
Qualität erhöhen, Energieverbrauch senken – ein Leitfaden



Zusammenfassung

In Zeiten der Energiewende drängen energiesparende Konzepte und Technologien in den Vordergrund. Allerdings darf die Qualität dabei nicht in den Hintergrund gedrängt werden. Das Gütesiegel „Qualität – Made in Germany“ muss bestehen bleiben, damit der Standort Deutschland attraktiv und wettbewerbsfähig bleibt. Die gegenläufige Beziehung der beiden Aspekte Energie und Qualität ist vielen Unternehmen bekannt, jedoch gehen nur wenige den Schritt und versuchen beide Aspekte gleichzeitig zu optimieren. Dabei ist dies durchaus möglich.

In diesem Whitepaper wird an einem realen Beispiel gezeigt, wie beim Spritzgießprozess gleichzeitig der Energieverbrauch gesenkt und die Qualität der Formteile erhöht werden konnte. Von diesem Wissen profitieren auch Unternehmen aus anderen Branchen: Mit der Checkliste gelangen sie in wenigen Schritten zum energieeffizienten Prozess unter vorgegebenen Qualitätskriterien.

Qualität beim Spritzgießen

Spritzgießen ist das bedeutsamste Urformverfahren in der Kunststoffverarbeitung. Mit diesem Verfahren lassen sich Formteile mit komplexer Geometrie in großer Stückzahl herstellen. Die Formteile werden dabei in drei Kategorien unterteilt: A-Teile – Präzisionsteile mit höchsten Anforderungen, B-Teile – technische Teile mit hohen Anforderungen und C-Teile – geometrisch einfache Formteile aus Standardkunststoffen mit geringen Anforderungen.

Wesentliche Qualitätsmerkmale in allen Kategorien sind unter anderem Formteilmaße und -gewicht sowie Festigkeit, Verzugserscheinungen und Oberflächenbeschaffenheit [1]. Die Beurteilung der Qualität der Formteile beim Spritzgießprozess erfolgt durch die quantitative oder qualitative Ausprägung der Merkmale [2]. Das Gewicht oder die Maße der Formteile können gemessen und quantitativ beschrieben werden. Optische Merkmale, wie Glanz oder Farbe, werden durch die qualitative Ausprägung beurteilt.

Die Qualität des Formteils hängt maßgeblich von der Abmusterung des Spritzgießwerkzeugs ab. Unter Abmusterung ist der Prozess der Begutachtung und Inbetriebnahme des Werkzeugs zu verstehen. Der ideale Ablauf einer Werkzeugabmusterung sollte in zwei Iterationsschritten erfolgen [1]: Zunächst findet eine Vorbesprechung der wichtigsten Verfahrensparameter und Qualitätsanforderungen statt. Danach werden im Verlauf der ersten Abmusterung die Prozessdaten erfasst und analysiert sowie die Qualität des Formteils ermittelt. Der erste Iterationsschritt endet mit der Festlegung der Maßnahmen zur Verbesserung des Prozesses. Im zweiten Iterationsschritt erfolgen eine erneute Abmusterung und eine abschließende Qualitätsermittlung. Der Abmusterungsprozess endet mit der Freigabe des Werkzeugs und der ermittelten Prozessparameter für die Produktion.

In der industriellen Praxis sind oftmals mehr als zwei Iterationsschritte notwendig. Dabei werden die Prozessparameter so lange verstellt, bis die gewünschte Qualität erreicht ist.

Qualitätsbewusst denken, nachhaltig handeln

Die Prozessparameter des Spritzgießprozesses verfügen über einen gewissen Toleranzbereich, in dem Formteile produziert werden können, die die Qualitätsanforderungen erfüllen. Dieser Toleranzbereich resultiert häufig auch in unterschiedlichen Energiebedarfen des Spritzgießprozesses und bietet somit das Potenzial, den Energieverbrauch zu reduzieren. Ein Beispiel ist die Massetemperatur, die benötigt wird, um das Kunststoffgranulat zu schmelzen. Die Granulathersteller geben meist einen Toleranzbereich für die Massetemperatur an. Genau hier steckt das Potenzial zur Energieeinsparung: Denn beispielsweise eine Absenkung der Massetemperatur um 10 K bei einem Formmassendurchsatz von 100 kg/h Polypropylen im Dreischichtbetrieb (24h) bewirkt eine Heizenergieersparnis von täglich 19,2 kWh [3].

Neben der Massetemperatur haben weitere Prozessparameter – wie beispielsweise der Nachdruck, die Einspritzzeit, die Schließkraft oder die Werkzeugwandtemperatur – einen wesentlichen Einfluss auf die Formteilqualität [1, 2] und auch auf den Energieverbrauch. Die Werkzeugwandtemperatur bestimmt beispielsweise den Verzug, die Qualität der Oberfläche sowie die Maßabweichung [1]. Die Werkzeugwandtemperatur ist zudem ein Parameter, der ein großes Potenzial zur Energieeinsparung bietet. Das Werkzeug wird durch zwei Temperiergeräte, eines für jede Werkzeughälfte, auf einer konstanten Temperatur gehalten. Wird die heiße Kunststoffschmelze, deren Temperatur um ein Vielfaches höher ist als die Werkzeugwandtemperatur, ins Werkzeug eingespritzt, so muss der Temperaturunterschied ausgeglichen werden. Dies erfordert erneut Energie.

Trotz der offensichtlichen Zusammenhänge ist eine energieoptimierende Denkweise bei der Festlegung der Prozessparameter bisher nicht verbreitet. Eine Hürde ist die große Zahl der Prozessparameter und die komplexen Abhängigkeiten zwischen Formteilqualität und Energieverbrauch.

Qualität und Energieverbrauch im Einklang

Zur Erreichung eines optimal qualitativ und energetisch eingerichteten Prozesses müssen sich Unternehmen der Spritzgussbranche somit die folgenden Fragen stellen: Welche Prozessparameter haben einen hohen Einfluss auf die Qualität meines Produkts? Welche Prozessparameter haben zudem einen hohen Einfluss auf den Energieverbrauch? Wie kann ich die optimalen Parameter mit möglichst wenig Aufwand bestimmen?

Mit dieser Fragestellung hat sich auch die Firma Phoenix Contact GmbH & Co. KG aus Blomberg auseinandergesetzt. Das Familien-Unternehmen aus Nordrhein-Westfalen ist weltweit Marktführer und Innovationsträger in der Elektrotechnik. Auf die Frage nach Komponenten für einen Schaltschrank lautet die Antwort immer gleich: „Wir liefern alles, von der Klemme bis zur Steuerung!“. Entsprechend groß ist auch der Maschinenpark des Unternehmens: Allein im Technikum sind 10 Spritzgießmaschinen unterschiedlicher Hersteller im Einsatz. Der gesamte Standort Blomberg zählt über 100 Maschinen.

Das IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH und Phoenix Contact arbeiten in verschiedenen Forschungsprojekten und im Arbeitskreis Werkzeug- und Formenbau zusammen. Gemeinsam haben die beiden Unternehmen ausgewählte Prozessparameter im Hinblick auf die Energieeinsparung und Qualitätsverbesserung untersucht. Zunächst fand eine Vorauswahl jener Prozessparameter statt, die den größten Einfluss auf den Energieverbrauch haben (vgl. [4]). Im zweiten Schritt wurden dann Prozessdaten in Versuchsreihen generiert, um Prognosemodelle für den Energieverbrauch sowie bestimmte Qualitätsmerkmale zu erstellen.

Die Durchführung der Versuche im Technikum von Phoenix Contact erfolgte mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung (DOE – Design Of Experiments). Die DOE-Methodik erlaubt eine systematische Planung und statistische Auswertung von Versuchen. Dabei wird der funktionale Zusammenhang von Einflussparametern und den Ergebnissen ermittelt und mathematisch beschrieben, beispielsweise in Form von Regressionsgleichungen. Die Vorgehensweise zum Aufbau der Modelle ist in Bild 1 dargestellt.

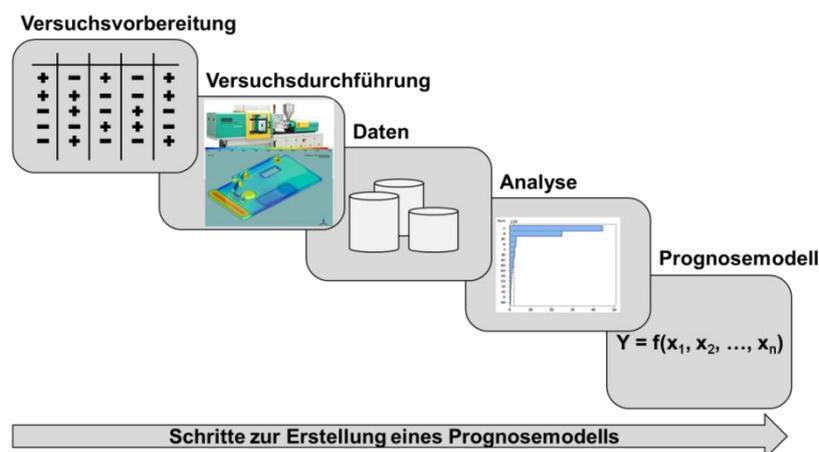


Bild 1: In nur 5 Schritten lässt sich ein Prognosemodell für beliebige Kriterien erstellen. (Bildquelle: IPH)

In der Versuchsvorbereitung werden entsprechend dem gesetzten Ziel Versuchspläne erstellt. Im Bereich Spritzgießen haben sich vollfaktorielle und fraktionierte Versuchspläne als zielführend erwiesen [5]. Demnach wurde ein vollfaktorieller 2k-Versuchsplan mit $k=5$ Faktoren (Parametern) und zwei Stufen aufgestellt. Die betrachteten Faktoren und ihre Stufen sowie die Mittelwerte (Standard-Einstellung) sind in Tabelle 1 gezeigt.

Faktor	Einstellparameter	-	Standard	+	Einheit
T_{Zyl}	Zylindertemperatur	270	275	280	°C
T_{WKZ}	Werkzeugtemperatur	60	70	80	°C
t_K	Kühlzeit	3	4	5	s
p_N	Nachdruck	200	400	600	bar
\dot{V}_E	Einspritzvolumenstrom	17,5	27,5	37,5	cm ³ /s

Tabelle 1: Bei 5 Parametern mit je 2 Einstellungen werden lediglich 32 Versuche benötigt.

Die für den Modellaufbau erforderlichen Prozessdaten wurden mittels produktionsnahen Versuchen an einer Spritzgießmaschine sowie Simulationen mit der Software Cadmould® 3D-F generiert. Das Ziel der Spritzgießversuche war die Ermittlung des spezifischen Energieverbrauchs. Zusätzlich wurden das Gewicht sowie ein Längenmaß (vgl. Bild 2) am gefertigten Produkt vermessen. Mit den Simulationen wurde als weiteres Qualitätsmerkmal die Schwindung untersucht.

Das Formteil für die Versuchsdurchführung ist ein Testprodukt der Firma Phoenix Contact mit einem Gewicht von 2 g und einem Schussvolumen von 3,5 cm³ (vgl. Bild 2). Dieses verfügt über typische Merkmale der Firmenprodukte und wird aus dem in der Elektroindustrie häufig eingesetzten Kunststoff Polyamid 6.6 hergestellt.

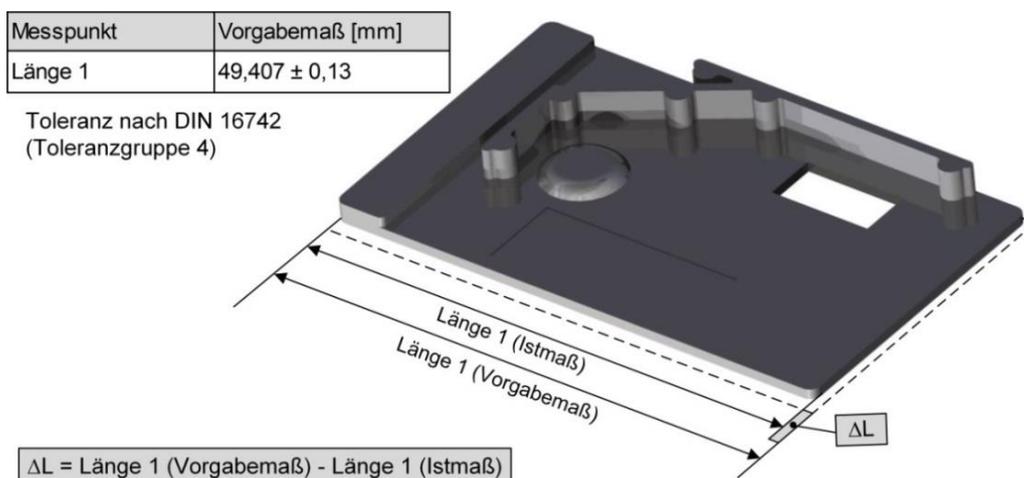


Bild 2: Das Testprodukt der Phoenix Contact GmbH & Co. KG. (Bildquelle: Phoenix Contact)

Die Versuche wurden auf einer elektrischen Spritzgießmaschine (Typ: Allrounder 370 A, maximale Schließkraft: 500 kN, Hersteller: ARBURG GmbH + Co KG, Loßburg) durchgeführt. Die Messung des Energieverbrauchs erfolgte mit einer speziellen Messeinrichtung mit vier Messkanälen, die an die Spritzgießmaschine angeschlossen war. Die Messkanäle erfassten jeweils die elektrische Leistung des Heißkanal-Temperiergeräts, der Maschine und zweier Werkzeug-Temperiergeräte.

Im Anschluss an die Versuchsdurchführung wurden mit Hilfe einer Varianzanalyse (ANOVA) signifikante Einflussgrößen auf den spezifischen Energieverbrauch sowie die Qualitätsmerkmale Gewicht, Maßabweichung und Schwindung identifiziert. Auf Basis der aufbereiteten Daten wurden in einem weiteren Schritt Prognosemodelle erstellt und statistisch beurteilt, die den funktionalen Zusammenhang zwischen dem spezifischen Energieverbrauch sowie jeweils einem Qualitätsmerkmal und den Prozessparametern beschreiben.

Mit Hilfe der erstellten Modelle konnten Parameter identifiziert werden, die alle vier Kriterien (Senkung des spezifischen Energieverbrauchs, Erhöhung des Gewichts, Reduktion der Schwindung und der Maßabweichung) verbessern. Eine Möglichkeit zur Ermittlung dieser Parameter bietet die Formulierung eines Optimierungsproblems. Dabei werden die Kriterien in einer Zielfunktion als gewichtete Summe der Einzelkriterien aggregiert. Dieser Ansatz bietet die Vorteile einer unbegrenzten Anzahl an Kriterien, leichter Berechenbarkeit und einfacher Handhabbarkeit durch den Anwender. Nachfolgend ist die definierte Gesamtfunktion dargestellt.

$$f_{\text{Gesamt}}(T_{\text{Zyl}}, T_{\text{WKZ}}, t_{\text{K}}, p_{\text{N}}, \dot{V}_{\text{E}}) = \sum_{i=1}^4 \lambda_i f_i, \text{ mit } \sum_{j=1}^4 \lambda_j = 1$$

Die Funktionen f_i stehen hierbei stellvertretend für die Modelle des Energieverbrauchs und der Qualitätsmerkmale. Die Koeffizienten λ_i sind die Gewichtungsfaktoren der Funktionen und können beliebig gewählt werden. Werden sie beispielsweise wie folgt festgelegt: $\lambda_1 = 0,9$ und $\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 0,0333$, ergeben sich die in Tabelle 2 dargestellten Werte.

		Standard-einstellung	Optimale Einstellung	Verbesserung in %
T_{Zyl}	Zylindertemperatur [°C]	275	270	
T_{WKZ}	WKZ-Temperatur [°C]	70	60	
t_{K}	Kühlzeit [s]	4	3	
p_{N}	Nachdruck [bar]	400	600	
\dot{V}_{E}	Einspritzvolumenstrom [cm³/s]	27,5	17,5	

Spezifischer Energieverbrauch [kWh/kg]	5,2631	4,3297	17,74
Gewicht [g]	1,9662	1,9864	1,03
Maßabweichung [mm]	0,1012	0,0463	54,26
Schwindung [%]	4,4148	4,1914	5,06

Tabelle 2: Verbesserungspotenzial: Die gleichzeitige Optimierung aller Kriterien ist möglich. Nicht alle Kriterien sind gleich stark verbessert, dennoch ist die Verbesserung des Prozesses erheblich.

Mit der gewählten Gewichtung liegt der optimale Energieverbrauch für diesen Anwendungsfall bei 4,3297 kWh/kg und ist somit um 17,74 % besser, als der Standardwert. Gleichzeitig werden alle Qualitätskriterien verbessert. Die Maßabweichung beispielsweise wird gegenüber dem Standardwert um 54,26% verbessert. Festzuhalten ist also, dass mit den gewählten Gewichten alle vier Kriterien optimiert werden. Gegenüber den Standardwerten wird neben der Verbesserung des Energieverbrauchs auch das Gewicht um 1,03% erhöht, die Maßabweichung um 54,26% verbessert und die Schwindung um 5,06% verringert.

Optimal ist subjektiv

Wie oben beschrieben wurde das Optimierungsproblem mit Hilfe der gewichteten Summe in eine Zielfunktion überführt und gelöst. Die Ergebnisse zeigen, dass alle Kriterien gleichzeitig optimiert werden können. Ein Vorteil der gewichteten Summe liegt in der einfachen praktischen Anwendbarkeit. Vor allem kleine und mittlere Unternehmen können so profitieren.

Ein weiterer Vorteil liegt in der individuellen Gewichtung der Kriterien. Hat beispielsweise der spezifische Verbrauch einen hohen Stellenwert in der Produktion, so kann ein höherer Wert für die Gewichtung gewählt werden. Steht die Erfüllung der Qualitätsanforderungen im Vordergrund, kann dies ebenfalls berücksichtigt werden. Wird beispielsweise der Energieverbrauch mit 0,1 und die Qualitätskriterien mit jeweils 0,3 gewichtet, so ergibt sich folgendes Bild: Gegenüber den Standardwerten wird der Energieverbrauch um 3,53% erhöht, das Gewicht um 1,19% erhöht, die Maßabweichung um 73,35% verbessert sowie die Schwindung um 12,81% verringert. Eine Verbesserung aller Kriterien ist hier nicht gegeben.

Bewegen sich die Qualitätsanforderungen jedoch in vorgegebenen Toleranzen, so können Gewichtungen gefunden werden, die zur simultanen Optimierung aller Kriterien führen. Bereits mit den fünf untersuchten Parametern ergibt sich so eine Spanne von ca. 2 kWh/kg

zwischen dem minimalen und dem maximalen spezifischen Energieverbrauch innerhalb der vorgegebenen Qualitätsgrenzen. Zusammen mit weiteren Parametern kann das hier gezeigte Energieeinsparpotenzial noch weiter gesteigert werden.

Checkliste

Den Energieverbrauch senken und gleichzeitig die Qualität steigern – das ist nicht nur beim Spritzgießprozess möglich. Mit der folgenden Checkliste gelangt auch Ihr Unternehmen in wenigen Schritten zum energieeffizienten Prozess unter vorgegebenen Qualitätskriterien.

- Zieldefinition:** Führen Sie sich zuerst das Ziel vor Augen: Welche Energieströme nehme ich in das Modell auf? Welche Qualitätsmerkmale sind für mich oder meinen Kunden ein Muss?
- Parameterwahl:** Wählen Sie danach die zu untersuchenden Parameter aus. Bestimmte Abhängigkeiten zwischen Qualitätsmerkmalen und Parametern sind bereits bekannt – nutzen Sie diese. Falls zu viele Parameter in Betracht kommen, können Sie ihre Anzahl mit Hilfe von Screening-Plänen reduzieren. Dies erfordert zwar zusätzliche Versuche, reduziert jedoch den späteren Versuchsaufwand enorm.
- Versuchsplanung:** Ist die Anzahl der Parameter und ihrer Stufen klein, bieten sich vollfaktorielle Versuchspläne an. Sie decken den Ergebnisraum komplett ab und schaffen eine sehr gute Grundlage für den Modellaufbau.
- Durchführung:** Führen Sie im nächsten Schritt Versuche durch und dokumentieren Sie die Ergebnisse. Zur Aufnahme der Energieströme benötigen Sie die passende Ausrüstung. Sprechen Sie beispielsweise den Hersteller ihrer Fertigungsmaschinen dazu an. Viele moderne Spritzgießmaschinen sind mit integrierten Werkzeugen zur Aufnahme des Energieverbrauchs ausgestattet.
- Modellaufbau:** Stellen Sie als Nächstes Prognosemodelle für die ausgewählten Kriterien auf. Den einfachsten Ansatz stellen sogenannte lineare Regressionsmodelle dar. Sie können problemlos mit Hilfe bekannter Programme wie Excel aufgestellt werden. Für anspruchsvollere Analysen bietet sich beispielsweise das Statistik-Programm Minitab an.
- Optimierung:** Nutzen Sie im letzten Schritt die zuvor aufgestellten Modelle, um die optimalen Parametereinstellungen zu finden. Falls Sie Regressionsmodelle verwenden, können Sie auch in diesem Schritt zum altbewährten Excel greifen. Die integrierte Solver-Funktion hilft Ihnen bei der Lösung des Optimierungsproblems.

Literaturverzeichnis

- [1] Martin Bichler: Qualitätssicherung beim Spritzgießen. Werkzeuge abmustern, Werkzeuginnendruck nutzen, Formteilqualität sichern. 2. überarbeitete Auflage. Hüthig Verlag, Heidelberg, 2008.
- [2] Bernd Fein: Optimierung von Kunststoff-Spritzgießprozessen. 2., überarbeitete Auflage. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2013.
- [3] Lothar Zahn, Jakob Mannherz: Energieeffiziente Werkzeuge leisten mehr In: Kunststoffe, 06-13.
- [4] Schachmanow, J.; Ullmann, G.; Overmeyer, L.: Jedem Spritzgießbetrieb seine eigene Energiewende – Die Parameter des Spritzgießprozesses bergen noch ungenutztes Potenzial zur Senkung des Energieverbrauchs. In: Kunststoffe, Carl Hanser Verlag, Jg. (2015), H. 06, Seite 56-59.
- [5] Bourdon, R. et al.: Standardisierte Prozess- und Qualitätsoptimierung mit DOE-Methoden – eine Kurzanleitung für die Praxis beim Spritzgießen. Kunststofftechnik 8 (2012).

Kontaktdaten

IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH
Hollerithallee 6 | 30419 Hannover

☎ +49 (0)511 27976-0 | @ info@iph-hannover.de | 🌐 www.iph-hannover.de