

Effektives Einfahren eines Spritzgießprozesses

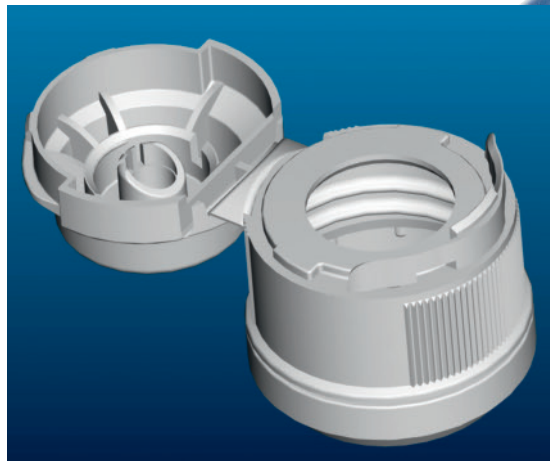
Design of Experiments. Spritzgießverarbeiter streben nach robusten Prozessen mit geringen Schwankungen von Zyklus zu Zyklus und zu vernachlässigenden Reaktionen auf äußere Störungen. Um die Prozessgüte sicher einschätzen zu können, benötigen sie einen gut strukturierten Ansatz und hohe Datenqualität. Statistische Versuchsplanung ist die effektivste Methode, diese Ziele zu erreichen.

**STEFAN MOSER
DANIEL MADL**

Beim Einfahren, bei der Fehlersuche oder bei der Optimierung technischer Prozesse verfahren die Mitarbeiter in der Produktion häufig noch nach dem COST-Prinzip („Change one parameter at a time“). Dieses Vorgehen erschwert es allerdings, Projektplan, Budget und Ressourcen vernünftig zu planen. DoE-Software („Design of Experiments“) definiert und visualisiert in vergleichsweise wenigen Experimenten Ursache und Wirkung von Prozessen. So lassen sich mit geringem Aufwand effiziente Versuchspläne erzeugen und nach dem Abarbeiten der Versuchspläne mithilfe grafischer Auswertungen die Einflüsse dieser Parameter (Faktoren) bewerten.

Ebenso wichtig wie die Einschätzung der Faktoren und Regelgrößen ist die Qualität der Messmethoden. Liefert eine Messmethode keine zuverlässigen Ergebnisse, so muss die ganze Versuchsreihe in Frage gestellt werden. Aus diesem Grund deckt die statistische Versuchsplanung diesen Bereich ebenfalls ab. Gerade im Spritzgießen beeinflussen nicht kontrollierbare Parameter, z.B. Schwankungen der Luftfeuchte und Raumtemperatur, oftmals das Prozessergebnis. Der softwareunterstützte Ansatz bietet die Möglichkeit, diese Faktoren zu dokumentieren und ihren Einfluss zu gewichten.

ARTIKEL ALS PDF unter www.kunststoffe.de
Dokumenten-Nummer KU110022



DoE auf den Spritzgießprozess übertragen

Doch kann die DoE-Methode auch für das Einfahren eines komplexen Spritzgießprozesses verwendet werden? Die Antwort soll das im Folgenden geschilderte Experiment geben. Nur wer in der Lage ist, schnell robuste Prozesse zu installieren, kann mit der nötigen Flexibilität auf die Anforderungen des Marktes reagieren.

Den Versuch, DoE auf den Spritzgießprozess zu übertragen, unternahm im vergangenen Jahr in einem Gemeinschaftsprojekt die Seaquist Closures Löffler GmbH, Freyung, und die FH Rosenheim. Die Versuchsplanung wird mit der Software Modde V8.0 (Hersteller: Umetrics Inc., Kinnelon/USA) erarbeitet, für die Durchführung wird eine Spritzgießmaschine des Typs ES 330/50 HL (Hersteller: Engel Austria GmbH, Schwertberg/Österreich) mit einem Schnecken-durchmesser von 35 mm und einer ma-



Anhand dieses Flaschendeckels wird die Tauglichkeit des Design of Experiments untersucht

(Quelle Zeichnung: Seaquist Closure Löffler GmbH; Foto: Adelhölzner Alpenquellen GmbH)

ximalen Schließkraft von 500 kN verwendet. Bei dem betrachteten Formteil handelt es sich um einen Verschlussdeckel für Getränkeflaschen (Titelbild) aus einem PP-Random-Copolymer.

Der Vorteil der statistischen Versuchsplanung ist, dass sie ähnlich wie das Kochen nach Rezept abläuft. Die einzelnen Zutaten, sprich die Projektstufen

- Problemformulierung: Festlegen der Faktoren und Zielgrößen;
- Screening: Ermittlung der linearen Einflüsse der Faktoren;
- Optimierung: Konzentration auf die wesentlichen Faktoren sowie Untersuchung von Wechselwirkungen und ggf. deren nicht linearen Einfluss;
- Robustheitstests: Untersuchung eines potenziellen Optimums auf Prozesssicherheit

werden nacheinander ver- bzw. abgearbeitet.

Erster Schritt: Die Formulierung des Problems

Die veränderlichen Größen (Faktoren) werden zu Beginn den Bewertungskriterien (Zielgrößen) gegenübergestellt. Während die Anzahl der Faktoren die Summe der Versuche erheblich beeinflusst, ist die Anzahl der Bewertungskriterien von untergeordneter Bedeutung. Oft ist es hilfreich, die Faktoren und Bewertungskriterien in einem Ishikawa-Diagramm („Fischgräten-Diagramm“) grafisch darzustellen.

Im günstigsten Fall handelt es sich um quantitative Faktoren, sodass sich einfache geometrische Versuchspläne erzeugen



Bild 1. Die Qualität der Flaschenverschlüsse wird mit einem 3D-Koordinatenmesstisch geprüft

(Foto: Seaquist Löffler)

lassen. Schwieriger wird es, wenn es sich um qualitative Parameter handelt, z.B. „Maschine 1“ oder „Maschine 2“. Diese qualitativen oder attributiven Parameter erhöhen die Zahl der Versuche, weil sie die Generierung der Versuchspläne erschweren.

Wenn die Faktoren erfasst sind, gilt es, deren Effekt abzuschätzen. Der Effekt beschreibt die Wirkung eines Faktors auf die Zielgröße in der Variation zwischen minimaler und maximaler Einstellung. Da in einem Versuchsplan alle Faktoren simultan verändert werden, ist es schwierig, diese Wirkung abzuschätzen. Es ist daher sinnvoll, die Faktorvariationen in einer Gruppe erfahrener Mitarbeiter zu diskutieren und festzusetzen.

Beim Einrichten des Spritzgießprozesses für die Verschlussdeckelproduktion wird der Einfluss aller Faktoren bewusst detailliert und mit geringem Aufwand untersucht, insbesondere der Einfluss der Werkzeugtemperatur, der Kühlzeit, der Masstempertur sowie des Nachdruck- und des Einspritzgeschwindigkeitsprofils. So wie in der Maschine werden auch im Versuchsplan die Profile jeweils mit zehn Stützstellen (Anfangswert + 9 Stützstellen) programmiert. Der Anfangs- und Endwert des Profils sind bekannt. Zudem gibt der Prozess einen abfallenden Verlauf vor.

Würde man die Profile mit den Realzahlen programmieren, bräuchte man wegen des abfallenden Profilverlaufs sehr viele zusätzlich programmierte Rahmenbedingungen. Diese Faktor-Restriktionen schränken die Auswahl der Versuchsmuster stark ein und erhöhen die Zahl der nötigen Versuche erheblich. Aus diesem Grund wird eine mathematische Formulierung der Profile gewählt, die es erlaubt, ganz auf Einschränkungen zu verzichten. So errechnet sich das Druckprofil aus dem gegebenen Anfangswert und der maximalen Abnahme des Drucks in bar pro Stützstelle:

$$\Delta p = \frac{(\text{Anfangswert}_{\max.} - \text{Endwert}_{\min.})}{(\text{Anzahl Stützstellen} - 1)} \quad (1)$$

Für jede Stützstelle ergibt sich somit die Variation:

$$\text{Stützstelle } (i+1) = \text{Stützstelle } (i) - (\min. 0; \max. \Delta p) \quad (2)$$

Da somit die einzelnen Stützstellen unabhängig voneinander quantitativ beschrieben werden können, reduziert sich der Versuchsumfang erheblich. Das Profil der Einspritzwerte wird in gleicher

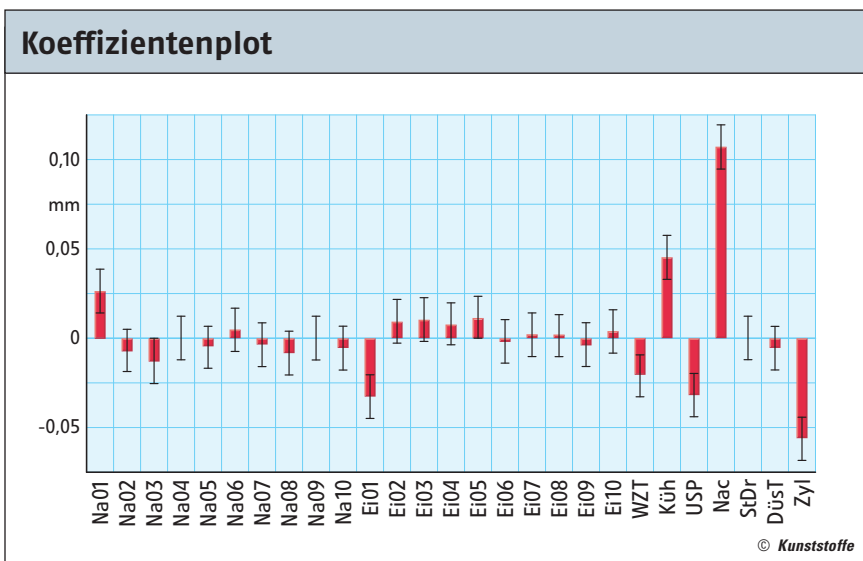


Bild 2. Die Modellbildung erfolgt grafisch über die Auswahl der Faktoren im Koeffizientenplot. Als Grundlage dienen die berechnete Verbesserung im Modell (Bild 3) und der Kenntnisstand des Optimierens (Software: Modde; Bearbeiter: S. Moser)

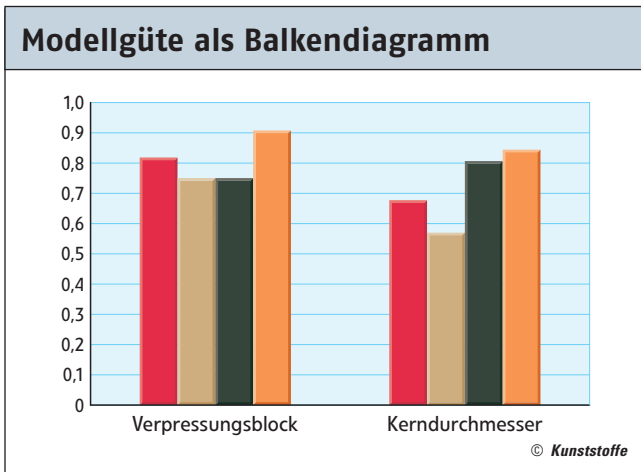


Bild 3. Die Darstellung des Bestimmungsmaßes (rot), der Modellvorhersagegüte (beige), Validität (schwarz) und Reproduzierbarkeit (orange) ermöglicht hier die Einschätzung der Modellgüte in einer Grafik

Wechselwirkungen oder quadratischen Termen zu einem späteren Zeitpunkt nicht zulassen.

Der Versuchsplan dieses Screening-Experiments umfasst zwei Profile mit jeweils zehn Stützstellen sowie sieben quantitative Faktoren. Daraus ergeben sich 27 Faktoren, aus denen mit dem Fraktionalen Faktoriellen Design ein Versuchsumfang von 64 + 3 Center-Point-Versuchen generiert wird. Diese Anzahl ergibt sich aus dem Versuchsdesign, in dem alle Faktoren unabhängig voneinander und ohne Wechselwirkung auf zwei Niveaus (min./max.) untersucht werden. In einer Machbarkeitsstudie werden die Ver-

Weise formuliert. Die Liste der Faktoren ist in Tabelle 1 festgelegt. Als Zielgrößen werden sowohl geometrische Größen, verschiedene Kriterien der Oberflächengüte als auch einige gemessene Prozessgrößen verwendet.

Absicherung des Versuchsplans

Der Versuchsplan ist eine Art Fundament, auf dem alle weiteren Analysen aufgebaut werden. Da der Versuchsumfang auf ein Minimum reduziert wird, ist es essenziell, die Zielgrößen nahezu aller Experimente zu messen; ansonsten kann aus den Ergebnissen nur schlecht ein Modell der Realität berechnet werden.

Um die minimalen und maximalen Parameterwerte zu bestimmen, sind somit einige wenige in den Versuchsplan integrierte Vorversuche notwendig – in der Regel zwei Versuche, bei denen alle Faktoren auf niedrigstem bzw. höchstem Niveau eingestellt sind. Damit lässt sich sicherstellen, dass die Variation der Faktoren im Ergebnis noch messbar ist. Andernfalls muss die Variation einzelner Faktoren in einem angepassten Versuchsplan reduziert werden.

Zweiter Schritt: Das Screening

Meist beginnt die Versuchsplanung mit einer größeren Zahl von Faktoren, die zunächst nur auf ihren linearen Einfluss hin untersucht werden. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass man mit wenigen Experimenten herausfindet, welche Faktoren die Zielgrößen in welchem Ausmaß beeinflussen. Ebenso lässt sich eine erste Aussage über die Eignung der Bewertungskriterien und der Messtechnik treffen. Da der Fokus der Untersuchung sich auf lineare Zusammenhänge richtet, wird hier auf Versuche verzichtet, die die Wechselwirkungen zwischen den Fakto-

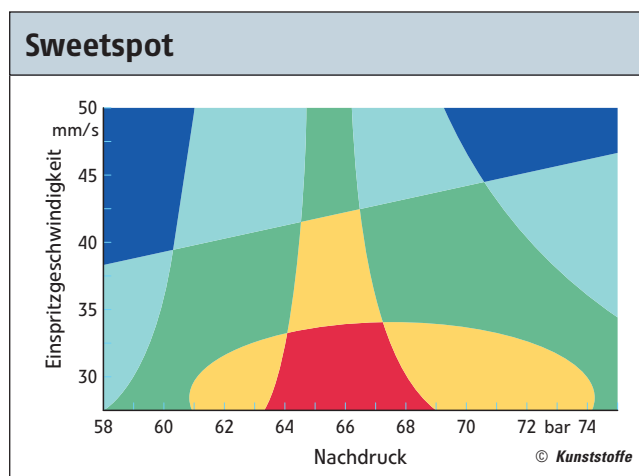


Bild 4. Im Diagramm ist der Erreichungsgrad der Zielfunktionen (verschiedene Farben) dargestellt. Im roten Bereich sind alle vorab definierten Zielfunktionen erfüllt (Software: Modde; Bearbeiter: S. Moser)

ren beschreiben. Wollte man alle Faktoren und deren Wechselwirkungen untersuchen, wäre der Versuchsaufwand sehr viel höher. Für die vollständige lineare Beschreibung der Faktoren gilt als Faustformel

$$\text{Anzahl der Versuche} = 2^{\text{Anzahl der Faktoren}} \quad (3)$$

Die sogenannten Center-Point-Versuche dienen dazu, die Reproduzierbarkeit der Messmethode und des Prozesses gegenüber der Variation im Versuchsplan zu beurteilen. Um den Einfluss der jeweiligen Faktoren zu ermitteln, werden diese um einen Mittelwert gleichermaßen nach oben und nach unten variiert.

Zur Erstellung des Versuchsplans wird ein gebräuchliches geometrisches Versuchsdesign gewählt. Dieses „Fraktionale Faktorielle Design“ beinhaltet wesentlich weniger Experimente als klassische vollfaktorielle Designs. Zum Vergleich: Wollte man diese Versuchsplanung mit einem vollfaktoriellen Design auf zwei Niveaus durchführen, benötigte man 227 Experimente. Andere Designs, z. B. Plackett Burmann Designs, kämen zwar mit einer geringeren Zahl an Versuchen (28+) aus, würden aber die Untersuchung von

schlüsse in einem 1-Kavitäten-Werkzeug gespritzt. Um einen Prozess mit konstanten Masse- und Werkzeugtemperaturen zu gewährleisten, werden vorab 30 Formteile produziert. Im Anschluss werden zwei Formteile produziert und gekennzeichnet. Nach der Durchführung der Versuche werden die Formteile an einem Koordinatenmesstisch (Bild 1, Typ: Mitutoyo Euro C-574; Hersteller: Mitutoyo Messgeräte GmbH) vermessen.

Die Werte werden in die Software übertragen; damit kann die „Blackbox“ zwischen Faktoreinstellung (Ursache) und Zielgrößen (Wirkung) grafisch modelliert werden. Das Modell selbst ist eine Differenzialgleichung, die mathematische Formulierung der abgeleiteten Zusammenhänge aus den Ergebnissen des Versuchsplans. Da das Screening nur die linearen Zusammenhänge untersucht, werden nur die linearen Effekte aller Faktoren in einem Balkendiagramm dargestellt (Bild 2).

Nach dem Paretoprinzip machen etwa 20 % der Faktoren 80 % der Wirkung aus. In Anlehnung an diese These kann ein Faktor ohne Einfluss (Signifikanz) grafisch entfernt werden, während die Soft-

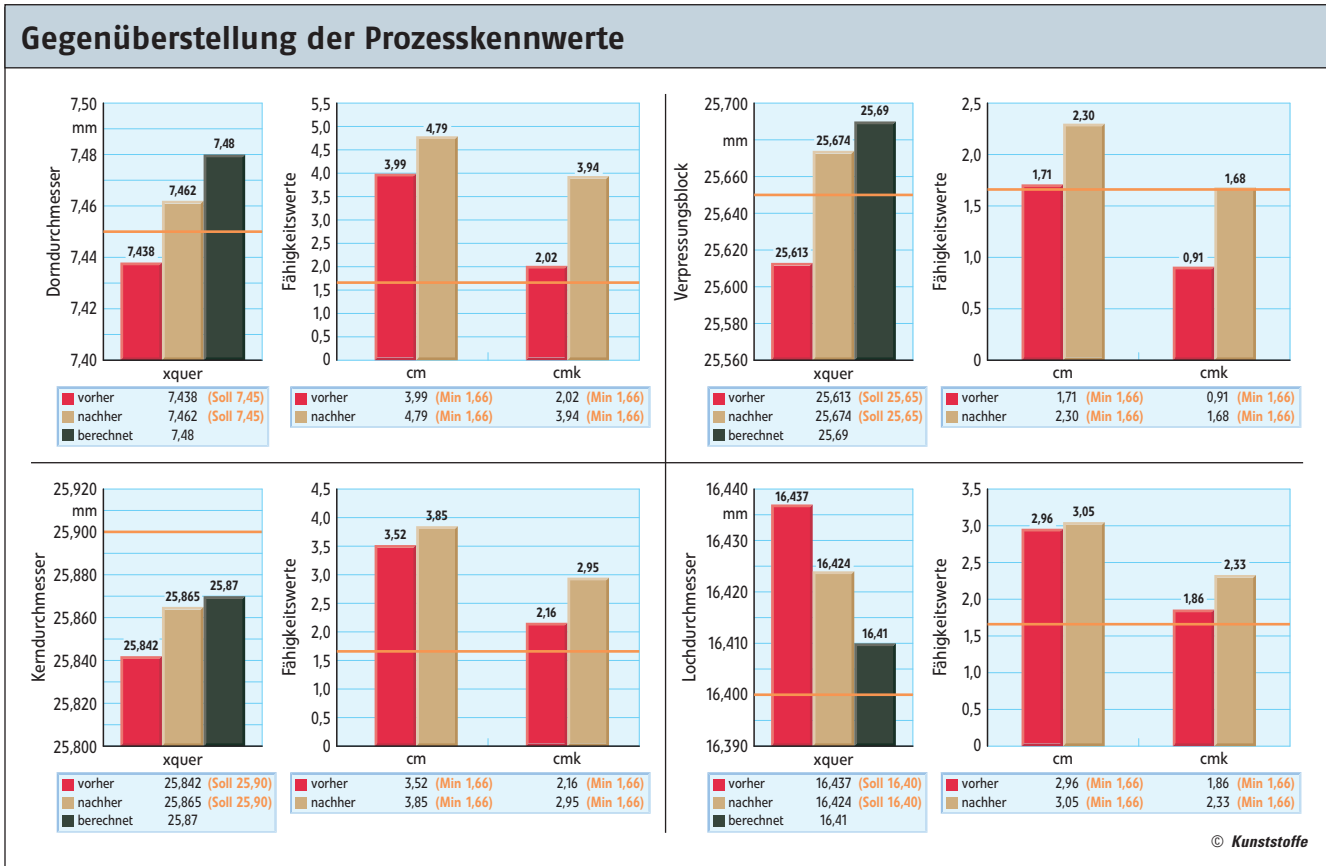


Bild 5. Aus der Grafik lässt sich die verbesserte Fähigkeit der Prozesse ablesen; rot: Kennwerte vor Durchführung der Versuchsplanung; beige: Fähigkeit nach dem DoE (Quelle: Seaquist Löffler)

ware im Hintergrund aus den verbleibenden Termen sofort das aktualisierte Modell berechnet. Im nächsten Schritt kann sich der Optimierer auf die signifikanten Faktoren konzentrieren. Dies ist deshalb entscheidend, da die Anzahl der Faktoren den Umfang weiterer Versuche maßgeblich bestimmt.

Die Güte der Versuchsreihe und dessen berechnetes Modell wird ebenfalls mithilfe von vier Balken (Bild 3) dargestellt. Sie stehen für die Qualität der Ergebnisse, die Prognose von Zielwerten bei neuen Experimenten, die Validität und

die Reproduzierbarkeit des Modells. Die Balken sind normiert (0 bis 1) dargestellt, d.h. je näher die Werte an 1 liegen, desto besser. Das nach der Screening-Phase berechnete Modell hat bereits eine erstaunlich gute Qualität.

Optimierung der Prozessparameter

Nach den Screening-Experimenten zeigt sich, in welchem Bereich die Profile für Nachdruck und Einspritzgeschwindigkeit liegen müssen. Dies ermöglicht es, auf die

Stützstellen zu verzichten und stattdessen die Profile mit einem variierenden Anfangswert und einem konstant abnehmenden Betrag zu beschreiben. Auch weniger signifikante Faktoren wie der Staudruck und die Temperatur der Heißkanaldüsen können bei einem berechneten optimalen Wert eingefroren werden. Damit verringert sich die Anzahl der zu variierenden Faktoren von 27 auf sechs. Diese sechs Faktoren – Nachdruck, Einspritzgeschwindigkeit, Werkzeugtemperatur, Kühlzeit, Umschaltzeit und Zylindertemperatur – können nun in einem mehrstufigen geometrischen Versuchsdesign („Central Composite Face“) mit 44 Experimenten und drei Center Points weiter untersucht werden.

Da wir uns nicht mehr als drei Dimensionen vorstellen können, ist es schwierig, mehr als zwei Faktoren plus eine Zielgröße darzustellen. Softwareunterstützt ist es jedoch möglich, den Erfüllungsgrad beliebig vieler Bewertungskriterien in Abhängigkeit mehrerer Faktoren zu berechnen und in einem Sweetplot (Bild 4) darzustellen. Wie in der Mengenlehre werden die erreichten Zielfunktionen in verschiedenen Farben übereinander abgebildet. Den Bereich, in dem alle Zielvorgaben erfüllt sind, nennt man

Faktor	minimaler Wert	maximaler Wert
Nachdruckhöhe Hydraulikdruck [bar]	58	72
Einspritzgeschwindigkeit [mm/s]	30	50
jeweils 9 Stützstellen für Nachdruck und Einspritzgeschwindigkeit	0	Δp bzw. Δv
Werkzeugtemperatur [°C]	18	30
Kühlzeit [s]	2,9	4,0
Düsentemperatur [°C]	265	270
Staudruck [bar]	4	7
Zylindertemperatur [°C]	220	260
Nachdruckzeit [s]	4	7
Umschaltzeit [mm]	4,5	7,5

Tabelle 1. Die genannten Faktoren werden auf ihre Wirkung untersucht. Als Zielgrößen werden u. a. Maßhaltigkeit und die Oberflächengüte des Formteils verwendet

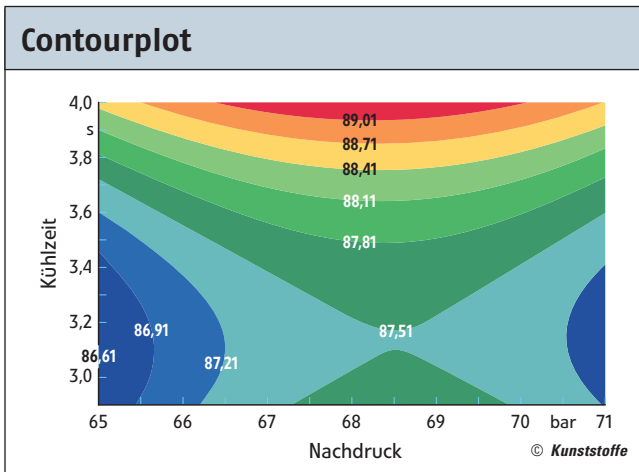


Bild 6. Prozesslandkarten verdeutlichen die Zusammenhänge: Die Faktoren werden entlang der X- und Y-Achse dargestellt, die Zielgrößen farblich und mit Höhenprofil analog einer Landkarte (Software: Modde; Bearbeiter: S. Moser)

Sweetspot (rot). Die Ermittlung des Prozessoptimums über das Modell war so gut und reproduzierbar zu berechnen, dass das Projektteam auf die Untersuchung der Robustheit des Optimums verzichtete. Auf Basis des Prozessmodells findet sich eine Einstellung, mit der das Spritzteil in der geforderten Qualität produziert werden kann. Ist dies nicht der Fall, benötigt man zur Einschätzung der Robustheit im Bereich des berechneten Optimums oft nur wenige Experimente, damit sich die Wirkung der Faktorvariationen ausreichend gut beschreiben lässt.

Erfolg mit Einschränkungen

Die Versuchsplanung führte bei diesem Projekt schnell zum gewünschten Ziel. Dank der strukturierten Versuchsplanung konnten die Versuche innerhalb von 32 Mannstunden effektiv abgearbeitet werden. Dieser Zeitaufwand ist in der Praxis gerade bei der Validierung von Neuwerkzeugen durchaus akzeptabel. Auf Basis der guten Daten des 3D-Messgeräts konnte ein hochwertiges Modell zur Be-

rechnung des Prozessoptimums generiert und bestätigt werden (Bild 5).

Oft verlaufen statistische Versuchsplanungen nicht so erfolgreich. Dies kann mehrere Ursachen haben. Wenn sich in einigen Experimenten die Zielgrößen nicht erfassen lassen, fehlen dem Modell wertvolle Daten. Hier empfiehlt es sich, den Versuchsplan neu aufzusetzen, da meist nur einige wenige Eckexperimente zu wiederholen sind. Wenn ungeeignete Messmittel, Prozessschwankungen, Variationen im Rohmaterial oder Veränderungen in der Umgebung, z. B. der relativen Feuchte, Temperatur oder des Gehalts an Verunreinigungen, ursächlich sind, kann oft allein durch die Dokumentation und Analyse dieser nicht kontrollierbaren Faktoren zumindest deren Einfluss abgeschätzt werden.

Die statistische Versuchsplanung ist kein Garant, jeden Prozess optimieren zu können. Sie zeigt jedoch, in welchem Maß Prozesse innerhalb der gesteckten Grenzen optimiert werden können. In jedem Fall ist das Ergebnis ein Kompromiss zwischen Aufwand und Nutzen. Je strukturierter die Versuche aufeinander auf-

bauen, desto geringer ist der Aufwand. Der softwareunterstützte Contourplot (Bild 6) verdeutlicht die Potenziale. Alle zukünftigen Versuche, die beim üblichen „Trial and Error“ in der Regel noch hinterfragt werden, können nun größtenteils auf Basis des Modells berechnet werden. Zudem können Prozesslandkarten bei zukünftigen Problemen zum Einkreisen potenzieller Fehlerursachen dienen – auch dies spart Zeit und Geld. ■

DIE AUTOREN

DIPL.-ING. (FH) STEFAN MOSER, geb. 1973, hat zehn Jahre Berufserfahrung in Projektmanagement und Produktentwicklung im Automobil- und Anlagenbau sowie in der Medizintechnik. Seit drei Jahren ist er Lehrbeauftragter für Design of Experiments an der FH Rosenheim; stefan_moser@web.de

DIPL.-ING. (FH) DANIEL MADL, geb. 1983, ist seit März 2008 Assistant Manager of Application Technology bei der Seaquist Closures Löffler GmbH, Freyung; daniel.madl@seaquistclosures.eu

SUMMARY KUNSTSTOFFE INTERNATIONAL

Effective Run-In of an Injection Molding Process

DESIGN OF EXPERIMENTS. Injection molders strive for a robust process with small fluctuations from cycle to cycle and negligible response to external influences. In order that they may reliably appraise the quality of that process, they need a well-structured approach and high-quality data. Design of experiments is the most effective way of achieving these goals.

NOTE: You can read the complete article in our magazine **Kunststoffe international** and by entering the document number **PE110022** on our website at www.kunststoffe-international.com