

Ganzheitliche Ansätze zur Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz in der Produktion

**PD Dr.-Ing Christoph Herrmann, Dipl.-Wirtsch.-Ing. Sebastian Thiede,
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Tim Heinemann**

Technische Universität Braunschweig, Institut für Werkzeugmaschinen und
Fertigungstechnik, Abteilung Produkt- und Life-Cycle-Management

Zusammenfassung

Aus ökonomischen und ökologischen Motiven kommt der bewussten Betrachtung von Energie- und Ressourcenverbräuchen in der Produktion eine immer wichtigere Bedeutung zu. Eine realistische und zielgerichtete Analyse und Ableitung von Effizienzpotentialen verlangt allerdings ein ganzheitliches, systemorientiertes Verständnis, um z.B. Zielkonflikte zu lösen und Problemverschiebungen vermeiden zu können. Dies umfasst z.B. ein erweitertes Prozessverständnis mit allen Eingangs- und Ausgangsgrößen und realistischem Verbrauchs-/Emissionsverhalten sowie die notwendige Berücksichtigung von Wechselwirkungen mit der technischen Gebäudeausstattung. Im Themenfeld Energie- und Ressourceneffizienz ergeben sich verschiedene Handlungsfelder: basierend auf einmaliger oder permanenter Datenerfassung, dem Verstehen von Zusammenhängen sowie geeigneten Methoden zur Bewertung und Vorhersage von Betriebsverhalten (z.B. über energieorientierte Simulation) gilt es letztendlich, Energie- und Ressourcenverbräuche neben klassischen Zielgrößen (z.B. Auslastung, Durchlaufzeiten/Termtreue, Qualitätsraten) als weitere Dimension in die betriebliche Entscheidungswelt zu integrieren. Beispiele für ganzheitliche Betrachtungsansätze finden sich in den BMBF-geförderten Projekten ProGress und EnHiPro. ProGress (Gestaltung ressourceneffizienter Prozessketten am Beispiel Aluminiumdruckguss, <http://www.progress-aluminium.de>) fokussiert die Bewertung und Gestaltung der energieintensiven Prozesskette Aluminiumdruckguss hinsichtlich des Energie- sowie des Materialeinsatzes. In EnHiPro (Energie- und Hilfsstoffoptimierte Produktion, <http://www.enhipro.de>) liegt das Ziel in der notwendigen Integration von Energie- und Hilfsstoffverbräuchen in das betriebliche Produktionsmanagement mit besonderem Fokus auf produzierende KMU. Diese sollen auf kontinuierlicher Basis in die Lage versetzt werden, organisatorischen und technischen Maßnahmen zur Effizienzsteigerung zu ermitteln und die Auswirkungen zu bewerten.

1 Motivation

Produktion ist „die Erzeugung von Ausbringungsgütern (Produkten) aus materiellen und nicht-materiellen Einsatzgütern (Produktionsfaktoren) nach bestimmten technischen Verfahrensweisen“ [1] und damit ein gleichzeitig wertschöpfender wie wertverzehrender Transformationsprozess. Neben menschlicher Arbeit und Betriebsmitteln stellen hierbei Rohmaterialien und Energie wesentliche Eingangsfaktoren dar. Der effizienten Nutzung von Energie und Ressourcen kommt eine immer stärkere Bedeutung zu. Zum einen sind mit der Gewinnung bzw. Erzeugung teilweise erhebliche Umweltwirkungen verbunden. So verbrauchen produzierende Unternehmen z.B. ca. 47% der Elektrizität in Deutschland und sind allein dadurch für 18% der nationalen CO₂ Emissionen verantwortlich. (Dazu kommen weitere ca. 20% durch direkte Emission, z.B. Feuerungen) [2]. Zum anderen ist die Gewinnung und Aufbereitung von Rohstoffen ebenfalls oftmals mit erheblichen Umweltbelastungen verbunden, der Bauxitabbau zur Aluminiumherstellung sei hierfür nur beispielhaft erwähnt. Die Vermeidung bzw., Reduzierung von Umweltwirkungen rückt in den letzten Jahren durch gesetzliche Rahmenbedingungen, gesamtgesellschaftliche (Klima-) Diskussion und auch eigenmotivierte Umwelterorientierung der Unternehmen verstärkt in den Vordergrund. Darüber hinaus beinhaltet die Berücksichtigung dieser zunächst

umweltorientierten Aspekte mittlerweile auch eine klare wirtschaftliche Motivation. Dies liegt vor allem an den in den letzten Jahren gestiegenen Preisen für Rohstoffe (z.B. Aluminium) und Energie (Gas, Öl, Elektrizität), was zu erhöhtem Kostendruck in den Unternehmen führte (*Abbildung 1*). Trotz momentan aufgrund der gesamtwirtschaftlichen Lage wieder etwas entspannter Preislage, ist zukünftig von weiteren Steigerungen auszugehen. Aus mittel- bis langfristiger Sicht ist in diesem Zusammenhang auch ein möglicher zukünftiger Mangel an strategisch wichtigen Ressourcen ein entscheidender Treiber.

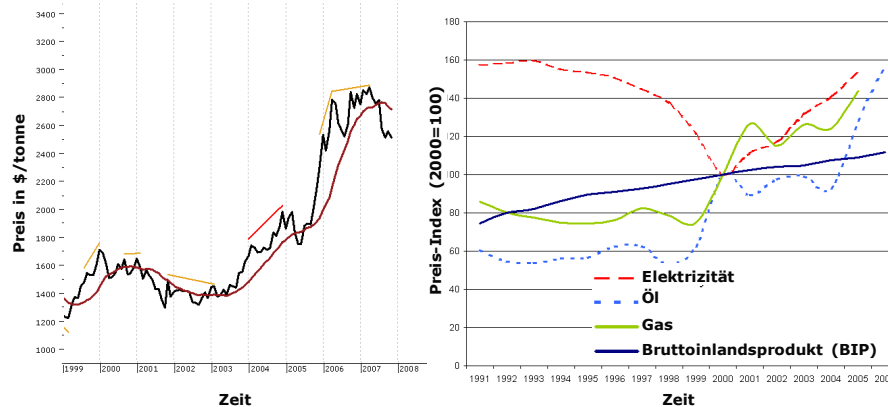


Abb. 1: Preisentwicklung für Rohstoffe (Bsp. Aluminium) und Energie (Quelle: [2] [3]).

2 Ganzheitliches Systemverständnis

Eine realistische und zielgerichtete Analyse und Effizienzverbesserung von Energie- und Ressourcenverbräuchen in der Produktion verlangt ein ganzheitliches, systemorientiertes Verständnis, um z.B. Zielkonflikte zu lösen und Problemverschiebungen vermeiden zu können [4]. Hierfür lassen sich folgende Voraussetzungen definieren:

- **Erweitertes Prozessverständnis:** Für die Schaffung ganzheitlicher Lösungen und zur Vermeidung von Problemverschiebungen müssen explizit alle Input- und Outputströme von Produktionsprozessen berücksichtigt werden. Dies umfasst alle energetischen (z.B. Druckluft, Strom, Abwärme) und stofflichen (z.B. Hilfsstoffe wie Kühlschmierstoffe) Flüsse, die direkt oder indirekt (z.B. durch notwendige Bereitstellung) zu zusätzlichem Energie- und/oder Ressourcenverbrauch führen.
- **Ganzheitliche Systemdefinition der Fabrik:** Interne Wechselwirkungen der konstituierenden Elemente einer Fabrik verlangen auch ein erweitertes Verständnis des Systems Fabrik als Ganzes. Hiernach sind im Wesentlichen die drei Teilsysteme Produktion (Maschinen und Mitarbeiter koordiniert durch Produktionsplanung und -steuerung), Technische Gebäudeausstattung (TGA) und Gebäudehülle zu unterscheiden. Aufgaben der TGA sind im Fabrikzusammenhang die Sicherstellung notwendiger Umgebungsbedingungen der Produktion (z.B. Klimatisierung) sowie die Herstellung, Bereitstellung und Aufbereitung (bei Kreislaufführung) notwendiger Medien und Energie (z. B. Druckluft, Prozesswärme in Form von Dampf, Warm-/Kaltwasser). Dazu wird ebenfalls Energie in Form von Elektrizität, Gas oder Öl benötigt bzw. direkt aus regenerativen Energiequellen erzeugt (z. B. Solarenergie, Windenergie, Biomassekraftwerk). Wie in *Abbildung 2* dargestellt, sind die drei Teilsysteme keinesfalls isoliert zu betrachten, sondern die systemdynamischen Abhängigkeiten zu berücksichtigen. Eine Bewertung der Energieeffizienz einer Fabrik muss z. B. alle von außerhalb des Systems zugeführten nicht-regenerativen Energieströme (z. B. Strom, Öl, Gas) und sowohl den Energieverbrauch der Produktion als auch den der technischen Gebäudeausstattung berücksichtigen [5].
- **Dynamik des Verbrauchs-/Emissionverhaltens und Wechselwirkungen:** Alle relevanten Input- und Outputströme sind überwiegend dynamische Größen und hängen vom Betriebszustand der Prozesse bzw. der Maschinen ab. Auf Fabrikebene ist erst das

dynamisch auf Basis von Einzellastprofilen und Wechselwirkungen entstehende Gesamtlastprofil (z.B. Prozesswärmebedarf, Druckluftbedarf, Wärmefluss in die Fabrikhalle) entscheidend für Auslegung und Aussteuerung der TGA.

- **Denken in Prozessketten:** Endprodukte sind normalerweise nicht Resultat eines einzelnen Fertigungsprozesses sondern entstehen vielmehr in mehreren Schritten auf verschiedenen Produktionsanlagen im Sinne einer Produktionsprozesskette. Vor dem Hintergrund der Energie- und Ressourceneffizienz muss die Prozesskette als Ganzes betrachtet und bewertet werden, da hier ggfs. weitere Potenziale liegen (z.B. Zusammenfassung von Prozessen) oder aber verbessernde Maßnahmen in einem Prozess ggfs. zu einer Verschlechterung in anderen Teilprozessen führen können.
- **Lebenszyklusorientierte Sichtweise:** Analog zur Denkweise in Prozessketten müssen bei Verbesserungsmaßnahmen bzgl. der Energie- und Ressourceneffizienz alle Lebensphasen von Produkten (dies sind auch die Betriebsmittel selbst) berücksichtigt werden, da auch hier Problemverschiebungen entstehen können oder Potentiale ungenutzt bleiben. So liegt der entscheidende Hebel zur Erhöhung der Energieeffizienz von z.B. Werkzeugmaschinen natürlich weniger bei der Verbesserung einzelner Parameter eines speziellen Prozesses sondern vielmehr bereits bei der Entwicklung der Maschine selbst. Auch hat die Wahl bestimmter Prozesse (z.B. Fügeverfahren) direkte Auswirkungen auf Nutzungs- und Entsorgungsphase (z.B. Festigkeit, Demontierbarkeit), was dort zu erhöhten Aufwänden führen kann.
- **Berücksichtigung aller Nachhaltigkeitsdimension und integrierte Bewertung:** zur Ableitung vorteilhafter Lösungen sind mehrere relevante Zieldimensionen integrativ zu berücksichtigen. Neben einer ökologischen Bewertung (mit korrekter Verrechnung der verschiedenen Eingangs- und Ausgangsgrößen, z.B. Umweltauswirkung von Strom- bzw. Gasverbrauch) umfasst dies eine realistische wirtschaftliche (auf Basis eines geeigneten Kostenmodells, das reale Vertragskonditionen berücksichtigt) und technische Betrachtung (z.B. Auswirkungen auf Produktqualität). Mögliche Zielkonflikte müssen aufgezeigt und Entscheidungsunterstützung zu deren Lösung angeboten werden.

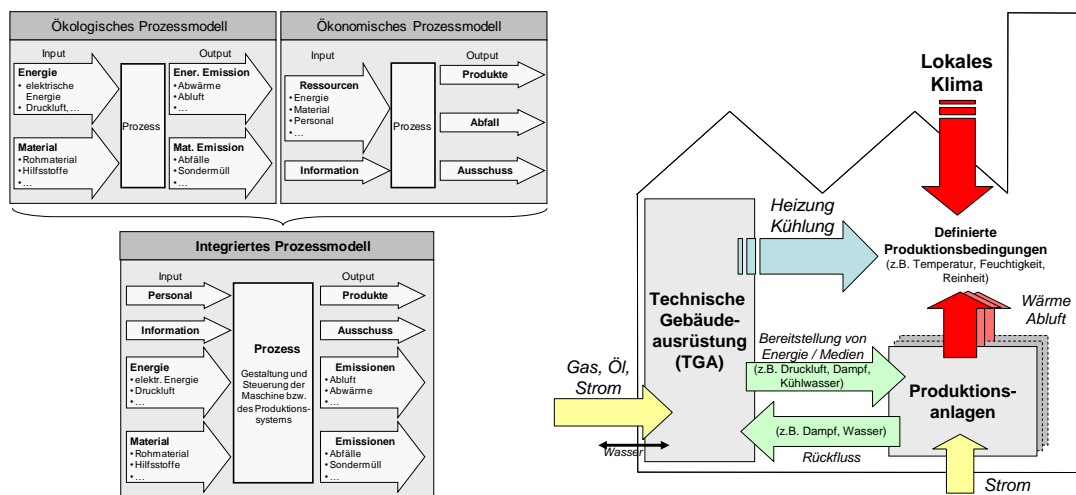


Abb. 2: Integriertes Prozessmodell zur nachhaltigkeitsorientierten Prozessbewertung und ganzheitliche Systemdefinition des Fabriksystems [4] [5].

Vor dem Hintergrund obiger Ausführungen zeigt *Abbildung 3* Handlungsfelder im Themenfeld Energie- und Ressourceneffizienz in der Produktion. Hierbei kann zwischen der Maschinen- bzw. Prozessperspektive und der Sichtweise auf Prozessketten bzw. Fabrikssystem differenziert werden, wobei beides wie oben dargestellt unmittelbar zusammenhängt. Basierend auf einmaliger oder permanenter Datenerfassung, dem

Verstehen von Zusammenhängen sowie geeigneten Methoden zur Bewertung und Vorhersage von Betriebsverhalten gilt es letztendlich, Energie- und Ressourcenverbräuche neben klassischen Zielgrößen (z.B. Auslastung, Durchlaufzeiten/Termtreue, Qualitätsraten) als weitere Dimension in die betriebliche Entscheidungswelt zu integrieren. Angelehnt an diese Systematik werden in den folgenden Abschnitten einzelne Elemente anhand von Beispielen detaillierter erläutert.

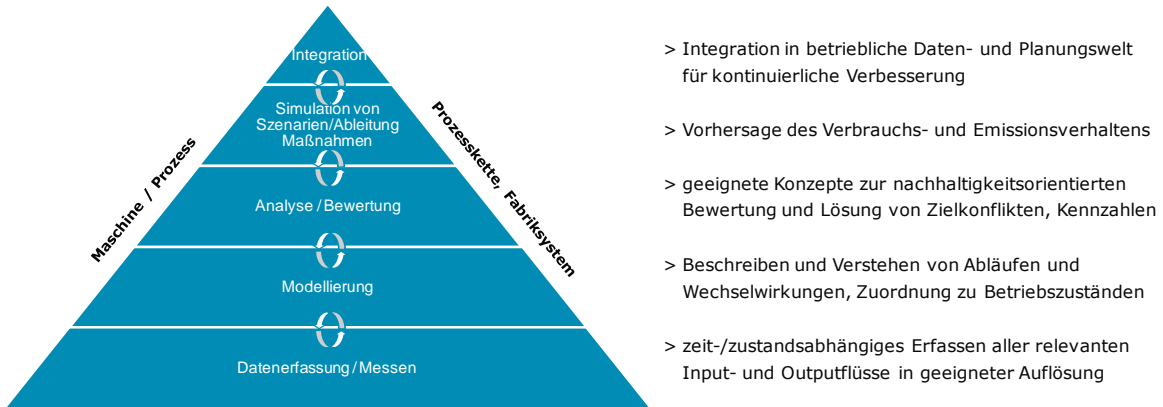


Abb. 3: Handlungsfelder im Themenfeld Energie- und Ressourceneffizienz in der Produktion.

3 Bewertung und Gestaltung energie- und ressourceneffizienter Prozessketten am Beispiel Aluminiumdruckguss

Die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Aludruckgussindustrie ist aufgrund hoher branchenspezifischer Energieverbräuche eng mit den aktuell vorherrschenden, hohen Energiepreisen gekoppelt. Die notwendige Energie wird im Wesentlichen zum Erwärmen und Schmelzen des Aluminiums, für die Druckgießmaschine mit den Peripheriegeräten und für die Formtemperierung benötigt. Die Wärmebilanz des Gesamtprozesses ist dabei durch hohe Energieverluste gekennzeichnet, die in *Abbildung 4* dargestellt sind. Die energetischen Verluste wurden im Rahmen eines von der DBU geförderten Projektes zur Energiebilanz des Druckgießprozesses ermittelt [6]. Es wird deutlich, dass ein großer Teil der eingebrachten Energie während des Prozesses in Form von Wärme bzw. durch Kühlvorgänge verloren geht. Insgesamt sind die hohen Wärmeverluste im Druckgießprozess unter Gesichtspunkten des Umweltschutzes als äußerst unbefriedigend anzusehen.

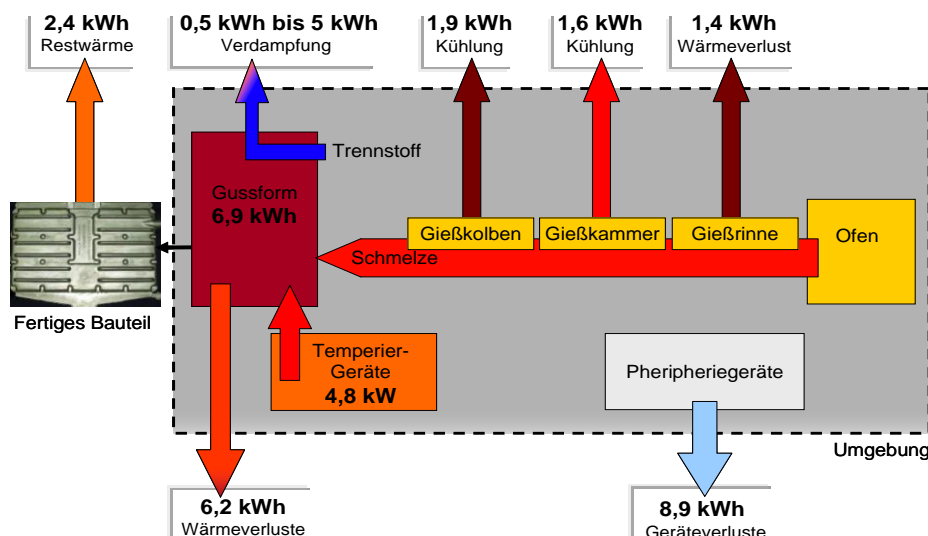


Abb. 4: Energetische Flüsse beim Druckguss von Aluminium [6].

Neben der Betrachtung der effizienten Nutzung von Energie und Hilfsstoffen bei der Herstellung von Aluminiumgussteilen ist auch die möglichst effiziente Bereitstellung und Nutzung des Aluminiums selbst von wichtiger Bedeutung. Je nach Teilespektrum, Anzahl der verwendeten Legierungen und vorrätiger Infrastruktur wird die Schmelzebereitstellung aus Masseln/Kreislaufmaterial und Aufarbeitung in der Gießerei vorgenommen oder die flüssige Legierung wird direkt in Thermobehältern angeliefert. Es entstehen somit diverse Stoffkreisläufe in denen Material in unterschiedlichen Qualitäten immer wieder erschmolzen und aufgearbeitet werden muss. Allerdings ist gerade die schlechte Ausnutzung des Rohstoffs Aluminium im Prozess problematisch. Überlauf und Anguss (die bis zu 50% bei der gegossenen Form ausmachen können) sowie fertige Bauteile, die nicht der geforderten Qualität entsprechen oder Teile aus dem Anfahrprozess werden als Recycling-Material zum Teil in Masseln umgeschmolzen und müssen den gesamten energieintensiven Prozess erneut durchlaufen. Dies betrifft je nach Fertigungsparametern bzw. Bauteil 30-70% des ursprünglich eingebrachten Materials. Darüber hinaus fallen 2-5% Materialverluste an, die nicht wieder in den Prozess eingebracht werden können (z.B. durch starke Verunreinigungen) und somit verloren sind [7]. Während diese Verluste aus Sicht des Unternehmens vor allem durch Materialkosten entscheidend sind, ist aus Umweltsicht die äußerst energieintensive und Umwelt schädigende Gewinnung von Aluminium äußerst kritisch zu sehen ist (Abfälle mit Umweltgefährdungspotential, große Flächen zum Abbau von Bauxit notwendig, Elektrolyse zur Aluminiumgewinnung). Damit führt eine Verbesserung der Materialeffizienz und damit Reduktion des Aluminiumverbrauchs aus globaler Sicht 'indirekt' ebenfalls zu einer erheblichen Senkung des Energiebedarfs.

Im BMBF-geförderten Projekt ProGress (Gestaltung ressourceneffizienter Prozessketten am Beispiel Aluminiumdruckguss, <http://www.progress-aluminium.de>) wird nun in Einklang mit dem erweiterten Prozess- und Systemverständnis (siehe oben) ein integrierter Ansatz verfolgt. Neben der isolierten Analyse von Material- und Energieverbräuchen und -verlusten einzelner Prozesse wird in ProGress die Bewertung und Gestaltung der gesamten Prozesskette Aluminiumdruckguss hinsichtlich des Energie- sowie des Materialeinsatzes angestrebt. Hierfür ist eine Betrachtung der Energieverbräuche und Stoffströme von der Ebene der Einzelprozesse über einzelne Produktionssysteme hin zu unternehmensübergreifenden Lieferketten entlang der Prozesskette Aluminiumdruckguss notwendig.

Ausgehend von Unternehmenskennzahlen werden zunächst Verbrauchskennwerte der Anwenderunternehmen generiert und als Effizienzmaß für das individuelle Produktionssystem genutzt. So können erste Zusammenhänge zwischen Produktionsvolumen und Produktionssystemen in Beziehung zum Ressourcenverbrauch und Energieaufwand pro Fertigteil identifiziert werden. Für die unternehmensinterne Prozesskette vom Einschmelzen des Materials über das Warmhalten und Dosieren an der Druckgussanlage und den Druckgussprozess selbst bis hin zur mechanischen Nachbearbeitung lassen sich so als Folge unterschiedlicher Automatisierungsgrade, Nutzungsgrade und Losgrößen auch stark differierende Verbrauchsgrößen hinsichtlich der verwendeten Energieträger dokumentieren. *Abbildung 5* zeigt die Anteile der Energieträger Gas und Elektrizität an dem Energiebedarf pro Kilogramm endbearbeitete Gussteile über die hausinterne Prozesskette zweier ausgewählter Gießereien.

Unternehmen 1 repräsentiert dabei ein Unternehmen mit stark standardisierten und automatisierten Prozessen mit hohem Nutzungsgrad. Unternehmen 2 repräsentiert hingegen ein Unternehmen, das sich durch eine hohe Variantenvielfalt bei relativ kleinen Losgrößen und einer großen Anzahl an manuellen Tätigkeiten auszeichnet. Unterschiedliche Konzepte zur Bereitstellung und Dosierung der Schmelze aufgrund der Anforderungen der unterschiedlichen Produktionsprogramme führen zu einem variierenden prozentualen Anteil der unterschiedlichen Energieträger.

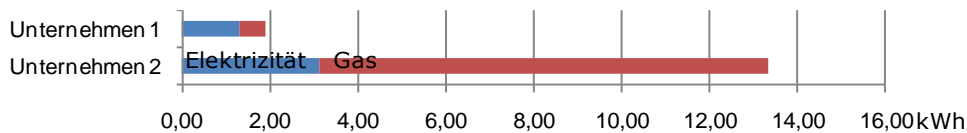


Abb. 5: Energieverbrauch je kg Gussteil in der unternehmensinternen Prozesskette.

Um nun die Nutzungseffizienz der einzelnen Energieträger in diesem Produktionssystem zu steigern, ist insbesondere auch eine Analyse der einzelnen Systembestandteile erforderlich. In Druck-Gießereien stellen Druckgusszellen sinnvolle Subsysteme dar. Sie vereinen die Druckgussmaschine selbst, Dosierofen, Temperiergeräte sowie diverse weitere Peripheriegeräte. Wird nun auf den Verbrauch elektrischer Energie in diesem Subsystem fokussiert, können unterschiedliche Lastgänge der Einzelverbraucher beobachtet werden, die sich zu einem Gesamtlastgang überlagern, welcher wiederum den Beitrag der Druckgusszelle zum Leistungsabruf des gesamten Produktionssystems widerspiegelt.

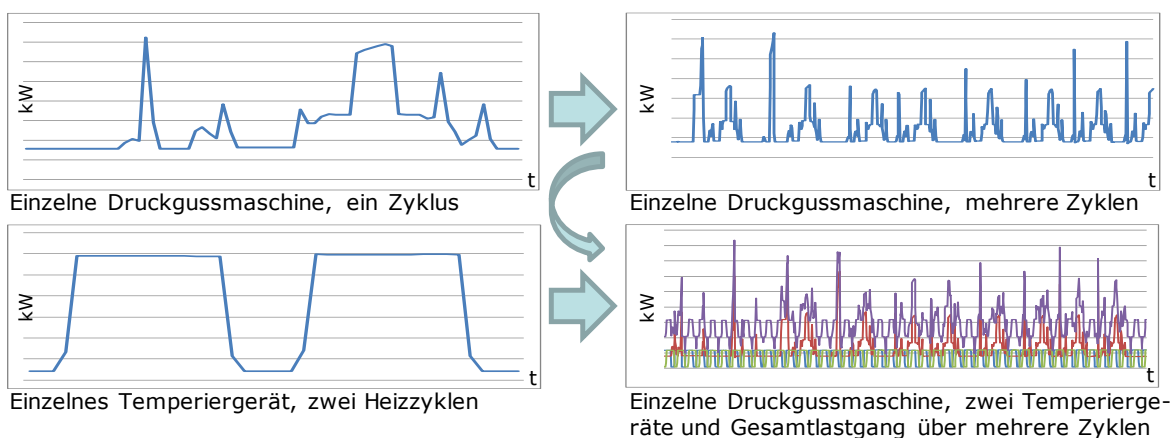


Abb. 6: Überlagerung von Lastgängen in Druckgusszellen.

Wie aus *Abbildung 6* ersichtlich ist, können für ausgewählte Verbraucher charakteristische Lastgänge (hinsichtlich Standby-Verbräuchen, Lastspitzen, lastabhängigen Niveaus, etc.) dokumentiert werden, die im Rahmen des Projektes ProGRess auch in anderen Produktionsumgebungen der Aluminiumdruckgussbranche beobachtet werden können und sich teilweise nur durch einen Skalierungsfaktor unterscheiden. Sie bieten sich also an, um bereits bei der Planung einer neuen Druckgusslinie oder auch im Rahmen einer dynamischen Simulation der Aluminiumdruckgussfertigung herangezogen zu werden. So kann bereits vor Inbetriebnahme neuer Produktionssysteme oder aber auch bei der Änderung von Prozessparametern frühzeitig das Verhalten der Prozesskette vorherbestimmt und energetisch effizient ausgelegt werden. Darüber hinaus lassen sich die aufgenommenen Lastgänge auch zur Effizienzsteigerung in bereits bestehenden Druckgusszellen nutzen, um sowohl technologische als auch organisatorische Potenziale zu identifizieren und Maßnahmen abzuleiten. Auf diesem Wege können sowohl auf Einzelprozessebene als auch unternehmensübergreifend Hebel zur Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz identifiziert werden, um Emission von Klimagasen dauerhaft reduzieren und gleichzeitig die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Aluminiumdruckgussbranche sichern zu können.

4 Energieorientierte Simulation

Wie dargestellt ist für eine realistische, energie- und ressourceneffiziente Auslegung von Systemen mit mehreren Maschinen die Berücksichtigung der Verbrauchs- und auch Emissionsdynamik von großer Bedeutung. So können hiermit nicht wertschöpfende Verluste aufgezeigt und Maßnahmen zur Abstellung abgeleitet werden. Auch sind Belastungsspitzen sowohl aus wirtschaftlicher (z.B. Leistungs-/Leistungsüberschreitungpreiskomponente in

Energieversorgungsverträgen) als auch aus technischer Sicht (z.B. Auslegung elektrisches Netz und TGA) von wichtiger Bedeutung. Da statische Ansätze hierzu nicht mehr ausreichend sind, wurde zur energieorientierten Analyse und Bewertung von Prozessketten bzw. Fabrikssystemen ein geeigneter Simulationsansatz entwickelt [8] [9]. Hiermit können Produktionssysteme mit allen Anlagen und den relevanten energetischen und stofflichen Flüssen modelliert werden. Auch werden Wechselwirkungen mit der TGA wie z.B. die notwendige Energie zur Bereitstellung von Druckluft berücksichtigt. *Abbildung 7* zeigt beispielhaft Ergebnisse einer Fallstudie: Auf Basis eines modellierten Produktionssystems wurden Szenarien (in diesem Fall Variationen im Bereich Produktionsplanung und -steuerung) simuliert und eine integrierte Bewertung nach ökologischen (Stromverbrauch), wirtschaftlichen (Stromkostenberechnung auf Basis eines realen Vertragsmodells mit Leistungspreis) und technischen (Produktionszeit) Gesichtspunkten durchgeführt. Die Diagramme zeigen das resultierende Lastprofil verschiedener Szenarien. Es fällt auf, dass das energetische Verhalten des Produktionssystems wesentlich durch Produktionsplanung und -steuerung beeinflusst werden kann. Auch zeigen sich in diesem Fall Zielkonflikte zwischen den verschiedenen Bewertungsdimensionen. Wie dargestellt ist auf dieser Basis nun eine integrierte Bewertung und die Ableitung von aus Gesamtsicht vielversprechenden Maßnahmen möglich (im Beispiel ist z.B. Szenario 3 zu bevorzugen).

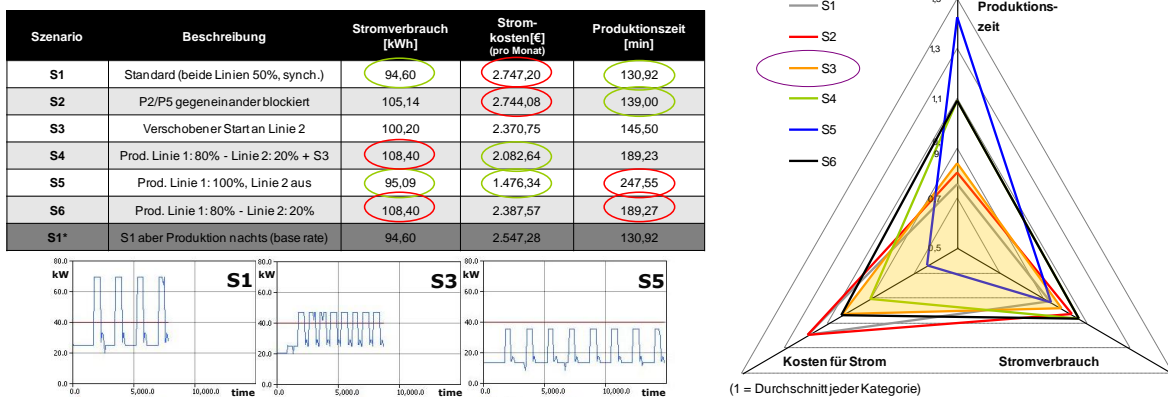


Abb. 7: Beispielhafte Ergebnisse einer energieorientierten Prozesskettensimulation und integrierte Bewertung [8].

5 Energie- und Hilfsstoffoptimierte Produktion

In Forschung und industrieller Praxis sind mittlerweile eine Vielzahl möglicher Maßnahmen zur Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz grundsätzlich bekannt [10]. Allerdings fehlt es insbesondere für KMU an Entscheidungsunterstützung bzgl. konkreter Einsetzbarkeit und Wirksamkeit solcher Ansätze im speziellen Fall. Mit dem BMBF-geförderten Projekt EnHiPro (Energie- und Hilfsstoffoptimierte Produktion, <http://www.enhipro.de>) werden produzierende KMU auf kontinuierlicher Basis in die Lage versetzt, solche organisatorischen und technischen Maßnahmen zur Effizienzsteigerung zu ermitteln und die Auswirkungen zu bewerten. Neben Strom-, Gas- oder Ölverbräuchen werden hierbei explizit auch andere Energieformen bzw. Hilfsstoffe wie z.B. Druckluft, Prozesswärme oder Kühlschmierstoffe berücksichtigt. Wie in *Abbildung 8* dargestellt, liegt das Ziel in der notwendigen Integration von Energie- und Hilfsstoffverbräuchen in das betriebliche Produktionsmanagement. Durch eine geeignete Verknüpfung von Messtechnik und IT-Anwendungen zur Verbrauchserfassung und -kontrolle werden hierfür die realen Verbrauchswerte zunächst erfasst und visualisiert. Diese Daten bilden die Grundlage zur Analyse und Bewertung von Maßnahmen zur Optimierung der Energie- und Hilfsstoffeffizienz, indem Effekte und Potentiale von Maßnahmen vorhergesagt und visualisiert werden. Auf Basis einer energie- und hilfsstoffverbrauchsorientierten Auswertung von Prozessketten wird hiermit ein Beitrag zur Schließung der vielfach zu beobachtenden Lücke zwischen Wissen und Handeln geleistet.

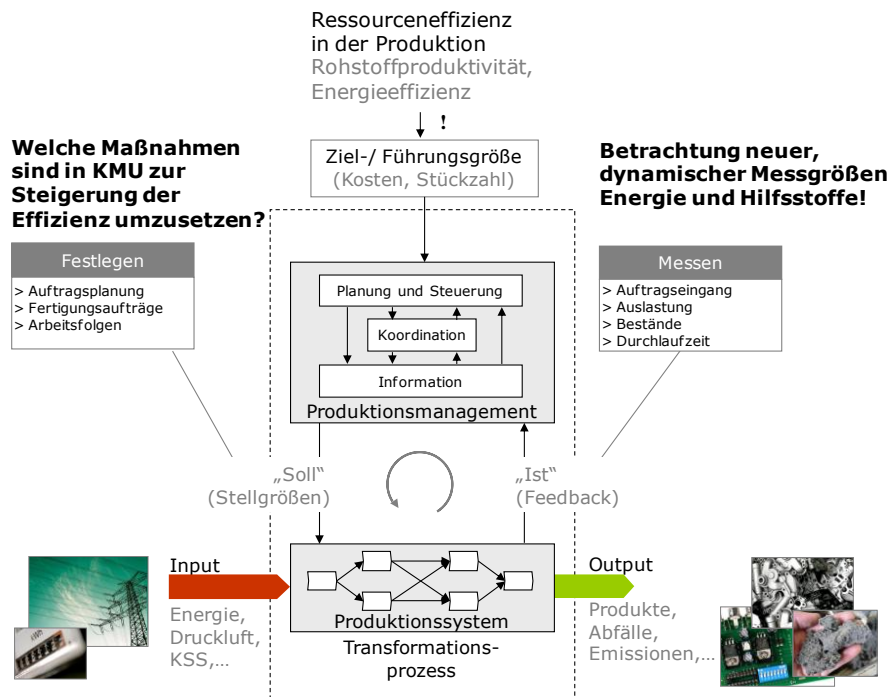


Abb. 8: Integration von Energie- und Ressourcenverbräuchen in den betrieblichen Regelkreis der Produktion.

Literatur:

- [1] Günther, H.-O.; Tempelmeier, H., 2005, Produktion und Logistik. 6., verb. Aufl., [Hauptbd.], Springer.
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Energiedaten -nationale und internationale Entwicklung, 2009, verfügbar unter <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/energiestatistiken.html>
- [3] London Metal Exchange Webseite, 2008, verfügbar unter <http://www.lme.com/>.
- [4] Herrmann, C., 2009, Ganzheitliches Life Cycle Management, Springer.
- [5] Hesselbach, J.; Herrmann, C.; Detzer, R.; Martin, L.; Thiede, S.; Lüdemann, B., 2008, Energy Efficiency through optimized coordination of production and technical building services, In: 15th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Sydney, Australien, Seite 624-629, ISBN 978-1-877040-67-2.
- [6] Optimierung der Energiebilanz beim Aluminium-Druckgießprozess, Abschlussbericht September 2007, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Förderkennzeichen AZ 22197, Institut für Füge- und Schweißtechnik, TU Braunschweig.
- [7] Institut für Füge- und Schweißtechnik, TU Braunschweig.
- [8] Herrmann, C., Thiede, S., 2008, Increasing Energy Efficiency in Manufacturing Companies through Process Chain Simulation, In: Sustainability and Remanufacturing VI - Global Conference on Sustainable Product Development and Life Cycle Engineering, Pusan, Korea, 2008, Seite 52-57.
- [9] Herrmann, C., Thiede, S., 2009, Process chain simulation to foster energy efficiency in manufacturing, In: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Elsevier, ISSN 1755-5817.
- [10] Seefeldt, F; Wunsch, M.; Baumgartner, W.; Matthes, U., 2007, Energieeinsparung und Energieeffizienz. Potenzialermittlung im Auftrag des BMWi 18/06, Prognos AG.