

# Temperatursensitive Dünnschichten für den Einsatz in Spritzgießwerkzeugen der Thermoplastverarbeitung

*Dr.-Ing. Angelo Librizzi*

*gemeinnützige KIMW Forschungs GmbH, Mathildenstraße 22, 58507 Lüdenscheid, Deutschland*

## Zusammenfassung

Mit Hilfe temperatursensitiver Werkzeugbeschichtungen ist eine 100%-ige Online-Überwachung des Spritzgießprozesses möglich. Durch die graphische Darstellung der Temperaturkurve lassen sich Abläufe wie das Bemustern, Anfahren und Optimieren von Spritzgießwerkzeugen deutlich beschleunigen und die Formteilqualität sowie deren Konstanz erhöhen. Ferner können die erfassten Signale zur Analyse, Überwachung, Regelung und Dokumentation des Prozesses genutzt werden. Das entwickelte Dünnschichtsystem, bestehend aus in Aluminiumoxid eingebetteten thermoelektrischen Aufnehmermaterialien, wurde mittels PVD-Beschichtungstechnik auf formgebende Werkzeugelemente aufgebracht. Das Schichtsystem besitzt dabei eine Dicke von  $< 10 \mu\text{m}$ , wobei die eigentliche partiell applizierte Aufnehmerschicht lediglich eine Dicke von  $1 \mu\text{m}$  aufweist. Zur partiellen PVD-Beschichtung der Formeinsätze ist eine neue Maskierungsmethode, mittels eines Abdecklackes mit anschließendem Freilasern, entwickelt worden. Mittels einer thermoelektrischen Sensorcharakterisierung konnte eine gute Übereinstimmung der Werte des Schichtmaterials im Vergleich zum Bulkmaterial festgestellt werden. Weiterhin wurde mit Hilfe einer FEM-Simulation ein schnelles Ansprechverhalten der Sensoren ermittelt. Unter dem Gesichtspunkt der Austauschbarkeit eines defekten Sensors ist eine modulare Sensorvariante und eine flächige Variante zur gleichzeitigen Herstellung mehrerer über die Werkzeugoberfläche verteilten Sensoren entwickelt worden. In Spritzgießversuchen konnte gezeigt werden, dass es mit diesem Aufbau erstmalig möglich ist, eine Temperaturmessung in der direkten Einwirkzone der Kunststoffschmelze im Bereich der Werkzeugwand durchzuführen.

**Keywords:** Dünnschichtsensorik, Spritzgießen, PVD, Thermoelement, Temperaturmessung

## Einleitung

Die Verarbeitung von thermoplastischen Kunststoffen im Spritzgießprozess ermöglicht die Herstellung hochwertiger Formteile unter wirtschaftlichen Bedingungen. Steigende Herstellungskosten erfordern in Spritzgießbetrieben eine rationelle, reproduzierbare Fertigung bei hoher Produktqualität. Dies verlangt nach transparenten Prozessen und exakter Prozessbeherrschung der qualitätsrelevanten Parameter, die allein durch die Spritzgießmaschine oftmals nicht dargestellt werden können. Durch zusätzliche Sensoren im Spritzgießwerkzeug zur Bestimmung der Werkzeugwandtemperatur während der Formteilherstellung können relevante Informationen erfasst werden, die zur Analyse, Optimierung, Überwachung und Dokumentation des Prozesses dienen. Bei komplexen Fertigungsprozessen wird daher zunehmend angestrebt, über kontinuierlich erfasste Prozessinformationen die Prozessgüte zu überwachen und sicherzustellen. Primäres Ziel ist dabei,

anhand sensorisch ermittelter Prozesssignale auf Qualitätsschwankungen zu schließen. Das ermöglicht einerseits eine hundertprozentige Qualitätsüberwachung, andererseits besteht eine Basis für zeitnahe, qualitätsabhängige Eingriffe in den Prozess. In diesem Zusammenhang werden standardmäßig Temperatur- und Druckfühler eingesetzt, die eine punktuelle Messung im Spritzgießwerkzeug erlauben. Hierzu sind in der Regel im angussnahen und/oder im angussfernen Bereich entsprechende Bohrungen im Werkzeug vorgesehen, in welche die stiftförmigen Sensoren eingepasst werden. Die standardmäßig in Spritzgießwerkzeugen eingesetzten Sensoren unterliegen gewissen Restriktionen. So ist es zur Vermeidung des Eindringens von Kunststoffschmelze zwischen Sensor und Bohrung erforderlich, vorgegebene Bohrungstoleranzen exakt einzuhalten und zusätzliche O-Ringe zur Abdichtung zu verwenden. In diesem Zusammenhang kann sich die Verarbeitung sehr niedrigviskoser Schmelzen als problematisch erweisen. Es

besteht die Gefahr des Eindringens der Schmelze in den Ringspalt, was zu einer fehlerhaften Messwerterfassung führt oder diese gar vollständig unterbunden wird. Die marktüblichen Messelemente weisen gewisse geometrische Einschränkungen hinsichtlich des Krümmungsradius der Sensorfront auf. Verfügbar sind sowohl Sensorelemente, die mechanisch bearbeitbar und der Werkzeugwandkontur anpassbar sind, als auch Elemente, die keine Bearbeitung der Stirnfläche zulassen. Daher kann eine frei wählbare Positionierung, insbesondere an einer qualitätsrelevanten Bauteilposition, erschwert werden. Bei Temperatursensoren, die eine mechanische Bearbeitung zulassen, muss das eigentliche Messelement, in der Regel ein Drahtthermoelement, einen gewissen Abstand von der mit dem Kunststoff in Kontakt kommenden Oberfläche des eingepassten Stiftes aufweisen. Daher ist mit einer Abweichung zwischen der real vorliegenden und der vom Sensor interpretierten Temperatur auszugehen. Ferner kommt es aufgrund der zu erwärmenden Masse der Messelemente zu einer Sensorträgheit. Weiterhin bereiten bei der Spritzgießverarbeitung Verschleiß, Korrosion und Beläge an Werkzeugoberflächen und Werkzeugelementen Probleme, die mit hohen Kosten für Nachbearbeitungen verbunden sind.

Die zentrale Herausforderung der hier vorgestellten Entwicklung ist daher, Temperatursensoren für Spritzgießwerkzeuge zu entwickeln und diese mittels Oberflächen- und Schichttechnologien herzustellen, um die beschriebenen Einschränkungen zu umgehen und die vorteilhaften Eigenschaften von dünnen Schichten für den Verarbeitungsprozess zu nutzen.

### Messprinzip und Schichtaufbau

Die entwickelten Dünnschichtsensoren wurden direkt auf die formgebende Oberfläche der Werkzeugwand aufgebracht und ermöglichen daher die Messung der Temperatur in der direkten Einwirkzone der Kunststoffschmelze. Das Messprinzip der entwickelten Dünnschicht-Temperatursensoren basiert auf dem Seebeck-Effekt. Zur Ausnutzung dieses Effektes werden zwei verschiedene, elektrisch leitende Materialien (Thermoschenkel) an einem Ende miteinander verbunden und bilden ein Thermoelement und somit die Messstelle. Infolge einer Differenz zwischen der Temperatur der Verbindungsstelle  $T_1$  und der Temperatur  $T_2$  am offenen Ende der Leitermaterialien A und B entsteht eine Thermospannung  $U_{A/B}$ ; siehe Gl. (1):

$$U_{A/B} = S_{A/B} \cdot (T_1 - T_2) = S_{A/B} \cdot \Delta T$$

Die Änderung der Thermospannung mit der Temperatur wird mittels des Seebeck-Koeffizienten  $S_{A/B}$  beschrieben. Die Thermospannung wird zusammen mit der Temperatur an den offenen Enden gemessen und mittels einer Kalibrierfunktion in die eigentliche Messstellentemperatur umgerechnet. Das Prinzip illustriert Abb. 1.

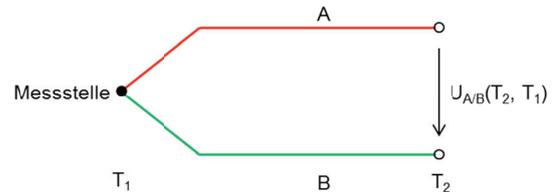


Abb. 1: Verwendetes Messprinzip.

Für die hergestellten Dünnschichtsensoren wurde die Thermopaarkombination NiCr/Ni (Typ K) und Cu/Konstantan (Typ T) verwendet. Dabei gilt es zu beachten, dass durch jedes weitere in die Thermoelementschleife eingebracht elektrisch leitendes Material ein neues Thermoelement entsteht und eine Veränderung des Thermospannungskoeffizienten zur Folge hat. Daher wird das Dünnschichtthermoelement gegenüber dem Werkzeugstahl - bestehend aus 1.2343 - zunächst mittels einer vollflächig abgeschiedenen  $Al_2O_3$ -Schicht mit einer Dicke von ca. 5  $\mu m$  elektrisch isoliert. Auf diese elektrische Isolationsschicht werden anschließend die Thermoschenkelmaterialien mit einer Dicke von jeweils ca. 1  $\mu m$ , unter Anwendung einer geeigneten Maskierungsmethode, partiell aufgebracht. Im Hinblick auf eine hohe Standzeit des Sensors, sind die hergestellten Dünnschicht-Thermoelemente durch eine verschleißfeste Passivierungsschicht bedeckt worden, ebenfalls aus  $Al_2O_3$  mit einer Dicke von ca. 2  $\mu m$ . Die Schicht dient schützend gegen mechanischen Verschleiß der durch den Formbildungsvorgang hervorgerufen wird und wirkt elektrisch isolierend, um Kurzschlüsse gegen leitfähige, mit dem Sensor in Berührung kommende, Materialien zu verhindern. Der Schichtaufbau ist in Abb. 2 dargestellt.

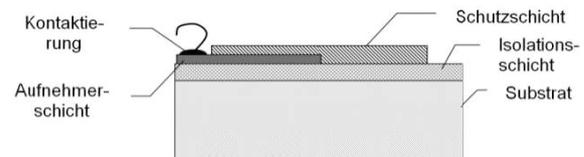


Abb. 2: Darstellung der Schichtfolge.

### Herstellung der Dünnschichtsensoren

Zur Beschichtung des Werkzeugeinsatzes mit dem gezeigten Schichtstapel wurden nacheinander die Materialien mittels Magnetron-DC-Sputtern (PVD-Technik) appliziert.

Für die erste Schicht aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ist ein hohes elektrisches Isolationsvermögen essentiell. Die Beschichtungsuntersuchungen haben gezeigt, dass mittels PVD-Technik hergestellte Schichten zur Bildung von Pinholes (Abb. 3) neigen. Das dargestellte EDX-Spektrum zeigt anhand des Peaks bei Fe, dass am Grund eines solchen Pinholes das Beschichtungs-substrat freiliegt. Dadurch hat das Material des nachfolgend aufgetragenen Thermo-schenkels mit dem Substrat Kontakt und es kommt zur Querleitung zum Substrat hin. Die Folge sind verfälschte Messergebnisse bzw. unbrauchbare Aufnehmerschichten.

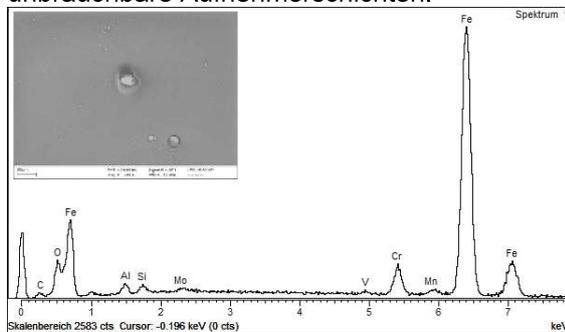


Abb. 3: REM-Aufnahme eines Pinholes in der elektrischen Isolationsschicht und EDX-Spektrum innerhalb des Pinholes.

Eine erfolgreiche Optimierung der Isolationsbeschichtung konnte durch einen mehrlagigen Schichtaufbau realisiert werden. Die einzelnen Schichtlagen weisen zwar Fehlstellen auf, jedoch sind diese nicht direkt übereinanderliegend und werden jeweils durch die folgende Lage bedeckt. Dadurch konnten Isolationswiderstände gegenüber dem aufgetragenen Thermoelement im Bereich von 1-2 M $\Omega$  realisiert werden.

Der elektrischen Isolationsschicht schließt sich der eigentliche Temperaturlaufnehmer - das Dünnschicht-Thermoelement - an. Für das verwendete Typ K Thermoelement werden dazu nacheinander partiell Nickel-Chrom und Nickel beschichtet. Im Bereich der Überlappungsstelle der beiden Materialien entsteht der eigentliche Messpunkt. Durch geeignete Maskierungstechniken lassen sich auf diese Weise ein oder mehrere Sensoren über eine Fläche verteilt in einem Beschichtungszyklus gleichzeitig herstellen.

Die geometrische Strukturierung erfolgte mittels Schattenmasken und alternativ dazu

mittels der Applikationen einer Abdeckbeschichtung mit anschließenden Freilasern der selbigen. Im ersten Fall wird auf die zu beschichtende Oberfläche eine Stahlmaske aufgebracht, die für das sensorische Beschichtungsmaterial durchlässige Bereiche in Form der Aufnehmergeometrie aufweist (Abb. 4).

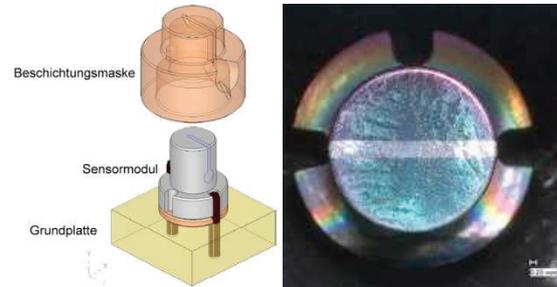


Abb. 4: Schattenmaske zur partiellen Beschichtung des Sensormoduls mit dem Aufnehmersmaterial (links); Mikroskopische Darstellung einer auf diese Weise hergestellten Thermo-elementbeschichtung (rechts).

Als alternatives Konzept zur Herstellung partieller Beschichtungen in Form der Thermo-elementschenkel ist eine Methodik entwickelt worden, bei der die Herstellung und Fixierung eines zusätzlichen Maskenbauteils vermieden werden kann und in vergleichsweise kurzer Zeit eine Maskierung mit feiner geometrischer Auflösung realisiert werden kann (Abb. 5). Dazu wird eine Abdeckbeschichtung sprühtechnisch auf ein entsprechendes Substrat appliziert. Nach der Lösemittelverflüchtigung der Abdeckbeschichtung, hinterlässt diese einen Feststofffilm aus Graphit, der nach dem Freilasern und der partiellen PVD-Beschichtung von der Oberfläche entfernt wird.

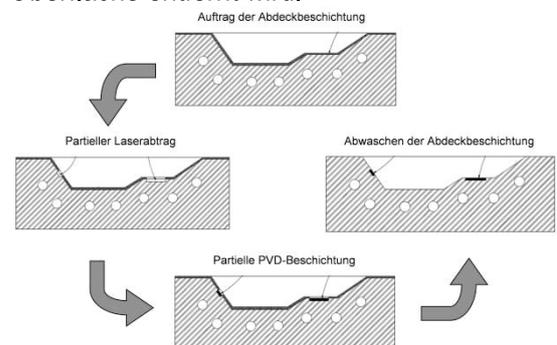


Abb. 5: Methodik zur Sensorstrukturierung durch einen Abdecklack und anschließendem Freilasern.

Abb. 6 zeigt vier auf diese Weise hergestellte Dünnschicht-Thermoelemente vom Typ T (Cu-Konstantan).

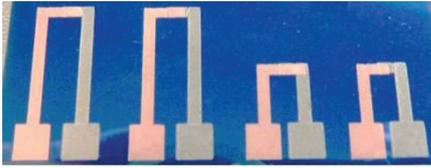


Abb. 6: Realisierung der Maskierung mit Freilassern eines Abdecklackes zur partiellen Beschichtung von Typ T Thermoelementen.

Im Hinblick auf eine hohe Standzeit des Sensors und eine elektrische Passivierung wurden die hergestellten Sensorvarianten durch eine zusätzliche Schicht gegenüber äußeren Einflüssen geschützt. Nach der Herstellung des Thermoelementes wird der Kontaktierungsbereich der beiden Thermoschenkel abgedeckt, um auf die restliche Oberfläche Aluminiumoxid mit einer Dicke von ca. 2  $\mu\text{m}$  als Schutzschicht mittels reaktivem Magnetron-DC-Magnetronspütern zu applizieren. Anschließend werden an die offenen Enden der Thermoschenkel Thermoleitungen mittels Weichlötens ankontaktiert, um diese mit dem Messwertfassungssystem zu verbinden. Abb. 7 zeigt zwei Sensorvarianten.

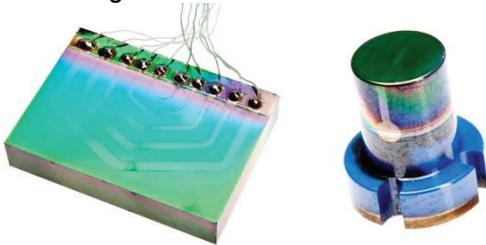


Abb. 7: Formeinsätze für ein Spritzgießwerkzeug mit Dünnschicht-Thermoelementen.

### Charakterisierung des thermo-elektrischen Verhaltens der Dünnschichtsensoren

Ziel der Sensorcharakterisierung ist die Sensorkalibrierung zur Bestimmung der thermisch-elektrischen Eigenschaften im Hinblick auf die Erfassung der vorherrschenden Temperatur im Spritzgießwerkzeug. Die Charakterisierung erfolgte in einem Kalibrier-Ölbad im Vergleichsverfahren, an quasi-stationären Temperaturpunkten innerhalb eines Bereiches von 25  $^{\circ}\text{C}$  bis 150  $^{\circ}\text{C}$ . Die Kalibrierfunktionen der auf der Oberfläche des Formeinsatzes in Abb. 7 (links) verteilten fünf Dünnschicht-Thermoelemente sind in Abb. 8 dargestellt. Die Thermoelemente 1 bis 5 besitzen jeweils

unterschiedliche Breiten ( $b_i$ ) der Thermoschenkel, zwischen von 0,5 mm bis 2,5 mm. Erkennbar ist ein linearer Zusammenhang der Thermospannung mit der Temperatur. Die mittlere Sensorempfindlichkeit liegt je nach Schenkelbreite im Bereich von mit 39,6  $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$  - 40,1  $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ . Ein t-Test auf Gleichheit der Sensorempfindlichkeiten, unter Berücksichtigung der Versuchsstreuung der Regressionsfunktionen und deren gemeinsamer Varianz hat gezeigt, dass dieser Einfluss jedoch nicht signifikant ist. Zusätzlich sind in Abb. 8 die Grundwerte des Typ K Thermoelementes aufgetragen. Für Temperaturen kleiner als 50  $^{\circ}\text{C}$  liegt lediglich eine geringe Abweichung von den Grundwerten vor. Bei weiterem Temperaturanstieg ist eine Zunahme dieser Abweichung zu erkennen.

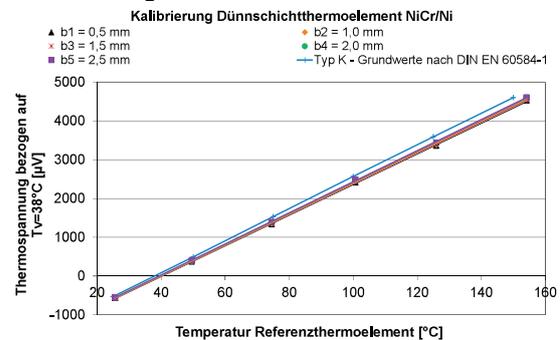


Abb. 8: Kalibrierfunktionen der Dünnschicht-Thermoelemente im Vergleich mit den Grundwerten des Typ K Thermoelementes.

### Thermische Prozesssimulation

Das Ziel der Temperaturmessung ist die Ermittlung des zeitlichen Verlaufes der Werkzeugwandtemperatur während der Werkzeugfüllung mit der heißen Kunststoffschmelze. Wird die eigentliche Aufnehmerschicht, wie bei den hier vorgestellten Sensoren, mit einer Schicht zum Schutz gegen mechanische Belastung belegt, ergeben sich folgende Fehlereinflüsse auf die gemessene Temperatur:

- Das Ansprechverhalten (Sprungantwort) des Temperatursensors verzögert sich um die Zeit, die benötigt wird, bis der durch die Kunststoffschmelze induzierte Wärmestrom die Schutzschicht durchdrungen hat und zur Aufnehmerschicht gelangt.
- Aufgrund der Schutzschicht wird nicht unmittelbar an der Kontaktstelle zwischen Kunststoff und Dünnschicht-Thermoelement gemessen. Das bedeutet, dass der gemessene Temperaturverlauf mit zunehmendem Abstand der Aufnehmerschicht zu der

Werkzeugoberfläche bzw. mit zunehmender Schutzschichtdicke verstärkt dem realen Temperaturverlauf abweichen wird.

Daher ist es das Ziel der thermischen Prozesssimulation, eine quantitative Abschätzung der Ansprechzeit und hinsichtlich der Verfälschung der aufgezeichneten Temperatur vorzunehmen.

Der Spritzgießprozess verläuft zyklisch und ist zeitlich wesentlich von der zu spritzenden Artikelgeometrie abhängig. Große zeitliche Temperaturänderungen sind insbesondere während der Einspritzphase, bei der Berührung der Kunststoffschmelze mit der kälteren Werkzeugwand die Folge. Die hergestellten Dünnschichttemperatursensoren müssen daher in der Lage sein, auch bei sehr kurzen Einspritzzeiten und hohen Temperaturänderungen die entsprechend vorherrschende Temperatur hinreichend genau und mit hoher Ansprechdynamik zu erfassen. Eine hohe Ansprechdynamik ist insbesondere zur Erfassung der Schmelzposition bei einer sensorabhängigen Nachdruckschaltung von Relevanz. Der Sensor folgt einem sprunghaften Anstieg der Temperatur immer nacheilend anhand der sogenannten Sprungantwortfunktion. Zur Quantifizierung der Messdynamik wurde die Neunzehntelzeit  $t_{90}$  (Zeit, um 90 % des Temperatursprungs zu erreichen) mittels einer FEM-Wärmetransportsimulation berechnet. Dazu wurde eine schlagartige Temperaturerregung von 100 °C als Startbedingung angenommen. Der auf die Höhe der Temperaturerregung normierte Verlauf der Sprungantwortfunktion sowie die berechneten Neunzehntelzeiten sind in Abb. 9 für unterschiedliche Schutzschichtdicken dargestellt.

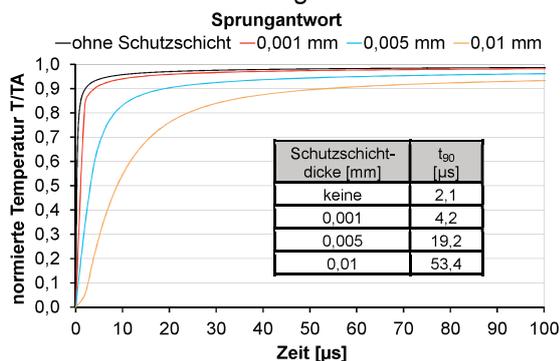


Abb. 9: Einfluss der Dicke der Schutzbeschichtung auf die Sprungantwort der Dünnschicht-Thermoelemente.

Aufgrund der geringen thermischen Masse der Thermoelementmaterialien erwärmen sich diese zunächst sehr schnell. Mit

fortschreitender Aufheizzeit flacht der Temperaturanstieg infolge der Wärmeableitung in Richtung Substrattiefe ab. Ferner ist eine Zunahme der Neunzehntelzeit mit der Dicke der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schutzbeschichtung erkennbar. Praxisrelevante Fließfrontgeschwindigkeiten beim Spritzgießen von Thermoplasten liegen erfahrungsgemäß in der Größenordnung von 100 - 200 mm/s. Bezieht man diesen Wert auf die längste berechnete Neunzehntelzeit, so wird deutlich, dass die Schmelze bei der Sensorvariante mit einer 0,01 mm dicken Schutzbeschichtung lediglich einen Weg von etwa 0,01 mm in der Kavität zurückgelegt hat. Dieser geringe Wert spiegelt die Praxistauglichkeit der Dünnschichtsensoren wieder, z. B. zur Erfassung der Schmelzposition. Weiterhin haben die Berechnungsergebnisse gezeigt, dass während des Einspritzens des Kunststoffes, eine vernachlässigbare Temperaturverfälschung von ca. 0,02 °C, infolge der Schutzbeschichtung auftritt.

### Sensorintegration und Anwendung in einem Spritzgießwerkzeug

Abb. 10 zeigt einen Werkzeugeinsatz auf dessen Oberfläche fünf Messpunkte an unterschiedlichen Positionen angebracht sind. Damit lässt sich in Abhängigkeit des Fließweges des Kunststoffes das Temperaturprofil bei der Formfüllung erfassen. Die Trennung der Kontaktierungspunkte gegenüber der einströmenden Kunststoffschmelze erfolgt über ein flexibles Dichtelement, welches in der düsenseitigen Werkzeughälfte verbaut ist und beim Schließen des Werkzeuges in die schließseitig angeordnete Kavität eintaucht und dabei den Kontaktierungsbereich abdichtet.

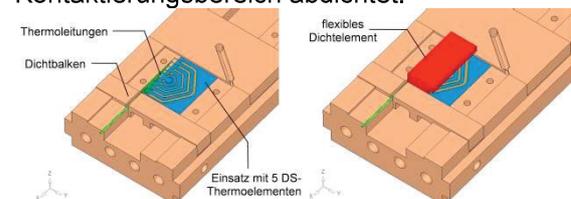


Abb. 10: Integration von fünf Dünnschicht-Thermoelementen in die schließseitige Werkzeughälfte eines Spritzgießwerkzeuges (links) und Trennung der angelöteten Thermoelementen gegenüber der einströmenden Kunststoffschmelze mittels flexiblen Dichtelements (rechts).

Des Weiteren wurde unter dem Gesichtspunkt einer schnellen Austauschbarkeit des Sensors im Schadensfall eine modularisierte Variante

entwickelt. Die Temperaturmessstelle befindet sich auf der Deckfläche des stiftförmigen Moduls im Bereich der Überlappung der Thermoelementschenkel (Abb. 11 links). Diese werden jeweils über die Mantelfläche geführt und dort mit den Thermoleitungen kontaktiert. Das kontaktierte Sensormodul wird anschließend in eine Hülse eingesetzt. Die seitlichen Freimachungen am unteren Bund des Moduls dienen als Kabelkanal und zur verdrehsicheren Verstiftung im Dichtelement. Dieser Aufbau wird in den Werkzeugeinsatz eingepasst, in dessen Rückseite (Abb. 11 mitte) Kanäle zur Kabelführung eingefräst sind. Die Thermoleitungen werden im eingebauten Zustand über den in den Dichtbalken eingebrachten Kabelkanal (Abb. 11 rechts) aus der Werkzeugkassette herausgeführt und mit dem Datenerfassungssystem verbunden.

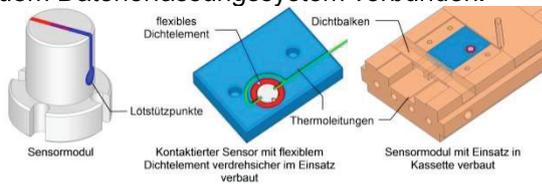


Abb.. 11: Integration des Sensormoduls in die schließseitige Werkzeughälfte eines Spritzgießwerkzeuges.

Abb. 12 zeigt die Überwachung des Anfahrverhaltens des Spritzgießprozesses mit dem modularisierten Dünnschichtsensor. Nach ca. 600 s, am Ende der Aufheizphase des Spritzgießwerkzeuges, ist eine Temperatur von 76 °C erkennbar. Da diese jedoch nicht der am Temperiergerät eingestellten Temperiermittelvorlauftemperatur von 80 °C entspricht, ist dies bereits eine erste wichtige Aussage, die der Sensor liefert. Im Bereich von 600 s bis 1400 s ist ein leicht variierender Temperaturverlauf zu erkennen, der um den Mittelwert von 76 °C schwankt. Die Schwankung beträgt  $\pm 0,6$  °C und ist auf Wärmestrahlungsverluste an der Werkzeugwand und das Gegenregeln des Temperiergerätes zurückzuführen. Der erste Spritzgießzyklus wird bei  $t = 1400$  s gestartet. Die Vorlauftemperatur des Temperiergerätes wird über den gesamten Verarbeitungsprozess konstant gehalten. Währenddessen steigt die tatsächliche Werkzeugwandtemperatur mit fortlaufender Fertigung, bedingt durch die Wärmezufuhr der heißen Schmelze, nach und nach an, bis ein Gleichgewicht erreicht ist. Das heißt, der Verlauf mehrerer aufeinanderfolgender Werkzeugwandtemperaturkurven kann dazu genutzt werden, das Erreichen eines thermisch-stationären Zustandes beim Anfahren eines Werkzeuges zu erkennen. Weiterhin ist erkennbar, dass

sich erst nach einigen Zyklen ein quasi-stationäres Temperaturprofil einstellt. Erst ab diesem Zeitpunkt kann mit einer gleichbleibenden und reproduzierbaren Formteilqualität gerechnet werden. Gleiches gilt für Prozessunterbrechungen.

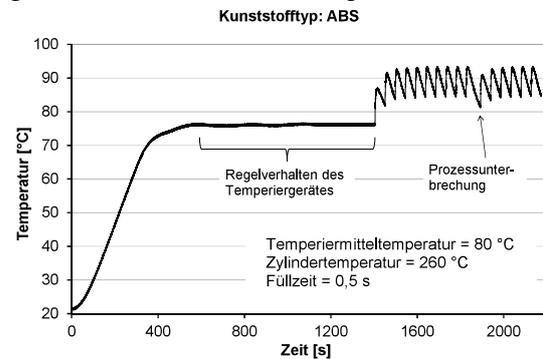


Abb.. 12: Überwachung des Anfahrverhaltens des Spritzgießprozesses.

Beispielhafte Temperaturmessungen mit dem Sensormodul bei der Herstellung eines Formteils aus ABS zeigt Abb. 13.

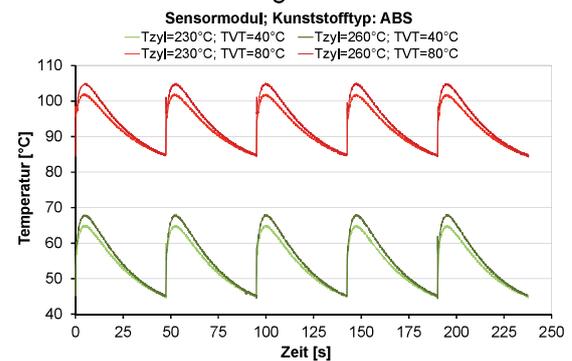


Abb.. 13: Einfluss der Temperiermittelvorlauftemperatur und der Zylindertemperatur auf den Temperaturverlauf an der Werkzeugwand.

Der Temperaturverlauf bildet sich aufgrund der Erwärmung während der Einspritzphase und der Kühlung während der Nachdruck- und Kühlphase dabei sägezahnförmig aus. Die unterschiedlichen Kurvenverläufe resultieren aus der Variation der Zylindertemperatur ( $T_{Zyl}$ ) und der Temperiermittelvorlauftemperatur (TVT). Sobald die Schmelze die Sensoroberfläche berührt, werden die Aufnehmerschichten erwärmt und es stellt sich ein schlagartiger Temperatursprung ein. Der Temperaturverlauf flacht bis zum Erreichen des Temperaturmaximums leicht ab, da zeitgleich durch die Werkzeugtemperierung Wärme entzogen wird. Die zu diesem Zeitpunkt erfasste Temperatur kann zur Überprüfung der Prozessreproduzierbarkeit verwendet werden, da bei gleichbleibenden

Viskositätsbedingungen die Schmelze in der gleichen Zeit diesen Ort in der Kavität wieder erreichen muss. Auf diese Weise kann eine Veränderung im Viskositätsverhalten, z. B. infolge schwankender Masse- oder Werkzeugtemperatur, erkannt werden. Infolge von Wärmeleitung sinkt die Temperatur während des Zyklus weiter ab. Sofern ein quasistationärer Zustand zu Beginn des neuen Zyklus vorliegt, ist das Ausgangstemperaturniveau zu diesem Zeitpunkt wieder erreicht.

### Fazit und Ausblick

Mit Hilfe temperatursensitiver Werkzeugbeschichtungen ist eine 100%-ige Online-Überwachung des Spritzgießprozesses möglich. Durch die graphische Darstellung der Temperaturkurve lassen sich Abläufe wie das Bemustern, Anfahren und Optimieren von Spritzgießwerkzeugen deutlich beschleunigen und die Formteilqualität sowie deren Konstanz erhöhen. Die Temperatursensorik auf Basis einer sensitiven Werkzeugbeschichtung bietet zahlreiche Vorteile und Anwendungsmöglichkeiten:

- Überwachung des Anfahrverhaltens des Prozesses
- Erfassung der Schmelzposition zur Nachdruckumschaltung
- Erkennung von Viskositätsschwankungen und ungefüllter Teile
- Steuerung einer Kaskadenanbindung und variothermen Werkzeugtemperierung
- Rückschlüsse auf Glanzgrade
- Miniaturisierte Ausführung
- Herstellung mehrerer Sensoren in einem einzigen Beschichtungsprozess
- Schnelles Ansprechverhalten

Gegenstand zukünftiger Untersuchungen wird die Weiterentwicklung von sensitiven Werkzeugbeschichtungen sein, die neben der Temperaturmessung auch eine Messung des Werkzeuginnendruckes möglich macht. Dadurch kann das Zusammenwirken von Kunststoff, Spritzgießmaschine, Spritzgießwerkzeug und Umwelt während der Formteilentstehung anhand der Zustandskurve transparent gemacht werden.