

Verwendung dualer Energiesignaturen zur Optimierung von Wertschöpfungsketten (*Using dual energy signatures for the optimization of value streams*)

Müller, E.¹; Schillig, R.²; Stock, T.²

¹ TU Chemnitz, Professur Fabrikplanung und Fabrikbetrieb

² HTW Aalen, Professur Fertigungsorganisation und Prozessmanagement

Abstract

Der Kern des Toyota Produktionssystems (TPS) bzw. des ‚Lean-Production‘ Gedankens ist die systematische Minimierung von Verschwendung in Wertschöpfungsketten. Die Betrachtungsweise ist holistisch, d. h. sie ist auf die Schaffung eines Gesamtoptimums hin ausgerichtet. Eine von der Gesamtbetrachtung losgelöste Optimierung einzelner Prozessabschnitte wird nicht angestrebt. Im Fokus steht die Wertschöpfungskette als Ganzes. Prozesse werden danach beurteilt, ob sie wertschöpfend sind oder nicht. Nicht wertschöpfende Prozesse werden minimiert, wo möglich, eliminiert. Die Wertstromanalyse hat sich als praxistaugliches Verfahren bewährt, das es ermöglicht, die Wertschöpfungszeit getrennt von der nicht wertschöpfenden Prozessdurchlaufzeit zu betrachten. In den letzten Jahren wurde sie von verschiedenen Autoren um die Betrachtung des Energieeinsatzes erweitert. Keiner dieser Autoren hat jedoch den Energieeinsatz auf die beiden Kategorien wertschöpfend und nicht wertschöpfend hin untersucht. In diesem Aufsatz wird gezeigt, dass gerade diese duale Betrachtung des Energieeinsatzes der inneren Logik der Wertstromanalyse entspricht.

The core of the Toyota Production System (TPS) and the idea of lean production, respectively, is the systematic reduction of wastes within value streams. The focus is holistic, i. e., it is directed on the creation of an optimum of the entire system. An optimization of individual process sections, detached from this holistic view, is not pursued. In the centre of attention is the whole value stream. Processes are evaluated regarding whether they are value adding or not. Non-value adding processes are minimized or, if possible, eliminated. The Value Stream Mapping has proven to

R. Neugebauer, U. Götze, W.-G. Drossel (Hrsg.), *Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung und Bewertung technischer Systeme – Erkenntnisse aus dem Spitzentechnologiecluster eniPROD*, Tagungsband zum 1. und 2. Methodenworkshop der Querschnittsarbeitsgruppe 1 „Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung“ des Spitzentechnologieclusters eniPROD, *Wissenschaftliche Scripten*, Auerbach, 2013.

URN: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-109067>

be a practicable method allowing the consideration of the value added separated from the non-value added process lead time. In recent years, several authors have extended the methodology of Value Stream Mapping by the analysis of energy demand. However, none of these authors has examined the energy input regarding the two categories of value adding and non-value adding. The paper seizes this shortcoming and presents a method transferring the dual view of Value Stream Mapping to the analysis of energy demand.

Keywords:

Energiewertstromanalyse, Wertstromanalyse, Lean and Green Production, Duale Energiesignaturen, Energieeffiziente Produktion

Energy Value Stream Mapping, Value Stream Mapping, Lean and Green Production, dual energy signatures, energy-efficient production

1 Einführung

Mit der Energiewende in Deutschland erlangte das Thema ‚Energieeffiziente Produktion‘ innerhalb kürzester Zeit hohe Bedeutung. Das produzierende Gewerbe ist einer der größten Energieverbraucher in unserem Lande und gleichzeitig ein Schlüsselfaktor für unseren Wohlstand. Im letzten halben Jahrhundert galten die Rationalisierungsbemühungen der Industrie primär der Steigerung der Arbeitsproduktivität, deutlich abgeschlagen der Materialproduktivität und zuletzt der Steigerung der Energieproduktivität.

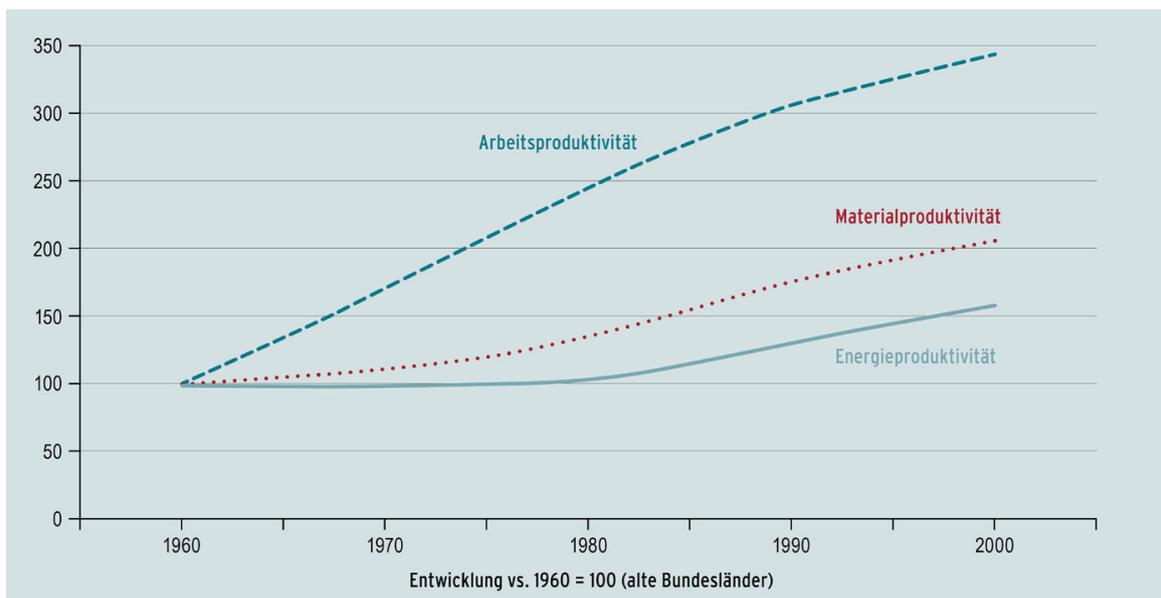


Bild 1: Entwicklung der Arbeits-, Material- und Energieproduktivität [1]

Es ist jedoch nicht allein die Energiewende, die einen Handlungsdruck in Richtung Energieeffiziente Produktion erzeugt. Die Begrenztheit fossiler Energieträger in Verbindung mit dem wachsenden Energiebedarf der Industrienationen führt dazu, dass Energie als Kostenfaktor zunehmend an Bedeutung gewinnt. Der hohe Preisanstieg im 20. Jahrhundert führte bereits zu einem überproportional steigenden Anteil der Energiekosten an den Gesamtkosten der Produktion, vgl. Bild 1 und 2. [2]

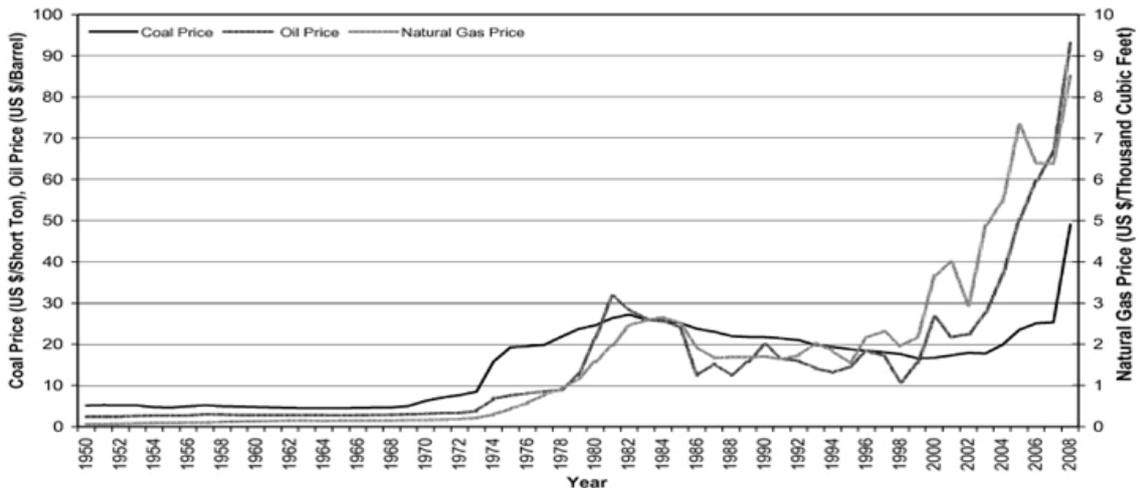


Bild 2: Energiepreisentwicklung Weltmarkt von 1950 bis 2008 [3]

Eines der Verfahren, welches bislang erfolgreich zur Steigerung der Arbeitsproduktivität eingesetzt wird, ist die Wertstromanalyse. Sie ist methodisch robust und in der industriellen Praxis bekannt und bewährt. Es bietet sich daher an, diese Methode dahingehend zu erweitern, dass mit ihr auch die Energieproduktivität gesteigert werden kann.

2 Wertstrombetrachtung

2.1 Elemente des TPS erweitert um Energiebetrachtung

Über das TPS ist viel geschrieben worden. Auf die Frage: ‚What is Toyota doing now‘ antwortete seiner Zeit Taichi Ohno, einer der Architekten des TPS: ‚All we are doing is looking at the time line. From the moment the customer gives us an order to the point when we collect the cash. And we are reducing that time line by removing the non-value-added wastes‘. [4]

Es geht im TPS also darum, den zeitlichen Abstand zwischen der Auftragserteilung und der Bezahlung des Produkts möglichst kurz zu halten. Anders ausgedrückt, die mit der Werterstellung verbundenen Vorfinanzierungskosten so schnell als möglich aus den Verkaufserlösen begleichen zu können. Um dieses scheinbar triviale Ziel erreichen zu können, sind im TPS nicht wertschöpfende Prozesse, wo immer mög-

lich, zu eliminieren. Hierfür nahm Ohno eine Klassifizierung der Verschwendungsarten vor. [4]

- Waste of overproduction
- Waste of time on hand (waiting)
- Waste in transportation
- Waste of processing itself
- Waste of stock on hand (inventory)
- Waste of movement
- Waste of making defective products

Diese sieben Verschwendungsarten sind üblicherweise mit Energieeinsatz verbunden. Betrachtet man beispielsweise ‚waste of overproduction‘, so bedeutet das in Bezug auf den Energieeinsatz, dass Energie aufgewendet wurde für die Bearbeitung von Waren, die nicht direkt weiterverarbeitet oder verkauft werden können. Sie wurden ‚auf Halde‘ produziert. D. h. zu den mit der Überproduktion verbundenen vorfinanzierten Material- und Lohnkosten sind also auch noch die mit ihr verbundenen Energiekosten zu addieren. Der Vorfinanzierungsaufwand wird erhöht, die ‚time line‘ nicht verkürzt, und es lässt sich feststellen, dass diese Verschwendungsarten regelmäßig mit Energieverschwendung einhergehen. [5]

2.2 Wertstromanalyse und Energiewertstrombetrachtung

Rother und Shook [6] stellten 1999 mit der Wertstromanalyse erstmalig ein praxistaugliches Verfahren vor, das es ermöglicht, die Zykluszeit getrennt von der nicht wertschöpfenden Durchlaufzeit zu betrachten. Damit folgten sie der inneren Logik des TPS, die Prozesse einer Wertschöpfungskette lediglich in die Kategorien wertschöpfend und nicht wertschöpfend einzuteilen. Bei ihrer Betrachtung stand die Minimierung der Durchlaufzeit im Fokus.

Sie stellten der Durchlaufzeit die Summe der Zykluszeiten gegenüber, die sie Verarbeitungszeit nannten und konnten damit aufzeigen, welche durchlaufzeitverlängernde Wirkung die batch-orientierte Produktion in großen Losen mit sich bringt. Rother und Shook unterschieden zwar zwischen der Wertschöpfungszeit und der Zykluszeit – in ihren Wertstromdiagrammen wird jedoch, die Verarbeitungszeit regelmäßig als Summe der Zykluszeiten dargestellt. Dies kann den Eindruck erwecken, dass die Prozessabläufe innerhalb der Zykluszeiten grundsätzlich frei von Verschwendung seien. Dem ist jedoch nicht so. Es ist also erforderlich, innerhalb der Zykluszeiten die wertschöpfenden und die nicht wertschöpfenden Zeitanteile zu identifizieren, erst dann lässt sich der Energieeinsatz in den Zykluszeiten ebenfalls in wertschöpfend und nicht wertschöpfend aufteilen.

Die Notwendigkeit dieser dualisierten Betrachtung des Energieeinsatzes scheint schon früher erkannt worden zu sein, wenn in [7] formuliert wird ‚So wie beim Wertstromdesign wertschöpfende und nicht wertschöpfende Prozessschritte transparent gemacht werden, die beide Zeit ‚fressen‘, so kann man in der Analogie wertschöpfende von nicht wertschöpfenden Prozessen unterscheiden, die beide Energie ‚fressen‘.

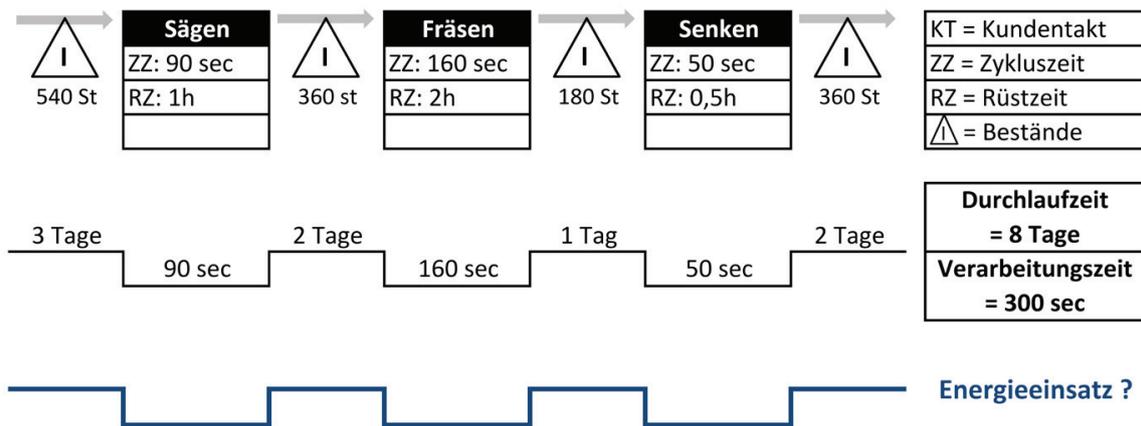


Bild 3: Wertstromanalyse (eigene Darstellung angelehnt an Rother/Shook) [6]

In der Vergangenheit wurden verschiedene Vorschläge vorgestellt, den Energieeinsatz in die klassische Wertstromanalyse zu integrieren. Hierzu sei auf die Arbeiten von Erlach und Westkämper [8], Reinhart [9] sowie Brüggemann [10] verwiesen. Bislang liegt jedoch keine Untersuchung vor, welche sowohl die Zykluszeit als auch den Energieeinsatz innerhalb derselben konsequent einer dualen Betrachtung unterzieht.

3 Aufnahme dualer Energiesignaturen am Beispiel eines Zerspanungsprozesses

3.1 Versuchsaufbau

Im Zerspanungslabor der Hochschule Aalen wurden mit einem 3-achsigen Vertikal-Bearbeitungszentrum der Firma Hermle (Typ C 30 V) in Folge drei Nuten in ein Bauteil aus Vergütungsstahl C45 gefräst, Bild 4. Die Zerspanung wurde im Vollschnitt durchgeführt mit drei HSS-Schafffräsern mit den Durchmessern 8, 12 und 16 mm, mit einer Zustellung von 7,5 mm über eine Strecke von 60 mm. Die Energiemessung erfolgte mit Hilfe eines portablen Leistungsmessgerätes der Firma Yokogawa (Typ CW240). Dieses wurde, während des Betriebs, mittels Stromwandler und Klemmprüfspitzen angeschlossen. Neben der elektrischen Energie benötigt das Bearbeitungszentrum zusätzliche Energie in Form von Druckluft. Mit Hilfe eines

Strömungssensors der Firma ifm (Typ SD6000) fand parallel die Volumenstrommessung statt.



Bild 4: Leistungs- und Druckluftmessung an einem Bearbeitungszentrum im Vollschnitt

Der erste Durchgang wurde im Luftschnitt gefahren, d. h. ohne Werkstück. Damit ließ sich die Energiesignatur des Prozesses ohne Kraftschluss ermitteln. Der zweite Durchgang erfolgte mit Werkstück, also unter Kraftschluss. [11]

3.2 Versuchsergebnisse und Analyse

Die jeweiligen Betriebszustände der Maschine und die duale Energiesignatur des Zerspanungsprozesses sind in Bild 5 dargestellt. Die hellgraue Signatur, zeigt die Leistungsaufnahme im Luftschnitt. Die dunkelgraue Signatur zeigt die zusätzliche Leistungsaufnahme bei Zerspanung. Wertschöpfend ist ausschließlich der Zerspanungsprozess. Die wertschöpfenden Zeiten sind darunter mittels dunkelgrauer Balken markiert. Die hellgraue Signatur am Ende der Abbildung zeigt den Druckluftverbrauch. Dieser ist ausschließlich nicht wertschöpfend.

Die für die Zerspanung unmittelbar benötigte Energie beträgt 10 Wh, die wertschöpfende Zeit 25 s. Der nichtwertschöpfende Energieeinsatz 145 Wh (116 Wh + 29 Wh), der nicht wertschöpfende Zeiteinsatz 135 s.

In der Signatur fallen die peak-artigen Verläufe auf. Hervorgerufen werden diese durch Werkzeugwechsel und die damit verbundenen Beschleunigungsvorgänge in der Werkzeugmaschine. Gleichzeitig sind auch negative Spitzen zu erkennen. Sie entstehen beim Abbremsen der Antriebe und speisen Energie in das System zurück.

Die dunkelgrauen „Energiebalken“ zeigen die für die Spanabnahme gegenüber dem Luftschnitt zusätzlich eingesetzte Energie. Der Energiebedarf bei der Zerspanung steigt mit der Zunahme der Fräsdurchmesser an. Das liegt daran, dass alle drei Zerspanungsvorgänge mit derselben Vorschubgeschwindigkeit ($v_f = 450 \text{ mm/min}$) durchgeführt wurden, wodurch das Zeitspanvolumen unterschiedlich groß war.

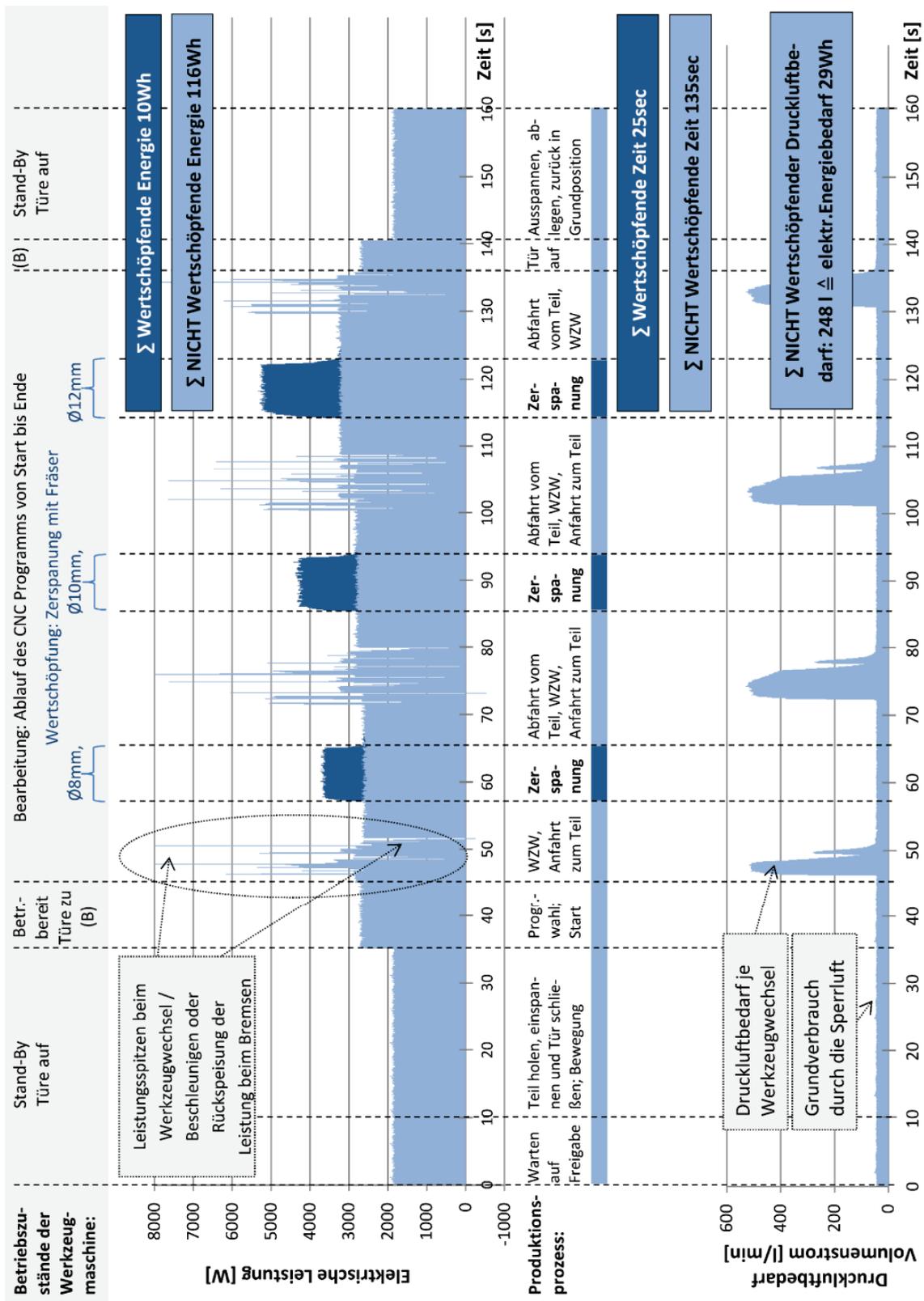


Bild 5: Duale Energiesignatur einer Fräsbearbeitung

Der Schafffräser mit dem Durchmesser 8 mm trägt gegenüber den Durchmessern 12 mm bzw. 16 mm in der gleichen Zeit weniger Material ab und benötigt demzufolge auch weniger Energie. Die Signatur der Druckluftmessung zeigt den Volumenstrom [l/min] über die Zeit [s]. Neben dem konstanten Druckluftbedarf für die Sperrluft sind vier Bereiche starken Druckluftanstiegs erkennbar. Diese sind durch den automatischen Werkzeugwechsel begründet. In Summe ergibt sich für diesen Zyklus ein Druckluftverbrauch von 248 l. Der Druckluftverbrauch ist im Luftschnitt und unter Kraftschluss gleich.

Um den Gesamtenergiebedarf beurteilen zu können, wird der gemessene Druckluft-Volumenstrom in eine äquivalente elektrische Leistung umgerechnet. Für effiziente Druckluftanlagen können nach [12] Werte zwischen 6,5 und 7,5 kW pro m³/min zugrunde gelegt werden. Für diese vorliegende Untersuchung wurde von einem Leistungsbedarf von 7 kW pro m³/min Volumenstrom bei 6 bar ausgegangen [13]. Damit ergibt sich für den o. g. Druckluftverbrauch von 248 l ein Energiebedarf von 29 Wh, vgl. (1).

$$\text{Energiebedarf Druckluft} = \frac{7\text{kW}}{\text{m}^3/\text{min}} \times 248 \text{ l} = 29 \text{ Wh} \quad (1)$$

Die Druckluft, wie in Bild 5 ersichtlich, trägt nicht zur Spanabnahme bei. Sie ist damit nicht wertschöpfend.

4 Modifizierte Wertstromanalyse

4.1 Erweiterte Wertstrombetrachtung

Die Systematik der klassischen Wertstromanalyse, erweitert um die energetische Betrachtung, ist in Abb. 6 exemplarisch für den in Abschnitt 3.1 beschriebenen Fräsprozess dargestellt. In den rechts stehenden Datenkästen finden sich die entsprechenden kumulierten Werte wieder.

Zur Vereinfachung wurden folgende Festlegungen getroffen:

- Wertschöpfend eingesetzte Zeit: T_{va} (Time value add)
- Nicht wertschöpfend eingesetzte Zeit: T_{nva} (Time non value add)
- Wertschöpfend eingesetzte Energie: E_{va} (Energy value add)
- Nicht wertschöpfend eingesetzte Energie: E_{nva} (Energy non value add)

Das in Bild 6 dargestellte Prinzip einer um die Energiebetrachtung erweiterten Wertstromanalyse ist geeignet, eine Wertschöpfungskette in Bezug auf die *beiden* Faktoren Zeit und Energie hin zu optimieren.

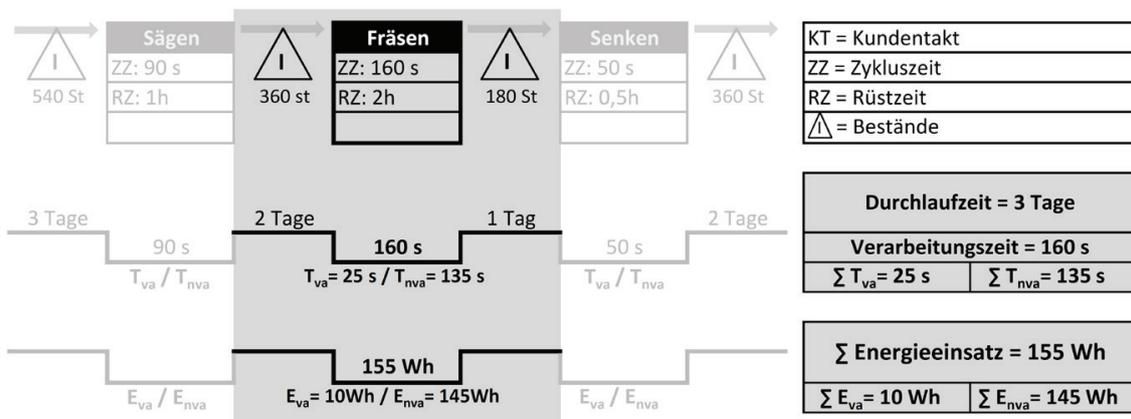


Bild 6: Modifizierte Wertstromanalyse (eigene Darstellung angelehnt an Rother/Shook) [6]

5 Ausblick

Neben der in Abschnitt 3.1 vorgestellten Energiesignatur wurden von den Autoren noch Energieverbrauchsmessungen an zahlreichen Bearbeitungsmaschinen in Produktionsunternehmen durchgeführt. Auffällig war die Divergenz von Arbeits- und Energieproduktivität. Es zeigte sich regelmäßig, dass diese Maschinen nur zwischen zwei und fünf Prozent der eingesetzten Energie wertschöpfend nutzen.

Dies sei exemplarisch in Bild 7 an der Energiesignatur eines mehrspindigen Hochgeschwindigkeits-Bearbeitungszentrums der Firma Grüner Systemtechnik dargestellt. Diese Maschine zählt zu den schnellsten ihrer Klasse. Bearbeitet wurde ein PKW-Getriebegehäuse.

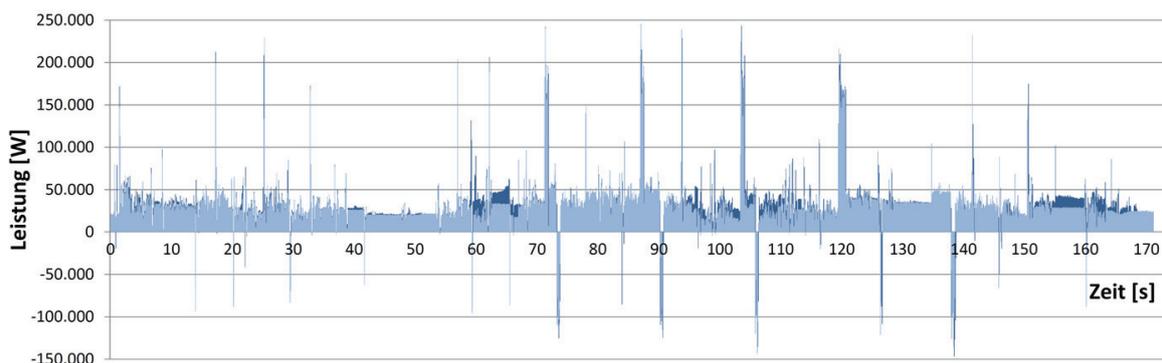


Bild 7: Duale Energiesignatur eines komplexen Bearbeitungszentrums

Die Datenaufnahme und -auswertung erfolgte nach der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Methode. Die Leistungsaufnahme im Luftschnitt beträgt 1.583 Wh, die unter Kraftschluss 1.632 Wh. Wertschöpfend eingesetzt werden im untersuchen Zyklus lediglich 49 Wh. Die extrem hohen Beschleunigungen erzeugen Leistungsspitzen

von weit über 200.000 W. Die Kühlmittelhochdruckpumpe und die Absaugpumpe benötigen ca. fünfzig Prozent der eingesetzten Energie.

Energieeffiziente Produktion beginnt bei der Konzeption und der Konstruktion der Bearbeitungsmaschinen. Die dualisierte Betrachtung des Energieeinsatzes, in wertschöpfend und nicht wertschöpfend könnte Maschinenkonstruktoren eine wertvolle Hilfe sein die Energieproduktivität der Maschinen bei gleichzeitig guter Arbeitsproduktivität, zu erhöhen.

In Zusammenarbeit mit namhaften Industrieunternehmen werden derzeit von einer Forschergruppe der Hochschule Aalen umfangreiche Vermessungen von Bearbeitungsmaschinen vorgenommen, mit dem Ziel, bestehende Wertstromanalysen um die Energiewertstrombetrachtung zu erweitern. Des Weiteren werden an der Hochschule Aalen Grundsatzuntersuchungen zur Auswertung von Energiesignaturen in den Bereichen

- Aluminium Druckguss,
- Kunststoffverarbeitung,
- Lasertechnik (Laserschneiden, Laserschweißen, Laserbeschichten),
- Fließpressen sowie
- Montage, Automation und Robotik

durchgeführt. Ziel ist es, eine praxistaugliche Methode zu entwickeln, die es ermöglicht, die Wertschöpfungskette in Bezug auf die eingesetzten Faktoren Zeit und Energie ganzheitlich zu optimieren.

6 Zusammenfassung

Die Gestaltung energieeffizienter Wertschöpfungsketten gewinnt für produzierende Unternehmen zunehmend an Bedeutung. Mittels dualer Energiesignaturen kann der wertschöpfende und nicht wertschöpfende Energieeinsatz bestimmt werden. Beim Zerspanungsprozess ist hierzu lediglich der Energiebedarf im Luftschnitt dem unter Kraftschluss gegenüberzustellen. Diese Differenzierung bietet die Möglichkeit, die Systematik der Wertstromanalyse auf energetische Betrachtungen konsistent zu erweitern.

Äquivalent zur Gegenüberstellung von Zykluszeit und Durchlaufzeit wird mit Hilfe der Energiesignatur der Herstellungsprozess selbst hinsichtlich wertschöpfendem und nichtwertschöpfendem Zeit- bzw. Energieeinsatz bilanziert. Die Verschwendung wird dadurch ersichtlich.

Die in der betrieblichen Praxis etablierte Wertstromanalyse wird dadurch unter Beibehaltung ihrer inneren Logik um die Darstellung des Energieeinsatzes erweitert. Die Reduktion auf eine duale Betrachtungsweise ermöglicht es, die eingesetzte

Technologie hinsichtlich ihrer Energiebilanz kritisch zu hinterfragen. Prozessgestalten wird mit dieser Methodik ein praktisches Werkzeug bereitgestellt, um Wertschöpfungsketten ganzheitlich zu analysieren und zu verbessern.

Literaturangaben

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Umweltwirtschaftsbericht 2011, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2011
- [2] Müller, E.: *Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben*. Springer, Berlin Heidelberg, 2009
- [3] Shafiee, S., Topal, E.: A long term view of worldwide fossil fuel prices. *Applied Energy*, 87. Jg., 2010, S. 988-1000, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.09.012> [26.09.2012]
- [4] Ohno, T.: *Toyota Production System. Beyond Large-Scale Production*. Portland, OR: Productivity Press, 1988
- [5] Schillig, R.: *Lean und Green – Zwei Seiten einer Medaille*. Vortrag auf dem Aalener Gießerei Kolloquium, Mai 2010
- [6] Rother, M., Shook J.: *Sehen lernen, mit Wertstromdesign die Wertschöpfung erhöhen und Verschwendung beseitigen*. Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) Stuttgart, Deutschland, Dezember 2000
- [7] Neugebauer, R.: *Abschlussbericht: Untersuchung zur Energieeffizienz in der Produktion*, Fraunhofer Gesellschaft, Chemnitz, 2008
- [8] Erlach, K. Westkämper E.: *Energiewertstrom. Der Weg zur Energie-Effizienz Fabrik*. Fraunhofer Verlag, 2009
- [9] Reinhard, G.: *Energiewertstromdesign. Ein wichtiger Bestandteil zum Erhöhen der Energieproduktivität*. *Wt online*, 101. Jg., H. 4, 2011
- [10] Brüggemann, H.: *Nachhaltiges Wertstromdesign. Integration der Energie- und Materialeffizienz in das Wertstromdesign*. *Wt online*, 99. Jg., H. 11/12, 2009
- [11] Müller, E., Schillig, R., Stock, T.: *Darstellung von Energiewertströmen erlaubt umfassende Wertstromanalyse*. *VDI-Z* 2012, H. 7/8
- [12] *Bayrisches Landesamt für Umweltschutz: Effiziente Druckluftsysteme Energie sparen-Klimaschützen-Kosten senken! Sensor Druck, Augsburg, 2004*
- [13] Rief, M., Kalhöfer, E., Karpuschewski, B.: *Energiebetrag verschiedener Kühlschmiersysteme*. *Werkstatt und Betrieb*, H. 09/10, 2010, S. 142-145