernhard, F., 2014, S. 758). Als Vorteile erweisen sich bei diesem Meßprinzip das lineare Verhältnis zwischen Spannung und Temperatur sowie die geringen Messfehler durch die sensornahe Digitalisierung und die direkte Signalweiterverarbeitung (Bernhard, F., 2014), (Stiny, L., 2016). Prinzipbedingt arbeitet der Sensor daher im Bereich von -50 bis +150 °C am genauesten (Bernhard, F., 2014, S. 758).

Zum Nachweis der Messgenauigkeit des RFID-Sensor-Tags, auch für höhere Temperaturen als im Datenblatt des Herstellers spezifiziert, wurde eine Vergleichsmessung mit einem Thermoelement Typ-K-Temperaturfühler PeakTech® TF-10 (Messgenauigkeit $\pm 2\%$) und einem PeakTech® 5187-Datenlogger (PeakTech Prüf- und Messtechnik GmbH, Ahrensburg) im Ölbad durchgeführt (Messfrequenz 0,5 Hz). Das Verfahren der Vergleichsmessung in einem homogenen und zeitlich konstanten Flüssigkeitsthermostat mit Rührwerk stellt ein in der Literatur übliches Verfahren dar (Debey, D. *et al.*, 1997), (Amberg, J. *et al.*, 2003, S. 7), (Librizzi, A., 2015), (Bernhard, F., 2014, S. 565). Das hier verwendete Fluid Dibenzyltoluol Syntex 350 MH (aic-regloplas GmbH, München) wird standardmäßig als Wärmeträgeröl zur Temperierung von Spritzgusswerkzeugen benutzt. Jeweils 9 Messungen über 60 s wurden bei drei verschiedenen Temperaturniveaus, d. h. mit untemperierten Fluid bei Raumtemperatur und bei 80 bzw. 130 °C, durchgeführt. Durch das Flüssigkeitsthermostat, eine Heizplatte und ein Rührwerk wird, wie von Bernhard gefordert (Bernhard, F., 2014, S. 565), eine geringe örtliche Temperaturdifferenz und eine ausreichende thermische Kopplung mit guter Wärmeübertragung zwischen Flüssigkeit und Temperaturfühler garantiert. Eine abschließende Messung, wieder bei Raumtemperatur, zeigt einen eventuellen Einfluss der Erhitzung auf die Messgenauigkeit auf.

Für die drahtlose Temperaturmessung mittels RFID-Sensor-Tag nach der Entformung aus dem Spritzgusswerkzeug wurde zum Vergleich die Umgebungstemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit mit einem Datenlogger vom Typ LOG 23 TH (Dostmann Electronics GmbH, Reichholzheim) in einem Intervall von 30 s aufgezeichnet.

11.2. Konventionelle Prozessüberwachung

Für zusätzliche Informationen aus dem Spritzgießprozess, zur vergleichenden Temperaturmessung und zur Bestimmung des Werkzeuginnendrucks, d. h. der im Prozess auftretenden Belastungen, kam das konventionelle Prozessüberwachungssystem CoMo Injection²⁹ (Kistler Group, Schweiz) mit einer Abtastrate von 1200 Hz zum Einsatz. Wie in Abschnitt 10 gezeigt, wurden im RFID-Sensor-Werkzeug ein kombinierter Werkzeuginnendruck- und Werkzeugwandtemperatursensor vom Typ 6188AA³⁰ (Kistler Group, Schweiz) und ein Drucksensor vom Typ 6183CA³¹ (Kistler Group, Schweiz) verbaut (siehe auch Tabelle 11). Dabei besteht der Temperatursensor aus einem NiCr-Ni-Thermoelement vom Typ K, mit einer Messgenau-

²⁹ Kistler Instrumente AG, CoMo Injection, 2012.

³⁰ Kistler Instrumente AG, p-T-Sensor Typ 6188AA, 2011.

³¹ Kistler Instrumente AG, Werkzeuginnendrucksensor Typ 6183CA, 2014.

igkeit nach DIN EN 60584-1 Klasse 1 (DIN EN 60584-1, 2013, S. 14), was einem Bereich von $\pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ und zusätzlichen $< \pm 0,25 \%$ Abweichung durch den Temperaturverstärker³² entspricht. Die Drucksensoren arbeiten nach dem piezoelektrischen Prinzip. Die Messsituation in der Kavität entspricht Abb. 3-3. Beide Sensoren müssen in einem Betriebstemperaturbereich $< 200 \text{ }^\circ\text{C}$ betrieben werden, die Schmelztemperatur an der Sensoroberfläche darf aber bis zu $450 \text{ }^\circ\text{C}$ betragen. Die Synchronisation dieser konventionellen Prozessüberwachung mit der RFID-Sensor-Tag-Messung erfolgte über die Freigabe des Einspritzens vom RFID-Reader an die Spritzgießmaschine und die gleichzeitige Signalweitergabe von der Spritzgießmaschine an den CoMo Injection. Zur Ermittlung der Belastung auf die RFID-Tags während des Spritzgießprozesses wurden neben der Spritzgießsimulation auch die Daten der Werkzeuginnen-druck- und Werkzeugwandtemperatursensoren herangezogen.

Tabelle 11: Eigenschaften der verwendeten Sensoren zur konventionellen Prozessüberwachung

Sensor-Typ		Empfindlichkeit	Messbereich	Linearität $< \pm \% \text{ FSO}^{33}$	Messgenauigkeit / $^\circ\text{C}$
6188AA	Druck	-4,781 pC/bar	$\leq 2000 \text{ bar}$	0,02	N.A.
	Temperatur	0,05 V/ $^\circ\text{C}$	$\leq 200 \text{ }^\circ\text{C}$	N.A.	$\pm 1,5 \pm 0,25 \%^{32}$
6183CA	Druck	-2,292 pC/bar	$\leq 2000 \text{ bar}$	0,028	N.A.

11.3. Messung RFID-spezifischer Parameter

Zur Analyse der Kommunikation zwischen RFID-Sensor-Tag und UHF-Antenne wurden verschiedene RFID-spezifische Parameter betrachtet. Mit einem Tagformance Lite RFID-UHF-Messsystem (Voyantic Ltd., Finnland) ist die maximale theoretische Lesereichweite der Transponder in Metern nach der ISO/IEC 18000-6C (ISO/IEC 18000-6, 2013) im Bereich um die UHF-Frequenz von 868 MHz bestimmt worden. Das Übertragungsverhalten bzw. die Verstimmung der UHF-Antenne durch das umgebende Werkzeugmaterial wurde mit einem Netzwerkanalysator vom Typ E5063A (Keysight Technologies Inc., USA) in einer Absorberkammer durchgeführt. Dazu ist die UHF-Antenne selbst und in Kombination mit geöffnetem und geschlossenem Spritzgusswerkzeug vermessen und der S11-Eingangsreflektionsparameter, der die reflektierte Leistung zwischen Antenne und Referenzsystem widerspiegelt, in Dezibel als Funktion der Frequenz bestimmt worden. Als Indikator der Signalstärke dient dabei der ermittelte on-Chip Received Signal Strength Indicator (RSSI). Um die Materialeigenschaften des sich in der Signalmessstrecke zwischen Antenne und Sensor-Tag befindlichen Polyetheretherketons (PEEK) hinsichtlich des Einflusses auf die Signaltransparenz und somit die Kommunikationsfähigkeit einschätzen zu können, wurde die stoffabhängige relative Permittivität ϵ_r bestimmt. Für diese dielektrische Materialmessung zwischen 1 Hz und 4,5 GHz wurde der Netzwerkanalysator mit einer koaxialen Messsonde für eine Reflexionsmessung gekoppelt, um jeweils 5 Messpunkte an 2 PEEK-Platten mit 20-facher Wiederholung zu analysieren. Messungen an Luft und Wasser dienten als Referenz.

³² Reproduzierfehler (ohne Absolutfehler), Kistler Instr. AG, Mehrkanaltemperaturverstärker Typ 2205A, 2011

³³ FSO = Full Scale Output (Endwertbezogener Fehler)

11.4. Bauteilmaßhaltigkeit

Der Einfluss des Einlegeteils auf die Bauteilmaßhaltigkeit wurde durch taktile Messung der Probekörpergeometrie in Millimeter mit einem Messtaster Typ METRO MT 60M (Dr. Johannes Heidenhain GmbH, Traunreut) ermittelt. Die Lagerung und Abnahme der Bauteile erfolgte angelehnt an die DIN 16742 (DIN 16742, 2013) und die DIN EN ISO 294-4 (DIN EN ISO 294-4, 2003). Die Verarbeitungsschwindung wird nach Formel 2-2 als Differenz des Kavitätsmaßes (L_K) und des Formteilmaßes (L_F) in Prozent dargestellt. Um die vom Hersteller angegebene Genauigkeit zu verifizieren und den Messfehler des taktilen Messgerätes zu identifizieren, ist die maximale Abweichung aus mehreren Messungen mit $2,8 \mu\text{m}$ ($n = 15$, Prüfkraft 1 N) bestimmt worden. Dies bedeutet bei einer durch die DIN 16742 in der kleinstmöglichen Toleranzgruppe geforderten Genauigkeit von $7 \mu\text{m}$ eine ausreichende Präzision der Messung. Abschließend wurden $n = 15$ Probekörper je Werkstoff (PP, PBT) mit und ohne Sensor-Einlegeteil auf der Arburg Allrounder-Spritzgießmaschine gefertigt und parallel und quer zur Fließrichtung vermessen.

11.5. Bauteilstabilität

Der Einfluss des Einlegeteils auf die Bauteilstabilität bzw. auf die Biegeeigenschaften des Kunststoffprobekörpers wurde durch einen 3-Punkt-Biegeversuch nach DIN EN ISO 178 (DIN EN ISO 178, 2013) auf einer Material-Prüfmaschine Zwick/Roell Z2.5 (ZwickRoell GmbH & Co. KG, Ulm) analysiert (siehe Abb. 11-1). Dazu sind $n = 10$ Probekörper je Werkstoff (PP, PBT) und Position (Pos.1/2, siehe Abb. 10-5) mit den Einstellungen nach Tabelle 12 geprüft worden. Als Referenz dienten Probekörper ohne Einlegeteil. Die Biegespannungs-Biegedehnungs-Kurve ergab sich durch Aufbringen einer konstanten Prüfgeschwindigkeit und Aufzeichnen der Kraft F und der Durchbiegung s in der Mitte des Probekörpers (Verfahren A, DIN EN ISO 178). Als Kennwert für die Bauteilstabilität dient die maximale, während der Prüfung ertragene Biegespannung σ_{fM} (Biegefestigkeit) in MPa (siehe Formel 11-1) bezogen auf den Ausgangsquerschnitt ($b \cdot h$) des Probekörpers und die dazu entsprechende Durchbiegung.

$$\sigma_{fM} = \frac{F}{A} \quad 11-1$$

mit: σ_{fM} : Biegefestigkeit, F : Kraft, A = Ausgangsquerschnitt

Tabelle 12: Parameter des Biegeversuches nach DIN EN ISO 178.

Abkürzung	Parameter	Wert
L	Länge des Probekörpers	80 mm
b	Breite des Probekörpers	10 mm
h	Höhe des Probekörpers	4 mm
l	Messspanne (Distanz Auflager)	64 mm
R1	Radius Druckfinne	5 mm
R2	Radius Auflager	5 mm
a	Vorlast	0,1 N
v_a	Vorlast-Geschwindigkeit	1 mm/min
v	Prüfgeschwindigkeit	2 mm/min

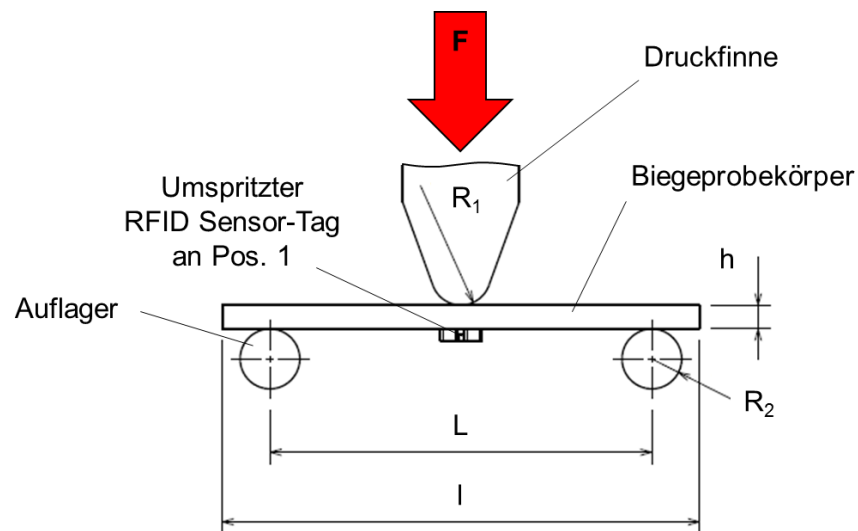


Abb. 11-1: Probekörper mit eingespritztem RFID-Sensor-Tag und Messaufbau nach DIN EN ISO 178 (DIN EN ISO 178, 2013).

11.6. Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC)

Zur thermischen Analyse und quantitativen Erfassung von Phasenumwandlungsprozessen wurde eine Dynamische Differenz-Thermoanalyse (Differential Scanning Calorimetry, DSC) des thermoplastischen Polypropylens nach DIN EN ISO 11357/1-3 durchgeführt (DIN EN ISO 11357, 2017). Dazu wurde das Messgerät DSC Q2000 (TA Instruments Inc., USA) mit 25 ml/min Helium als Spülgas verwendet. Die Probengröße betrug dabei 7,332 mg. Während der Messung wurde eine Heiz-Kühl-Heiz-Rampe nach Norm abgefahren mit jeweils 5 min isothermer Wartezeit zwischen den Rampen. Somit konnte der Wärmefluss in W/g als Funktion der Temperatur und der vor allem für die Regelung der Restkühlzeit wichtige Bereich der Werkstoffstarrung ermittelt werden.

11.7. Lichtmikroskopie

Lichtmikroskopische Aufnahmen in verschiedenen Vergrößerungen (Objektive VH-Z25, VH-Z100) mit einem digitalen Mikroskop Typ VHX-500F (Keyence Corporation, Japan) ermöglichten die Analyse von Schlibfbildern. Dadurch konnte die Position des Sensor-Einlegeteils in der umgebenden Kunststoffmatrix und auch die Haftung beider Komponenten analysiert werden. Die Schlibfbilder wurden mit einer Secotom-15-Präzisionstrennmaschine (Struers GmbH, Augsburg) und einem LaboPol-20-Schleif- und Poliersystem (Struers GmbH) angefertigt.

11.8. Thermografie

Zur Ermittlung der Oberflächentemperatur des Kunststoffformteils nach der Entformung wurde die Wärmebildkamera Trotec IC080LV (Trotec GmbH & Co. KG, Heinsberg) eingesetzt. Der dabei eingestellte Emissionskoeffizient entspricht der Vorgabe für Kunststoffteile mit 0,9 (Menges, G. *et al.*, 2007, S.691).

11.9. Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung wurde mit der Software Origin Pro 2017G (OriginLab Corporation, USA) durchgeführt. Die Normalverteilung ist mit dem Test nach Shapiro-Wilk, die Varianzhomogenität mit dem F-Test und die Signifikanz mit dem t-Test bzw. dem Mann-Whitney u-Test bewertet worden. Das Niveau der Signifikanz bzw. die Fehlerwahrscheinlichkeit p ist nach Tabelle 13 dargestellt. (Sachs, L. *et al.*, 2006), (Siebertz, K. *et al.*, 2010), (Dürr, W. *et al.*, 2017)

Für die grafische Auswertung als Box-Plot entspricht der untere/obere Whisker der Spannweite zwischen Minimum und Maximum des Datenbereichs. Zur besseren Übersicht wurden teilweise mehrere Kurven mit der Funktion *avecurve* aus Origin Pro 2017G gemittelt.

Tabelle 13: Darstellung der Signifikanz.

Signifikanzniveau	Symbol im Diagramm	Fehlerwahrscheinlichkeit
keine Signifikanz	Klammer ohne Symbol	$p > 0,05$
signifikant	*	$p \leq 0,05$
sehr signifikant	**	$p \leq 0,01$
hoch signifikant	***	$p \leq 0,001$

12. Experimente und Ergebnisse

In diesem Kapitel wird die drahtlose, kombinierte Temperaturmessung während und nach der Herstellung von thermoplastischen Spritzgussbauteilen durch konkrete Messungen verifiziert. Damit werden die in Abschnitt 6 vorgestellten erwarteten Vorteile und Funktionen nach quantitativen Parametern und Kriterien bewertet. Die detaillierte Beschreibung der entsprechenden Messmethoden und Geräte sind Kapitel 11 zu entnehmen.

12.1. Systemverifikation

Zur Verifikation wird zunächst die Messgenauigkeit des RFID-Sensor-Transponders analysiert. Das Gesamtsystem aus Spritzgießmaschine, Spritzgusswerkzeug, RFID-Schreib-/Lesegerät und dem Sensor-Transponder wird hinsichtlich des Kommunikationsverhaltens und der Fähigkeit zur Temperaturmessung während und nach der Spritzgießverarbeitung überprüft. Anschließend wird die Möglichkeit zur Regelung des Spritzgießprozesses evaluiert.

12.1.1. Sensorqualifikation

Die Fähigkeit der RFID-Sensor-Transponder zur Temperaturmessung wurde mit jeweils 9 Sensor-Tags auf 3 Temperaturniveaus (Raumtemperatur (RT), 80 °C, 130 °C) in einem Wärmeträgerfluid als Thermostat über eine Messzeit von 60 s bewertet. Der jeweilige Median, als gegenüber Ausreißern robustes Lagemaß, bzw. die Abweichungen der Temperatur in Grad Celsius und der Vergleich zur Referenzmessung mit einem Normalthermoelement Typ-K im selben Thermostat (siehe Abschnitt 11.1) werden als quantitative Bewertungsparameter herangezogen.

In Abb. 12-1 ist das Ergebnis der Vergleichsmessung auf den einzelnen Temperaturniveaus dargestellt. Als zusätzliche Messung wurde anschließend an den Erhitzungsprozess eine erneute Messung bei Raumtemperatur (RT-2) durchgeführt, um Aussagen für eine Weiterverwendung des Sensor-Elements treffen zu können. Wie aus Abb. 12-1 ersichtlich, folgt die Messung mit dem Sensor-Tag der Referenzmessung, wobei sich die Mediane bei einer Thermostatterperatur auf Raumtemperaturniveau um 1,53 °C, bei 80 °C um 1,08 °C und bei ca. 130 °C um 0,09 °C unterscheiden. Somit wird die Forderung (Bernhard, F., 2014, S. 496) nach einer möglichst genauen Übereinstimmung der Temperaturmessung zwischen Sensor-Tag, Referenzthermometer und Temperiereinrichtung in der zentralen Tendenz erfüllt. Durch eine ausreichende Vorwärmzeit vor dem Messbeginn auf dem jeweiligen Temperaturniveau wurde ein Messfehler durch Temperatúrausgleich und Änderung des äußeren thermischen Widerstands zwischen Sensor und Medium vermieden. Die trotzdem auftretenden Abweichungen zur eingestellten Thermostatterperatur können aus einer nicht optimalen thermischen Kopplung mit dem Thermostat oder auch der Wärmeableitung zur Umgebung resultieren. Dies kann laut Bernhard (Bernhard, F., 2014, S. 564) bei dieser Überprüfungs-methode eines Sensors bei einzelnen Temperaturen systembedingt auftreten. Somit setzt sich die hier gemessene Abweichung aus der Ungenauigkeit des Systems und Fehlern durch Wärmeableitung zusammen.

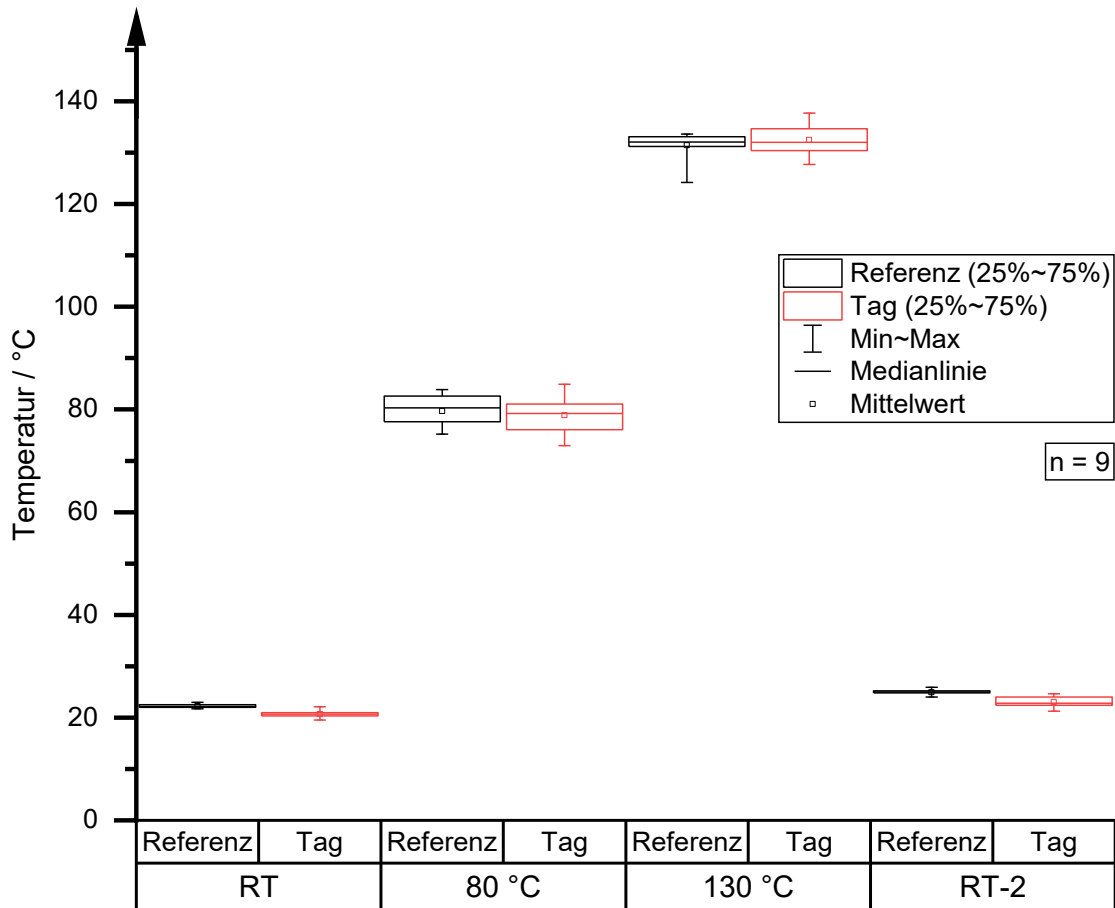


Abb. 12-1: Vergleich der gemessenen Temperaturen zwischen RFID-Sensor-Tag und einem Referenz-Thermoelement bei unterschiedlichen Temperaturniveaus des Thermostats (Raumtemperatur (RT), 80 °C, 130 °C). Eine zusätzliche Kontrollmessung wurde nach der Temperaturbelastung erneut auf Raumtemperaturniveau (RT-2) durchgeführt.

Als zusätzliches Qualifizierungsmerkmal des Sensor-Tags wird die Linearität zwischen den drei gemessenen Temperaturniveaus herangezogen (siehe Abb. 12-2). Der Bereich bis 85 °C ist dabei durch das Datenblatt und das grundsätzlich lineare Messprinzip dieses Sensortyps bestätigt. Für die Extrapolation zu höheren Temperaturen stellen sich im Mittel die Geradengleichungen wie folgt dar:

$$\text{Referenz} \quad y = 1,01 x - 0,21 \quad \text{12-1}$$

$$\text{Sensor-Transponder} \quad y = 1,00 x + 1,68 \quad \text{12-2}$$

Wie in Abb. 12-2 ersichtlich, folgen beide Datenbereiche einer linearen Verteilung mit einer hohen Anpassungsgüte an die Regression, erkennbar durch Bestimmtheitsmaße R^2 von $>99\%$. Ein R^2 von 100% würde dabei einem perfekten linearen Zusammenhang entsprechen. Zur Auswertung und besseren Übersichtlichkeit wurde dazu der gegenüber Ausreißern robuste Median aus den jeweils neun Messungen beurteilt. Somit bestätigt sich das lineare Messprinzip des hier gewählten Sensortyps und ein weiteres Qualitätskriterium für Sensorelemente, d. h. eine lineare Interpolation (Bernhard, F., 2014, S. 492) kann erfüllt werden. Dies bedeutet auch, dass der Sensor-Tag auch außerhalb seines im Datenblatt spezifizierten Bereiches

sinnvoll verwendet und die vorgestellte Anwendung damit realisiert werden kann. Als Funktionsgrenze des Sensor-Elementes zeigt sich jedoch eine Umgebungstemperatur ab ca. 150 °C.

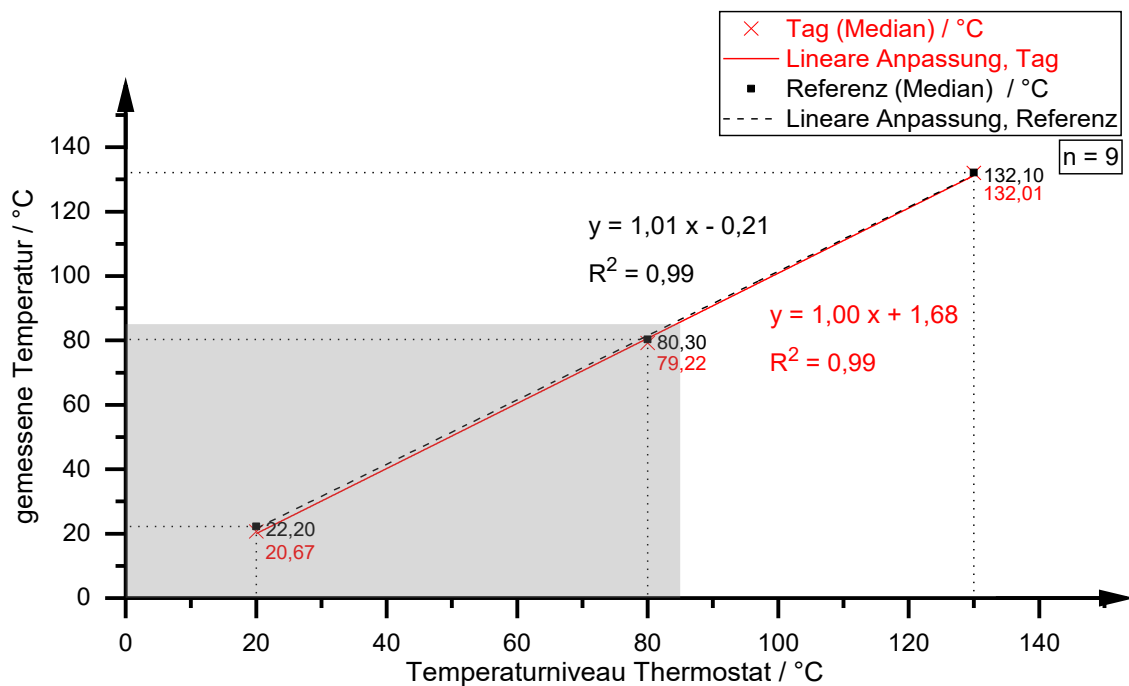


Abb. 12-2: Lineare Verteilung der mittels Sensor-Tag (rot) und Referenz-Thermoelment (schwarz) gemessenen Temperaturen gegenüber dem Temperaturniveau des umgebenden Thermostats (Wärmeträgeröl). Grau hinterlegt ist der vom Hersteller des Sensor-Tags im Datenblatt definierte Arbeitsbereich (bis +85 °C).

Eine detaillierte Betrachtung der Messwerte auf dem 130 °C Temperaturniveau, wie in Abb. 12-3 präsentiert, zeigt für die Referenzmessung mit dem Thermoelment einen maximalen Wertebereich von $\pm 4,70$ °C um den Median und einen maximalen Temperaturmessfehler δT von $\pm 0,95$ °C für die mittleren 50 % der Daten. Die Messgenauigkeit des verwendeten Referenz-Thermoelmentes wird dabei im Datenblatt mit einer Messgenauigkeit von $\pm 2,6$ °C bei einer Umgebungstemperatur von 130 °C angegeben. Die parallel durchgeführte Messung mit dem RFID-Sensor-Tag ergab ein δT von $\pm 5,02$ °C für den maximalen Bereich und von $\pm 2,14$ °C für den mittleren Bereich. Dabei muss beachtet werden, dass sich die Abweichungen zwischen den einzelnen Messungen aus dem gesamten hier entwickelten Messsystem bzw. der Messkette ergeben und sich nicht nur auf den einzelnen Sensor-IC beziehen. Dieser ist mit einer Genauigkeit von ± 1 °C bis zu einer Temperatur von +85 °C angegeben. Betrachtet man die Mediane der Messungen mit Referenz (132,10 °C) und Sensor-Tag (132,01 °C), stellt man eine Temperaturdifferenz ΔT von nur 0,09 °C auf dem Temperaturniveau von 130 °C fest. Insgesamt lässt sich somit eine hohe Richtigkeit der Messung feststellen, d. h. eine geringe Abweichung vom gemessenen Referenzwert. Für industriell verwendete Temperaturmesseinrichtungen beim Kunststoffspritzgießen (siehe auch Abschnitt 3.2), wie dem für die Spritzgießversuche als Referenz verwendeten System zur konventionellen Prozessüberwachung (siehe Abschnitt 11.2), kann sich der Messfehler auf $\pm 2,8$ °C (bei 130 °C Umgebungstemperatur) summieren. Die im Stand der Technik vorgestellten thermografischen Messmethoden erreichen im Praxiseinsatz Abweichungen von $\pm 1,30$ - $2,39$ °C (siehe Abschnitt 3.2), bezogen auf das hier betrachtete Temperaturniveau von 130 °C (siehe auch Tabelle 2). Ein Vergleich

zu den vorgestellten Messansätzen aus dem Bereich der Forschung ist aufgrund mangelnder Angaben zu Messgenauigkeiten oder anderen Problemen in der Messmethodik schwierig.

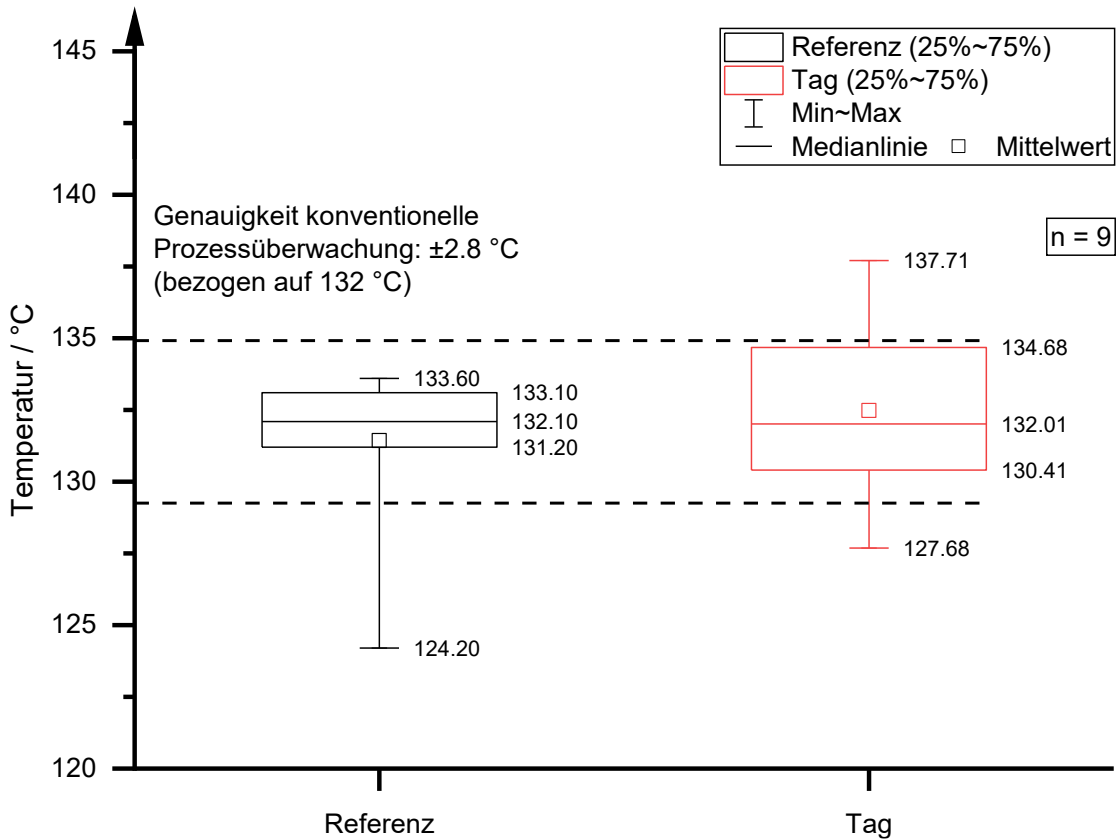


Abb. 12-3: Vergleich zwischen Referenz-Thermoelment und RFID-Sensor-Tag bei Temperaturmessung auf einem Thermostatniveau von ca. 130 °C. Die gestrichelten Linien deuten die Genauigkeit der in den Spritzgießversuchen als Referenz verwendeten konventionellen Prozessüberwachung an (beschrieben in Abschnitt 11.2).

Beim Vergleich der Messfrequenzen aller Messungen fällt auf, dass der Median auf den verschiedenen Temperaturniveaus bei 5,26 Hz liegt und nur eine geringe Schwankung aufweist. Bei Raumtemperatur vor dem Erhitzen liegt der Mittelwert der Messfrequenz bei 5,30 Hz ($\pm 0,26$; $n = 9$). Bei einem Niveau von 80 °C liegt der Mittelwert ebenfalls bei 5,25 Hz ($\pm 0,06$; $n = 9$). Diese Werte bleiben auch bei der maximalen Temperatur von 130 °C annähernd gleich (Mittelwert 5,24 Hz $\pm 0,07$; $n = 9$). Die erneuten Messungen nach Abkühlung auf Raumtemperatur zeigen keine Veränderung der Messfrequenz (5,22 $\pm 0,10$ Hz; $n = 9$). Ein Vergleich der Messfrequenzen bei Raumtemperatur und 130 °C Mediumtemperatur ist in Abb. 12-4 dargestellt.

Um eine weitere Verwendbarkeit des Sensor-Tags nach der Temperaturbelastung durch den Spritzgießprozess zu verifizieren, wurden folgend auf die Messungen bei einer Wärmeträgerumgebung von 130 °C nochmals Vergleichsmessungen bei Raumtemperatur (RT-2) durchgeführt. Wie in Abb. 12-5 ersichtlich, besteht zwischen der ersten Temperaturmessung mit den originalen Sensor-Tags und der Referenz eine gemessene Temperaturdifferenz ΔT von 1,53 °C. Diese erhöht sich nach Temperaturbelastung durch das Spritzgießen auf eine Differenz ΔT von 2,17 °C. Somit besteht zwischen den Messungen vor und nach Erhitzen ein Delta von 0,64 °C. Bei einer angegebenen Genauigkeit für den Sensor-IC von $\pm 0,3$ °C bis +50 °C erscheint dieser Unterschied nachvollziehbar und akzeptabel. Das insgesamt etwas

höhere Temperaturebene der zweiten Messung lässt sich dabei auf eine etwas höhere Ausgangstemperatur der Thermostatflüssigkeit bei der zweiten Vergleichsmessung (RT-2) zurückführen.

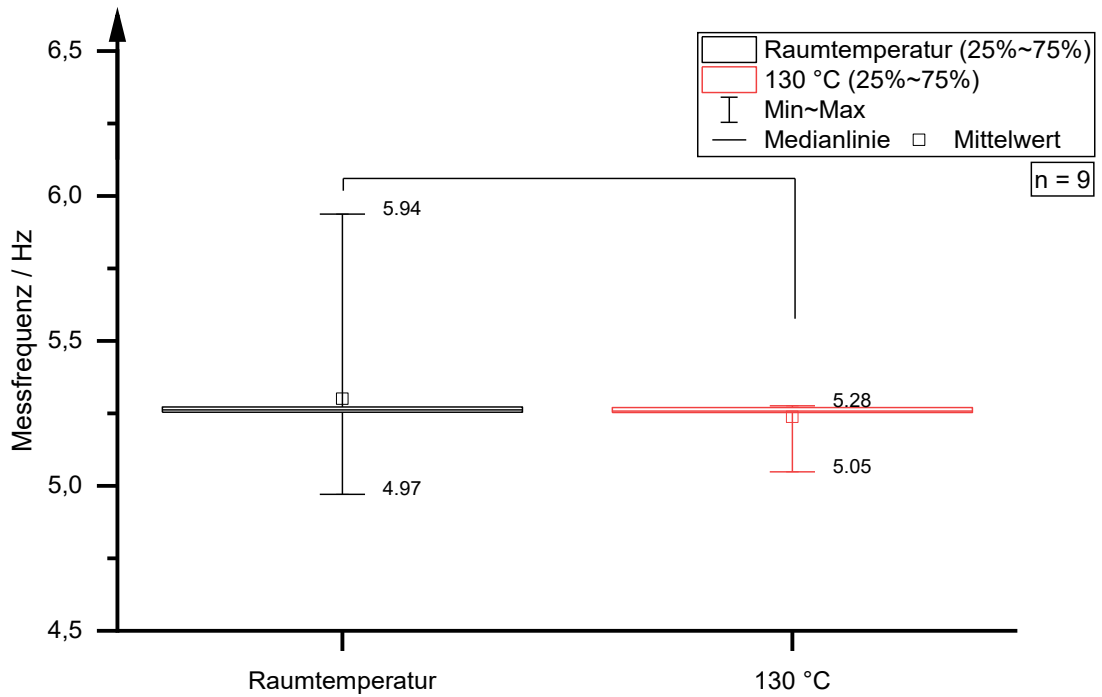


Abb. 12-4: Vergleich der Messfrequenzen bei Raumtemperatur bzw. 130 °C warmem Wärmeträgerfluid.

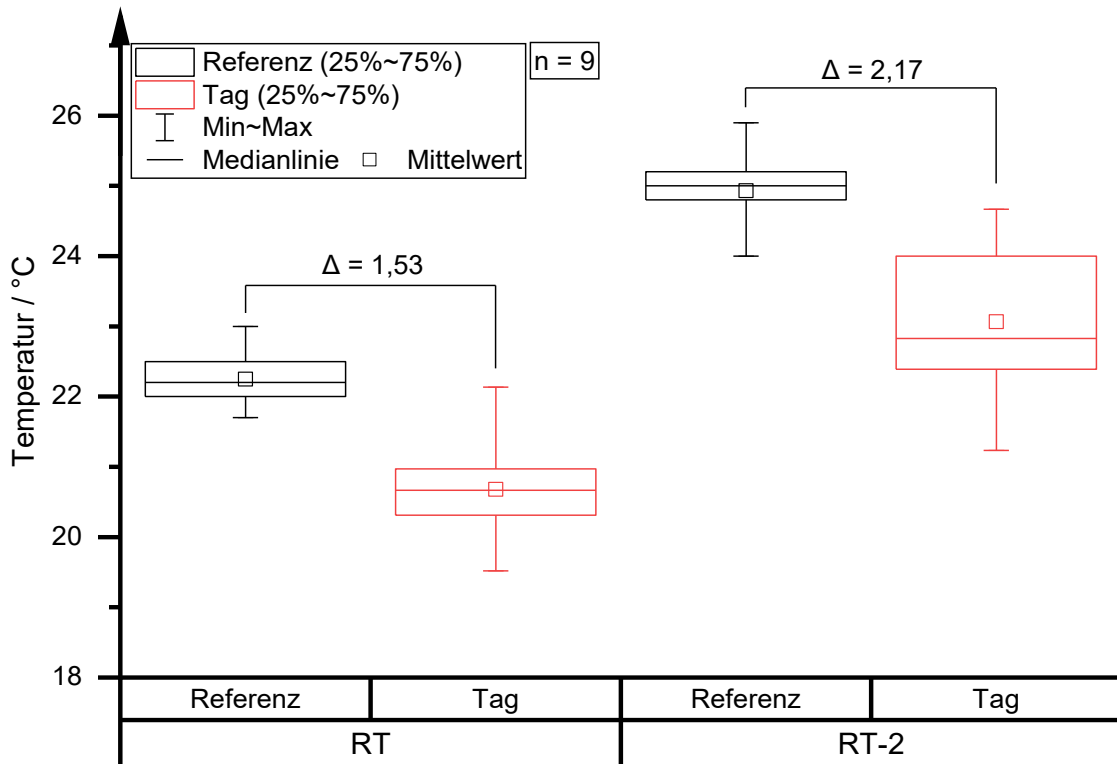


Abb. 12-5: Vergleich zwischen Referenz und RFID-Sensor-Tag auf Raumtemperaturebene vor (RT) und nach (RT-2) einer Erhitzung auf 130 °C.

12.1.2. Kommunikation während und nach der Spritzgießverarbeitung

Vor der Überprüfung des Kommunikationsverhaltens mit dem RFID-Sensor-Tag direkt während des Spritzgießprozesses wurden die Übertragungseigenschaften des Transponders im Ausgangszustand und im Umfeld des entwickelten Spritzgusswerkzeuges analysiert.

12.1.2.1. Drahtloser Übertragungsweg

Zuerst wurde, wie in Abschnitt 11.3 beschrieben, die Lesereichweite der Transponder überprüft (siehe Abb. 12-6). Daraus ergab sich im Mittel eine maximale theoretische Lesereichweite von 1,02 m ($\pm 0,09$; $n = 5$) und bei der für die Messung im Ultra High Frequency (UHF)-Bereich relevanten Frequenz von 865 MHz eine mittlere theoretische Lesereichweite von 0,29 m (Mittelwert; $\pm 0,03$; $n = 5$) an Luft. Diese Reichweite ist sowohl für eine Temperaturmessung innerhalb als auch außerhalb des Werkzeuges mit der hier verwendeten Nahfeldantenne ausreichend und könnte durch die Verwendung einer stärkeren Antenne oder der Kombination der Transponder mit einer Metallfläche noch gesteigert werden. Zusammen mit Metall konnte eine mittlere theoretische Lesereichweite der Transponder bei 865 MHz von 3,10 m ($\pm 0,27$; $n = 5$) an Luft nachgewiesen werden.

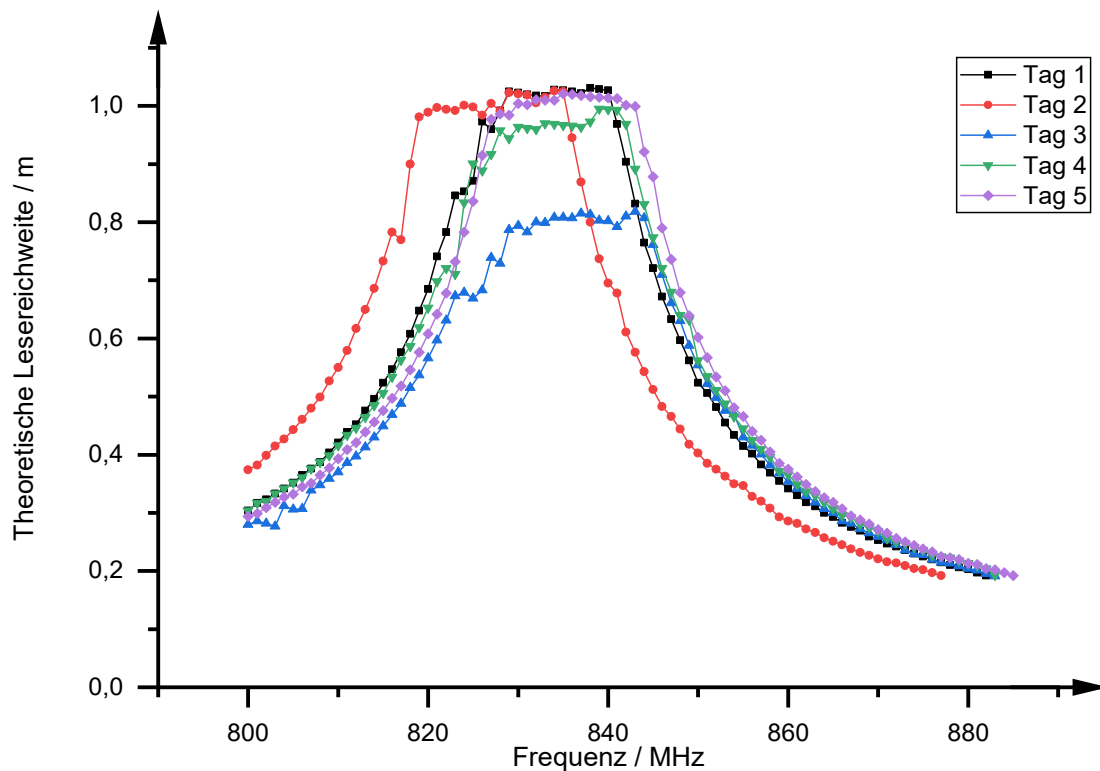


Abb. 12-6: Maximale theoretische Lesereichweite der RFID-Sensor-Tags an Luft.

Der Einfluss des Spritzgusswerkzeuges auf die Kommunikationsfähigkeit zwischen Transponder und Antenne wurde untersucht, indem zunächst die Permittivität des Tag-Halters aus Polyetheretherketon gegenüber hochfrequenten elektromagnetischen Feldern analysiert wurde. Dazu wurde dessen stoffabhängige relative Permittivität ϵ_r bestimmt und mit der von Wasser bzw. Luft bei Raumtemperatur verglichen (siehe Abb. 12-7). Die somit nachgewiesene Frequenzunabhängigkeit der relativen Permittivität des für den Werkzeugeinsatz verwen-

deten PEEK erweist sich dabei als Vorteil für die hier angestrebten Messungen. D. h. eine eventuelle Beeinflussung der Übertragungsstrecke zwischen Antenne und Transponder durch das dazwischenliegende PEEK ist vernachlässigbar. Im für die angestrebte UHF-Messung relevanten Bereich um 865 MHz liegt die relative Permittivität ϵ_r des PEEK bei 3,23 ($\pm 0,17$; $i = 2$; $n = 5$). Im Vergleich dazu liegt der Mittelwert der rel. Permittivität von Luft bei 1,18 und von Wasser bei 80,45, was den Werten aus der Literatur entspricht (Stiny, L., 2015, S. 178).

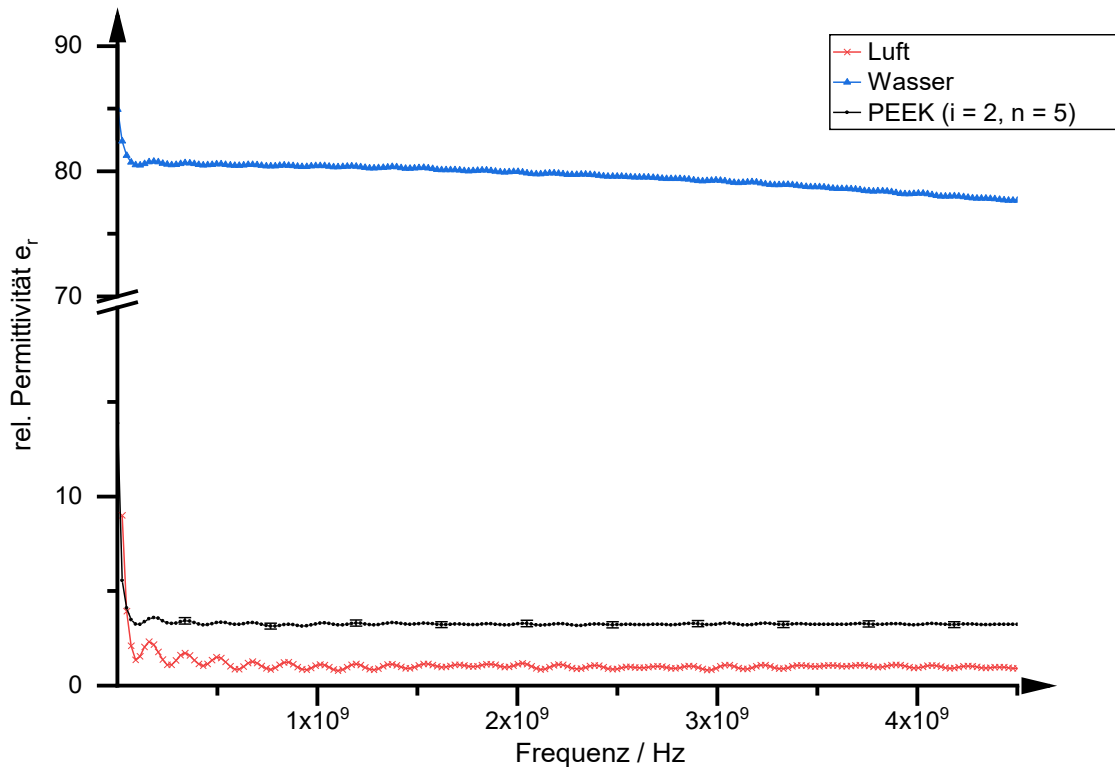


Abb. 12-7: Bestimmung der relativen Permittivität ϵ_r des PEEK-Halters im Übertragungsweg zwischen Antenne und Transponder gegenüber hochfrequenten elektromagnetischen Feldern.

Um die Einbausituation der UHF-Nahfeld-Antenne im Werkzeug und die Auswirkung auf die Kommunikation zu analysieren, wurde die reflektierte Leistung zwischen Antenne und einem Referenzsystem anhand des in Abschnitt 11.3 vorgestellten S11-Reflektionsparameters beschrieben (siehe auch Zeppenfeld, M. *et al.*, 2017a). Im Vergleich zur Messung an der Antenne selbst verschiebt sich der Reflektionsparameter bei im Werkzeug montierter Antenne zu einer niedrigeren Frequenz (siehe Tabelle 14). Diese Verstimmung durch das umgebende Werkzeugmaterial wird jedoch nicht weiter durch das Schließen des Werkzeuges, d. h. durch die Kombination mit der Kavitätsseite, beeinflusst.

Tabelle 14: Minimum des S11-Reflektionsparameters für verschiedene Antenneneinbausituationen.

Einbausituation	Frequenz / MHz	S11-Parameter / dB
Antenne einzeln	873,05	-21,35
Antenne im geöffneten Werkzeug	850,32	-19,80
Antenne im geschlossenen Werkzeug	850,32	-19,85

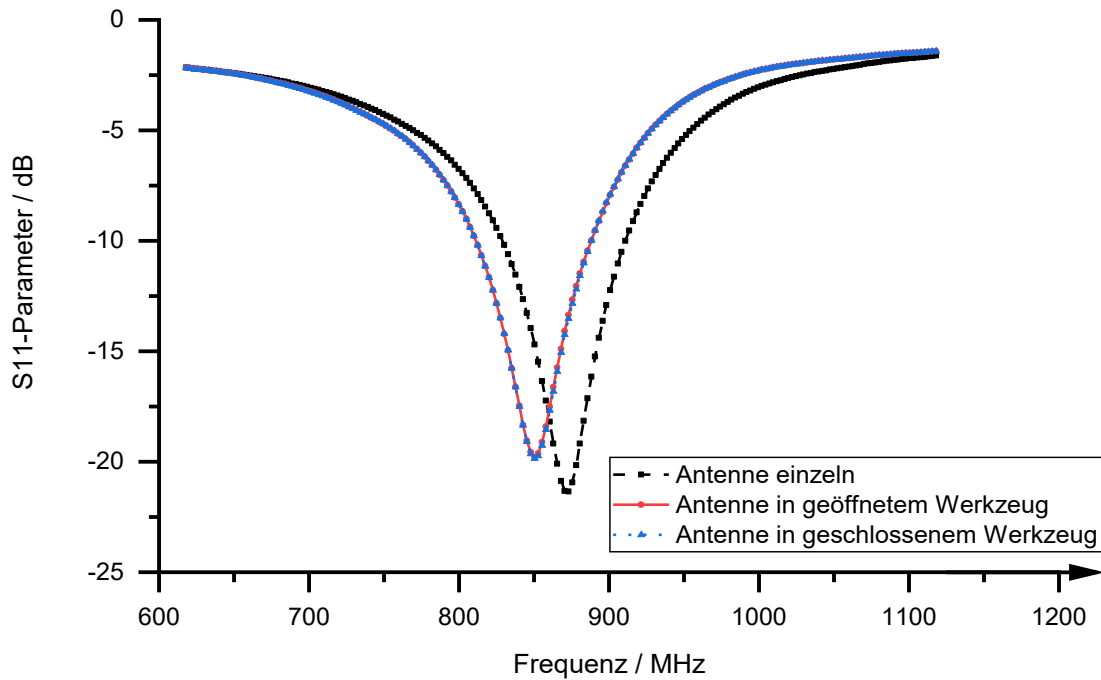


Abb. 12-8: Analyse verschiedener Einbausituationen der UHF-Nahfeldantenne im Spritzgusswerkzeug anhand des S11-Reflektionsparameters.

12.1.2.2. Kommunikation während des Spritzgießens

Die Kommunikation mit dem Sensor-Tag auch während des realen Spritzgießzyklus wurde mit Hilfe der on-Chip Received Signal Strength (RSSI), welche als Indikator für die empfangene Signalstärke des Transponders dient, an insgesamt 9 Transpondern ausgewertet (siehe auch Zeppenfeld, M. *et al.*, 2017a). Um einen zeitlichen Bezug zur Einströmsituation der Kunststoffschmelze in das Spritzgusswerkzeug zu bekommen, wurde der Formfüllvorgang mittels Spritzgießsimulation analysiert. Dadurch konnte für die Spritzgießmaschine vom Typ KM 50 EX eine Zeit bis zur volumetrischen Füllung der Kavität von 0,5239 s und für die Maschine vom Typ Arburg Allrounder 420 C eine Zeit von 0,3971 s (siehe Abb. 12-9) ermittelt werden. Als zusätzliche Referenz dienen der sowohl düsenseitig (anschnittnah) als auch kavitätsseitig (auf Höhe des Sensor-Tags) im Prozess gemessene Werkzeuginnendruck und die Werkzeugwandtemperatur. Hierbei weist der maximale anschnittnahe Werkzeuginnendruck und die an derselben Stelle gemessene Werkzeugwandtemperatur, je nach verwendeter Spritzgießmaschine, ein Maximum zwischen 0,6-1,7 s nach Beginn des Einspritzvorgangs auf. Bei den überprüften Sensor-Transpondern lag der Messwert des on-Chip RSSI (siehe Abb. 12-12) immer in den Grenzen von maximal 20 bis minimal 13, d. h. im Mittel bei 16,87 ($\pm 0,85$; $n = 9$), was somit die vom Chip-Hersteller definierten Kriterien für eine zuverlässige Temperaturmessung (siehe Abschnitt 11.1) erfüllt. Die an der Spritzgießmaschine vom Typ Arburg Allrounder 420 C durchgeführten RSSI-Messungen ($n = 6$) fanden bei einer maximalen Werkzeugwandtemperatur von 52,92 °C und einem maximalen düsenseitigen Druck von 104,69 bar statt. Die an der Maschine vom Typ KM 50 EX ($n = 3$, siehe Abb. 12-10) erfassten Werkzeugwandtemperaturen lagen maximal bei 50,93 °C, der maximale düsenseitige Druck bei 118,88 bar. Die an der Arburg-Maschine im Vergleich zur KM-Maschine höheren gemessenen Wandtemperaturen am Formteilrand weisen auf eine höhere Schmelzetemperatur und niedrigere Viskosität der Polypropylen-Schmelze hin (siehe Abb. 12-11). Um eine ausreichende Kühlzeit auch bei den Bauteilen mit höherer Schmelzetemperatur zu garantieren,

wurden die an der Arburg gefertigten Formteile bei der Überprüfung der Kommunikation erst nach 60 s entformt.

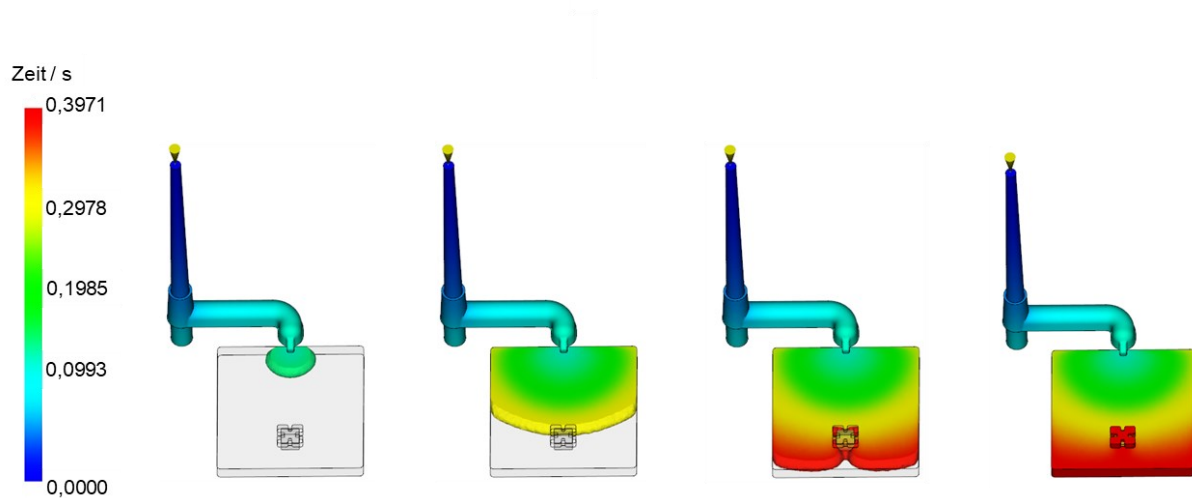


Abb. 12-9: Visualisierung des Formfüllvorganges zur Ermittlung der Zeit bis zum vollständigen volumetrischen Füllen der Kavität mit der Spritzgießmaschine vom Typ Allrounder 420 C.

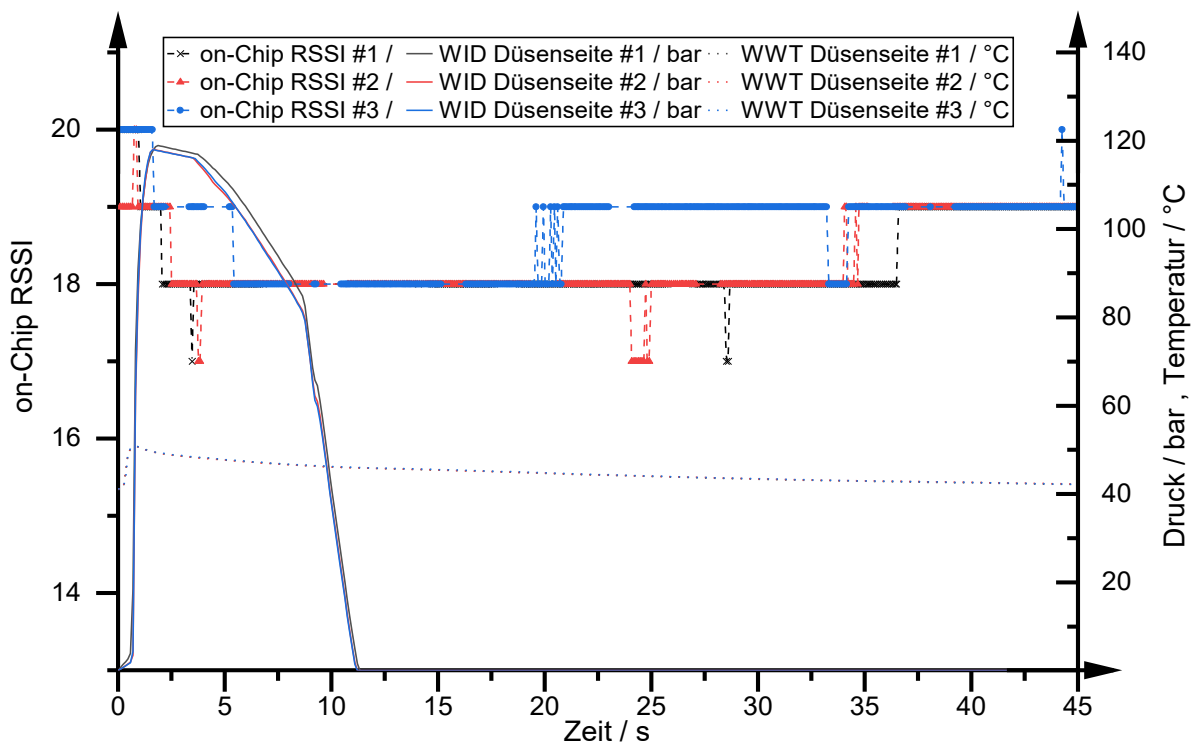


Abb. 12-10: Nachweis der Kommunikation beim Umspritzen der RFID-Sensor-Tags mit Polypropylen an der Spritzgießmaschine vom Typ KM 50 EX durch Messung der on-Chip Received Signal Strength (RSSI). Der Vergleich zur Werkzeugwandtemperatur (WWT) und dem düsenseitigen Werkzeuginnen- druck (WDI) verdeutlicht den Ablauf des Spritzgießprozesses.

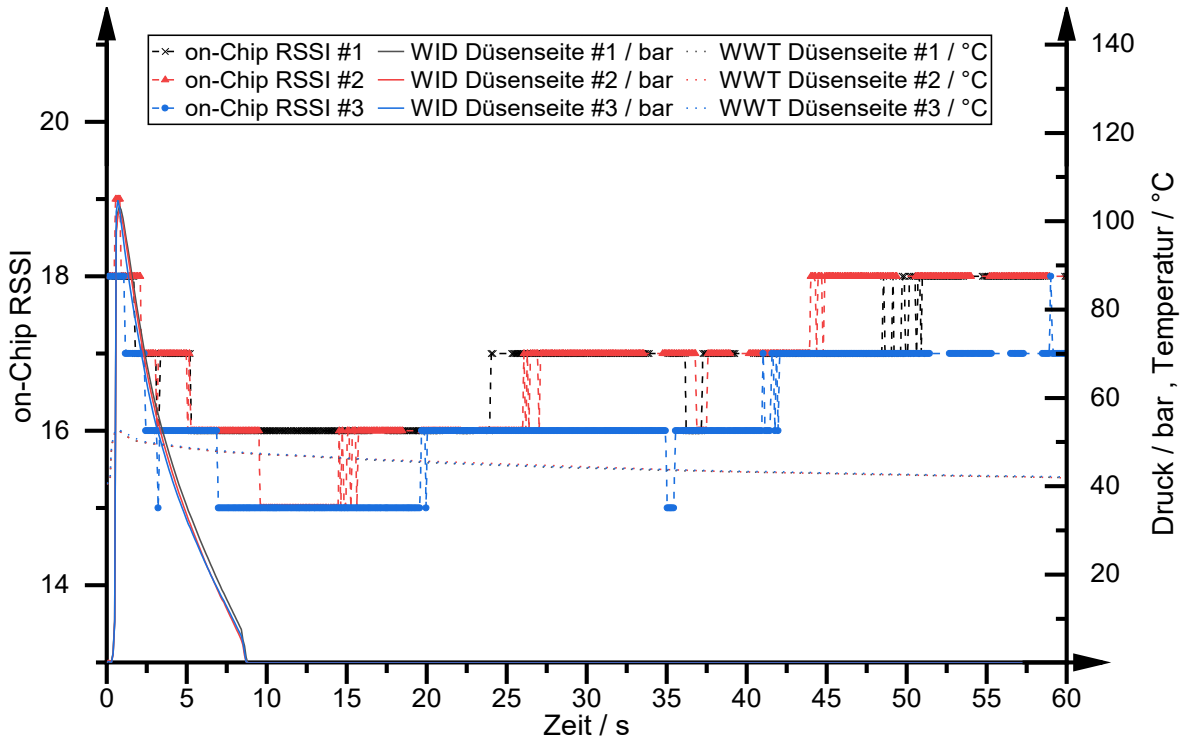


Abb. 12-11: Nachweis der Kommunikation beim Umspritzen der RFID-Sensor-Tags mit Polypropylen an der Spritzgießmaschine vom Typ Allrounder 420 C durch Messung der on-Chip Received Signal Strength (RSSI). Der Vergleich zur Werkzeugwandtemperatur (WWT) und dem düsenseitigen Werkzeuginnendruck (WID) verdeutlicht den Ablauf des Spritzgießprozesses.

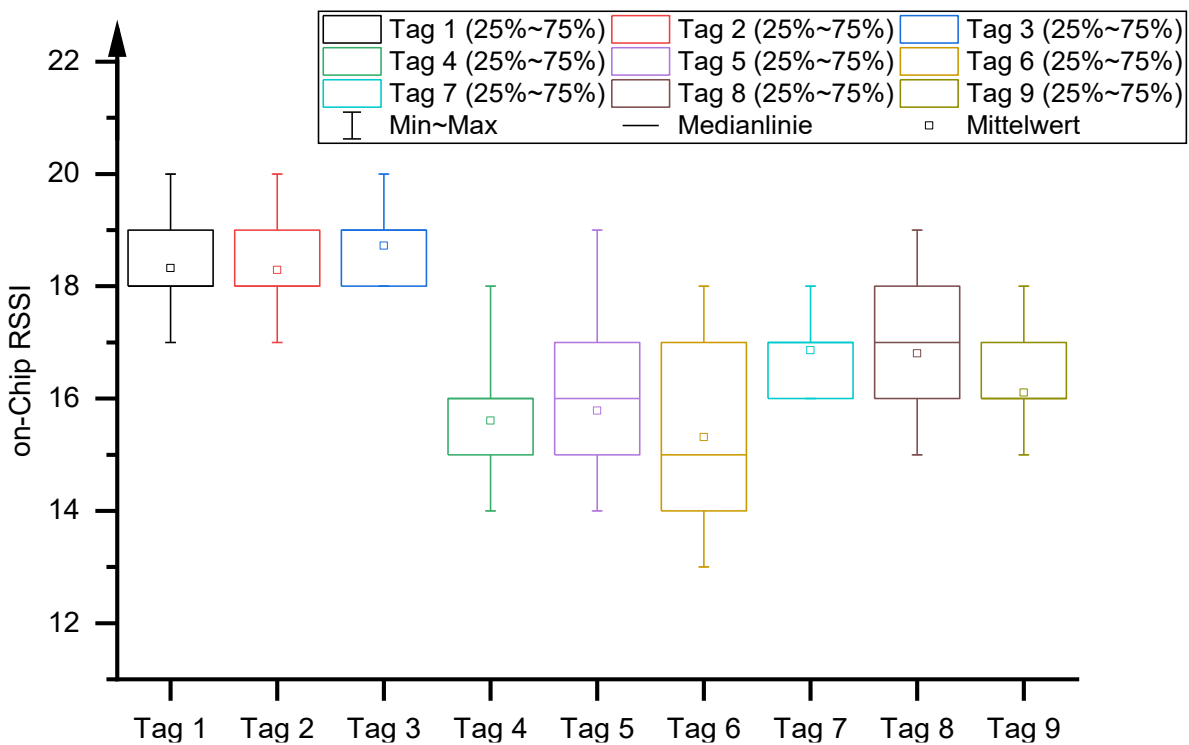


Abb. 12-12: Übersicht über alle ausgewerteten Transponder und deren entsprechende on-Chip Received Signal Strength (RSSI). Tag 1-3 wurden auf der Spritzgießmaschine vom Typ KM 50 EX, Tag 4-9 auf der Spritzgießmaschine vom Typ Arburg Allrounder 420 C umspritzt.

Als Ausblick wurden noch Versuche ($n = 3$) mit Polybutylenterephthalat (PBT) bei einer Massetemperatur von 260 °C an der Spritzgießmaschine vom Typ Arburg Allrounder 420 C durchgeführt. Bei der im Vergleich zum Polypropylen höheren Schmelzetemperatur sind längere Messaussetzer zu beobachten (siehe Abb. 12-13). Dies liegt an der maximalen Einsatztemperatur des RFID-Sensor-Tags von 150 °C . Dennoch ist eine Kommunikation mit dem Tag direkt am Anfang des Spritzgießzyklus und vor allem bei fallenden Temperaturen während der Kühlphase möglich. Der gemessene Wertebereich der on-Chip RSSI lag zwischen 8 und 19 bei einem Mittelwert von $14,33$ ($n = 3$). Dabei betrug die maximale Werkzeugwandtemperatur $76,43\text{ °C}$ und der maximale düsenseitigen Druck $119,96\text{ bar}$.

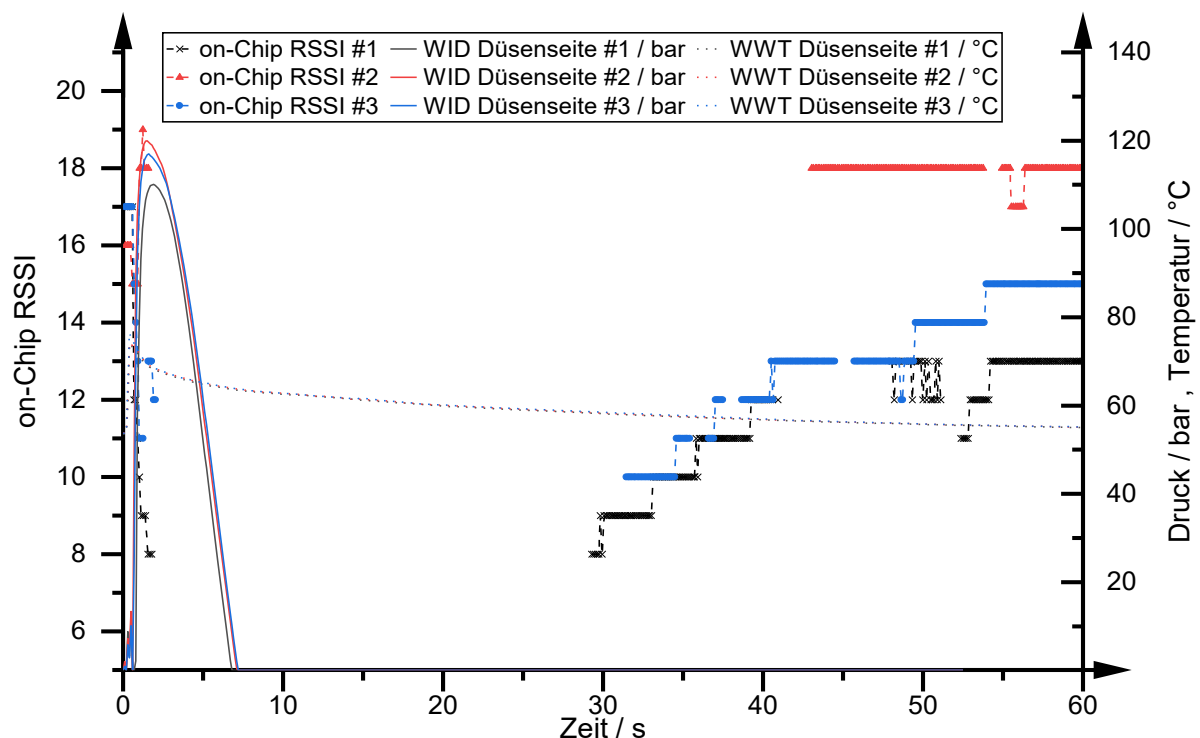


Abb. 12-13: Analyse der Kommunikation mit dem RFID-Sensor-Tag beim Umspritzen mit Polybutylenterephthalat (PBT) an der Spritzgießmaschine vom Typ Arburg Allrounder 420 C durch Messung der on-Chip Received Signal Strength (RSSI) im Vergleich zum Werkzeuginnendruck (WID) und der Werkzeugwandtemperatur (WWT). Durch die im Vergleich zum Polypropylen höhere Schmelzetemperatur von 260 °C unterbricht die Kommunikation bei Kontakt mit der heißen Schmelze. Diese kann aber während der Abkühlphase wieder aufgenommen werden.

Insgesamt kann durch die Bestimmung der maximalen theoretischen Lesereichweite des Sensor-Transponders ein praxistauglicher Einsatz des Sensor-Transponders nachgewiesen werden. Ebenfalls kann eine Beeinflussung des Messsignals durch die hier umgesetzte Werkzeugkonstruktion, insbesondere durch den verwendeten PEEK-Halter, ausgeschlossen werden, da das verwendete PEEK eine konstante relative Permittivität aufweist. Durch den Einbau der RFID-UHF-Antenne in das Spritzgusswerkzeug wurde diese hin zu niedrigeren Frequenzen verstimmt, allerdings blieb dies auch bei weiterer Änderung der Werkzeugkonfiguration, beispielsweise durch Schließen des Werkzeuges, konstant. Auch durch zusätzliche Messung der Transponder-Signalstärke (on-Chip RSSI) während des gesamten Spritzgießzyklus mit Polypropylen kann eine ausreichende Kommunikationsfähigkeit zwischen Antenne und

Sensor-Tag sichergestellt werden. Somit ist eine zuverlässige Messung der Temperatur während des Spritzgießprozesses möglich.

Mögliche weitere einsetzbare Materialien mit einem ähnlichen Schmelzetemperaturbereich wie Polypropylen sind z. B. Typen folgender Thermoplaste: Polyethylen (PE), Polystyrol (PS), Styrol-Acrylnitril (SAN), Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), Polyvinylchlorid (PVC), Polymethylmethacrylat (PMMA), Polyoxymethylen (POM), einzelne Polyamid-Typen (z. B. PA11, PA12) oder thermoplastische Elastomere (Baur, E. *et al.*, 2007, S. 688). Allerdings sind Auswirkungen evtl. notwendiger höherer Werkzeugtemperaturen auf die im Werkzeug integrierte Antenne zu überprüfen. Beim Umspritzen mit Polybutylenterephthalat (PBT) ist eine Kommunikation mit dem Sensor-Tag nur am Anfang und am Ende des Spritzgießzyklus möglich.

12.1.3. Temperaturmessung während und nach der Spritzgießverarbeitung

In diesem Abschnitt wird die Fähigkeit des Systems zur drahtlosen Messung der Temperatur aus dem Bauteilinneren sowohl während des Spritzgießprozesses als auch danach nachgewiesen. Dazu wird zuerst der Kontakt zwischen Sensor-Tag und der umgebenden Kunststoffformmasse, wie in Abschnitt 11.7 beschrieben, nachgewiesen. Anschließend wird auf die Messung während des Umspritzens mit Polypropylen eingegangen. Dazu werden insgesamt 15 Sensor-Tag Messungen während des Spritzgießprozesses ausgewertet und diskutiert. Als Referenz und als Anhaltspunkt für den Prozessablauf dient hierbei die konventionelle Prozessüberwachung, insbesondere der Werkzeugwandtemperatur-Sensor. Die Spritzgießsimulation dient zusätzlich zum Vergleich. Abschließend wird die Möglichkeit der drahtlosen Temperaturbestimmung nach der Entformung an weiteren 5 Messungen aufgezeigt und Messungen beim Umspritzen mit Polybutylenterephthalat (PBT) als Ausblick betrachtet.

12.1.3.1. Kontakt Transponder/Kunststoff

Um die Temperaturmessung mit dem RFID-Sensor-Transponder zu gewährleisten, ist ein durchgehender Kontakt zwischen Schmelze und Sensor, aber auch zu dem erstarrten Kunststoff direkt vor und vor allem nach der Entformung, notwendig. Aufgrund der hohen Drücke und des schmelzeartigen Kunststoffes kann während des Umspritzens von einem hinreichenden Kontakt zwischen Formmasse und Sensor ausgegangen werden. Dies bestätigt auch die durchgeführte Füllsimulation des Werkzeuges (siehe Abb. 12-9). Es ist davon auszugehen, dass die flüssige Schmelze auch am eingelegten RFID-Temperatursensor relativ schnell erstarrt und sich eine Randschicht, wie in Abb. 7-3 dargestellt, ausbildet. Jedoch ist im Gegensatz zu einem in der Werkzeugwand verbauten Sensor die Beeinflussung durch Wärmeableitung an das temperierte Werkzeugmaterial deutlich geringer, was insgesamt ein aussagekräftigeres Messsignal aus dem Bauteilinneren zulässt.

Trennschliffe (siehe Abb. 12-14 und Abb. 12-15) der entformten, mit Polypropylen umspritzten Einlegeteile zeigen einen direkten Kontakt ohne Luftpockets zwischen Sensor und Kunststoff (siehe auch Zeppenfeld, M. *et al.*, 2019a/b). Somit bewährt sich das gewählte Werkzeugdesign und ermöglicht das komplette Umfließen ohne Beschädigung des sensiblen Sensorelements. Wie aus der lichtmikroskopischen Analyse in Abb. 12-15 ersichtlich, ist auch nach der Entformung, trotz erstarrungsbedingter Volumenschwindung, eine Haftung zwischen Kunststoff und Sensor garantiert.

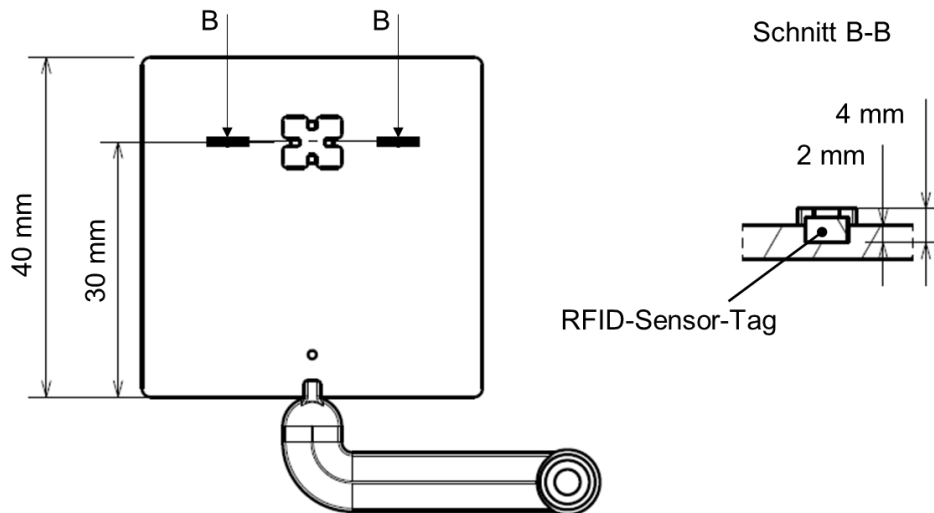


Abb. 12-14: Schnittebene des Trennschliffes zur Analyse des Kontakts zwischen Sensor-Tag und umgebenden Kunststoff.

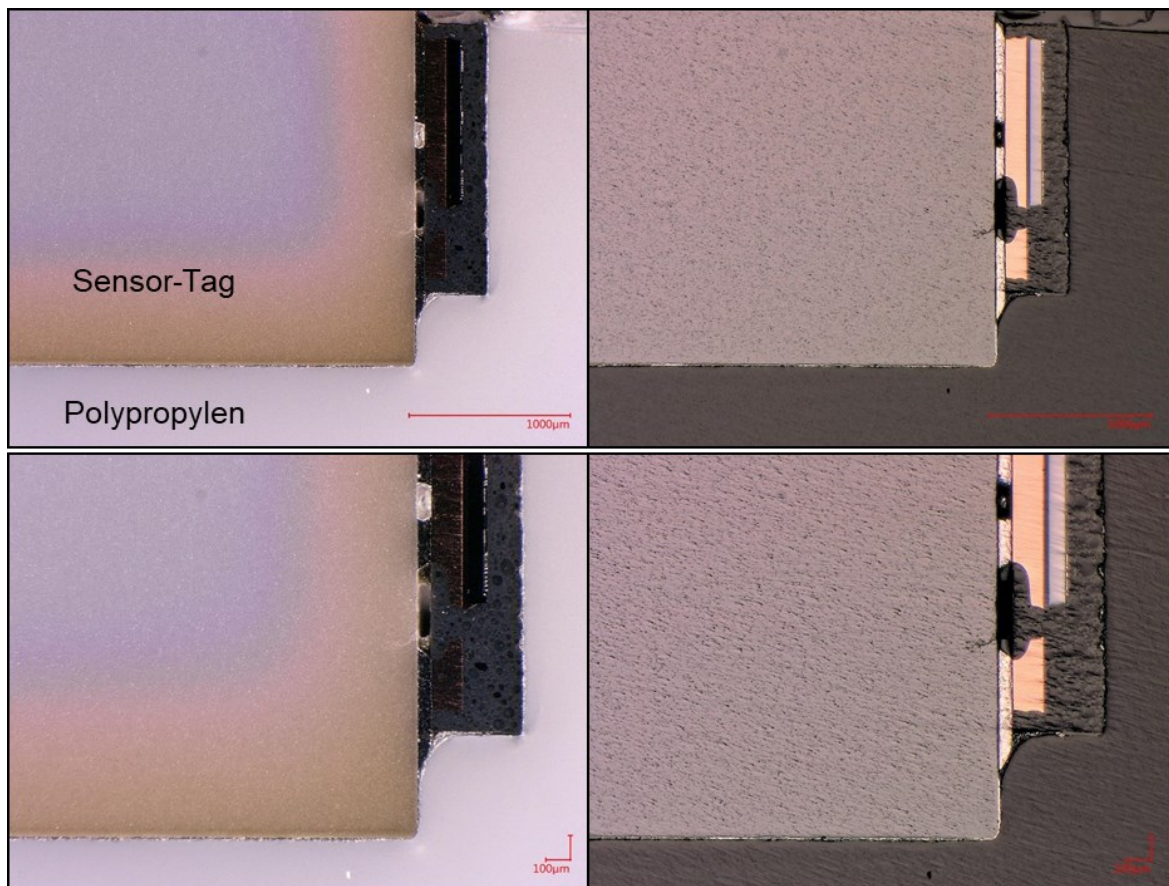


Abb. 12-15: Schliffbild bzw. lichtmikroskopische Aufnahme eines RFID-Sensor-Tags in direktem Kontakt zum umgebenden Polypropylen (Vergrößerung oben: 100x (Maßstab 1000 µm), unten: 150x (Maßstab 100 µm); links: Normalbild, rechts: verstärkter Kontrast (High Dynamic Range).

12.1.3.2. Temperaturmessung während des Spritzgießprozesses

Die drahtlosen Temperaturmessungen ($n = 15$) mittels RFID-Sensor-Tag bei der Umspritzung mit Polypropylen, durchgeführt an den beiden gewählten Maschinentypen, wird im Folgenden mit der entsprechenden Spritzgießsimulation und der Messung mittels konventioneller Werkzeugwandtemperatursensorik (WWT) verglichen (siehe auch Zeppenfeld, M. *et al.*, 2017a und Zeppenfeld, M. *et al.*, 2019a/b).

Die mittels Sensor-Tag aufgezeichneten Temperaturmesskurven an der Maschine vom Typ KM 50 EX (siehe Abb. 12-16) starten etwas unterhalb der am Temperiergerät vorgegebenen Werkzeugtemperatur von 45 °C und unter dem Niveau der in der Werkzeugwand eingebetteten, d. h. vorgewärmten, Thermoelemente. Dies lässt sich durch das Einlegen der bei Raumtemperatur gelagerten Sensor-Tags und die isolierende Wirkung des PEEK-Einlegeteilhalters erklären. Zu Beginn des Spritzgießzyklus weisen die Sensor-Tag-Messkurven eine ähnliche Steigung auf wie die der fest installierten WWT-Sensoren. Dies bedeutet, dass das minimal bei $50,63\text{ °C}$ bzw. maximal bei $50,86\text{ °C}$ gemessene Temperaturmaximum der Thermoelemente ungefähr zum gleichen Zeitpunkt, bzw. sogar um etwa $0,2\text{ s}$ früher, erreicht wird. Durch die Position der Sensor-Tags im Schmelzestrom können zudem detailliertere Temperaturinformationen aus dem zuletzt erstarrenden Bauteilinneren bestimmt werden, was sich in einer deutlich höheren gemessenen Maximaltemperatur von $122,06\text{ °C}$ ($\pm 0,23$; $n = 3$) widerspiegelt. Insgesamt lässt sich, trotz einzelner anfänglicher Messaussetzer (vgl. Sensor-Tag #3 in Abb. 12-16), eine durchgehende, drahtlose Messung der Temperatur aus dem Bauteilinneren gewährleisten. Beim Vergleich mit der Spritzgießsimulation zeigt sich ein sehr ähnliches Temperaturniveau an der Sensor-Tag-Messstelle. Der simulierte Temperaturverlauf unterscheidet sich zwar im Bereich des Temperaturmaximums von $118,32\text{ °C}$ um $3,87\text{ °C}$ zu den realen Messwerten, gleicht sich aber mit fallender Temperatur immer mehr an und wird ab ca. 80 °C von den realen Temperaturwerten auch teilweise unterschritten. Die Messung endet entweder nach der vorgegebenen Messzeit oder durch die Entformung des Bauteils aus der Werkzeugkavität und dem dadurch auftretenden Signalverlust zwischen Nahfeld-Antenne und Sensor-Tag.

Eine genauere Betrachtung der ersten Sekunde des Spritzgießprozesses an der Spritzgießmaschine vom Typ KM 50 EX (siehe Abb. 12-17) liefert Erkenntnisse über den Einspritzvorgang der Kunststoffschmelze in die Werkzeugkavität. Beim Einspritzen der heißen Kunststoffmasse spricht bei dem hier analysierten Prozess zuerst der 5 mm hinter dem Anschnitt gelegene Werkzeugwandtemperatursensor beim Kontakt mit der Schmelze an. Der im selben Sensorelement kombinierte Werkzeuginnendrucksensor reagiert verzögert erst bei ansteigendem Druck in der Kavität. Der RFID-Temperatursensor, im vorgestellten Spritzgusswerkzeug 30 mm vom Anschnitt entfernt, spricht ungefähr zeitgleich mit dem Drucksensor an.

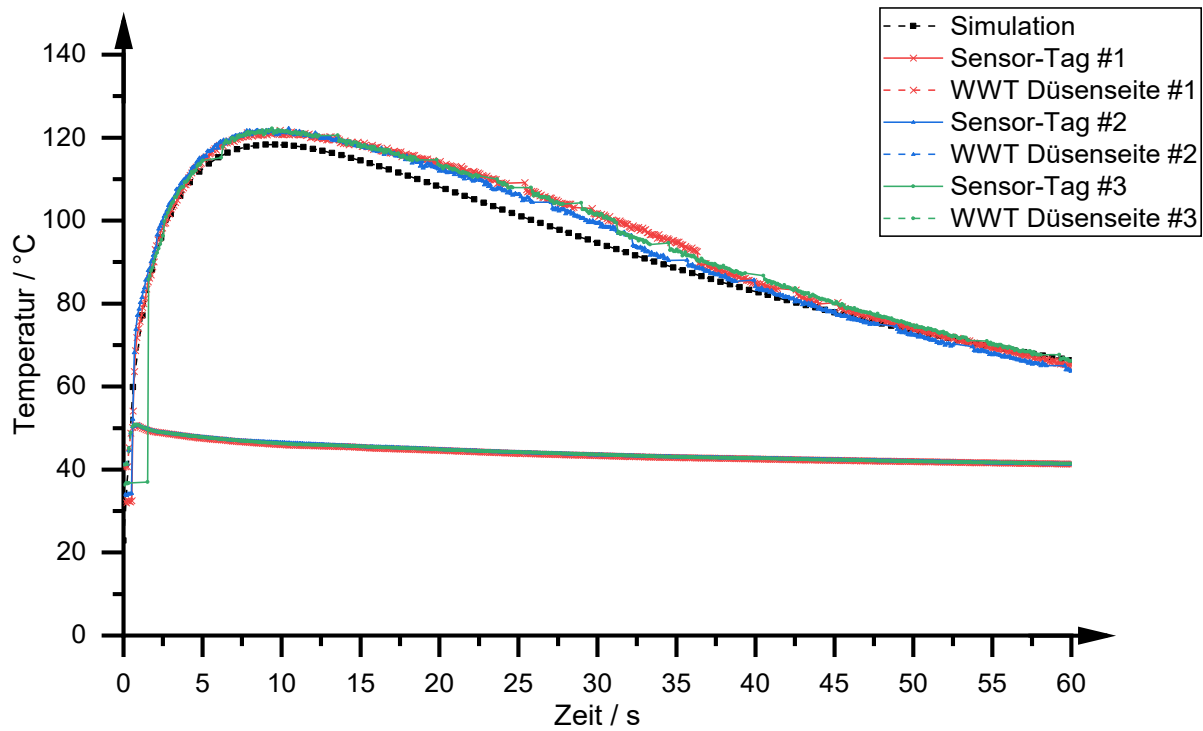


Abb. 12-16: Temperaturmessung bei der Umspritzung mit Polypropylen auf der Spritzgießmaschine vom Typ KM 50 EX. Verglichen werden die Spritzgießsimulation und die Werkzeugwandtemperatur (WWT) mit jeweils 3 Messungen mittels RFID-Temperatursensor (Sensor-Tag).

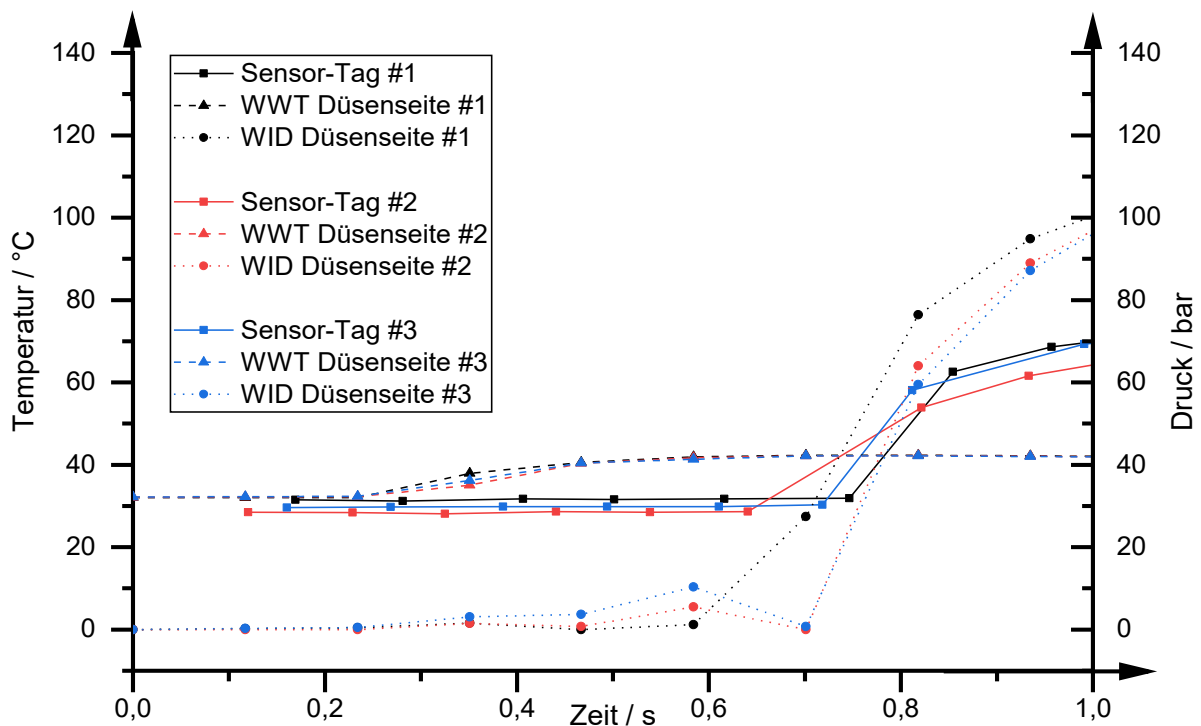


Abb. 12-17: Erste Sekunde des Spritzgießprozesses und Analyse des Einspritzvorgangs beim Umspritzen des RFID-Sensor-Tags an der Spritzgießmaschine vom Typ KM 50 EX. Die konventionelle gemessene Werkzeugwandtemperatur (WWT) reagiert als erstes auf ein Einströmen der heißen Kunststoffschmelze. Der an gleicher Stelle gemessene Werkzeuginnendruck (WID) spricht ungefähr gleichzeitig wie der in Strömungsrichtung 25 mm weiter platzierte RFID-Sensor-Tag an.

Im Vergleich zur in Abb. 12-16 gezeigten Messung an der Maschine vom Typ KM 50 EX ergibt sich an der Arburg Allrounder 420 C Spritzgießmaschine (siehe Abb. 12-18) bei gleichbleibender Werkzeuggeometrie ein höheres Temperaturniveau bei der drahtlosen Sensor-Tag-Messung mit einem Temperaturmaximum von $130,37\text{ °C}$ ($\pm 1,39$, $n = 6$). Dies bedeutet, im Vergleich zur Messung an der KM 50 EX, im Mittel einen Unterschied der Temperaturmaxima von $8,31\text{ °C}$. Die erhöhte Temperatur der Polypropylen-Schmelze zeigt sich auch an der heißeren Werkzeugwandtemperatur von $52,99\text{ °C}$ ($\pm 0,20$; $n = 6$), was einem Delta von $2,25\text{ °C}$ entspricht, und somit auch die Richtigkeit der Sensor-Tag-Messung verifiziert. Die höhere Schmelzetemperatur spiegelt sich auch in einer niedrigeren Viskosität, messbar durch einen niedrigeren Werkzeuginnendruck, wieder. Liegt der düsenseitige Werkzeuginnendruck bei der KM 50 EX bei $118,84\text{ bar}$ ($\pm 2,70$; $n = 3$), so verringert sich dieser durch die dünnflüssigere Schmelze zu $102,27\text{ bar}$ ($\pm 4,99$; $n = 6$) bei der Allrounder Maschine.

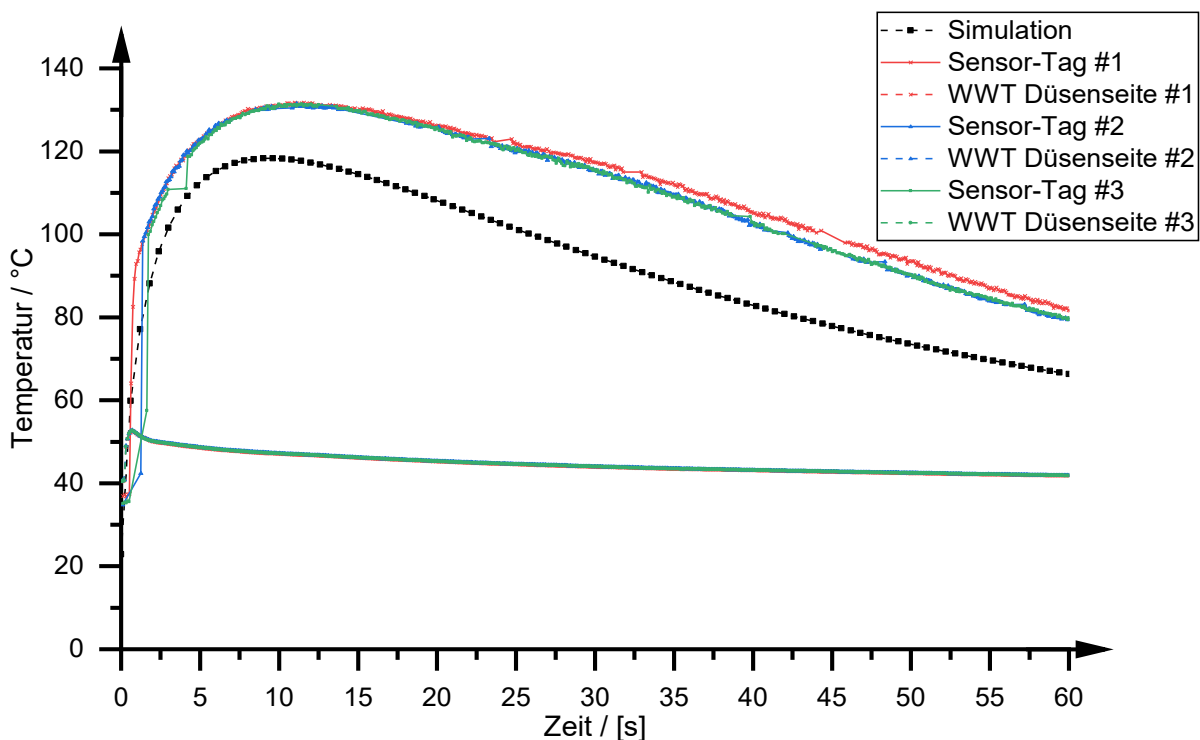


Abb. 12-18: Temperaturmessung bei der Umspritzung mit Polypropylen auf der Spritzgießmaschine vom Typ Arburg Allrounder 420 C. Verglichen wird die Spritzgießsimulation mit jeweils 3 Messungen mittels RFID-Tempersensor (Sensor-Tag) und Werkzeugwandtemperaturesensor (WWT).

Neben den unterschiedlichen Antriebskonzepten und der Maschinengröße an sich haben die verschiedenen Schmelzetemperaturen ihre hauptsächliche Ursache in den unterschiedlichen Plastifiziereinheiten der jeweiligen Maschinen. Generell wurde bei den Maschineneinstellungen auf Vergleichbarkeit geachtet, lediglich die Schneckendrehzahl und somit die Umfangsgeschwindigkeit wurde aufgrund des größeren Schneckendurchmessers und eines anderen Einzugsverhaltens bei der Arburg variiert. Der Durchmesser der Plastifizierschnecke ist an der Spritzgießmaschine vom Typ Allrounder 420 C mit 25 mm größer als an der Maschine vom Typ KM 50 EX (22 mm). Zudem weist die Allrounder eine deutlich größere verfahrenstechnisch wirksame Schneckenlänge (L/D -Verhältnis) und ein größeres Hubvolumen auf als die KM 50 EX (vgl. Tabelle 4). Dies bedeutet für die Allrounder eine Distanz³⁴ zwischen

³⁴ Auf den Durchmesser bezogene verfahrenstechnisch wirksame Schneckenlänge

Granulateinzug und Rückstromsperre von 600,0 mm im Gegensatz zu 398,2 mm bei der KM 50 EX. Diese konstruktiven Divergenzen resultieren zusammen mit möglichen weiteren Faktoren, wie einer unterschiedlichen Düsengeometrie, verschiedenen Schnecken geometrien und -drehzahlen, einer anders abgestimmten Zylinderheizung, verschiedenen Temperaturfühlerpositionen oder eventuellem Verschleiß (Rauigkeit) der Schnecke, in einem unterschiedlichem Plastifizierverhalten, d. h. einem größeren Energieeintrag und auch in einer längeren Verweilzeit der Schmelze in der größer dimensionierten Plastifiziereinheit der Allrounder.

Bei gleichem Schussvolumen V_T und Zykluszeit t_Z erhöht sich die Verweilzeit näherungsweise nach Formel 12-3 (Kulkarni, S., 2017, S. 213) und (Johannaber, F. *et al.*, 2004, S. 215) bei der Allrounder durch ein im Vergleich zur KM 50 EX größeres Schneckenkanalvolumen V_S um 331 s.

$$\text{Verweilzeit} = \left(0,8 \times \frac{V_S}{V_T}\right) \times t_Z \quad 12-3$$

mit: V_S : Schneckenkanalvolumen, V_T : Schussvolumen, t_Z : Zykluszeit

Auch die Literatur gibt Hinweise auf maschinen- und schneckenbedingte Einflüsse auf die Temperaturhomogenität wie auch auf die absolute Höhe und Toleranzen der gemessenen und an der Steuerung angezeigten Temperaturwerte (Johannaber, F. *et al.*, 2004, S. 960), (Liu, J., 2010). So kann nach Johannaber (Johannaber, F. *et al.*, 2004, S. 313/314) bzw. Bühring-Polaczek (Bühring-Polaczek, A. *et al.*, 2014, S. 712) je nach Typ der Maschine und der Schnecke bzw. der Dosierweglänge, die Massetemperatur Inhomogenitäten von axial $\pm 5-20$ °C und radial von $\pm 3-6$ °C aufweisen.

Um generell den Einfluss von Prozessparametern auf die im Werkzeug vorherrschende Schmelzetemperatur darzustellen und deren Nachweisbarkeit auch durch das vorgestellte Messsystem zu demonstrieren, wurde anhand der Plastifizierung an der Spritzgießmaschine vom Typ Arburg Allrounder 420 C ein vergleichender Versuch mit unterschiedlichen Plastifiziergeschwindigkeiten durchgeführt (siehe Abb. 12-19). Zum einen wurde die Schneckendrehzahl mit 150 U/min wie an der EX 50 gewählt, was an der 25 mm Schnecke der Allrounder einer Schneckenumfangsgeschwindigkeit von 196,4 mm/s entspricht. Zum anderen wurde vergleichend eine Drehzahl von 114 U/min gewählt, was eine Schneckenumfangsgeschwindigkeit von 150,0 mm/s ergibt. Als Temperaturmesssystem wird dabei der RFID-Sensor-Tag verwendet und mit dem etablierten, konventionellen Werkzeugwandtemperatursensor nahe am Werkzeuganschnitt verifiziert. Die gewählte Plastifiziergeschwindigkeit von 114 U/min ergab im Mittel eine maximale Temperatur am Sensor-Tag von 126,69 °C ($\pm 2,75$; $n = 6$) und eine maximale Werkzeugwandtemperatur (WWT) von 51,93 °C ($\pm 0,08$; $n = 6$). Bei einer erhöhten Schneckendrehzahl von 150 U/min stieg auch das mittels Sensor-Tag gemessene Temperaturmaximum auf 130,37 °C ($\pm 1,39$; $n = 6$) an, genauso wie das WWT-Temperaturmaximum auf 52,69 °C ($\pm 0,20$; $n = 6$). Das Delta von 3,68 °C in der maximalen Sensor-Tag-Temperatur zeigt eine deutlich differenzierte Messung im Gegensatz zu den Messungen mit dem konventionellen, in der Werkzeugwand verbauten Thermoelement mit einem Delta von 0,76 °C. Insgesamt erweist sich die Temperaturmessung in Verbindung mit verschiedenen Spritzgießmaschinen und auch bei erhöhtem Schmelzetemperaturniveau, abgesehen von einzelnen Aussetzern, als zuverlässig.

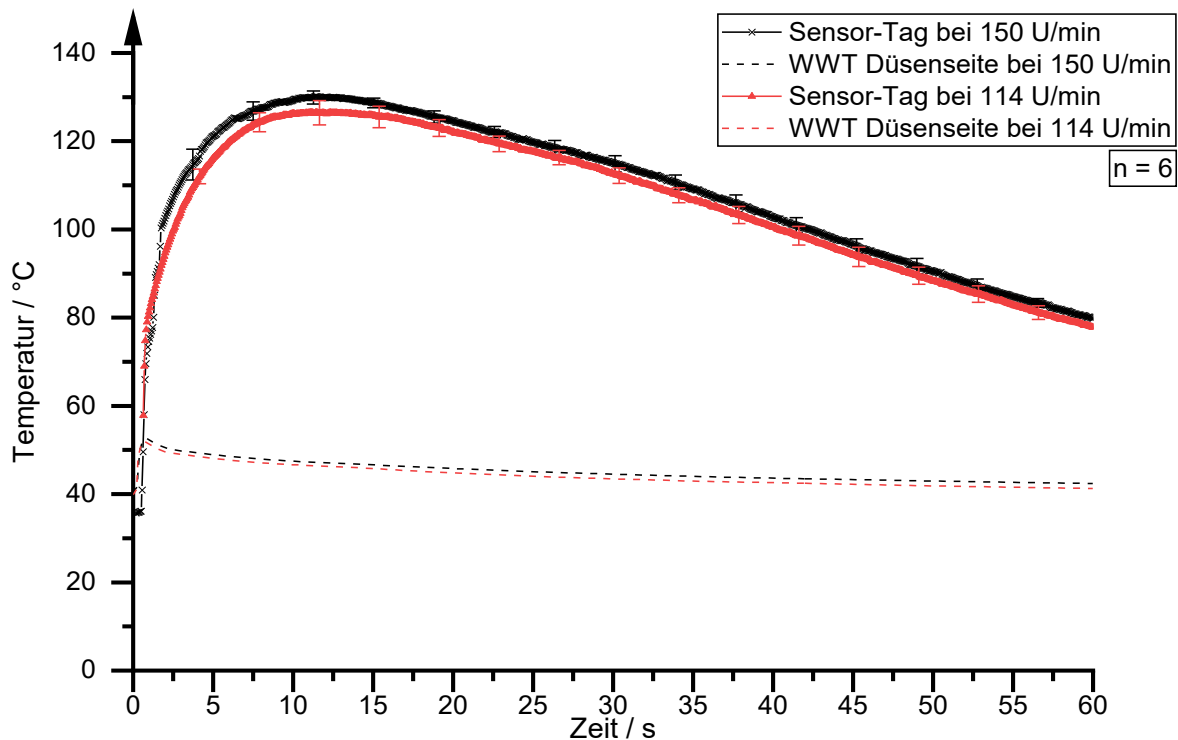


Abb. 12-19: Mittels Sensor-Tag gemessene Schmelzetemperaturen bei verschiedenen Schnecken-drehzahlen an der Spritzgießmaschine vom Typ Arburg Allrounder 420 C. Verglichen werden die gemittelten Messkurven bei einer Schneckendrehzahl von 114 U/min (entspricht 150,0 mm/s Umfangsgeschwindigkeit) mit den Messungen bei einer Drehzahl von 150 U/min (entspricht 196,4 mm/s Umfangsgeschwindigkeit).

Generell ist eine Wärmeaufnahme der Einlegeteile während der Füll- und Nachdruckphase mit einem Temperaturmaximum während der Nachdruckphase zu beobachten. Trotzdem wird das mittels Werkzeugwandtemperatursensorik gemessene Referenz-Temperaturmaximum ungefähr zum gleichen Zeitpunkt erreicht. Mit abkühlender Schmelze verlieren auch die Einlegeteile an Wärme. Dies geschieht im Bereich des Kontaktes mit dem vergleichsweise schlechter wärmeleitenden PEEK-Halter langsamer als im umgebenden Formteil, welches direkt mit der Werkzeugwand aus Aluminium in Kontakt steht (siehe Abb. 12-20). Dies zeigt auch die Auswertung der Spritzgießsimulation zwischen einem Knoten auf Höhe des IC-Sensors auf der Einlegeteiloberfläche (N3673), einem benachbarten Knoten im Kunststoffformteil (N34270) und einem Knoten (N8171) am Formteilrand, dargestellt in Tabelle 15 und Abb. 12-21. Beim Vergleich verschiedener Knoten an den Seiten sowie der Ober- und Unterseite wird deutlich, dass sich die maximal auftretenden Temperaturen beim Umspritzen in ihrem absoluten Wert nur gering unterscheiden (siehe Tabelle 15). An der in Strömungsrichtung liegenden Seite des Sensor-Tags (Knoten N131) tritt eine Temperatur von 118,10 °C auf, an der Position des IC-Sensors (Knoten N3673) tritt eine Temperatur von 118,32 °C auf. Die höchste simulativ bestimmte Temperatur ist an der Unterseite des Einlegeteils, d. h. in Formteilmittte (Knoten N362457) mit 118,41 °C zu beobachten. Die niedrigste Temperatur befindet sich auf der Einlegeteiloberseite (Düsenseite des Werkzeugs im Bereich des PEEK-Halters (Knoten N362164)) mit 117,86 °C. D. h. die simulierten maximal auftretenden Temperaturen am Sensor-Einlegeteil treten alle zum selben Zeitpunkt, 9,6 s nach Prozessbeginn, auf und weichen je nach Lage in der Polymerströmung um max. 0,55 °C ab.

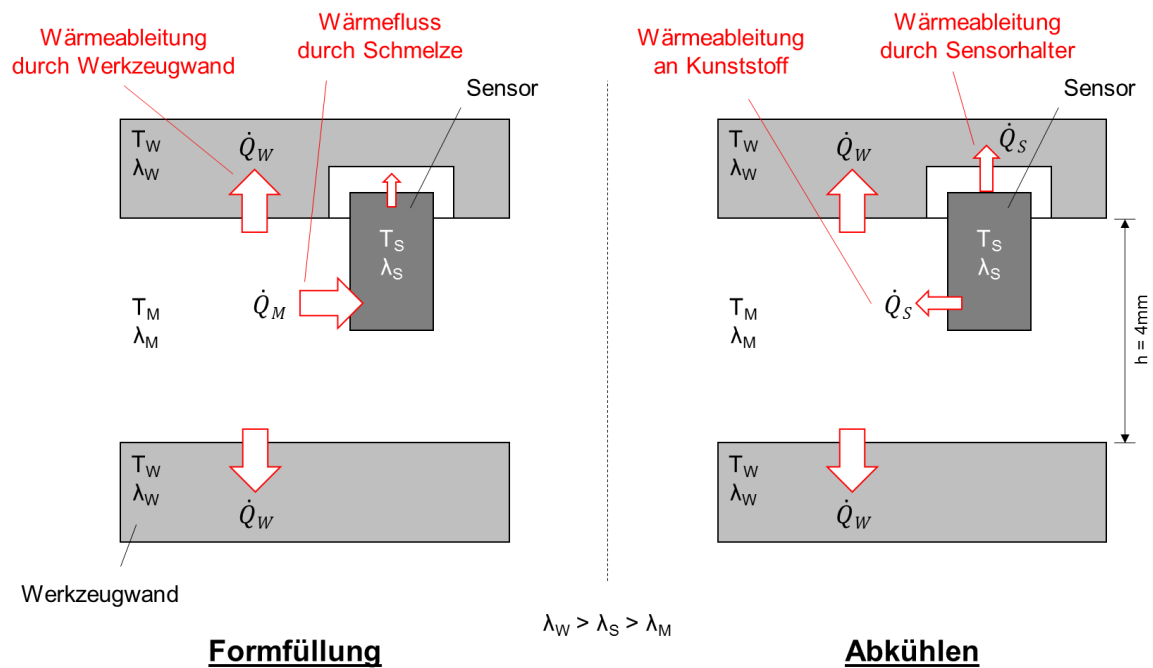


Abb. 12-20: Wärmefluss von der Kunststoffschmelze in den Einlegesensor (\dot{Q}_M) bzw. Wärmeableitung in die Werkzeugwand (\dot{Q}_W), in den Sensorhalter (\dot{Q}_S) oder in die abkühlende Formmasse (\dot{Q}_S) während der Formfüllung (links) und des Abkühlvorgangs (rechts) im Spritzgusswerkzeug.

Tabelle 15: Simulativer Vergleich verschiedener Positionen am RFID-Sensor-Tag während des Umspritzens mit Polypropylen und der dabei auftretenden Maximaltemperaturen.

Position am Sensor-Tag	Knoten	Temperaturmaximum / °C
Strömungszugewandte Seite	N131	118,10
Strömungsabgewandte Seite	N361958	118,15
Strömungsparallel seitlich	N3673	118,32
Strömungsparallel seitlich (Gegenseite)	N198	118,30
Einlegeteilmitte	N3801	118,17
Einlegeteilunterseite (Formteilmitte)	N362457	118,41
Einlegeteiloberseite (Formteilrand)	N362164	117,86

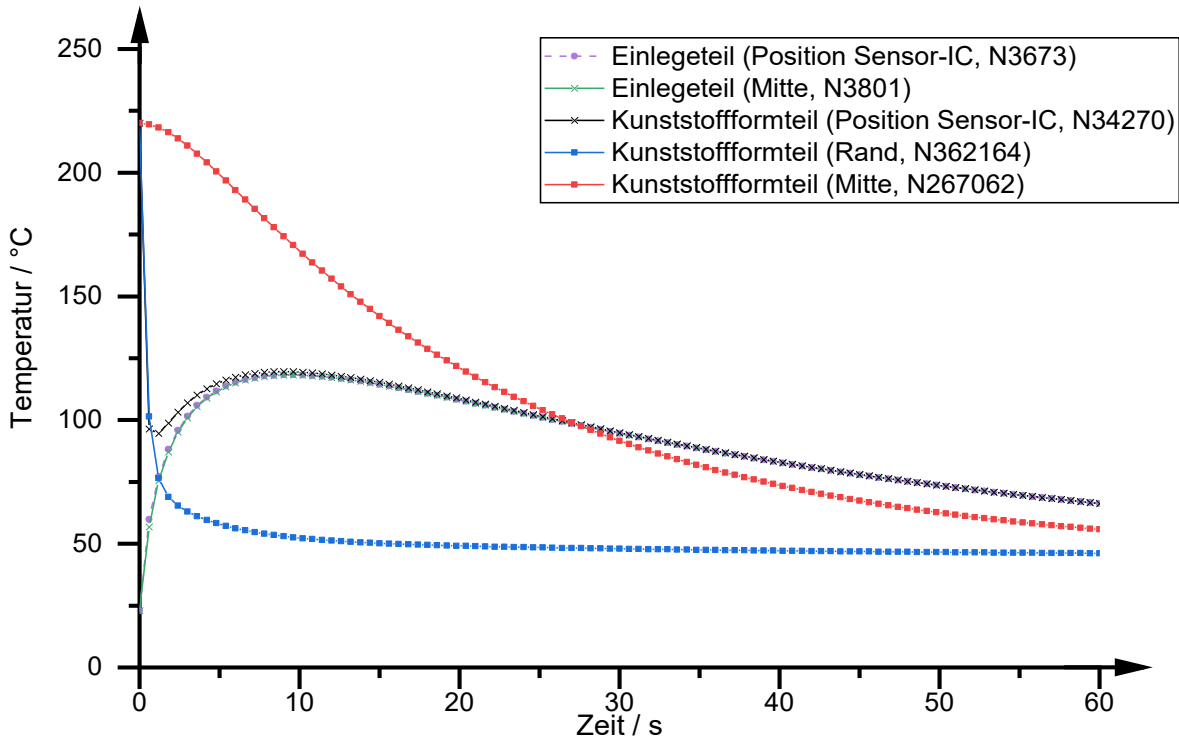


Abb. 12-21: Simulativ bestimmter Temperaturverlauf an verschiedenen Positionen im Kunststoffformteil und im Sensor-Einlegeteil.

Die im Versuch gemessenen Temperaturunterschiede der Schmelze zwischen beiden Maschinentypen lassen sich simulativ nicht abbilden. Da sich die Spritzgießsimulation hauptsächlich am für beide Maschinen gleich vorgegebenen Einspritzprofil orientiert und die Bauteilberechnung auch erst ab dem Anguss beginnt, unterscheidet sich das Temperaturmaximum der Simulationen am gleichen Bauteilknoten für die unterschiedlichen Maschinen nicht. Aufgrund der Berechnung genau eines Spritzgießzyklus spielen auch die real auftretenden Prozessschwankungen und auch die Verweilzeit in der Simulation keine Rolle. Die auch hier festgestellten Grenzen der Simulation bestätigen die in Kapitel 4 aufgeführte Literaturstellen, welche eine experimentelle Messung empfehlen, um die genauen Verhältnisse im Bauteil, v.a. hinsichtlich der Temperatur, beurteilen zu können.

Als Ausblick wurden zusätzlich Temperaturmessungen ($n = 3$) beim Umspritzen des Sensor-Tags mit Polybutylenterephthalat (PBT) an der Spritzgießmaschine vom Typ Arburg Allrounder 420 C durchgeführt (siehe Abb. 12-22). Die maximal gemessene Werkzeugwandtemperatur betrug $75,22\text{ °C}$ bei einem maximalen düsenseitigen Werkzeuginnendruck von $117,87\text{ bar}$. Die Spritzgießsimulation ergab für PBT an der Allrounder eine maximale Schmelzetemperatur am Einlegesensor von $127,24\text{ °C}$. Durch die im Vergleich zum Polypropylen heißere Massetemperatur der Schmelze von 260 °C war eine Temperaturaufzeichnung nur bis zum Zeitpunkt von $2,09\text{ s}$ ($\pm 0,46$; $n = 3$) nach Zyklusstart bis zu einer Temperatur von $131,54\text{ °C}$ ($\pm 2,84$; $n = 3$) möglich. Beim Abkühlen der Kunststoffschmelze unter die maximale Sensor-Einsatztemperatur von 150 °C konnte die Kommunikation mit dem Sensor-Tag ab einem Zeitpunkt von $31,89\text{ s}$ ($\pm 3,25$; $n = 3$) wiederaufgenommen werden, was eine fortgesetzte Temperaturmessung ab $134,01\text{ °C}$ ($\pm 1,85$; $n = 3$) erlaubte. Somit kann auch eine Temperaturmessung extern des Spritzgusswerkzeuges fortgeführt werden. Da die Messung des on-Chip RSSI für PBT teilweise niedrigere Werte als die minimal geforderten 13 ergab (siehe

Abschnitt 12.1.2) kann die Temperaturmessung für PBT nur als Ausblick dienen und müssen hinsichtlich ihrer Genauigkeit weiter untersucht werden. Für eine Temperaturmessung größer 150 °C müsste zudem der Sensor-Transponder optimiert werden.

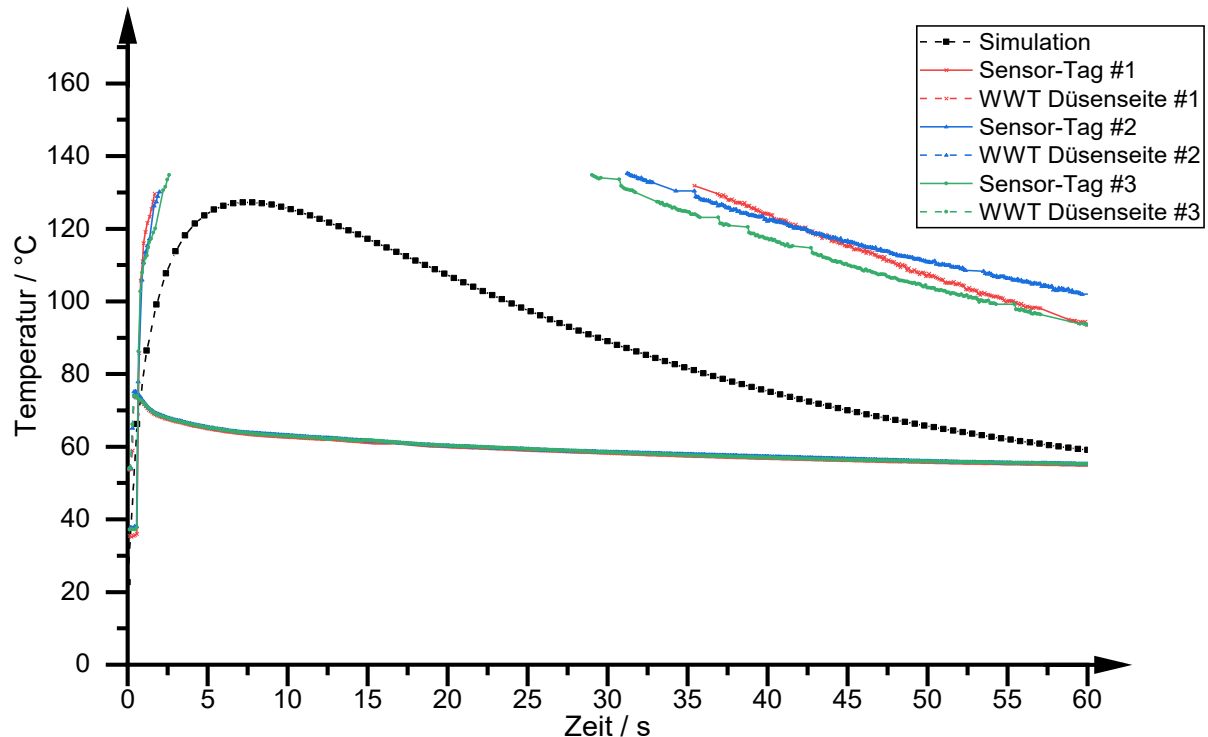


Abb. 12-22: Temperaturmessung beim Umspritzen des Sensor-Tag mit PBT an der Spritzgießmaschine vom Typ Arburg Allrounder 420 C.

12.1.3.3. Temperaturmessung nach dem Spritzgießprozess

Zusätzlich zur drahtlosen Temperaturmessung während des Spritzgießprozesses ist auch die Möglichkeit einer weiteren Überwachung des Bauteils nach der Entformung vorteilhaft (siehe auch Abschnitt 3.3). Zum Nachweis wurden mehrere Sensor-Einlegeteile ($n = 5$) umspritzt und die Temperatur während und nach der Verarbeitung aufgezeichnet bis das Bauteil Umgebungstemperatur erreicht hatte (siehe Abb. 12-23 und Abb. 12-24). Dabei wird das Kunststoffformteil mit einer Temperatur von $80,32 \text{ °C}$ ($\pm 1,13$; $n = 5$) nach 60 s entformt. Lediglich zur, hier am Prototypenwerkzeug notwendigen, manuellen Entformung der Bauteile und zur Umschaltung zwischen der intern im Werkzeug verbauten Antenne und der externen Antenne musste die Messung für eine Zeitspanne von ca. 30-40 s unterbrochen werden. Die Messung über die externe RFID-Antenne startet bei einer Temperatur im Formteil von $59,51 \text{ °C}$ ($\pm 2,16$; $n = 5$), nähert sich mit zunehmender Abkühlung der Umgebungstemperatur an und erreicht diese bei den vorherrschenden Bedingungen spätestens nach ca. 1200 s. Die bei jedem Messzyklus aufgezeichnete Umgebungstemperatur ist dabei im Mittelwert dargestellt und beträgt $23,88 \text{ °C}$ ($\pm 0,47$; $n = 5$). Somit wird ersichtlich, dass nicht nur während des Spritzgießzyklus eine Aufzeichnung der Schmelzetemperatur möglich ist, sondern auch nach der Entformung die Bauteiltemperatur weiterhin drahtlos überwacht werden kann. Die Messunterbrechung bei der Entformung könnte durch eine automatisierte Entnahme mit einem Handling-System und einer daran befestigten RFID-Antenne verhindert werden.

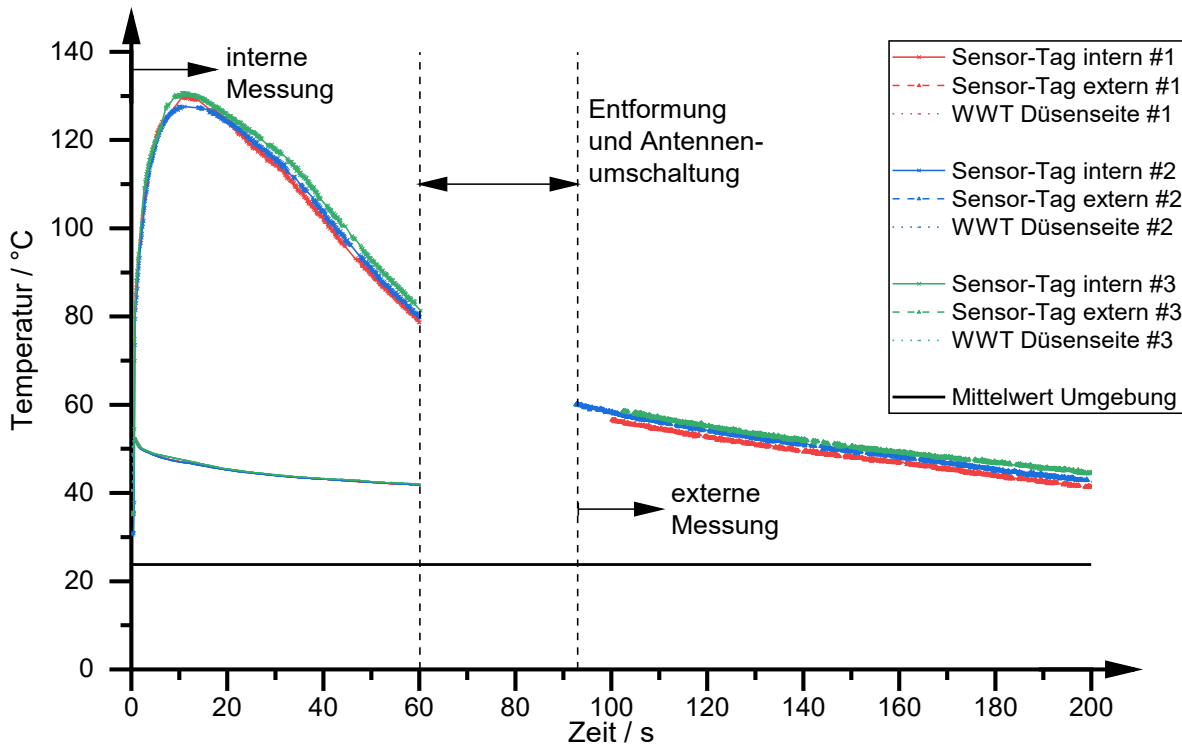


Abb. 12-23: Detailansicht der ersten 200 s nach dem Beginn des Spritzgießzyklus und der drahtlosen Temperaturmessung mittels Sensor-Tag. Zusätzlich zur Umgebungstemperatur wird während des Spritzgießzyklus die Werkzeugwandtemperatur (WWT) aufgezeichnet. Durch die manuelle Entformung und das Umschalten von der im Werkzeug verbauten internen auf die externe RFID-Antenne entsteht eine Messlücke von ca. 30-40 s.

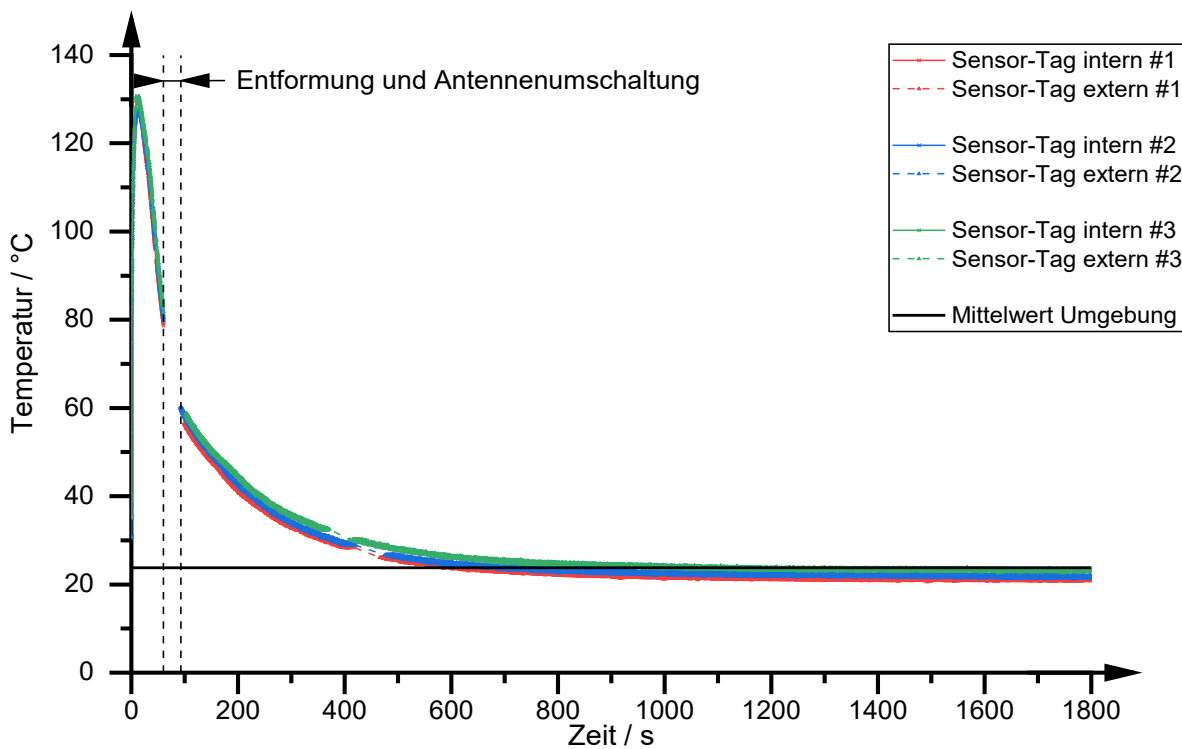


Abb. 12-24: Drahtlose Temperaturmessung mittels RFID-Sensor-Tag während und nach der Umspritzung mit Polypropylen an der Spritzgießmaschine vom Typ Arburg Allrounder 420 C.

Im Vergleich ergibt die thermografische Messung der Bauteiloberflächentemperatur mittels Infrarotbildkamera direkt nach der Entformung im und außerhalb des Werkzeugs (siehe Abb. 12-25) eine Temperatur im Bereich des Sensor-Tags von ca. 60 °C an der Formteiloberfläche bei einer Umgebungstemperatur von 25 °C. Dies ordnet die oben erwähnten Temperaturmessungen mittels Sensor-Tag zusätzlich ein und zeigt die Größenordnung der Abkühlung des Sensor-Tags auf ca. 60 °C auch im Bauteilinneren nach der Entformung und Antennenumschaltung als realistisch.

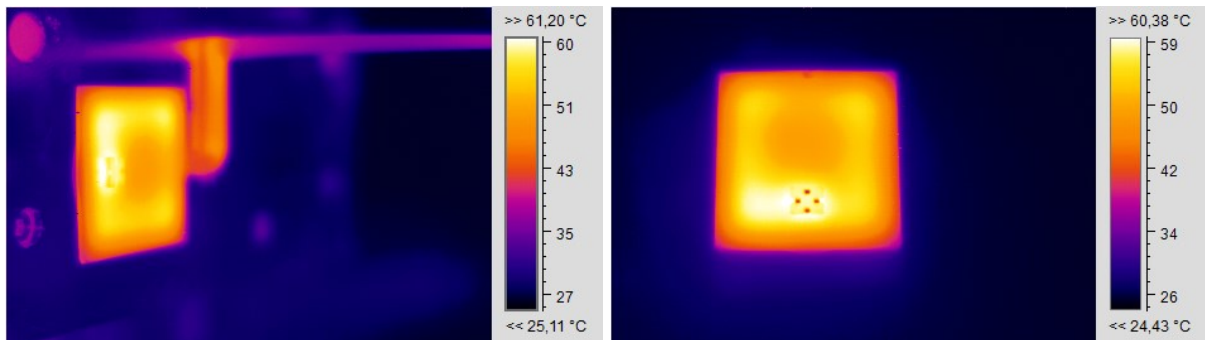


Abb. 12-25: Thermografische Messung der Oberflächentemperatur des Polypropylen-Formteiles nach der Entformung im (links) und außerhalb (rechts) des Werkzeuges.

Wie bereits im Stand der Technik und Forschung erwähnt, wird die invasive Messung der Schmelzetemperatur teilweise als kritisch betrachtet. Scherungsbedingte Einflüsse bei der Kontaktmessung der Schmelzetemperatur werden von Nicolazo et al. (Nicolazo, C. *et al.*, 2010), Hopmann et al. (Hopmann, C. *et al.*, 2017d) und Launey et al. (Launay, J. *et al.*, 2014) erwähnt. Nichtsdestotrotz ist die modellbasierte Beschreibung des Temperaturfeldes in der Kavität bisher schwierig und somit eine messtechnische Erfassung gefordert (Praher, B. *et al.*, 2014), (Gordon, G. *et al.*, 2015), (Hopmann, C. *et al.*, 2017c). Zudem zeigen sich nicht-invasive Messverfahren, wie in Kapitel 4 dargestellt, bisher noch nicht als ausgereift bzw. bringen wesentliche Nachteile mit.

Zusammenfassend konnte mit dem hier untersuchten Lösungsansatz bei allen 20 untersuchten Sensor-Transpondern, abgesehen von unwesentlichen Kommunikationsaussetzern, eine durchgehende drahtlose Temperaturmessung während der Spritzgießverarbeitung im Bauteilinneren realisiert werden. Dabei weisen alle ausgewerteten Temperaturkurven eine annähernd gleiche Kurvenform und Steigung auf. Die Standardabweichung in der gemessenen Maximaltemperatur schwankt je nach Maschinentyp und Einstellung zwischen 0,23-2,75 °C. Durch Einsatz von verschiedenen Spritzgießmaschinen und der Variation von Maschinenparametern, hier der Schneckendrehzahl während der Plastifizierung, kann auch die Fähigkeit des Messsystems zur Erfassung von Schwankungen der Schmelzetemperatur im Bauteilinneren und somit von äußeren Einflüssen auf den Formteilbildungsprozess im Spritzgusswerkzeug nachgewiesen werden. Eine Optimierung des Sensor-IC ist zur durchgehenden Temperaturmessung über 150 °C, abhängig von der Positionierung im Kunststoffformteil, vor allem beim Einsatz technischer Kunststoffe (z. B. PBT) mit hoher Schmelzetemperatur notwendig. Hinsichtlich einer kombinierten und bauteilintegrierten Messung auch nach dem Spritzgießprozess, bietet das hier vorgestellte System zusätzliche Vorteile. Bis auf die Unterbrechung der Kommunikation während der Entformung kann die Temperaturüberwachung der Bauteillagerung und Verwendung auch anschließend an die Spritzgießverarbeitung kontinuierlich fortgesetzt werden.

Beim hier entwickelten Messverfahren wurde, wie in der VDI/VDE Richtlinie 3511 „Technische Temperaturmessungen“ (VDI/VDE 3511, 1996, S. 19) gefordert, der Temperaturmess-

fehler durch Wärmeaustausch zwischen Sensor und Umgebung, d. h. dem umgebenden Werkzeugmaterial, durch die Isolation des RFID-Sensor-Tags mittels PEEK-Einsatzes so gering wie möglich gehalten. Der Fehler durch Wärmeableitung könnte z. B. durch Verwendung eines geeigneten Keramik-Materials weiter verringert werden. Zusätzlich wurde durch die hier gewählte Position des Sensor-Tags im Spritzgusswerkzeug der Wärmeaustausch zwischen Schmelze und Temperaturfühler begünstigt. Durch die ständig nachströmende heiße Schmelze ist auch der Fehler durch Temperaturengleich zwischen dem Sensor und der Formmasse vernachlässigbar. Anhand der Spritzgießsimulation konnte gezeigt werden, dass das Temperaturprofil um den eingelegten Sensor-Tag annähernd gleich ist und somit die Ausrichtung des Sensors zu vernachlässigen ist.

12.1.4. Regelung des Spritzgießprozesses

Wie bereits in Abschnitt 8.2 „Prozessregelung“ vorgestellt, dient die zum Regelkreis erweiterte drahtlose Temperaturmessung zur Kontrolle des Abkühlprozesses. Aus der simulativen Analyse des vorliegenden Spritzgießprozesses in Abb. 12-26 wird deutlich, dass bei Prozessschwankungen, z. B. der Schmelzetemperatur, auch die Temperatur im Formteil und somit auch die Abkühlung des Kunststoffes variieren kann. Um eine gleichbleibende Entformungstemperatur des Bauteiles zu garantieren ist eine individuelle Anpassung der Restkühlzeit, d. h. des Entformungszeitpunktes, sinnvoll. In diesem Abschnitt wird diese Fähigkeit des Systems zur laufenden Anpassung der Kühlzeit an 12 Messungen analysiert, um eine bauteil- und kunststoffspezifische Entformungstemperatur für das Bauteil garantieren zu können und somit dessen Qualität sicherzustellen.

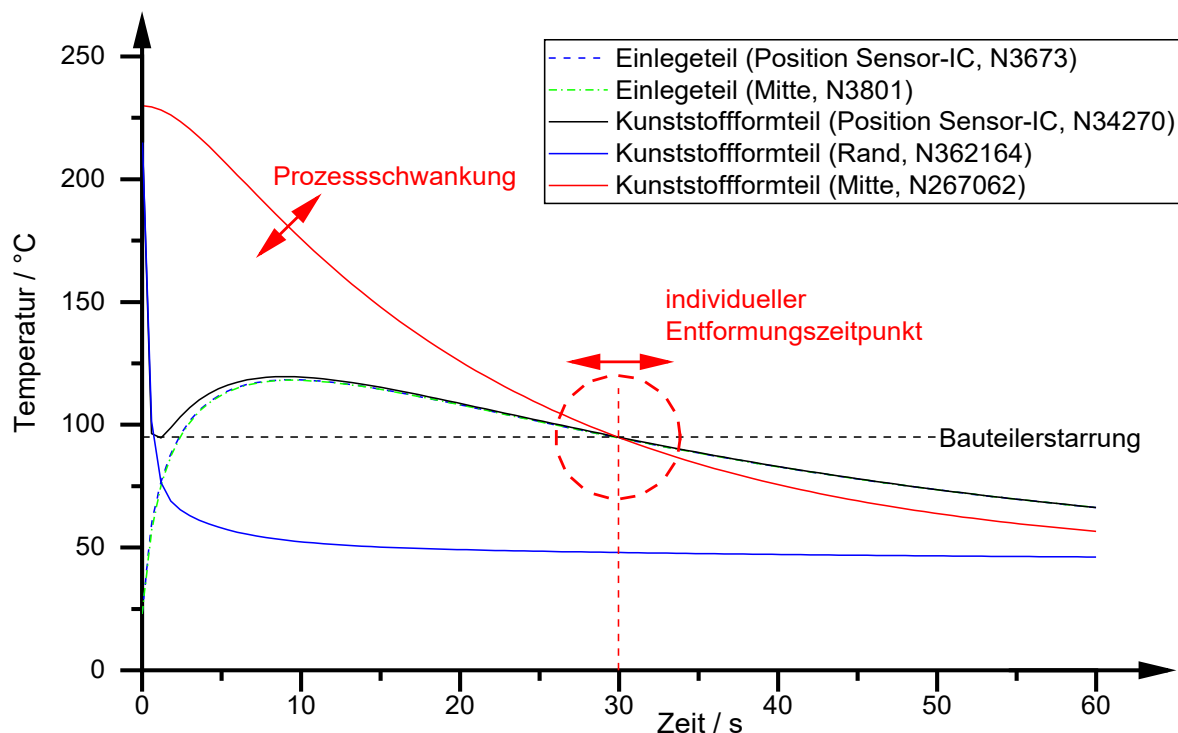


Abb. 12-26: Simulative Bestimmung des Temperaturverlaufs am Bauteilrand, im Bauteilinneren und am Sensor-Einlegeteil. Durch Prozessschwankungen mit Auswirkung auf die Schmelzetemperatur kann z. B. die Temperatur im Formteil abweichen, was eine Anpassung der Kühlzeit bzw. des Entformungszeitpunktes (rot gestrichelte Linie) für eine gleichbleibende Entformungstemperatur (schwarz gestrichelte Linie) sinnvoll macht.

12.1.4.1. Entformungstemperatur

Um die genaue Entformungs- bzw. Erstarrungstemperatur für das hier verwendete Polypropylen-Polyethylen Block-Copolymer zu ermitteln, wurde eine Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC, siehe Abschnitt 11.6) durchgeführt. Wie aus der DSC-Analyse in Abb. 12-27 ersichtlich, ist sowohl im ersten als auch im zweiten Aufheizzyklus ein positiver Wärmestrom des Polyethylen-Anteils bei ca. 120 °C und danach des Polypropylens bei ca. 160 °C zu erkennen. Während des Abkühlens sind negative Wärmeströme des PP-Blocks bei ca. 120 °C und des Polyethylen-Blocks bei ca. 100 °C sichtbar, welche Rückschlüsse auf eine einsetzende Kristallisation bzw. Erstarrung ermöglichen. Einen weiteren Hinweis auf eine ausreichende Bauteilerstarrung gibt die Literatur mit einer maximalen langfristigen Gebrauchstemperatur von PP bei ca. 100 °C (Baur, E. *et al.*, 2007, S. 473).

Für die Untersuchung der Kühlzeitregelung wurden dem System je nach verwendeter Spritzgießmaschine und entsprechenden Prozesseinstellungen eine Entformungstemperatur von 85 °C bzw. von 95 °C vorgegeben (siehe Abb. 12-28 und Abb. 12-29).

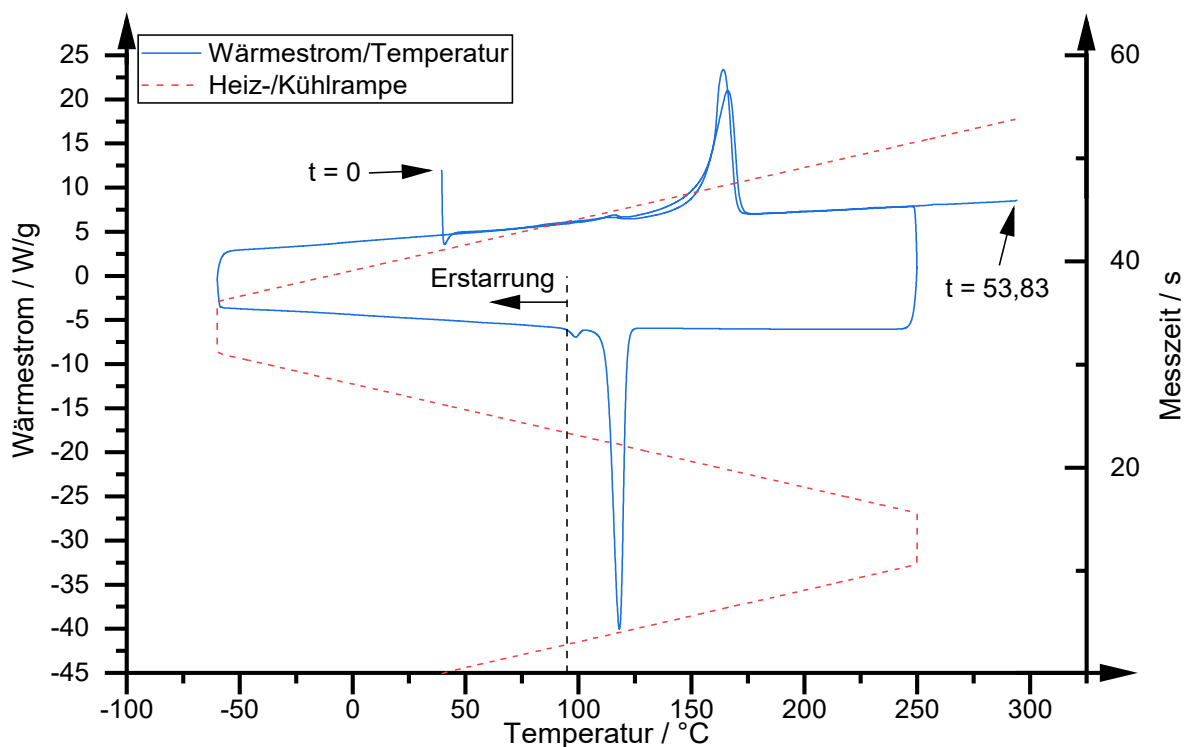


Abb. 12-27: Dynamische Differenz-Thermoanalyse zur Ermittlung der Erstarrungstemperatur des verwendeten Polypropylen-Polyethylen Block-Copolymers. Die Messrampe verlief im Modus Heizen-Kühlen-Heizen.

12.1.4.2. Kühlzeitregelung

Die Anpassung der Kühlzeit bzw. des Entformungszeitpunktes wurde an der Maschine vom Typ KM 50 EX bei einer Werkzeugtemperatur von 35 °C und einer Massetemperatur von 210 °C sowie bei einer Werkzeugtemperatur von 45 °C und einer Massetemperatur von 230 °C analysiert (siehe Abb. 12-28). Die Entformungstemperatur ist mit 85 °C vorgegeben. Diese gesetzte Grenze konnte bei allen Versuchen erreicht werden, wobei die letzte gemessene Temperatur vor der Entformung für die Parameterkombination 35/210 °C im Mittel 84,67 °C ($\pm 0,24$; $n = 3$) und für die Temperaturen 45/230 °C im Mittel 84,57 °C ($\pm 0,17$; $n = 3$) betrug. Bei Unterschreiten der am Sensor-Tag gemessenen Temperatur unter die voreingestellte Entformungstemperatur wurde, wie in Kapitel 8.2 beschrieben, das Signal zur Entformung an die Spritzgießmaschine ausgegeben. Dies führte zu einer Werkzeugöffnung nach 41,55 s ($\pm 1,07$; $n = 3$) bei 210 °C Massetemperatur und für eine Massetemperatur von 230 °C zu einer entsprechenden Entformungszeit von 61,53 s ($\pm 2,72$; $n = 3$).

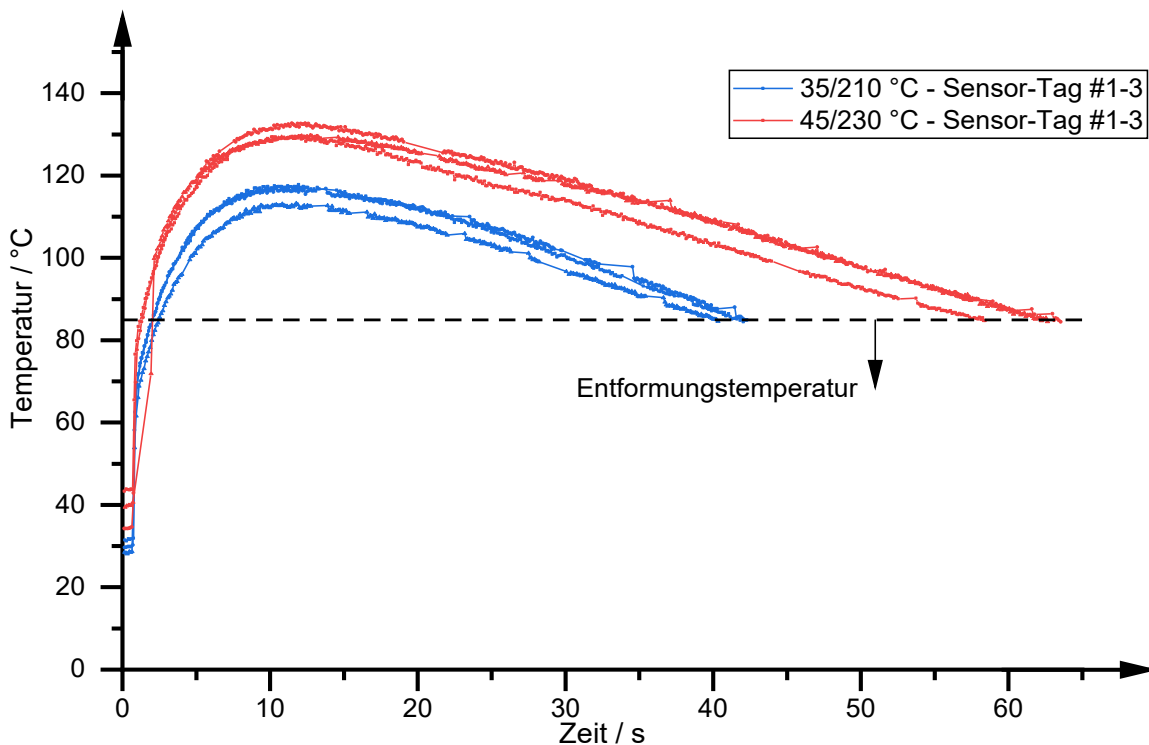


Abb. 12-28: Regelung der Kühlzeit bzw. Anpassung des Entformungszeitpunktes durch Temperaturmessung mit dem eingelegten RFID-Sensor-Transponder und Abgleich mit der vorgegebenen Entformungstemperatur von 85 °C. Die Werkzeugtemperatur betrug 35 bzw. 45 °C, die Massetemperatur 210 bzw. 230 °C an der Spritzgießmaschine vom Typ KM 50 EX.

Bei der Regelung mit verschiedenen an der Maschine eingestellten Massetemperaturen, d. h. 210 °C und 220 °C, bei gleichbleibender Werkzeugtemperatur von 35 °C an der Spritzgießmaschine vom Typ Arburg Allrounder 420 C kann ebenfalls eine individuelle Anpassung der Kühlzeit an die jeweilige Schmelzetemperatur beobachtet werden (siehe Abb. 12-29). Mit einer Schmelzetemperatur von 210 °C betrug die letzte gemessene Temperatur vor der Entformung 95,02 °C ($\pm 0,26$; $n = 3$) nach 40,73 s ($\pm 0,56$; $n = 3$). Bei einer Massetemperatur von 220 °C ergab sich eine Temperatur vor der Entformung von 93,61 °C ($\pm 0,90$; $n = 3$) bei einem

Entformungszeitpunkt von 58,00 s ($\pm 1,30$; $n = 3$). Somit ist ersichtlich, dass die vorgeschlagene Regelung auch auf eine Änderung der Schmelzetemperatur flexibel reagieren kann und die Kühlzeit bzw. den Entformungszeitpunkt individuell angleicht, um eine gleichbleibende Entformungstemperatur und somit eine komplette Erstarrung des Bauteils zu garantieren.

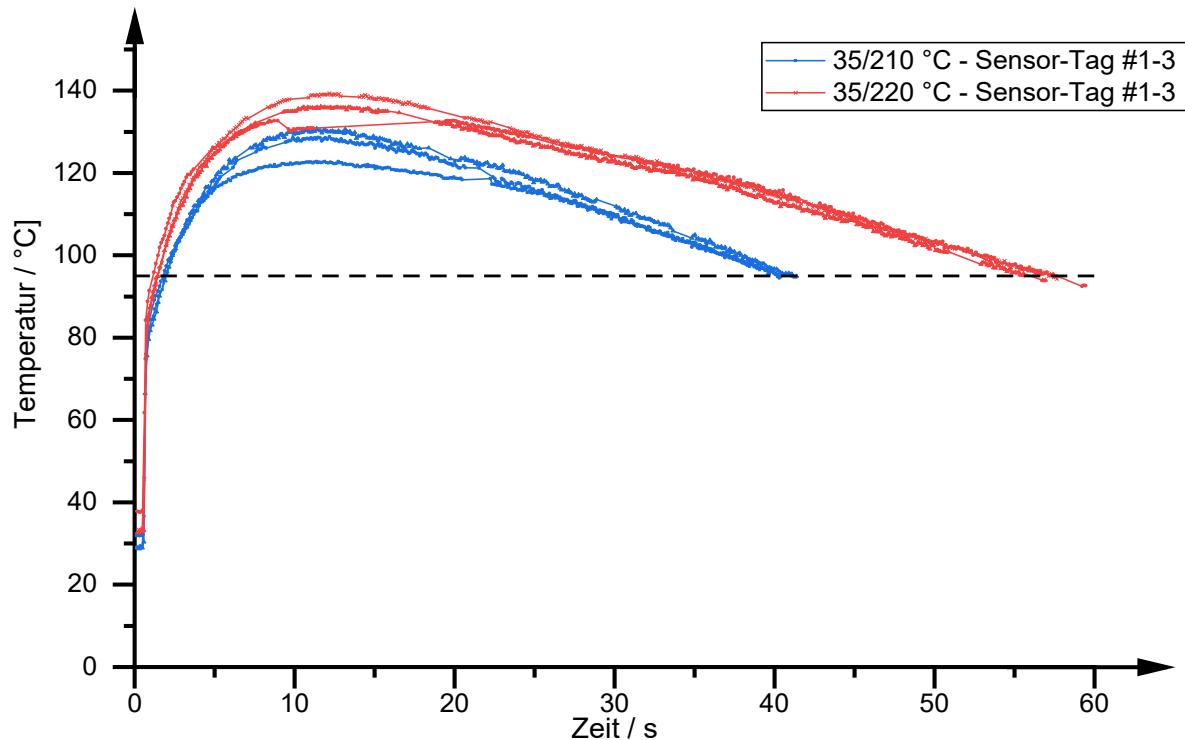


Abb. 12-29: Vergleich der Kühlzeitregelung bei verschiedenen Massetemperaturen (210 °C bzw. 220 °C) an der Spritzgießmaschine vom Typ Arburg Allrounder 420 C. Die Entformungstemperatur wurde vorgegeben bei 95 °C, die Werkzeugtemperatur betrug konstant 35 °C.

Insgesamt wurde in allen 12 durchgeführten Versuchen zur Regelung des Spritzgießprozesses mit dem beschriebenen System der Spritzgießzyklus bei der gewünschten Entformungstemperatur mit einer Schwankung von 0,17-0,90 °C beendet. Der Entformungszeitpunkt schwankte dabei von 0,56 s bis maximal 2,72 s. Trotz der geringen Abmaße des RFID-Sensor-Einlegeteils ist allerdings dessen Wärmekapazität zu beachten, welche zu einer Verzögerung der Entformung führen kann. Dies wird durch die Spritzgießsimulation bestätigt, die zeigt, dass die Temperatur am Einlegeteil nach Erstarrung langsamer sinkt als im umgebenden Kunststoffformteil.

Auf eine Regelung beim Umspritzen mit Polybutylenterephthalat (PBT) wurde aufgrund der Kommunikationsunterbrechung und der dadurch nicht durchgängigen Temperaturerfassung verzichtet.

Als Fazit kann abgeleitet werden, dass eine bauteilspezifische Prozessregelung mittels des verwendeten RFID-Sensor-Transponders möglich ist. Somit kann die Kühlzeit so lange wie nötig individuell geregelt werden, um einerseits die Zeit bis zur Entformung so kurz wie möglich und somit den Prozess am wirtschaftlichen Optimum zu halten und andererseits eine Entformung des Kunststoffbauteiles erst bei kompletter Erstarrung und ausreichender Stabilität durchzuführen.

12.2. Bauteilverifikation

Neben der mittels Messung mit dem konventionellen Prozessüberwachungssystem erkennbaren Belastungen des Spritzgießprozesses auf den Sensor-Transponder (siehe Abschnitt 12.1), sind auch Einflüsse des Sensor-Einlegeteils auf das Spritzgussbauteil zu bewerten. Dies umfasst Auswirkungen auf die Bauteilmaßhaltigkeit und die Bauteilstabilität durch Umspritzen des Sensor-Einlegeteiles.

12.2.1. Auswirkungen auf die Bauteilmaßhaltigkeit

Wie in Abschnitt 2.3 erläutert, spielt die Schwindung, d. h. die Volumenkontraktion, der erstarrten Kunststoffformmasse eine wichtige Rolle für das spätere Bauteilmaß. Die Integration von Einlegeteilen in das Kunststoffbauteil stellt dabei aufgrund einer möglichen induzierten Schwindungsbehinderung zusätzliche Herausforderungen hinsichtlich der Einschätzung der Bauteilmaßhaltigkeit. Aus diesem Grund wurden jeweils 15 Bauteile mit und ohne RFID-Sensor-Einlegeteil aus den beiden Werkstoffen Polypropylen und Polybutylenterephthalat gefertigt und nach Norm vermessen (siehe Kapitel 11.4).

Das Einlegeteil beeinflusst die Außenmaße des Polypropylen-Bauteils sowohl parallel als auch quer zur Fließrichtung im Vergleich zu einem Referenzbauteil ohne RFID-Sensor-Tag (siehe Abb. 12-30). In paralleler Messrichtung zeigt sich ein sehr signifikanter ($p < 0,01$) Unterschied zwischen den Bauteilmaßen mit und ohne Einlegeteil. Dies resultiert in einer auf das Kavitätsmaß bezogenen Schwindung der Referenzbauteile von 2,11 % ($\pm 0,01$; $n = 15$) und mit Einlegeteil von 2,13 % ($\pm 0,01$; $n = 15$). Eine höchst signifikante ($p < 0,001$) Blockierung der Schwindung, d. h. ein größeres Bauteilmaß mit Einlegeteil, ist quer zur Strömungsrichtung am Bauteil festzustellen. Die Schwindung verringert sich somit quer von 2,41 % ($\pm 0,01$; $n = 15$) am Referenzteil zu 2,32 % ($\pm 0,01$; $n = 15$) mit Einlegeteil.

Im Gegensatz dazu wirkt sich das Einbringen des RFID-Sensor-Einlegeteiles in das Testbauteil aus Polybutylenterephthalat nicht signifikant auf die Bauteilaußenmaße aus (siehe Abb. 12-31). Die Schwindung in paralleler Messrichtung unterscheidet sich mit 2,13 % ($\pm 0,07$; $n = 15$) ohne Einlegeteil nicht signifikant von den ermittelten 2,15 % ($\pm 0,04$; $n = 15$) mit umspritztem Sensor. Quer zur Fließrichtung macht sich ebenfalls kein signifikanter Unterschied zwischen der Referenz mit 2,33 % ($\pm 0,05$; $n = 15$) und dem Einlegeteil mit 2,31 % ($\pm 0,03$; $n = 15$) bemerkbar.

Die Literatur (Steinko, W. *et al.*, 2008, S. 420/421) bestätigt ebenfalls einen Einfluss von Einlegeteilen auf die Schwindung und gibt an, dass eine Blockierung der Schwindung in einer Richtung die Schwindung in der nicht-blockierten Bauteilrichtung entsprechend größer werden lässt. Nach Steinko ist dies bedingt durch die gleichbleibende gesamte Volumenkontraktion des Bauteiles und hat dementsprechend Auswirkungen auf die Vorhersagegenauigkeit der Bauteilmaße (Steinko, W. *et al.*, 2008, S. 420/421).

In weiteren Untersuchungen von lokalen Schwindungsunterschieden in Bezug auf eine unterschiedliche Einlegeteilgeometrie und -position entlang des Fließweges und somit der Beurteilung der erreichbaren Bauteilmaßhaltigkeit konnten diese Ergebnisse bestätigt und ebenfalls ein signifikanter Einfluss des Einlegeteils auf die Schwindung im Kunststoffbauteil festgestellt werden (Zeppenfeld, M. *et al.*, 2017d). Die Schwindung wird dabei sowohl durch die Form als auch durch die Position des Einlegeteils im Formteil beeinflusst. Eine stärkere Blockierung der Schwindung tritt demnach mit wachsendem Abstand zum Anspritzpunkt auf. Im Vergleich zu runden Einlegeteilen haben Einlegeteile mit einer quadratischen Form einen

größeren Einfluss auf die Schwindung und auf das Bauteilmaß. Somit sollte ein erhöhter Aufwand zur Einschätzung der Schwindungsblockierung durch Einlegeteile bei einer Positionierung nahe am Bauteilrand und bei eckiger Geometrie erfolgen. Entscheidend dabei sind auch das Größenverhältnis von Einlegeteil zum umgebenden Kunststoffformteil und der verwendete Kunststoff. Durch eine asymmetrische Wahl der Einlegeteilposition, d. h. unterschiedlich starke Materialanhäufungen um das Einlegeteil, kann auch eine zusätzliche schwindungsinduzierte thermo-mechanische Belastung auf das Einlegeteil beobachtet werden. Dies und der eventuelle Einfluss auf die Mediendichtigkeit zwischen Kunststoff und Einlegeteil wird auch in der Literatur diskutiert (Heinle, C. *et al.*, 2010), (Heinle, M. *et al.*, 2015), (Frey, P. *et al.*, 2015b).

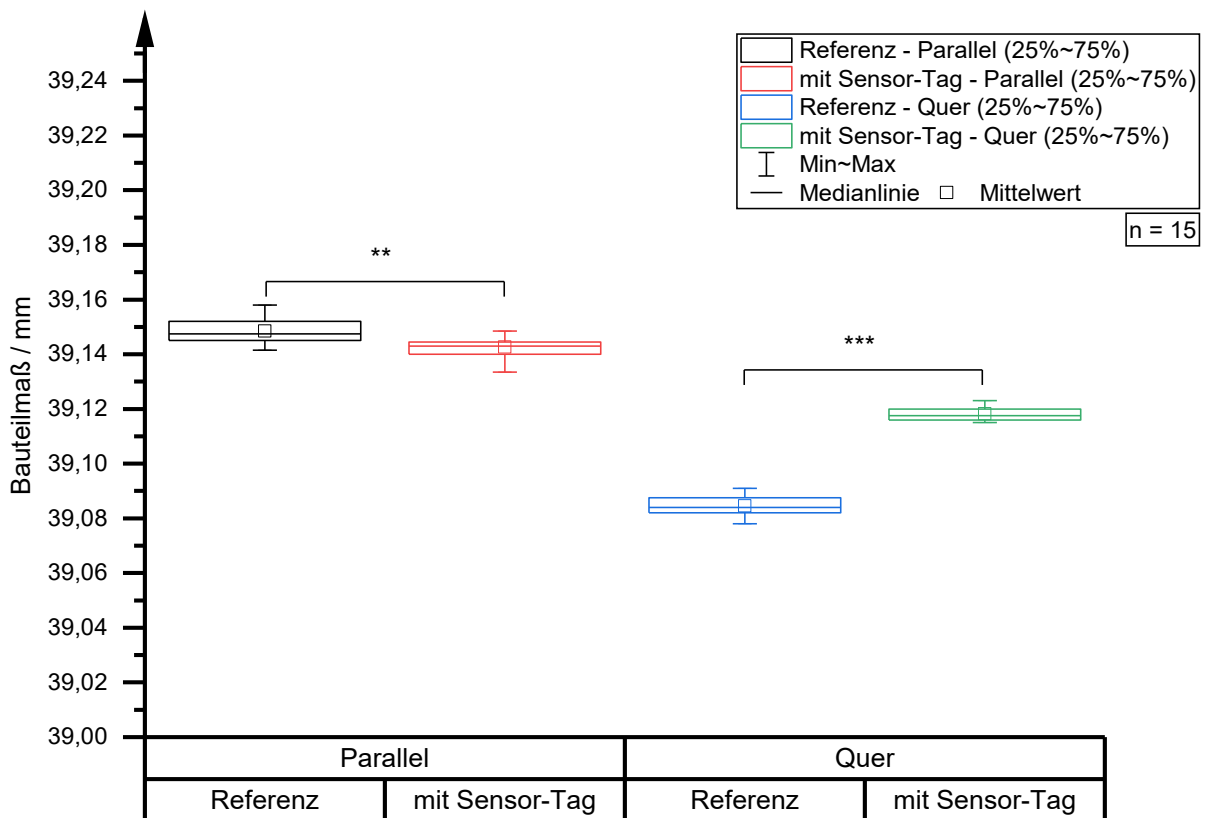


Abb. 12-30: Vergleich der Bauteilaußenmaße parallel und quer zur Fließrichtung der Polypropylen-Schmelze zwischen einem Referenzbauteil und einem Bauteil mit Sensor-Einlegeteil (jeweils n = 15).

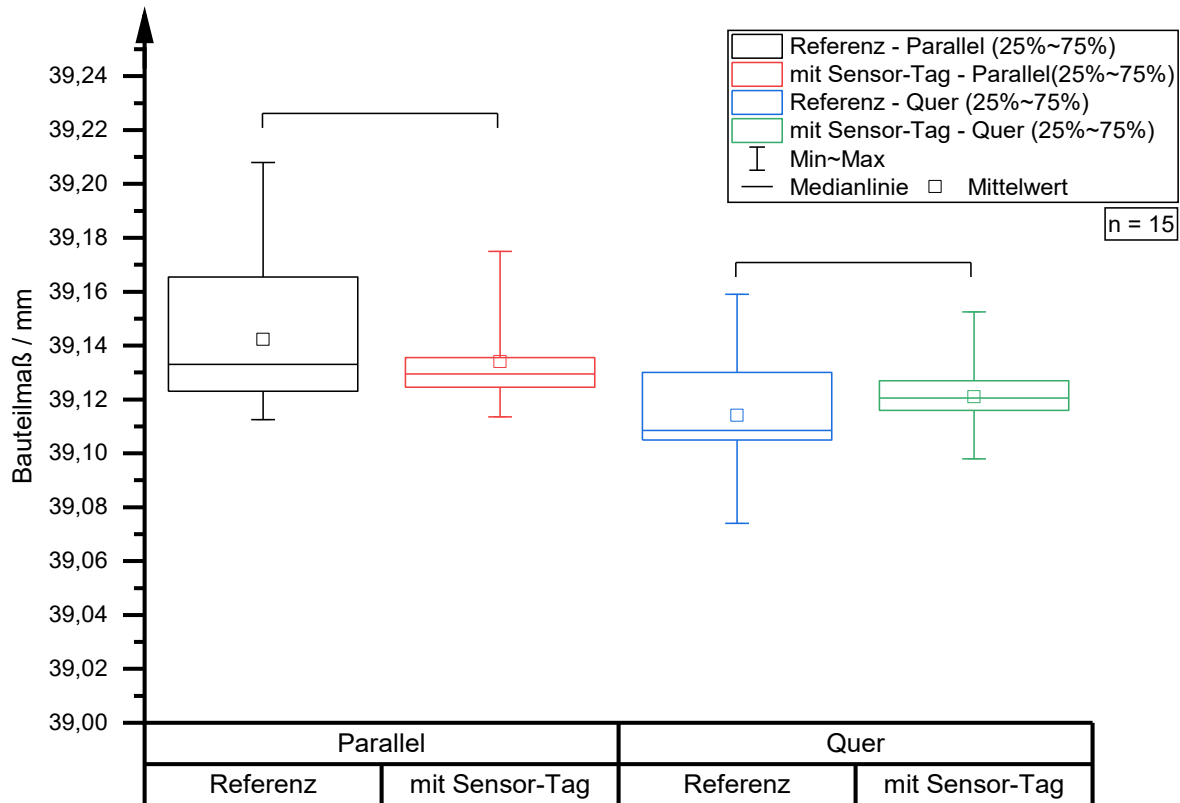


Abb. 12-31: Vergleich der Maße parallel und quer zur Fließrichtung an einem Bauteil aus Polybutylenterephthalat ohne (Referenz) und mit Sensor-Einlegeteil (jeweils $n = 15$).

12.2.2. Auswirkungen auf die Bauteilstabilität

Um die Auswirkungen eines umspritzten Einlegeteiles auf die Stabilität des Kunststoffbauteiles zu beurteilen, wurden, wie in Abschnitt 11.5 vorgestellt, je 10 Probekörper als Referenz ohne und mit Einlegeteil an 2 verschiedenen Positionen gefertigt. Die beiden Positionen wurden so gewählt, dass sich das Einlegeteil direkt zentral im Kraftangriffspunkt (Pos. 1) oder dezentral davon befand (Pos. 2). Als Werkstoffe wurden wieder Polypropylen (PP) und Polybutylenterephthalat (PBT) gewählt.

Wie aus Abb. 12-32 und Abb. 12-34 ersichtlich, steigt die gemessene Kraft mit wachsender Durchbiegung des Bauteiles, verursacht durch den mit konstanter Geschwindigkeit (2 mm/min) verfahrenen Prüfstempel, kontinuierlich bis zu einem Maximum an und fällt danach bis zum Herausrutschen des Biegestreifens aus den Auflagern messbar ab. Die maximal messbare Kraft liegt dabei für die PP-Referenzprobekörper ohne Einlegeteil bei 44,73 N ($\pm 0,30$; $n = 10$) und fällt durch das Einbringen eines Einlegeteiles höchst signifikant ($p < 0,001$) ab (siehe Tabelle 16 bzw. Abb. 12-33, Abb. 12-35). Die Durchbiegung bei Maximalkraft von 12,20 mm ($\pm 0,13$; $n = 10$) verändert sich dabei im gleichen Verhältnis (siehe Tabelle 16). Für Bauteile aus PBT zeigen sich ähnliche Ergebnisse, d. h. eine Maximalkraft von 116,82 N ($\pm 0,71$; $n = 10$) für die Referenzbauteile bei einer Durchbiegung von 11,57 mm ($\pm 0,21$; $n = 10$). Mit Einlegeteilen zeigt sich dabei ebenfalls eine höchst signifikante ($p < 0,001$) Reduzierung der Bauteilstabilität (siehe Tabelle 16 bzw. Abb. 12-34, Abb. 12-35). Bei dezentraler Position des Einlegeteiles (Pos. 2) fällt jedoch ein deutlich kleinerer Stabilitätsverlust im Gegensatz zu einer Platzierung direkt im Kraftangriffspunkt (Pos. 1) für beide Werkstoffe auf. Der Unterschied in der maximal messbaren Kraft bei Bauteilen aus PP

mit Einlegeteil zentral in Beanspruchungsrichtung zur Referenz beträgt 2,35 N, bei einer Positionierung des Einlegeteiles um 16 mm verschoben zum Kraftangriffspunkt jedoch nur noch 0,85 N. Für Formteile aus dem stabileren technischen Kunststoff PBT liegt das Delta zwischen Referenz und Einlegeteil an Pos. 1 bei 15,47 N, bezogen auf Pos. 2 reduziert sich der Unterschied auf 2,06 N.

Bei der Auslegung eines Kunststoffbauteiles ist also bei der Integration eines RFID-Sensor-Tags in bestimmten Fällen eine Schwächung des Formteiles zu beachten. Dies kann hier durch dezentrale Positionierung des Sensors im Bauteil erheblich vermindert werden. Somit ist bei der Bauteilauslegung auf eine Positionierung außerhalb der Beanspruchungsrichtung zu achten, was allerdings individuell für jedes Formteil geprüft werden muss.

Tabelle 16: Übersicht der maximal gemessenen Kraft und der entsprechenden Durchbiegung bei verschiedenen Positionen des Einlegeteiles im Kunststoffbauteil im Vergleich zu Referenzbauteilen aus Polypropylen- (PP) oder Polybutylenterephthalat- (PBT) Vollmaterial.

Material	Variante	Maximalkraft / N (Mittelwert, n = 10)	Durchbiegung / mm bei Maximalkraft (Mittelwert, n = 10)
PP	Referenz	44,73 ± 0,30	12,20 ± 0,13
	Einlegeteil zentral (Pos. 1)	42,38 ± 0,45 ***	11,60 ± 0,13 ***
	Einlegeteil dezentral (Pos. 2)	43,88 ± 0,17 ***	12,15 ± 0,10
PBT	Referenz	116,82 ± 0,71	11,54 ± 0,21
	Einlegeteil zentral (Pos. 1)	101,35 ± 0,89 ***	8,10 ± 0,17 ***
	Einlegeteil dezentral (Pos. 2)	114,76 ± 0,30 ***	11,44 ± 0,15

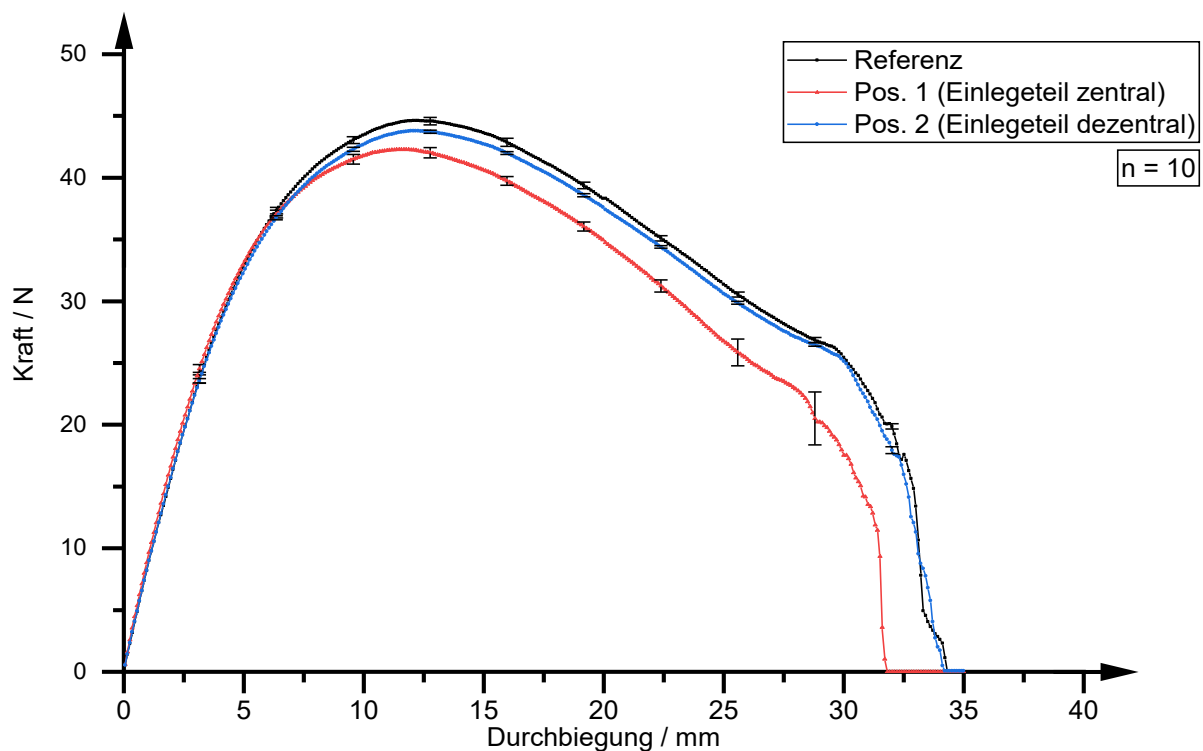


Abb. 12-32: Vergleich der Durchschnittskurven (n = 10) von Bauteilen aus Polypropylen (PP) ohne (Referenz) und mit Einlegeteil zentral am Kraftangriffspunkt (Pos.1, zentral) oder versetzt dazu (Pos. 2, dezentral).

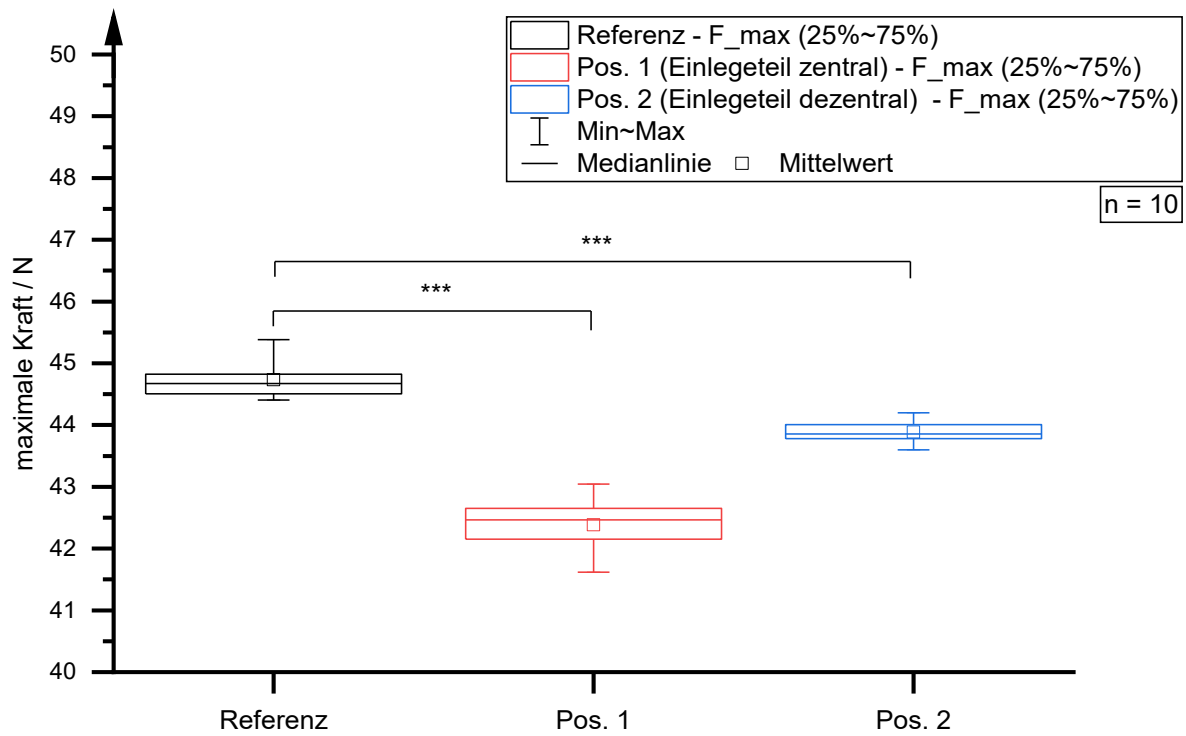


Abb. 12-33: Vergleich der maximal messbaren Kraftaufnahme der Polypropylen-Bauteile ohne (Referenz) und mit umspritztem Einlegeteil an zentraler (Pos. 1) bzw. dezentraler (Pos. 2) Position.

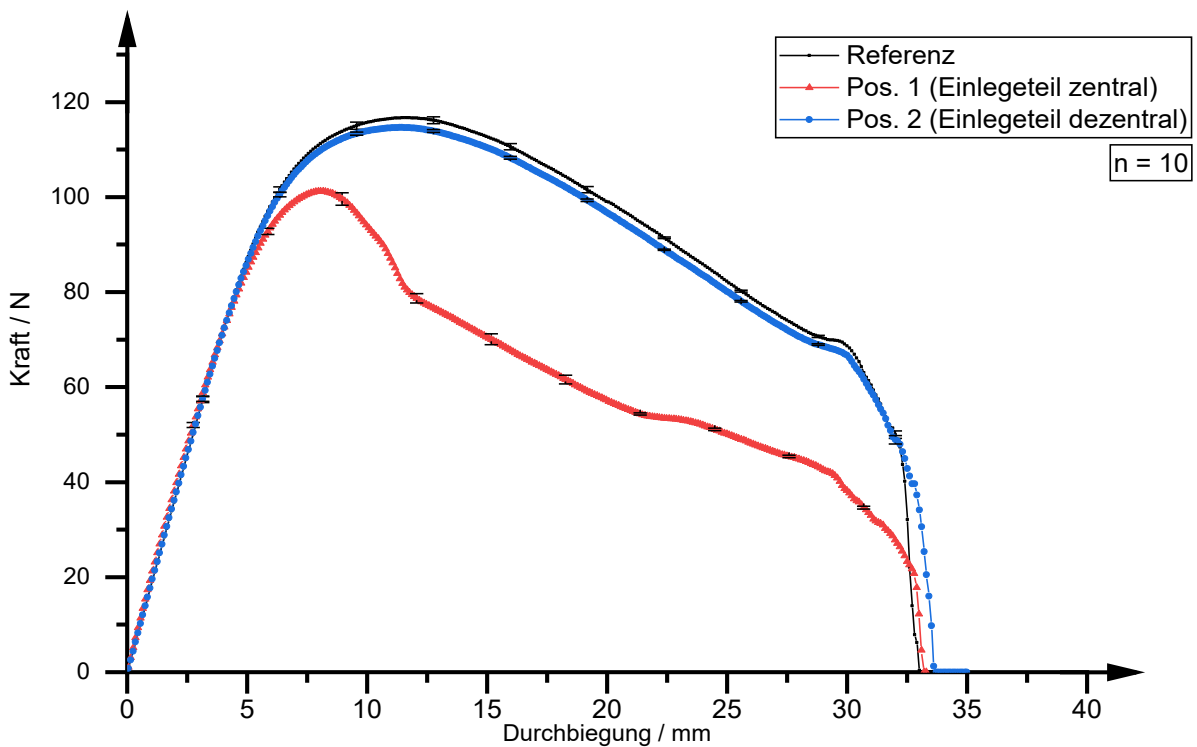


Abb. 12-34: Vergleich der Durchschnittskurven ($n = 10$) von Bauteilen aus Polybutylenterephthalat (PBT) ohne (Referenz) und mit Einlegeteil zentral am Kraftangriffspunkt (Pos.1, zentral) oder versetzt dazu (Pos. 2, dezentral).

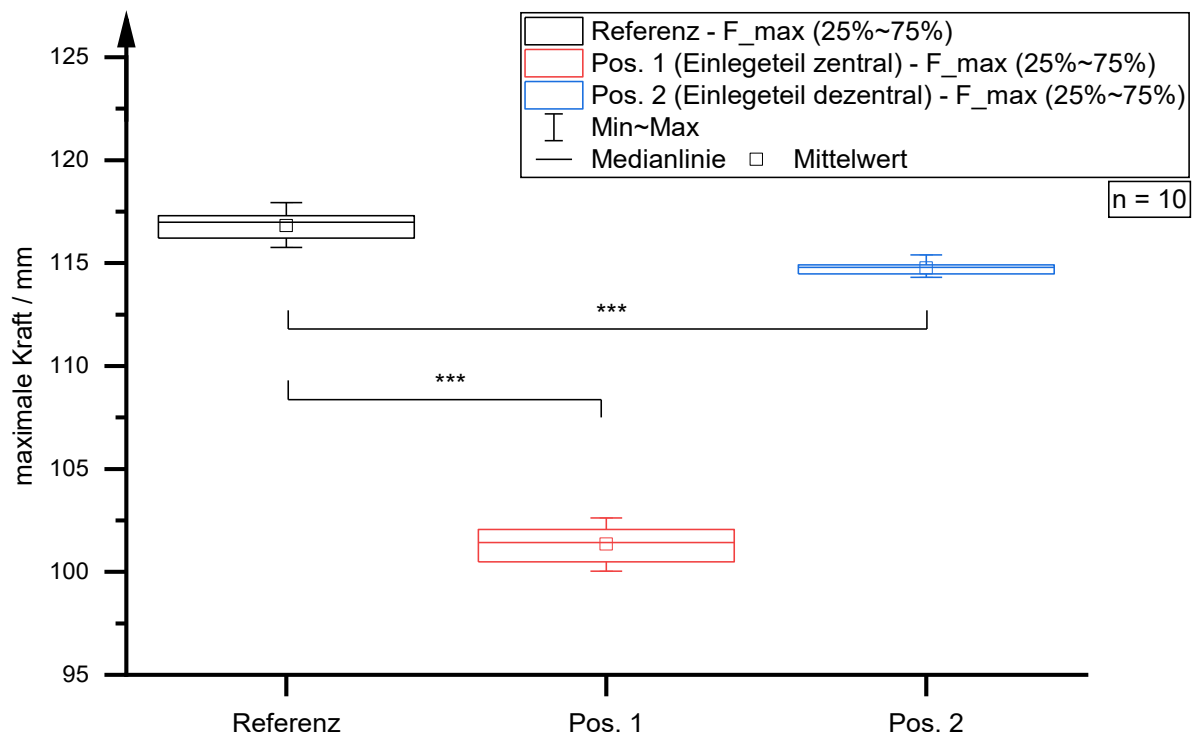


Abb. 12-35: Vergleich der maximal messbaren Kraftaufnahme der Polybutylenterephthalat-Bauteile ohne (Referenz) und mit umspritztem Einlegeteil an zentraler (Pos. 1) bzw. dezentraler (Pos. 2) Position.

13. Zusammenfassung und Ausblick

In der vorgestellten Arbeit wurde ein System bzw. Verfahren entwickelt und erprobt, mit dem drahtlos und mit demselben bauteilintegrierten Sensorelement sowohl während als auch nach dem Spritzgießprozess im Inneren von Spritzgussbauteilen Temperaturwerte erfasst und vorteilhaft angewendet werden können.

Die Notwendigkeit zur Überwachung, Regelung und Dokumentation des Spritzgießprozesses und des weiteren Bauteillebenszyklus wird zur Steigerung der Produktivität bzw. Qualität und zur Erfüllung normativer Vorgaben in der Prozessvalidierung immer bedeutsamer. Weitere Motivation zur Entwicklung des präsentierten Systems ergab sich aus einer detaillierten Analyse des Stands der Technik und Forschung (siehe Kapitel 3). Dabei zeigen die bekannten modellbasierten Verfahren noch deutliche Einschränkungen bei der Beschreibung des Spritzgießprozesses und erfordern, auch durch zusätzliche Prozesseinflüsse/-schwankungen während der realen Produktion, eine Verifikation durch physische Messmethoden, welche bisher aber aus Kostengründen mit werkzeuggebundener, drahtbasierter Sensorik realisiert werden (siehe Kapitel 4). Diese experimentellen Ansätze sind somit nur während bzw. eingeschränkt nach dem Spritzgießprozess in der Lage, die Temperatur am und vor allem im Kunststoffbauteil zu bestimmen. Deshalb wurde zur Entkoppelung von Werkzeug und Sensorik ein Spritzgusswerkzeug mit integrierter RFID-Antenne entwickelt, welches in Kombination mit einer zusätzlichen externen Antenne die Kommunikation mit den RFID-Sensor-Einlegeteilen während und nach der Bauteilherstellung ermöglicht.

Durch die in Kapitel 12 vorgestellten Experimente konnten die in Abschnitt 6 beschriebenen Vorteile des präsentierten Lösungskonzepts verifiziert werden. Neben dem eindeutigen Aufbau des Systems und der wiederholten, rechnerbasierten Messwertaufzeichnung zeigen vor allem die Ergebnisse aus der Qualifizierung des RFID-Sensor-Tags (siehe 12.1.1), dem Nachweis der Kommunikationsfähigkeit mit den Sensor-Tags (siehe 12.1.2) und der Realisierung der drahtlosen Temperaturmessung während/nach dem Spritzgießprozess (siehe 12.1.3) die Objektivität und Reliabilität bzw. Reproduzierbarkeit der durchgeführten Messungen. Zusätzlich wurde die Anwendbarkeit der bauteilintegrierten Kühlzeitregelung analysiert und nachgewiesen (siehe 12.1.4). Abschließende Untersuchungen befassten sich mit den Auswirkungen des umspritzten Sensor-Einlegeteils auf die Maßhaltigkeit des Kunststoffformteiles (siehe 12.2.1) sowie auf die Bauteilstabilität (siehe 12.2.2).

Die präsentierte kombinierte *Prozessüberwachung* des Formteiles mit demselben Sensorelement realisiert die kontinuierliche, drahtlose Temperaturmessung im Spritzgussbauteil während und nach seiner Produktion. Dies ermöglicht eine umfassende Kontrolle der Bauteilqualität und auch die Nachverfolgung des Kunststoffbauteiles im weiteren Lebenszyklus im Sinne des Product Life Cycle Monitoring, beispielsweise während der Lagerung und der konkreten Anwendung.

Als Ausblick wird beispielhaft die Anwendung des RFID-Sensors zur Überwachung der Temperatur während der Dampfsterilisation in einem Autoklav vom Typ Hospiklav 25-B (SHP Steriltechnik AG, Detzel Schloß, Deutschland) betrachtet (siehe Abb. 13-1). Dabei sind die einzelnen Prozessphasen eindeutig identifizierbar. Somit kann der erfolgreiche Autoklaviervorgang als individuelle bauteilspezifische Nutzungsinformation in jedem Werkstück dokumentiert und später nachvollzogen werden.

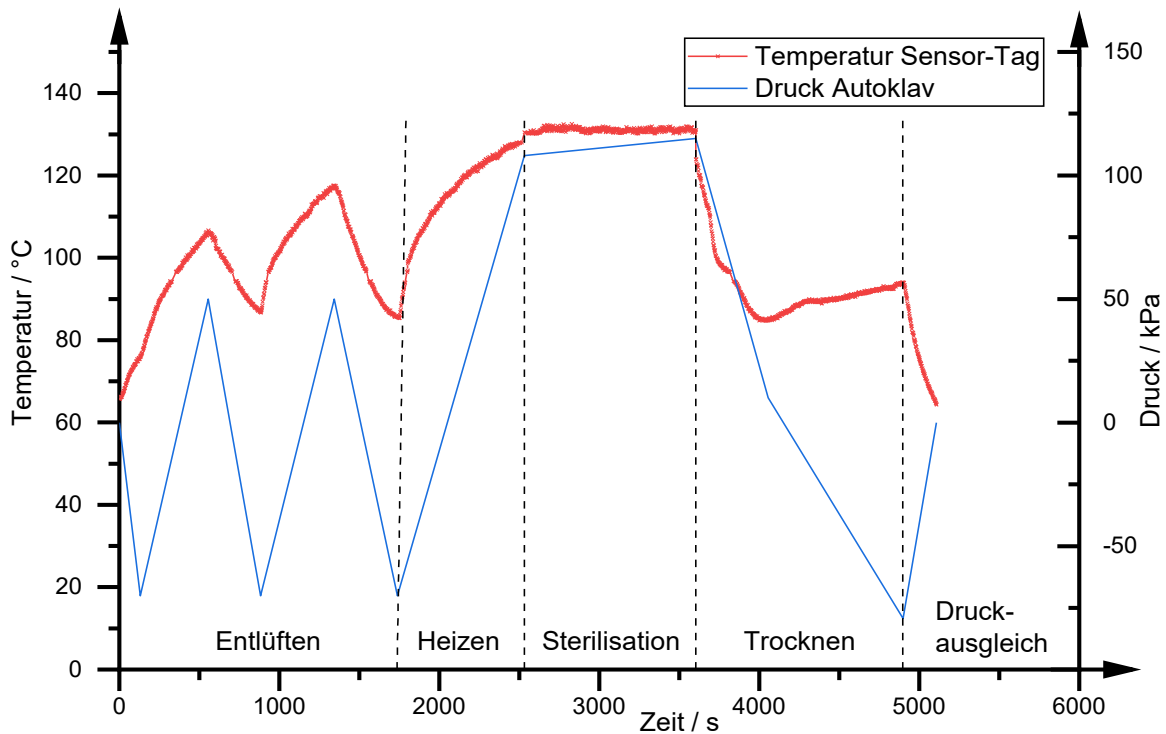


Abb. 13-1: Beispiel zur Anwendung der drahtlosen Temperaturüberwachung mittels RFID-Sensor-Transponder bei der Bauteilsterilisation im Autoklaven. Der Druckverlauf im Autoklav charakterisiert die einzelnen Prozessschritte. (Zeppenfeld, M. *et al.*, 2019a/b)

Herausforderungen bei dieser Art der drahtlosen Temperaturmessung mittels RFID-Sensor-Transponder bestehen dabei aufgrund der hohen Temperaturen vor allem bei der Temperaturüberwachung während des Spritzgießprozesses. Eine genaue Betrachtung der Temperaturmessungen mittels RFID-Sensor-Tag ergab eine hohe Richtigkeit der Messungen im Vergleich zur Referenzmessung mit einem konventionellen Thermoelement. Messungen mit dem RFID-Sensor-Tag zeigten eine maximale Abweichung von $\pm 5,02$ °C und einen mittleren Bereich von $\pm 2,14$ °C bei einem Messniveau von 130 °C. Zur weiteren Verbesserung der Genauigkeit der drahtlosen Sensor-Tag-Messung empfiehlt sich insbesondere die Optimierung der Messpräzision der Sensor-Transponder. Die Weiterentwicklung der in dieser Untersuchung verwendeten kommerziell verfügbaren und etablierten RFID-Sensor-Transponder sollte hinsichtlich einer individuellen Anwendung und der Einsetzbarkeit im Spritzgießprozess auf einen für höhere Temperaturen (> 150 °C) optimierten Sensor-IC und eine optimierte Schreib-/Lese-Reichweite abzielen. Trotz des bereits geringen Volumens des Sensor-Tags könnte eine weitere Größenreduktion zusätzliche Einsatzmöglichkeiten auch an geometrisch kleineren Kunststoffbauteilen erschließen und die Wärmekapazität des Sensor-Elements verringern. Dabei ist auf ein möglichst hohes Oberflächen- zu Volumenverhältnis und zudem ein gut wärmeleitendes Material zu achten, um eine schnelle Wärmeaufnahme bzw. -abgabe und somit einen möglichst kleinen Messfehler durch Eigenerwärmung zu erreichen. Durch eine weitere Optimierung der gesamten Messkette könnte weiterhin die Umschaltzeit zwischen der internen Messung im Werkzeug und der externen Kommunikation mit dem Sensor-Tag nach der Entformung verringert werden.

Durch die vorgestellte Erweiterung der Temperaturmessung zur *Prozessregelung* kann flexibel auf Änderungen in der besonders qualitätsrelevanten Schmelzetemperatur reagiert und ein

in der Literatur (Karbasi, H. *et al.*, 2006), (Ogorodnyk, O. *et al.*, 2018) empfohlenes möglichst direktes Qualitäts-Feedback von Bauteileigenschaften an die Spritzgießmaschine ermöglicht werden. Diese kunststoff- und bauteilspezifisch individuelle Anpassung der Kühlzeit, welche ca. 80 % der Zeit eines Spritzgießzyklus ausmacht (Dubay, R. *et al.*, 2006), kontrolliert auch bei Prozessschwankungen eine gleichbleibende, vordefinierte Entformungstemperatur und garantiert eine komplette Verfestigung auch im zuletzt erstarrenden Bauteilinneren. So kann unter Beachtung der mechanischen Bauteilstabilität die Kühlzeit robust gegen Störgrößen solange wie nötig, aber so kurz und damit so wirtschaftlich wie möglich gehalten werden. Da in der Praxis meist die Abschnitte eines Bauteiles mit der dicksten Wandstärke die Kühlzeit am stärksten beeinflussen, empfiehlt sich eine Platzierung des Sensors an diesen oder an anderen qualitätsrelevanten Stellen.

Der Einsatz des Sensor-Einlegeteils im Kunststoffformteil wurde auch hinsichtlich eines Einflusses auf die Maßhaltigkeit und Stabilität untersucht. So verursacht das Einlegeteil je nach Form und Position im Kunststoffbauteil eine Blockierung der Verarbeitungsschwindung, was bei der Werkzeugkonstruktion beachtet werden muss. Bei der individuellen Bauteilauslegung ist es empfehlenswert darauf zu achten, das Sensor-Einlegeteil mit Abstand zum Hauptbeanspruchungspunkt zu platzieren.

Weiterhin wurde die Möglichkeit einer im Bauteil integrierten, automatisierbaren und elektronisch auslesbaren, d. h. ohne Sichtkontakt auskommenden *Prozessdokumentation* aufgezeigt. Dies ermöglicht bauteilspezifisch die komplette Prozessdokumentation bzw. Bauteilnachverfolgbarkeit von Beginn des Fertigungsprozesses an und reduziert somit die Gefahr von Fehlidentifizierung. Zudem kann der Transponder auch über die Entformung hinaus als bauteilindividueller Datenspeicher genutzt werden. Neben der Möglichkeit zur Nutzung des RFID-Sensor-Transponders zur individuellen Bauteilidentifikation, welche im medizintechnischen Umfeld als Unique Device Identification gefordert wird (FDA Fed. Reg. 78(185) 2013), (EU Reg. 2017/745, 2017), kann die Speicherung des herstellungsspezifischen Temperaturverlaufs im Formteil und in einer zentralen Datenbank als bauteilspezifischer „Fingerabdruck“ dienen und somit die Fälschungssicherheit medizintechnischer Kunststoffbauteile erhöhen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass aus heutiger Sicht die drahtlose Temperaturmessung durch in das Bauteil eingebettete RFID-Sensoren ein großes Potential zur Optimierung des Spritzgießprozesses und auch zur langfristigen Überwachung der damit gefertigten Bauteile während Lagerung und Anwendung besitzt. Das vorgestellte System zur drahtlosen Prozessüberwachung realisiert eine 100-prozentige Kontrolle der Bauteilqualität während des Produktionsprozesses und kontinuierlich im weiteren Bauteillebenszyklus mit demselben formteilintegrierten RFID-Sensor-Transponder. Zusätzlich wird eine belastungsgerechte und flexible Prozessanpassung ermöglicht.

Durch die beschriebene Funktionsintegration wird das Kunststoffwerkstück von einem passiven zu einem aktiven Objekt mit integrierter Sensorik und der Fähigkeit zur Datenerfassung/-weitergabe. Somit werden auch aktuelle Anforderungen in der Produktionstechnik für die Kunststofftechnik umgesetzt. Dies beinhaltet eine flexible, individualisierte Fertigung und eine effektive Qualitätsüberwachung, auch über die reine Produktionsphase hinaus, durch Vernetzung aller Produktionsmittel und vor allem unter Einbeziehung des Werkstückes (Denkena, B. *et al.*, 2017, S. 295).

Literaturverzeichnis

- Abeykoon, C.: „Soft Sensing of Melt Temperature in Polymer Extrusion”, European Control Conference, Aalborg, Denmark, IEEE, Piscataway, USA, 2016.
- Alajoki, T. et al.: „In-mould Integration of Electronics into Mechanics and Reliability of Overmoulded Electronic and Optoelectronic Components”, Microelectronics and Packaging Conference, Rimini, Italy, 2009.
- Alig, I; Steinhoff, B. und Lellinger, D.: „Monitoring of polymer melt processing”, Measurement Science and Technology, 21 (6), 2010, S. 1–19.
- Amancio-Filho, S.T. und dos Santos, J.F.: „Joining of polymers and polymer-metal hybrid structures, Recent developments and trends”, Polymer Engineering & Science, 49 (8), 2009, S. 1461–1476.
- Amberg, J. et al.: „Experimentelle Bestimmung thermischer Material- und Prozessdaten für die Spritzgießsimulation unter Verbesserung der Messtechnik”, Institut für Mikrostrukturtechnik und Institut für Materialforschung am Forschungszentrum Karlsruhe (Hrsg.), Karlsruhe, 2003.
- Amendola, S. et al.: „Thermal characterization of Epidermal RFID sensor for Skin Temperature Measurements”, IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, Fajardo, Puerto Rico, IEEE, Piscataway, USA, 2016.
- Annicchiarico, D. und Alcock, J.R.: „Review of Factors that Affect Shrinkage of Molded Part in Injection Molding”, Materials and Manufacturing Processes, 29 (6), 2014, S. 662–682.
- ANSI/IEEE 1451.7: „IEEE Standard for Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators--Transducers to Radio Frequency Identification (RFID) Systems Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet Formats”, 2010.
- Baur, E. et al.: „Saechtling Kunststoff Taschenbuch”, 30. Ausg., Hanser, München, 2007.
- Bendada, A. et al.: „A hollow waveguide infrared thermometer for polymer temperature measurement during injection moulding”, Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 5, 2003, S. 464–470.
- Bendada, A. et al.: „Advances in infrared technology for the online monitoring of injection moulding: application to the understanding of the nature of contact at the polymer–mould interface”, Transactions of the Institute of Measurement and Control, 29 (5), 2007, S. 431–451.
- Bernhard, F.: „Handbuch der Technischen Temperaturmessung”, 2. Aufl., Springer Vieweg, Berlin, 2014.
- Europäisches Komitee der Hersteller von Kunststoff- und Gummimaschinen (EUROMAP) 1: „Beschreibung von Spritzgießmaschinen”, 1983.

- Bibi, F. et al.: „A review: RFID technology having sensing aptitudes for food industry and their contribution to tracking and monitoring of food products”, *Trends in Food Science & Technology*, 62, 2017, S. 91–103.
- Biehl, S. et al.: „Multifunktionale Dünnschichtsensormodule zur Überwachung von Produktionsprozessen”, *MikroSystemTechnik Kongress, Karlsruhe*, 2015.
- Bonten, C.: „Kunststofftechnik, Einführung und Grundlagen”, 1. Aufl., Hanser, München, 2014.
- Böswirth, L; Bschorer, S. und Buck, T.: „Technische Strömungslehre, Lehr- und Übungsbuch”, 10. Aufl., Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.
- Brown, E.C; Dawson, A.J. und Coates, P.D.: „Ultrasonic Monitoring of Nozzle and Cavity during Injection Moulding”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 21 (5), 2002, S. 441–450.
- Brown, E.C; Kelly, A.L. und Coates, P.D.: „Melt temperature field measurement in single screw extrusion using thermocouple meshes”, *Review of Scientific Instruments*, 75 (11), 2004, S. 4742–4748.
- Bruker, I. et al.: „Numerical analysis of the temperature profile in the melt conveying section of a single screw extruder: Comparison with experimental data”, *Polymer Engineering & Science*, 27 (7), 1987, S. 504–509.
- Bühning-Polaczek, A; Michaeli, W. und Spur, G.: „Handbuch Urformen”, Hanser, München, 2014.
- Bula, K. et al.: „The use of IR thermography to show the mold and part temperature evolution in injection molding”, *Archives of Mechanical Technology and Materials*, 36 (1), 2016, S. 843.
- Bur, A.J. und Roth, S.C.: „Fluorescence temperature measurements, Methodology for applications to process monitoring”, *Polymer Engineering & Science*, 44 (5), 2004, S. 898–908.
- Bur, A.J; Vangel, M.G. und Roth, S.C.: „Fluorescence Based Temperature Measurements and Applications to Real-Time Polymer Processing”, *Polymer Engineering & Science*, 41 (8), 2001, S. 1380–1389.
- Bur, A.J. und Wang, F.W.: „In-line optical monitoring of polymer injection molding”, *Polymer Engineering & Science*, 34 (8), 1994, S. 671–679.
- Debey, D. et al.: „Fabrication of planar thermocouples for real-time measurements of temperature profiles in polymer melts”, *Sensors and Actuators A: Physical*, 58 (3), 1997, S. 179–184.
- Denkena, B. et al.: „Das intelligente Werkstück”, In: Reinhart, G. (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*, Hanser, München, 2017.

- Dienelt, S.: „EPC/RFID und Sensorik Grundlageninformation, EPC/RFID und Sensorik - Einführung, Einsatzgebiete und Standardisierung“, GS1 Germany GmbH (Hrsg.), 2009.
- DIN EN ISO 178: „Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften“, 2013.
- DIN EN ISO 11357: „Kunststoffe – Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC)“, 2017.
- DIN 16742: „Kunststoff-Formteile – Toleranzen und Abnahmebedingungen“, 2013.
- DIN 24450: „Maschinen zum Verarbeiten von Kunststoffen und Kautschuk“, 1987.
- DIN EN ISO 294-1: „Spritzgießen von Probekörpern aus Thermoplasten - Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Herstellung von Vielzweckprobekörpern und Stäben“, 2017.
- DIN EN ISO 294-3: „Spritzgießen von Probekörpern aus Thermoplasten Teil 3: Kleine Platten“, 2003.
- DIN EN ISO 294-4: „Spritzgießen von Probekörpern aus Thermoplasten Teil 4: Bestimmung der Verarbeitungsschwindigkeit“, 2003.
- DIN EN 60584-1: „Thermoelemente – Teil 1: Thermospannungen und Grenzabweichungen“, 2013.
- DIN 16160: „Thermometer - Begriffe“, 1990.
- DIN 8580: „Fertigungsverfahren: Begriffe, Einteilung“, 2003.
- Dreckschmidt, R.: „Modularer In-Mould-Transponder“, RFID im Blick, 12/2011-01/2012, 2012, S. 42–43.
- Dubay, R; Pramujati, B. und Hernandez, M.: „A generic controller for part surface temperature on a plastic injection molding machine“, Advances in Polymer Technology, 25 (1), 2006, S. 1–12.
- Dürr, W. und Mayer, H.: „Wahrscheinlichkeitsrechnung und schließende Statistik“, 8. Auflage, Hanser, München, 2017.
- Egger, P.: „Verfahren zur Herstellung eines mehrschichtigen Kunststoffkörpers“ EP1938944A1, Europäisches Patentamt, 2007.
- Eggmann, K. und Kotyrba, G.: „RFID Anwendungen in der Diagnostik und Medizintechnik“, VDI-Fachtagung Kunststoffe in der Medizintechnik, Friedrichshafen, Kunststofftechnik, 4346, VDI Verlag, Düsseldorf, ISBN: 978-3-18-234346-2, 2016.
- GS1 EPCglobal: „EPC™ Radio-Frequency Identity Protocols Generation-2 UHF RFID Specification for RFID Air Interface Protocol for Communications at 860 MHz – 960 MHz“, Version 2.0.1, 2013.
- European Union: „Regulation (EU) 2017/745 of the European Parliament and of the Council of 5 April 2017 on Medical Devices“, Official Journal of the European Union, 2017.

- Farouq, Y. et al.: „Temperature measurements in the depth and at the surface of injected thermoplastic parts”, *Measurement*, 38 (1), 2005, S. 1–14.
- Fernández-Salmerón, J. et al.: „Passive UHF RFID tag with multiple sensing capabilities”, *Sensors*, 15 (10), 2015, S. 26769–26782.
- Finkenzeller, K.: „RFID-Handbuch, Grundlagen und praktische Anwendungen von Transpondern, kontaktlosen Chipkarten und NFC”, 7. Auflage, Hanser, München, 2015.
- Fonseca, G.E; Dubé, M.A. und Penlidis, A.: „A Critical Overview of Sensors for Monitoring Polymerizations”, *Macromolecular Reaction Engineering*, 3 (7), 2009, S. 327–373.
- Food and Drug Administration: „Final rule: Unique Device Identification System”, *Federal Register*, 78 (185), 2013, S. 58786–58828.
- Fosso Wamba, S; Anand, A. und Carter, L.: „A literature review of RFID-enabled healthcare applications and issues”, *International Journal of Information Management*, 33 (5), 2013, S. 875–891.
- Frettloeh, V; Beck, C. und Figge, T.: „Entwicklung und Erprobung einer neuartigen Produktionstechnik zur vollautomatisierten Integration von RFID Technik in thermoplastische und duroplastische Bauteile”, *Automation 2016*, Baden-Baden, 2016.
- Frettlöh, V.: „Integration von RFID-Tags in thermoplastische und duroplastische Kunststoffe: Intelligenter Kunststoffbauteile durch RFID-Technologie”, *Konstruktion*, 69 (10), 2015.
- Frey, P. et al.: „Embossing of Metal Inserts for Subsequent Assembly Injection Moulding of Media Tight Electronic Systems”, *Key Engineering Materials*, 639, 2015a, S. 99–106.
- Frey, P. et al.: „Influence of metal inserts with microformed edges on subsequent injection assembly moulding for media tight electronic systems”, *MATEC Web of Conferences*, 21, 2015b, S. 9013.
- Fronimidis, D. et al.: „Use of non-invasive measurement methods to aid the control of part quality in the injection moulding process”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 218 (9), 2005, S. 1195–1201.
- Gao, R.X. et al.: „Online product quality monitoring through in-process measurement”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 63 (1), 2014, S. 493–496.
- Gordon, G. et al.: „Quality control using a multivariate injection molding sensor”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78 (9-12), 2015, S. 1381–1391.
- Gross, T.P. und Crowley, J.: „Unique Device Identification in the service of public health”, *The New England journal of medicine*, 367 (17), 2012, S. 1583–1585.
- Grujicic, M.: „Injection over molding of polymer-metal hybrid structures”, *American Journal of Science and Technology*, 1 (4), 2014, S. 168–181.

- Günthner, W.A; Fruth, A. und Waang, K.: „Technikleitfaden für RFID-Projekte“, Technikleitfaden, RFID - Anwenderzentrum München, Technische Universität München, Garching, 2011.
- Halmen, N. et al.: „Ultrasound tomography for inline monitoring of plastic melts“, Journal of Sensors and Sensor Systems, 6 (1), 2017, S. 9–18.
- Heinle, C. et al.: „Mediendichte Materialverbunde in mechatronischen System durch Montagespritzguss“, Kunststofftechnik, 5 (6), 2009, S. 427–450.
- Heinle, C. et al.: „Assembly Molding of Tight Mechatronic System - A Model Approach“, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 132 (5), 2010, S. 54505.
- Heinle, M.: „Montagespritzgießen von mechatronischen Komponenten“, Dissertation (Betreuer: Prof. Dr. Drummer), Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 2014.
- Heinle, M. und Drummer, D.: „Measuring mechanical stresses on inserts during injection molding“, Advances in Mechanical Engineering, 7 (5), 2015, S. 1–6.
- Heyl, S.: „Analyse von Prozessschwankungen bei der Fertigung von Kunststoff-Metall-Verbunden“, unveröffentlichte Semesterarbeit (Betreuer: Matthias Zeppenfeld), Lehrstuhl für Medizintechnik, TU München, Garching, 2017.
- Hirn, R.: „Einfluss der Nachdruckumschaltung auf die Maßhaltigkeit von Spritzgussbauteilen“, unveröffentlichte Bachelorarbeit (Betreuer: Matthias Zeppenfeld), Lehrstuhl für Medizintechnik, TU München, Garching, 2016a.
- Hirn, R.: „Steuerung, Überwachung und Dokumentation des Spritzgießprozesses anhand sensorgestützter RFID Einlegeteile“, unveröffentlichte Semesterarbeit (Betreuer: Matthias Zeppenfeld), Lehrstuhl für Medizintechnik, TU München, Garching, 2016b.
- Hopmann, C. et al.: „A concept for non-invasive temperature measurement during injection moulding processes“, AIP Conference Proceedings, 1713, American Institute of Physics, College Park, USA, 2016.
- Hopmann, C. und Grümer, B.: „Ultraschall zur Prozessüberwachung bei Insert- und Outsertbauteilen“, Werkstoffzeitschrift, 2, 2014.
- Hopmann, C. und Michaeli, W.: „Einführung in die Kunststoffverarbeitung“, 8. Auflage, Hanser, München, 2017a.
- Hopmann, C; Theunissen, M. und Hascke, F.: „Kunststoffverarbeitung 4.0 - Individualisiertes Spritzgießen für die Produktion von morgen“, VDI Wissensforum Spritzgießen 2017, Baden-Baden, VDI Verlag, Düsseldorf, ISBN: 9783182343493, 2017b.
- Hopmann, C. und Wipperfurth, J.: „Ultrasound Tomography for Spatially Resolved Melt Temperature Measurements in Injection Moulding Processes“, Journal of Applied Mechanical Engineering, 6 (3), 2017c.

- Hopmann, C; Wipperfurth, J. und Schöngart, M.: „Spatially resolved temperature measurement in injection moulding using ultrasound tomography”, AIP Conference Proceedings, 1914, American Institute of Physics, College Park, USA, 2017d.
- ISO/IEC 18000-6: „Information technology - Radio frequency identification for item management - Part 6: Parameters for air interface communications at 860 MHz to 960 MHz”, 2013.
- Johannaber, F. und Michaeli, W.: „Handbuch Spritzgießen”, 2. Aufl., Hanser, München, 2004.
- Kaiser, W.: „Kunststoffchemie für Ingenieure, Von der Synthese bis zur Anwendung”, 1. Aufl., Carl Hanser Fachbuchverlag, 2011.
- Karbasi, H. und Reiser, H.: „Smart Mold: Real-Time In-Cavity Data Acquisition”, First Annual Technical Showcase & Third Annual Workshop, Canada, 2006.
- Kazmer, D.: „Injection mold design engineering”, 2nd edition, Hanser Publications, Cincinnati, 2016.
- Kazmer, D.O.: „Plastics manufacturing systems engineering, a systems approach”, Hanser Verlag, München, 2009.
- Kleffel, T. und Drummer, D.: „Investigating the suitability of roughness parameters to assess the bond strength of polymer-metal hybrid structures with mechanical adhesion”, Composites Part B: Engineering, 117, 2017, S. 20–25.
- Kollenberg, W.: „Technische Keramik, Grundlagen, Werkstoffe, Verfahrenstechnik”, 2. Aufl., Vulkan-Verl., Essen, 2009.
- Kulkarni, S.: „Robust process development and scientific molding, Theory and practice”, 2nd edition, Hanser Publications, Cincinnati, 2017.
- Lai, G.-Y. und Rietveld, J.X.: „Role of polymer transparency and temperature gradients in the quantitative measurement of process stream temperatures during injection molding via IR pyrometry”, Polymer Engineering and Science, 36 (13), 1996, S. 1755–1768.
- Launay, J. et al.: „Intrusive measurement of polymer flow temperature”, Polymer Engineering & Science, 54 (12), 2014, S. 2806–2814.
- Librizzi, A.: „Temperaturmessung im Spritzgießwerkzeug mittels Dünnschichtsensorik”, Lüdenscheid, 2015.
- Liu, S.-J; Su, P.-C. und Lin, K.-Y.: „In-situ temperature measurements in the depths of injection molded parts”, Measurement, 42 (5), 2009, S. 771–777.
- Liu, J.: „Erhöhung der Reproduzierbarkeit des Spritzgießprozesses durch verbesserte Plastifizierkonzepte”, Dissertation (Betreuer: Prof. Dr. Dr. Wintermantel), Lehrstuhl für Medizintechnik, TU München, Garching, 2010.

- Lunze, J.: „Regelungstechnik 1, Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen“, 11. Auflage, Springer, Berlin, 2016.
- Lyu, M.-Y. und Choi, T.G.: „Research trends in polymer materials for use in lightweight vehicles“, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 16 (1), 2015, S. 213–220.
- McEwen, A. und Cassimally, H.: „Designing the Internet of things“, Wiley, Hoboken, USA, 2014.
- Menath, D.: „Untersuchung und Optimierung des Spritzgießprozesses mittels statistischer Versuchsplanung“, unveröffentlichte Masterarbeit (Betreuer: Matthias Zeppenfeld), Lehrstuhl für Medizintechnik, TU München, Garching, 2016.
- Menges, G; Michaeli, W. und Mohren, P.: „Spritzgießwerkzeuge, Auslegung, Bau, Anwendung“, 6. Auflage, Hanser, München, 2007.
- Meola, C. et al.: „Infrared thermography in the quality assurance of manufacturing systems“, *Nondestructive Testing and Evaluation*, 18 (2), 2002, S. 83–90.
- Meyer, B.-R. und Falke, D.: „Maßhaltige Kunststoff-Formteile, Toleranzen und Formteilengineering“, Hanser, München, 2013.
- Miles, S.B. und Sarma, S. E., Williams, J. R.: „RFID technology and applications“, Cambridge University Press, Cambridge, England, 2008.
- Moser, S. und Madl, D.: „Effektives Einfahren eines Spritzgießprozesses, Design of Experiments“, *Kunststoffe*, (8), 2009, S. 36–40.
- Müller, B.: „Einfluss der Form und Lage von Einlegeteilen auf die Schwindung im Thermoplastspritzguss“, unveröffentlichte Semesterarbeit (Betreuer: Matthias Zeppenfeld), Lehrstuhl für Medizintechnik, TU München, Garching, 2017.
- Neff, R.A; Woerdeman, D.L. und Parnas, R.S.: „Use of a charged coupled device (CCD) camera for evanescent wave optical fiber cure monitoring of liquid composite molding resins“, *Polymer Composites*, 18 (4), 1997, S. 518–525.
- Nicolazo, C. et al.: „Change on temperature at the surface of injection moulded parts“, *Journal of Materials Processing Technology*, 210 (2), 2010, S. 233–237.
- O'Connor, M.C.: „Gen 2 EPC Protocol Approved as ISO 18000-6C. The International Standards Organization has made EPCglobal's UHF Gen 2 air-interface protocol a part of its ISO/IEC 18000-6 standard.“, *RFID Journal*, 2006.
- Ogorodnyk, O. und Martinsen, K.: „Monitoring and Control for Thermoplastics Injection Molding A Review“, 11th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, Naples, Italy, 67, 2018.
- Osswald, T.A. und Hernández-Ortiz, J.P.: „Polymer processing, Modeling and simulation“, Hanser, München, 2006.

- Pillwein, G; Giessauf, J. und Steinbichler, G.: „Einfaches Umschalten auf konstante Qualität“, *Kunststoffe*, (9), 2012, S. 31–35.
- Pitschenender, W. und Naderhirn, H.: „Spritzgießmaschine“ DE102004043274C5, Deutsches Patentamt, 2004.
- Polifke, W. und Kopitz, J.: „Wärmeübertragung, Grundlagen, analytische und numerische Methoden“, 2. Auflage, Pearson Studium, München, 2009.
- Praher, B. et al.: „Ultrasound based monitoring of the injection moulding process - Methods, applications and limitations“, AIP Conference Proceedings, 1593, American Institute of Physics, College Park, USA, 2014.
- Praher, B; Straka, K. und Steinbichler, G.: „An ultrasound-based system for temperature distribution measurements in injection moulding, System design, simulations and off-line test measurements in water“, *Measurement Science and Technology*, 24 (8), 2013, S. 84004.
- Reichel, S.: „Einfluss von Schwindungsbehinderung auf die Maßhaltigkeit beim Spritzgießen“, unveröffentlichte Semesterarbeit (Betreuer: Matthias Zeppenfeld), Lehrstuhl für Medizintechnik, TU München, Garching, 2016.
- Rokhsaz, S; Young, B.D. und Younis, A.: „Method and Apparatus For Sensing Environmental Parameters Using Wireless Sensor(s)“ US020170110796A1, U.S. Patent and Trademark Office, 2015.
- Sachs, L. und Hedderich, J.: „Angewandte Statistik“, 12. Auflage, Springer, Berlin, 2006.
- Schiele, S.: „Integration eines UHF RFID Auslesesystems in ein Spritzgießwerkzeug zur Prozessüberwachung und -dokumentation“, unveröffentlichte Semesterarbeit (Betreuer: Matthias Zeppenfeld), Lehrstuhl für Medizintechnik, TU München, Garching, 2016.
- Schiffers, R; Kruppa, S. und Moser, S.: „Für jeden Schuss der richtige Umschaltpunkt“, *Kunststoffe*, (11), 2014, S. 58–62.
- Schiller, G.F.: „A practical Approach to Scientific Molding“, Hanser, München, 2018.
- Schwalme, G.: „Inline Infrared Thermography Applied For Quality Gates And For Mould Temperature Control In The Injection Moulding Process“, 8th Ilmenau Scientific Colloquium, Ilmenau, 2014.
- Schwalme, G.: „Inline Infrared in Industrie 4.0“, VDI Wissensforum Spritzgießen, Baden-Baden, Kunststofftechnik, VDI Verlag, Düsseldorf, ISBN: 9783182343493, 2017.
- Seul, T. et al.: „Intelligente Spritzgießwerkzeuge als valide Produktionsmittel im Kontext Spritzgießen 4.0, VDI Wissensforum Spritzgießen 2017“, VDI Wissensforum Spritzgießen, Baden-Baden, Kunststofftechnik, VDI Verlag, Düsseldorf, ISBN: 9783182343493, 2017.
- Siebertz, K; van Bebber, D. und Hochkirchen, T.: „Statistische Versuchsplanung, Design of Experiments (DoE)“, Springer, Heidelberg, 2010.

- Süddeutsches Kunststoffzentrum: „Aluminiumwerkzeuge für den Serieneinsatz“, SKZ-KFE gGmbH (Hrsg.), Forschungsbericht, Würzburg, 2013.
- Sombatsompop, N. und Chaiwattanpipat, W.: „Temperature distributions of molten polypropylene during injection molding“, *Journal of Materials Science*, 35 (24), 2000, S. 6131–6137.
- Staiger, S.: „Einfluss von Kavitätanzahl und Prozessregelung beim Spritzgießen“, unveröffentlichte Bachelorarbeit (Betreuer: Matthias Zeppenfeld), Lehrstuhl für Medizintechnik, TU München, Garching, 2015.
- Staiger, S.: „Entwicklung eines Spritzgusswerkzeugs zur Integration von UHF RFID-Transpondern in Kunststoffbauteile“, unveröffentlichte Semesterarbeit (Betreuer: Matthias Zeppenfeld), Lehrstuhl für Medizintechnik, TU München, Garching, 2017.
- Stein, A.: „Prädiktion mit Präzision“, *Kunststoffe*, (7), 2018, S. 20–21.
- Steinko, W. und Bader, C.: „Optimierung von Spritzgießprozessen“, Hanser, München, 2008.
- Stiny, L.: „Passive elektronische Bauelemente, Aufbau, Funktion, Eigenschaften, Dimensionierung und Anwendung“, 2. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015.
- Stiny, L.: „Aktive elektronische Bauelemente, Aufbau, Struktur, Wirkungsweise, Eigenschaften und praktischer Einsatz diskreter und integrierter Halbleiter-Bauteile“, 3. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016.
- VDI Richtlinie 2206: „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“, 2004.
- VDI/VDE-Richtlinie 3511: „Technische Temperaturmessungen - Grundlagen und Übersicht über besondere Temperaturmeßverfahren“, 1996.
- Thomas, C.L. und Bur, A.J.: „Optical monitoring of polypropylene injection molding“, *Polymer Engineering & Science*, 39 (7), 1999, S. 1291–1302.
- Trescher, M.: „Einfluss verschiedener Angussysteme auf die Maßhaltigkeit thermoplastischer Spritzgussbauteile“, unveröffentlichte Bachelorarbeit (Betreuer: Matthias Zeppenfeld), Lehrstuhl für Medizintechnik, TU München, Garching, 2016.
- Vera-Sorroche, J. et al.: „Thermal optimisation of polymer extrusion using in-process monitoring techniques“, *Applied Thermal Engineering*, 53 (2), 2013, S. 405–413.
- Vetter, M. et al.: „Adhesive bonding between multi-material assembly injection molding parts with an adhesive interlayer“, *Journal of Polymer Engineering*, 31 (8-9), 2011, S. 31.
- Virtanen, J. et al.: „Temperature Sensor Tag for Passive UHF RFID Systems“, *IEEE Sensors Applications Symposium*, San Antonio, USA, IEEE, Piscataway, USA, 2011.
- Wang, M.-L.; Hsu, C.-H. und Chang, R.-Y.: „Molding Simulation, Theory and Practice“, 1. Auflage, Hanser, München, 2018.

- Wardenberg, M.: „Untersuchung passiver RFID-Transponder für den Einsatz in medizintechnischen Kunststoffbauteilen“, unveröffentlichte Semesterarbeit (Betreuer: Matthias Zeppenfeld), Lehrstuhl für Medizintechnik, TU München, Garching, 2018.
- Weigelt, K.: „Integration gedruckter Elektronik in Kunststoffe durch Folienhinterspritzen“, Dissertation (Betreuer: Prof. Dr. Hübler), Technischen Universität Chemnitz, Chemnitz, 2013.
- Weser, S.: „Untersuchungen zum Umspritzen von Nacktchips mit laserstrukturierbaren Thermoplasten“, IGF - AIF Abschlussbericht, Institut für Mikroaufbautechnik, Hanh-Schickard-Gesellschaft, Stuttgart, 2010.
- Wohlschläger, L.: „Simulative Untersuchungen zur Belastung und Schwindungsbeeinträchtigung von Einlegeteilen beim Spritzgießen“, unveröffentlichte Semesterarbeit (Betreuer: Matthias Zeppenfeld), Lehrstuhl für Medizintechnik, TU München, Garching, 2017.
- Wortberg, J; Schulze Struchtrup, A. und Zhao, C.: „Digitalisierung der Spritzgießproduktion - Intelligente Maschinen für effiziente Prozesse nutzen“, VDI Wissensforum Spritzgießen, Baden-Baden, VDI Verlag, Düsseldorf, 2017.
- Yang, Y. et al.: „Injection molding process control, monitoring, and optimization“, Hanser, München, 2016.
- Yang, Y; Yang, W. und Zhong, H.: „Temperature Distribution Measurement and Control of Extrusion Process by Tomography“, IEEE International Workshop on Imaging Systems and Techniques, Chania, Greece, IEEE, Piscataway, USA, ISBN: 978-1-4244-2497-9/08, 2008.
- Yao, J.: „Literaturrecherche zur Prozessüberwachung/-regelung beim Spritzgießen“, unveröffentlichte Semesterarbeit (Betreuer: Matthias Zeppenfeld), Lehrstuhl für Medizintechnik, TU München, Garching, 2015.
- Yao, W; Chu, C.-H. und Li, Z.: „The adoption and implementation of RFID technologies in healthcare, A literature review“, Journal of medical systems, 36 (6), 2012, S. 3507–3525.
- Yin, J. et al.: „A System-on-Chip EPC Gen-2 Passive UHF RFID Tag With Embedded Temperature Sensor“, IEEE Journal of Solid-State Circuits, 45 (11), 2010, S. 2404–2420.
- Yokoi, H. et al.: „Visualization analysis of injection molding phenomena in hot-runner system“, 31st International Conference of the Polymer Processing Society, Jeju Island, Korea, AIP Conference Proceedings, 1713, American Institute of Physics, College Park, USA, 2016.
- Yokoi, H; Murata, Y. und Tsukakoshi, H.: „Measurement of melt temperature profiles during filling and packing processes using a new integrated thermocouple sensor“, ANTEC 92--Shaping the Future, Detroit, 1992.
- Zäh, M. et al.: „Das intelligente Werkzeug“, In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik, Hanser, München, 2017.

- Zeppenfeld, M.; Hirn, R.; Schiele, S.; Werner, V.; Eblenkamp, M.: „Communication with Passive RFID Sensor Tags during Injection Molding of Medical Plastic Parts, Evaluation of part integrated process documentation, monitoring and control”, ITG-Fachbericht 273, Informationstechnische Gesellschaft im VDE (ITG), VDE Verlag, Berlin, 2017a, S. 1-6.
- Zeppenfeld, M.; Hirn, R.; Wardenberg, M.; Eblenkamp, M.: „Drahtlose Prozessüberwachung im Spritzgussbauteil”, *Kunststoffe*, (4), 2019a.
- Zeppenfeld, M.; Hirn, R.; Wardenberg, M.; Eblenkamp, M.: „Wireless Life Cycle Monitoring in the Injection Molded Part”, *Kunststoffe international*, (4), 2019b.
- Zeppenfeld, M.; Gattinger, J. und Robeck, A.: „Maßhaltigkeit im Thermoplastspritzguss”, Bayerischer Unternehmensverband Metall und Elektro e. V. und Verband der Bayerischen Metall und Elektro-Industrie e. V. (Hrsg.), München, 2017c.
- Zeppenfeld, M.; Hirn, R.; Gattinger, J.: „Vergleich moderner Methoden zur Nachdruckumschaltung im Spritzgießprozess hinsichtlich Bauteilmaßhaltigkeit“, *Qualitätsgipfel Kunststoff: Internationale Fachtagung für Qualität in der Kunststoffbranche*, SKZ-KFE gGmbH, Würzburg, ISBN 978-3-00-055843-6, 2016, S.72-73.
- Zeppenfeld, M.; Müller, B. und Heyl, S.: „Influence of Insert Component Position and Geometry on Shrinkage in Thermoplastic Insert Molding”, 33rd Annual Meeting of the Polymer Processing Society, Cancun, Mexiko, 2017d.

Abkürzungsverzeichnis

*	Signifikant mit Fehlerwahrscheinlichkeit $p \leq 0,05$
**	Hoch signifikant mit Fehlerwahrscheinlichkeit $p \leq 0,01$
***	Höchst signifikant mit Fehlerwahrscheinlichkeit $p \leq 0,001$
ϵ_r	stoffabhängige relative Permittivität
EPC	Electronic Product Code
PBT	Polybutylenterephthalat
PEEK	Polyetheretherketon
PP	Polypropylen
RFID	Radio Frequency Identification
RSSI	Received Signal Strength Indicator
S11	Reflektionsparameter
t	Zeit
t_k	Kühlzeit
T	Temperatur
ΔT	Gemessene Temperaturdifferenz
δT	Temperaturmessfehler
T_{Soll}	Solltemperatur / Entformungstemperatur
T_{Mess}	aktuell gemessene Massetemperatur
TID	Tag Identifier
TNC	Koaxialer Steckverbinder (Threaded Neill Concelman)
UDI	Unique Device Identification
UHF	Ultra High Frequency
VS	Verarbeitungsschwindigkeit

Danksagung

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh für die Begleitung des Prüfungsverfahrens und die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Ebenfalls bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler für die Prüfung der Dissertation.

Ausdrücklich möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lüth für die Betreuung und Prüfung der Dissertation bedanken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Andreas Robeck, Dr. Markus Eblenkamp, allen ehemaligen Kollegen und Werkstattmitarbeitern für Ihre Unterstützung, die wissenschaftlichen Diskussionen, und für das gemeinsame Gestalten der großartigen Zeit am Lehrstuhl für Medizintechnik der Technischen Universität München.

Vor allem bedanke ich mich bei meiner Familie für die herzliche Unterstützung.

Betreute Studienarbeiten, studentische Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Lehrstuhl für Medizintechnik der Technischen Universität München in den Jahren 2015 bis 2019 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten. Diese Untersuchungen zur Prozessüberwachung beim Kunststoffspritzgießen bzw. vorbereitende und begleitende Fragestellungen trugen zur Entstehung des vorliegenden Dokumentes bei.

Ich bedanke mich bei allen studentischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für ihre tatkräftige Unterstützung.

Simon Staiger (Bachelorarbeit)	(Staiger, S., 2015)
Juan Yao (Semesterarbeit)	(Yao, J., 2015)
Simon Schiele (Semesterarbeit)	(Schiele, S., 2016)
Daniel Menath (Masterarbeit)	(Menath, D., 2016)
Rupert Hirn (Bachelorarbeit)	(Hirn, R., 2016a)
Steffen Reichel (Semesterarbeit)	(Reichel, S., 2016)
Matthias Trescher (Bachelorarbeit)	(Trescher, M., 2016)
Rupert Hirn (Semesterarbeit)	(Hirn, R., 2016b)
Benedikt Müller (Semesterarbeit)	(Müller, B., 2017)
Simon Staiger (Semesterarbeit)	(Staiger, S., 2017)
Lukas Wohlschläger (Semesterarbeit)	(Wohlschläger, L., 2017)
Sophia Heyl (Semesterarbeit)	(Heyl, S., 2017)
Maximilian Wardenberg (Semesterarbeit)	(Wardenberg, M., 2018)

Simon Staiger, Hilfswissenschaftliche Tätigkeit, 03/2018-01/2019

Rupert Hirn, Hilfswissenschaftliche Tätigkeit, 04/2016-12/2016 und 07/2017-03/2018

Maximilian Wardenberg, Hilfswissenschaftliche Tätigkeit, 02/2016-01/2018

Eigene Publikationen

Paper

Zeppenfeld, M.; Hirn, R.; Wardenberg, M.; Eblenkamp, M.: „Wireless Life Cycle Monitoring in the Injection Molded Part“, *Kunststoffe international*, 4, 2019.

Zeppenfeld, M.; Hirn, R.; Wardenberg, M.; Eblenkamp, M.: „Drahtlose Prozessüberwachung im Spritzgussbauteil“, *Kunststoffe*, 4, 2019.

Best Paper Award auf der Smart SysTech 2017 - European Conference on Smart Objects, Systems and Technologies:

Zeppenfeld, M.; Hirn, R.; Schiele, S.; Werner, V.; Eblenkamp, M.: „Communication with passive RFID Sensor Tags during Injection Molding of Medical Plastic Parts“, ITG-Fachbericht 273, Informationstechnische Gesellschaft im VDE (ITG), VDE Verlag, Berlin, ISBN 978-3-8007-4428-2, 2017, S. 1-6.

Zeppenfeld, M.; Müller, B. und Heyl, S.: „Influence of Insert Component Position and Geometry on Shrinkage in Thermoplastic Insert Molding“, 33rd Annual Meeting of the Polymer Processing Society, Cancun, Mexiko, 2017.

Zeppenfeld, M.; Wardenberg, M.; Rapp, C.; Eblenkamp, M.: „Protection of active implant electronics with organosilicon open air plasma coating for plastic overmolding“, *Current Directions in Biomedical Engineering*, 2 (1), 2016, S. 35-38.

Vorträge

Zeppenfeld, M.: „Prozessüberwachungsmöglichkeit IM Spritzgießbauteil mittels RFID-Sensoren“, AKZEPT-PP Anwendungs- und Kompetenz-Zentrum für Polymer Technologie, Obernburg, 2018.

Zeppenfeld, M.; Trescher, M; Robeck, A.; Gattinger, J.: „Comparison of Cold and Hot Runner System concerning Part Accuracy in Thermoplastic Injection Molding“, 33rd Annual Meeting of the Polymer Processing Society, Cancun, Mexiko, 2017.

Zeppenfeld, M.; Hirn, R.; Gattinger, J.: „Vergleich moderner Methoden zur Nachdruckumschaltung im Spritzgießprozess hinsichtlich Bauteilmaßhaltigkeit“, *Qualitätsgipfel Kunststoff: Internationale Fachtagung für Qualität in der Kunststoffbranche*, SKZ-KFE gGmbH, Würzburg, ISBN 978-3-00-055843-6, 2016, S.72-73.

