

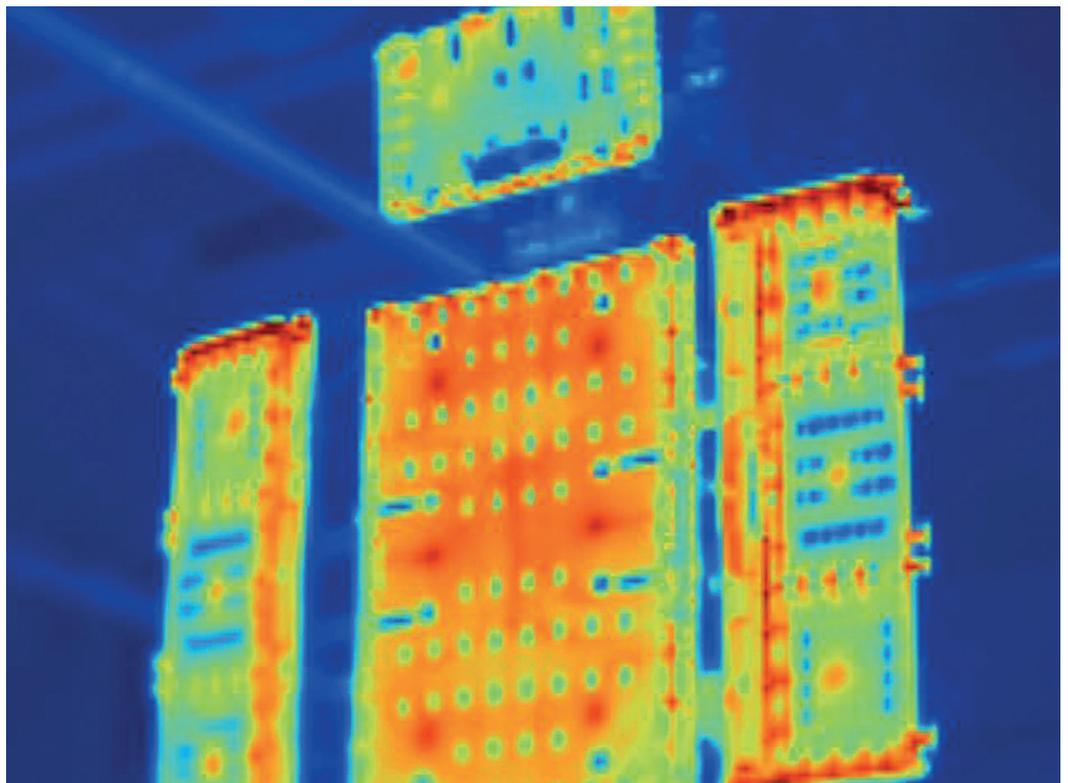
# Wertvolle Referenzen

## Analyse der Energieeffizienz im Teillastbetrieb von Spritzgießmaschinen

In der Kunststoffverarbeitung werden Spritzgießmaschinen selten im Auslegungspunkt betrieben. Gängig sind Teillastzustände, die die Energieeffizienz der Maschine zwangsläufig verschlechtern. Dieser Umstand bleibt bei der Bewertung der Energieeffizienz oft unbeachtet. Der Autor erläutert, wie mithilfe von Referenzkurven der energetische Zustand im aktuellen Arbeitspunkt einer Spritzgießmaschine zuverlässig bewertet und verbessert werden kann. Produktqualität und Zyklusdauer haben weiterhin die höchste Priorität.

Wärmebild nach der  
Formteilentnahme aus  
dem Werkzeug

© M. König und H. de Vries,  
Stork IMM



Die kunststoffverarbeitende Industrie ist, wie alle anderen Industrien auch, gefordert, ihren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck zu verbessern. Dies gilt nicht nur für energieintensive Unternehmen im Sinne des EEG oder für Betriebe, die ein Energiemanagementsystem eingeführt und beispielsweise nach ISO 50001 zertifiziert haben.

Bei Unternehmen, die vorwiegend Spritzgießmaschinen betreiben, haben diese in der Regel einen Anteil von 60 bis 70 % am Gesamtstromverbrauch einer Produktionsstätte. Mit deutlichem Abstand folgt die Produktionskälte in einer Größenordnung von 15%. Um den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck zu verringern, bieten sich

zur Effizienzsteigerung Maßnahmen vor allem bei den installierten Spritzgießmaschinen an, zumal diese für eine Nutzungsdauer von 20 bis 25 Jahren angeschafft werden.

### **Energieeffizienz verschlechtert sich mit zunehmender Teillast**

Spritzgießmaschinen werden in der Regel in einem Betriebszustand eingesetzt, der stark vom Auslegungspunkt abweicht. Die Arburg GmbH + Co KG, Loßburg, etwa gibt in [1] die gängigen Arbeitspunkte im Bereich von 20 bis 80% der Auslegungsleistung an, was den Er-

fahrungen des Autors entspricht. Die Maschinen-Teillastzustände zu beachten ist für die Beurteilung der Energieeffizienz entscheidend. Denn auch bei geringerer kapazitiver Auslastung der Maschine sind dieselben Massen an Spritz- und Schließeinheiten zu bewegen. Diese Maschinengrundlast wirkt sich auf das Ergebnis der Energieeffizienz umso negativer aus, je geringer die kapazitive Maschinenauslastung ist. Daher sind „eindimensionale“ Bewertungen, wie hier (Bild 1) dargestellt und noch 2015 in einem Fachvortrag [2] vorgestellt, irreführend. Ein spezifischer Strombedarf von 0,9 kWh/kg kann für einen Maschinenarbeitspunkt durchaus

angemessen und gut, ein Wert von 0,5 kWh/kg auch für die modernste Maschine unerreichbar sein.

Veröffentlichungen, die diese Einschätzung belegen, sind spätestens seit 1997 bekannt [3]. Auch in [4, 5] wird über eine mitunter gravierende Zunahme des Strombedarfs bei Teillast berichtet. Die Bedeutung von Teillastzuständen hat sich jedoch bisher in den Betrieben kaum herumgesprochen. Selbst Produktionsverantwortliche können mit dem Begriff „Teillast“ wenig anfangen, vielleicht auch, weil sie nicht wissen, wie Teillastzustände zu bestimmen sind. Erst mit Einbeziehung weiterer Größen, nämlich der kapazitiven Auslastung und der Zyklusdauer, lassen sich die Energieeffizienz und somit das Einsparpotenzial realistisch beurteilen.

### Die kapazitive Maschinenauslastung ist selten ein Thema

In Unternehmen der Kunststoffverarbeitung wird unter Maschinenauslastung vornehmlich die zeitliche Maschinenbelegung im Verhältnis zur geplanten Einsatzzeit verstanden. Hier geht es jedoch um die Frage, inwieweit mit dem hergestellten Produkt das Stückgewicht erreicht wird, das der Maschinenauslegung zugrunde gelegt wurde. Um Missverständnisse zu vermeiden, wird daher hier bewusst von **kapazitiver** Maschinenauslastung gesprochen.

Was neben einer Aufklärung fehlt, ist die Bereitschaft von Herstellern, umfassend Auskunft zur Änderung des Strombedarfs oder der Energieeffizienz über den gesamten Einsatzbereich der Maschine zu geben. Kennlinienfelder sind für Motoren, Pumpen etc. allgemein zugänglich, aber nicht für Spritzgießmaschinen. Dennoch verfügen die Maschinenhersteller über „Teillastkurven“. Der Autor konnte diese zwar einsehen, aber

#### Wieviel Energie wird benötigt, um 1 kg Kunststoffgranulat zu verarbeiten?

>1,0 kWh/kg

mangelhaft

0,75 kWh/kg – 1,0 kWh/kg

befriedigend

0,5 kWh/kg – 0,75 kWh/kg

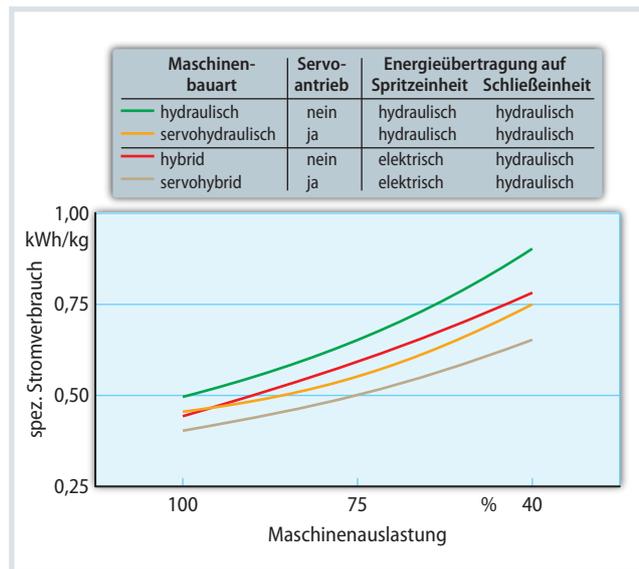
gut

<0,5 kWh/kg

sehr gut

**Bild 1.** Hier sogenannte „Energie-Indikatoren“ einzelner Spritzgießmaschinen

Quelle: K. Lange [2]; Grafik: © Hanser



**Bild 2.** Teillastverläufe verschiedener Bauarten von Spritzgießmaschinen in Abhängigkeit von der Maschinenauslastung

Quelle: M. König, Datenbasis:

A. Lohnecker, Engel Austria;

Grafik: © Hanser

nicht „mitnehmen“. Eine Ausnahme davon ist Arburg – das Unternehmen stellt in [1] zumindest einen typischen Teillastverlauf dar. Die Engel Austria GmbH, Schwertberg/Österreich, ist eine weitere Ausnahme. Nach Erkundigungen hat der Autor 2014 Anhaltspunkte für Teillastverläufe unterschiedlicher Maschinenbauarten erhalten. Diese Angaben wurden grafisch aufgearbeitet (**Bild 2**).

Mit der Verweildauer der Kunststoffschmelze in der Plastifiziereinheit wird entschieden, ob mit der in das Werkzeug eingespritzten Masse (Schussgewicht) die Anforderungen an die Produktqualität erfüllt werden oder nicht. Bei einer Standardauslegung sind die Schneckengänge mit der drei- bis vierfachen Masse des Schussgewichts [6] gefüllt. Bei kleiner werdenden Schussgewichten nimmt die Verweildauer des Materials in der Plastifiziereinheit zu. Hierdurch erhöht sich die Gefahr einer unerwünschten Überhitzung der Schmelze. Hinzu kommt, dass die Messsysteme bei zu geringen Schussgewichten nicht mehr mit der gewünschten Genauigkeit arbeiten. Bei Schussgewichten jenseits der Schneckenauslegung kann sich die Verweildauer derart verkürzen, dass die Zeit für die Homogenisierung der Schmelze nicht ausreicht.

Für die kapazitive Maschinenauslastung existieren somit qualitätsbezogene Ober- und Untergrenzen. Diese Grenzen sind von der Auslegung der Schnecke abhängig und werden allgemein mit dem Dosierweg (Strecke, die die Schnecke für die Bereitstellung des Schussgewichts zu-

rückfährt) beschrieben. Bei einer Standardschnecke liegen die Grenzen des Dosierwegs allgemein beim einfachen bis dreifachen Schneckendurchmesser (1–3D) [6]. Daneben gibt es spezielle Schneckenkonstruktionen, mit denen die Qualitätsanforderungen im Bereich von 0,5D bis 4D [7] ebenso erfüllt werden können.

### Referenzwerte belegen, wie gut die jeweilige Energieeffizienz ist

Die Teillastverläufe (**Bild 2**) setzen Standardschnecken voraus. Weitere Erläuterungen zu den Angaben des spezifischen Stromverbrauchs lagen nicht vor. Auch Maschinen der Schoeller Allibert GmbH sind »

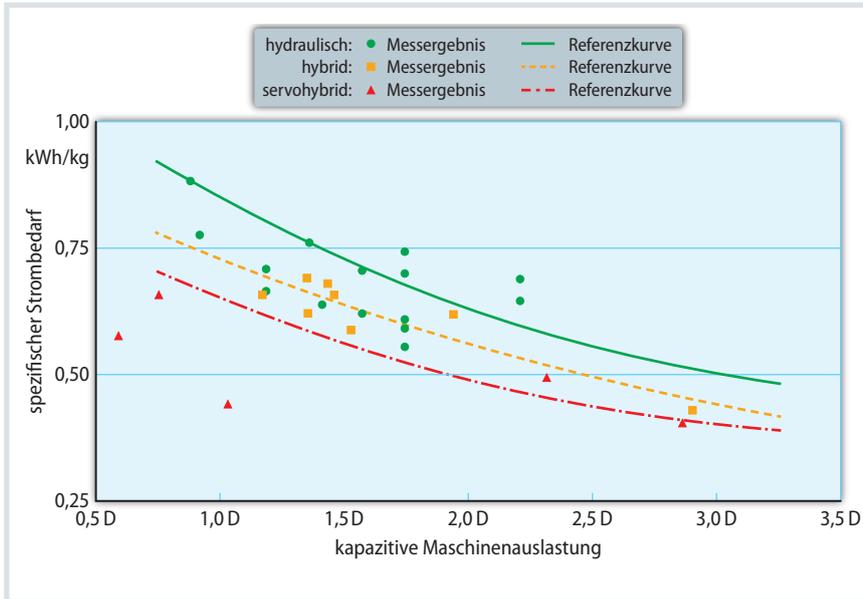
## Der Autor

**Michael König** ist Inhaber der E&P Management Dipl.-Ing Michael König, Bremen. Er war von 2012 bis 2019 Leiter des internationalen Energiemanagements bei der Schoeller Allibert GmbH. Heute steht die ingenieurwissenschaftliche Beratung und Planung im Bereich des strategischen Energie- und Projektmanagements im Mittelpunkt seiner Tätigkeit; michael.koenig-bremen@gmx.de

## Service

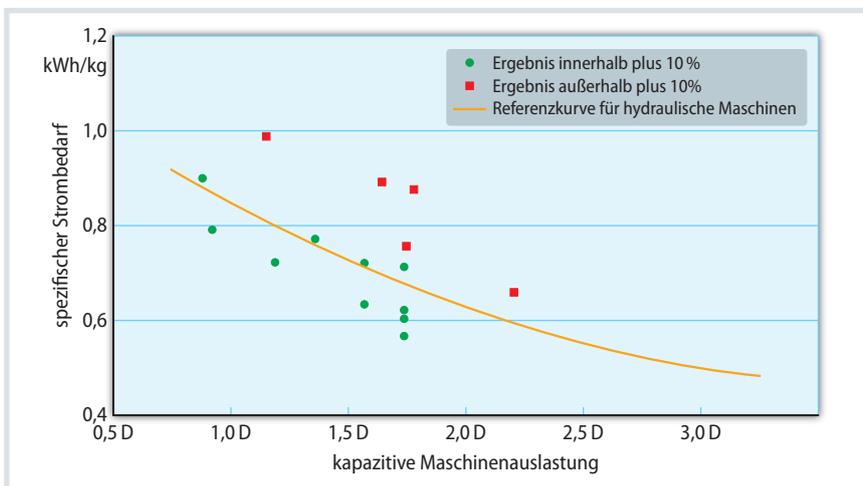
### Literatur & Digitalversion

» Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/onlinearchiv](http://www.kunststoffe.de/onlinearchiv)

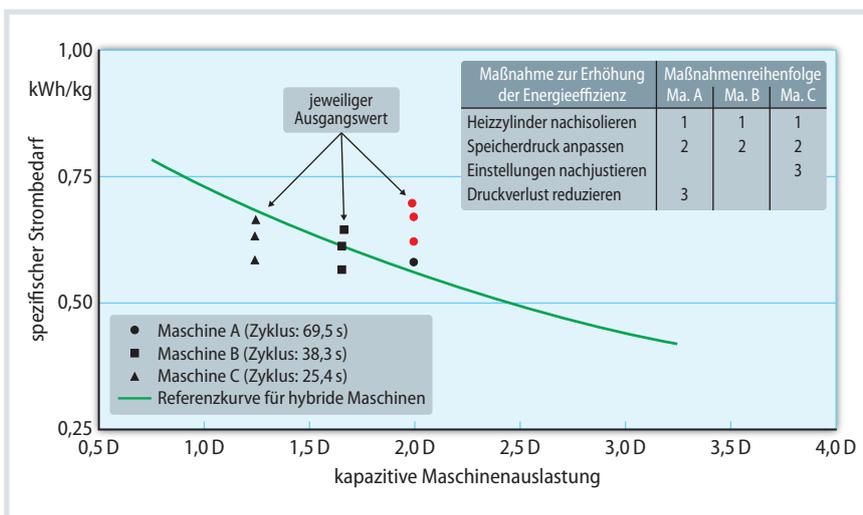


**Bild 3.** Spezifischer Strombedarf von Spritzgießmaschinen mehrerer Hersteller bei unterschiedlicher kapazitiver Auslastung; Ergebnisse im Vergleich mit der jeweiligen Referenzkurve

Quelle: M. König, Datenbasis: Schoeller Allibert; Grafik: © Hanser



**Bild 4.** Einschätzung des Handlungsbedarfs zur Steigerung der Energieeffizienz bei hydraulischen Spritzgießmaschinen Quelle: M. König, Datenbasis: Schoeller Allibert; Grafik: © Hanser



**Bild 5.** Auswahl wirtschaftlicher Energiesparmaßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz bei hybriden Spritzgießmaschinen Quelle: M. König, Datenbasis: Schoeller Allibert; Grafik: © Hanser

mit Standardschnecken ausgestattet. Daher bestand für die hier aufgelisteten Bauarten und -größen (Tabelle 1) ein Interesse zu prüfen, wie tauglich diese Teillastverläufe für den eigenen Maschinenpark sind. Hierfür wurden in der Folge die Kurvenverläufe auf den „Maßstab D“ umgerechnet.

Das energetische Teillastverhalten stand somit im Zentrum der Betrachtungen. Die kapazitive Maschinenauslastung wird gemäß den genannten Beispielen (Tabelle 2) berechnet. Der in den folgenden Abbildungen dargestellte **spezifische Strombedarf** ist definiert als Gesamtstromverbrauch einer Spritzgießmaschine im jeweiligen Arbeitspunkt [kWh], bezogen auf die im selben Zeitraum verarbeitete Produktionsmasse [kg]. Die hier gezeigten Ergebnisse (Bild 3) stammen aus einer Zeit, in der noch alle Maschinen mit einem VG46-Hydrauliköl arbeiteten. Die in [8] beschriebene Umstellung auf ein VG22-Öl begann erst später.

Die ermittelten spezifischen Strombedarfe streuen um die jeweilige Referenzkurve. Hierfür gibt es verschiedene – auch „natürliche“ – Gründe:

- Der spezifische Strombedarf wird durch die Zyklusdauer beeinflusst. Ergebnisse mit Zyklen kleiner 30 s liegen überwiegend unterhalb, mit Zyklen größer 50 s vornehmlich oberhalb des jeweiligen Referenzwerts.
- Maschinen mit Akkumulatoren (Hydrauliköl-Druckspeicher) haben bei Teillast generell einen höheren Strombedarf, wenn der Speicherdruck nicht an den Arbeitspunkt angepasst wird (in der Regel bei Akkumulatormaschinen, die vor 2010 installiert wurden).
- Betriebsparameter sind nicht genügend auf die Paarung von Maschine und Werkzeug abgestimmt (z. B. Schließkraft unnötig hoch gewählt).
- Erhöhter Strombedarf aufgrund eines Instandhaltungsbedarfs (im Falle einer verschlissenen Schnecke kann ein Rückfluss der Schmelze nur durch eine höhere Schneckendrehzahl verhindert werden).

Aus den Ergebnissen ist zu schließen, dass der Verlauf der Referenzkurven stark von der Zyklusdauer beeinflusst wird. Durch die „Normierung“ der Referenzkurven auf den Schneckendurchmesser ist gewährleistet, dass diese Kurven für eine große Bandbreite an 3D-Stückgewichten gelten.



### Einsparpotenziale mithilfe von Referenzkurven sicher erkennen

Für die Praxis stellt sich die Frage, welchen betrieblichen Nutzen die dargestellten Referenzkurven bieten. Mit ihrer Hilfe können Fragen zur Energieeffizienz in den folgenden Fällen einfach und zuverlässig beantwortet werden:

- Bei Bewertung der Energieeffizienz in einem Arbeitspunkt (**Bilder 4 und 5**): Besteht ein wirtschaftlich nutzbares Energieeinsparpotenzial und wie groß ist dieses?
- Bei Neuanschaffung von Spritzgießmaschinen (**Bild 6**): Welche Stromesparungen gegenüber „heute“ sind in den geplanten Arbeitspunkten tatsächlich zu erwarten?

Referenzkurven (**Bild 4**) dienen dazu, eine tatsächlich erreichbare Verbesserung der Energieeffizienz im jeweiligen Arbeitspunkt abzuschätzen. Die Ergebnisse stehen im direkten Vergleich mit dem relevanten Referenzwert. Eine gewisse Abweichung zum Referenzwert ist natürlich und somit unvermeidbar. Daher wird ein Ergebnis, das nicht mehr als 10% oberhalb des Referenzwerts liegt, noch als „energetisch unverdächtig“ betrachtet, sofern der Zyklus maximal 100 s dauert. Wenn der spezifische Strombedarf jedoch oberhalb der 10%-Grenze liegt, dann sollten die Gründe dafür näher analysiert werden.

Für zuverlässige Ergebnisse ist es zwingend, nur Messintervalle zu prüfen, in denen die Maschine störungsfrei und ununterbrochen produziert hat. Ansonsten landen die Ergebnisse schnell im roten Bereich. Die Festlegung einer Obergrenze von 10% begründet sich aus den Erfahrungen mit Zykluszeiten kleiner 100 s. Bei einer Zyklusdauer von 100 bis 150 s sollte zusätzlich eine zweite, eine 15%-Grenzlinie, „eingezogen“ werden.

Um den spezifischen Strombedarf zu reduzieren, sollten neben investiven Maßnahmen auch organisatorische Möglich-

keiten geprüft werden. Der Effekt ist messbar, wie eine Versuchsreihe mit baugleichen Akkumulatormaschinen (Baujahr 2003) zeigt (**Bild 5**). Dargestellt werden die Ausgangswerte und die mit den aufgeführten Maßnahmen erzielten Erfolge. Alle Maschinen verfügten ursprünglich über einen fest eingestellten Speicherdruck von 195 bar, der auch bei Teillast unverändert blieb. Um diesen bereits erwähnten typischen Nachteil einer Akkumulatormaschine einzudämmen, kann das Bedienpersonal den Speicherdruck nach einer geringen Investition nun selbst einstellen.

Bei der Maschine A war der erzielte Erfolg mit den ersten beiden Maßnahmen nicht zufriedenstellend. Die Energieeffizienz lag weiterhin im roten Bereich. Während der Durchführung der zweiten Maßnahme (Schritt 2) fiel auf, dass die Hydraulikpumpen ungewöhnlich häufig anliefen, um den Speicherdruck in der vorgegebenen Bandbreite zu halten. Nach Behebung der Ursache wurde eine zufriedenstellende Energieeffizienz erreicht.

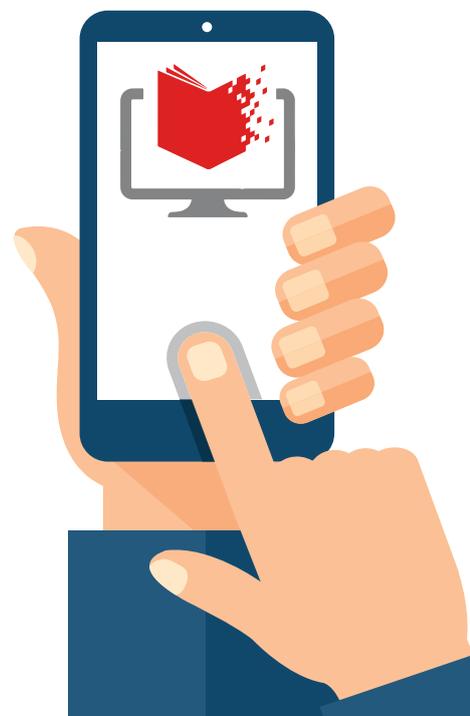
### Zwanzig lohnende Minuten

Die Ausgangswerte der Maschinen B und C befanden sich bereits innerhalb der 10%-Grenze. Der Ausgangswert der Maschine C lag sogar unterhalb der Referenzkurve. Eigentlich hätte man bei der Maschine C nach der Speicherdruck-Anpassung (Schritt 2) zufrieden sein können. Jedoch zeigte sich, dass die vorgegebenen Maschineneinstellwerte nicht optimal auf die Paarung von Maschine und Werkzeug abgestimmt waren. Das gute Ergebnis stellte sich erst durch Nachjustieren wesentlicher Einstellparameter ein. Der Zeitaufwand hierfür betrug lediglich 20 Minuten. Die Beispiele verdeutlichen, dass es sich sogar bei Ausgangswerten innerhalb der 10%-Grenze lohnen kann, den spezifischen Strombedarf näher zu betrachten. Dies ist insbesondere bei Fällen ratsam, in denen der Zyklus weniger als 40 s dauert. »

## KUNSTSTOFF Bibliothek

24/7 geöffnet

[www.kunststoff-bibliothek.de](http://www.kunststoff-bibliothek.de)



Maschinenbauart	Akkumulatormaschine	Schneckendurchmesser [mm]	Schließkraftbereich [kN]
Hydraulisch	Ja + Nein	115 – 200	5000 – 20000
Hybrid	Ja + Nein	110 – 133	6000 – 10000
Servohybrid	Nein	150 – 260	10000 – 40000

**Tabelle 1.** In die Überprüfung einbezogene Maschinenbauarten und -größen Quelle: M. König;

Datenbasis: Schoeller Allibert

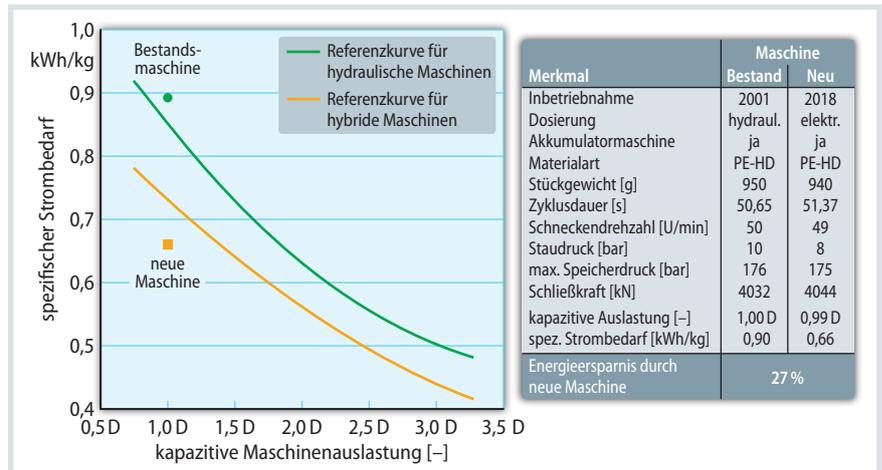
Im Rahmen eines Beschaffungsprozesses ist es üblich, Lieferanten von Spritzgießmaschinen zu befragen, welche Stromersparnis mit der angebotenen Neumaschine gegenüber dem „Ist-Wert“ zu erzielen sei. Übliche Antworten beziffern die Einsparungen auf 40 oder gar bis zu 50%. Wie kommen diese Aussagen zustande? Solche Werte beziehen sich auf das Ideal, wenn also der Kunde nur den aktuellen Stromverbrauch einer vergleichbaren Bestandsmaschine nennt und der Lieferant daraufhin Auskunft gibt über den spezifischen Strombedarf bei Nennauslastung, also bei 3D. Natürlich werden Einsparungen erreicht, in einer Größenordnung von 40 bis 50% aber nur unter besonderen Voraussetzungen. Ein eindimensionaler Zahlenvergleich (Bild 1) kann zu einer – in Wahrheit utopischen – Einsparprognose führen.

### Klarer Faktenvergleich objektiviert das Einsparpotenzial durch Neuanschaffung

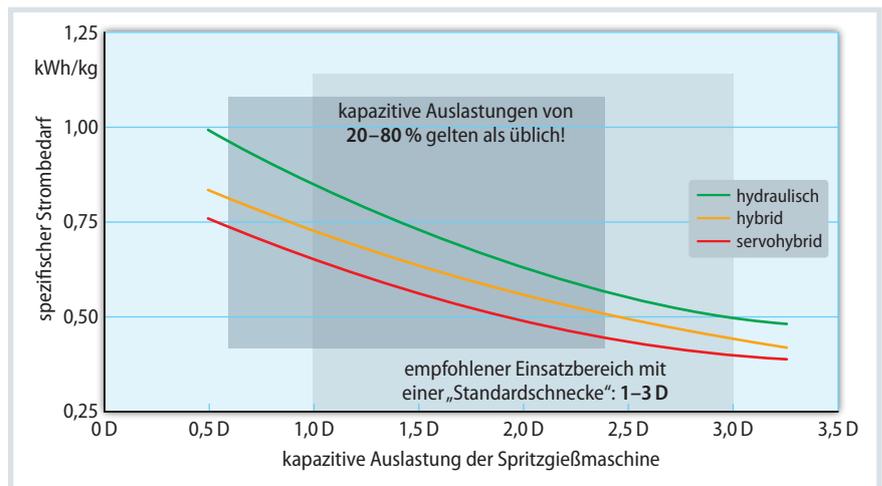
Bei dem hier dokumentierten Faktenvergleich (Bild 6) handelt es sich um Maschinen identischer Auslegung und desselben Herstellers. Der Gegenüberstellung kam der zufällige Umstand zugute, dass auf beiden Maschinen parallel das gleiche Produkt mit Werkzeugen derselben Generation „gespritzt“ wurde. Die Einstellparameter wurden vor der Messung einander weitgehend angepasst. Die für den Vergleich wesentlichen Merkmale sind in der Grafik tabellarisch aufgelistet. Der Faktenvergleich ergab eine Einsparung von 27%. Ein Arbeiten mit Referenzkurven hilft, die real erzielbare Stromersparnis durch eine Neuanschaffung zu objektivieren.

Berechnungsgröße	Einheit	Daten	
Kunststoff	–	PE-HD	PP
Schneckendurchmesser	mm	110	
3D-Dosierweg	mm	330	
3D-Volumen	cm <sup>3</sup>	3135	
Volumenschumpfung	%	15	
Dichte bei Raumtemp.	g/cm <sup>3</sup>	0,94	0,91
Aktuelles Stückgewicht	g	1000	
3D-Stückgewicht	g	2504	2425
Kapazitive Auslastung	–	1,20D	1,24D

**Tabelle 2.** Berechnung der kapazitiven Maschinenauslastung Quelle: M. König, E&P Management



**Bild 6.** Nachweis der tatsächlichen Energieeinsparung durch Neuanschaffung und Ersatz einer Bestandsmaschine Quelle: M. König, Datenbasis: Schoeller Allibert; Grafik: © Hanser



**Bild 7.** Referenzkurven für den Bereich üblicher Arbeitspunkte von Spritzgießmaschinen

Quelle: M. König, E&P Management; Grafik: © Hanser

Die Erfahrungen mit dem Umgang der drei vorgestellten Referenzkurven sind äußerst positiv. Mit dem Abstand des tatsächlichen spezifischen Strombedarfs zu dem relevanten Referenzwert wird deutlich, wie energieeffizient die Maschine arbeitet und wo – unter Einhaltung der geforderten Produktqualität und Zykluszeit – das erreichbare Effizienzziel liegt. Die Referenzkurven repräsentieren Durchschnittswerte für eine große Bandbreite an Bauarten, Schließkräften und Zykluszeiten, insbesondere für die Energieeffizienz von Bestandsmaschinen (bis Baujahr 2015).

### Gerade für den Bestand sind Referenzkurven ein ideales Hilfsmittel

Bei einer Zyklusdauer unter 40 s ist ein spezifischer Strombedarf unterhalb des Referenzwerts anzustreben. Sollte die

Zykluszeit darüber, aber nicht über 100 s liegen, so sollte der spezifische Strombedarf nicht mehr als 10% über dem Referenzwert liegen. Messergebnisse (Bilder 3 und 6) zeigen aber auch, dass die Teillastkurven offensichtlich flacher verlaufen, wenn Spritzgießmaschinen mit moderner Mess-, Steuer- und Regeltechnik ausgestattet sind.

Solange Betriebsanleitungen für Spritzgießmaschinen keine Referenzkurven in Form eines Zykluszeit-parametrierten Kennfelds sowie Korrekturhinweise für ausgewählte Kunststoffarten enthalten, solange können die Referenzkurven (Bild 7) auch für moderne Maschinen als Orientierung dienen. Für Bestandsmaschinen (bis Baujahr 2015) bieten die Referenzkurven eine zuverlässige Grundlage, die Energieeffizienz zu bestimmen und die real zu erwartenden Einsparpotenziale abzuschätzen. ■