

Analyse von Aluminiumdruckgießprozessen mittels dualer Energiesignatur

Zur Wertschöpfung trägt lediglich ein geringer Teil der eingesetzten Energie bei.

VON RAINER SCHILLIG, AALEN, TIMO STOCK, AALEN/CHEMNITZ, MIRIAM SCHMEILER, AALEN, UND EGON MÜLLER, CHEMNITZ

Energie gewinnt aufgrund der Begrenztheit fossiler Energieträger in Verbindung mit dem wachsenden Energiebedarf der Industrienationen als Kostenfaktor zunehmend an Bedeutung. Speziell die energieintensiven Branchen, darunter die Gießereibranche, sind von den steigenden Energiepreisen betroffen.

Das Aluminiumdruckgießen zählt in der Automobil- und Zulieferindustrie zu den bedeutendsten Gießverfahren. Der Druckgießprozess ist sehr energieintensiv. In den letzten Jahren wurden in vielen Aluminiumdruckgießereien erste Energieeinsparmaßnahmen, wie die Optimierung des Schmelzofens, erfolgreich umgesetzt [1]. Die Druckgießmaschinen und deren unmittelbare Peripherie jedoch blieben bislang weitestgehend unangetastet, obwohl dort die wesentlichen Einsparpotentiale liegen.

Das Verfahren der dualen Energiesignaturen zur Identifikation von Energieverschwendung in Fertigungsprozessen hat sich gut bewährt [2]. Dabei erfolgt die Einteilung des Zeit- und Energieeinsatzes ausschließlich dual in wertschöpfend und nicht wertschöpfend. Wertschöpfender Energiebedarf führt zu einem Mehrwert am Produkt [2]. Dieser Ansatz ist an etablierte Klassifizierungsmethoden (Einteilung der Prozessabläufe mittels der vier Leistungsarten [3] oder der Refa-Lehre [4]) angelehnt. Bei den Leistungsarten wird die Nutzleistung als wertschöpfend definiert (Bild 1 oben). Stützleistung ist aus technischen Gründen teilweise erforderlich, jedoch wie Blind- und Fehlleistung per Definition nicht wertschöpfend [5]. Bild 1 zeigt Beispiele für die Leistungsarten.

Diese Logik auf die Refa-Lehre übertragen bedeutet:

- > Die Hauptzeit, der Betriebszustand Produktivbetrieb/Bearbeitung, wird als wertschöpfend definiert (Bild 1 unten).

- > Nebenzeiten, wie die Betriebszustände „Aus“, „Stand by“ und „Fertigungsbereit“, tragen nicht unmittelbar zum Mehrwert am Produkt bei und sind damit nicht wertschöpfend.

In diesem Beitrag wird ein Verfahren zur Berechnung des wertschöpfenden Energieeinsatzes beim Aluminiumdruckgießen vorgestellt.

Durch Gegenüberstellung mit dem tatsächlich gemessenen Gesamtenergiebedarf der Druckgießmaschine können ein energetischer Wertschöpfungswirkungsgrad η_{Eva} berechnet und Verbesserungspotentiale abgeleitet werden. Gleichzeitig wird der zeitliche Wertschöpfungswirkungsgrad η_{tva} bestimmt.

Analyse und Bilanzierung des elektrischen Energieeinsatzes

Druckgießmaschinen werden vorwiegend hydraulisch betrieben. Dies ermöglicht eine hohe Dynamik zum Beschleunigen der Massen während des Formfüllens.

In einer mittelständischen Gießerei wurde mit einer hydraulischen Kaltkammer-Druckgießmaschine (Frech DAK 720) ein Kühlkörper mit den Abmessungen ca. 450 mm × 300 mm × 5 mm aus Aluminiumdruckguss hergestellt.

Bild 2 zeigt die elektrische Leistungsaufnahme der Druckgießmaschine in den einzelnen Prozessabschnitten. Der Gesamtenergiebedarf innerhalb eines Zyklus beträgt 338,1 Wh. Dieser setzt sich aus dem Bedarf der Antriebe, der Steuerung und der Schaltschrankkühlung zusammen. Neben der konstanten Grundlast (ca. 15 000 W) fallen die hohen Leistungsspitzen (ca. 70 000 W) auf. Diese werden durch die Maschinenbewegung und das Aufladen des Druckspeichers hervorgerufen.

Bilanzierung des Zeit- und Energieeinsatzes mittels dualer Energiesignaturen

Zur Erstellung dualer Energiesignaturen beim Aluminiumdruckgießen wird folgendes Verfahren vorgeschlagen:

KURZFASSUNG:

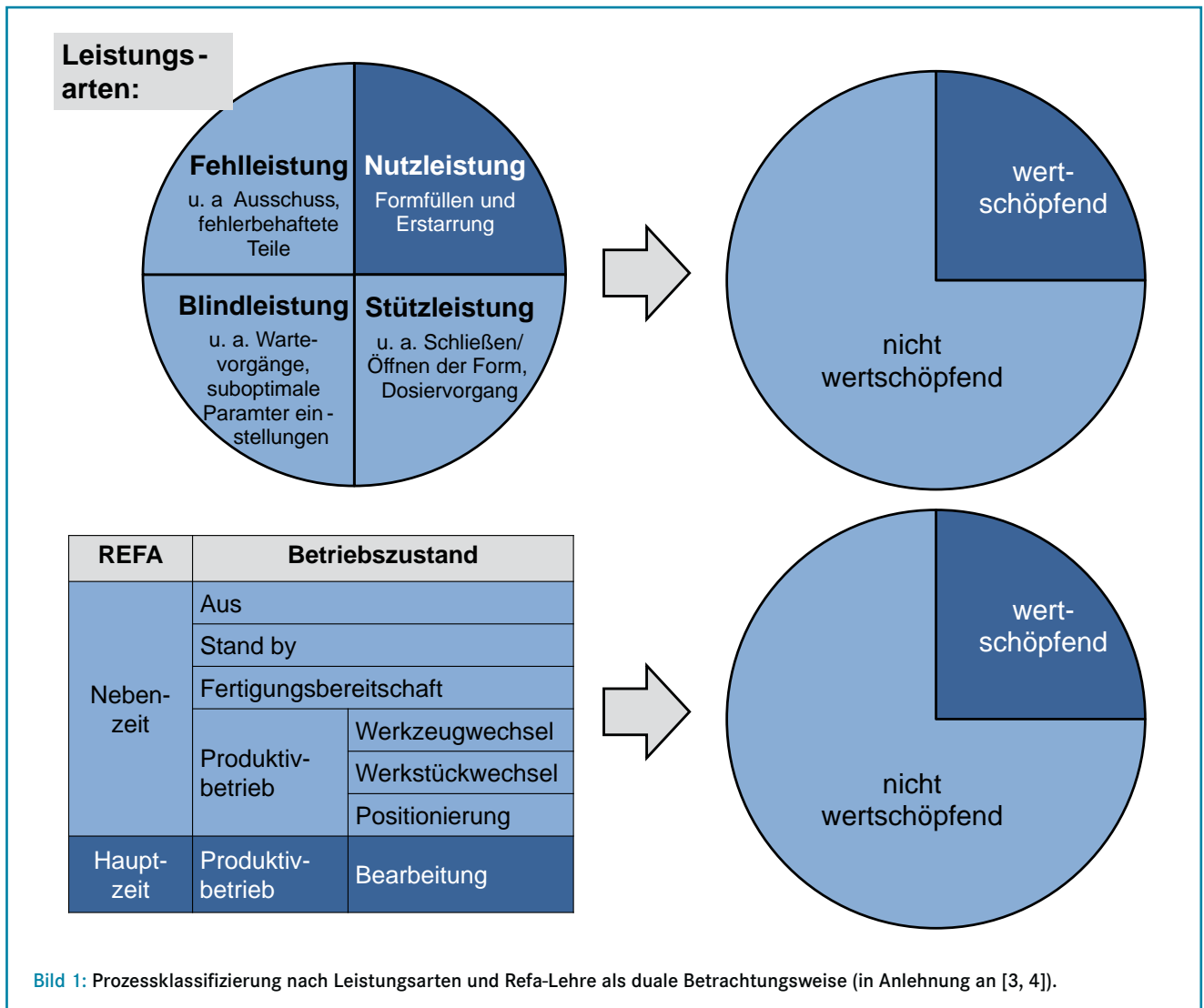
Aluminiumdruckgießen ist eine energieintensive Fertigungstechnologie. Vom Aufschmelzen des Rohmaterials bis zum Abkühlen des Formteils wird Energie benötigt. Meist ist jedoch nicht bekannt, wieviel Energie für die tatsächliche Wertschöpfung beim Gießprozess erforderlich ist. Dieser Beitrag stellt ein praxistaugliches Verfahren vor, das es erlaubt, den Energieeinsatz bei Druckgießmaschinen dual in wertschöpfend und nicht wertschöpfend zu unterteilen. Es lassen sich damit Effizienzbetrachtungen durchführen und Verbesserungspotenziale ableiten.

- Aufnahme des Gesamtenergiebedarfs der Druckgießmaschine und Beschreibung der Prozessabschnitte (Bild 2),
- Berechnung eines „idealen Druckgießprozesses“,
- Gegenüberstellung des gemessenen Gesamtenergiebedarfs und des „idealen Druckgießprozesses“ auf der Basis der Wertschöpfungsdefinition.

Definition von Wertschöpfung beim Druckgießen

Der Füllprozess ist in drei Phasen eingeteilt [6]. Als wertschöpfend kann jedoch

- nur der Energieeinsatz, der zum Formfüllen benötigt wird, angesehen werden [7]:
- > In der 1. Phase wird die Schmelze langsam bis zum Anschnitt geführt. Der Energieeinsatz ist nicht wertschöpfend.
 - > In der 2. Phase wird die Schmelze mit hoher Geschwindigkeit in die Form gefüllt. Die hohe Kolbengeschwindigkeit wird durch Zuschalten eines Druckspeichers realisiert. Wertschöpfend ist der unmittelbare Energieeinsatz für das Formfüllen aus dem Druckspeicher (Speicherenergie) und das Urfor-



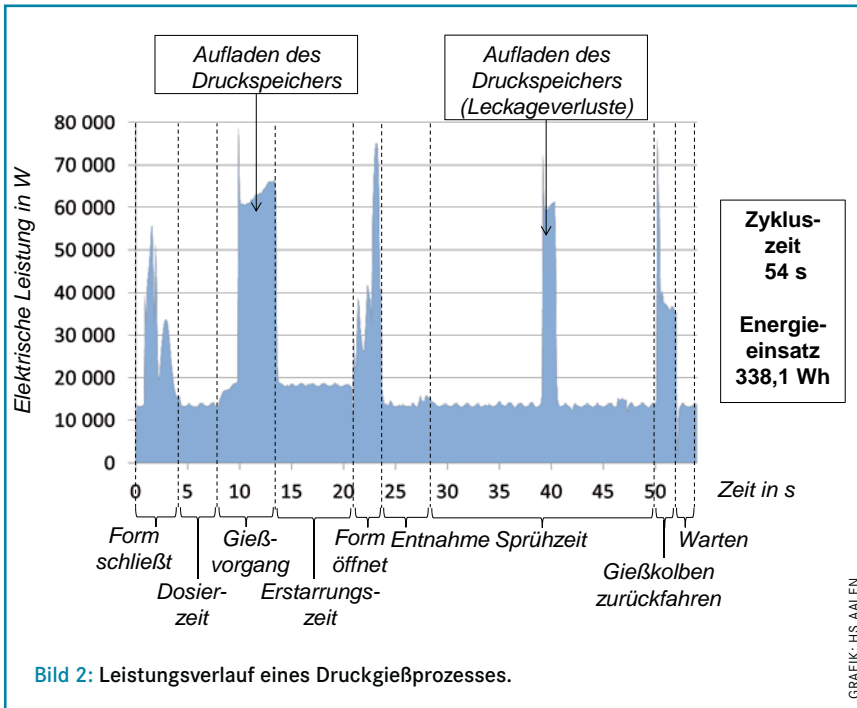


Bild 2: Leistungsverlauf eines Druckgießprozesses.

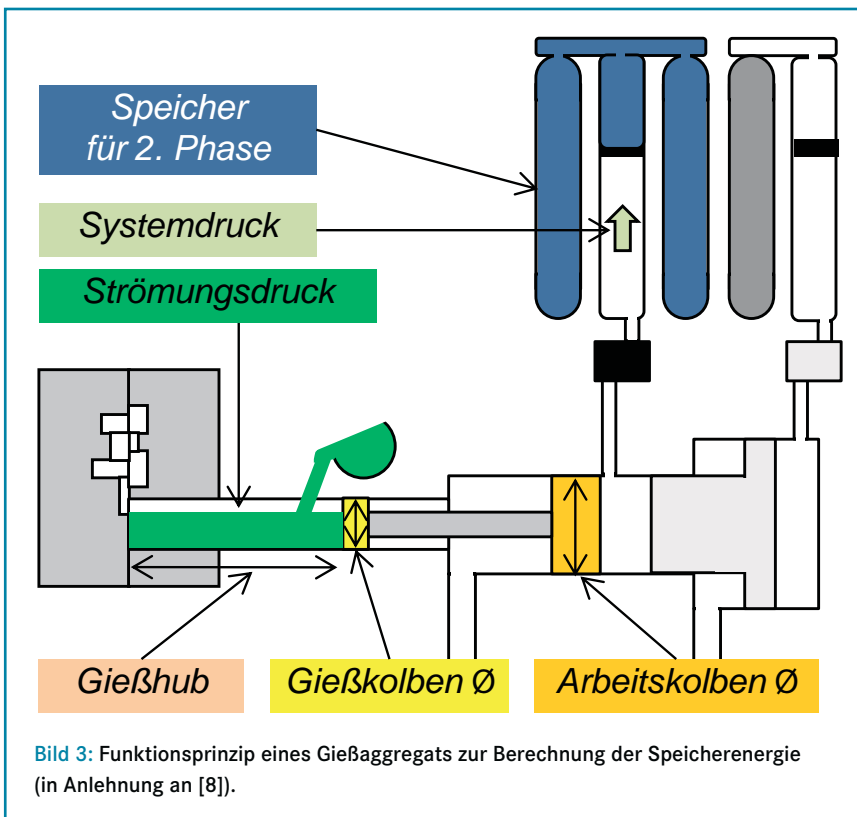


Bild 3: Funktionsprinzip eines Gießaggregats zur Berechnung der Speicherenergie (in Anlehnung an [8]).

men, um die Schmelze in die gewünschte geometrische Form zu bringen (Urformenergie).

- > In der 3. Phase wird die erstarrende Schmelze unter hohem Druck verdichtet. Dies dient der Volumenkontraktion von Gasen und dem Ausgleich der Schwindung. Der hohe Druck wird oft durch einen zusätzlichen Druckspeicher/Multiplikator realisiert. Wertschöpfend ist lediglich der Energieeinsatz, der zur Dichtspeisung beiträgt (Verdichtungsenergie).

Berechnung eines „idealen Druckgießprozesses“

Der Kunde ist bereit, für das Bauteil zu bezahlen, für das Angussystem und die Überläufe nicht. Folglich wird ausschließlich das Bauteil und das dafür benötigte Material als wertschöpfend angesehen.

Die Berechnung eines idealisierten Verarbeitungsprozesses erfolgt unter folgenden weiteren Randbedingungen: Die Maschinenbewegungen und das Formfüllen werden als reibungsfrei angenommen. Das Zuhalten der Druckgießmaschine er-

folgt kraftfrei und benötigt ebenso keine Energie.

Zur Herstellung eines Formteils wird folglich in einem idealisierten Prozess lediglich die wertschöpfende Energie benötigt, bestehend aus Speicher-, Urform- und Verdichtungsenergie (siehe vorhergehender Abschnitt). Diese werden mithilfe der Gleichungen (1) bis (7) berechnet. Bild 3 zeigt das Funktionsprinzip eines Gießaggregats. Die farbigen Markierungen dienen der Verständlichkeit und finden in den nachfolgenden Formeln Anwendung.

Der tatsächliche Gießhub (ohne Angussystem und Überläufe) wird nach den Gleichungen (1) und (2) unter folgenden Annahmen berechnet:

- > Masse des Bauteils: 0,419 kg (ohne Anguss),
- > Dichte Aluminium: 2700 kg/m³ (hier wird vereinfacht mit der Dichte im erstarrten Zustand gerechnet, im flüssigen ist diese etwas geringer) [6].

$$\begin{aligned} \text{Gießvolumen} &= \frac{\text{Masse des Bauteils}}{\text{Dichte}} = \\ &= \frac{0,419 \text{ kg}}{2700 \text{ kg/m}^3} = 155,2 \text{ cm}^3 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Gießhub} &= \frac{\text{Gießvolumen}}{\pi \cdot \left(\frac{\text{Gießkolben } \varnothing}{2}\right)^2} = \\ &= \frac{155,2 \text{ cm}^3}{\pi \cdot \left(\frac{70 \text{ mm}}{2}\right)^2} = 40,3 \text{ mm} \end{aligned} \quad (2)$$

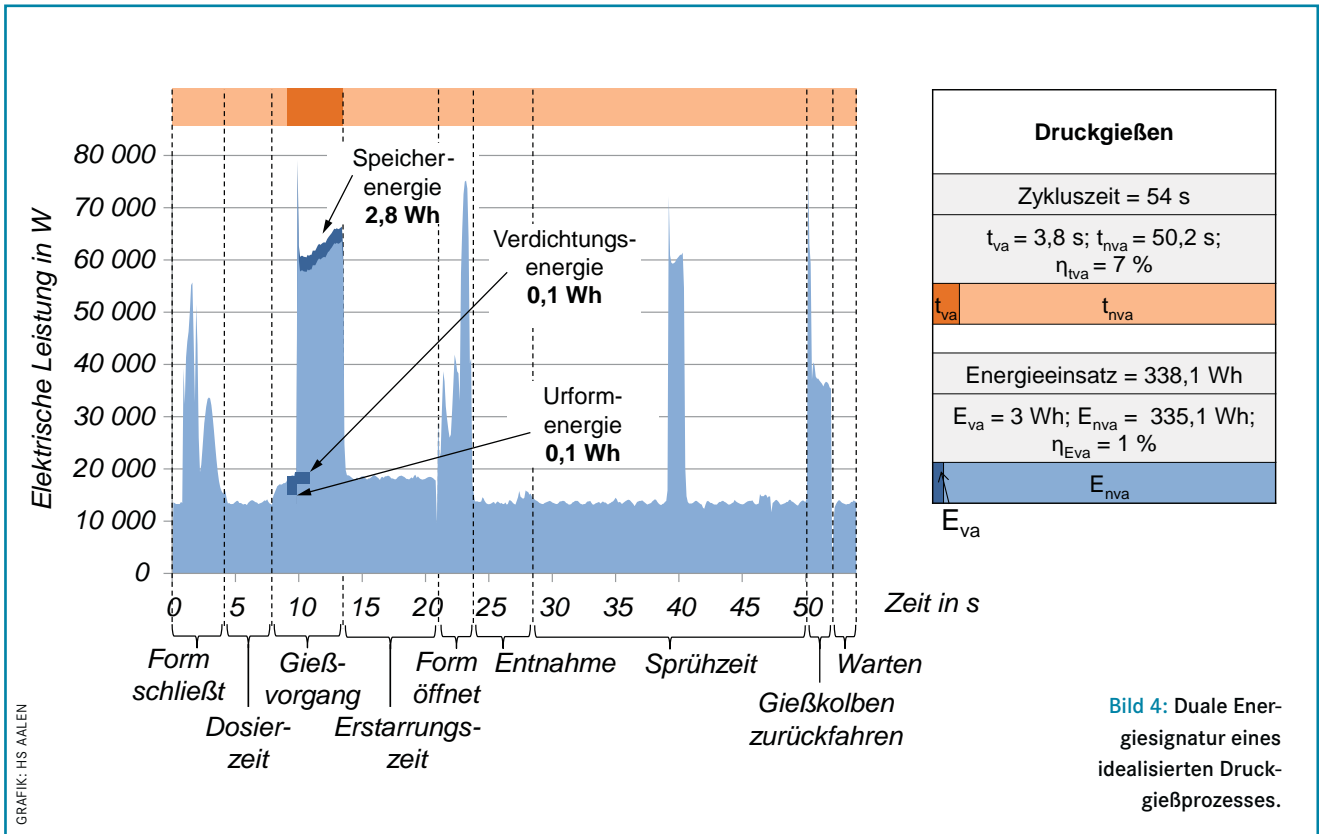
Der tatsächliche Gießhub beträgt 40,3 mm.

Berechnung der Speicherenergie

Die Gusslegierung wird in der zweiten Phase in kürzester Zeit in die Form transportiert. Dies erfordert eine hohe Beschleunigung, da die Schmelze sonst bereits während des Formfüllens erstarrt. Die dafür erforderliche Energie wird in einem Druckbehälter gespeichert (Speicherenergie). Die Hydraulikpumpe fördert entgegen dem eingeschlossenen Gas eine bestimmte Ölmenge in den Druckspeicher, bis der eingestellte Maximaldruck im Speicher erreicht ist. Die Speicherenergie berechnet sich wie folgt.

$$\begin{aligned} \text{Speicherenergie} &= \text{Arbeitskolbenfläche} \cdot \\ &\cdot \text{Gießhub} \cdot \text{Systemdruck} = \\ &= \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (140 \text{ mm})^2 \cdot 40,3 \text{ mm} \cdot \\ &\cdot 160 \text{ bar} = 2,8 \text{ Wh} \end{aligned} \quad (3)$$

Die berechnete Energie zum Befüllen des Speichers beträgt 2,8 Wh. Diese Energie



steht sofort zur Verfügung, wenn das Schussventil öffnet und die Hydraulikflüssigkeit abströmen kann.

Berechnung der Urformenergie

Die Urformenergie wird zum Einfüllen der Schmelze in den Formhohlraum benötigt. Die Berechnung erfolgt mit Hilfe der Bernoulli-Gleichung für quasistationäre Strömungen. Die durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit beträgt i. d. R. 30 bis 50 m/s [9]. Hier wurden 45 m/s angenommen.

$$\text{Strömungsdruck} = \frac{\text{Strömungsgeschwindigkeit}^2}{2} \cdot \text{Dichte des Metalls}$$

$$= \frac{(45 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2} \cdot 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 27 \text{ bar} \quad (4)$$

Aus dem errechneten Strömungsdruck und dem Gießvolumen ergibt sich die Urformenergie.

$$\text{Urformenergie} = \text{Gießkolbenfläche} \cdot \text{Gießhub} \cdot \text{Strömungsdruck}$$

$$= \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (70 \text{ mm})^2 \cdot 40,3 \text{ mm} \cdot 27 \text{ bar} = 0,1 \text{ Wh} \quad (5)$$

Verdichtungsenergie

Die Erstarrungsschrumpfung stellt beim Übergang vom flüssigen in den festen Zustand eine Volumenabnahme des Bauteils dar. Die direkte Folge ist ein Volumende-

fizit in Form von Porosität als Lunker [6]. Das Volumendefizit der Schrumpfung kann beim Gießprozess durch Nachspeisen kompensiert werden.

Die Erstarrungsschrumpfung beträgt für Aluminiumlegierungen ca. 4 % [10]. Somit können 4 % des Gießhubes der 2. Phase als Hub der Nachdruckphase angesehen werden. In der Realität ist dieser jedoch meist höher, da das Volumen im Überlauf und dem Angussystem ebenfalls schwindet.

$$\begin{aligned} \text{Hub Nachdruck} &= \text{Gießhub} \cdot 4 \% \\ &= 40,3 \text{ mm} \cdot 4 \% \\ &= 1,6 \text{ mm} \end{aligned} \quad (6)$$

Die Höhe des eingestellten Nachdrucks beträgt 640 bar. Der Zyklus wurde ohne zusätzlichen Speicher in der Nachdruckphase und ohne Multiplikator gefahren. Es ergibt sich folgende Berechnung für die Verdichtungsenergie:

$$\begin{aligned} \text{Verdichtungsenergie} &= \text{Gießkolbenfläche} \cdot \text{Hub Nachdruck} \cdot \text{Nachdruck} \\ &= \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (70 \text{ mm})^2 \cdot 1,6 \text{ mm} \cdot 640 \text{ bar} = 0,1 \text{ Wh} \end{aligned} \quad (7)$$

Die Verdichtungsenergie von 0,1 Wh wird lediglich innerhalb der Erstarrenszeit benötigt, da das Material nur bis zur vollständigen Erstarrung des Teils verdichtet werden kann. Zu beachten ist, dass sich die

eindringende Wärmestromdichte proportional zum Wärmeeindringkoeffizienten verhält und mit der Zeit abklingt (Chvorinov) [11]. Die Erstarrenszeit für unser Bauteil mit einer maximalen Wanddicke von 3 mm lässt sich somit näherungsweise wie folgt berechnen:

$$\begin{aligned} i \text{ mm} &\triangleq (i \cdot 5)^2 \text{ ms} \\ 3 \text{ mm} &\triangleq (3 \cdot 5)^2 \text{ ms} = 225 \text{ ms} \end{aligned} \quad (8)$$

Die Verdichtungsenergie wird folglich in der Erstarrenszeit von 225 ms benötigt.

Duale Energiesignatur mittels des „idealen Druckgießprozesses“

Der wertschöpfende Energieanteil ergibt sich aus der o. g. Berechnung und beträgt in Summe 3 Wh: Speicherenergie 2,8 Wh, Urformenergie 0,1 Wh und Verdichtungsenergie 0,1 Wh (Bild 4, dunkelblaue Anteile der Signatur). Der wertschöpfende Zeitanteil von 3,8 s ist oberhalb der Signatur dunkelorange gekennzeichnet. Damit ist zweifelsfrei ersichtlich, dass nur, wenn Energie wertschöpfend eingesetzt wird, auch die Zeit wertschöpfend sein kann.

Die hellblaue Signatur zeigt den nicht wertschöpfenden Energieeinsatz der Druckgießmaschine. Dieser beträgt 335,1 Wh. Der zugehörige nicht wertschöpfende Zeiteinsatz beträgt 50,2 s, hellorange dargestellt.

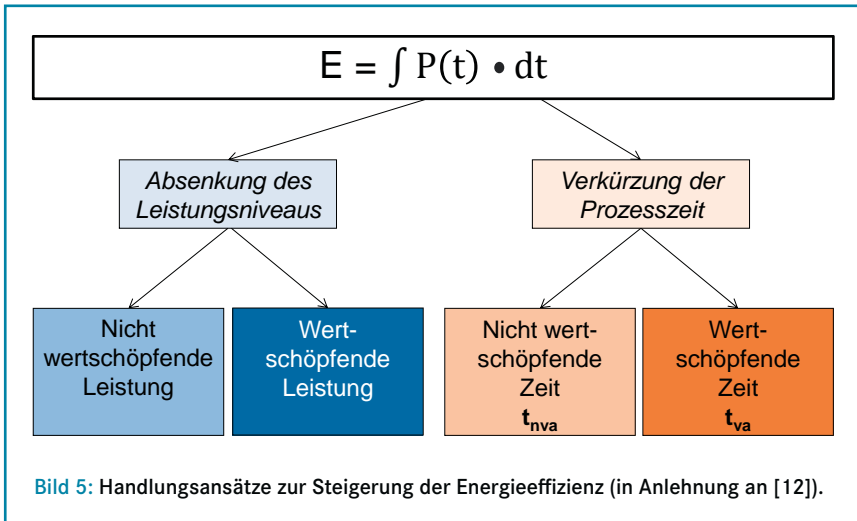


Bild 5: Handlungsansätze zur Steigerung der Energieeffizienz (in Anlehnung an [12]).

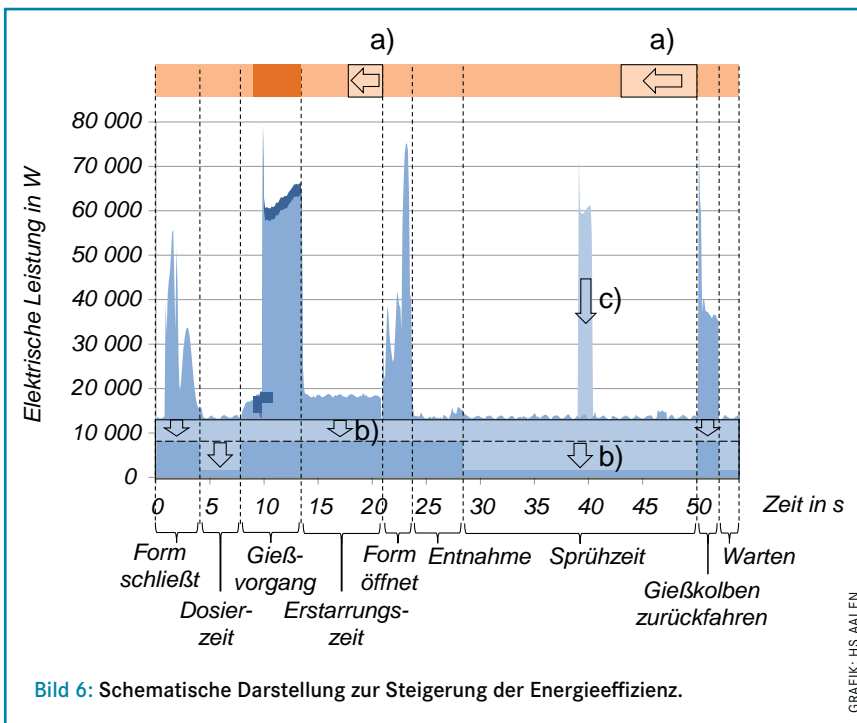


Bild 6: Schematische Darstellung zur Steigerung der Energieeffizienz.

die Prozesseffizienz zu steigern, sind grundsätzlich zwei Ansatzpunkte möglich [12]:

- > Absenkung des Leistungsniveaus P und
- > Verkürzung der Prozesszeit t.

Im Druckgießprozess lässt sich die Energieeffizienz durch folgende prinzipielle Ansätze steigern:

- a) Verkürzen der Prozesszeit: Eine Prozesszeitverkürzung führt neben einer Produktivitätssteigerung regelmäßig auch zu einer Energieeinsparung. Grund: Um Energie zu verschwenden, wird Zeit benötigt. Wird die Zeit reduziert, wird folglich auch der Energiebedarf reduziert. In der Praxis erfolgt die Einstellung der Prozessparameter Sprüh- und Erstarrungszeit im Allgemeinen nach Erfahrungswerten. Diese nicht wertschöpfenden Zeitabschnitte kritisch zu hinterfragen, zeigt regelmäßig Verbesserungspotenzial (Bild 6).
- b) Absenken des Leistungsniveaus: Das gesamte Leistungsniveau kann reduziert werden, beispielsweise durch den Einsatz energieeffizienter Hydraulikkomponenten und strömungsgerechter Rohrleitungsgestaltung (s. Bild 6). Geregelte Pumpen bieten den Vorteil der bedarfsgerechten Bereitstellung von Energie. Somit kann der Energiebedarf in Zeiten ohne Maschinenbewegung reduziert werden (s. Bild 6).

Eine weitere Möglichkeit zur Energieeinsparung bieten hybride Maschinenkonzepte. Während die hohen Beschleunigungsvorgänge beim Füllprozess bislang den Einsatz von Hydraulikkomponenten erfordern, ist der Einsatz von elektrischen Antriebskonzepten für sonstige Maschinenbewegungen zu prüfen. Diese sind deutlich energieeffizienter und bieten weitere Vorteile wie Positioniergenauigkeit und geringeren Wartungsaufwand.

- c) Weitere Verbesserungsmaßnahmen: Leckagen führen beim eingesetzten Hydraulikspeicher zu Druckverlust. Dieser muss ausgeglichen werden, um die Druckenergie in der 2. Phase zu gewährleisten (Bild 6, Leistungspeak bei 40 s). Leckage kann durch Abdichten oder steuerungstechnische Änderungen vermieden werden (Bild 6). Steuerungstechnisch kann das Aufladen des Druckspeichers an das Zyk-

Mittels dualer Signatur kann nun der zeitliche Wertschöpfungswirkungsgrad η_{tva} von 7 % (Gleichung (9)) und der energetische Wertschöpfungswirkungsgrad η_{Eva} von 1 % berechnet werden (Gleichung (10)).

Die Datenbox (Bild 4, rechts) fasst die Ergebnisse zusammen.

$$\eta_{tva} = \frac{t_{va}}{t_{va} + t_{nva}} = \frac{3,8 \text{ s}}{3,8 \text{ s} + 50,2 \text{ s}} = 7\% \quad (9)$$

$$\eta_{Eva} = \frac{E_{va}}{E_{va} + E_{nva}} = \frac{3 \text{ Wh}}{3 \text{ Wh} + 335,1 \text{ Wh}} = 1\% \quad (10)$$

η_{tva} liegt im einstelligen Prozentbereich. Bei solch geringen wertschöpfenden Zeitanteilen sollte der Prozessablauf überprüft werden. Möglicherweise liegt hier Verbesserungspotenzial durch Reduktion nicht wertschöpfender Zeitabschnitte.

η_{Eva} liegt bei ca. 1 %. Das heißt, ca. 99 % des Energieeinsatzes sind nicht wertschöpfend und damit Energieverschwendung. Die Dimensionierung der Maschine sollte überprüft, nicht wertschöpfende Energieanteile sollten kritisch hinterfragt werden.

Prinzipielle Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz im Druckgießprozess

Die elektrische Energie E ist das Integral der Leistung P über der Zeit t (Bild 5). Um

lusende verschoben werden, damit das Speicherladen näher am nächsten Schuss erfolgt. Dies führt zu einer Energieeinsparung von ca. 5 %.

Zusammenfassung

Das Thema Energieeffizienz gewinnt aufgrund der steigenden Energiepreise zunehmend an Bedeutung. Die Steigerung der Energieeffizienz erfordert Transparenz hinsichtlich des Energie- und Zeitbedarfs der Maschinen und Anlagen. Mittels dualer Energiesignaturen kann der Energie- und Zeiteinsatz in wertschöpfende und nicht wertschöpfende Anteile unterteilt werden. Bei Aluminiumdruckgießprozessen kann dies mittels des „idealen Prozesses“ erfolgen. Dabei wird der Zeit- und Energieeinsatz eines realen Prozesses einem idealisierten gegenüber gestellt. Der wertschöpfende Energieanteil wird theoretisch berechnet. Aus den Analysen lassen sich der energetische und zeitliche Wertschöpfungswirkungsgrad berechnen und Verbesserungspotentiale ableiten.

Prof. Dr.-Ing. Rainer-Ulrich Schillig, Hochschule Aalen, Aalen, M.B.A.+Eng. Timo

Stock, Hochschule Aalen, Aalen, /TU Chemnitz, Chemnitz, M.Sc. Miriam Schmeiler, Hochschule Aalen, Aalen, Prof. Dr.-Ing. Egon Müller, TU Chemnitz, Chemnitz

Literatur:

- [1] Hartmann G.; Pries, H.; Herrmann, C.: *Energie- und ressourceneffiziente Produktion von Aluminiumdruckguss*. Springer Vieweg: Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [2] ZWF 107 (2013), [Nr. 1-2], S. 20-26.
- [3] Pfeifer, T.: *Qualitätsmanagement, Strategien, Methoden, Techniken*. 3. völlig überarbeitete und erweiterte Auflage. Carl Hanser Verlag, München/Wien, 2001. S. 197.
- [4] REFA Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V.: *Methodenlehre des Arbeitsstudiums, Teil 2 Datenermittlung*. 6. Aufl. Carl Hanser Verlag, München, 1978. S. 30, 31.
- [5] Erlach, K.; Westkämper, E.: *Energiewertstrom – Der Weg zur energieeffizienten Fabrik*. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2009. S. 57.
- [6] Hasse, S.: *Gießereilexikon*. Foundry Technologies & Engineering GmbH (FT&E), (GL), Kantonsgericht Schaffhausen. Online

verfügbar unter: <http://www.giessereilexikon.com/giesserei-lexikon/> Stichwort: Umschaltzeitpunkt, Strömungsgeschwindigkeit beim Druckgießen, Erstarrungsschrumpfung.

- [7] Beitz W.; Grote K.-H.: *Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau*. 20. Ausg. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2001. ISBN: 3-540-67777-1. S. 34.
- [8] Ruhland, N.: *Druckgießen für Praktiker*. 1. Aufl. Gießerei-Verlag, Düsseldorf, 2003. S. 25.
- [9] Brunhuber, E.: *Praxis der Druckgußfertigung*. 3. Aufl. Fachverlag Schiele und Schön, Berlin, 1980. S. 15, 19.
- [10] Ostermann, F.: *Anwendungstechnologie Aluminium*. 2. Aufl. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2007. S. 197.
- [11] Leis, W.: *Wärmeübertragung beim Druckgießen*. Fachtagung Gießereikolloquium, Hochschule Aalen, 2008.
- [12] Müller, E.; Engelmann, J.; Löffler, T., u. a.: *Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben*. 1. Aufl. Springer-Verlag, Berlin, 2009. S. 122.



Von G. Engels und H. Wübbenhorst †
Herausgegeben vom
Verein Deutscher Giessereifachleute (VDG)

4., erweiterte Auflage 2007. 22,5 x 27,5 cm. 256 S./p.
ISBN 978-3-87260-156-8

49,00 €

Für persönliche Mitglieder des VDG/
For personal member of VDG

44,10 €

GIESSEREI
VERLAG

5000 Jahre Gießen von Metallen Fakten, Daten, Bilder zur Entwicklung der Gießereitechnik

Der beliebte Bildband in neu überarbeiteter und ergänzter Auflage enthält sowohl neue Erkenntnisse aus der Frühzeit des Gießens von Metallen als auch jüngste technologische Entwicklungen. Ergänzt wurde die Geschichte der alten Eisenwerke im ostdeutschen Raum, insbesondere im Erzgebirge. In dieser Weiterentwicklung gibt der aufwändig gestaltete, mit sehr interessanten

Bildern ausgestattete Kunstdruckband ein wirklich umfassendes Bild einer der wichtigsten technischen Entwicklungen der Menschheit. 5000 Jahre Gießen gehört in den Bücherschrank jedes Technik-Interessierten!

Giesserei-Verlag GmbH
Postfach 102532 · 40016 Düsseldorf · Tel.: +49 211 69936-264 · Fax: +49 211 69936-266
E-Mail: annette.engels@stahleisen.de · www.giesserei-verlag.de