

HVG-Mitteilung Nr. 2053

Ein automatisierungstechnisches Verfahren zur Optimierung der
Prozessführung von Feedern

M. Kaufmann, Inst. f. Angew. Informatik/Automatisierungstechnik, Karlsruhe

Vortrag im Fachausschuss IV der DGG am 14.10.2003 in Würzburg

1. Einleitung

Die Glashersteller stehen vor Herausforderungen, die neue Strategien zur Prozessführung der Anlagen erfordern. Einerseits verursachen Produktionsbedingungen wie der hohe Recyclinganteil und die flexiblere Nutzung der Anlagen Störungen. Andererseits nehmen die Qualitätsanforderungen und der Kostendruck zu. Daneben wird an neuen Messverfahren gearbeitet, die zusätzliche Informationen über den Prozess liefern. Neue Strategien werden benötigt, um unter diesen Bedingungen wirtschaftlich produzieren zu können. Auf dem Forschungsgebiet der *Computational Intelligence* wird die heute verfügbare hohe Computerleistung genutzt, um aus vorhandenen Informationen auf Basis intelligenter Rechenalgorithmen Schlussfolgerungen abzuleiten und neuartige Steuer- und Regelverfahren umzusetzen. Im folgenden wird ein solches Verfahren zur Ermittlung optimaler Führungsgrößen für einen Vorherd vorgestellt.

Die Regelung einer Brennstoffmenge zur Stabilisierung einer Temperatur ist eine der Reglerfunktionen am Vorherd. In der Regel verfügt jede Zone über einen solchen Regler. Für eine gleichmäßige, schwankungsarme Produktion mit der gewünschten Qualität ist nicht nur die Funktion dieser Regler wichtig. Entscheidend ist die Abstimmung der Führungsgrößen (Sollwerte), die den Reglern vorgegeben werden. In diesem Fall sind dies die Temperatursollwerte. Erst die behutsame Abstimmung des passenden Temperaturprofils längs des Vorherdkanals (vgl. Abbildung 1) gewährleistet die gewünschte homogene Temperaturverteilung am Auslauf. Veränderte Randbedingungen bei der Formgebung, Produktwechsel oder Änderungen der Glaszusammensetzung erfordern eine Neuabstimmung der Führungsgrößen. In Abbildung 1 ist die übliche manuelle Vorgehensweise dargestellt. In der Praxis betrachtet ein Vorherdexperte die verschiedenen Messgrößen, beispielsweise die Temperaturmesswerte am Kanalauslauf, und verstellt die Führungsgrößen der einzelnen Regler solange in kleinen Schritten, bis die gewünschte Temperaturverteilung erreicht ist. Angesichts der komplexen Wärme- und Stofftransportvorgänge im Kanal erreicht der Experte sein Ziel mit erstaunlich wenigen Eingriffen. Dennoch benötigt die Korrektur wertvolle Produktionszeit, zeitweilige Störungen oder die Produktion von Ausschuss sind unvermeidbar. Darüber hinaus kann der Experte nur auf bereits aufgetretene Abweichungen reagieren, jedoch nicht vorausschauend eingreifen.

Zur Lösung dieser Probleme wird ein Verfahren benötigt, mit dem passende Führungsgrößen vorausschauend berechnet werden können.

2. Verfahren

Ein Verfahren zur Ermittlung optimaler Führungsgrößen wird in [KA02] vorgestellt. Es besteht aus einem neuentwickelten Bilanzmodell und einem neuen Optimierungsverfahren.

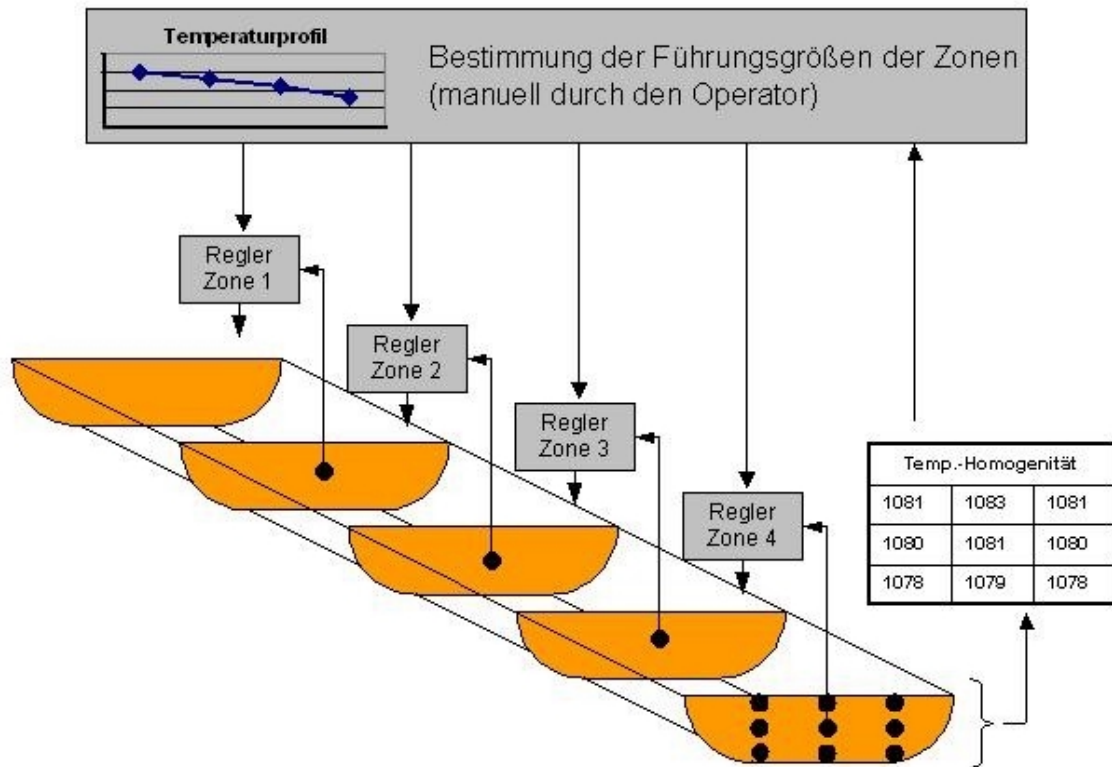


Abbildung 1: Manuelle Bestimmung des Temperaturprofils.

Mit dem Bilanzmodell werden stationäre Zustände bei konstanten Eingangsgrößen (u.a. die Wärmeströme durch die Oberflächenzonen) berechnet. Gegenüber einem rechenintensiven CFD-Modell ist das entwickelte Modell soweit vereinfacht, dass einige wichtige lokale Größen (z.B. Temperaturen im Glasbad) mit hinreichender Genauigkeit berechnet werden. Wegen der Rechenzeiteinsparung können automatisierungstechnische Online-Anwendungen realisiert werden. Temperaturführungsgrößen können also unabhängig vom realen Vorherd auf ihre Auswirkung hin „getestet“ werden, die Wartezeit entfällt.

Die Aufgabe des Anlagenexperten, die schrittweise Abstimmung der Führungsgrößen, wird durch ein Suchverfahren unterstützt. Durch wiederholte Korrektur der Führungsgrößen und deren „Test“ am Modell ermittelt das Suchprogramm eine Einstellung, die am realen Vorherd ein akzeptables Ergebnis erwarten lässt. Da die zur Verfügung stehende Zeit bei einer Online-Anwendung begrenzt ist, ist eine „blinde“ Suche nicht sinnvoll. Vielmehr soll dem Suchverfahren das Erfahrungswissen des Anlagenexperten für eine „zielgerichtete“ Suche nutzbar gemacht werden. Das Beispiel in Abbildung 2 verdeutlicht Inhalt und Nutzung dieses Erfahrungswissens.

Der Experte betrachtet z.B. die neun Messwerte der Thermoelementmatrix am Kanalauslauf. Dabei kann er folgende Abweichungen vom gewünschten Temperaturiveau feststellen:

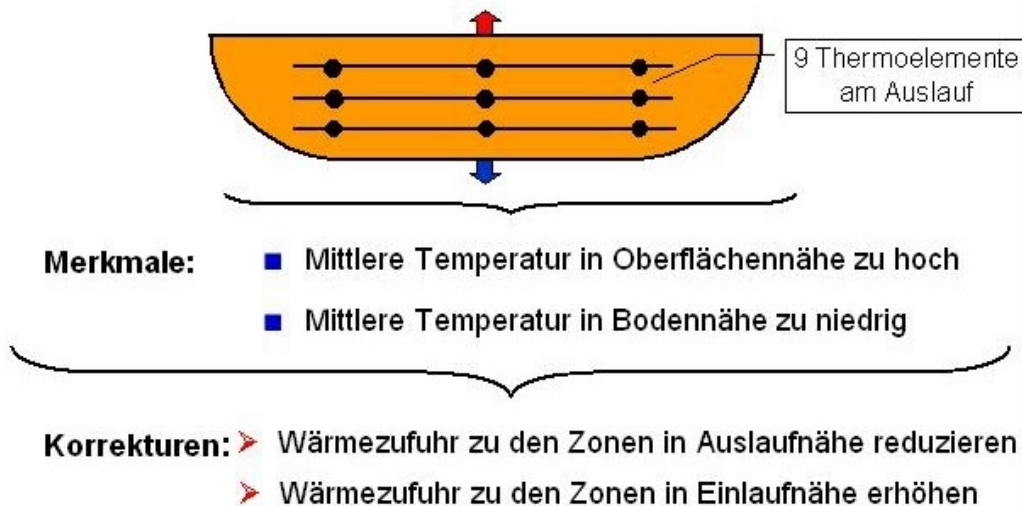


Abbildung 2: Erfahrungswissen, Beispiel

- Die Temperatur in Oberflächennähe ist zu hoch und
- die Temperatur in Bodennähe ist zu niedrig.

In diesem Fall wird der Experte folgende Korrekturen vornehmen:

- Wärmezufuhr zu den Zonen in Einlaufnähe reduzieren, d.h. betreffende Temperaturführungsgrößen absenken und
- Wärmezufuhr zu den Zonen in Auslaufnähe erhöhen, d.h. betreffende Temperaturführungsgrößen anheben.

"Wärmezufuhr erhöhen" in Einlaufnähe bewirkt eine Erwärmung bis in Bodennähe, die resultierende zu hohe Temperatur in Oberflächennähe wird durch „Wärmezufuhr reduzieren“ am Auslauf wieder abgesenkt.

Durch verknüpfte Programmanweisungen, sog. Merkmals-, Verknüpfungs-, Einfluss- und Korrekturoperatoren [KA02], werden derartige Vorschriften einmalig – auch von Personen ohne Programmierkenntnisse – eingegeben. Simulationen zeigen, dass die Suche unter Anwendung derartiger Expertenkenntnisse wesentlich schneller zu Ergebnissen führt.

Zufriedenstellende Ergebnisse setzen eine Anpassung des Bilanzmodells an einen gegebenen Vorherd voraus. Mit einem Adaptionsverfahren werden anhand einiger Messdatensätze der Anlage Parameter des Modells mit so abgestimmt, dass eine hohe Übereinstimmung erreicht wird [KA02]. Diese Anpassung kann weitestgehend automatisch erfolgen.

3. Anwendung

Das beschriebene Verfahren zur Bestimmung optimaler Führungsgrößen unterstützt zunächst den Anlagenexperten in den Fällen, in denen er bisher manuell eine veränderte Einstellung suchte:

- bei beabsichtigten Änderungen des Betriebs, z.B. bei Produktwechseln oder
- bei veränderten Anforderungen der Formgebung, z.B. höhere/niedrigere Formgebungstemperatur erforderlich.

In diesen Fällen werden vom Verfahren frühzeitig passende Führungsgrößen ermittelt, die dann vom Experten übernommen werden können.

Neue Anwendungsfelder ergeben sich durch die Anwendung neu entwickelter Messverfahren. Besonders die Online-Messung der Viskosität (z.B. [FK98, JV98]) und die Messung von Eigenschaften, die das Wärmeübertragungsverhalten beeinflussen (z.B. Redoxmessung [SC02], Spektrometer [BR96]) sind dabei von Interesse. Veränderte Eigenschaften der Schmelze – beispielsweise hervorgerufen durch schwankende Qualität der Recyclingscherben – führen zu veränderten Wärme- und Stofftransportverhältnissen im Kanal. In der Folge ändert sich die Temperaturverteilung am Kanalauslauf, die Führungsgrößen müssen korrigiert werden. In der Praxis können diese Gründe für plötzlich auftretende Qualitätsprobleme mangels Messtechnik höchstens vermutet werden. Die Zusammenhänge lassen sich jedoch in Modellrechnungen deutlich zeigen.

Ist ein entsprechendes Messgerät vorhanden, können mit dem vorgestellten Verfahren frühzeitig veränderte Führungsgrößen ermittelt werden, große Abweichungen werden vermieden. Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse einer entsprechenden Modellrechnung für eine Änderung der Temperaturabhängigkeit der Viskosität. Eine solche Änderung kann durch eine veränderte Glaszusammensetzung hervorgerufen werden und bewirkt im Modellbeispiel die im linken Diagramm dargestellte Verschiebung der Temperaturmesswerte 431-433 am Kanalauslauf (vgl. „vor Änderung“—„nach Änderung“)

Durch eine Änderung der Temperaturabhängigkeit der Viskosität ändern sich bei konstanter Temperatur lokale Strömungsgeschwindigkeiten im Glasbad. Wegen der damit verbundenen veränderten Einwirkungszeit der Heizung bzw. Kühlung ändert sich die Temperaturverteilung.

Wird die Veränderung gemessen, so können die passenden, veränderten Temperaturführungsgrößen für die einzelnen Zonensegmente 1S-4M, dargestellt im rechten Diagramm, ermittelt werden (vgl. „vor Änderung“—„nach Optimierung“). Bei Freigabe dieser Führungsgrößen ergeben sich die links dargestellten neuen Temperaturmesswerte 432-433 (vgl. „nach Optimierung“), die sehr nahe bei den ursprünglichen Werten (vgl. „vor Änderung“) liegen. Negative Auswirkungen der veränderten Gemengezusammensetzung bzw. Glaseigenschaften sind damit weniger wahrscheinlich.

Vor einem breiten Online-Einsatz sind sowohl auf dem Gebiet der Viskositätsmessung als auch auf dem Gebiet der Bestimmung von Wärmetransporteigenschaften weitere Untersuchungen durch Mess- und Werkstofftechniker erforderlich.

Das beschriebene Verfahren wurde zunächst für einen geraden Vorherdkanal entwickelt und ist grundsätzlich auf Vorherde anderer Bauart oder ähnliche wärmetechnische Anlagen übertragbar.

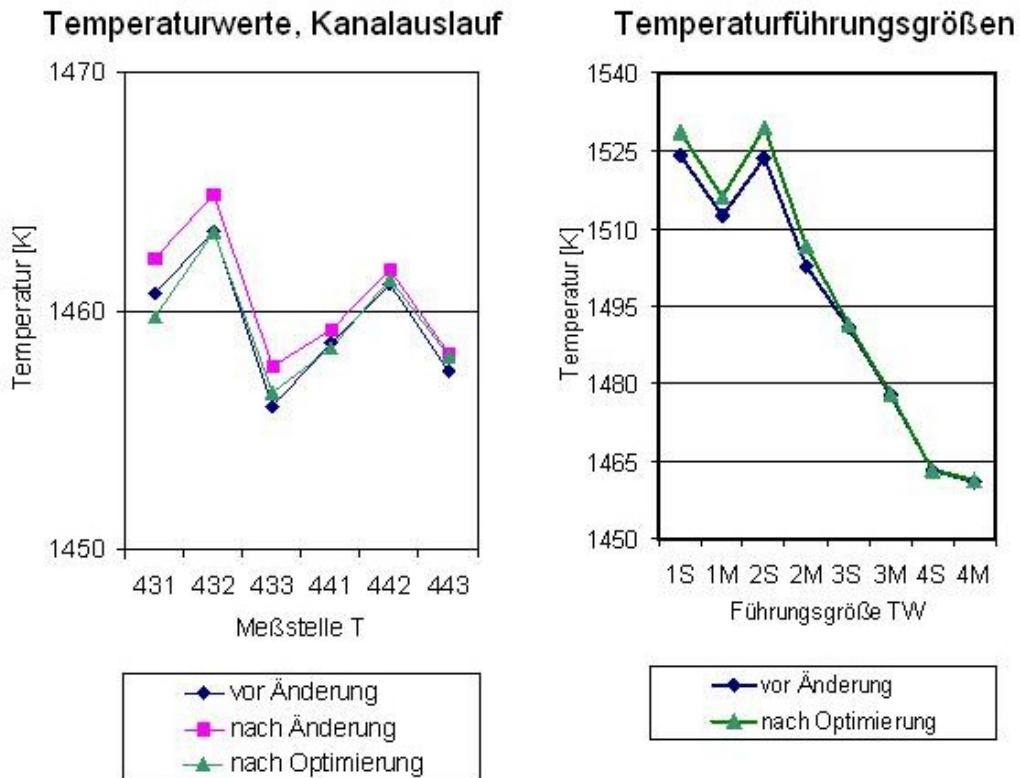


Abbildung 3: Ermittlung optimaler Temperaturführungsgrößen bei einer gemessenen Änderung der Temperaturabhängigkeit der Viskosität.

4. Zusammenfassung

Mit intelligenten Computeralgorithmen der *Computational Intelligence* können aus Prozessdaten neue Informationen gewonnen und neuartige Verfahren zur Prozesssteuerung realisiert werden.

Ein Verfahren, das aus einem Bilanzmodell und einem Suchverfahren besteht, wird zur vorausschauenden Ermittlung optimaler Führungsgrößen für einen Vorherd genutzt. Durch das Suchverfahren werden schrittweise neue Modelleingangsgrößen berechnet und in kurzer Zeit am Modell „getestet“. Ist eine passende Einstellung gefunden, können die ermittelten Sollwerte vom Anlagenexperten übernommen werden. Zur Beschleunigung der Suche wird dem Suchverfahren Erfahrungswissen des Experten in einer durch den Computer verarbeitbaren Form zur Verfügung gestellt.

Ein Anwendungsgebiet liegt in der Ermittlung optimaler Führungsgrößen beispielsweise vor Produktwechseln oder bei veränderten Anforderungen der Formgebung. Die bei manuellen Korrekturen notwendige Einstellzeit wird verkürzt, Auswirkungen von Störungen werden verringert. Mit einer entsprechenden Messtechnik ist darüber hinaus eine vorausschauende Reaktion auf veränderte Materialeigenschaften möglich, Beispiele sind die Temperaturabhängigkeit der Viskosität und Eigenschaften, die die Wärmetransportverhältnisse beeinflussen.

Die Weiterentwicklung des Verfahrens erfordert die Unterstützung durch interessierte Anlagenbetreiber.

5. Literatur

- BR96 Breitfelder, Th.: Erprobung eines Mehrkanalpyrometers in Behälterglas-schmelzen. Weimar: Bauhaus-Universität, Diplomarbeit, 1996.
- FK98 Flick, C., Kaufmann, M., Richter, Th., Strack, A., Zimmermann, H.: Verfahren zur Messung und Regelung der Viskosität einer Flüssigkeit, Deutsche Patentanmeldung DE 198 40 868.4, 1998.
- JV98 Jovanov, E., Vracar, V., Lazic, A., Dupalo, R.: A Prototype Glass Viscosity Measurement System. In: glass machinery plants & accessories (1998) Heft 3, S. 123-125.
- KA02 Kaufmann, M.: Ein neues Konzept zur modellgestützten Online-Optimierung der Glasproduktion. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 971, Düsseldorf: VDI Verlag, 2002, ISBN 3-18-397108-9.
- SC02 Schaeffer, H.A.: Redox Control of Industrial Glass Melting. 104th Annual Meeting of the American Ceramic Society (ACerS), St. Louis, MO, 28.4. - 2.5.2002.