



Die Reproduzierbarkeit eines Prozesses ist keine konstante Größe (© Engel)

Wie reproduzierbar ist die Reproduzierbarkeit?

Über den richtigen Umgang mit Maschinenfähigkeit und Toleranzgrenzen

Unter Reproduzierbarkeit versteht man die Fähigkeit, Teile mit jeweils identischen Eigenschaften herzustellen. Wie auch bei anderen Fertigungsverfahren kommt dieser Fähigkeit beim Spritzgießen eine große Bedeutung zu, weil sie die Wirtschaftlichkeit entscheidend mit beeinflusst. Daher wird oftmals gefordert, Produktionsanlagen oder deren Komponenten schon im Vorfeld danach zu beurteilen, ob sie einen reproduzierbaren Prozess sicherstellen. Nur: wie?

Hohe Reproduzierbarkeit über einen längeren Zeitraum setzt im Allgemeinen eine hohe Robustheit gegen plötzlich oder allmählich veränderliche Störgrößen voraus. Solche Störgrößen können schwankende Umgebungsbedingungen oder der Verschleiß von Maschine und Werkzeug sein. Auch Materialeigenschaften, die chargenbedingten Schwankungen unterliegen, stellen Störgrößen für den Prozess dar.

Doch wer weiß schon, welche Störgrößen sich im Laufe eines Prozesslebens bemerkbar machen werden? In welchem Maß sie auftreten und, vor allem, wie stark sie die Qualität der Bauteile beeinflussen werden? In der Praxis werden diese Zukunftsszenarien meist außer Acht gelassen, man beschränkt sich auf eine Bestandsaufnahme der aktuellen Wiederholgenauigkeit. Doch auch diese er-

weist sich bei näherer Betrachtung als nicht trivial.

Vergleiche mit Standardabweichungen und Schwankungsbreiten

Für eine schnelle Beurteilung der Reproduzierbarkeit werden üblicherweise die Schussgewichte einer bestimmten Anzahl aufeinanderfolgender Zyklen ermittelt. Diese Werte dienen als Basis, um die Standardabweichung oder die Schwankungsbreite zu berechnen (**Bild 1**). Beide Größen werden oft als Prozentwert vom mittleren Schussgewicht ausgedrückt – sie lassen sich dadurch besser mit Erfahrungswerten vergleichen.

So gelten Schwankungsbreiten als sehr zufriedenstellend, wenn sie unter 0,1% des mittleren Teilegewichts liegen. Der Nachteil dieser Betrachtungsweise

besteht darin, dass die Schwankungsbreite nur aus zwei Werten berechnet wird: dem größten und dem kleinsten gemessenen Wert. Was sich dazwischen abspielt, wird nicht berücksichtigt. Diese kleine Unzulänglichkeit sei aber verziehen, denn der Kurzzeit-Reproduzierbarkeitstest, bei dem z.B. 50 Zyklen betrachtet werden, verschweigt in Wahrheit noch viel mehr – dazu später mehr.

Im letzten Jahrzehnt haben Maschinen- und Prozessfähigkeitsuntersuchungen zunehmende Verbreitung erlangt. Dabei wird unter definierten Randbedingungen eine bestimmte Anzahl an Teilen entnommen und an diesen eine für die spätere Funktion wichtige Eigenschaft gemessen. Diese Eigenschaft kann beispielsweise eine kritische Abmessung sein. Aus den Messwerten wird im Falle

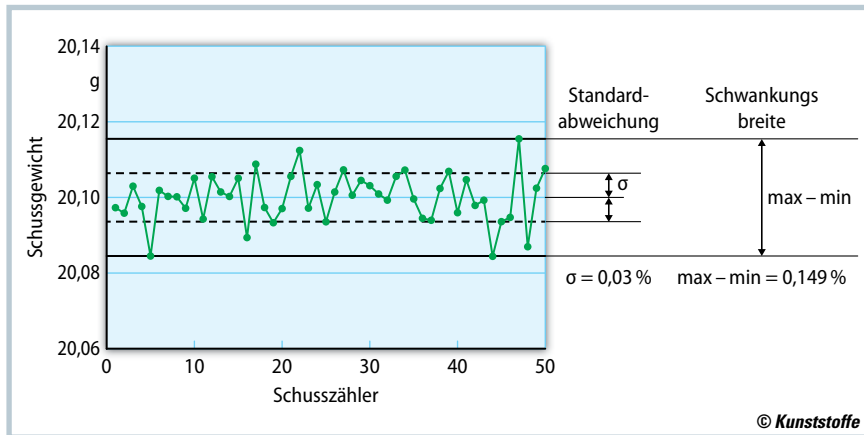


Bild 1. Der Verlauf der Schussgewichte sowie die Standardabweichung und die Schwingungsbreite von 50 aufeinanderfolgenden Zyklen werden üblicherweise für eine schnelle Beurteilung der Reproduzierbarkeit herangezogen (Quelle: Engel)

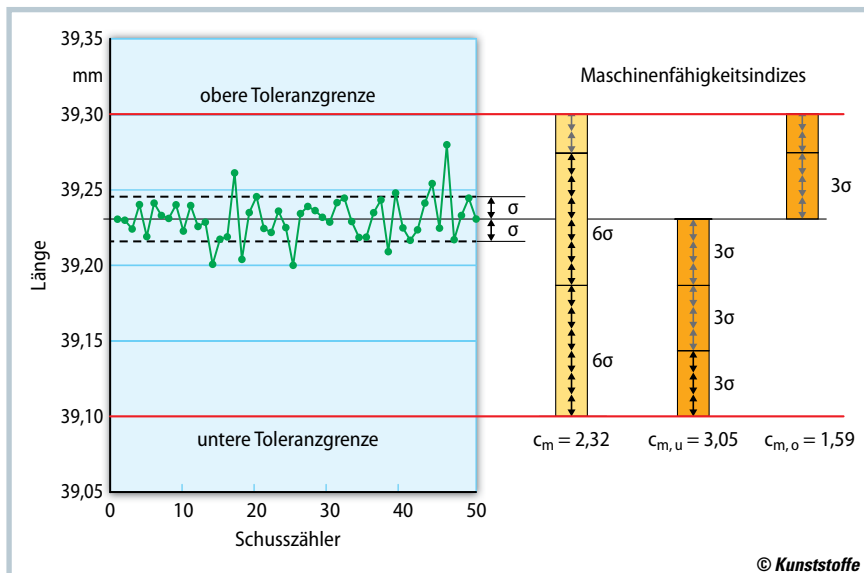


Bild 2. Aus dem Verlauf des Längenmaßes von 50 aufeinanderfolgenden Zyklen und der sich daraus ergebenden Standardabweichung (als Doppelpfeil dargestellt) lassen sich die Maschinenfähigkeitsindizes c_m , $c_{m,u}$ und $c_{m,o}$ berechnen (Quelle: Engel)

einer normalverteilten Stichprobe die oben erwähnte Standardabweichung ermittelt. Daraus und aus der für die betrachtete Eigenschaft zulässigen Toleranz werden Maschinenfähigkeitsindizes berechnet.

Der Maschinenfähigkeitsindex c_m sagt aus, wie oft das Sechsfache der Standardabweichung in die vorgegebene Toleranzbreite passt. In einem Fallbeispiel ist die sechsfache Standardabweichung als sechs übereinander gestapelte Doppelpfeile in einem gelben Rechteck illustriert. Wie zu erkennen ist, findet das gelbe Rechteck rund 2,3-mal zwischen der unteren und der oberen Toleranzgrenze Platz. Üblicherweise wird ein Wert von $c_m > 1,67$ gefordert (**Bild 2**).

Der untere Maschinenfähigkeitsindex $c_{m,u}$ sagt aus, wie oft das Dreifache der Standardabweichung zwischen Sollwert und unterer Toleranzgrenze passt, der obere $c_{m,o}$ demgegenüber zwischen Sollwert und oberer Toleranzgrenze. In dem Fallbeispiel ist die dreifache Standardabweichung als drei übereinander gestapelte Doppelpfeile in einem orangefarbenen Rechteck dargestellt. Wie zu erkennen ist, findet das orange Rechteck rund 3-mal zwischen unterer Toleranzgrenze und Mittelwert Platz, jedoch nur 1,59-mal zwischen Mittelwert und oberer Toleranzgrenze (**Bild 2**).

$c_{m,u}$ und $c_{m,o}$ beschreiben also die Lage der Messwerte innerhalb der Toleranzen. Je größer der Index, desto weiter

sind die Messwerte von der entsprechenden Toleranzgrenze entfernt. Dementsprechend ist ein kleiner Wert problematisch, daher wird der kleinere aus den beiden Werten $c_{m,u}$ und $c_{m,o}$ als kritischer Maschinenfähigkeitsindex $c_{m,k}$ bezeichnet. Im Beispiel (**Bild 2**) wäre also $c_{m,o}$ der kritische Wert. Auch dafür wird meist ein Wert $> 1,67$ gefordert. Während die Streuung der Messwerte mit einem c_m von 2,3 die Anforderungen erfüllt, ist der $c_{m,o}$ mit 1,59 zu niedrig – die Messwerte liegen zu nahe am oberen Grenzwert. Nun würde man versuchen, durch Änderung der Einstellparameter die Schwindung so zu beeinflussen, dass die Länge etwas reduziert wird. Gelingt dies nicht, ist eine Geometrieänderung im Werkzeug erforderlich.

Die Tücken der Reproduzierbarkeitsmessung

Hat der Spritzgießer nun einen Reproduzierbarkeitstest durchgeführt, erhält er also zumindest einen der zuvor beschriebenen Zahlenwerte. Damit lässt sich der Prozess – oder besser gesagt eine Momentaufnahme daraus – beurteilen. Die Praxis hat gezeigt, dass Ergebnisse einer Reproduzierbarkeitsmessung oft einer genaueren Überprüfung nicht standhalten. Es gibt eine Menge von Fehlerquellen, deren häufigste an dieser Stelle aufgezeigt werden sollen. »

Die Autoren

Dipl.-Ing. Josef Gießauf leitet die Abteilung Entwicklung Prozesstechnologie bei der Engel Austria GmbH, Schwertberg/Österreich; josef.giessauf@engel.at

Christian Maier, M.Sc., ist Projektleiter in der Abteilung Entwicklung Prozesstechnologie bei Engel; christian.maier@engel.at

Service

Literatur & Digitalversion

- » Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/1377808

English Version

- » Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at www.kunststoffe-international.com

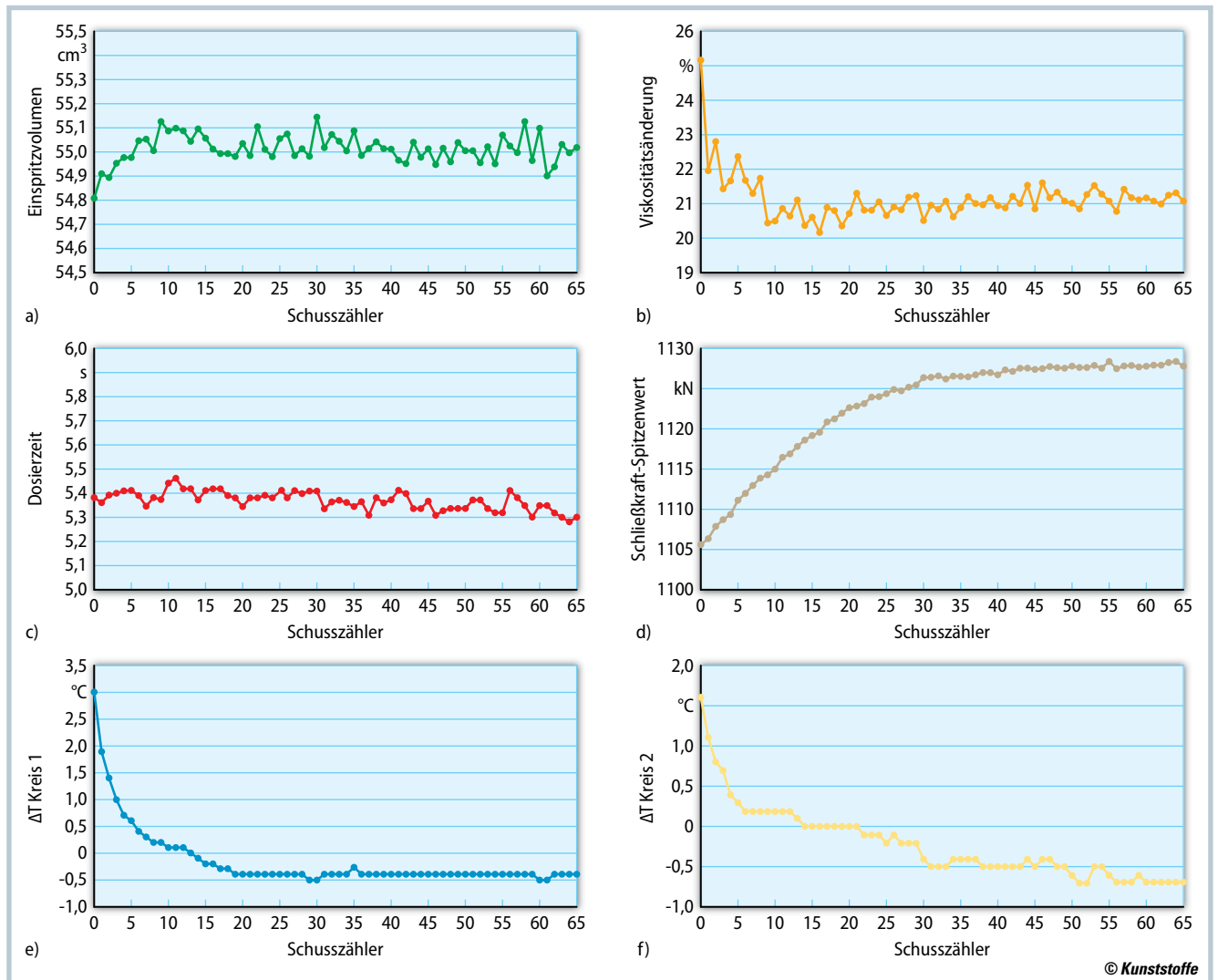


Bild 3. Um zu beurteilen, ob ein Prozess eingeschwungen ist, ist es notwendig, mehrere Parameter Schuss für Schuss zu beobachten. Die Werte lassen sich in der Steuerung der Spritzgießmaschine (CC300) grafisch darstellen (Quelle: Engel)

Der erste Fehler passiert bei Messungen „auf die Schnelle“. Wenn Mitarbeiter sich am Ende eines mit Werkzeugbemusterungen gefüllten Tages entschließen, noch schnell Formteile aus 50 Schuss zu entnehmen und auf die Waage zu legen. Oft stellt sich dann zu spät – nämlich wenn die Schussgewichte vorliegen – oder im Extremfall nie heraus, dass der Prozess zum Zeitpunkt der Teileentnahme nicht eingeschwungen war (**Bild 3**). Vor Reproduzierbarkeitstests sollte daher immer geprüft werden, ob der Prozess in einem stabilen Zustand ist (**siehe Praxistipp: Ist der Prozess eingeschwungen?**).

Fehlerhafte Messungen

Die nächste Falle lauert beim Wiegen. Man könnte meinen, dass der erfolgreiche Umgang mit einer Waage in Küche

oder Badezimmer schon als Befähigungsnachweis für die Gewichtsbestimmung bei den Reproduzierbarkeitstests reicht. Welch ein Irrtum! Wie jede Mess-tätigkeit muss auch das Wägen gelernt sein. Es gilt, die Messmittelfähigkeit sicherzustellen und Zugluft zu vermeiden. Sinnvollerweise wird nicht in der Produktionsumgebung gewogen, sondern in einem Labor, wobei die Teile nicht über den Wägeteller hinausragen dürfen.

Zu beachten ist auch, dass unterschiedliche Lagerzeiten nach der Entnahme durch die unterschiedliche Feuchteaufnahme das Ergebnis verfälschen können – ebenso wie eine elektrostatische Aufladung der Teile. Speziell der letzte Punkt ist nicht allgemein bekannt. Es empfiehlt sich daher, die Formteile mit ionisierter Luft zu entladen.

Die suboptimale Einstellung

Wer die Hinweise bis hierhin beachtet, erhält vermutlich schon ein korrektes Ergebnis – genauer gesagt: ein Ergebnis, das unter den gegebenen Randbedingungen seine Richtigkeit hat. Eine der wesentlichen Randbedingungen ist der Betriebspunkt, also die Summe aller Einstellungen, die der Benutzer gewählt hat. Um es noch ein wenig komplizierter zu machen: Die Reproduzierbarkeit ist abhängig von der Einstellung. Die Werkzeugtemperatur etwas verringert, die Einspritzgeschwindigkeit erhöht, und schon kann sich die Reproduzierbarkeit ändern. Sowohl im Kurzzeit-Versuch als auch – vermutlich noch viel mehr – längerfristig.

In der Praxis wird es schwer gelingen, bei der Prozessoptimierung auch gleich die Robustheit und somit die Reprodu-

zierbarkeit mit zu optimieren. Meist reicht es schon aus, zumindest eine Optimierung nach den üblichen Regeln des Spritzgießens durchzuführen. Zwei wesentliche Indikatoren für die Güte einer Einstellung seien hier exemplarisch erwähnt.

- Erstens: Kann der Einspritzantrieb dem gewählten Einspritzgeschwindigkeitsprofil folgen? Dies wäre beispielsweise nicht der Fall, wenn die zum Schutz für das Werkzeug gewählte Spritzdruckgrenze erreicht wird.
- Zweitens: Ist die Spritzdruckkurve von Schuss zu Schuss in ihrer prinzipiellen Form gleich? Dies wäre beispielsweise nicht der Fall, wenn kalte Pfropfen in der Düse Schwankungen zu Beginn des Einspritzvorgangs verursachen würden.

Moderne Maschinensteuerungen wie die CC300 der Engel Austria GmbH helfen dem Praktiker, Antworten auf diese Fragen zu finden und damit wesentliche Voraussetzungen für die Robustheit des Spritzgießprozesses zu gewährleisten (siehe **Praxistipp S. 66**).

Reproduzierbarkeitstests mit Prozessdaten

Messen ist aufwendig, dauert und kostet Geld. Warum also nicht in erster Näherung statt Messdaten vom Bauteil zunächst einmal Prozessdaten – also Istwerte von der Maschine – zur Beurteilung der Reproduzierbarkeit verwenden? Ein gleichmäßiges Polster, eine stabile Dosierzeit sagen doch schon viel über die Qualität der Maschine aus, oder?

So bequem diese Vorgangsweise auch sein mag: Ein Zusammenhang mit der Formteilqualität lässt sich damit nicht herstellen. Besonders kritisch wird es, wenn ein Maschinenfähigkeitsindex aus Prozessdaten errechnet wird. Dafür sind, wie eingangs beschrieben, Toleranzgrenzen erforderlich. Für Prozessdaten sind diese aber in keiner Bauteilzeichnung »

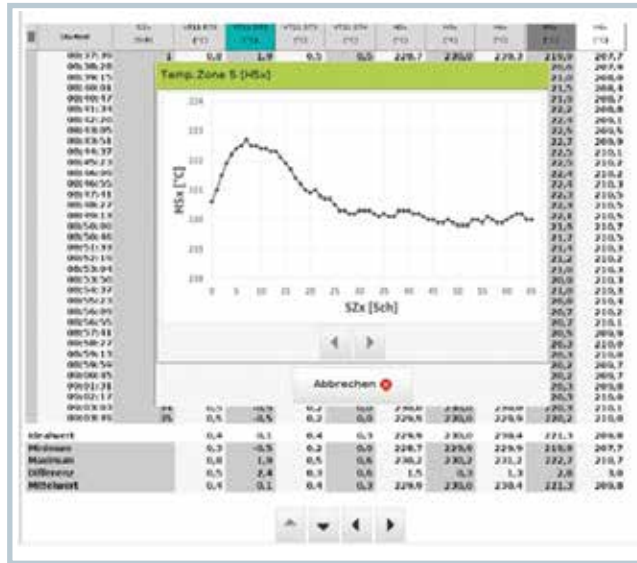


Bild 4. Aus dem Prozessdatenprotokoll kann jederzeit eine Quick-Grafik generiert werden (© Engel)

Praxistipp

Ist der Prozess eingeschwungen?

Zu beurteilen, ob ein Prozess eingeschwungen ist, ist in den meisten Fällen schwierig. Für eine derartige Beurteilung ist es notwendig, mehrere Parameter Schuss für Schuss über einen längeren Zeitraum zu beobachten. Die aktuelle Maschinensteuerung CC300 von Engel bietet die Möglichkeit, Prozessparameter grafisch darzustellen. Dadurch wird es möglich, Veränderungen im Prozess bzw. den Zustand des Prozesses auf einen Blick in bis zu sechs Graphen auf einer Bildschirmseite zu beurteilen. Das Suchen von Änderungen in scheinbar endlosen Spalten gehört damit der Vergangenheit an.

Maschinenspezifische Größen oder prozessspezifische Parameter lassen erkennen, ob ein Prozess eingeschwungen ist oder nicht. Beim Anfahren der Maschine zeigt sich (**Bild 3**), dass die prozessspezifischen Parameter Einspritzvolumen (3a), Viskositätsänderung (3b) und Dosierzeit (3c) bereits nach wenigen Zyklen stabil sind.

Bei den Temperaturdifferenzen zwischen Vor- und Rücklauf im Kühlkreis des Werkzeugs (3e und 3f) ist zu beobachten, dass nicht beide Temperierkreise zum gleichen Zeitpunkt eingeschwungen sind. In diesem Fall lässt sich der Unterschied dadurch erklären, dass die beiden Temperierkreise unterschiedliche Bereiche des Werkzeugs versorgen. Ist die zu temperierende Masse größer, dauert es länger, bis sich eine stabile Temperaturdifferenz einstellt.

Bei Kniehebemaschinen ändert sich der Schließkraft-Spitzenwert (3d), während das Werkzeug auf seine Einsatztemperatur gebracht wird, bedingt durch die thermische Ausdehnung. Daher eignet sich dieser Parameter besonders zur Beurteilung, ob das Werkzeug bereits durchgewärmt ist.

Für den Fall, dass sechs Graphen nicht ausreichen oder man während des Prozesses den Verlauf eines anderen, beliebigen Parameters im Prozessdatenprotokoll untersuchen und grafisch darstellen lassen möchte, braucht der Bediener nur in die Spalte des jeweiligen Parameters zu tippen. Beispielsweise kann die so erstellte Quick-Grafik zeigen, dass mindestens 25 Zyklen notwendig sind, bis die Temperatur einer Zylinderzone eingeschwungen ist (**Bild 4**).

Praxistipp

Istwert-Anzeige in der Sollwert-Grafik

Im Prozessdatenprotokoll und in den dazugehörigen Grafiken wird ein Wert pro Zyklus aufgezeichnet. Über den Verlauf von Werten innerhalb eines Zyklus geben diese Aufzeichnungen jedoch keine Auskunft. Allerdings kann der Benutzer sich zusammen mit dem Sollwert-Profil der Einspritzgeschwindigkeit die Istwert-Kurven für Einspritzgeschwindigkeit und Einspritzdruck anzeigen lassen (Bild 5). Dies ermöglicht es, auf einfache Art und Weise zu überprüfen, ob und wie der Einspritzantrieb der eingestellten Einspritzgeschwindigkeit folgt. Darüber hinaus kann der Verlauf des Spritzdrucks beobachtet und auf Unregelmäßigkeiten (Druckspitzen während des Einspritzens, durch kalte Pfropfen bedingte Unterschiede zu Beginn der Druckkurve etc.) untersucht werden.

Die sogenannte Istwert-Anzeige in der Sollwert-Grafik, die von rechts nach links zu lesen ist, ist in drei Bereiche unterteilt (Bild 5). Bereich a, dunkelgrau hinterlegt, kennzeichnet das Durchfahren der Kompressionsentlastung. Bereich b, hellgrau hinterlegt, bildet die geschwindigkeitsgeregelter Phase des Einspritzvorgangs ab. Am Übergang von b zu c befindet sich der Umschaltzeitpunkt. Das wiederum bedeutet, dass Bereich c einen Teil der druckgeregelten Phase des Spritzgießprozesses darstellt. Die hier dargestellten Kurven zeigen, dass der Einspritzantrieb dem vorgegebenen Profil folgt und es zu keinen Auffälligkeiten, wie z.B. Druckspitzen, während des Einspritzens kommt.

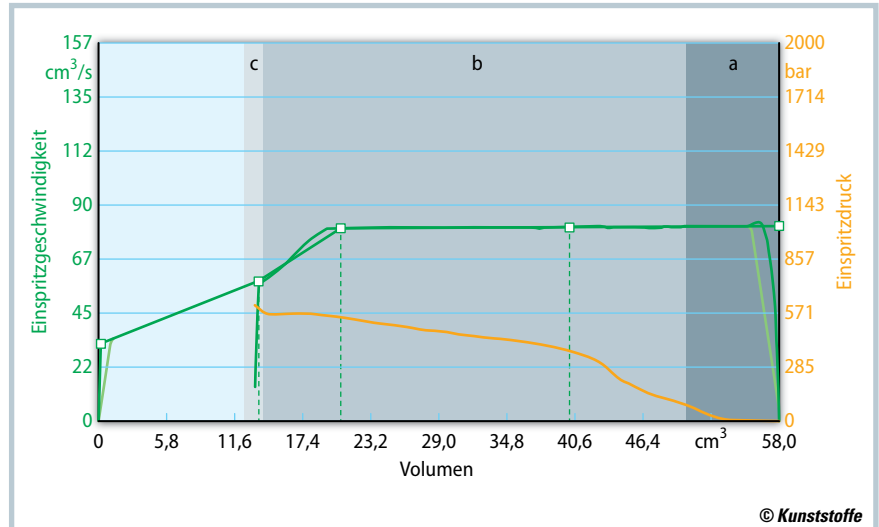


Bild 5. Die Darstellung der Istwert-Kurven ermöglicht es, auf einfache Art und Weise zu überprüfen, ob und wie der Einspritzantrieb der eingestellten Einspritzgeschwindigkeit folgt. Die Grafik ist von rechts nach links zu lesen. Der Bereich a kennzeichnet das Durchfahren der Kompressionsentlastung, b das geschwindigkeitsgeregelter Einspritzen und c einen Teil der druckgeregelten Phase des Spritzgießprozesses (Quelle: Engel)

zu finden. Sie müssen frei erfunden werden, was uns direkt zum nächsten Punkt führt.

Der lockere Umgang mit Toleranzgrenzen

„Das einfachste Mittel, um die Prozessfähigkeit eines gegebenen Prozesses zu steigern, besteht darin, die Spezifikationsgrenzen zu lockern: Je größer die Differenz zwischen OSG und USG, desto mehr Standardabweichungen lassen sich darin unterbringen.“ Diese Erklärung aus Wikipedia [1] sollte nicht als Anleitung zum Selbstbetrug verstanden werden. Wenn die Toleranzgrenzen frei erfunden sind und damit die gewünschte Maschinenfähigkeit nicht erreicht wurde, liegt es nahe, die Grenzen einfach neu festzulegen. Dass eine solche Vorgehensweise völlig sinnlos ist, muss hier wohl nicht extra betont werden.

Assistenzsysteme zur Prozessregelung

Wer sich der beschriebenen Tücken bewusst ist, kann diesen fortan tunlichst aus dem Weg gehen und erhält damit einen Wert für die Reproduzierbarkeit, der tatsächlich aussagekräftig ist – zumindest für den Moment. Denn wie eingangs schon erwähnt, ist es nicht abschätzbar, wie sich Störgrößen zukünftig verändern und wie sie infolgedessen die

Qualität der Bauteile und die Reproduzierbarkeit des Prozesses beeinflussen werden.

Eine Lösung für dieses Problem bieten neue intelligente Assistenzsysteme zur Prozessregelung wie „iQ weight control“ von Engel: Das Modul bildet einen Regelkreis, der den bekannten Einspritz- und Nachdruckreglern überlagert ist. Wenn sich Störgrößen ändern, passt es Einspritz-, Umschalt- und Nachdruckparameter in Echtzeit, also noch im selben Zyklus, an, sodass das Schussgewicht weitestgehend konstant bleibt [2]. Das Softwarepaket ist Teil des „inject4.0“-Programms, mit dem Engel seinen Kunden den Weg zur smarten Fabrik ebnet.

Bei Prozessen, die im Kurzzeit-Versuch eine mangelhafte Reproduzierbarkeit aufweisen, kann die Software sofort eine Verbesserung herbeiführen. Ist die Reproduzierbarkeit im Kurzzeit-Versuch hingegen sehr gut, wird man im ersten Moment oft keine weitere Verbesserung durch den Einsatz der Software feststellen können. Dennoch wacht iQ weight control ständig über die Reproduzierbarkeit des Einspritzvolumens und greift zuverlässig dann ein, wenn sich etwas ändert. Das System ist also die Versicherung, dass der Prozess auch in Zukunft sicher läuft. Das Gute bei dieser Art der Versicherung: Sie wartet nicht auf eine Schadensmeldung, um aktiv zu werden. Sie wird schon aktiv, bevor Ausschuss entsteht. ■