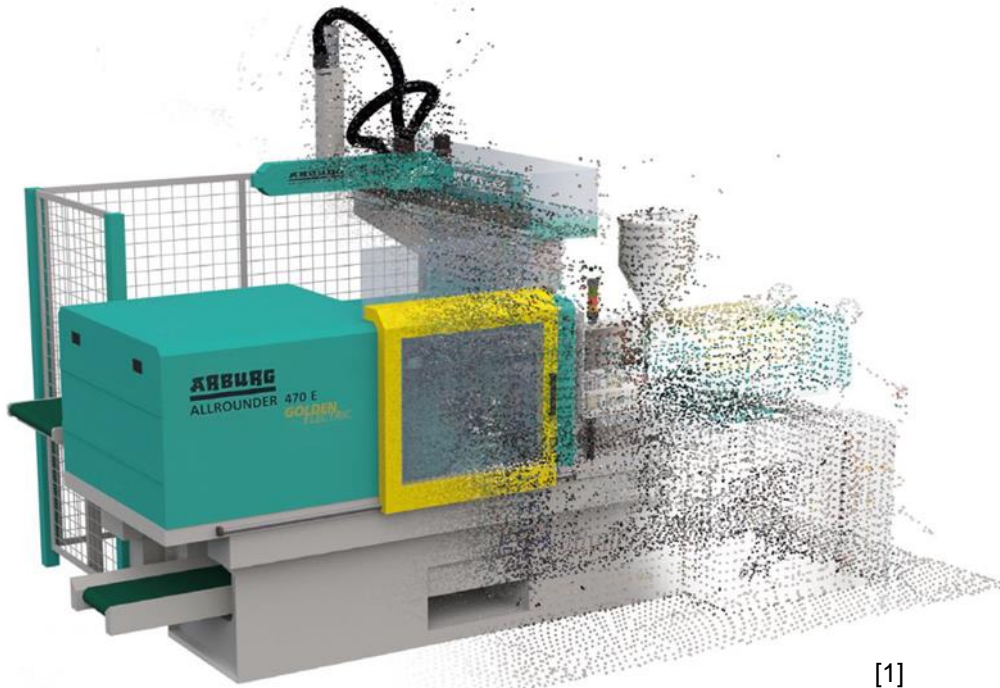


Digital Twin of Injection Molding



[1]

Leitfaden

Sensoren für Spritzgießwerkzeuge

Marco Klute

Universität Kassel

Fachgebiet Kunststofftechnik

Motivation für den Einsatz von Sensoren in Spritzgießkavitäten

Bei der Abmusterung von Spritzgießwerkzeugen und der Analyse von Korrelationen zwischen Qualitätsmerkmalen und Einstellgrößen werden üblicherweise mittels Design of Experiment (DoE) gezielte Parameterkombinationen eingestellt und deren Einfluss auf die Bauteilqualität ermittelt. Es gibt jedoch einige Einflüsse auf die Qualität und insbesondere auf den Formteilbildungsprozess innerhalb der Kavität, die bei solchen DoEs und selbst bei einer exakten Regelung der Einstellgrößen wie bspw. Einspritzgeschwindigkeit, Umschaltvolumen, Zylinder-temperaturprofilen oder des Nachdrucks nicht berücksichtigt werden können. So haben bspw. variierende Materialeigenschaften, Umwelteinflüsse oder stochastisch auftretende Störgrößen einen nicht unerheblichen Effekt auf die Formteilbildung in der Kavität.

Prinzipiell gibt es zwei Prozessgrößenverläufe, die innerhalb von Spritzgießkavitäten gemessen werden können und den Formteilbildungsprozess beschreiben. Hierbei handelt es sich um den Werkzeuginnendruck, der in der Praxis bereits häufig durch entsprechende Sensorik erfasst wird [2] und die Kontakttemperatur der Schmelze zur Werkzeugwand, die bisher nur selten berücksichtigt wird. Abbildung 1 zeigt qualitativ den Verlauf des Werkzeuginnendrucks sowie die korrelierenden Formteileigenschaften und Einflussparameter, aufgeteilt auf die drei Phasen des Spritzgießprozesses.



Abbildung 1: Qualitativer Verlauf des Werkzeuginnendrucks, korrelierende Formteileigenschaften und Einflussparameter [3]



Wie bereits erwähnt, haben sich Werkzeuginnendrucksensoren in der Praxis vielseitig bewährt und werden insbesondere bei Bauteilen mit hohen Anforderungen an die Qualität eingesetzt. Bei der Einrichtung von Spritzgießprozessen liefern sie wichtige Erkenntnisse über den Formteilbildungsprozess und erleichtern so die Werkzeugabmusterung und ermöglichen eine Prozessoptimierung, da Probleme im Prozess schnell erkannt und beseitigt werden können [3]. Darüber hinaus ermöglichen Innendrucksensoren eine Qualitätssicherung laufender Spritzgießprozesse durch eine automatisierte Dokumentation von gemessenen Daten, die direkt mit der Bauteilqualität korrelieren [4].

Der bisher nicht weitverbreitete Einsatz von Temperatursensoren in Spritzgießwerkzeugen kann neben den Informationen durch die Aufzeichnung des Innendrucks zusätzliche relevante Prozessinformationen zur Verfügung stellen. Durch die Erfassung der Werkzeugwandtemperatur lassen sich bspw. temperaturabhängige Formteileigenschaften wie Schwindung und Verzug beschreiben [3].

Positionierung der Sensoren

Da die durch die in das Spritzgießwerkzeug integrierten Sensoren erfassten Prozessgrößenverläufe nur punktuelle Messungen darstellen und nicht die gesamte Bauteilfläche abbilden, spielt die Position der Sensoren eine entscheidende Rolle. Generell empfiehlt sich eine Position möglichst angussnah, da nur so der gesamte Prozessverlauf (Füll- und Nachdruckphase) abgebildet werden kann [3]. In speziellen Fällen kann es aber auch sinnvoll sein, eine angussferne Position zu wählen, um gezielt eine auftretende Problematik wie bspw. Spritzgratbildung oder eine Unterfüllung der Kavität zu überwachen [5]. Insbesondere bei großflächigen Bauteilen oder bei Mehrfachkavitäten empfiehlt sich der Einsatz mehrerer Sensoren. Abbildung 2 zeigt qualitativ den Einfluss des Abstands eines Sensors zum Anspritzpunkt. Mit steigendem Abstand verschiebt sich der Zeitpunkt, ab dem ein Druckanstieg feststellbar ist und der gemessene Innendruck wird kleiner.

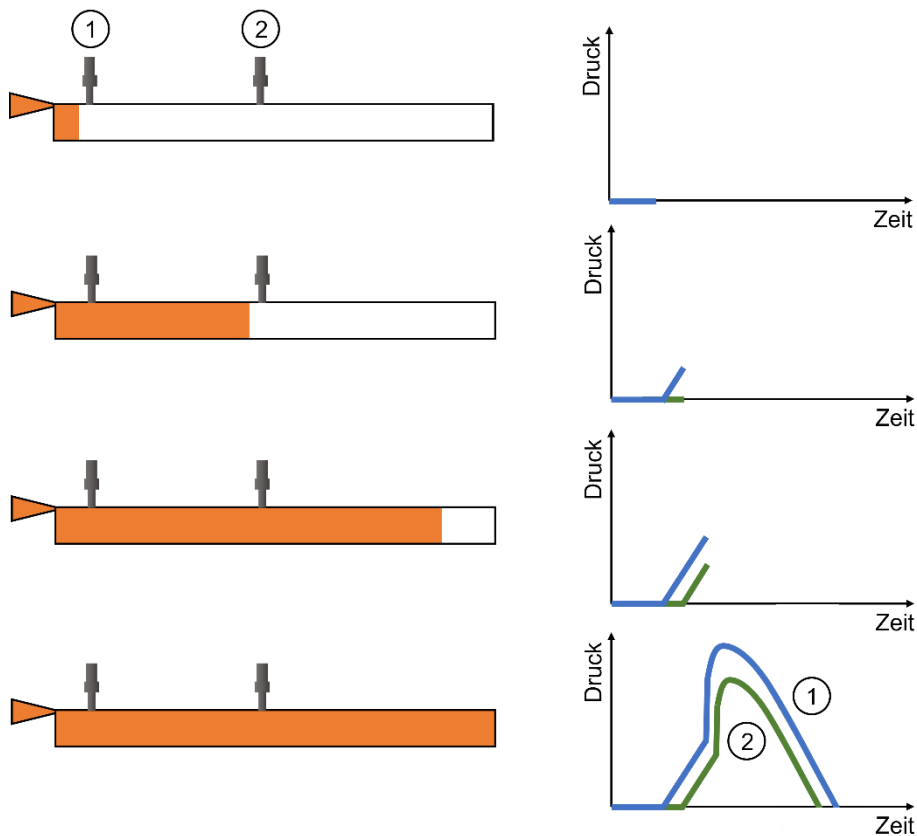


Abbildung 2: Werkzeuginnendruckverlauf in Abhängigkeit der Sensorposition

Sensortypen

Sowohl für die Sensoren zur Messung des Werkzeuginnendrucks als auch für die zur Bestimmung der Temperatur gibt es unterschiedliche Sensortypen, die auf unterschiedliche Weise die Prozessgrößen erfassen. Die Unterschiede sollen im Folgenden kurz erläutert werden.

Sensoren zur Messung des Werkzeuginnendrucks

So gut wie alle Sensortypen zur Bestimmung des Werkzeuginnendrucks basieren heutzutage entweder auf dem piezoelektrischen oder dem piezoresistiven Prinzip, wobei das erste deutlich häufiger verwendet wird. Üblicherweise werden piezoresistive Sensoren nur dort verbaut, wo sie sich dauerhaft im Kontakt zur Kunststoffschmelze befinden, bspw. in Heißkanälen.

Der hauptsächliche Grund für den fast ausschließlichen Einsatz von piezoelektrischen Sensoren in Spritzgießwerkzeugen ist ihre nahezu unbegrenzte Lebensdauer und hohe Dynamik. Ihr Messprinzip beruht auf der Verwendung von piezoelektrischen Kristallelementen, die bei einer aufgetragenen Kraft proportionale elektrische Ladungen abgeben. Durch Ladungsverstärker lässt sich diese Ladung in ein analoges Spannungssignal umwandeln.

In Abhängigkeit der Platzierung des Sensors im Spritzgießwerkzeug wird zwischen direkt und indirekt messenden Sensoren unterschieden. Während die direkt messenden Sensoren im

direkten Kontakt zur Kavität und somit auch zum Formteil haben, werden indirekt messende Sensoren bspw. hinter Auswerferstiften oder speziellen Messstiften platziert, die die Kraft an den Sensor übertragen. Nur wenn es die Bauteilgeometrie oder die Werkzeugkonstruktion nicht erlaubt, einen direkten Sensor in die Kavität zu integrieren, sollten indirekt messende Sensoren verwendet werden, da diese im Vergleich wesentlich ungenauer sind. Ihre Messgenauigkeit wird bspw. beeinflusst durch variierende Reibverhältnisse zwischen dem Auswerferstift und dem Werkzeug, die durch unterschiedliche Temperaturverhältnisse oder Verunreinigungen hervorgerufen werden können.

Direkt messende Drucksensoren werden durch eine Bohrung direkt in die Kavität eingebracht. Dadurch, dass die piezoelektrischen Kristallelemente von einem massiven Kolben umgeben sind, kann die Sensorfront an die Formteilgeometrie angepasst werden, um Markierungen auf den produzierten Bauteilen zu vermeiden. Hierbei ist zu beachten, dass die verbauten Sensoren dann gegen ein mögliches Verdrehen gesichert werden. Generell muss beim Werkzeugbau darauf geachtet werden, dass die Bohrung für den Sensor korrekt bearbeitet wird. Zwischen dem Sensor und dem Werkzeug ist ein definierter Ringspalt erforderlich, damit kein Kraftnebenschluss entsteht, der sowohl die Empfindlichkeit als auch die Linearität des Sensors beeinflussen würde.

Bei der Auswahl des Frontdurchmessers des Sensors stehen je nach Hersteller Durchmesser > 1 mm zur Verfügung, wobei der am häufigsten verwendete Durchmesser 4 mm beträgt. Beim Einbau von Drucksensoren in Spritzgießwerkzeugen ist außerdem auf die Kabelführung zu achten, da diese aufgrund ihrer benötigten Isolierung sehr empfindlich sind. Um eine Beschädigung der Kabel zu vermeiden, werden sie in gefrästen Kanälen verlegt, die mit einer Abdeckung verschlossen werden, die eine Anschlussbuchse beinhaltet.

Die Fixierung der Sensoren im Werkzeug geschieht üblicherweise durch sogenannte Montagenippel oder bei kleinen Sensordurchmessern (< 4 mm) durch geschlitzte Hülsen. Detaillierte Beschreibungen der Fixierung inklusive CAD-Dateien der Montagenippel bzw. Hülsen stellen Sensorhersteller zur Verfügung.

Der typische Einsatzbereich von direkt messenden Drucksensoren für Spritzgießkavitäten ist auf 2000 bar und 300 °C limitiert, wobei hierbei die Schmelztemperatur auch mehr als 450 °C betragen kann [6].

In Abbildung 3 ist beispielhaft ein Innendrucksensor mit einer Sensorfront von 4 mm und dessen Einbau in ein Spritzgießwerkzeug dargestellt.

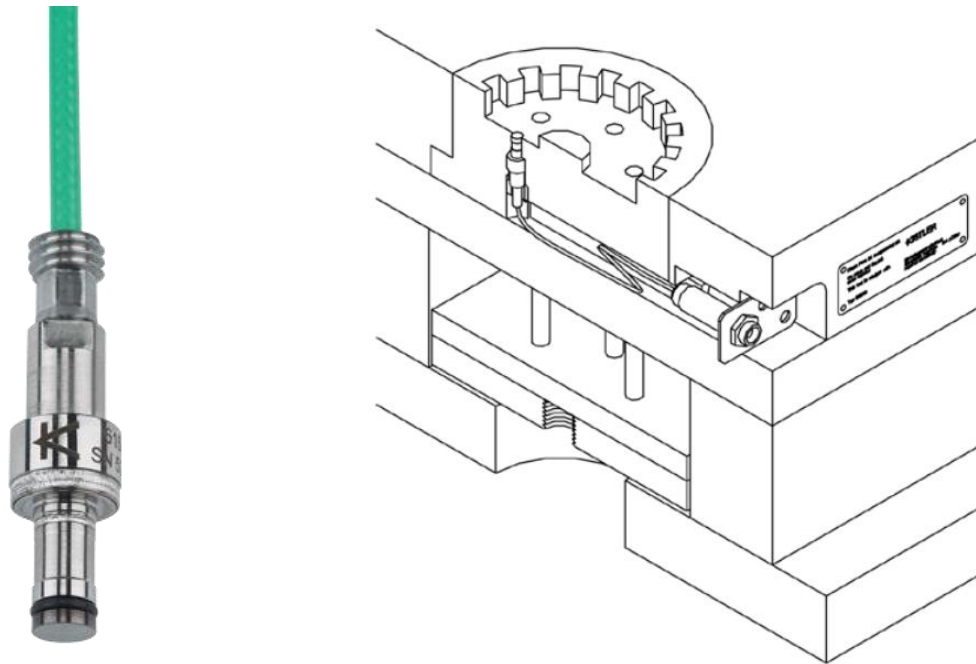


Abbildung 3: Direktmessender Werkzeuginnendrucksensor (links, [7]) und dessen beispielhafter Einbau in ein Spritzgießwerkzeug (rechts, [8])

Einen ähnlichen Einbau, wie er in Abbildung 3 dargestellt ist, weisen auch faseroptische Drucksensoren auf. Hier basiert das Messprinzip jedoch auf der durch einen anliegenden Druck hervorgerufenen veränderten Stellung eines Spiegels und der dadurch verursachten Abweichung der reflektierten Intensität. Das Verbindungskabel ist in diesem Falle ein Lichtleiter, der das Licht einer Infrarot-LED zum besagten Spiegel leitet. Der Quotient aus der Ausgangsintensität und der des reflektierten Lichts bildet das Maß für den anliegenden Druck. Der schematische Aufbau eines solchen Sensors ist in Abbildung 4 dargestellt.

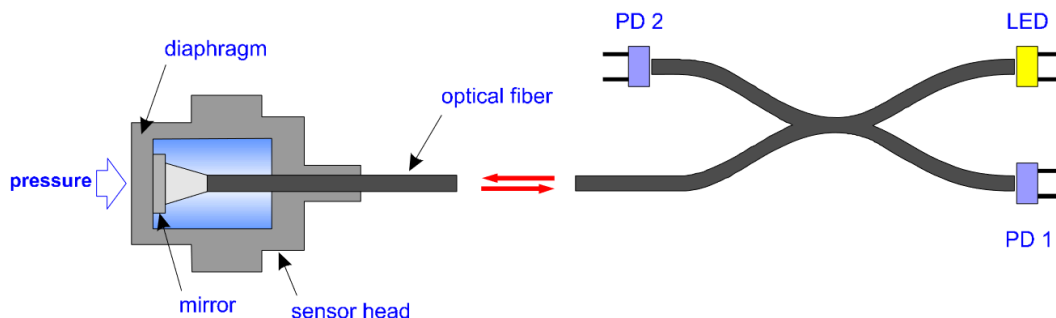


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Innendruckensors mit faseroptischer Drucksensortechnik [9]

Indirekt messende Sensoren messen wie bereits beschrieben den Druck nicht direkt in der Kavität, sondern die Kraft, die über einen Auswerfer- oder Messstift auf sie übertragen wird. Bei den indirekt messenden Sensoren handelt es sich demnach um Kraftsensoren. Deshalb spielt hierbei die Fläche des Auswerfer- oder Messstiftes eine entscheidende Rolle, da das gemessene Signal auf diese Fläche übertragen werden muss [3]. Prinzipiell gibt es zwei unterschiedliche Bauformen von indirekt messenden Sensoren für Spritzgießwerkzeuge. Bei

festinstallierten Sensoren werden üblicherweise zylinderförmige Bauformen verwendet, während bei temporären Nachrüstungen häufig sogenannte Messlaschen eingesetzt werden. Abbildung 5 zeigt beispielhaft eine Messlasche und einen zylindrischen indirekt messenden Innendrucksensor und deren Einbau im Spritzgießwerkzeug.

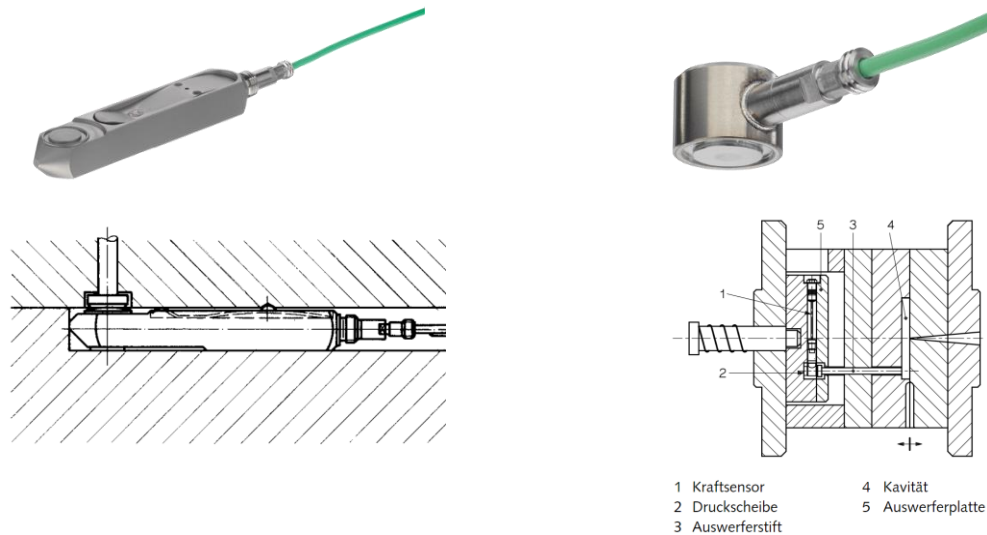


Abbildung 5: Messlasche (links, [10]) und zylindrischer indirekt messender Kraftsensor (rechts, [11]), jeweils mit Einbauskizze

Alternativ kann neben der Kraft, die über die Auswerfer- bzw. Messstifte übertragen wird, auch die Dehnung des Werkzeugstahls durch Dehnungsmessdübel bestimmt werden. Das bietet sich bspw. an, wenn gar keine Markierungen auf dem Bauteil entstehen dürfen oder ein anderes Auswerfersystem verwendet wird. Die Dehnungsmessdübel liefern zwar keine Absolutwerte für den Innendruck, die aufgezeichneten Messwerte sind jedoch in der Regel für die Qualitätsüberwachung ausreichend [12].

Sensoren zur Messung der Temperatur

Generell kann bei den Temperatursensoren, die im Spritzgießwerkzeug eingesetzt werden, zwischen zwei Arten unterschieden werden. Zum einen werden Temperatursensoren zur Messung der Werkzeugtemperatur hinter der Kavität und zum anderen zur Erfassung der Formteil- bzw. Kavitätswandtemperatur eingesetzt. Die Messwerte der Sensoren, die die Werkzeugtemperatur wenige Millimeter hinter der Kavitätswand bestimmen, werden üblicherweise für eine exakte Regelung der Werkzeugtemperatur genutzt und dafür an das Temperiergerät weitergeleitet [3]. Die Sensoren, die hingegen in direkten Kontakt mit der Schmelze in der Kavität kommen, liefern Informationen, die in direktem Zusammenhang mit der Formteilstehung liegen. Temperaturabhängige Formteileigenschaften (bspw. Schwindung und Verzug) können aus den Informationen des Temperaturverlaufs abgeleitet werden.

Üblicherweise werden Kontakttemperatursensoren eingesetzt, deren Thermoelementpaarung bis an die Sensorfront geführt wird und dadurch in der Kavität im Kontakt zum Formteil steht.

Erfasst wird hierbei die sogenannte Kontakttemperatur, die sich aus der Schmelztemperatur und der Werkzeugtemperatur ergibt [13]. Die tatsächliche Schmelztemperatur kann über die ermittelte Kontakttemperatur jedoch nur indirekt berechnet werden und ist stets fehlerbehaftet, da die thermischen Eigenschaften der verwendeten Sensoren von denen des Werkzeugstahls abweichen. Der Informationsgehalt von Temperaturmessungen in Spritzgießwerkzeugen ist demnach zwar geringer im Vergleich zu Werkzeuginnendrucksensoren, die Messresultate eignen sich aber dennoch gut, um über den aufgezeichneten Temperaturverlauf qualitative Aussagen über den Formteilbildungsprozess und resultierende Qualitäten treffen zu können [3].

Da das Ansprechverhalten von Kontakttemperatursensoren vergleichsweise langsam ist, werden häufig auch IR-Sensoren zur Erfassung der Temperatur in der Kavität eingesetzt. Hierbei wird die Emission von Strahlungen in einem definierten Wellenlängenbereich gemessen. Da das Emissionsvermögen sehr stark vom eingesetzten Werkstoff abhängt und die tatsächliche Emission um die Reflexions- und Transmissionsanteile vermindert wird, muss ein IR-Sensor bezüglich des Emissionsgrads der zu verarbeitenden Kunststoffschmelze kalibriert werden [3]. Außerdem kann bei der IR-Messung kein genauer Ort für die Messung angegeben werden [13]. Aufgrund der Abhängigkeit der Messung vom Kunststoff und vom Messort, müssen die Sensoren demnach in der Praxis auch auf die erwarteten Schmelze und Entformungstemperaturen kalibriert werden [14].

In der Regel bestehen IR-Sensoren, die in Spritzgießwerkzeugen eingesetzt werden, aus einem Saphirglas, das zur Einkopplung der Strahlung in den dahinterliegenden Lichtleiter dient. Dieser leitet die Strahlung auf einen Detektor, der sie in eine Spannung, die proportional zur Temperatur ist, umwandelt.

Oftmals werden Kontakttemperatur- oder IR-Sensoren in Verbindung mit Drucksensoren eingesetzt, um zusätzliche Informationen über den Prozess zu erhalten [3]. Der Aufbau eines solchen kombinierten Sensors ist in Abbildung 6 dargestellt.

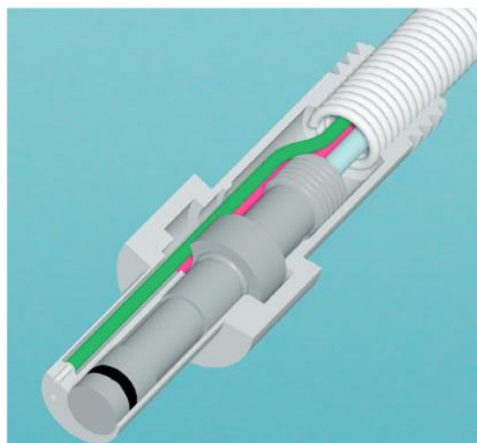


Abbildung 6: Schematischer Aufbau eines kombinierten Druck- und Temperatursensors [3]

Quellen:

- [1] <https://hmq-3d.ch/galerie/40/3d-modell-spritzgiessmaschine-arburg.html>
zuletzt aufgerufen am 21.02.2023
- [2] Lange, G.: Höhere Qualität und bessere Auslastung, *Plastverarbeiter* (2011) 9, S. 1–3.
- [3] Hopmann, C., Menges, G., Michaeli, W., & Mohren, P. (2018). *Spritzgießwerkzeuge: Auslegung, Bau, Anwendung*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
- [4] Schnerr, O.: *Automatisierung der Online-Qualitätssicherung beim Kunststoffspritzgießen*. RWTH Aachen, Dissertation, 2000 – ISBN: 3-89653-442-4.
- [5] Bader, C.; König, E.: Wir regeln das schon. *Kunststoffe* 102 (2012) 6, S. 62–67.
- [6] N. N.: *Sensoren und Systeme – Qualitätsüberwachung und Prozessregelung beim Spritzgießen*. Produktinformation, Kistler Instrumente AG, Winterthur, Schweiz, 2015.
- [7] https://kistler.cdn.celum.cloud/SAPCommerce_Product_1200x1200/Kistler_18.042_6157CC-1.png
zuletzt aufgerufen am 21.02.2023
- [8] https://kistler.cdn.celum.cloud/SAPCommerce_Download_original/003-339d.pdf
zuletzt aufgerufen am 21.02.2023
- [9] https://www.fos-messtechnik.de/Messsprinzip_2006.pdf
zuletzt aufgerufen am 21.02.2023
- [10] https://kistler.cdn.celum.cloud/SAPCommerce_Download_original/000-133d.pdf
zuletzt aufgerufen am 21.02.2023
- [11] https://kistler.cdn.celum.cloud/SAPCommerce_Download_original/000-128d.pdf
zuletzt aufgerufen am 21.02.2023
- [12] Bürkle, E.; Klotz, B.; Schnerr, O.: Der gläserne Innendruck. *Kunststoffe* 97 (2007) 5, S. 26–31.
- [13] Lienhard, J. H.: *A Heat Transfer Textbook*. Cambridge, Massachusetts: Phlogiston Press, 2012.
- [14] Obendrauf, W.; Kukla, C.; Langecker, G. R.: Schnelle Temperaturmessung mit IR-Fühlern. *Kunststoffe* 83 (1993) 12, S. 971–974