

Datengetriebene Qualitätsregelung beim Spritzgießen mit Inline-Qualitätsmessung

C. Jung^{†‡}, T. Magyar[‡], S. Strommer[‡], T. Glück[‡], W. Kemmettmüller[†]

[†] Automation and Control Institute (ACIN), TU Wien, Wien, Österreich, E-Mail: jung@acin.tuwien.ac.at

[‡] Center for Vision, Automation & Control, AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Wien, Österreich

Spritzgießen ist eine der wichtigsten Produktionsmethoden zur Herstellung von Kunststoffbauteilen. Zwar ist das Spritzgießen ein weitgehend automatisierter Prozess, doch können Änderungen von Material und Betriebsbedingungen die Produktion aus dem engen Qualitätsfenster führen [1]. Das einfach messbare Bauteilgewicht wird häufig als Qualitätsmaß verwendet. Aufgrund seines integralen Charakters können damit aber weder lokale Teilfüllungen noch Materialüberschuss am Bauteilrand (Grat) erkannt werden. Dieser Beitrag stellt einen geschlossenen Qualitätsregelkreis vor, der das Bauteilgewicht mit optischen Inline-Messungen von Füllgrad und Gratanzahl kombiniert.

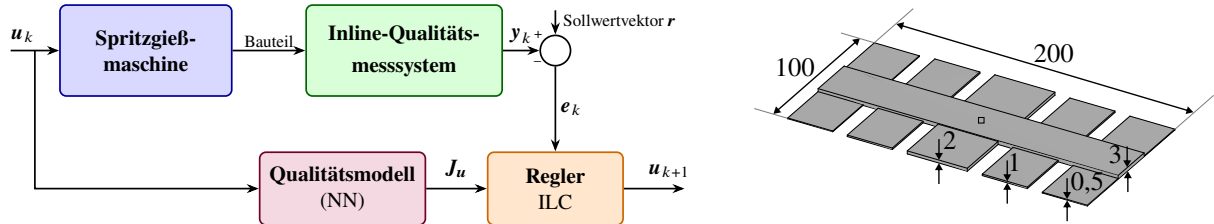


Abbildung 1: Architektur der zyklischen Qualitätsregelung (links) und kammförmiges Testteil (rechts); Maße in mm.

Abbildung 1 zeigt die Architektur der Qualitätsregelung, die von einem Produktionszyklus zum nächsten wirkt. Unter Verwendung der Maschineneinstellungen $u_k = [V_{s,k}, p_{H,k}, f_{cl,k}, v_{inj,k}]^T$ (Umschaltvolumen V_s , Nachdruck p_H , Schließkraft der Form f_{cl} , Einspritzgeschwindigkeit v_{inj}) fertigt die Spritzgießmaschine das Bauteil. Dieses wird mit dem Inline-Qualitätsmesssystem vermessen, womit die Qualitätsparameter $y_k = [y_{w,k}, y_{f,k}, y_{b,k}]^T$ (Bauteilgewicht $y_{w,k}$, Füllgrad $y_{f,k}$, Gratanzahl $y_{b,k}$) für das Bauteil bestimmt werden, siehe [4] für eine detaillierte Darstellung der Qualitätsmessung.

Der Kern der vorgestellten daten-basierten Qualitätsregelung ist ein Qualitätsmodell, welches die Auswirkung der Maschineneinstellungen u auf die Qualität y abbildet. Hierzu wird ein dreischichtiges neuronales MIMO-Netz f verwendet, welches anhand von Produktionsdaten eines statistischen Versuchsplans mit 480 Bauteilen trainiert wurde. Bekanntes Prozesswissen, etwa die monotone Abhängigkeit der Gratanzahl vom Nachdruck, wird über Monotoniebedingungen bereits im Training berücksichtigt. Damit werden physikalisch plausible lokale Gradienten des Qualitätsmodells sichergestellt.

Die Regelung der Bauteilqualität erfolgt von einem Zyklus zum nächsten. Dazu wird im Zyklus k die gemessene Qualität y mit dem Sollwert r verglichen. Mithilfe einer iterativ lernenden Regelung (ILC) wird anschließend ein Update Δu_k ermittelt, wobei die dazu notwendige Jacobi-Matrix J_u aus dem daten-basierten Qualitätsmodell bestimmt wird. Im Rahmen des Vortrags werden eine gradientenbasierte ILC (GB-ILC) und eine normoptimale ILC (NO-ILC) verglichen [3]. Dabei bestraft die NO-ILC zusätzlich Änderungen der Stellgrößen in Form der

Optimierungsaufgabe

$$\min_{\Delta \mathbf{u}_k} \|\mathbf{e}_k - \mathbf{J}_u \Delta \mathbf{u}_k\|_{\mathbf{Q}}^2 + \|\Delta \mathbf{u}_k\|_{\mathbf{R}}^2, \quad (1)$$

mit den Gewichtungsmatrizen $\mathbf{Q}$ und $\mathbf{R}$, womit ein gleichmäßigeres Konvergenzverhalten erreicht werden kann. Die Einhaltung von Maschinengrenzen wird durch geeignete Projektionen sichergestellt.

Der Nachweis der Funktion erfolgt durch Messungen an einer realen Spritzgießmaschine. Das verwendete Testteil (siehe Abbildung 1 rechts) ist durch ein besonders enges Prozessfenster charakterisiert. Insbesondere stellt die vollständige Füllung der dünnen äußeren Kavitätsbereiche ohne dass in den dickeren Bereichen Grate entstehen, eine wesentliche Herausforderung dar.

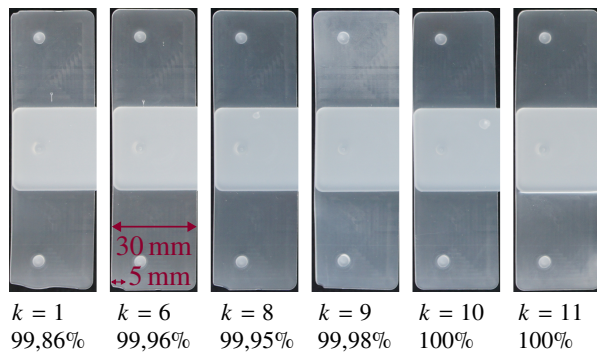


Abbildung 2: Nahaufnahmen der kritischen Bereiche des Testteils: Der Füllgrad steigt von 99,86% bei $k = 1$ auf 100% bei $k = 10$.

Ein Beispiel für die erfolgreiche Qualitätsregelung ist in Abbildung 2 dargestellt. Ausgehend von einem unvollständig gefüllten, untergewichtigen Bauteilen ($y_{f,1} \approx 99,86\%$) wird durch den vorgestellten Qualitätsregelkreis die gewünschte Bauteilqualität (Vollfüllung $y_{f,11} = 100\%$) bereits nach ca. 10 Spritzgießzyklen erreicht. Deutlich erkennbar ist, dass die Teilfüllung in den schwer füllbaren dünnen Bereichen vollständig verschwindet. Nach Wiederherstellung von Füllung und Bauteilgewicht behandelt die NO-ILC den zentralen Zielkonflikt: Sie senkt den Nachdruck zur Begrenzung der Gratanzahl und die

Schließkraft, sodass die vollständige Füllung erhalten bleibt. Die vorgestellte Qualitätsregelung kann sehr effizient berechnet werden und benötigt auf dem Prüfstandsrechner 8,1 ms. Dies ist deutlich weniger als die Zykluszeit von 30 s.

Im Vortrag werden die Vor- und Nachteile der beiden Versionen der ILC diskutiert und anhand von Messdaten validiert. Die Ergebnisse sind ausführlich in [4] dargestellt.

Literatur

- [1] Osswald, T. A.; Turng, L.-S.; Gramann, P.: *Injection Molding Handbook*, 2nd ed., Hanser, Munich, 2008. ISBN 978-3-446-40781-7.
- [2] Ginner, L.; Breuss, S.; Traxler, L.: Fast inline microscopic computational imaging, *Sensors*, 22(18), 7038, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22187038>
- [3] Owens, D. H.: Iterative learning control, in: *Encyclopedia of Systems and Control*, Springer, Cham, 2021. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5102-9_115-1
- [4] Jung, C.; Magyar, T.; Strommer, S.; Glück, T.; Kemmetmüller, W.: Data-driven cycle-to-cycle quality control of injection molding using inline visual inspection and part weight, SSRN, 2026. <https://doi.org/10.2139/ssrn.6880994>