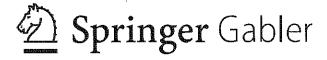
Hubert Biedermann (Hrsg.)

Industrial Engineering und Management

Beiträge des Techno-Ökonomie-Forums der TU Austria

Mit einem Geleitwort von Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Wilfried Eichlseder



Herausgeber Hubert Biedermann Leoben, Österreich

Techno-ökonomische Forschung und Praxis ISBN 978-3-658-12096-2 ISBN 978-3-658-12097-9 (eBook) DOI 10.1007/978-3-658-12097-9

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Springer Gabler

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Fachmedien Wiesbaden ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Inhaltsverzeichnis

GeleitwortV
VorwortVII
InhaltsverzeichnisIX
Employability: Welche Kompetenzen fordern Unternehmen von TU- Absolventen?
Ulrich Bauer
Informationssystemdesign für Produktionssysteme der Zukunft 23 Gerald Lichtenegger, Wolfgang Vorraber, Christoph Wolfsgruber, Siegfried Vössner
Einfluss der Maker Movement auf die Forschung und Entwicklung. 43 Christian Ramsauer, Matthias Friessnig
Agile Produktion - Ein Produktionskonzept für gesteigerten Unternehmenserfolg in volatilen Zeiten
Technologischer Fortschritt als Treiber von Geschäftsmodellinnovationen
Techno-Ökonomie: Entwurf eines interdisziplinären Bezugsrahmens für Lehre und Forschung im Schnittstellenbereich angewandte Naturwissenschaften und angewandte Sozialwissenschaften 103 Bernd M. Zunk
Lean Smart Maintenance
Change Management bei der Entwicklung von Performance Management Systemen
KOYNA KIPINAIPINI TÜNELI DIEAELMANI

Referenzmodellierung - Eine Möglichkeit zur Strukturgebung innerhalb der Informationslogistik?
Susanne Altendorfer-Kaiser
Management von Produkt- und Prozesskomplexität aus logistischer Sicht
Helmut Zsifkovits
Forschungsbericht zum Projekt "Die Dynamik von Asset Swap Spreads am europäischen Markt für Unternehmensanleihen"193
Wolfgang Aussenegg
Experimentelle Analyse und Optimierung IT-gestützter interdisziplinärer Planungsprozesse
Michael Filzmoser, Iva Kovacic
Perspektiven zur Gestaltung menschlicher Arbeit im Industrial Engineering
Peter Kuhlang, Thomas Finsterbusch, Thomas Weber
Forschungsbericht zum Projekt: "Bewertung von Rücklösungsverpflichtungen in der Münze Österreich AG"
Forschungsbericht zum Projekt: "Kosten und CO ₂ -Emissionen im Produktionsnetzwerk von Magna Europe"
Auf dem Weg zur Industrie 4.0 – ein dreistufiges Vorgehensmodell 247 Selim Erol, Andreas Schumacher, Wilfried Sihn
Ansatz zur Bewertung der Abfallentstehung im Wertstrom267 Alexander Sunk, Thomas Edtmayr, Wilfried Sihn
Autorenverzeichnis283

Ansatz zur Bewertung der Abfallentstehung im Wertstrom

Prozessorientierte Ressourcenverbrauchsrechnung und idealtypischer Verwertungskreislauf in der Wertstromanalyse

Alexander Sunk, Thomas Edtmayr, Wilfried Sihn

Institut für Managementwissenschaften – Bereich Betriebstechnik und Systemplanung/ Technische Universität Wien; Fraunhofer Austria Research GmbH

- 1. Einleitung
- 2. Theoretische Grundlagen
 - 2.1. Grundlagen Wertstromanalyse und -design
 - 2.2. Ansätze zur Kombination von Sustainability und VSM
- 3. Prozessorientierte Ressourcenverbrauchsrechnung im VSM
 - 3.1. Kumulierte Ausschussrate im Wertstrom und deren Auswirkungen
 - 3.2. Berechnung des materiellen Abfalls an einem Prozess
 - 3.3. USE CASE: Abfall im Wertstrom und Disposal-Datenlinie
- 4. Zusammenfassung und Ausblick
- 5. Literatur- und Quellenangaben

Abstract

Die Inhalte des vorliegenden Beitrags sind im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsprojekts der Institutsbereiche Finanzwirtschaft und Controlling sowie Betriebstechnik und Systemplanung des IMW an der TU Wien mit der Magna International Europe AG und der Magna Interiors-Gruppe erarbeitet worden, wobei unser besonderer Dank den Herren Christoph Bistricky und Johannes Müller für die fortwährend gute Betreuung und Bereitstellung der Daten gilt.

Die hier präsentierten Ergebnisse sollen in unterschiedlichen Ausprägungen und Sichtweisen als Basis der Dissertationen von beiden Autoren dienen. Die Modellierung der prozessorientierten Ressourcenverbrauchsrechnung wurde mit den vorhandenen Daten eines spezifischen Produktionswerks von Magna Interiors entwickelt und mittels Pilotanwendung in einem anderen Werk getestet. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Modellierung zumindest für Magna Interiors generell anwendbar und auch für den Praxiseinsatz gut geeignet ist. Eine Evaluierung für andere Branchen als die Automobilindustrie bzw. andere Anwendungsfälle in der (variantenreichen) Serienfertigung ist jedoch noch ausständig. Deshalb würden wir uns freuen, wenn Sie uns fachliches Feedback aus Wissenschaft und Praxis geben können, um die vorgestellte Modellierung weiter zu entwickeln.

Beide Autoren beschäftigen sich intensiv mit der Weiterentwicklung der Methodik "Wertstromanalyse und -design", damit sie sich sowohl wissenschaftlich als auch in der täglichen Verbesserungspraxis in Unternehmen noch stärker etabliert. Wir wünschen Ihnen deshalb viel Freude beim Lesen und hoffen, dass Sie unsere Modellierung bzw. Vorgehensweise an einem konkreten Beispiel durchdenken oder sogar anwenden werden.

1 Einleitung

Nachhaltigkeit (Sustainability) hat über 100 Definitionen (Manufacturing Skills Australia, 2008) die wichtigsten sind zu entnehmen aus dem (a) Brundtland Report: "Development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generation to meet their own needs" (WCED 1987); und vom

(b) United States Department of Commerce (US DOC): "sustainable manufacturing is defined as the creation of manufactured products that use processes that minimize negative environmental impacts, conserve energy and natural resources, are safe for employees, communities, and consumers and are economically sound" (UD DOC 2014).

Die Europäische Union vertritt den Life Cycle Assessment-Ansatz (LCA) mit dem Ziel, die Umwelteinflüsse und den Ressourcenverbrauch entlang des gesamten Lebenszyklus eines Produktes zu minimieren (European Commission 2014). Bevölkerungen und ihre politischen Vertreter verlangen Verbesserungen in den Bereichen Umwelt, Gesundheit und Sicherheit (Kleindorfer et al. 2005). Zahlreiche Autoren weisen auf Kosteneinsparungspotentiale durch die Anwendung von Sustainability Management in Produktionsprozessen hin (Kleindorfer et al. 2005; Bevilacqua et al. 2007; Dou und Sarkis 2010; Seuring und Müller 2008). Das Konzept und die Messung von Sustainability sind sowohl in natürlichen Systemen als auch in soziotechnischen Systemen bekannt (Diaz-Balteiro und Romerio 2004). Für ein effektives Reporting haben sich klassische Indikatoren wie Energie-Material-, Wasserverbrauch als auch Emissionen generell durchgesetzt (Jasch 2000; Mani et al. 2014). Um auf jeden Herstellungsprozess anwendbar zu sein, sollten aber zumindest Wasser-, Rohmaterial und Energieverbrauch inkludiert sein (Faulkner und Badurdeen 2014).

Im Konzept der verschwendungsfreien Produktion (engl. "Lean Production") – in den 1950er und 1960ern von Eiji TOYODA und Taiichi OHNO bei Toyota entwickelt (Womack et al 1991) werden konventionelle Methoden in der produzierenden sowie der Service-Industrie durch Lean Methoden ersetzt (Venkat und Wakeland 2006). In der Literatur wurde der Begriff "Lean Production" vor allem durch das Buch "*The Machine That Changed the World*" geprägt und erst dadurch außerhalb Japans populär (Womack et al. 1991), da mit diesem Ansatz sehr große Kostenersparnisse in der Produktion erreichbar wurden und noch immer sind. Die zusätzliche Einbeziehung von Nachhaltigkeitskriterien kann als Weiterentwicklung zur traditionellen Lean-Betrachtung gesehen werden. Diese kombinierte Anwendung von Lean Production mit Sustainable Development erhöht die Qualität sowie Kundenzufriedenheit und verringert dabei Kosten und Durchlaufzeit (Nitin

et al. 2010). Die praktische Anwendung von Lean zur Verbesserung der Nachhaltigkeit einer Produktion erfreut sich großer Beliebtheit, darüber hinaus weist die steigende Anzahl von Veröffentlichungen in den letzten Jahren über Lean in Kombination mit Sustainability Management auf diesen Trend hin (Martínez-Jurado und Moyano-Fuentes 2013). Studien zeigen jedoch, dass eine reine Anwendung von Lean nicht zwangsweise zu einer Steigerung der Nachhaltigkeit führt (Venkat und Wakeland 2006; Liker 2009). Aus diesem Grund wird von uns der Ansatz verfolgt, mittels fundierter Wertstromanalyse unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien (hier: Entstehung von Abfall) die Ressourcenverbräuche prozessorientiert zu quantifizieren, um fundierte Aussagen über mögliche Schwachstellen im Wertstrom treffen zu können.

2 Theoretische Grundlagen

In den folgenden Kapiteln werden die theoretischen Grundlagen zur Integration von Sustainability in die Methodik Wertstromanalyse und -design kurz beschrieben. Bevor bekannte Ansätze kurz erläutert werden, wird die zugrundeliegende Methodik an sich vorgestellt.

2.1 Grundlagen Wertstromanalyse und -design

Wertstromanalyse und -design (engl. Value Stream Mapping: VSM) wurde ursprünglich als Verfahren innerhalb des Toyota Produktionssystems (Ohno 1998; Liker 2009) entwickelt und als eigenständige Methodik von ROTHER und SHOOK eingeführt (Rother und Shook 2006). Wertstromanalyse und -design ist eine einfache, aber sehr effektive Methode, um einen ganzheitlichen Überblick über den Zustand der Wertströme innerhalb einer Organisation zu gewinnen. Basierend auf der Analyse der momentanen Situation werden flussorientierte Zielzustände eines Wertstroms (= Soll-Zustand) geplant und umgesetzt (Rother und Shook 2006; Erlach 2007; Klevers 2007).

Ein Wertstrom umfasst alle Aktivitäten, d.h. wertschöpfende, nicht wertschöpfende und unterstützende, die notwendig sind, um ein Produkt (oder eine Dienstleistung) zu erzeugen und dem Kunden zur Verfügung zu stellen. Dazu gehören

die operativen Prozesse, der interne Materialfluss zwischen den Prozessen, der externe Materialfluss von den Lieferanten und zum Kunden sowie deren Ansteuerung über den Informationsfluss (Rother und Shook 2006). Um mögliche Verbesserungspotentiale zu realisieren, werden beim klassischen Wertstromdesign die Bearbeitungszeiten dem Kundentakt angeglichen und deren Summe mit der Durchlaufzeit verglichen (Kenngröße: Flussgrad). Je größer die Differenz, desto größer das Verbesserungspotential, welches üblicherweise mittels Reduktion der Bestände erschlossen wird (Erlach 2007). Die Darstellung eines Wertstroms mit der Zeitlinie ist im Use Case angeführt.

2.2 Ansätze zur Kombination von Sustainability und VSM

In der Literatur existieren mehrere Ansätze zur Verbindung von Sustainability und VSM, ein relevanter Auszug wird hier angeführt und kurz beschrieben:

- (a) "Green VSM" (GVSM) (Dadashzadeh und Wharton 2012) mit Fokus auf Büroarbeiten und den Verbräuchen von Energie, Wasser, Materialien, Transportaufwänden sowie dem Entstehen von Müll, und Emissionen. Die bildliche Darstellung ist limitiert (Faulkner und Badurdeen 2014).
- (b) "Environmental VSM" (E-VSM) (Torres und Gati 2009) mit dem primären Fokus auf Wasserverbrauch. Die visuelle Identifikation der Wasserverschwendung ist nicht eindeutig. Eine detaillierte Betrachtung existiert nur für die Ressource Wasser (Faulkner und Badurdeen 2014).
- (c) "Energiewertstrom" (Erlach und Westkämpfer 2009) mit Fokus auf Energieeinsparung, untersucht jeden Herstellungsschritt auf Energieverschwendung. Die Arbeit von ERLACH ist praxisnah, die Analyse von anderen Ressourceneinsätzen (z.B. Abfall) fehlt jedoch.
- (d) "Energy and Environment VSM" (EE-VSM) (Kuriger und Chen 2011) betrachtet Prozessenergieverbräuche. Energieverbräuche durch Transport oder Lagerung werden allerdings vernachlässigt (Faulkner und Badurdeen 2014).
- (e) Das "Lean Sustainable Production Assessment Tool" (Kuriger et al. 2011) ist eine Weiterentwicklung des EE-VSM mit den Metriken: Energie, Wasserverbrauch, Materialverbrauch und CO₂-Emissionen. Die visuelle Darstellung wird nicht behandelt (Faulkner und Badurdeen 2014).

- (f) "Sustainable Manufacturing Mapping" (SMM) (Paju et al. 2010) betrachtet ausgewählte Sustainability Indikatoren und basiert auf VSM, Life Cycle Assessment (LCA) und Discrete Event Simulation (DES).
- (g) "Sustainable VSM" (SVSM) (Simons und Mason 2002) analysiert Greenhouse gas (GHG) Emissionen. Es wird angenommen, dass die sozialen Indikatoren indirekt über die positiven Auswirkungen auf Wirtschaft und Umwelt einfließen (Faulkner und Badurdeen 2014).
- (h) Das "U.S. Environmental Protection Agency's (EPA) lean and environmental toolkit" dient der Illustration von Handlungsoptionen bei Verschwendung (US EPA 2014). Es hilft Lean-Anwendern bei der Identifikation von Energieverschwendung um zur Verbesserung der Umweltbelastung beizutragen (Faulkner und Badurdeen 2014).

Es werden jeweils unterschiedliche Ausprägungen, Indikatoren sowie Parameter von Sustainability berücksichtigt und versucht, diese zu verbessern. Meist betrifft dies ökologische Aspekte, da ökonomische Aspekte bereits im Lean Management berücksichtigt sind. Die soziale Komponente von Sustainability wird meist ausgeklammert, es wird jedoch – ohne Beleg – vielfach auf einen positiven (Neben-)Effekt auf diese Komponente hingewiesen. Bezüglich ökologischer Kriterien, die verbessert werden sollen, existiert trotz zahlreicher Publikationen noch kein einheitlicher Standard (Simons und Mason 2002). Für das Produktionsmanagement abgeleitet ergeben sich lediglich grobe Übersichten von zu verbessernden Kriterien (Jasch 2000; Paju et al. 2010), wobei in den bisher bekannten Ansätzen eine detaillierte Betrachtung der Materialflüsse fehlt. Dieser Beitrag beschäftigt sich deshalb intensiv mit dem eingesetzten Material in Wertströmen und der Entstehung von Abfall. Hierfür wurde eine prozessorientierte Ressourcenverbrauchsrechnung für Gut- und Schlechtteile in seriellen Prozessketten entwickelt.

3 Prozessorientierte Ressourcenverbrauchsrechnung im VSM

In der prozessorientierten Ressourcenverbrauchsrechnung wird jedem Prozess im Wertstrom ein virtueller idealtypischer Verwertungskreislauf (siehe Bild 1) hinterlegt, welcher die Kategorien Reuse, Recycle, Recovery und Disposal beinhaltet.

Dieser idealtypische Verwertungskreislauf besteht aus fünf Transporten, drei Lagerstufen und dem Verwertungsprozess selbst, womit versucht wird sämtliche innerbetrieblichen Aufwände abzudecken. Er ist für alle Arten der Produktionsund Montageprozesse anwendbar und dient als Grundlage für die Modellierung der prozessorientierten Ressourcenverbrauchsrechnung im Wertstrom. Als Beispiel wird hier die Modellierung zur Entstehung von Abfall im Wertstrom vorgestellt, weitere Anwendungen können bspw. folgende sein: (a) direkte und indirekte Energieverbräuche der Prozesse, Transporte und Puffer; (b) Bewertung des CO₂-Ausstoßes je Stück in der Produktion aufgrund der Ressourceneinsätze.

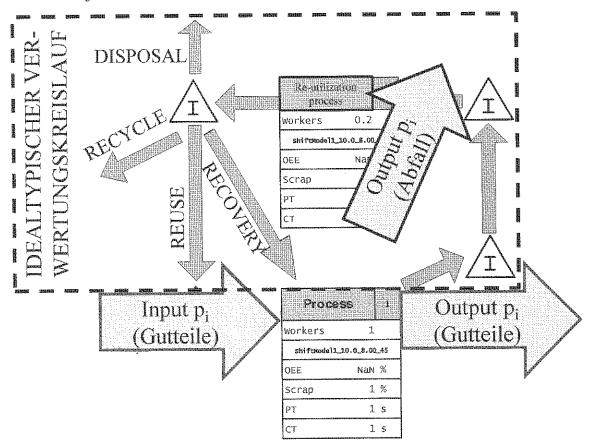


Bild 1: Idealtypischer Verwertungskreislauf je Prozess im Wertstrom

3.1 Kumulierte Ausschussrate im Wertstrom und deren Auswirkungen

Bei einer seriellen Abfolge von Prozessen eines Wertstroms und den dabei auftretenden Ausschussraten müssen die jeweils vorgelagerten Prozesse mehr produzieren, um schlussendlich die geforderte Menge dem Kunden zur Verfügung zu stellen. Entgegen der Flussrichtung steigt demzufolge für jeden einzelnen Prozess die kumulierte Ausschussrate an; für die Berechnung einer seriellen Abfolge der Prozesse gilt Formel 3.1.1.

$$scum(i) = 1 - \prod_{i=n}^{1} (1 - si)$$
(3.1.1)

- Scum(i) ... Kumulierte Ausschussrate flussaufwärts bei Prozess i in [%]
- s_i ... Ausschussrate eines Prozesses i [%]

Somit ergibt sich, ausgehend vom tatsächlichen Kundenbedarf D_{net}, der Kundenbedarf je Prozess (i) mit:

$$Dnet.p(i) = \frac{Dnet}{1 - scum(i)}$$
(3.1.2)

- D_{net.p} (i) ... Erhöhter Nettobedarf pro Prozess durch die kumulierte Ausschussrate pro Prozess i [Stück im BZR]
- Dnet ... Nettobedarf des Kunden [Stück im BZR] am Wertstromende
- s_{cum}(i) ... Kumulierte Ausschussrate flussaufwärts bei Prozess i in [%]

Diese Formel ist grundlegend für die Berechnung des Abfalls entlang eines Wertstroms. Eine weitere Auswirkung der kumulierten Ausschussrate wird im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet, soll aber aufgrund der Vollständigkeit hier angeführt werden: Die kumulierte Ausschussrate bewirkt im Wertstrom flussaufwärts eine Erhöhung der benötigten Nettomenge je Prozess. Deshalb darf in weiterer Folge der Kundentakt je Prozess streng genommen nicht als konstant angenommen, sondern muss aufgrund der erhöhten Nettomengen bei gleichbleibend verfügbarer Arbeitszeit je Prozess reduziert werden.

3.2 Berechnung des materiellen Abfalls an einem Prozess

Der Abfall an materiellen Ressourcen je Prozess im Wertstrom wird wie oben beschrieben dem idealtypischen Verwertungskreislauf (Bild 1) zugeordnet. Dieser Abfall kann im Allgemeinen auf drei Arten erfolgen: (a) Abfall aufgrund der (kumulierten) Ausschussrate, (b) Abfall aufgrund von Materialeinsatzmengendifferenz (Bruttomenge - Nettomenge) und (c) Abfall aufgrund von Rüstvorgängen; siehe Formeln 3.2.1 bis 3.2.3. Die Begriffe Stück und Gutteil sind als Synonyme zu betrachten. Der Begriff Betrachtungszeitraum (BZR) kann bspw. Tag, Woche oder Monat sein. Für (a) gilt:

$$W_{nok} = (D_{net.p} - D_{net}) * d_n$$
(3.2.1)

- W_{nok} ... Abfall verursacht durch die Ausschussrate [kg im BZR]
- D_{net} ... Erhöhter Nettobedarf des Kunden [Stück im BZR]
- D_{net,p} ... Nettobedarf des Kunden [Stück im BZR]
- d_n ... Nettogewicht des Gutteils[kg im BZR]

 W_{nok} steht für den Ausschuss, welcher nicht den Anforderungen genügt wie bspw. gebrochene oder falsch gefertigte Teile; z.B. in [kg/Tag]. Der Brutto-Materialeinsatz wird als d_g in [kg/Stk.] bezeichnet. Aufgrund des gewählten Herstellungsverfahrens ist oftmals zusätzlicher Ressourceneinsatz W_{ok} in [kg/BZR] erforderlich, wobei sich dieser Anteil für (b) wie folgt berechnet:

$$W_{nok} = D_{net,p} * (dg - dn)$$
(3.2.2)

- Wok ... Abfall durch die Materialeinsatzmengendifferenz [kg im BZR]
- D_{net.p} ... Erhöhter Nettobedarf des Kunden je Prozess [Stück im BZR]
- d_g. ... Bruttogewicht des Gutteils [kg im BZR]
- d_n ... Nettogewicht des Gutteils [kg im BZR]

Der Netto-Materialeinsatz wird als d_n in [kg/Stk.] bezeichnet, die Materialeinsatzmengendifferenz aus brutto und netto ist bspw. Anguss beim Spritzguss oder Lackschlamm beim Lackierprozess.

Als dritte Kategorie (c) wird hier Abfall aufgrund von Rüstvorgängen $W_r(i)$ bzw. $W_b(i)$ vorgestellt. Dieser fällt vor allem bei Losgrößenfertigung oder nicht durchgängigem Schichtmodell an, z.B. während die Produktion still steht. Die obigen Anteile des gesamten Abfalls sind abhängig vom betrachteten Zeitraum, der

Abfall-Anteil aufgrund von Rüsten (W_r) ist meist jedoch nicht im selben BZR wie die geforderte Menge des Kunden $D_{net,p}$ erfassbar. Aus diesem Grund wird die folgende Proportionalität angewendet:

$$\frac{Wr(i)}{Dnet.p(i)} \propto \frac{Wb(i)}{b(i)}$$
(3.2.3)

- W_r ... Abfall aufgrund von Rüstvorgängen [kg im BZR]
- D_{net.p} ... Erhöhter Nettobedarf des Kunden durch die kumulierte Ausschussrate [Stück im BZR]
- W_b. ... Abfall pro Los [kg/ Los]
- b ... Losgröße [Stk./Los]

W_b stellt den durchschnittlichen Abfall in [kg/Los] dar, b wird als durchschnittliche Losgröße bezeichnet. Die Summe des Abfalls im BZR – wie bspw. Schicht – berechnet sich folgendermaßen:

$$W = W_{nok} + W_{ok} + W_r \tag{3.2.4}$$

- W ... Abfall im Wertstrom einer eingesetzten Ressource [kg im BZR]
- W_{nok} ... Abfall durch die kumulierte Ausschussrate [kg im BZR]
- Wok ... Abfall durch die Materialeinsatzmengendifferenz [kg im BZR]
- $\bullet \quad \ \ W_r \ldots \ Abfall \ aufgrund \ von \ R\"{u}stvorg\"{a}ngen \ [kg \ im \ BZR]$

Um auf den Abfall je Stück (Gutteil) umrechnen zu können, muss der errechnete Abfall durch die im BZR geforderte Stückzahl dividiert werden. Somit errechnet sich der Abfall je Stück [kg/Stk.] je Prozessschritt i mit:

$$w(i) = \frac{dg(i)}{1 - scum(i)} - dn(i) + \frac{Wb(i)}{b(i)}$$
(3.2.5)

- w... Gesamter Abfall des Gutteils [kg/Stk.]
- $\bullet \quad d_g. \ ... \ Bruttogewicht des \ Gutteils \ [kg/Stk.]$
- s_{cum} ... Kumulierte Ausschussrate [%]
- d_n ... Nettogewicht des Gutteils [kg/Stk.]
- W_b Abfall pro Los [kg/ Los]
- b ... Losgröße [Stk./Los]

Der Abfall je Stück an materiellen Ressourcen kann mit der Formel 3.2.5 für jeden Prozess und jede eingesetzte Ressource berechnet werden. Er wird dem idealtypischen Verwertungskreislauf zugeführt und damit (monetär) bewertet.

3.3 USE CASE: Abfall im Wertstrom und Disposal-Datenlinie

Bei der Berechnung der Gesamtdurchlaufzeit werden alle Wartezeiten von Material in den Lagerstufen im Wertstrom addiert, dasselbe gilt für die Berechnung der Gesamtbearbeitungsdauer aller Prozesse. Bearbeitungszeiten und Durchlaufzeiten sowie deren jeweilige Summe werden in der Zeitlinie unterhalb des Wertstroms dargestellt. Derselbe Ansatz wird für die Disposal-Datenlinie genutzt. Als Darstellungsform der Disposal-Datenlinie wurde eine an der Zeitlinie orientierte Linienführung gewählt, wobei die Verbindung zwischen den Prozessen punktiert ist, da hier keine materiellen Abfälle im Wertstrom anfallen (siehe Bild 2). Unterhalb eines Prozesskastens wird der Disposal-Anteil am Abfall, der bei dem betrachteten Prozess entsteht, in [kg/Stk.] ausgewiesen. Diese Werte werden aufsummiert am Ende der Disposal-Datenlinie unter dem Customer-Symbol eingetragen. Dabei kann man gegebenenfalls zwischen den unterschiedlichen Primärressourcen wie Metall oder Kunststoff unterscheiden.

Als Ergebnis erhält man den materiellen Abfall je Gutteil, der die Produktion verlässt und in die Hände des Kunden gelangt in [kg/Stk.]. Mit einer Unterscheidung zwischen den Verwertungskategorien Reuse, Recycle, Recovery und Disposal können Prozesse detailliert analysiert und mit dem geforderten Ressourceneinsatz je Gutteil verglichen werden. Auf Basis dieser detaillierten Bewertung können somit gezielt Verbesserungspotentiale ermittelt und Maßnahmen abgeleitet werden. Vor allem ist der idealtypische Verwertungskreislauf mit den Transporten, Puffern und dem Verwertungsprozess auch einfach monetär bewertbar, indem man die eingesetzten Ressourcen (d.h. Zeit, Flächen, Energie, usw.) mit Kostensätzen hinterlegt; bspw. Transportzeiten des Staplers, Flächenkosten für Abfallbehälter, Nutzungszeiten eines Schredders.

Die Autoren haben im Rahmen des Forschungsprojekts ein Konzept zur umfassenden Bewertung des idealtypischen Verwertungskreislaufs erstellt, weshalb ein einfaches Beispiel zur Veranschaulichung vorgestellt wird:

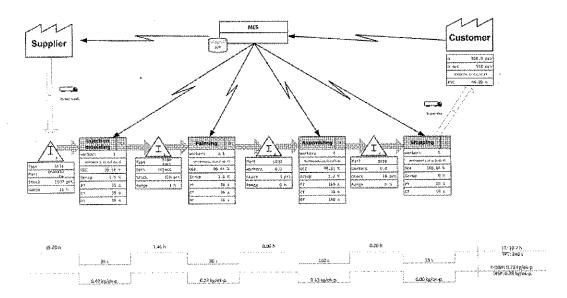


Bild 2: Zeitlinie und Disposal-Datenlinie des Use Cases

Ein spezifischer Wertstrom besteht aus vier seriellen Prozessen mit den Prozesstechnologien Spritzguss, Lackieren, Montage und Sequenzieren. Sämtliche Arten von eingesetzten Ressourcen (z.B. Kunststoffe, Lacke und Teile der Stückliste für die Montage) werden in [kg/Stk.] angegeben. Aufgrund des Ressourceneinsatzes und den drei Abfallarten konnte für jeden Prozess der Anteil - z.B. in Prozent - Disposal berechnet werden. Für einen beliebigen Spritzguss-Prozess ist bspw. das Brutto-Spritzgewicht 3,85 [kg/Stk.], das Netto-Spritzgewicht je Gutteil nur noch 3,65 [kg/Stk.]. Nach jedem 300-sten Teil wird umgerüstet und es entstehen dabei 13,5 [kg/Los] Spritzkuchen. Außerdem weist der betrachtete Prozess eine Ausschussrate aus, die mit den im Wertstrom nachfolgenden Ausschussraten eine kumulierte Ausschussrate von 3,39% ergibt. Mit der oben vorgestellten Berechnung des Abfalls beträgt der gesamte Abfall an Spritzguss-Material im Wertstrom 0,38 [kg/Stk.] oder 10,4% des Netto-Spritzgewichts. Angenommen es werden davon 100% auf der Deponie entsorgt, dann wäre der Disposal-Anteil der Gesamtabfall im Wertstrom (siehe Bild 2). Maßnahmen zur Reduktion des Disposal-Anteils können sein, dass bspw. (a) der Abfall einer anderen Verwertungskategorie zugeführt oder (b) mittels Investitionen oder konstruktiven Änderungen den Gesamtabfall reduziert wird (Formel 3.2.5). Eine fundierte Entscheidungsgrundlage wird mit der Modellierung geschaffen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorgestellte Ansatz soll Wertstromplaner dabei unterstützen, Wertströme nachhaltig zu gestalten. Der Ansatz beinhaltet dazu die Modellierung zur Entstehung von materiellem Abfall im Wertstrom, der den Verwertungskategorien Reuse, Recycle, Recovery und Disposal zugeführt werden kann. Damit können Verschwendungstreiber hinsichtlich Materialeffizienz identifiziert werden. Die Auswirkungen möglicher Verbesserungsmaßnahmen können mit dem Ansatz ebenfalls (monetär) bewertet werden. Außerdem kann somit die Bewusstseinsbildung hinsichtlich Sustainability bzw. Materialeffizienz in der Produktion gefördert werden. Es ist jedoch noch zu überprüfen, ob der vorgestellte Ansatz für sämtliche Wertströme, Prozesstechnologien und Branchen geeignet ist, was ein zukünftiger Forschungsschwerpunkt der Autoren sein wird.

Literatur- und Quellenangaben

- Bevilacqua, M., Ciarapica, F.E., Giacchetta, G. (2007): Development of a Sustainable Product Lifecycle in Manufacturing Firms: A Case Study. International Journal of Production Research, 45(18-19), S. 4073-4098.
- Dadashzadeh, M., Wharton, T. (2012): A Value Stream Approach for Greening the IT Department. International Journal of Management & Information Systems, 16(2), S. 125-136.
- Diaz-Balteiro, L., Romerio, C. (2004): In search of a natural systems sustainability index. Ecological Economics, 49(3), S. 401-405.
- Dou, Y., Sarkis, J. (2010): A joint location and outsourcing sustainability analysis for a strategic offshoring decision. International Journal of Production Research, 48(2), S. 567-592.
- Erlach, K. (2007): Wertstromdesign Der Weg zur schlanken Fabrik. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Erlach, K., Westkämper, E. (2009): Energiewertstrom Der Weg zur energieeffizienten Fabrik. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- European Commission (2014): EPLCA European Platform on LCA. [Online] http://eplca.jrc.ec.europa.eu/ (21.06.2015).

- Faulkner, W., Badurdeen, F. (2014): Sustainable Value Stream Mapping (Sus-VSM): methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance. Journal of Cleaner Production, Vol. 85. S- 8-18.
- Jasch, C. (2000): Environmental performance evaluation and indicators. Journal of Cleaner Productions, Vol 8., S. 79-88.
- Paju, M., Heilala, J., Hentula, M., Heikkila, A., Johansson, B., Leong, S.K, Lyons K.W. (2010): Framework and indicators for a sustainable manufacturing mapping methodology. Baltimore, Maryland, Proceedings of the 2010 Winter Simulations Conference.
- Kleindorfer, P., Singhal, K., Van Wassenhove, L. (2005): Sustainable operations management. Production & Operations Management, 4(14), S. 482-492.
- Klevers, T. (2007): Wertstrom-Mapping und Wertstrom-Design: Verschwendung vermeiden Wertschöpfung steigern. Landsberg am Lech: mi-Fachverlag.
- Kuriger, G., Chen, F. (2010): Lean and Green: A Current State View. Cancun, Mexico, Industrial Engineering Research Conference.
- Kuriger, G., Huang, Y., Chen, F. (2011): A lean sustainable production assessment tool. Madison, Wisconsin, Proceedings of the 44th CIRP Conference on Manufacturing Systems.
- Liker, J. (2009): Der Toyota-Weg: 14 Managementprinzipien des weltweit erfolgreichsten Automobilkonzerns. 6, slightly different version ed. München: FinanzBuch.
- Mani, M., Madan, J., Lee; J.H., Lyons, K.W., Gupta, S.K. (2014): Sustainability characterisation for manufacturing processes. International Journal of Production Research, 52(20), S. 5895-5912.
- Manufacturing Skills Australia (2008): Sustainable manufacturing. [Online] http://www.mskills.com.au/ (21.06.2015).
- Martínez-Jurado, P., Moyano-Fuentes, J. (2013): Lean Management, Supply Chain Management and Sustainability: A Literature Review. Journal of Cleaner Production.
- Nitin, U., Deshmukh, S., Suresh, G. (2010): Lean Manufacturing for Sustainable Development. Global Business and Management Research: An International Journal, 2(1), S. 125-137.

- Ohno, T. (1998): Toyota Production System beyond Large Scale Production. In: Ohno, T. (1978) Toyota seisan höshiki. Tokyo, Japan Diamand, Inc.. Portland USA: Productivity Press.
- Paju, M., Heilala, J., Hentula, M., Heikkila, A., Johansson; B., Leong, S.K., Lyons
- Rother, M., Shook, J. (2006): Learning to see (Sehen lernen Mit Wertstromdesign die Wertschöpfung erhöhen und Verschwendung beseitigen). Aachen: Lean Management Institut.
- Seuring, S., Müller, M. (2008): From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. Journal of Cleaner Production, 16(15), S. 1699-1710.
- Simons, D., Mason, R. (2002): Environmental and transport supply chain evaluation with sustainable value stream mapping. Birmingham, UK, 7th Logistics Research Network Conference.
- Torres, A., Gati, A. (2009): Environmental Value Stream Mapping (EVSM) as Sustainability Management Tool In. Portland, OR, IEEE.
- US DOC (2014): How the DOC Defines Sustainable Manufacturing. [Online] http://www.trade.gov/ (21.06.2015).
- US EPA (2014): The Lean, Energy and Climate Toolkit. [Online] http://www.epa.gov/lean/environment/toolkits/energy/index.htm (06.11.2014).
- Venkat, K, Wakeland, W. (2006): Is Lean Necessarily Green, in Proceedings of the 50th Annual Meeting of the ISSS, ISSS 2006 Papers.
- WCED (1987): Our Common Future (World Commission on Environment and Development, Brundtland Commission). Oxford University Press.
- Womack, J., Jones, D., Roos, D. (1991): The Machine That Changed the World: The Story of Lean Production. s.l.:Harper Perennial.
- Yang, C., Lin, S., Chan, Y., Sheu, C. (2010): Mediated effect of environmental management on manufacturing competitiveness: an.