

Analyse des Spritzgießens von dickwandigen Produkten mit Cavity Eye Werkzeuginnendruck-Messsystem

*András Szűcs PhD** College Adjunct, *Károly Belina PhD** Professor

1. Einleitung

Die Qualitätsanforderungen an die Spritzgießprodukte steigen, man denke nur an die Automobil- oder Telekommunikationsprodukte, deren mechanische Eigenschaften, Maßhaltigkeit und Aussehen sich in den letzten Jahren stark weiter entwickelt haben. Dank immer genauerer Spritzgussmaschinen, Formen und spezielleren Polymeren auf dem Markt. Einer der Voraussetzungen für die qualitativ hochwertige Massenproduktion ist ein richtig eingestellter Prozess. Mit der Maschineneinstellung sind natürlich nicht nur die Maschinenparameter gemeint, sondern auch die richtige Vorbereitung und Trocknung des Rohmaterials, die Temperierung der Form und andere Einstellungen. Wenn mit einem Mehrkavitätenwerkzeug gearbeitet wird, ist die Reproduzierbarkeit der Produktion durch die unterschiedliche Befüllung der Kavitäten erschwert. Um die Reproduzierbarkeit und Stabilität der Technologie zu prüfen, können wir die Überwachungen an der Spritzgießmaschine verwenden. Diese Methode ist mehr oder weniger effektiv, hat aber ihre Grenzen, da wir die Parameter nicht dort messen, wo die Herstellung stattfindet, so dass Störfaktoren die Zuverlässigkeit der Überwachung einschränken. Die Messung des Werkzeuginnendrucks ist die einzige Technik, die eine reale Rückmeldung für den Prozess liefert. Die Umschaltung auf Basis des Werkzeuginnendrucks erhöht die Systemstabilität, die Produktselektion auf Basis der Druckkurven - durch die Einstellung korrekter Toleranzen - sorgt für eine ausschussfreie Produktion, die Speicherung der Messwerte erleichtert die Qualitätskontrolle und Rückverfolgbarkeit. Leider sind diese Systeme in der industriellen Umgebung nicht weit verbreitet, deshalb haben wir an der GAMF-Fakultät der Hochschule Kecskemét ein neues Werkzeuginnendruck-Messsystem entwickelt, das den Anwendern neue Möglichkeiten eröffnet. In unserem Artikel zeigen wir das Potenzial des Messsystems anhand der Form eines dickwandigen Produkts aus praktischer Sicht.

2. Das Experiment

Für die Tests haben wir den Polypropylen-Typ Tipelin R-959A verwendet, der für das Spritzgießen empfohlen wird und eine niedrige Viskosität hat. Sein Fließindex beträgt 45g/10 min, gemessen bei 230°C und 2,16 kg.

Die Versuche wurden auf einer ARBURG Allrounder 470A Spritzgießmaschine mit Überwachungssystem durchgeführt. Während des Prüf-/Produktionsprozesses speichert der elektronische Datenträger kontinuierlich die Messwerte (Einspritzdruck, Einspritzzeit etc.), so dass sie später ganz einfach und schnell ausgewertet werden können.

Für die Messungen haben wir die Form eines geänderten Standardmusters verwendet. Der Anschnitt der Form kann mit Einsätzen ausgestattet werden, so dass Produkte mit Seiten-, Folien-, einseitigem und beidseitigem Anschnitt hergestellt werden können. Die Dicke der Kavität beträgt 4 mm. In beiden Kavitäten befinden sich am Anfang und am Ende des Fließweges Auswerferstifte, durch die eine indirekte Messung durchgeführt werden kann. Unter den Auswerferstiften haben wir unsere selbstentwickelten Drucksensoren installiert. Der Messbereich der Sensoren beträgt 15 kN, was auch wirklich notwendig ist, da die Druckkraft bei einem Auswerferstift mit 10 mm Durchmesser und 1000 bar Werkzeuginnendruck etwa 7850 N beträgt. Dank des minimierten Rausch-Verhältnisses werden die Messwerte in recht großer Auflösung dargestellt, so dass auch wenige N Belastung genau gemessen werden können, und die Kennlinie ist im gesamten Bereich linear. Die Sensoren sind unempfindlich gegenüber Temperaturänderungen. Die Signale wurden mit dem



1. Abbildung "Cavity Eye" Druckmesssystem

Messsystem "Cavity Eye" (Bild 1) und der Software verarbeitet, die speziell für die industrielle Umgebung entwickelt wurden, aber auch für Labormessungen geeignet sind. Die Standardversion des Geräts verarbeitet 8 Kanäle - Sensoren - und kann unbegrenzt erweitert werden. Es enthält viele automatisierte Funktionen, z. B. elektronischer Zugriff, Speicherung und Komprimierung aller Messergebnisse, statistische Auswertung, automatische Identifizierung der Form usw.

Die Analyse des Spritzgießprozesses

Die Werkzeuginnendruck- und Hydraulikdruckkurven sind mehr oder weniger miteinander verbunden. Der Einspritzdruck beeinflusst eindeutig den Werkzeuginnendruck, aber die Formgebung findet in der Werkzeugkavität statt, so dass wir nur dann korrekte Informationen über den Produktionsprozess erhalten können, wenn der Druck in der Werkzeugkavität untersucht wird. Eine allgemeine Werkzeuginnendruck- und Hydraulikdruckkurve ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Kurve kann in mehrere verschiedene Abschnitte unterteilt werden, nämlich

- Volumetrische Füllung,
- Verdichten,
- Nachdruck,
- Kühlung [1].

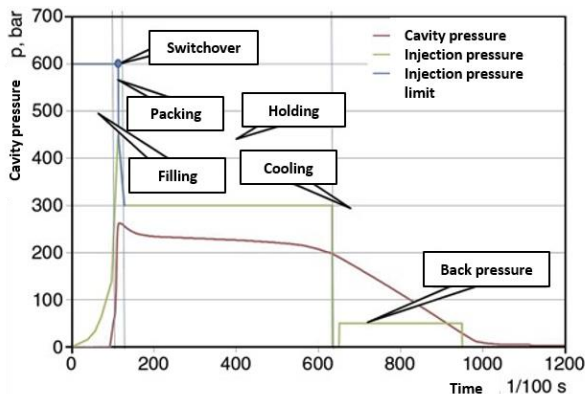


Abbildung 2. Werkzeuginnendruck und Einspritzdruck in Abhängigkeit von der Zeit

In der Füllphase fließt das Material frei in der Kavität. Der zur Aufrechterhaltung des Flusses erforderliche Druck ist relativ gering und hängt in erster Linie von der Fließfähigkeit des Materials, der Geschwindigkeit der Schmelzefront und dem Querschnitt des Flusses ab. Es gibt grundlegende Unterschiede zwischen dünn- und dickwandigen Produkten. Das Füllen von dünnwandigen Produkten mit langem Fließweg ist komplizierter, es steht weniger Zeit zur Verfügung, und beim Füllen bildet sich

ein größerer Druck im Formhohlraum, während die Abkühlzeit auch wesentlich kürzer ist.

In der Kompressionsphase füllt sich der Formhohlraum vollständig mit Polymerschmelze. Das Material fließt nicht, daher wird bei leichter Kompression der Werkzeuginnendruck in 0,01...0,1 Sekunden aufgebaut. Komprimierung bedeutet im Grunde, dass wir einige Prozent mehr Material in den Formhohlraum pressen, als er unter atmosphärischem Druck. (Die Kompressibilität des Materials kann durch p-v-T-Messung ermittelt werden.) Nach der Kompression wird auf Nachdruck umgeschaltet, d.h. der real aufgebaute Einspritzdruck wird kurzzeitig oder innerhalb einer vorgegebenen "Rampenzeit" auf den Nachdruckwert reduziert. Die "Rampe" kann bei einer modernen Spritzgießmaschine immer eingestellt werden, was den Prozess variieren lässt, da die PID-Regel Elektronik nicht in der Lage ist, ständige kleine Änderungen zu verarbeiten. Die Umschaltung ist einer der sensibelsten Parameter des Spritzgießprozesses.

Während der Absenkung der Materialtemperatur nimmt das spezifische Volumen ab, dies wird durch das eingespritzte Material in der Haltephase kompensiert. Während der Nachdruckphase können fallende, steigende und eventuell gestufte Druckprofile verwendet werden. Falsche Einstellung des Nachdrucks kann zu Einfallstellen auf der Produktoberfläche oder zu Vakuolen im Produkt führen. Die Nachdruckphase ist bis zum Erreichen des Siegelpunktes sinnvoll, d.h. wenn die Materialtemperatur im Querschnitt des Anschnittes unter die Fließ- bzw. Kristallisationstemperatur sinkt, erstarrt es und verhindert den Materialfluss.

In der Abkühlphase kühlt das Material kontinuierlich ab, der Druck im Formhohlraum nimmt ab, aber durch die Erstarrung fließt das Material nicht mehr. Daher ist die Druckabnahme annähernd proportional zur Abnahme des spezifischen Volumens, d. h. der Schrumpfung des Produkts. Die negative Steilheit in der Abkühlphase ist proportional zur Abkühlgeschwindigkeit.

Einer der wichtigsten Maschinenparameter ist die Umschaltung. Es ist üblich, die Umschaltung wegababhängig einzustellen, d.h. die Umschaltung von der Drehzahlregelung auf die druckgeregelte Haltephase erfolgt an einem bestimmten Schneckenweg. Bei modernen Maschinen kann diese Position mit 0,001-0,01 mm Genauigkeit gehalten werden. Der Fehler des Systems ist, dass es die äußeren Einflüsse auf den Füllprozess nicht berücksichtigt. Im Falle eines Ausfalls oder einer leichten Abnutzung des Rückschlagventils bleibt der Umschaltweg konstant, obwohl die Menge des eingespritzten Materials in jedem Zyklus schwankt. Die

am wenigsten verbreitete Methode ist die Umschaltung nach der Zeit. Sie hat den Vorteil, dass die Zeit mit extremer Genauigkeit gemessen werden kann, daher kann sie zur Steuerung verwendet werden. Die effektivste Methode in Bezug auf die Stabilität ist die Messung des Werkzeuginnendrucks. Der Drucksensor befindet sich in der Nähe des Anschnitts oder am Fließwegende. Befindet er sich in der Nähe des Anschnitts, ist der gesamte Füllprozess gut nachvollziehbar, befindet er sich am Ende des Fließweges, kann der Füllgrad des Produkts kontrolliert werden. Die meisten Informationen erhalten wir, wenn sich sowohl am Anfang als auch am Ende des Fließweges Sensoren befinden. Dies ist besonders bei dünnwandigen Produkten wichtig. Da das Ziel ist, in jedem Zyklus die gleiche Produktqualität zu produzieren, kann die größte Stabilität durch eine Umschaltung auf Basis des Werkzeuginnendrucks erreicht werden [3]. Die Abbildung 3 zeigt den Produktherstellungsprozess.

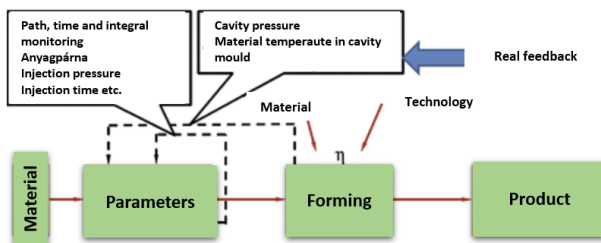


Abbildung 3. Flussdiagramm der Produktherstellung

3. Messergebnisse

Für die experimentelle Produktion wurde eine stabile Technologie eingestellt (Tabelle 1.), im Vergleich dazu wurden die folgenden Parameter geändert:

- Einspritzgeschwindigkeit (v_f),
- Materialtemperatur (T_a),
- Werkzeugtemperatur (T_{sz}),
- Schaltpunkt (s),
- Nachdruck (pN),
- Haltezeit (t_H).

Abbildung 4 zeigt Werkzeuginnendruckkurven, die in einem Zyklus gemessen wurden. 2 Sensoren pro Kavität liefern das Signal, so dass insgesamt 4 dargestellte Kurven paarweise zusammengehören. Die Sensoren wurden kalibriert, so dass die Unterschiede der Druckspitzen durch die Unterschiede der Werkzeuggeometrie entstehen können. Die zuvor genannten vier Phasen lassen sich gut trennen.

Durch Vergrößern des ansteigenden Abschnitts der Kurve wird die Füll- und Kompressionsphase sichtbar (Abbildung 5).

Tabelle 1.
Technologische Parameter

Materialtemperatur	200°C (240°C)
Temperatur der Form	30°C (90°C)
Einspritzgeschwindigkeit	80 mm/s (40, 60, 100, 120, 140 mm/s)
Schaltpunkt	10 mm (11, 9, 8, 7, 6 mm)
Einspritzdruck	1500 bar
Haltezeit	5 s (1, 2, 3, 4 s)
Haltezeit	300 bar (100, 200, 400, 500, 600 bar)

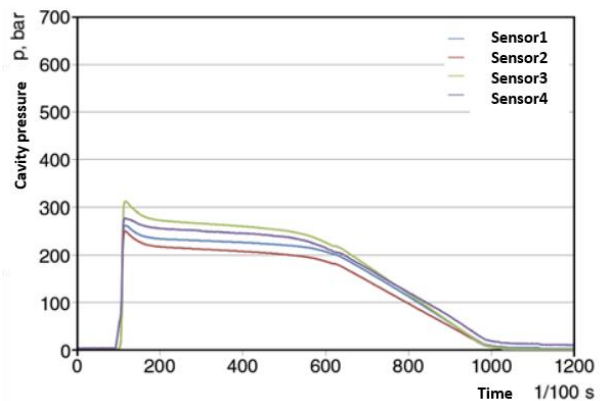


Abbildung 4. Werkzeuginnendruckkurve in Abhängigkeit von der Zeit

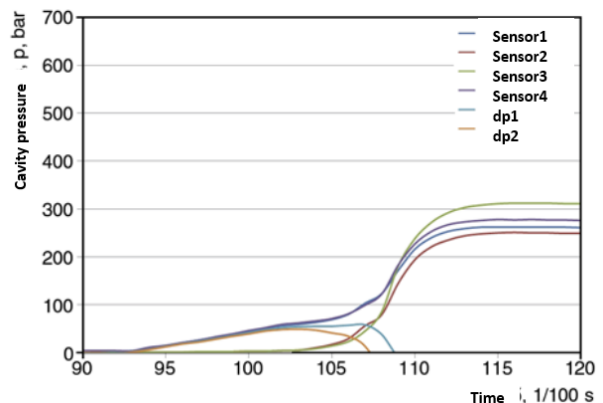


Abbildung 5. Werkzeuginnendruckkurve in Abhängigkeit von der Zeit

Die Schmelze erreicht die anschnittsnahen Sensoren in ca. 85ms, wobei ein messbarer Druck erst am Ende des Fließweges, nach 100ms, auftritt. Die gemessene Druckdifferenz zwischen den Sensoren ($dp1$ und $dp2$) in der Füllphase ist in einem kurzen Abschnitt nahezu konstant und proportional zur Materialviskosität, die verstrichene Zeit zwischen dem Anstieg zweier Signale ist proportional zur Einspritzgeschwindigkeit (Schergeschwindigkeit).

In Tabelle 2 sind die Δp - und Einspritzdruckwerte zusammengefasst.

Die in Abbildung 6 zu sehenden Kurven ähneln der Strömungskurve [3]. Die Erklärung dafür ist, dass die Schubspannung durch den Druckabfall und die Strömungsgeometrie bestimmt wird, während die Schergeschwindigkeit aus dem Durchflussvolumen und der Strömungsgeometrie stammt. Durch Erhöhung der Einspritzgeschwindigkeit ändert sich die gemessene Druckdifferenz zwischen den Sensoren nichtlinear, so dass die Materialviskosität abnimmt und dies mit dem System online gemessen werden kann. Der Einfluss der Materialtemperatur auf die Fließfähigkeit ist eindeutig. Es war ein geringerer Druck erforderlich, um den Formhohlraum mit Kunststoff höherer Temperatur zu füllen. Der registrierte Einspritzdruck zeigt eine ähnliche Tendenz, die eine ganz andere Erklärung hat. Die Grenze des an der Maschine eingestellten Einspritzdrucks liegt bei 1500 bar.

Tabelle 2.
Das Δp und der Einspritzdruck in
Abhängigkeit von der
Einspritzgeschwindigkeit

Temperatur	200°C		240°C		
	vfröccs [mm/s]	pfröccs [bar]	p1-p2 [bar]	pfröccs [bar]	p1-p2 [bar]
	40	380	40	334	34
	60	426	45	384	41
	80	462	54	391	45
	100	495	60	415	48
	120	523	61	438	50
	140	548	63	458	54

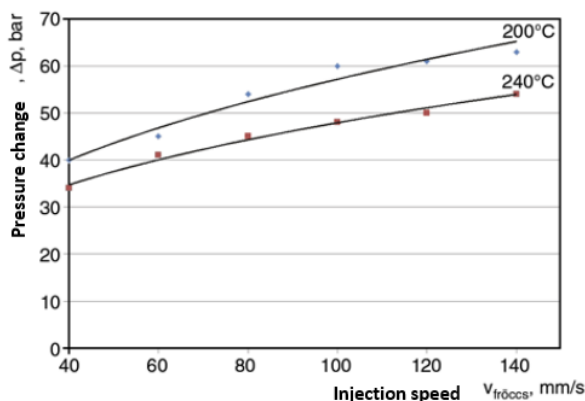


Abbildung 6. Δp -Werte in Abhängigkeit von der Einspritzgeschwindigkeit

Der gemessene Druck in der Einspritzphase liegt deutlich darunter, was bedeutet, dass dieser Parameter bei der Umformung keine Rolle spielt, der reale Einspritzdruck kann sich frei aufbauen. Der Unterschied lässt sich eher durch die Reaktionszeit der Maschine erklären, die sich je nach Maschinentyp zwischen 0,01 und 0,1s ändert. Durch die Erhöhung der Einspritzgeschwindigkeit nimmt die Trägheit der Schnecke zu, d.h. sie wird später anhalten. Die Umschaltung betrug bei allen Einstellungen 10mm, aber die Schnecke stoppte jedes Mal später. Abbildung 7 zeigt die Druckkurve des 1. Sensors in Abhängigkeit von der Einspritzgeschwindigkeit. (Um den Vergleich der Kurven zu erleichtern, verwenden wir im Folgenden die Messergebnisse des 1. Sensors).

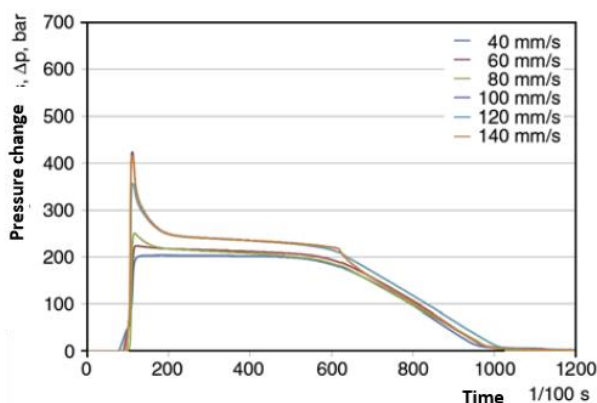


Abbildung 7. Werkzeuginnendruck in Abhängigkeit von der Einspritzgeschwindigkeit

Bei exakt gleichen Parametern hat die Einspritzgeschwindigkeit einen signifikanten Einfluss auf den Werkzeuginnendruck. Die Proben, die mit der Geschwindigkeit von 120 und 140 mm/s hergestellt wurden, weisen Grate auf, die sich durch den hohen Werkzeuginnendruck erklären lassen. Bei einem Grat muss berücksichtigt werden, ob er in der Füll- oder in der Haltephase entstanden ist. In diesem Fall wird durch den impulsartigen Druckstoß das Werkzeug leicht geöffnet, und die niedrigviskose Schmelze bildet einen Grat. In solchen Fällen kann der Grat durch Verringern der Einspritzgeschwindigkeit eindeutig verhindert werden, der Nachdruck hat darauf keinen Einfluss.

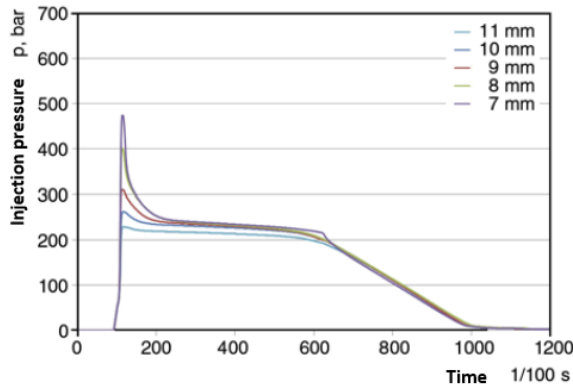


Abbildung 8. Der Einfluss des Umschaltpunktes auf den Einspritzdruck

Das Ändern des Umschaltpunktes brachte ähnliche Ergebnisse. In der Grundeinstellung erfolgt die Umschaltung von Einspritzdruck auf Nachdruck bei der 10-mm-Position. Erfolgte die Umschaltung früher, also bei 11 mm, reduzierte sie den Nachdruck nur geringfügig. Dies bedeutet, dass die Verdichtung in der Nachdruckphase erfolgte. Erfolgt die Umschaltung später, so zeigt die Einspritzgeschwindigkeit das gleiche Phänomen wie vorher. Da die Obergrenze des Einspritzdrucks bei 1500 bar lag, hat die Spritzgießmaschine den realen, aufgebauten Einspritzdruck nicht begrenzt. Durch die späte Umschaltung bildete sich ein Grat am Teil (Bild 8.)

Um den Prozess schneller zu analysieren, lohnt es sich, die Füll- und Kompressionsphase etwas genauer zu untersuchen (Abbildung 9.). Die in der Füllphase gemessenen Druckkurven sind gleich, die Linien überschneiden sich. Die Umschaltung von 11 und 10 mm knickt aufgrund der relativ frühen Umschaltung leicht ab. Auch in der Druckphase laufen die Kurven zusammen, während die Einspritzgeschwindigkeit die Kurvenverläufe steiler oder flacher werden ließ. Nach der Umschaltung verwenden wir bei allen Einstellungen 300 bar Nachdruck. Die Abnahme der Werkzeuginnendruckspitze über die Zeit lässt sich durch den Rückfluss des Materials erklären. Hier herrschte ein Werkzeuginnendruck von 200...250 bar. Dieser Unterschied lässt sich durch die Kompressibilität des Polymers, die nicht-newtonsche Strömung und die Strukturveränderungen im Strömungsquerschnitt während der Abkühlung erklären [4].

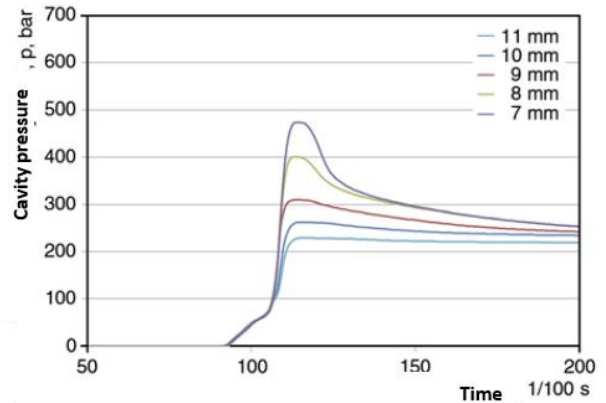


Abbildung 9. Auswirkung der Umschaltung auf den Werkzeuginnendruck

Die Haltezeit wird üblicherweise durch die Gewichtsermittlung des Teils bestimmt. Mit dem Werkzeuginnendruck-Messsystem kann die effektive Haltezeit schneller und genauer bestimmt werden (Abbildung 10). Da alle Parameter konstant sind, laufen die Kurven bis zum Ende der Haltezeit zusammen. Ist die Nachdruckzeit kürzer als die Siegelzeit, kann es zu einem plötzlichen Bruch kommen, der auch das Ergebnis des freien Materialflusses ist. Ist die Haltezeit länger als die Siegelzeit, so wird sie in der Kurve nicht dargestellt, da die im Hindernis eingefrorenen Materialteile weder Zu- noch Abfluss zulassen. Nach dem Siegelpunkt - in der Abkühlphase - ist die Steilheit der Kurven annähernd konstant, was im Abkühltest ausgewertet wird.

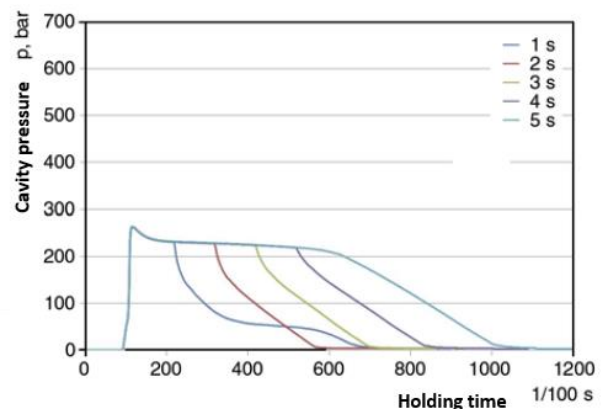


Abbildung 10. Der Einfluss der Haltezeit auf den Werkzeuginnendruck

Die Prüfung des Nachdrucks brachte sehr interessante Ergebnisse (Abbildung 11). Der Werkzeuginnendruck ist etwas niedriger als der eingestellte Wert. Der Grund dafür wurde bereits erläutert. Wenn der Nachdruck niedriger als der Werkzeuginnendruck ist, bildet sich ein Rückfluss im Anschnitt und der Druck sinkt. Wenn er jedoch höher ist, wird die Kompression durch den Nachdruck gebildet,

das Erreichen der Druckspitze wird langsamer und bleibt bis zur Abdichtung auf demselben Wert.

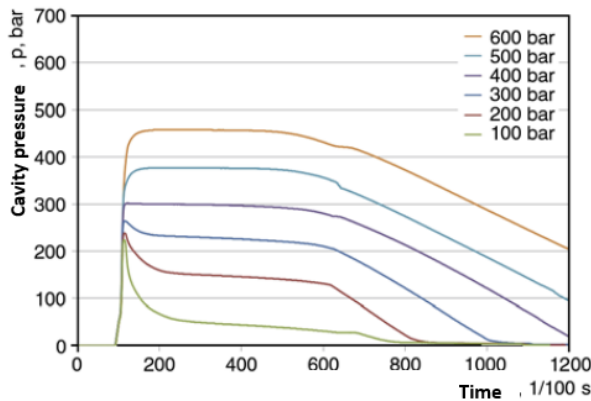


Abbildung 11. Auswirkung des Nachdrucks auf den Werkzeuginnendruck

Bei beiden Einstellungen sind die Probekörper mit Grat, obwohl der Werkzeuginnendruck deutlich höher war als bei der Änderung der Einspritzgeschwindigkeit. Der Grund dafür ist, dass die Randschicht des Teils während der Füllung kontinuierlich abkühlt. Wenn die Temperatur der Schalenschicht unter die Kristallisationstemperatur sinkt, dann umgibt eine feste Schale die Schmelze. Dementsprechend kann das geschmolzene Material die Randschicht nicht durchbrechen, in die Trennebene fließen und einen Grat bilden. Folglich sollte bei der Herstellung von dickwandigen Produkten der Nachdruckwert profiliert werden, um die Einfallstellen zu reduzieren, empfohlen wird, ihn mit der Zeit zu erhöhen.

CAVITYEYE
SENSOR INTO EVERY MOLD

SCRAPFREE PRODUCTION AND ONLINE QUALITY CONTROL WITH CAVITY EYE CAVITY MEASUREMENT SYSTEM

PRODUCTION AND DISTRIBUTION MEASURING INSTRUMENTS AND SENSORS

YOU CAN FIND FURTHER INFORMATION ON OUR WEBSITE WWW.CAVITYEYE.COM

Abbildung 12 zeigt den Einfluss der Materialtemperatur auf den Werkzeuginnendruck. Es ist sofort zu erkennen, dass mit steigender Temperatur des Kunststoffes der Werkzeuginnendruck zunimmt und auch die Abdichtung immer später erfolgt.

Grund dafür ist, dass die höhere Temperatur Schmelze später versiegelt.

Die Funktion in Abbildung 13 ist die erste zeitliche Ableitung der Kurven in Abbildung 12. Sie enthält viele interessante Punkte in Bezug auf die Prozessanalyse.

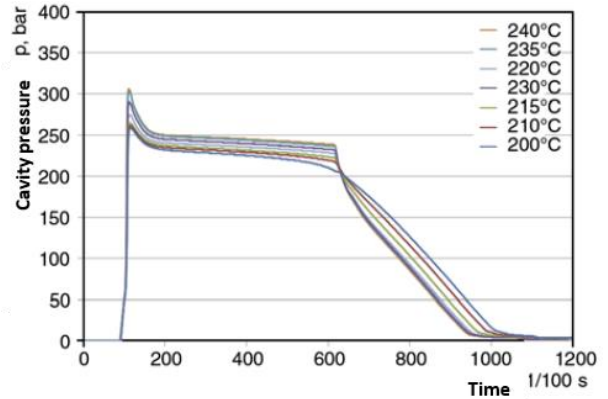


Abbildung 12. Einfluss der Materialtemperatur auf den Werkzeuginnendruck

Sie zeigt gut den Einfluss der Materialtemperatur auf den Formgebungsprozess. In der Kompressionsphase ist der erste und größte Peak in positiver Richtung zu sehen, dem ein negativer Peak folgt, dieser ist proportional zur Ausflussrate des Materials. In der Haltephase ist eine negative Steilheit zu erkennen, der Druck nimmt leicht ab. Die nächste negative Spitze führt zu einer stärkeren Änderung in Abhängigkeit von der Temperatur. Zwischen der Umschaltung und der Abkühlung zeigt sich ein kontinuierlicher Übergang, wenn die Abdichtung erfolgt, wenn die Haltezeit kurz ist, dann gibt es wieder einen negativen Peak. In der Abkühlphase ist die gesamte Steilheit konstant, da sich nach der Versiegelung die Abkühlgeschwindigkeit nicht wesentlich ändert.

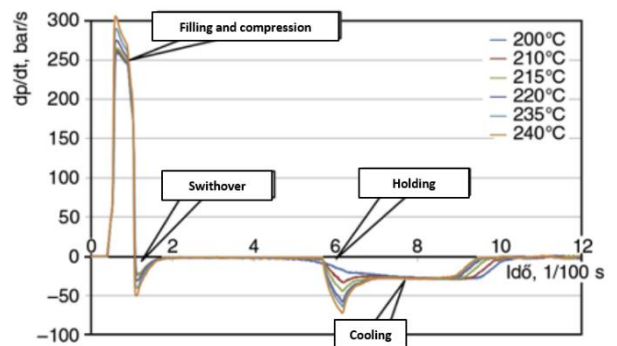


Abbildung 13. Erste Ableitung nach der Zeit der Werkzeuginnendruckkurven bei verschiedenen Materialtemperaturen

Die Werkzeugtemperatur beeinflusste die Kurven ähnlich wie die Materialtemperatur, erhöhte aber die Druckspitze nicht in gleichem Maße (Abbildung 14). Durch die Erhöhung der Werkzeugtemperatur verschiebt

sich die Siegelzeit wieder nach hinten. Bei 53°C reichen die 5s Nachdruckzeit nicht aus, das Material fließt schon vor dem Siegelvorgang aus der Kavität. In der Nachdruckphase nimmt der Druck bei einer höheren Werkzeugtemperatur weniger stark ab. Dies lässt sich durch die langsamere Abkühlung und die langsamere Abnahme des spezifischen Volumens erklären.

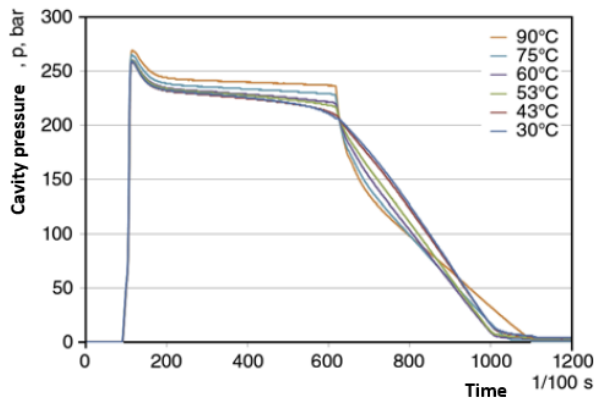


Abbildung 14. Der Einfluss der Werkzeugtemperatur auf den Innendruck

Durch Auswertung der Ableitung von Abbildung 14 kann die effektive Haltezeit und Abkühlgeschwindigkeit verifiziert werden (Abbildung 15). Die höhere Werkzeugtemperatur führt zu einer langsameren Abkühlung, was im Diagramm gut zu erkennen ist. Die Analyse der abgeleiteten Funktion wird im Algorithmus der Cavity-Eye-Regelung und des Interferenzprozesses verwendet.

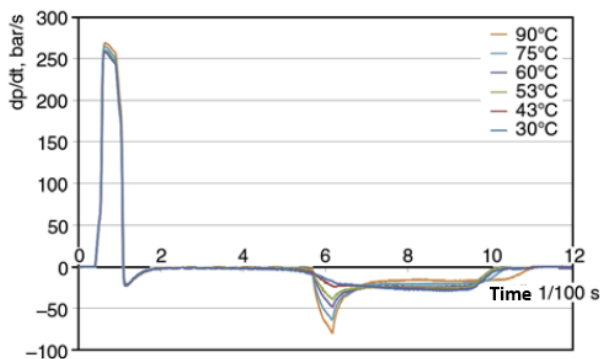


Abbildung 15. Erste Ableitung nach der Zeit der Werkzeuginnendruckkurven bei verschiedenen Werkzeugtemperaturen

4. Zusammenfassung

Als Ergebnis der Forschung der letzten Jahre haben wir ein Werkzeuginnendruck-Messsystem entwickelt, das die Entwicklung der Messzellen, der

Hardwarekomponenten und der Software umfasst. Das Gerät wurde nach den industriellen Anforderungen erstellt, ist aber auch für Labormessungen geeignet. In unserem Artikel haben wir die Möglichkeiten der Druckmessung und die Bedingungen des Spritzgießprozesses vorgestellt. Die Messergebnisse zeigen gut, wie jeder technologische Parameter die vier Phasen des Spritzgießens beeinflusst. Die Analyse und Steuerung des Spritzgießprozesses mit den Kurven und der erstmaligen Ableitung der Kurven sichert weitere Automatisierungsmöglichkeiten. Durch den Einsatz des Systems kann der Produktionsstart einfacher und schneller erfolgen. Im Falle der Herstellung von fehlerhaften Produkten hilft es, die Ursache des Problems zu bestimmen und den Ausschuss aufgrund der Instabilität der Technologie zu sortieren und zu trennen.

Bibliographie

- [1] Ming-Shyan Huang: Cavity pressure based grey prediction of the filling-to-packing switchover point for injection molding, *Journal of Materials Processing Technology*, 183, 419-424 (2007).
- [2] Ho Yin Wong, Ka Tsai Fung, Furong Gao: Development of a transducer for in-line and through cycle monitoring of key process and quality variables in injection molding, *Sensors and Actuators, A* 141, 712-722 (2008).
- [3] Sz "cs, A.: Rheological and thermal analysis of the filling stage of injection moulding, *eXPRESS Polymer Letters*, 6/8, 672-679 (2012).
- [4] Pantani, R.; Coccorullo, I.; Speranza, V.; Titomanlio, G.: Morphology evolution during injection molding: Effect of packing pressure, *Polymer*, 48, 2778-2790, (2007)