

Lehrstuhl für  
Betriebswissenschaften und Montagetechnik  
der Technischen Universität München

**Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendung  
unter Berücksichtigung von Zielgrößen Ganzheitlicher  
Produktionssysteme**

**Peter Schnellbach**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Egon Müller,  
Technische Universität Chemnitz

Die Dissertation wurde am 23.03.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 12.10.2015 angenommen.



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Verzeichnis der Formelzeichen</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation und Motivation	1
1.2 Spezifizierung des Betrachtungsbereichs	4
1.3 Zielsetzung	6
1.4 Aufbau der Arbeit	7
<b>2 Grundlagen</b>	<b>9</b>
2.1 Energieverschwendung in der Fertigung	9
2.1.1 Allgemeines	9
2.1.2 Der Energiebegriff im betrieblichen Umfeld	9
2.1.3 Energie als Kostenfaktor in der produzierenden Industrie	12
2.1.4 Energieeffizienz, -intensität und -verschwendung	13
2.1.5 Maßnahmen zur Reduzierung von Energieverschwendung	15
2.2 Ganzheitliche Produktionssysteme	17
2.2.1 Allgemeines	17
2.2.2 Ursprung und Entwicklung der GPS	17
2.2.3 Fertigungsprozessketten in GPS	19
2.2.4 Zieldimensionen und -größen in GPS	20
2.2.5 Wertstromdesign	28
2.2.6 Erweiterung des GPS-Gedankens um den Aspekt Energie	31
2.3 Systemtheorie und System Dynamics	33
2.3.1 Allgemeines	33
2.3.2 Grundsätze der Systemtheorie	33
2.3.3 Systemstruktur eines GPS	34
2.3.4 Modellierung von GPS mit Hilfe von System Dynamics	35

2.4	Wirtschaftlichkeitsbewertung von Maßnahmen	41
2.4.1	Allgemeines	41
2.4.2	Eindimensionale Investitionsrechnung	41
2.4.3	Multikriterielle Entscheidungsfindung	43
2.5	Fazit	46
<b>3</b>	<b>Stand der Erkenntnisse und Handlungsbedarf</b>	<b>47</b>
3.1	Anforderungen an eine methodische Vorgehensweise zur Reduzierung von Energieverschwendung in GPS	47
3.2	Vorstellung und Einordnung betrachteter Ansätze	49
3.2.1	Ansätze zur Verbesserung der Energieeffizienz auf Basis des Wertstromdesigns	49
3.2.2	Allgemeine Ansätze zur Verbesserung der Energieeffizienz in der Fertigung	53
3.2.3	Ansätze zur Identifizierung und Bewertung von Wirkbeziehungen in GPS	56
3.3	Ermittlung des Handlungsbedarfs und Zielspezifikation	58
<b>4</b>	<b>Entwicklung der Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendung in GPS</b>	<b>61</b>
4.1	Allgemeines	61
4.2	Untersuchung von Wirkbeziehungen in GPS	62
4.2.1	Generischer Aufbau des Wirkgefüges eines Prozessschrittes	62
4.2.2	Wirkbeziehungen zwischen Prozessschritt und Prozesskette	67
4.3	Energieorientierte Wertstromanalyse	71
4.3.1	Erläuterung der Vorgehensweise	71
4.3.2	Auswahl der Prozesskette	71
4.3.3	Aufnahme der Produktionsdaten	73
4.3.4	Aufnahme der Energiedaten	76
4.3.5	Datenauswertung	82
4.4	Generierung von Energieeffizienz-Maßnahmen	85
4.4.1	Ableitung von Energieeffizienz-Handlungsansätzen	85

---

4.4.2	Erläuterung der Energieeffizienz-Handlungsansätze	87
4.4.3	Positionierung im Energieeffizienz-Maßnahmenportfolio	91
4.4.4	Quantifizierung der Auswirkungen von Energieeffizienz-Maßnahmen auf Stellgrößen und endogene Größen	94
4.5	Generisches System-Dynamics-Modell	96
4.5.1	Erläuterung der Vorgehensweise	96
4.5.2	Phase 1: Problemartikulation	97
4.5.3	Phase 2: Qualitative Analyse des Systems	97
4.5.4	Phase 3: Erstellung des System-Dynamics-Modells	100
4.5.5	Phase 4: Verifikation und Validierung	112
4.5.6	Phase 5: Simulationsdurchführung und Auswertung	115
4.6	Erweiterte Wirtschaftlichkeitsbewertung	122
4.6.1	Genereller Aufbau des erweiterten Bewertungsverfahrens	122
4.6.2	Bewertung der GPS-Zielgrößenveränderungen	123
4.6.3	Ableitung von Umsetzungsempfehlungen	130
4.7	Fazit	134
<b>5</b>	<b>Exemplarische Anwendung in der Praxis</b>	<b>135</b>
5.1	Erläuterung der Vorgehensweise	135
5.2	Fallbeispiel 1: Lernfabrik für Energieproduktivität (LEP)	136
5.2.1	Schritt 1: Energieorientierte Wertstromanalyse	136
5.2.2	Schritt 2: Energieeffizienz-Maßnahmengenerierung	140
5.2.3	Schritt 3: Prognose der GPS-Zielgrößenwerte	143
5.2.4	Schritt 4: Erweiterte Wirtschaftlichkeitsbewertung	147
5.3	Fallbeispiel 2: Stirnwandfertigung im Karosseriebau	151
5.3.1	Schritt 1: Energieorientierte Wertstromanalyse	151
5.3.2	Schritt 2: Energieeffizienz-Maßnahmengenerierung	153
5.3.3	Schritt 3: Prognose der GPS-Zielgrößenwerte	155
5.3.4	Schritt 4: Erweiterte Wirtschaftlichkeitsbewertung	158

5.4	Bewertung der Methodik	161
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>167</b>
6.1	Zusammenfassung	167
6.2	Ausblick	169
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>171</b>
<b>8</b>	<b>Übersicht betreuter Studienarbeiten</b>	<b>189</b>
<b>9</b>	<b>Anhang</b>	<b>191</b>
A1	Kenngrößen des GPS-Wirkgefüges	191
A2	Aufbau des System-Dynamics-Modells in <i>Vensim<sup>®</sup> PLE Plus</i>	193
A3	Fallstudie 1: Energieorientierte Wertstromanalyse	194
A4	Fallstudie 1: Energieeffizienz-Maßnahmensteckbriefe	196
A5	Fallstudie 2: Energieorientierte Wertstromanalyse	197
A6	Fallstudie 2: Energieeffizienz-Maßnahmensteckbriefe	200

---

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AHP	Analytischer Hierarchieprozess
AS	Anlagenstillstand
aZ	arbeitender Zustand
B	Balancing Loop
BAZ	Bearbeitungszentrum
BC	Best-Case
BDE	Betriebsdatenerfassungssystem
BMF	Bundesministerium der Finanzen
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
bspw.	beispielsweise
BZ	Bereitschaftszustand
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
d. h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
e. V.	eingetragener Verein
EBIT	earnings before interest and taxes
EE	Energieeffizienz
EN	Europäische Norm
etc.	et cetera

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
evtl.	eventuell
eWSA	energieorientierte Wertstromanalyse
f./ff.	und folgende (Singular/Plural)
FIFO	first-in-first-out
FM	Fertigungsmittel
fZ	fördernder Zustand
ggfs.	gegebenenfalls
GPS	Ganzheitliche(s) Produktionssystem(e)
I	Inventory
i. Allg.	im Allgemeinen
i. S.	im Sinne
inkl.	inklusive
ISO	International Organization for Standardization
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
Kurzst.	Kurzstillstand
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
LEP	Lernfabrik für Energieproduktivität
MA	Maßnahme
MAUT	Multi-Attributive Nutzentheorie
max	maximal
MC	Mean-Case
MCDM	Multi Criteria Decision Making
min	minimal



---

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
MIT	Massachusetts Institute of Technology
Mon	Monat(e)
Mrd.	Milliarde(n)
n	Anzahl Nennungen
NNE	Netznutzungsentgelte
NWA	Nutzwertanalyse
org.	organisatorisch(e)
Prod.-laufzeit	Produktionslaufzeit
PS	Prozessschritt
pZ	produktionsfreier Zustand
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung e. V.
RIF	Dortmunder Initiative zur rechnerintegrierten Fertigung e. V.
RW	Referenzwert
saZ 1 bis n	sonstiger aktiver Zustand 1 bis n
sog.	sogenannt(e/r)
tägl.	täglich(e)
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TPS	Toyota Produktionssystem
u. a.	unter anderem
ungepl.	ungeplant(e)
V & V	Verifikation und Validierung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
WC	Worst-Case
z. B.	zum Beispiel
ZE	Zeiteinheit

---

## Verzeichnis der Formelzeichen

Variable	Einheit	Bedeutung
#FM	-	Anzahl identischer Fertigungsmittel
#FT	-	Anzahl der Fabrikstage
#U	-	Anzahl der Unterbrechungen
#Var	-	Anzahl der Varianten
a	-	Koeffizient a
A&N	ZE	Ausschuss- und Nacharbeitszeit
a, b, c, ...	-	Stellgrößen
a, b, c, ...	-	Nummerierung der Fertigungsmittel
$a_{ij}$	-	Paarvergleich
$A_t$	€	Einzahlung zum Zeitpunkt t
AV	%	Anlagenverfügbarkeit
AZ	ZE/d	tägliche Arbeitszeit
b	-	Koeffizient b
B(T)	Stk	Bestandsgröße als Funktion der Zeit
bZ	ZE	bearbeitende Zeit pro Fabriktag
$bZ_{\text{Stk}}$	ZE/Stk	bearbeitende Zeit pro Stück
$BZ_j$	%	prozentualer Anteil des Betriebszustands j
c	-	Koeffizient c
$c_i$	-	Spaltensumme der Spalte i
CI	-	Konsistenzindex
CR	-	Konsistenzverhältnis
DLZ	ZE	Durchlaufzeit

Variable	Einheit	Bedeutung
E	J bzw. Wh	Energie
EI	Wh/Stk	Energieintensität
EI <sub>n</sub>	Wh/Stk	Energieintensität des Prozessschrittes n
EPEI	ZE	Every-Part-Every-Interval
E <sub>t</sub>	€	Einzahlung zum Zeitpunkt t
f(x)	-	Funktion der Grenzkurve
f <sub>k</sub>	%	Kompensationsanteil
i	-	Element i der Paarvergleichs
j	-	Element j des Paarvergleichs
K&L	ZE	Kurzstillstand- und Langsamlaufzeit
KT	ZE/Stk	Kudentakt
KW	€	Kapitalwert
KW <sub>t*</sub>	€	Kapitalwert nach der Zeitperiode t*
KW <sub>t*+1</sub>	€	Kapitalwert nach der Zeitperiode t*+1
LG	%	Leistungsgrad
LOS	Stk	Losgröße
m, n, p, q	-	Modellvariablen
M <sub>DL</sub>	Wh/m <sup>3</sup>	Medienfaktor Druckluft
MIX	Stk	Produktmix
MTBF <sub>i</sub>	ZE	mittlere Dauer zwischen zwei Unterbrechungen der Taktverlustart i
MTTR	ZE	mittlere Unterbrechungsdauer
MTTR <sub>i</sub>	ZE	mittlere Unterbrechungsdauer der Taktverlustart i
N	-	Menge der natürlichen Zahlen

<b>Variable</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$N_0$	-	Menge der natürlichen Zahlen mit Null
$n, n+1, \dots$	-	Nummerierung der Prozessschritte
$nbZ$	ZE	nicht-bearbeitende Zeit pro Fabriktag
$nbZ_{Stk}$	ZE/Stk	nicht-bearbeitende Zeit pro Stück
$N_{spez}$	$m^3/ZE$	Normvolumenbedarf
OEE	%	Overall Equipment Effectiveness
$OEE_{gesamt}$	%	Overall Equipment Effectiveness der gesamten Prozesskette
$OEE_i$	%	Overall Equipment Effectiveness des Prozessschrittes i
$oS$	ZE	organisatorische Störzeit
$P$	W	Leistung
$P_{DL}$	W	Leistungsbedarf Druckluft
$P_{el}$	W	elektrische Leistung
$P_j$	W	Leistungsbedarf des Betriebszustands j
$pT(T)$	Stk	produzierte Teile als Funktion der Zeit
$pT_n$	Stk	produzierte Teile im Prozessschritt n
$PZ$	ZE	Pausenzeit
$Q$	J	Wärme
$\dot{Q}$	J/ZE	Wärmestrom
QG	%	Qualitätsgrad
$r$	-	Anzahl der Zeitanteile pro tägl. Produktionslaufzeit
R&A	ZE	Rüst- und Anlaufzeit

Variable	Einheit	Bedeutung
RD	ZE	Rüstdauer
$r_i$	-	Zeilensumme der Zeile $i$
RI	-	Zufallskonsistenz
$\bar{r}_i$	-	Zeilensumme der Durchschnittsmatrix
s	-	Anzahl der Betriebszustände im Prozessschritt
t	ZE	Zeit
$t^*$	ZE	Zeitperiode nach der KW zum letzten Mal negativ ist
$t_A$	ZE	Amortisationszeit
TB	Stk/d	Tagesbedarf
$T_i$	ZE	Zeitanteil $i$
$TiR(t)$	Stk/Takt	Teileinput-Rate als Funktion der Zeit
$ToR(t)$	Stk/Takt	Teileoutput-Rate als Funktion der Zeit
tPLZ	ZE	tägliche Produktionslaufzeit
tS	ZE	technische Störzeit
$t_U$	ZE	Unterbrechungszeit
TV	%	Technische Verfügbarkeit
TZ	ZE/Takt	Taktzeit
$V(t)$	Stk/Takt	Summe der Taktverluste zum Zeitpunkt t
Var n	Stk	Tagesbedarf der Variante n
$V_{K\&L}(t)$	Stk/Takt	Taktverlust Kurzstillstand- & Langsamlaufzeit
$V_{N\&A}(t)$	Stk/Takt	Taktverlust Nacharbeits- & Ausschusszeit
$V_{oSTiR}(t)$	Stk/Takt	Taktverlust organisatorische Störzeit $t_{TiR}$
$V_{oSToR}(t)$	Stk/Takt	Taktverlust organisatorische Störzeit $t_{ToR}$

<b>Variable</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$V_P(t)$	Stk/Takt	Taktverlust Pausenzeit
$V_{R\&A}(t)$	Stk/Takt	Taktverlust Rüst- & Anlaufzeit
$V_{tS}(t)$	Stk/Takt	Taktverlust technische Störzeit
$V_{W\&oA}(t)$	Stk/Takt	Taktverlust Zeit für Wartung & ohne Auftrag
$W$	J	Arbeit
$W\&oA$	ZE	Zeit für Wartung und ohne Auftrag
$W_{el}$	J bzw. Wh	elektrische Arbeit / Energie
$w_i$	-	Gewichtung der Zeile i
$WIP$	Stk	Umlaufbestand
$WIP(T)$	Stk	Umlaufbestand als Funktion der Zeit
$WIP(T_0)$	Stk	Anfangsbestand zum Zeitpunkt $T_0$
$WIP_{gesamt}$	Stk	Umlaufbestand der Prozesskette
$WIP_{max}$	Stk	maximaler Umlaufbestand
$WIP_{min}$	Stk	minimaler Umlaufbestand
$WIP_n$	Stk	Umlaufbestand des Prozessschrittes n
$x$	Stk	Pufferkapazität
$x_{min}$	-	minimaler Wert auf der x-Achse
$y, z$	-	Zielgrößen
$y_{min}$	-	minimaler Wert auf der y-Achse
$z$	%	Kalkulationszinssatz
$ZZ$	ZE/Stk	Zykluszeit pro Stück
$ZZ_{vPS}$	ZE/Stk	Zykluszeit des vorgelagerten Prozessschrittes
$\lambda_i$	-	Eigenwert

<b>Variable</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$\lambda_K$	-	Eigenwert einer vollständig konsistenten Matrix
$\lambda_{\max}$	-	maximaler Eigenwert
$\lambda_{\text{Tech}}$	Stk/ZE	technischer Durchsatz
$\mu$	1/Stk	Parameter der exponentiellen Verteilungsfunktion



# 1 Einleitung

„Die Energie kann als Ursache für alle Veränderungen in der Welt angesehen werden.“

W. Heisenberg

## 1.1 Ausgangssituation und Motivation

Identifiziert als einer der zukünftigen Megatrends, stellt die Ressourcenknappheit die Politik, Wirtschaft und Gesellschaft im 21. Jahrhundert vor neue Herausforderungen (ABELE & REINHART 2011, S. 17). Eine wachsende Weltbevölkerung, das globale Wirtschaftswachstum sowie die damit einhergehende Verknappung von Rohstoffen bringen die Menschheit an ihre natürlichen Grenzen (NEUGEBAUER 2008, S. 11). Folglich bildet der sparsame Umgang mit den natürlichen Ressourcen die Grundlage für ökonomisch und ökologisch verantwortungsbewusstes Handeln (RIMPAU ET AL. 2010). Der hierzu notwendige Paradigmenwechsel aus der Perspektive produzierender Unternehmen wird von NEUGEBAUER (2008, S. 12) wie folgt formuliert:

„An die Stelle von *maximaler Gewinn aus minimalem Kapital* muss *maximaler Gewinn aus minimalen Ressourcen* treten.“

Der Einsatz von Energie als eine der natürlichen Ressourcen bietet erhebliches Einsparpotenzial. Dies trifft vornehmlich auch auf produzierende Unternehmen zu, denn bei der Analyse der Energiebedarfsstruktur in Deutschland im Jahr 2013 zeigt sich, dass mit 28,5 % ein maßgeblicher Anteil am gesamten Endenergiebedarf von 9.269 PJ auf die Industrie entfällt (Abbildung 1).

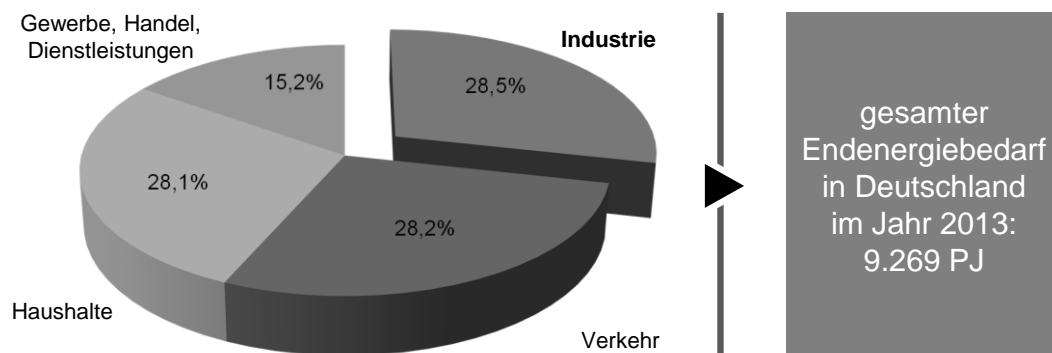


Abbildung 1: Endenergiebedarf im Jahr 2013 in Deutschland nach Verbrauchergruppen (eigene Darstellung nach BMWi 2014)

Viele Unternehmen stehen einer Realisierung von Energieeinsparungen in der Produktion allerdings skeptisch gegenüber (vgl. KFW 2005). Ein Grund für diese Haltung ist die Ungewissheit der Auswirkungen auf bestehende Produktionssysteme (KLETTI & SCHUMACHER 2011, S. 10). Oft können analog zur *Theorie des Schmetterlingseffekts* bereits kleine Eingriffe in bestehende Systeme erhebliche Auswirkungen verursachen (LORENZ 1963, S. 130). Derartige Auswirkungen sind das Resultat von Wirkbeziehungen. Der Begriff *Wirkbeziehung* stammt aus der Methodik des Vernetzten Denkens und wird zur Beschreibung und Darstellung von Zusammenhängen in komplexen Systemen verwendet (PROBST & GOMEZ 1991).

Mit dem Ziel „Produkte und Leistungen bedarfsgerecht, wirtschaftlich und termingerecht mit der erforderlichen Qualität herzustellen“ (WESTKÄMPER 2009, S. 27), wurden Produktionsprozessketten in den letzten Jahren in verstärktem Maße nach den Prinzipien der schlanken Produktion gestaltet und zu *Ganzheitlichen Produktionssystemen* (GPS) weiterentwickelt (KORGE & LENTES 2009, S. 570 ff.). Die Leistung eines GPS wird mit Hilfe von Zielgrößen wie bspw. der Durchlaufzeit oder dem Qualitätsgrad gemessen (VDI 2870, S. 11). GPS gelten zudem als komplexe Systeme, deren Elemente durch Wirkbeziehungen miteinander verbunden sind (vgl. KROPIK 2009, S. 23; HALL & FANGEN 1956, S. 18). Die Umsetzung einer Maßnahme zur Energieeinsparung kann aufgrund dieser Wirkbeziehungen zu Veränderungen im Produktionsablauf und dadurch wiederum zu ungewünschten Auswirkungen auf GPS-Zielgrößen führen (vgl. PETER 2009, S. 28). Dieses Erkenntnis ist in Abbildung 2 beispielhaft dargestellt.

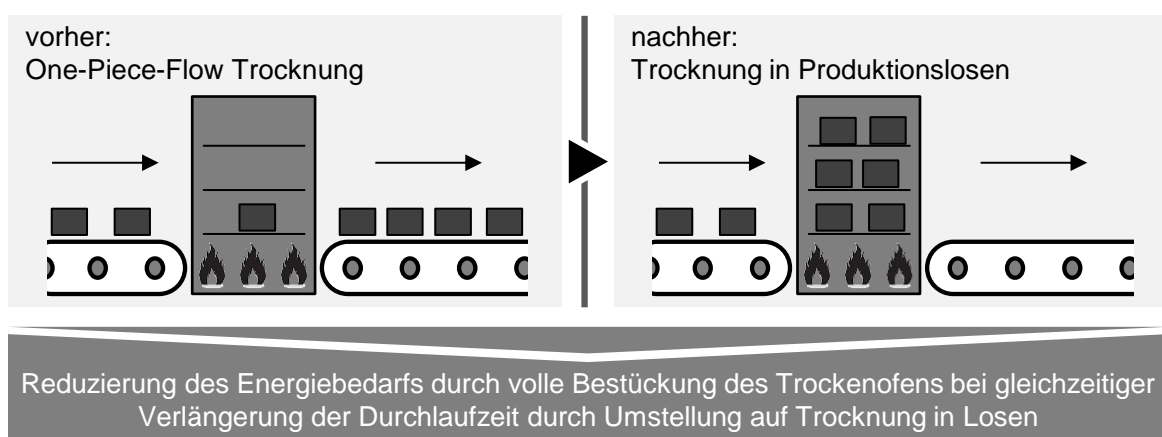
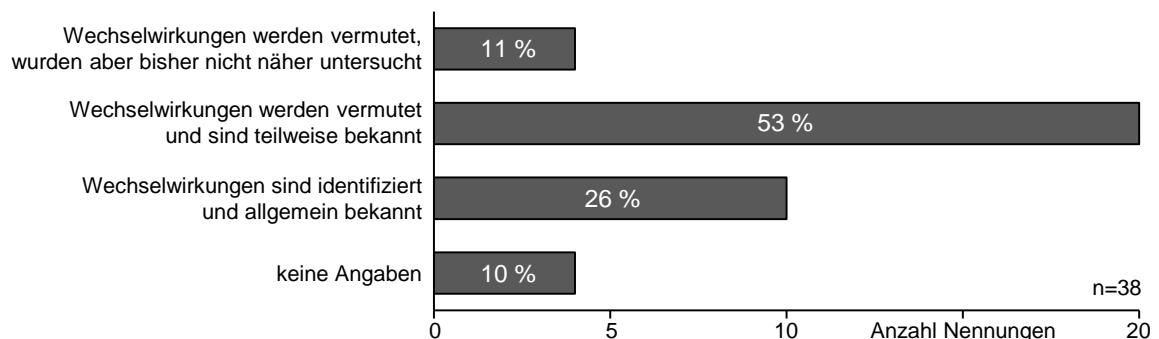


Abbildung 2: Beispielhafte Darstellung der Wirkbeziehung zwischen einer Maßnahme zur Senkung des Energiebedarfs und der Durchlaufzeit

Ein Trockenofen wird in diesem Beispiel aus Kapazitätssicht bewusst nicht vollständig, sondern mit genau einem Produkt bestückt, um die Produktion nach dem GPS-Prinzip des Einzelstückflusses (One-Piece-Flow) zu steuern (TAKEDA 2009, S. 247). Aus energetischer Sicht ist eine Ausnutzung der vollen Kapazität des Trockenofens jedoch sinnvoller. Dies kommt einer Umstellung von einer One-Piece-Flow-Trocknung auf eine Trocknung in Produktionslosen gleich. Durch diese Umstellung wird eine Reduzierung des Energiebedarfs pro Produkt erreicht. Als Nebeneffekte können vor dem Trocknungsprozess Wartezeiten und nach dem Trocknungsprozess Leerlaufzeiten auftreten, die in einer Verlängerung der Durchlaufzeit resultieren. Offensichtlich besteht im Beispiel eine Wirkbeziehung zwischen der Energieeinsparmaßnahme und der GPS-Zielgröße Durchlaufzeit.

Entsprechende Wirkbeziehungen müssen bei der Umsetzung von Energieeinsparprogrammen zwingend berücksichtigt werden (HERRMANN ET AL. 2008; BERGMILLER & MCCRIGHT 2009). Oftmals fehlt es den Unternehmen jedoch am nötigen Wissen bezüglich dieser Wirkbeziehungen, die teilweise auch als *Wechselwirkungen* bezeichnet werden. In einer Studie zur Ermittlung des Stellenwerts der Reduzierung von Energieverschwendung in GPS wurden Mitarbeiter der in Deutschland produzierenden Automobilhersteller zu ihrem Kenntnisstand zu bestehenden Wechselwirkungen zwischen Maßnahmen zur Senkung des Energiebedarfs und Zielgrößen in GPS befragt (SCHNELLBACH ET AL. 2013, S. 433). 53 % der Befragten gaben an, dass diese Wechselwirkungen vermutet werden jedoch nur teilweise bekannt sind. Zwar vermutet, aber noch nicht näher untersucht, wurden die Wechselwirkungen nach Angabe von 11 % der Teilnehmer. Nur etwa ein Viertel der Befragten waren der Meinung, dass bestehende Wechselwirkungen bereits identifiziert und allgemein bekannt sind (Abbildung 3).



*Abbildung 3: Einschätzung bestehender Kenntnisse über Wechselwirkungen zwischen Maßnahmen zur Senkung des Energiebedarfs und GPS-Zielgrößen (SCHNELLBACH ET AL. 2013, S. 434)*

Daneben fehlt es produzierenden Unternehmen zusätzlich auch an methodischen Vorgehensweisen, um Transparenz über mögliche Energieeinsparpotenziale zu erzeugen und diese Potenziale anschließend umzusetzen (NEUGEBAUER 2008, S. 350 f.; REINHART ET AL. 2011A, S. 253; WEINERT ET AL. 2011, S. 41). Diese methodischen Vorgehensweisen werden neben der Fabrikplanungsphase vor allem bei langen Produktlebenszyklen auch im laufenden Betrieb der Produktion benötigt (MÜLLER ET AL. 2009, S. 31; ENGELMANN 2009, S. 28).

Als Fazit kann festgehalten werden, dass aufgrund fehlender Relevanz der effiziente Einsatz von Energie in GPS in der Vergangenheit keine entscheidende Rolle spielte (GOTTMANN 2009, S. 32). Eine wachsende Bereitschaft zur Änderung dieses Umstands wird durch die mangelnde Kenntnis der Wirkbeziehungen in GPS gebremst. Aufgrund von Synergieeffekten ist die Erweiterung von GPS um eine methodische Vorgehensweise zur systematischen Energiebedarfsreduzierung in der Betriebsphase jedoch sinnvoll (MCKINSEY & COMPANY 2009, S. 51; GONCE & SOMERS 2010). Teil dieser methodischen Vorgehensweise muss jedoch die Untersuchung der Wirkung von Maßnahmen auf die Zielgrößen in GPS sein. Im nachfolgenden Abschnitt folgt die Spezifizierung des Betrachtungsbereichs der Arbeit vor dem Hintergrund der Entwicklung einer solchen methodischen Vorgehensweise.

### **1.2 Spezifizierung des Betrachtungsbereichs**

Zur Abgrenzung des Betrachtungsbereichs der vorliegenden Arbeit werden aus der Morphologie in Abbildung 4 die im Fokus stehenden Merkmalsausprägungen aufgezeigt, die bei der Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Reduzierung des Energiebedarfs in GPS Berücksichtigung finden sollen.

Zur Spezifizierung des Betrachtungsbereichs erfolgt in der Morphologie die Unterscheidung von drei Merkmalskategorien. Die erste Kategorie bezieht sich auf die betrachtete Fertigung. Die zu entwickelnde Vorgehensweise soll in einer nach GPS-Prinzipien gestalteten Fertigung Anwendung finden. Da GPS ihren Ursprung in der Automobilfertigung haben (vgl. OHNO 1988), sind deren Merkmalsausprägungen für den Betrachtungsbereich der vorliegenden Arbeit bestens geeignet. Die methodische Vorgehensweise soll folglich in einer Fertigung anwendbar sein, die sich durch die Fertigungsart *Serienfertigung* charakterisieren lässt. Gefertigt wird nach dem *Make-to-Order*-Konzept in *Fließfertigung* (FORD & CROWTHER 1926; LÖDDING 2005, S. 95 ff.; SCHUH & STICH 2012, S. 168 ff.). Unter dem Begriff *Fertigung* werden dabei auch Montagetätigkeiten verstanden, die nach DIN 8580

Bestandteil der Fertigungsverfahren sind (DIN 8580, S. 11). In der vorliegenden Arbeit findet ein synonyme Gebrauch der Begriffe *Fertigung* und *Produktion* statt.

Merkmale	Ausprägungen					
	Fertigungsart	Einzel-fertigung	Fertigung in kleinen Losen	Serien-fertigung	Massen-fertigung	
Fertigungs-konzept	Engineering to Order		Make to Order	Make to Stock		Merkmale der Fertigung in GPS
Fertigungsprinzip	Fließ-Fertigung		Insel-fertigung	Werkstatt-fertigung		
Fabriklebenszyklus	Entwicklung	Aufbau	Anlauf	Betrieb	Abbau	Merkmale der Fabrik-planung
Verbesserungs-ansatz	Innovation			Kaizen / KVP		
Elemente der Energiewandlung	Primär-energie	Sekundär-energie	End-energie	Nutz-energie		Merkmale des Energie-managements
Energetischer Stellhebel	Energiebedarfsreduzierung			Lastmanagement		

■ im Betrachtungsfokus

Abbildung 4: Morphologie zur Abgrenzung des Betrachtungsbereichs

Durch die zweite Merkmalskategorie – die Fabrikplanung – wird festgelegt, in welcher Phase des Fabriklebenszyklus die methodische Vorgehensweise angewandt werden kann und welcher Verbesserungsansatz ihr zugrunde liegt. Entsprechend dem Ursprung der GPS soll der Fokus der Betrachtung während des Fabriklebenszyklus auf der Phase des laufenden *Betriebs* liegen (MÜLLER ET AL. 2009, S. 132). In dieser Phase gestaltet sich eine Verbesserung nach dem Prinzip der Innovation für bestehende Produktionsprozessketten häufig kostenintensiv (vgl. PROGNOSE 2007, S. 105). Daher soll vorrangig der Ansatz des *Kontinuierlichen Verbesserungsprozesses* (KVP) gelten. In Japan ist dieser unter dem Terminus *Kaizen* bekannt (IMAI 1986, S. 37).

Das Energiemanagement stellt die dritte Merkmalskategorie dar und legt fest, welche Energieform betrachtet und welcher energetische Stellhebel genutzt werden soll. Innerhalb der Energiewandlungskette liegt der Fokus der Betrachtung auf der Endenergie, welche der Fabrik bereitgestellt wird. Sie wird entweder sofort in der Fertigung genutzt (in dem Fall entspricht die Endenergie der Nutzenergie) oder aber

innerhalb der Fabrik, z. B. in Form von Druckluft, partiell in Nutzenergie umgewandelt (VDI 4661, S. 11 f.). Nach der Zusammensetzung des Energiepreises ist es kostenseitig sowohl sinnvoll, den absoluten Energiebedarf zu reduzieren, als auch ein Lastmanagement zu betreiben, das zur Glättung des Leistungsbedarfs beiträgt (MÜLLER ET AL. 2009, S. 96 ff.; REINHART ET AL. 2012, S. 622). Zur Betreibung eines funktionstüchtigen Lastmanagements werden „komplexere elektronisch gesteuerte Systeme“ benötigt (ERLACH & WESTKÄMPER 2009, S. 72). Eine Glättung des Leistungsbedarfs gestaltet sich somit auf operativer Ebene schwierig. Für die zu entwickelnde methodische Vorgehensweise wird daher die *Energiebedarfsreduzierung* als energetischer Stellhebel festgelegt. Sie kann auf operativer Ebene einfach beeinflusst und nachverfolgt werden (REINHART ET AL. 2011A, S. 260).

### 1.3 Zielsetzung

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit besteht in der Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise, die es einem Anwender ermöglichen soll, den Energiebedarf einer nach GPS-Prinzipien gestalteten Fertigung zu reduzieren. Dazu bietet die Vorgehensweise Lösungen zur Identifizierung von Energieverschwendung in der Fertigung. Als Energieverschwendung kann jegliche eingesetzte Energie bezeichnet werden, die nicht zwingend zur Erzeugung der Produktionsausbringung benötigt wird (ERLACH & WESTKÄMPER 2009, S. 17). Auf Basis ermittelter Einsparpotenziale soll dem Anwender dann eine Systematik zur Generierung von Maßnahmen zur Reduzierung der Energieverschwendung geboten werden. Vor der Umsetzung der Maßnahmen sollen deren Auswirkungen auf GPS-Zielgrößen prognostiziert werden, um abschließend eine Umsetzungsempfehlung für den Anwender zu ermöglichen. Als Anwender der zu entwickelnden Vorgehensweise werden Energie- und/oder GPS-Experten angesehen, die für die kontinuierliche Verbesserung der Fertigung zuständig sind.

Als Untersuchungsbereich der Vorgehensweise wird eine nach GPS-Prinzipien ausgerichtete Fließfertigung ausgewählt. Demnach kann im untersuchten Bereich ein fortgeschrittener GPS-Einführungsstand und somit auch eine Steuerung der Produktion mit Hilfe der GPS-Zielgrößen vorausgesetzt werden<sup>1</sup>.

Für die vorliegende Arbeit ergeben sich daraus vier Forschungsfragen:

---

<sup>1</sup>Informationen zum Einführungsstand von GPS in der produzierenden Industrie können u. a. BECKER ET AL. (2002), KESSLER ET AL. (2008), KLUGE ET AL. (2009) und SCHNELLBACH ET AL. (2013) entnommen werden.

*Wie kann Energieverschwendung in einem ausgewählten Produktionsbereich identifiziert werden?*

*Wie können Maßnahmen zur Reduzierung von Energieverschwendung generiert werden?*

*Wie können Wirkungen der Umsetzung dieser Maßnahmen auf Zielgroßen Ganzheitlicher Produktionssysteme ermittelt werden?*

*Wie können die ermittelten Wirkungen in einer Wirtschaftlichkeitsbewertung der Maßnahmen berücksichtigt werden?*

Die Entwicklung einer Vorgehensweise zur Reduzierung von Energieverschwendung unter Berücksichtigung der Wirkbeziehungen in GPS erfordert die Beantwortung dieser vier Forschungsfragen.

## **1.4 Aufbau der Arbeit**

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel, deren logischer Aufbau in Abbildung 5 dargestellt ist.

In Kapitel 1 wurde in der Einleitung bereits auf die *Ausgangssituation und Motivation* der Arbeit eingegangen. Nach der *Spezifizierung des Betrachtungsraums* und der Formulierung der *Zielsetzung* endet das Kapitel mit der Beschreibung des *Aufbaus der Arbeit*.

Kapitel 2 widmet sich der Aufarbeitung der für die Arbeit notwendigen Grundlagen. Nach einer Erläuterung der Thematik *Energieverschwendung in der Fertigung*, werden *Ganzheitliche Produktionssysteme* beschrieben. Da es sich bei GPS um komplexe Systeme handelt, wird anschließend eine Übersicht der *Systemtheorie* gegeben und um den Ansatz *System Dynamics* ergänzt. Mit Hilfe dieses Ansatzes können komplexe Systeme beschrieben werden. Abschließend findet eine Aufarbeitung der Thematik der *Wirtschaftlichkeitsbewertung von Maßnahmen* statt.

Auf Basis der Grundlagen erfolgen im dritten Kapitel die Erörterung von *Anforderungen an die methodischen Vorgehensweise* und die *Vorstellung und Einordnung betrachteter wissenschaftlicher Ansätze*. Anschließend werden eine *Ermittlung des Handlungsbedarfs* sowie eine *Zielspezifikation* durchgeführt.

Für die Entwicklung einer Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendung in GPS werden zu Beginn von Kapitel 4 zunächst *Wirkbeziehungen in GPS*

untersucht. Nach dieser Vorarbeit wird die *energieorientierte Wertstromanalyse* als erster Schritt der Methodik entwickelt. Den zweiten Schritt bildet die Vorgehensweise zur *Generierung von Energieeffizienz-Maßnahmen*, gefolgt von dem Aufbau eines *generischen System-Dynamics-Modells*. Dieses wird zur Prognose der Auswirkungen von Maßnahmen auf die GPS-Zielgrößen benötigt. Der letzte Entwicklungsschritt ist die *erweiterte Wirtschaftlichkeitsbewertung*.

In Kapitel 5 wird anschließend der Nachweis der operativen Anwendbarkeit durch die exemplarische Anwendung der Methodik im Rahmen zweier Fallstudien erbracht. Kapitel 6 schließt die Arbeit mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf weiterführende Handlungsfelder ab.

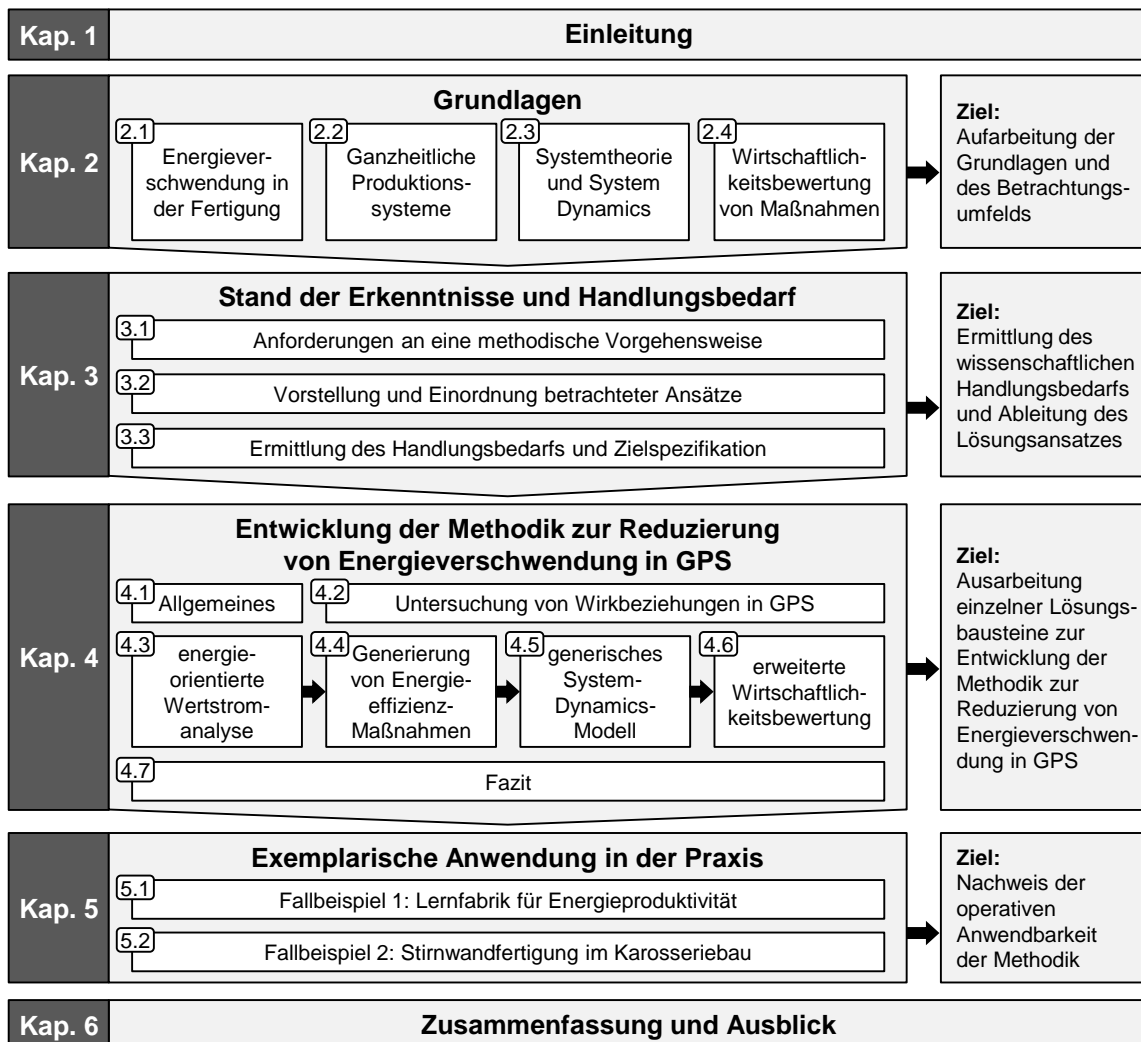


Abbildung 5: Aufbaudiagramm der Arbeit



## 2 Grundlagen

### 2.1 Energieverschwendung in der Fertigung

#### 2.1.1 Allgemeines

Nachfolgend wird der Begriff *Energieverschwendung in der Fertigung* verdeutlicht. Dazu erfolgt in Abschnitt 2.1.2 zunächst die Beschreibung der Energie im betrieblichen Umfeld. Zur Unterscheidung verschiedener Energieumwandlungsformen wird zusätzlich die Energiewandlungskette beschrieben. In Abschnitt 2.1.3 folgt die Betrachtung von Energie aus der Kostenperspektive produzierender Unternehmen. Zur Erläuterung wirksamer Ansatzpunkte zur Reduzierung von Energiekosten wird deren Zusammensetzung beschrieben. Aufbauend auf den bisherigen Erkenntnissen widmet sich Abschnitt 2.1.4 der Herleitung und Bedeutung der Begriffe Energieeffizienz, Energieintensität und Energieverschwendung. Der letzte Abschnitt des Kapitels gibt einen Überblick über in der Literatur genannte Maßnahmen zur Reduzierung der zuvor beschriebenen Energieverschwendung in der Fertigung.

#### 2.1.2 Der Energiebegriff im betrieblichen Umfeld

Die physikalische Energie wird häufig mit der einem System innewohnenden Fähigkeit, Arbeit zu verrichten, gleichgesetzt (FRESNER ET AL. 2009, S. 83; POSCH 2011, S. 11; HESSELBACH 2012, S. 18). Dabei ist zwischen Prozess- und Systemenergie zu unterscheiden. Prozessenergie tritt als Träger äußerer Wirkungen z. B. in Form von Wärme, Arbeit oder elektromagnetischer Strahlung auf. Sie entsteht durch Wirkbeziehungen mehrerer Systeme. Systemenergie bezeichnet als Zustandsgröße die Eigenschaft eines thermodynamischen Systems. Sie gibt die Differenz der im System gebundenen Energien zu einem normierten Referenzzustand an (VDI 4661, S. 5 f.).

Als Einheit der Energie werden Joule [J] bzw. Wattsekunden [Ws] verwendet. In der Energiewirtschaft und -technik sind darüber hinaus auch [Wh], [kWh] und [MWh] gängige Einheiten (MÜLLER ET AL. 2009, S. 68). Gemäß dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik (Energieerhaltungssatz) bleibt die Energie in einem abgeschlossenen System konstant. Der Verbrauch bzw. die Erzeugung von Energie ist in einem solchen System – entgegen gebräuchlicher Redensarten – physikalisch

unmöglich. Energie kann ausschließlich in verschiedene Energieformen umgewandelt werden. Dabei entsteht stets Wärme als Nebenprodukt (TIPLER & MOSCA 2007, S. 182). Mögliche Energieformen sind beispielsweise potentielle, chemische, elektrische oder thermische Energie (HESSELBACH 2012, S. 18).

Auf Grund des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik können derartige Umwandlungsvorgänge nicht uneingeschränkt durchgeführt werden (VDI 4661, S. 6). Sie verlaufen spontan in eine Richtung und sind nicht vollständig umkehrbar (TIPLER & MOSCA 2007, S. 594). Der im Hinblick auf die Verwendung nutzbare Anteil der Energie verkleinert sich folglich (HESSELBACH 2012, S. 21). Zur Bestimmung dieses Anteils ist infolgedessen eine Unterscheidung der Energieformen in Bezug auf ihre Qualität bzw. ihre Wertigkeit zu treffen. Dazu werden jeder Energiemenge die beiden Anteile Exergie und Anergie zugeordnet. Die VDI-Richtlinie 4661 (2003) beschreibt Exergie als den Teil der Energie, der „sich bei den jeweiligen thermodynamischen Umgebungsbedingungen prinzipiell in jede andere Energieform [...] umwandeln lässt.“ Im Gegensatz dazu umfasst die Anergie den Teil der Energie, der nicht in andere Energieformen umwandelbar und somit ohne Arbeitswert ist. Als hochwertige Energien gelten vor allem die elektrische und mechanische Energie. Sie bestehen zu 100 % aus Exergie. Der umgangssprachlich häufig genannte Energieverbrauch ist folglich streng genommen ein Exergieverlust, also eine Entwertung der Energie (MÜLLER ET AL. 2009, S. 69).

Von den energetisch äquivalenten Größen Energie  $E$  und Arbeit  $W$  ist die Leistung  $P$  in [Watt] abzugrenzen, welche die pro Zeit  $t$  verrichtete Arbeit quantifiziert:

$$P = \frac{W}{t} \quad (2-1)$$

Wesentliche Parameter zur Beeinflussung des Energiebedarfs sind folglich Leistung und Zeit. Analog lassen sich die vor allem im betrieblichen Umfeld wichtigen Arbeitsgrößen elektrische Energie bzw. Wärme aus dem Produkt von elektrischer Leistung bzw. Wärmeleistung und Zeit ermitteln (ENGELMANN 2009, S. 61).

Die elektrische Energie berechnet sich aus (MÜLLER ET AL. 2009, S. 83):

$$W_{\text{el}} = P_{\text{el}} \cdot t \quad (2-2)$$

mit

$W_{el}$ : elektrische Arbeit bzw. Energie  
 $P_{el}$ : elektrische Leistung

Die Wärmemenge berechnet sich entsprechend aus (MÜLLER ET AL. 2009, S. 80):

$$Q = \dot{Q} \cdot t \quad (2-3)$$

mit

$Q$ : Wärmemenge  
 $\dot{Q}$ : Wärmestrom bzw. Wärmeleistung

Produzierende Unternehmen oder Privatverbraucher beziehen Energie in unterschiedlichen Formen. Zuvor durchlaufen diese Energieformen eine mehrstufige Energiewandlungskette, welche in Abbildung 6 veranschaulicht ist.

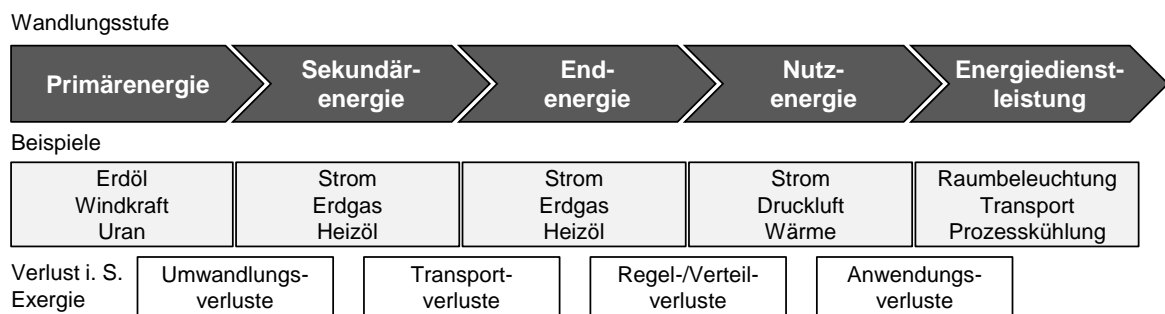


Abbildung 6: Energiewandlungskette (in Anlehnung an ENGELMANN 2009, S. 32)

Am Beginn der Energiewandlungskette steht die Primärenergie, die den Energiegehalt natürlich vorkommender Energieträger wie z. B. Erdöl, Windkraft oder Uran abbildet. Durch verlustbehaftete Prozesse, wie beispielsweise Verbrennung oder Kernspaltung in zentralen Umwandlungsanlagen (Kraftwerke, Heizwerke, Raffinerien, Reaktoren, etc.) wird daraus Sekundärenergie gewonnen. Sie steht zur Verteilung an die Endverbraucher zur Verfügung. Als Träger von Sekundärenergie dienen entweder die veredelten Produkte Heizöl, Briketts, Benzin, etc. oder leitungsgebundene Formen wie Fernwärme oder Strom (PEHNT 2010, S. 23). Die Endenergie gleicht in ihrer Form der Sekundärenergie. Sie beschreibt jedoch den Energiegehalt der Energieträger, die in den Besitz des Nutzers übergehen (MÜLLER ET AL. 2009, S. 74) und somit dem Markt entzogen werden (VDI 4661, S. 11). Die Endenergie dient der Erzeugung von Nutzenergie. Diese stellt die letzte Stufe der

Energiewandlung dar und umfasst nach der VDI-Richtlinie 4661 „alle technischen Formen der Energie, welche der Verbraucher letztendlich benötigt“ (VDI 4661, S. 12). Unter Verwendung von Nutzenergie können schließlich die eigentlichen, vom Nutzer gewünschten Energiedienstleistungen erbracht werden.

Auf dem Weg von der Gewinnung der Primärenergieträger bis hin zur Nutzung als Energiedienstleistung sind energetische Verluste im Sinne der Exergie unvermeidbar. Sie setzen sich z. B. aus Transport- und Umwandlungsverlusten sowie aus Anwendungsverlusten zusammen (ENGELMANN 2009, S. 32). In der Reduzierung dieser Verluste zeigt sich die besondere primärenergetische Relevanz von Energieeinsparungen im Nutzenergiebereich. So führt die Einsparung von 1 kWh Druckluft bereits zur Einsparung von 20 kWh Primärenergie (HESSELBACH 2012, S. 21).

### **2.1.3 Energie als Kostenfaktor in der produzierenden Industrie**

Energie spielte als Kostenfaktor in den meisten Unternehmen in der Vergangenheit lediglich eine untergeordnete Rolle. Dies ist vor allem auf den geringen Anteil der Energiekosten am Bruttoproduktionswert zurückzuführen: Dieser betrug im Jahr 2012 2,1 % im verarbeitenden Gewerbe, im Fahrzeugbau sogar nur knapp 1 % (DESTATIS 2014, S. 309). Laut einer Studie von McKinsey & Company beträgt das Energieeinsparpotenzial produzierender deutscher Unternehmen bis 2020 jedoch geschätzte 10 Mrd. €. Bei durchschnittlichen Energiekosten von etwa 2,5 % der Gesamtkosten würde dies einer Steigerung der durchschnittlichen EBIT-Marge von 3,5 % auf 4 % entsprechen (MCKINSEY & COMPANY 2009, S. 51). Daher soll dieser Abschnitt überblicksartig den Zusammenhang zwischen Energieeinsatz und -kosten aus Sicht eines industriellen Verbrauchers verdeutlichen.

Da die Stromkosten in den meisten produzierenden Unternehmen den größten Anteil der Energiekosten ausmachen, wird ihre Zusammensetzung an dieser Stelle weiter aufgeschlüsselt. Laut KONSTANTIN (2009, S. 55 ff.) bzw. PECHMANN ET AL. (2012, S. 528) setzt sich der Stromverbraucherpreis aus verschiedenen Hauptbestandteilen zusammen.

Der für die Stromlieferung entstehende Preis resultiert aus den Stromlieferverträgen und Einkäufen an der Strombörse und dient zur Abdeckung der Stromerzeugungskosten der stromproduzierenden Kraftwerke. Er kann als Arbeitspreis in [€/MWh] angesetzt werden (KONSTANTIN 2009, S. 55 f.). Netznutzungsentgelte (NNE) bezahlt der Kunde für den Transport und die Verteilung des Stroms durch die Stromnetze. Sie setzen sich bei leistungsgemessenen Kunden aus einem

Arbeitspreis in [€/MWh] und einem sogenannten Leistungspreis in [€/MW] zusammen. Dieser hängt von der Höchstlast, d. h. der höchsten gemessenen Leistung innerhalb eines definierten Zeitraums ab. Zusätzlich fallen Zahlungen für Messstellenbetrieb, Messung und Abrechnung sowie zum Teil auch für Blindarbeit an, die durch Blindstromkompensation jedoch vermieden werden kann (MÜLLER ET AL. 2009, S. 306). Hinzu kommen letztlich staatlich bestimmte Preisbestandteile, die auf verschiedenen rechtlichen Rahmenbedingungen beruhen und in Form von Steuern, Abgaben und Umlagen zu entrichten sind (KONSTANTIN 2009, S. 59 f.).

Die Zusammensetzung des Gesamt-Gaspreises für den Endverbraucher ist in groben Zügen vergleichbar mit der oben beschriebenen Struktur des Strompreises. Speziell der Preis für die Gaslieferung ist stark an den Heizölpreis gekoppelt. Im Gegensatz dazu unterliegen die Preise für den Bezug von Fernwärme bzw. -kälte nicht den Bestimmungen des Energiewirtschaftsgesetzes. Zur Versorgung wird ein Vertrag zwischen Fernwärme/-kälteunternehmen und dem Kunden geschlossen. Mit dem Vertrag ist wiederum ein Grund- und/oder Leistungspreis sowie ein Arbeitspreis verbunden (KONSTANTIN 2009, S. 68 ff.).

In der Folge ergibt sich unter Einbeziehung der formalen Zusammenhänge von Leistung und Energie eine direkte Abhängigkeit zwischen Energiekosten und den Faktoren Leistung und Zeit (MÜLLER ET AL. 2009, S. 96). Speziell durch die beiden Stellhebel Arbeits- und Leistungspreis ergeben sich somit vielfältige Möglichkeiten zur Reduzierung der Energiekosten. Der am weitesten verbreitete Ansatz ist dabei die Reduzierung des absoluten Energiebedarfs in MWh, für den der Arbeitspreis entrichtet werden muss (PECHMANN ET AL. 2012, S. 528). Aus der Perspektive der Fertigung lassen sich hier schnelle Erfolge z. B. durch gezielte Maschinenabschaltungen erzielen. Eine Reduzierung der Kosten über den Leistungspreis kann durch gezieltes Lastmanagement erreicht werden, wobei dieser Ansatz jedoch deutlich komplexer ist (SCHIEFERDECKER ET AL. 2006, S. 88 ff.). Hierbei ergibt vor allem eine gesamtheitliche Betrachtung eines Produktionsstandortes Sinn, wobei das Lastmanagement laut PECHMANN ET AL. (2012, S. 528) z. B. durch Steuerungs-Software unterstützt werden kann.

### **2.1.4 Energieeffizienz, -intensität und -verschwendung**

In der produktionstechnischen Literatur ist im Zusammenhang mit dem Energieeinsatz häufig vom Begriff *Energieeffizienz* die Rede. Energieeffizienz wird im Produktionsumfeld laut MÜLLER ET AL. (2009, S. 2) folgendermaßen definiert:

„Energieeffizienz heißt, einen gewünschten Nutzen (Produkte oder Dienstleistungen) mit möglichst wenig Energieeinsatz herzustellen oder aus einem bestimmten Energieeinsatz möglichst viel Nutzen zu ziehen.“

Je nach Betrachtungsebene kann die Art des Nutzens dabei unterschiedlich bewertet werden. In der Fertigung hat sich aus Gründen der Messbarkeit eine Bewertung des Nutzens als erzeugte Wertschöpfung in Form von produzierten Einheiten z. B. in [Stk] oder (bei Schüttgut) in [kg] bewährt (BUNSE ET AL. 2011):

$$\text{Energieeffizienz} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{eingesetzte Energie}} \text{ z. B. in } \frac{[\text{Stk}]}{[\text{Wh}]} \quad (2-4)$$

In der betrieblichen Praxis hat sich hingegen in den letzten Jahren die Inversion der Energieeffizienz durchgesetzt, die als *Spezifischer Energieverbrauch* oder synonym als *Energieintensität* bezeichnet wird (ERLACH & WESTKÄMPER 2009, S. 32; BUNSE ET AL. 2011, S. 671). So wird diese Kenngröße beispielsweise von vielen Automobilherstellern in ihren Nachhaltigkeitsberichten in der Einheit [MWh/Fahrzeug] angegeben (PRITZKE 2012, S. 4). Der hierbei im mathematischen Nenner stehende Nutzen bzw. Produktionsausstoß erhöht die Begreifbarkeit der Kenngröße für den Anwender. Da die Bezeichnung *Energieverbrauch* physikalisch gesehen nicht korrekt ist (vgl. ERLACH & WESTKÄMPER 2009, S. 17), wird in der vorliegenden Arbeit ausschließlich der Begriff *Energieintensität* verwendet. Die Energieintensität wird als energetische Zielgröße festgelegt und nach folgender Gleichung berechnet:

$$\text{Energieintensität} = \frac{\text{eingesetzte Energie}}{\text{Nutzen}} \text{ z. B. in } \frac{[\text{Wh}]}{[\text{Stk}]} \quad (2-5)$$

Eine Steigerung der Energieeffizienz kommt somit einer reziproken Reduzierung der Energieintensität gleich und vice versa. Um dies zu erreichen, kann entweder die eingesetzte Energie bei gleichbleibendem Nutzen verringert oder der Nutzen bei konstantem Energieeinsatz erhöht werden. In Ganzheitlichen Produktionssystemen ist der Ansatz der Nutzenerhöhung, die einem höheren Produktionsausstoß gleichzusetzen ist, nur bedingt anwendbar. Die meist ausgetakteten Fertigungslinien produzieren nach Kundenbedarf, also nach einem *Make-to-Order*-Prinzip (SCHUH & STICH 2012, S. 88 f.). Eine Erhöhung des Produktionsausstoßes wäre nur dann sinnvoll, wenn der Kundenbedarf auf Grund von Engpässen vorher nicht bedient werden konnte oder im Falle einer Nachfrageerhöhung. Sind diese Fälle nicht gegeben, führt eine Erhöhung des Ausstoßes zu unerwünschter Überproduktion

(OHNO 1988, S. 46). Folglich ist eine Konzentration auf die Reduzierung der eingesetzten Energie bei gleichbleibendem Nutzen meist sinnvoller.

Eingesetzte Energie, die nicht zur Erzeugung des Produktionsausstoßes beiträgt, wird als *Energieverschwendung* bezeichnet (ERLACH & WESTKÄMPER 2009, S. 17). Allgemein ist der Begriff *Verschwendung* als „eine verbrauchte Ressource [definiert], die dem Wert für den Kunden oder Anspruchsträger nichts hinzufügt“ (DIN EN 1325, S. 9). Transformiert auf den Energieeinsatz ergibt sich für die vorliegende Arbeit folgende Definition der Energieverschwendung in der Fertigung:

*„Energieverschwendung in der Fertigung ist eingesetzte End- bzw. Nutzenergie, die nicht zu einer Erhöhung des Produktwertes für den Kunden oder Anspruchsträger beiträgt.“*

Demnach kommt jede Reduzierung von Energieverschwendung einer Reduzierung der Energieintensität und damit einer Steigerung der Energieeffizienz gleich.

### **2.1.5 Maßnahmen zur Reduzierung von Energieverschwendung**

Zur Reduzierung von Energieverschwendung in der Fertigung bedarf es der Umsetzung entsprechender Maßnahmen (VDI 3922). In der produktionstechnischen und betriebswissenschaftlichen Literatur existieren vielfältige Vorschläge für sog. Energieeffizienz-Maßnahmen (vgl. bspw. PROGNOSE 2007; GALITSKY & WORRELL 2008; WEINERT 2010; MÜLLER ET AL. 2011; NEUGEBAUER 2013), die generell in drei verschiedene Kategorien unterteilt werden können (Tabelle 1).

Produktorientierte Maßnahmen verursachen Veränderungen am Produkt selbst und müssen daher bereits in der Entwicklung umgesetzt und in der Fabrikplanungsphase berücksichtigt werden (NEUGEBAUER ET AL. 2010, S. 798). Diese vorbetriebliche Phase birgt große Potenziale zur Vermeidung von Energieverschwendung (REINEMA ET AL. 2011, S. 249). Während der anschließenden Betriebsphase sind produktorientierte Maßnahmen jedoch kostspielig und daher oft unwirtschaftlich (PROGNOSE 2007, S. 105). Folglich ist diese Art von Maßnahmen zwar zur Vermeidung, jedoch weniger zur Reduzierung von Energieverschwendung geeignet.

Organisatorische Maßnahmen schaffen Voraussetzungen für einen produktiven Energieeinsatz durch die Implementierung von Energiemanagementsystemen und die Optimierung des Energiebezugs durch den Energieversorger. Die Erzeugung von Transparenz über den Energiebedarf und die Einführung von Energiekenngrößen unterstützen dieses Vorhaben (NEUGEBAUER ET AL. 2010, S. 798; BORCH ET

AL. 1986, S. 60 ff.). Diese Art von Maßnahmen ist ein essentieller Bestandteil einer energieeffizienten Fertigung, hat jedoch keine direkte Auswirkung auf den Energieeinsatz und trägt somit nicht unmittelbar zur Reduzierung von Energieverschwendung bei.

Technische Maßnahmen zielen laut NEUGEBAUER ET AL. (2010, S. 798) „auf eine Optimierung der Prozessführung und eine Verbesserung des Wirkungsgrades einzelner Komponenten des Systems ab“. Neben Ansätzen wie der partiellen Energierückgewinnung und einer intelligenten Steuerungstechnik fallen auch Aspekte wie die energetisch sinnvolle Fahrweise von Maschinen in diese Kategorie (ENGELMANN 2009, S. 97; WEINERT 2010, S. 28). Solche Maßnahmen werden während der Betriebsphase umgesetzt und resultieren direkt in einer Senkung des Energieeinsatzes. Sie können somit als Maßnahmen zur Reduzierung von Energieverschwendung bezeichnet werden.

Der Fokus der Arbeit liegt folglich auf technischen Maßnahmen. Eine *Energieeffizienz-Maßnahme* wird dabei synonym mit der Bezeichnung *Maßnahme zur Reduzierung von Energieverschwendung* verwendet und auch als solche verstanden.

*Tabelle 1: Kategorien für Maßnahmen zur Verbesserung der industriellen Energieeffizienz (in Anlehnung an NEUGEBAUER ET AL. 2010, S. 798; ENGELMANN 2009, S. 97)*

Kategorie	Maßnahmenbeispiele
produktorientiert	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verlängerung des Lebenszyklus</li> <li>- Materialsubstitution oder -einsparung</li> </ul>
organisatorisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>- optimales Vertragsmanagement der verschiedenen Energieträger</li> <li>- Erfassung von Energieverbrauchsdaten</li> <li>- Einführung von Energiekennwerten</li> <li>- Schulung der Mitarbeiter hinsichtlich Energieeinsparung</li> </ul>
technisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>- partielle Abwärmenutzung</li> <li>- Rückgewinnung von Bremsenergie</li> <li>- Bevorzugung von effizienten Energieträgern in der Fertigung</li> <li>- intelligente Steuerungstechnik</li> <li>- energetisch sinnvolle Fahrweise von Anlagen und Maschinen</li> </ul>



## 2.2 Ganzheitliche Produktionssysteme

### 2.2.1 Allgemeines

Produktionssysteme können als zielorientierte Prozessnetzwerke beschrieben werden, durch die Produktionseinheiten fließen (HOPP & SPEARMAN 2001, S. 190). Der Begriff *Ganzheitliches Produktionssystem* (GPS) ist weiter gefasst. Das aus Prozessketten bestehende physische Produktionssystem wird laut DOMBROWSKI ET AL. (2006B, S. 114) um ein „unternehmensspezifisches, methodisches Regelwerk zur umfassenden und durchgängigen Gestaltung der Produktion“ erweitert. Das erwähnte Regelwerk wurde maßgeblich von Führungskräften der Toyota Motor Corporation in Japan geprägt. Daher wird zur Einordnung von GPS in Abschnitt 2.2.2 zunächst deren Ursprung und Entwicklung vorgestellt. Abschnitt 2.2.3 beschreibt den physischen Aufbau der GPS und ihrer Prozessketten. Auf diese Erkenntnisse aufbauend folgen in den Abschnitten 2.2.4 und 2.2.5 Vertiefungen wichtiger GPS-Zielgrößen und der Methode Wertstromdesign. Den Abschluss bildet Abschnitt 2.2.6 mit der Erweiterung des GPS-Gedankens um den Aspekt Energie.

### 2.2.2 Ursprung und Entwicklung der GPS

Anfang der 90er Jahre veröffentlichte das Massachusetts Institute of Technology (MIT) eine Studie, die in der Automobilindustrie für Aufsehen sorgte. Präsentiert wurde ein den damaligen Strukturen in der amerikanischen und europäischen Automobilindustrie überlegenes japanisches Konzept, das unter dem Namen *Lean Production* bzw. *Schlanke Produktion* bekannt wurde (KRAFCIK 1988; WOMACK ET AL. 1991). Der Ursprung der *Schlanke Produktion* ist im Toyota Produktionssystem (TPS) zu finden, das Mitte des 20. Jahrhunderts maßgeblich von einem damaligen Produktionsleiter Toyotas namens Taiichi Ohno entwickelt wurde (MONDEN 1983; OHNO 1988; FUJIMOTO 1999).

Mit dem Ziel, die Produktionskosten durch die kontinuierliche Reduzierung von Verschwendung zu senken, begann Toyota das Konzept der Massenproduktion weiterzuentwickeln. Laut OHNO (1988, S. 46) trat Verschwendung dabei „in Form von Überproduktion, in Form von Wartezeiten, beim Transport, bei der Bearbeitung selbst, im Lager, in Form überflüssiger Bewegung [und] in Form von defekten Produkten“ auf. Er definierte Verschwendung in der Produktion als „alles, was nur Kosten erhöht, ohne zusätzliche Wertschöpfung zu bringen“ (OHNO 1988, S. 83).

Daher entwickelte Toyota zunächst als erste Säule des TPS das Prinzip der Autonomie (japanisch: *Jidoka*), durch das Maschinen zu einem selbständigen Stopp bei fehlerhafter Produktion befähigt wurden (CUSUMANO 1989). Zudem wurde als zweite Säule das *Just-in-Time* Prinzip mit dem Ziel entwickelt, die richtigen Produktionsteile genau dann in der benötigten Menge und Qualität am benötigten Ort bereitzustellen, wenn diese in der Fertigung gebraucht wurden (OHNO 1988, S. 30 f.). Mit Hilfe der beiden Säulen *Jidoka* und *Just-in-Time* gelang es Toyota, Automobile in kleinen Losen bei hoher Variantenvielfalt wirtschaftlich zu produzieren. Unterstützt wurde das TPS durch die typisch japanische Einstellung zur kontinuierlichen Verbesserung und dem Streben nach Perfektion (IMAI 1986, S. 37; WOMACK & JONES 1997, S. 391).

Die durch die MIT Studie angeregten Diskussionen über *Lean Production* lösten bei amerikanischen und europäischen Automobilherstellern eine Welle der Umsetzung von Prinzipien der *Schlanken Produktion* aus (DOMBROWSKI ET AL. 2006A, S. 173 f.). Diese Bemühungen waren anfangs jedoch nicht automatisch von Erfolg gekrönt, da sie oftmals als Rationalisierungsprojekte verstanden wurden und keine substantiellen Veränderungen bewirkten. Infolgedessen kamen die Verbesserungsprozesse schnell wieder zum Erliegen und hinterließen demotivierte Mitarbeiter (KORGE & LENTES 2009, S. 570). Diese Erfahrungen machten deutlich, dass die neuen Organisationsmethoden zu einem Gesamtsystem verknüpft werden mussten. Dabei war nicht nur die individuelle Auswahl und Anpassung der *Lean Production* Methoden notwendig, sondern auch eine Abstimmung dieser zur Schaffung eines ganzheitlichen Systems, das ständig zu hinterfragen und weiterzuentwickeln war (LAY & NEUHAUS 2005, S. 33). Aufgrund der Konzentration auf alle Bereiche des Produzierens werden diese Systeme unter dem Terminus *Ganzheitliche Produktionssysteme* geführt (SPATH 2003; DOMBROWSKI ET AL. 2006A, S. 174).

Ursprünglich entwickelt für die durch Fließfertigung geprägte Automobilproduktion, ist die Verbreitung der GPS heutzutage auch in anderen Branchen weit fortgeschritten (vgl. SCHNELLBACH ET AL. 2013, S. 432). Da GPS unternehmensindividuell konzipiert sind, existiert für ihre verschiedenen Elemente eine Vielzahl unterschiedlicher Begrifflichkeiten und Definitionen, was eine Vergleichbarkeit erschwert (HINRICHSSEN 2002, S. 251; DOMBROWSKI ET AL. 2006A, S. 174). Bei genauerem Hinsehen lassen sich jedoch stets deutliche Parallelen zum TPS feststellen (REINHART ET AL. 2003; DOMBROWSKI ET AL. 2006C; KLUGE ET AL. 2009), die sich bei erfolgreicher Einführung vor allem auch in messbaren Erfolgen wie bspw. Umsatzsteigerungen oder Durchlaufzeitverkürzungen widerspiegeln (SPATH 2003; ZÄH & AULL 2006).

### 2.2.3 Fertigungsprozessketten in GPS

In Abschnitt 1.2 fand eine Eingrenzung des Betrachtungsbereichs hinsichtlich des Fertigungsprinzips statt. Betrachtet werden Prozessketten in GPS, die nach dem Prinzip der Fließfertigung gestaltet sind. Fließfertigung wurde von Henry Ford eingeführt und im Toyota Produktionssystem übernommen (FORD & CROWTHER 1926; HOLWEG 2007). Zur allgemeinen Beschreibung dieser Prozessketten in GPS findet in Anlehnung an MÜLLER ET AL. (2009, S. 41) zunächst eine Festlegung verschiedener Strukturebenen statt.

Innerhalb des Fertigungsbereichs wird die obere Ebene durch „die zur Erfüllung der Produktionsaufgabe notwendigen Prozessketten“ (HERRMANN 2010, S. 295) abgebildet. Eine einzelne Prozesskette besteht wiederum aus mindestens zwei Prozessschritten. Der Prozessschritt stellt die mittlere Strukturebene dar. Die untere Ebene besteht aus einem oder mehreren Fertigungsmitteln, die zur Durchführung des eigentlichen Fertigungsvorgangs benötigt werden. Fertigungsmittel gehören zur Kategorie der Betriebsmittel, die nach EVERSHEIM (2002, S. 70) um Mess- und Prüfmittel, Fördermittel sowie Ver- und Entsorgungsanlagen ergänzt werden. Als Erzeuger der Wertschöpfung und zugleich Hauptenergienutzer nehmen Fertigungsmittel jedoch einen besonderen Stellenwert ein und werden als „Mittel zur direkten oder indirekten Form-, Substanz- oder Fertigungszustandsänderung mechanischer bzw. chemisch-physikalischer Art“ beschrieben (EVERSHEIM 2002, S. 70). Abbildung 7 zeigt die Anordnung der drei Strukturebenen einer nach GPS-Prinzipien aufgebauten Fließfertigung.

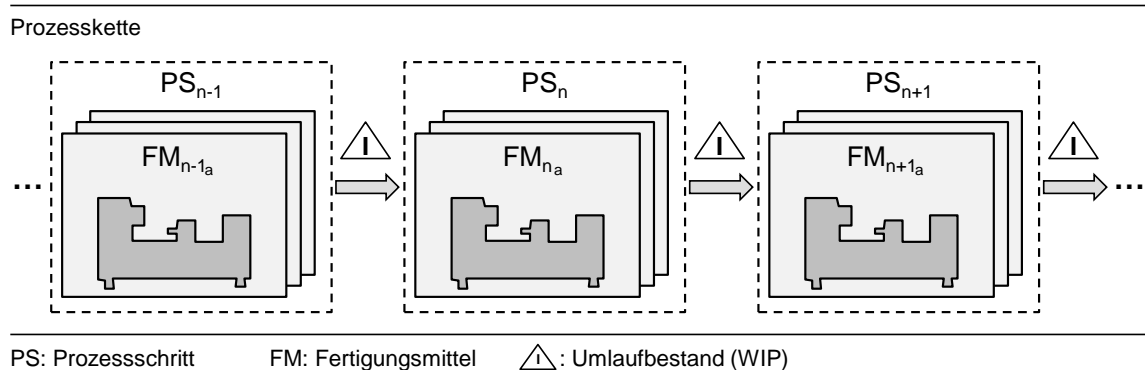


Abbildung 7: Betrachtete Strukturebenen einer Fließfertigung

Mess- und Prüfmittel können im Fall einer direkten Einbindung in die Prozesskette ebenfalls Bestandteil eines Prozessschrittes sein. Fördermittel sind in der Prozess-

kette zwischen den Prozessschritten zu finden und werden energetisch dem nachfolgenden Prozessschritt zugeordnet. Ebenso wie Mess-, Prüf- und Fördermittel tragen auch Ver- und Entsorgungsanlagen nicht direkt zur Wertschöpfung bei. Im Fall einer dezentralen Anordnung werden diese energetisch dem entsprechenden Prozessschritt zugerechnet. Bei zentraler Anordnung muss eine verursachungsgerechte Verteilung erfolgen.

Wie bereits beschrieben, kann ein Prozessschritt aus mehreren Fertigungsmitteln bestehen. Begrenzender Faktor ist dabei die Taktzeit. Sie gibt die Zeitdauer an, die bei Fließfertigung innerhalb eines Prozessschrittes für die Bearbeitung eines Produkts zur Verfügung steht, bevor die Bearbeitung im nachfolgenden Prozessschritt fortgesetzt wird (REFA 1993, S. 179). Im einfachsten Fall findet die Bearbeitung in einem Prozessschritt (während der Taktzeit) nur durch ein Fertigungsmittel statt. Möglich ist jedoch auch eine Bearbeitung durch mehrere, ohne Zwischenpuffer seriell angeordnete Fertigungsmittel oder eine Bearbeitung mehrerer Produkte innerhalb des Prozessschrittes durch parallel angeordnete identische Fertigungsmittel (HEGENSCHEIDT 2003, S. 28). Abbildung 8 zeigt die verschiedenen möglichen Anordnungen der Fertigungsmittel innerhalb eines Prozessschrittes.

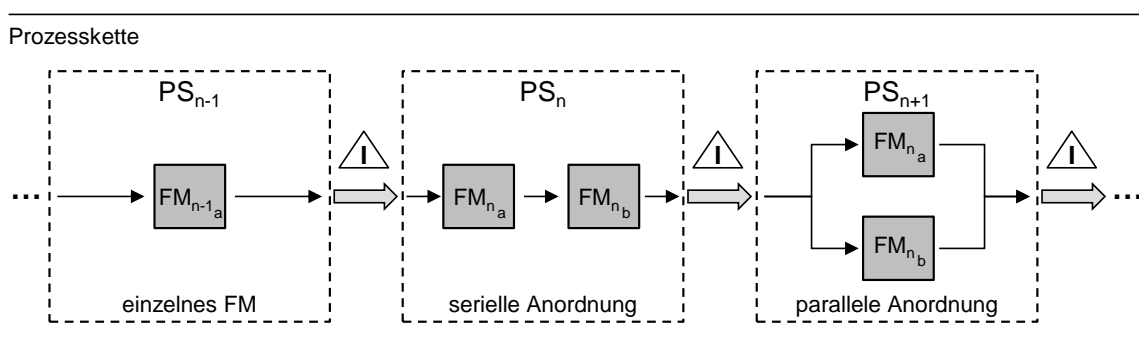


Abbildung 8: Anordnungen der Fertigungsmittel innerhalb eines Prozessschrittes

Wichtige Zielgrößen, die üblicherweise in GPS zur Steuerung der Produktion genutzt werden, sind im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

### 2.2.4 Zieldimensionen und -größen in GPS

Die Leistungsfähigkeit von GPS wird anhand von Zielgrößen gemessen. Zielgrößen sind quantifizierbare Kenngrößen auf Managementebene, die sich zumeist aus weiteren Kenngrößen zusammensetzen und sich entsprechenden Zieldimensionen

der Produktion unterordnen lassen (WEIGERT & ROSE 2011). In der Literatur wird dabei die „*heilige Trinität*“ (ERLACH 2010B, S. 13) aus den Zieldimensionen Qualität, Kosten und Zeit beschrieben (STEVEN 2002, S. 9; SCHLOSKE & THIEME 2009, S. 151; KLETTI & SCHUMACHER 2011, S. 2). Die Verbesserung der Zielgrößenwerte genannter Zieldimensionen wird folglich häufig als Begründung für die Einführung von GPS genannt. In einer von der Dortmunder Initiative zur rechnerintegrierten Fertigung e. V. (RIF) durchgeführten Befragung deutscher Produktionsunternehmen zur Einführung von GPS wurden entsprechend der drei Zieldimensionen die Kostensenkung, die Reduzierung von fehlerhaften Teilen und die Verbesserung der Termintreue als die wichtigsten Einführungsgründe angegeben (vgl. Abbildung 9).

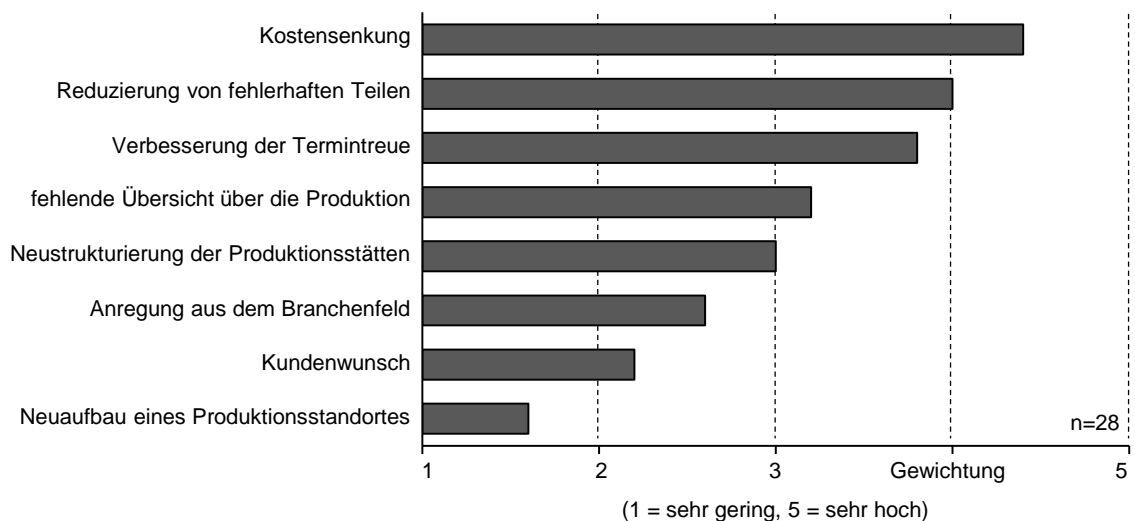


Abbildung 9: Gründe für die Einführung eines Ganzheitlichen Produktionssystems (KESSLER ET AL. 2008, S. 12)

In der Historie der GPS wird beschrieben, dass mit deren Entwicklung und der Abkehr von der Massenproduktion auch die Flexibilität Einzug in die Zieldimensionen erhalten hat. Sie lässt sich z. B. an der angebotenen Produktvielfalt oder der Fähigkeit, flexibel auf die Kundennachfrage zu reagieren, bemessen (ERLACH 2010B, S. 13, GEORGOULIAS ET AL. 2009, S. 888). So beschreiben sowohl SUH ET AL. (1998, S. 249) als auch HON (2005) die *Flexibilität* als wichtige Zieldimension zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von GPS.

Außerdem fällt die Zieldimension der Kosten heutzutage unter den Terminus *Wirtschaftlichkeit* und wird um weitere Zielgrößen wie z. B. die Maschinenauslastung und die Mitarbeiterproduktivität ergänzt. Die Zieldimension der Zeit

wird durch den Begriff *Geschwindigkeit* ersetzt, der den angestrebten Verbesserungscharakter zum Ausdruck bringt (ERLACH 2010B, S. 14). Durch diese Weiterentwicklung entsteht eine Adaption der Zieldimensionen in GPS (vgl. Abbildung 10).

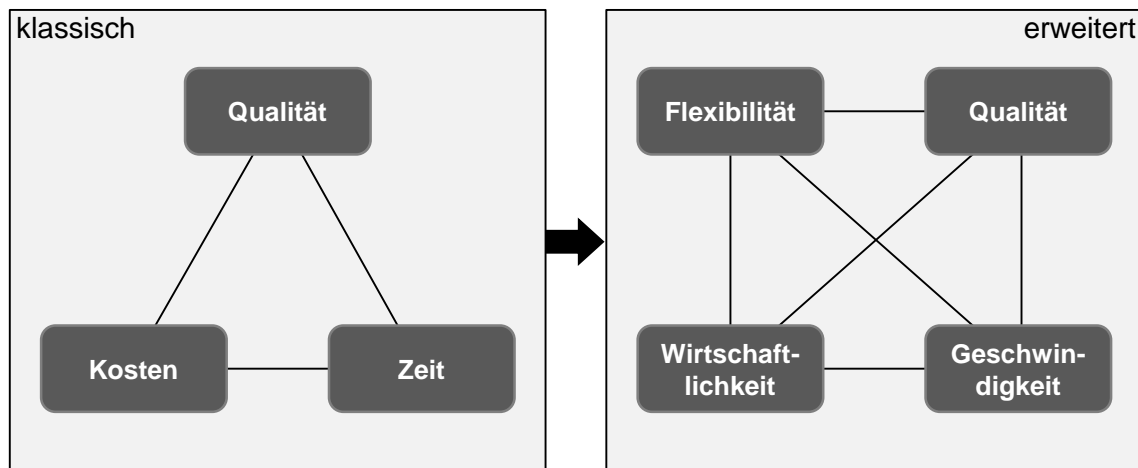


Abbildung 10: Adaption der Zieldimensionen in Ganzheitlichen Produktionssystemen (in Anlehnung an ERLACH 2010B, S. 26)

Die Verbesserung der Zielgrößen unterschiedlicher Dimensionen kann aufgrund von Zielkonflikten zur Verschlechterung anderer Zielgrößen führen (auch als *Dilemma der Produktion* bekannt) (vgl. GUTENBERG 1951, WIENDAHL 1997). Durch den bereits beschriebenen Schmetterlingseffekt können sich schon kleine Veränderungen in der Produktion unterschiedlich auf verschiedene Zielgrößen auswirken (KLETTI & SCHUMACHER 2011, S. 10). Da derartige Veränderungen durch Energieeffizienz-Maßnahmen in der zu entwickelnden Vorgehensweise prognostiziert werden sollen (vgl. Abschnitt 1.3), ist es notwendig, Zielgrößen zur Bewertung der betrachteten GPS festzulegen. Anhand der Zielgrößenwerte vor und nach Umsetzung einer Maßnahme wird eine Quantifizierung der Veränderungen ermöglicht. Für jede Zieldimension werden in der Literatur unterschiedliche Zielgrößen vorgeschlagen (vgl. ERLACH 2010B, S. 15). Da zunächst jede Zieldimension eine identische Wertigkeit im GPS hat, ist es sinnvoll, für jede Zieldimension jeweils eine repräsentative Zielgröße auszuwählen, anhand derer eine Bewertung von Veränderungen erfolgen kann. Nachfolgend werden wichtige Zielgrößen der vier Zieldimensionen vorgestellt.

### Flexibilität

Nach WADHWA (2012, S. 44) bzw. ERLACH (2010B, S. 14) beschreibt die Flexibilität einer Produktion die Fähigkeit, kurzfristige Schwankungen der Marktnachfrage zu bedienen. GEORGOULIAS ET AL. (2009, S. 889) differenzieren verschiedene Flexibilitätstypen und beschreiben deren Relevanz auf vier unterschiedlichen Produktionshierarchieebenen. Der Hauptfokus liegt dabei auf der Produkt-, der Volumen- und der operativen Flexibilität, die wie folgt definiert sind:

- *Produkt-Flexibilität* befähigt ein Produktionssystem dazu, unterschiedliche Teile oder Produkte mit demselben Equipment herzustellen, wodurch ein schneller Produktwechsel mit kurzen Rüstzeiten möglich ist.
- *Volumen-Flexibilität* erlaubt es einem Produktionssystem das Produktionsvolumen zu variieren, um auf Nachfrageschwankungen reagieren zu können.
- *Operative Flexibilität* beschreibt die Fähigkeit, verschiedene Produkte mit verschiedenen Fertigungsmitteln herstellen zu können, um Engpässe zu vermeiden.

Eine GPS-Zielgröße, die alle drei oben genannten Flexibilitätstypen vereint ist der *Every-Part-Every-Interval-Wert* (EPEI-Wert), der im Kontext der Produktionsnivellierung entwickelt wurde (PETER 2009, S. 69). Zur Berechnung des EPEI-Wertes sind Kenngrößen wie die Rüstdauer, die Anzahl der Varianten sowie die Anzahl der Fertigungsmittel notwendig. Die Zielgröße ist daher besonders gut zur Bewertung der Zieldimension Flexibilität geeignet. Der EPEI-Wert „entspricht dem Zeitraum, der benötigt wird, um die Rüstfolge über alle Varianten einmal komplett zu durchlaufen“ (ERLACH 2010B, S. 72). Je kleiner dieser Zeitraum ist, desto schneller kann auf Nachfrageschwankungen reagiert werden. Auf Prozessschritzebene wird der Wert wie folgt berechnet (vgl. ERLACH 2010B, S. 73):

$$\text{EPEI} = \frac{\#Var \cdot (\text{LOS} \cdot \text{ZZ} + \text{RD})}{\#FM \cdot \text{TV}} = \frac{\text{MIX} \cdot \text{ZZ} + \#Var \cdot \text{RD}}{\#FM \cdot \text{TV}} \quad (2-6)$$

mit

#Var:	Anzahl der Varianten
LOS:	Losgröße [Stk]
ZZ:	Zykluszeit pro Stück [ZE/Stk]
RD:	Rüstdauer pro Rüstvorgang [ZE]
#FM:	Anzahl identischer Fertigungsmittel
TV:	Technische Verfügbarkeit [%]
MIX:	Produktmix [Stk]

Die erste Berechnung in Gleichung (2-6) gilt, wenn alle Varianten in derselben Losgröße gefertigt werden. Ist dies nicht der Fall, so muss der Produktmix berücksichtigt werden. Er gibt die Anzahl an Teilen an die nötig sind, um die Lose aller Varianten nacheinander einmal zu fertigen<sup>2</sup>.

Der EPEI-Wert kann mit der obigen Formel für jeden Prozessschritt einzeln berechnet werden. Für die sich aus den Prozessschritten bildende Prozesskette muss jedoch der EPEI-Wert des Prozessschrittes angesetzt werden, der den höchsten Wert und somit die geringste Flexibilität aufweist (TÖPFER 2009, S. 155; KLETTI & SCHUMACHER 2011, S. 94).

### **Wirtschaftlichkeit**

Laut ERLACH (2010B, S. 15) beschreibt die Wirtschaftlichkeit einer Produktion den effizienten Einsatz ihrer Produktionsfaktoren. Von Relevanz sind dabei vor allem die Mitarbeiterproduktivität, die Maschinenauslastung und die Materialausnutzung. Da die Kosten lediglich eine Ableitung dieser Faktoren in monetären Größen darstellen sind sie unter dem Wirtschaftlichkeitsbegriff berücksichtigt und werden an dieser Stelle nicht gesondert aufgeführt (vgl. PETER 2009, S. 68).

Aus der energetischen Perspektive ist die Mitarbeiterproduktivität zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit nicht geeignet, da Maßnahmen zur Reduzierung von Energieverschwendung einen technischen Ansatz verfolgen und vorwiegend in energieintensiven automatisierten Prozessschritten angewandt werden (vgl. Abschnitt 2.1.5). Der Grad der Materialausnutzung wird maßgeblich während der Entwicklungsphase eines Produktes festgelegt und ist während der Betriebsphase nur begrenzt veränderbar (BLAESER-BENFER 2012).

Zur Repräsentation der Zieldimension Wirtschaftlichkeit eignet sich folglich besonders die Maschinenauslastung. Im Sinne von Effizienz und Effektivität sollte eine Kenngröße zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit dabei nicht ausschließlich messen, ob eine Maschine bzw. Anlage möglichst häufig, sondern auch zur richtigen Zeit, d. h. wenn sie für die Produktion benötigt wird, ausgelastet ist. Eine Kenngröße, die diese Kriterien erfüllt, ist die *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) (HARTMANN 2007, S. 61). Sie ist vor allem in der Automobilproduktion weit verbreitet (KROPIK 2009, S. 147) und wird häufig als Maß für die Wirtschaftlichkeit der Produktion genutzt (MAY & KOCH 2008).

---

<sup>2</sup> Bei drei Varianten und den jeweiligen Losgrößen 6 Stk, 2 Stk und 1 Stk beträgt der Produktmix bspw. 9 Stk.



Die Kenngröße OEE (deutsch: *Gesamtanlageneffektivität*) setzt sich aus Verfügbarkeits-, Leistungs- und Qualitätsparametern zusammen, die es zu maximieren gilt. Daraus ergibt sich die folgende Gleichung zur Berechnung des OEE-Wertes (HARTMANN 2007, S. 62):

$$OEE = \text{Anlagenverfügbarkeit} \cdot \text{Leistungsgrad} \cdot \text{Qualitätsgrad} \quad (2-7)$$

Die drei in die Gleichung eingehenden Kennwerte wiederum basieren auf der schrittweisen Subtraktion von Unterbrechungszeiten von der geplanten Laufzeit einer Anlage und den Verhältnissen der daraus abgeleiteten Prozesszeiten. Die Unterbrechungszeiten werden durch sechs Verlustarten verursacht (Abbildung 11).

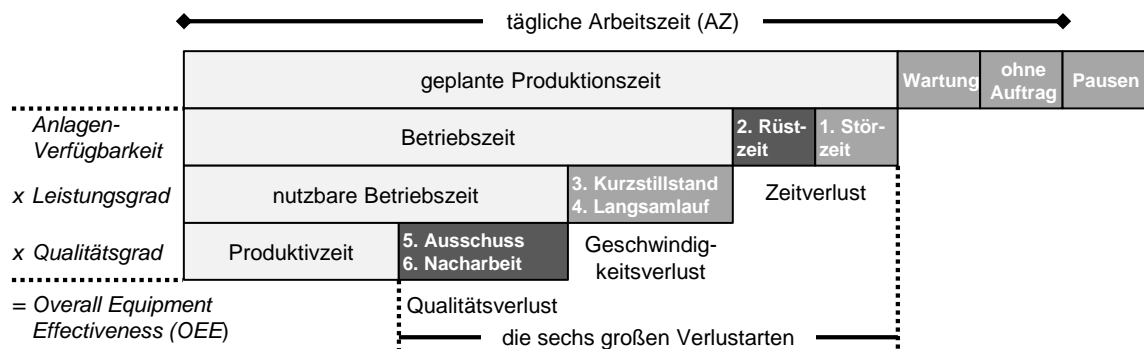


Abbildung 11: Aufbau der Kenngröße OEE (in Anlehnung an ERLACH 2010B, S. 71)

Ausgangspunkt für die Berechnung der Anlagenverfügbarkeit AV ist die *geplante Produktionszeit* einer Maschine oder Anlage, die sich aus der täglichen Produktionslaufzeit abzüglich der Pausen, Wartungszeiten und Zeiten ohne Produktionsauftrag ergibt. Diesem Wert wird die *Betriebszeit* gegenüber gestellt, die aus einer Subtraktion der beiden Zeitverluste Rüstzeiten und Störzeiten von der geplanten Produktionszeit hervorgeht (HARTMANN 2007, S. 69):

$$\text{Anlagenverfügbarkeit AV} = \frac{\text{Betriebszeit}}{\text{geplante Produktionszeit}} \quad (2-8)$$

Zeitverluste können im Falle von technischen Störungen, fehlendem Material oder Bedienpersonal unvorhergesehen auftreten. In Form von Rüst- und Anlaufvorgängen können sie jedoch auch beabsichtigt sein (ERLACH 2010B, S. 71).

Der Leistungsgrad LG einer Maschine oder Anlage berechnet sich aus dem Quotienten aus der *nutzbaren Betriebszeit* und der *Betriebszeit*. Die *nutzbare Betriebszeit* ergibt sich durch die Subtraktion der Geschwindigkeitsverluste von der *Betriebszeit* (HARTMANN 2007, S. 69):

$$\text{Leistungsgrad LG} = \frac{\text{nutzbare Betriebszeit}}{\text{Betriebszeit}} \quad (2-9)$$

Geschwindigkeitsverluste treten in Form von Kurzstillständen oder einem Langsamlauf der Maschinen oder Anlagen auf. Dabei handelt es sich um geringfügige Störungen, die vom Bedienpersonal häufig nicht dokumentiert werden, jedoch in der Summe gewichtig sein können (ERLACH 2010B, S. 72; SCHENK 2010, S. 83).

Die wertschöpfende *Produktivzeit* ergibt sich schließlich nach Abzug der beiden Qualitätsverluste von der *nutzbaren Betriebszeit*. Die Qualitätsverluste beschreiben die Zeit, die für die Produktion von fehlerhaften Teilen genutzt wurde. Die Teile müssen entweder nachgearbeitet oder als Ausschuss deklariert werden. Der Qualitätsgrad QG berechnet sich aus der Division der *Produktivzeit* durch die *nutzbare Betriebszeit* (HARTMANN 2007, S. 69).

$$\text{Qualitätsgrad QG} = \frac{\text{Produktivzeit}}{\text{nutzbare Betriebszeit}} \quad (2-10)$$

Als Verhältniskenngröße bewegen sich die OEE-Werte theoretisch zwischen 0 % und 100 %. In der Literatur wird ein Wert von 85 % übereinstimmend als Spitzenwert genannt, der in der Praxis schwer erreichbar ist. Typische Werte liegen zwischen 65 % und 85 % (KROPIK 2009, S. 150; SCHENK 2010, S. 85).

### Qualität

Der Begriff *Qualität* hat seinen Ursprung im lateinischen Wort *qualitas*, welches mit „Beschaffenheit“ oder „Eigenschaft“ übersetzt wird (BROCKHAUS 2014). In der produzierenden Industrie wird Qualität allgemein als „Grad [beschrieben], in dem ein Satz inhärenter Merkmale [...] Anforderungen [...] erfüllt“<sup>3</sup> (DIN EN ISO 9000, S. 18). HOPP & SPEARMAN (2001, S. 383) zeigen die Vielschichtigkeit des Begriffs durch die Differenzierung verschiedener Definitionen auf und unterteilen diese in die Perspektiven *produktorientierte* und *prozessorientierte* Qualität. Die Forderung einer *produktorientierten Qualität* folgt der Perspektive, dass Qualität

---

<sup>3</sup> „inhärent“ kann in diesem Kontext mit „einer Einheit innewohnend“ im Sinne von „ständig“ übersetzt werden (DIN EN ISO 9000, S. 18).

schließlich kundengetrieben sein muss. Da der Kunde nur das finale Produkt erwirbt, ohne den Herstellungsprozess zu kennen, beurteilt er es nach dessen Eigenschaften und nach seiner Langlebigkeit bzw. Haltbarkeit. Das Produktergebnis hängt jedoch maßgeblich von der für den Kunden nicht sichtbaren *prozessorientierten Qualität* ab, die z. B. durch das festgelegte Design des Produkts und die Robustheit der Produktionsprozesse beeinflusst wird.

Grundsätzlich hat sich in der produzierenden Industrie die Sichtweise etabliert, „dass Qualität durch die Anforderung des Kunden definiert wird und nicht *erprüft* werden kann, sondern vielmehr produziert werden muss“ (BRAUN 1996, S. 17). Da in GPS die während der Entwicklungsphase definierten Produktmerkmale nur bedingt beeinflusst werden können, liegt die Konzentration hier auf der prozessorientierten Qualität. Zur Messung dieser wird die Zielgröße *Qualitätsgrad* herangezogen, die ein Bestandteil der Berechnung des OEE-Wertes ist und bereits als Verhältnis aus der *Produktivzeit* und der *nutzbaren Betriebszeit* beschrieben wurde.

### **Geschwindigkeit**

Die Zieldimension Geschwindigkeit beschreibt die Eigenschaft eines Produktionssystems, ein bestelltes Produkt schnellstmöglich fertigzustellen und an den Kunden auszuliefern (ERLACH 2010B, S. 14). Die ausschließliche Fertigung auf Basis realer Kundenaufträge ist dabei ein wichtiges Prinzip der GPS (AULL 2013, S. 113). Eine auf den Kunden ausgerichtete Produktion folgt dem sog. Kundentakt KT, welcher die durchschnittliche Zeit angibt, in der ein Produkt theoretisch fertigzustellen ist (KLETTI & SCHUMACHER 2011, S. 65):

$$\text{Kundentakt KT} = \frac{\text{tägliche Arbeitszeit AZ}}{\text{Tagesbedarf TB}} \text{ z. B. in } \frac{[\text{min}]}{[\text{Stk}]} \quad (2-11)$$

Eine in GPS weit verbreitete Zielgröße zur Bewertung der Geschwindigkeit ist die *Durchlaufzeit* (DLZ) der Produktion. Sie kann beschrieben werden als die Zeitdauer, die ein Produkt benötigt, um vom Wareneingang bis zum Warenausgang der Produktionsprozesskette zu gelangen. Dabei durchläuft das Produkt alle nötigen Prozessschritte mit den entsprechenden Bearbeitungszeiten sowie alle Bestände zwischen den Prozessschritten (ERLACH 2010B, S. 102 f.).

Die für die Automobilproduktion charakteristische Fließfertigung ist mit einer Warteschlange vergleichbar, durch die die Produkte vom Beginn bis zum Ende befördert werden. In der Warteschlangentheorie stellt das Gesetz von LITTLE (1961)

folgenden Zusammenhang zwischen den Umlaufbeständen in der Fertigung (auch als *Work in Process* (WIP) bezeichnet), dem technischen Durchsatz und der Durchlaufzeit her (vgl. HOPP & SPEARMAN 2001, S. 223):

$$WIP = \lambda_{\text{Tech}} \cdot DLZ \quad (2-12)$$

mit

WIP: Work in Process bzw. Umlaufbestand [Stk]

$\lambda_{\text{Tech}}$ : technischer Durchsatz [Stk/ZE]

DLZ: Durchlaufzeit [ZE]

Bei genauer Betrachtung wird deutlich, dass bei einer nach dem Kundenbedarf ausgerichteten Fertigung der technische Durchsatz dem reziproken Wert des Kundentakts  $KT$  entspricht. Die einzelnen Prozessschrittdurchlaufzeiten berechnen sich demnach durch das Produkt aus Kundentakt und  $WIP_n$  des Prozessschrittes  $n$ , der als Umlaufbestand vor und im Prozessschritt befindlicher Produkte festgelegt wird. Aus der Summe der Prozessschrittdurchlaufzeiten ergibt sich schließlich die Durchlaufzeit der gesamten Prozesskette als (ERLACH 2010B, S. 103 f.):

$$DLZ = \sum_{n=1}^z WIP_n \cdot KT = WIP_{\text{gesamt}} \cdot KT \quad (2-13)$$

Die vorgestellten Zielgrößen EPEI-Wert, OEE-Wert, Qualitätsgrad und Durchlaufzeit eignen sich besonders gut zur Bewertung der vier Zieldimensionen in GPS. Zur standardisierten Aufnahme dieser Zielgrößen bietet das Methodenrepertoire von GPS das *Wertstromdesign* an. Dessen Aufbau und Anwendung wird im folgenden Abschnitt erläutert.

### 2.2.5 Wertstromdesign

Hinter dem Begriff „Wertstromdesign“ verbirgt sich eine Methode zur kompakten Darstellung und kontinuierlichen Verbesserung von Material- und Informationsflüssen in der Produktion. Sie wurde ursprünglich von ROTHER & SHOOK (2000) vorgestellt und dient insbesondere dazu, wertschöpfende Prozesse und Verschwendung im Sinne der GPS transparent zu machen. Die während der Ist-Analyse identifizierten Verschwendungen werden systematisch nach den Prinzipien der GPS verbessert. Entscheidender Faktor ist dabei eine konsequente Ausrichtung auf den Kundenbedarf (vgl. SIHN & PFEFFER 2013).

ROTHER & SHOOK (2000, S. 3) definieren den Begriff Wertstrom als „alle Aktivitäten (sowohl wertschöpfend als auch nicht-wertschöpfend), die notwendig sind, um ein Produkt durch die Hauptflüsse zu bringen, die für jedes Produkt entscheidend sind“. Die Methode Wertstromdesign ist für die Untersuchung einer Fließfertigung geeignet und findet weite Verbreitung unter produzierenden Unternehmen, die ein GPS eingeführt haben (HÄMMERLE & RALLY 2010, S. 37 ff.). Die Methode wird in vier Phasen untergliedert. Zunächst erfolgt eine Auswahl der Produktfamilien, die hinsichtlich des Wertstroms untersucht werden sollen. Anschließend wird der Ist-Zustand des Wertstroms gezeichnet. Diese Phase ist die eigentliche *Wertstromanalyse*. Sie erzeugt Transparenz und deckt Verbesserungspotenziale auf, die bei der Zeichnung des Soll-Wertstroms – das eigentliche *Wertstromdesign* – berücksichtigt werden. Nach der Darstellung des Sollzustands erfolgt eine Umsetzung von Maßnahmen zur Erreichung des Soll-Zustands (Abbildung 12). Die beidseitig gerichteten Pfeile zwischen den Phasen drücken eine Überlappung der Aktivitäten aus. So können z. B. während des Zeichnens des Ist-Zustands bereits Ideen für die Gestaltung des Soll-Zustands entstehen. Während der Phase der Umsetzung kann eine Verfeinerung des Soll-Zustands sinnvoll sein (ROTHER & SHOOK 2000, S. 9). Nachfolgend werden die vier Phasen beschrieben.

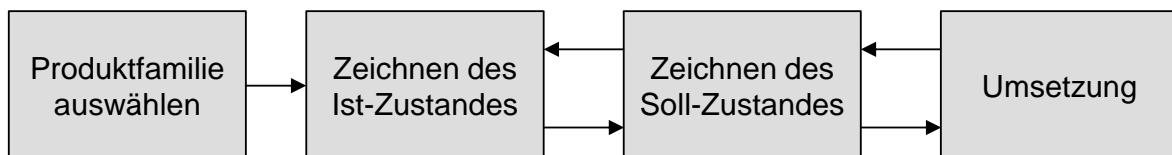


Abbildung 12: Vorgehensweise des Wertstromdesigns (in Anlehnung an HÄMMERLE & RALLY 2010, S. 15)

### Produktfamilie auswählen

Der erste Schritt des Wertstromdesigns ist das Unterteilen des zu untersuchenden Produktspektrums des Produktionssystems nach Ähnlichkeitskriterien. Ergebnis dieser Unterteilung sind Produktfamilien. Diese bestehen aus Produktvarianten, die gleiche oder ähnliche Prozessketten durchlaufen. Eine Produktfamilie muss jedoch nicht zwangsläufig vom Wareneingang der Fabrik bis zum Kunden betrachtet werden. Stattdessen kann sie als Segment verstanden werden, das geschickt aus dem Produktionssystem separiert und individuell betrachtet wird. Für jede Produktfamilie muss ein eigenes Wertstromdesign durchgeführt werden (ROTHER & SHOOK 2000, S. 6; ERLACH 2010B, S. 38). Nach Auswahl der Produktfamilien erfolgt eine Kundenbedarfsanalyse mit der Berechnung des variantenbezogenen Kundentakts.

Dazu ist auch eine Untersuchung der Rahmenbedingungen der betrachteten Prozesskette durchzuführen, um wichtige Kenngrößen wie die Anzahl der Fabrikstage (#FT), die tägliche Arbeitszeit oder Pausenzeiten zu ermitteln (ERLACH 2010B, S. 48). Der Kunde muss nicht zwangsläufig der Endkunde des Unternehmens sein. Stattdessen handelt es sich häufig um den internen Kunden der nachfolgenden Prozesskette (KLEVERS 2009, S. 39).

### **Zeichnen des Ist-Zustandes**

Nach der Auswahl einer Produktfamilie wird der Ist-Zustand des Wertstroms nach einem standardisierten Schema idealerweise auf einem Blatt Papier im DIN A3 Format skizziert (ROTHER & SHOOK 2000, S. 14). Zunächst werden die zuvor ermittelten Kundendaten und Rahmenbedingungen der Produktion in einem Datenkasten gesammelt und im rechten oberen Bereich der Skizze positioniert. Anschließend werden alle Prozessschritte der betrachteten Prozesskette im mittleren Bereich des Papiers aufgezeichnet. Zur Bewahrung der Kundenperspektive erfolgt die Aufnahme rückwärtig beginnend beim letzten Prozessschritt vor Übergabe an den Kunden und endet beim ersten Prozessschritt, der häufig dem Wareneingang entspricht (ERLACH 2010B, S. 55). Für jeden Prozessschritt werden anschließend wichtige Produktionsdaten erfasst und in den Datenkasten des Prozessschrittes eingetragen. Abgesehen von einigen Daten, wie bspw. der Zykluszeit (ZZ), die im weiteren Verlauf benötigt wird, lässt die Fachliteratur dem Anwender der Methode viele Freiheiten zur Auswahl aufzunehmender Daten (vgl. ERLACH 2010B, S. 63).

Nach der Betrachtung der Produktionsdaten wird eine Aufnahme des WIP durchgeführt und zwischen den Prozessschritten unter einem *Warndreieck* dokumentiert (ROTHER & SHOOK 2000, S. 18). Anschließend werden der Materialfluss zwischen den Prozessschritten mit Hilfe von unterschiedlichen Pfeilen beschrieben und im linken oberen Bereich der Skizze ein Lieferantensymbol eingezeichnet. Zum Zwecke des Verständnisses der Produktionssteuerung folgt nun die Beschreibung des Informationsflusses im oberen mittigen Bereich (KLEVERS 2009, S. 55).

Komplettiert wird der Wertstrom schließlich durch eine oszillierende Linie im unteren Bereich, auf welcher die bearbeitenden Zeiten je Stück ( $bZ_{\text{Stk}}$ ) und die DLZ der Prozessschritte eingetragen werden. Beide Werte summiert der Anwender schließlich für die Prozesskette (KLEVERS 2009, S. 59). Mit Hilfe von sog. *Kaizen-Blitzen* können nun Verschwendungen im Ist-Zustand markiert werden (ERLACH 2010B, S. 262). In Abbildung 13 ist ein Beispiel eines Ist-Wertstroms zu sehen.

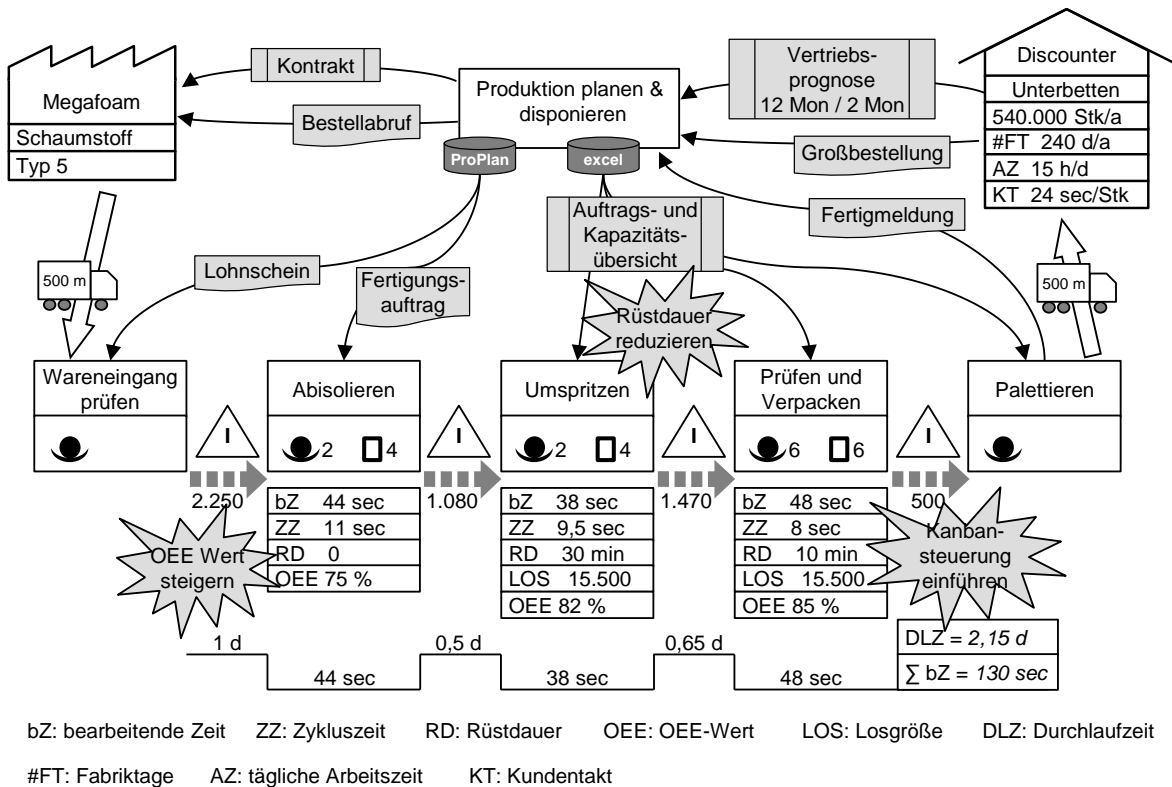


Abbildung 13: Beispiel für die Aufnahme des Ist-Wertstroms inkl. Kaizen-Blitze (in Anlehnung an ERLACH 2010B, S. 313)

### Zeichnen des Soll-Zustandes

Die Gestaltung des Wertstroms nach der Umsetzung von Maßnahmen zur Reduzierung der zuvor erkannten Verschwendung ist das Ziel der Zeichnung des Soll-Zustands. Wichtige Prinzipien von GPS wie z. B. *Just-in-Time* werden dabei berücksichtigt. Im Sinne des KVP-Gedankens stellt der gezeichnete Soll-Zustand nicht das Optimum dar, sondern ist ein erster Schritt der kontinuierlichen Verbesserung (HÄMMERLE & RALLY 2010, S. 20).

### Umsetzung

Nach den Zeichnungen von Ist- und Soll-Zustand kann mit der Umsetzung der Maßnahmen begonnen werden, um den Soll-Zustand zu erreichen. Dazu wird der Wertstrom der Prozesskette in verschiedene Abschnitte unterteilt, die nacheinander schrittweise abgearbeitet werden müssen (ERLACH 2010B, S. 261 f.).

### 2.2.6 Erweiterung des GPS-Gedankens um den Aspekt Energie

Eine Verknüpfung der Themen GPS und Energieverschwendung ist naheliegend und wurde in der Literatur bereits mehrfach diskutiert. So erwähnt OELTJENBRUNS

(2000, S. 34) bspw. die Energie als mögliche achte Verschwendungsart des TPS. Auch GOTTMANN (2009, S. 32) weist auf eine nötige Weiterentwicklung der GPS um Energieaspekte hin. Laut der Studie „Energieverschwendung und schlanke Produktion“ beschäftigten sich 77 % der Befragten bereits mit dieser Thematik (SCHNELLBACH ET AL. 2013, S. 432)<sup>4</sup>.

In der Praxis spiegelt sich die geforderte Weiterentwicklung vor allem in der Integration von Energiewerten in die Methode des Wertstromdesigns wider (siehe u. a. BRÜGGEMANN & MÜLLER 2009; REINHART ET AL. 2010; BOGDANSKI ET AL. 2013; POSSELT ET AL. 2014). Dieser Ansatz wird häufig als *Energiewertstrom* bezeichnet, um die Fokussierung auf Energiewerte herauszustellen. Tatsächlich steht bei allen Autoren jedoch weiterhin der Wertstrom der Produktionsprozesskette im Fokus, der lediglich um Energiedaten erweitert wird.

Die Gemeinsamkeit der bestehenden Energiewertstrom-Ansätze besteht in der Aufnahme von Energiedaten für die einzelnen Prozessschritte des Wertstroms. Während der Dokumentation des Ist-Zustands existieren Unterschiede z. B. in Form von verschiedenen Systemgrenzen, in der Detailtiefe der Aufnahmen, in der Auswahl der betrachteten Energiearten und in der Verwendung von Kenngrößen. Die unterschiedlichen Ansätze werden in Abschnitt 3.2.1 näher untersucht. Abbildung 14 zeigt die Darstellung eines Ist-Energiewertstroms.

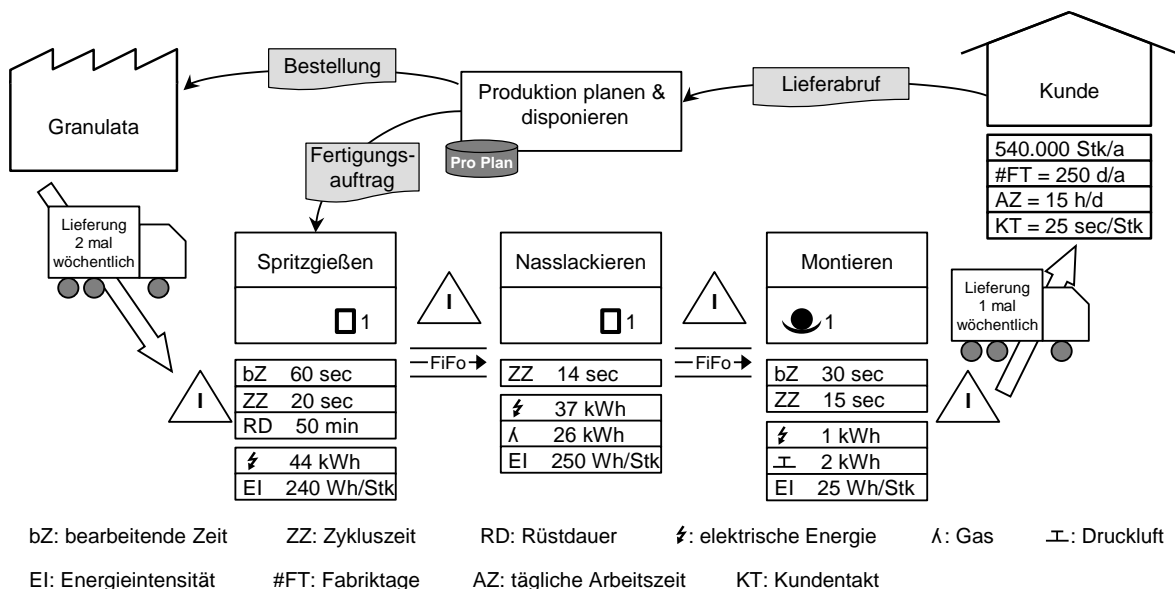


Abbildung 14: Beispielhafte Darstellung eines Ist-Energiewertstrom (in Anlehnung an ERLACH 2010A)

<sup>4</sup> Zielgruppe der Befragung waren GPS- und Energieexperten deutscher Automobilhersteller.



Auffällig ist die für bestehende Ansätze fehlende Zeichnung eines Soll-Zustands. Ein Grund dafür ist, dass Materialflüsse in der Wertstromzeichnung einfacher dargestellt werden können als Energieflüsse. Daher verzichten die Autoren nach der Ist-Darstellung auf einen Soll-Wertstrom und geben stattdessen Richtlinien und Leitfäden vor, um die ermittelte Energieverschwendung kontinuierlich zu reduzieren (vgl. ERLACH & WESTKÄMPER 2009; REINHART ET AL. 2011A).

## 2.3 Systemtheorie und System Dynamics

### 2.3.1 Allgemeines

Ein GPS beinhaltet den Begriff „System“. Es kann als solches verstanden werden und unterliegt folglich den Grundsätzen der Systemtheorie. Diese werden in Abschnitt 2.3.2 vermittelt. Daran anschließend wird in Abschnitt 2.3.3 die Systemstruktur eines GPS beschrieben. Zur Modellierung von GPS folgt in Abschnitt 2.3.4 die Erläuterung der Methode *System Dynamics*.

### 2.3.2 Grundsätze der Systemtheorie

Ein System kann laut HALL & FANGEN (1956, S. 18) als „eine Ansammlung von Elementen und deren Eigenschaften, die durch Wirkbeziehungen miteinander verbunden sind“, verstanden werden. Interaktionen innerhalb der Systeme erfolgen durch Material-, Informations- und Energieflüsse (PATZAK 1982, S. 19). Ein wichtiges Kriterium der Systembildung ist ihr angestrebter Zweck, der abhängig vom Systembeobachter ist (GOMEZ 1981, S. 42). Je nach Art der Beziehungen eines Systems zu seiner Umwelt kann von einem (teil-)offenen, bzw. geschlossenen System gesprochen werden. Geschlossene Systeme weisen dabei gegenüber (teil-)offenen Systemen keine Interaktionen zu anderen (Teil-)Systemen auf und gehen langfristig in einen zeitunabhängigen Zustand über. Dieser Zustand wird angesichts ihrer zeitlichen Veränderung bzw. Dynamik von offenen und teil-offenen Systemen nicht erreicht (PATZAK 1982, S. 20). Stattdessen ist die zeitabhängige Veränderlichkeit der Systemstruktur für die Interpretation des Systemverhaltens notwendig (FORRESTER 1972, S. 87 ff.). Offene Systeme lassen sich aufgrund der Menge und der Intensität ihrer Wirkbeziehungen von ihrer Umwelt nicht abgrenzen und besitzen daher keine scharfe Systemgrenze (AULL 2013, S. 19). Im Gegensatz dazu weisen teil-offene Systeme definierte Schnittstellen zu ihrer Umwelt auf, durch die eine gegenseitige Interaktion möglich ist (ULRICH & PROBST 1991, S. 33). Jedes

System kann in Subsysteme unterteilt werden und selbst wiederum Bestandteil eines übergeordneten Systems sein. Ist keine weitere Dekomposition eines Subsystems möglich, so wird in der Fachliteratur von einem Element gesprochen (vgl. ULRICH & PROBST 1991, S. 28).

Systeme werden als *dynamisch* bezeichnet, wenn sie einer zeitlichen Veränderung unterliegen. Neben der Dynamik besitzen Systeme eine Komplexität, die nach PATZAK (1982, S. 22 f.) aus der Art und Anzahl der Elemente (Varietät) sowie der Art und Anzahl der Wirkbeziehungen (Konnektivität) resultiert.

### 2.3.3 Systemstruktur eines GPS

GPS beinhalten eine hohe Anzahl an dynamischen Wirkbeziehungen und einen Informationsaustausch zwischen verschiedenartigen Elementen. Entsprechend dieser Eigenschaften können sie, angelehnt an die oben angeführten Definitionen, als komplexe dynamische Systeme verstanden werden (KROPIK 2009, S. 23).

Abbildung 15 zeigt in Anlehnung an ULRICH & PROBST (1991, S. 28) eine mögliche Systemstruktur eines GPS. Innerhalb seiner Systemgrenze weist das GPS eine Vielzahl an Elementen auf, die bspw. Prozessketten in der Produktion repräsentieren und durch Material- und Informationsflüsse interagieren. Durch eine weitere Dekomposition entsteht aus einer Prozesskette wiederum ein Subsystem bestehend aus Prozessschritten.

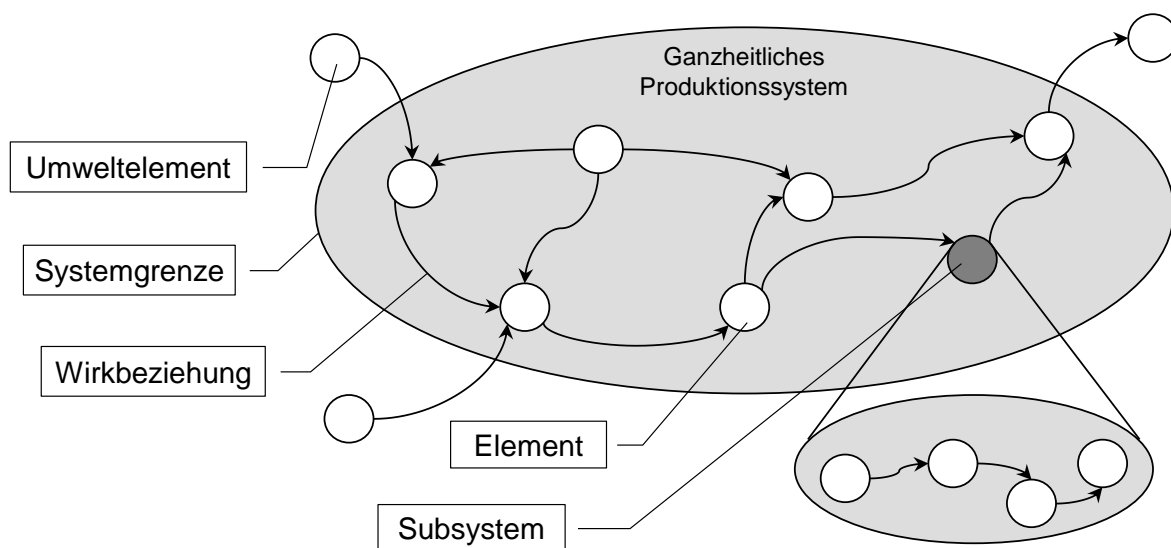


Abbildung 15: Systemstruktur eines GPS (in Anlehnung an ULRICH & PROBST 1991, S. 28; AULL 2013, S. 20)

Außerhalb der Systemgrenze des GPS sind weitere sog. Umweltelemente dargestellt. Diese stehen z. B. für die Interaktion mit der unternehmenseigenen Entwicklungs- oder der Vertriebsabteilung. Aber auch externe Einflüsse wie gesetzliche Vorgaben oder die verschiedenen Märkte des Unternehmens spielen hier eine Rolle (NYHUIS ET AL. 2009).

Generell werden die Dynamik und die Komplexität in GPS verstärkt durch nicht exakt vorhersehbare interne und externe Einflüsse – sog. Unsicherheiten – hervorgerufen (vgl. LI 2007; KREBS 2011). Während externe Unsicherheiten hauptsächlich durch Änderungen der Märkte verursacht werden, entstehen interne Unsicherheiten durch nicht planbare Wartezeiten, die z. B. aus Anlagenstörungen oder der Abwesenheit von Mitarbeitern resultieren (PETER 2009, S. 8).

### 2.3.4 Modellierung von GPS mit Hilfe von System Dynamics

Ein in der Wissenschaft weit verbreiteter Ansatz zur Modellierung und Simulation von komplexen dynamischen Systemen ist *System Dynamics*. Der Ansatz wurde im Jahr 1961 von FORRESTER (1961) veröffentlicht und ist „eine auf Regelkreisstrukturen basierende, integrative und systemorientierte Betrachtungsweise komplexer soziotechnischer Systeme“<sup>5</sup> (PATZAK 1982, S. 357). System Dynamics unterstützt sowohl bei der qualitativen Beschreibung und Untersuchung eines komplexen dynamischen Systems als auch bei der quantitativen Simulationsmodellierung des systemischen Verhaltens (COYLE 1996, S. 9).

In der Anfangszeit der Entwicklung des System-Dynamics-Ansatzes wurden hauptsächlich mathematisch-analytische Methoden wie das lineare Programmieren zur Beschreibung von industriellen Zusammenhängen genutzt (COYLE 1996, S. 1 ff.). Für Systeme, deren Komplexität aufgrund ihres dynamisches Verhaltens intuitiv nicht mehr erfasst werden konnten, stießen diese Methoden jedoch an ihre Grenzen (BRADL 2004, S. 17). Forrester nutzte daher seine Kenntnisse aus der Regelungstechnik, um die Wirkbeziehungen der Systeme mit einem rückkopplungsbasierten Computermodell zu beschreiben. Die Auswertung des systemischen Verhaltens erfolgte computergestützt mit numerischen Verfahren (PATZAK 1982, S. 357 f.). MEADOWS ET AL. (1972) veröffentlichten im Jahr 1972 ein von Forrester mit Hilfe von System Dynamics entwickeltes Weltmodell zur Prognose der Grenzen des Wachstums, das vom Club of Rome in Auftrag gegeben wurde und System Dynamics zum ersten Mal einer breiten Öffentlichkeit präsentierte. Seither wurde

---

<sup>5</sup> Soziotechnische Systeme sind Systeme mit technischen und sozialen Elementen (z. B. Unternehmen) (vgl. KIRSCH 2009, S. 12).

System Dynamics neben der Abbildung von Systemen unterschiedlichster Disziplinen auch mehrfach zur Modellierung von GPS herangezogen (vgl. STERMAN 2000; PETER 2009; AULL 2013).

Ziel von System Dynamics ist nicht in erster Linie die Optimierung eines Systems hinsichtlich definierter Fragestellungen, sondern die Untersuchung des systemischen Verhaltens. Daher ist es möglich, ein vereinfachtes Modell des Systems mit der Konzentration auf die wichtigen Elemente und Wirkbeziehungen zu erstellen, um eine höhere Transparenz zu erreichen. Dabei können z. B. Faktoren mit sehr geringem oder keinem Einfluss auf das Systemverhalten vernachlässigt werden. Zudem ist eine Einschränkung der durch Unsicherheiten erzeugten Variationsbreite von Faktoren auf ein realistisches Maß möglich (STROHHECKER 1998, S. 219; AULL 2013, S. 30).

Tabelle 2 zeigt die von STERMAN (2000, S. 86) vorgeschlagene Abfolge von Phasen zur Anwendung des System-Dynamics-Ansatzes. Weitere in der Literatur vorkommende Vorgehensweisen stimmen mit der hier ausgewählten weitestgehend überein (vgl. FORRESTER 1994, COYLE 1996, S. 11).

*Tabelle 2: Vorgehensweise zur Anwendung des System-Dynamics-Ansatzes (in Anlehnung an STERMAN 2000, S. 86)*

---

<b>Phase</b>	<b>Beschreibung</b>
1.	Problemartikulation (Bestimmung der Systemgrenze)
2.	Qualitative Analyse des Systems (Kausaldiagramm)
3.	Erstellung des System-Dynamics-Modells (Flussdiagramm)
4.	Verifikation und Validierung
5.	Simulationsdurchführung und Bewertung

---

### **Phase 1: Problemartikulation**

In der ersten Phase wird das eigentliche Problem beschrieben, das mit Hilfe von System Dynamics betrachtet werden soll. Dazu ist es notwendig, die Systemgrenze und den zeitlichen Betrachtungsraum festzulegen und die Kernelemente des Systems zu identifizieren (STERMAN 2000, S. 89 ff.).

### **Phase 2: Qualitative Analyse des Systems**

In Phase 2 besteht die Aufgabe darin, die grobe Systemstruktur inklusive der wichtigen Wirkbeziehungen zwischen den Elementen abzubilden. Dazu wird ein

sog. *Kausaldiagramm* modelliert. Zusammenhänge werden zunächst nicht mathematisch, sondern qualitativ beschrieben (COYLE 1996, S. 10). Hauptbestandteil der Kausaldiagramme sind die sog. Rückkopplungsschleifen (*Causal Loops*), welche die Rückwirkung eines Systemelements auf sich selbst beschreiben. Eine solche Rückwirkung kann entweder verstärkende (*Reinforcement Loop*) oder abschwächende Wirkung (*Balancing Loop*) haben (STERMAN 2000, S. 138). Elemente werden durch Pfeile miteinander verbunden, welche die Wirkbeziehung darstellen. Eine mit einem „+“ gekennzeichnete Beziehung hat eine gleichgerichtete Wirkung, während eine mit einem „-“ gekennzeichnete Beziehung ein gegenläufiges Verhalten aufweist (BRADL 2004, S. 18). Abbildung 16 zeigt ein Beispiel eines einfachen Kausaldiagramms, welches die Entwicklung der Produktqualität eines Unternehmens beschreibt.

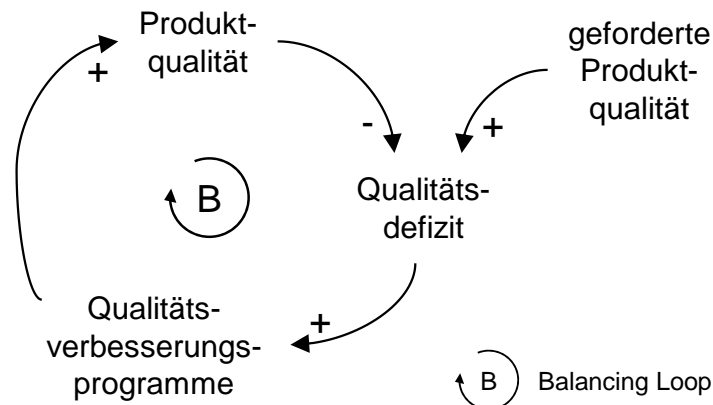


Abbildung 16: Beispiel für ein Kausaldiagramm (in Anlehnung an STERMAN 2000, S. 155)

Je geringer die Produktqualität ausfällt, desto höher ist das Qualitätsdefizit (gegenläufige Wirkung). Je höher das Qualitätsdefizit ist, desto mehr Qualitätsverbesserungsprogramme müssen gestartet werden und desto höher wird die Produktqualität (gleichgerichtete Wirkungen). Zusätzlich wird das Qualitätsdefizit durch die bspw. durch den Kunden geforderte Produktqualität beeinflusst. Der Rückkopplungskreislauf im Beispiel enthält eine ungerade Anzahl an gegenläufigen Wirkungen. Dadurch entsteht ein abschwächender Kreislauf, der im Laufe der Zeit zu einem Gleichgewicht führen kann (*Balancing Loop*). Im Falle einer geraden Anzahl an gegenläufigen Wirkungen entsteht ein verstärkender Kreislauf (*Reinforcement Loop*), der zu keinem Gleichgewichtszustand streben kann (STERMAN 2000, S. 155).

### Phase 3: Erstellung des System-Dynamics-Modells

Aufbauend auf dem Kausaldiagramm wird in dieser Phase ein quantitatives Flussdiagramm erstellt, das als Grundlage zur Gestaltung des Simulationsmodells dient. Zur Erzeugung eines tieferen Systemverständnisses entwickelte FORRESTER (1961) dafür eine spezielle Notation für Flussdiagramme bestehend aus *Bestandsgrößen* (Stocks) und *Flussgrößen* (Flows). Das Verhalten dieser Größen kann sehr einfach mit Hilfe der sog. Hydraulischen Metapher – auch Badewannenmodell genannt – erklärt werden. Bestandsgrößen entsprechen dem Wasservorrat einer Badewanne. Durch Flussgrößen fließt Wasser entweder zu oder ab. Sie verändern somit den Bestand im Laufe der Zeit kontinuierlich (STERMAN 2000, S. 193 f.). Abbildung 17 zeigt das Badewannenmodell und das daraus resultierende Prinzip des Flussdiagramms.

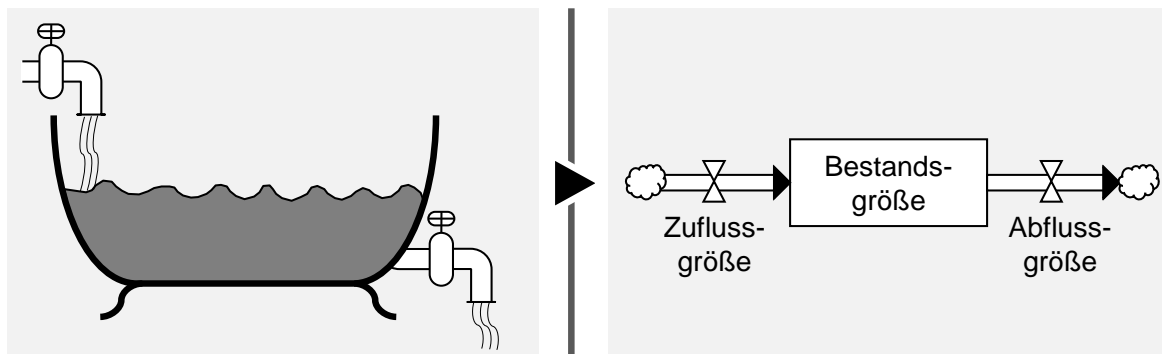


Abbildung 17: Hydraulische Metapher und Prinzip des Flussdiagramms (in Anlehnung an STERMAN 2000, S. 194)

Mathematisch gesehen können die im Flussdiagramm auftretenden Veränderungen mit Hilfe einer integralen Differenzbetrachtung abgebildet werden (STERMAN 2000, S. 194).

$$B(T) = \int_{T_0}^T [\text{Zufluss}(t) - \text{Abfluss}(t)] dt + B(T_0) \quad (2-14)$$

mit

- B(T): Bestandsgröße zum Zeitpunkt T z. B. in [Stk]
- Zufluss(t): Zufluss z. B. in [Stk/ZE]
- Abfluss(t): Abfluss z. B. in [Stk/ZE]
- B(T<sub>0</sub>): Bestandsgröße zum Anfangszeitpunkt T<sub>0</sub> z. B. in [Stk]

Neben Bestands- und Flussgrößen werden weitere Größen zur Beschreibung des Systems im Flussdiagramm verwendet, die auf die Bestand- und Flussgrößen einwirken. *Hilfsgrößen* können durch weitere Größen mathematisch beschrieben werden und tragen zur Übersichtlichkeit des dargestellten Systems bei. *Stellgrößen* können nicht weiter untergliedert werden. Sie sind direkt beeinflussbar und haben unmittelbare Auswirkungen auf das System (PETER 2009, S. 53). Darüber hinaus wird zwischen *endogenen* und *exogenen Größen* unterschieden. Endogene Größen (endogen: „von innen kommend, innerhalb stehend“ (BROCKHAUS 2014)) sind Einflussgrößen, die innerhalb eines Systems vorkommen und nur indirekt beeinflussbar sind (STERMAN 2000, S. 94). Es handelt sich dabei z. B. um technische oder organisatorische Störungen, die zufällig auftreten können und zu Systemstillständen führen. Dem gegenüber stehen exogene Größen (exogen: „von außen kommend, außerhalb entstehend“ (BROCKHAUS 2014)), die von außen Einfluss auf ein System haben, von diesem jedoch nicht beeinflusst werden. Beispiele für exogene Größen in GPS sind marktseitig bestimmte Kundenbedarfe oder gesetzlich geregelte Pausenzeiten während der Produktion. Endogene und exogene Größen sorgen für Unsicherheiten im System.

Während der Modellierung des Flussdiagramms stellt sich unweigerlich die Frage nach der Korrektheit der Übertragung von dynamischen Wirkbeziehungen des qualitativen Kausaldiagramms in mathematische Relationen. Diese sind zur Erstellung des Simulationsmodells notwendig. Fehlende allgemeingültige Regeln zur Ableitung dieser Relationen stellen beim Simulationsaufbau eine große Hürde dar und sind daher ein häufiger Kritikpunkt des System-Dynamics-Ansatzes (SCHÖNEBORN 2004, S. 46). AULL (2013, S. 41) schlägt vor, auf Erfahrungen aus der Modellierung bestehender System-Dynamics-Modelle zurückzugreifen.

### **Phase 4: Verifikation und Validierung**

Simulationsmodelle sind vereinfachende Abbildungen der Realität. Zur Vermeidung von falschen Schlussfolgerungen aufgrund von Inkonsistenzen und Fehlern müssen sie im Rahmen einer Plausibilitätsuntersuchung verifiziert und validiert werden (LAW 2001).

Durch eine *Verifikation* soll nachgewiesen werden, ob ein Simulationsmodell syntaktisch korrekt aufgebaut ist. Häufig bieten Softwarelösungen hierbei Unterstützung durch integrierte Syntaxüberprüfung an (JONDRALE 2013, S. 68). Im Rahmen der *Validierung* wird hingegen überprüft, wie genau das Simulationsmodell das reale System abbildet (PACE 2004, S. 164). Zur Überprüfung der beiden Aspekte wird in der Literatur eine Vielzahl an Verifikations- und Validierungs-

techniken (V & V-Techniken) vorgeschlagen (BALCI 1998, S. 361). SARGENT (2007, S. 124) betont jedoch, dass alle Techniken zwar Fehler im Modell selbst ausschließen können, jedoch keine vollständige Fehlerfreiheit bzgl. der dargestellten Realität gewährleisten. Durch eine Kombination verschiedener Techniken kann die Wahrscheinlichkeit der Fehlerfreiheit jedoch erhöht werden (RABE 2008B, S. 93).

Bei der Auswahl von V & V-Techniken muss beachtet werden, dass bestimmte Techniken in unterschiedlichen Phasen der Simulationserstellung anwendbar sind. Außerdem weist RABE (2008B, S. 113 ff.) darauf hin, dass keine Technik vollständige Objektivität bietet. Dennoch lassen sich verschiedene Subjektivitätsgrade unterscheiden. Abbildung 18 präsentiert verschiedene V & V-Techniken unter Berücksichtigung des Subjektivitätsgrads und der phasenabhängigen Anwendbarkeit.

		Phasenergebnisse des Modellierungsprozesses							
		Zielbeschreibung	Aufgabenspezifikation	Konzeptmodell	Formales Modell	Ausführbares Modell	Simulationsergebnisse	Rohdaten	Aufbereitete Daten
V & V-Techniken									
Grad der Subjektivität	↑ sehr hoch	Schreibtischtest	●	●	●	●	●	●	●
	Strukturiertes Durchgehen	●	●	●	●	●	●	●	●
	Monitoring					●	●		●
	Sensitivitätsanalyse					●	●		●
	Vergleich mit anderen Modellen					●	●		
	Festwerttest				●	●	●		
	Grenzwerttest				●	●	●		
	Ursache-Wirkungs-Graph			●	●	●			
	Validierung von Vorhersagen					●			
	Dimensionstest				●	●	●	●	●
	↓ weniger hoch	Test der internen Validität					●	●	

Abbildung 18: Verwendbarkeit von V & V-Techniken im Verlauf der Simulationsstudie unter Berücksichtigung des Subjektivitätsgrads (in Anlehnung an RABE 2008B, S. 114 ff.)

Zur Beschreibung der einzelnen Techniken sei an dieser Stelle auf BALCI (1998), RABE (2008B) und ROBINSON & BROOKS (2010) verwiesen.



### **Phase 5: Simulationsdurchführung und Bewertung**

Nach einer erfolgreichen Verifikation und Validierung des Simulationsmodells kann dieses in der letzten Phase für die geplanten Simulationsstudien verwendet werden. Je nach Zielstellung kann das Systemverhalten in verschiedenen Szenarien simuliert werden, um beispielsweise Prognosen abzuleiten (STERMAN 2000, S. 86).

## **2.4 Wirtschaftlichkeitsbewertung von Maßnahmen**

### **2.4.1 Allgemeines**

Maßnahmen zur Reduzierung von Energieverschwendung können Investitionen erforderlich machen und sollten durch Wirtschaftlichkeitsbewertungen abgesichert werden (VDI 3922, S. 13). Der Wirtschaftlichkeitsbegriff ist dabei enger gefasst als in den Zieldimensionen der GPS. Es gilt der Grundsatz, dass für ein beliebiges Handeln die günstigste Relation zwischen dem verfolgten Zweck und den einzusetzenden Mitteln anzustreben ist (BMF 2011, S. 2). Erwartete Energieeinsparungen müssen Investitionen gegenübergestellt werden. Die *Investition* beschreibt den finanziellen oder materiellen Aufwand zur Beschaffung von sog. Grundmitteln. Mit Hilfe der Investitionsrechnung erfolgt die Bewertung der Vorteilhaftigkeit von Investitionsvorhaben.<sup>6</sup> Sie stellt die Grundlage für Investitionsentscheidungen dar (JONDRAL 2013, S. 21). Mit Hilfe der Investitionsrechnung können sowohl Einzelinvestitionen als auch Investitionsprogramme bewertet werden (GÖTZE 2008, S. 48). Hinter Maßnahmen zur Reduzierung von Energieverschwendung stehen in der Regel Einzelinvestitionen. Bei dieser Art der Investition wird i. Allg. zwischen eindimensionalen und mehrdimensionalen Verfahren unterschieden (DÄUMLER & GRABE 2007, S. 29). Im folgenden Abschnitt 2.4.2 werden die wichtigsten Verfahren zur eindimensionalen Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung vorgestellt. Für mehrdimensionale Betrachtungen reichen rein monetäre Bewertungen nicht aus. Die dafür notwendige multikriterielle Entscheidungsfindung wird in Abschnitt 2.4.3 erläutert.

### **2.4.2 Eindimensionale Investitionsrechnung**

Nach GÖTZE (2008, S. 49) ist die Prämisse für eindimensionale Investitionsrechnungen, dass neben der monetären Zielgröße keine weiteren existieren. Für Energieeffizienz-Maßnahmen bedeutet dies, dass ihre verursachten Energieein-

---

<sup>6</sup> Die Begriffe *Berechnung* und *Bewertung* werden in der Literatur häufig synonym verwendet.

sparungen monetär bewertet und den Investitionen für die Umsetzung der Maßnahme gegenübergestellt werden. Weitere Auswirkungen (z. B. auf die Produktion) werden nicht berücksichtigt. Der Bereich der eindimensionalen Investitionsrechnung kann in die beiden Untergruppen der dynamischen und der statischen Investitionsrechnungsverfahren gegliedert werden. Typische statische Verfahren sind z. B. die Kosten- bzw. Gewinnvergleichsrechnung und die Rentabilitätsrechnung (GÖTZE 2008, S. 50). Diese Verfahren finden zwar in vielen Unternehmen heute noch Anwendung, haben jedoch mehrere gemeinsame Nachteile, die z. B. aus einer fehlenden Verzinsung resultieren (POGGENSEE 2011, S. 39 f.). Sie werden an dieser Stelle nicht weiter betrachtet.

Dynamische Investitionsrechnungsverfahren berücksichtigen die zu erwartenden Einzahlungen  $E_t$  und Auszahlungen  $A_t$  für ein Projekt zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t$ . Es erfolgt eine explizite Betrachtung über mehrere Zeitperioden. Die Ein- und Auszahlungen werden dabei zu Zahlungsreihen zusammengefasst. Die Anzahl der Perioden  $n$  wird vom Anwender individuell festgelegt und beschreibt in der Regel die gesamte Nutzungsdauer des Investitionsobjekts. Den Berechnungen wird die Annahme zugrunde gelegt, dass die Ein- und Auszahlungen zu diskreten und äquidistanten Zeitpunkten  $t_n$  erfolgen. Um Zahlungen von verschiedenen Zeitpunkten vergleichen zu können, muss eine Aufzinsung bzw. Abzinsung auf einen Bezugszeitpunkt erfolgen, da der Wert einer Zahlung vom Zahlungszeitpunkt abhängt (GÖTZE 2008, S. 67). Für den Investor ist ein Kapitalrückfluss zu einem früheren Zeitpunkt vorteilhafter als zu einem späteren, da er die Geldmittel verzinslich anlegen kann (WÖHE & DÖRING 2013, S. 536). Typische dynamische Verfahren der Investitionsrechnung sind die Kapitalwertmethode, die Annuitätenmethode, die dynamische Amortisationsrechnung und die interne Zinssatzmethode (GÖTZE 2008, S. 67 ff.).

Nachfolgend wird die Kapitalwertmethode erläutert.<sup>7</sup> Sie ist das gängigste Verfahren zur Beurteilung von Investitionsobjekten in Großunternehmen (DÄUMLER & GRABE 2007, S. 32). Der Kapitalwert KW ergibt sich aus dem Gegenwarts- oder Barwert einer Investition und wird durch Diskontierung aller auftretenden Ein- und Auszahlungen im betrachteten Zeitraum berechnet. Er beschreibt die Attraktivität eines Investitionsprojekts zum heutigen Zeitpunkt und wird mit der Kapitalwertgleichung berechnet (WÖHE & DÖRING 2013, S. 541):

---

<sup>7</sup> Beschreibungen der weiteren Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung können bspw. DÄUMLER, & GRABE (2007), POGGENSEE (2011) oder WÖHE & DÖRING (2013) entnommen werden.

$$KW = \sum_{t=0}^n (E_t - A_t) \cdot \frac{1}{(1+z)^t} \quad (2-15)$$

mit

t:	Zeitindex
n:	Anzahl der betrachteten Perioden
z:	Kalkulationszinssatz
$E_t$ :	Einzahlung zum Zeitpunkt t z. B in [€]
$A_t$ :	Auszahlung zum Zeitpunkt t z. B in [€]

„Ein Investitionsobjekt ist absolut vorteilhaft, falls sein Kapitalwert größer ist als Null. Ein Investitionsobjekt ist relativ vorteilhaft, falls sein Kapitalwert größer ist als der eines jeden anderen zur Wahl stehenden Objektes“ (GÖTZE 2008, S. 71). Ein positiver Kapitalwert bedeutet eine vollständige Wiedergewinnung der Anschaffungsausgaben, eine Verzinsung aller ausstehenden Beträge mit dem Kalkulationszinssatz z und einen barwertigen Überschuss in Höhe des KW (POGGENSEE 2011, S. 126). Für Energieeffizienz-Maßnahmen gehen notwendige Investitionen z. B. für Umbauten als Auszahlungen und daraus resultierende monetär bewertete Energieeinsparungen als Einzahlungen in die Berechnung ein.

Der Vorteil der dynamischen Investitionsverfahren gegenüber den statischen ist die genauere Abbildung des realen Investitionsobjekts durch die Berücksichtigung des Kalkulationszinssatzes. Als Schwachpunkt der dynamischen Verfahren ist zu nennen, dass zukünftige Zahlungsströme prognostiziert werden und deshalb einer gewissen Unsicherheit unterliegen, die im Kalkulationssatz zu berücksichtigen ist (GÖTZE 2008, S. 80). Ein Beispiel ist die unsichere Entwicklung von Energiepreisen, die sich auf die Höhe der Einsparungen auswirken.

### 2.4.3 Multikriterielle Entscheidungsfindung

Im vorangegangenen Abschnitt wurden Investitionsrechnungsverfahren vorgestellt, die eine Entscheidung alleine aufgrund der eindimensionalen monetären Vorteilhaftigkeit treffen. Oftmals ist es jedoch nicht möglich, ein Ziel für eine Investitionsentscheidung zu formulieren, das nur eine Zielgröße enthält. Als Beispiele werden in der Literatur Investitionen in innovative Technologien oder aufgrund strategischer Entscheidungen genannt, die sich auf komplexe Systeme auswirken (ZANGEMEISTER 1993, S. 9; GÖTZE 2008, S. 173). Auch die Bewertung von Energieeffizienz-Maßnahmen soll nicht eindimensional durchgeführt werden,

sondern zusätzliche Auswirkungen auf GPS-Zielgrößen berücksichtigen. Für diese Art der Entscheidungsfindung sind mehrdimensionale Verfahren notwendig. Dabei werden in der Regel eindimensionale Investitionsverfahren um Methoden ergänzt, die einen nicht monetär darstellbaren Nutzen bewerten (ZANGEMEISTER 1993, S. 5). Eine Vielzahl solcher Methoden ist unter dem Begriff *Multi Criteria Decision Making* (MCDM) zusammengefasst. MCDM gilt forschungsseitig als Teildisziplin des *Operations Research* und beschäftigt sich mit multikriteriellen Entscheidungsfindungen (ZARGHAMI & SZIDAROVSKY 2011). Entsprechende Methoden helfen dem Anwender dabei, Entscheidungsalternativen anhand qualitativer Faktoren zu bewerten (WENGER 2010). Häufig genutzte Methoden zur multikriteriellen Entscheidungsfindung sind die *Nutzwertanalyse*, der *Analytische Hierarchieprozess* und die *Multi-Attributive Nutzentheorie* (GÖTZE 2008, S. 180 ff.).<sup>8</sup>

### **Nutzwertanalyse (NWA)**

Die NWA untersucht eine „Menge komplexer Handlungsalternativen mit dem Zweck, die Elemente dieser Menge entsprechend den Präferenzen des Entscheidungsträgers bezüglich eines multidimensionalen Zielsystems zu ordnen“ (ZANGEMEISTER 1976, S. 45). Auf der Grundlage zuvor gewichteter Zielgrößen werden Teilnutzwerte für definierte Kriterien der vorliegenden Entscheidung berechnet und schließlich mittels additiver Gesamtnutzenfunktion zu einem Gesamtnutzwert summiert (GÖTZE 2008, S. 180 ff.). Die Anwendung der NWA besteht aus fünf Schritten (BLOHM ET AL. 2006, S. 155). Im ersten Schritt erfolgt die Bestimmung von Zielkriterien zur Bewertung der Entscheidungsalternativen. Diese müssen anhand einer Skala messbar sein und zumindest eine bedingte Nutzenabhängigkeit aufweisen. Zur Strukturierung komplexer Entscheidungsprobleme kann eine hierarchische Aufspaltung der Zielgrößen nützlich sein (RIEDL 2006, S. 112). Im zweiten Schritt folgt die Gewichtung der definierten Zielkriterien, z. B. mit Hilfe einer Intervallskalierung. Die Gewichte sollten anschließend normiert werden. Als sinnvoll wird hierbei in der Summe der Wert 1 erachtet. Im dritten Schritt werden die Teilnutzwerte für jedes Kriterium und jede Alternative bestimmt, indem zunächst ihre Ausprägungen anhand der festgelegten Skalen bewertet und diese anschließend mit den Gewichtungen multipliziert werden. Die Skalen können nominalen, ordinalen oder kardinalen Charakter haben (GÖTZE 2008, S. 182). Im vierten Schritt werden die Teilnutzwerte schließlich zu einem Gesamtnutzwert je Entscheidungsalternative aggregiert. Abschließend wird im fünften Schritt die Vorteilhaftigkeit der Alternativen beurteilt.

---

<sup>8</sup> Weitere Methoden des MDCM, die in mehrdimensionalen Investitionsrechnungen seltener Anwendung finden, sind ZARGHAMI & SZIDAROVSKY (2011) bzw. ZOPOUNIDIS & PARDALOS (2010) zu entnehmen.

### **Analytischer Hierarchieprozess (AHP)**

Der AHP wurde in den 70er Jahren von SAATY (1987) entwickelt und dient ebenfalls der Vorbereitung von Entscheidungen unter Berücksichtigung mehrerer Zielgrößen. „Analytisch“ ist der AHP aufgrund seines Vermögens, die Problemstellung in all seinen Abhängigkeiten umfassend zu analysieren. Als „hierarchisch“ kann der AHP bezeichnet werden, weil die Kriterien, die zur Lösung des Problems herangezogen werden, stets in einer Hierarchie mit verschiedenen Ebenen strukturiert werden. Die Kriterien können nach Bedarf auch als Merkmale, Attribute oder Elemente bezeichnet werden. Als „Prozess“ wird der AHP wegen seines prozessualen Charakters bezeichnet, der vorgibt, wie die Entscheidungen strukturiert und analysiert werden (MEIXNER & HAAS 2002, S. 114).

SAATY (2008, S. 85) unterteilt die Vorgehensweise des AHP in vier Schritte. Im ersten Schritt muss eine Problembeschreibung durchgeführt und eine Zielstellung festgelegt werden. Im zweiten Schritt strukturiert der Anwender die Entscheidungshierarchie vom oberen Entscheidungsziel über mögliche Unterziele, Zielkriterien und schließlich bis zur untersten Ebene, die in der Regel durch die Entscheidungsalternativen gebildet wird (RIEDL 2006, S. 103). In Schritt 3 stellt der Anwender Paarvergleich-Matrizen für die Elemente einer Ebene sowie der Alternativen auf. Nach der Aufstellung der Paarvergleich-Matrizen und deren Konsistenzüberprüfung berechnet der Anwender im vierten Schritt Gewichtungen für die Elemente mit Hilfe der Eigenwertmethode. An dieser Stelle wird ein Näherungsverfahren angewandt, das bei gegebener Konsistenz der Paarvergleiche aufwandsarm zu guten Ergebnissen führt (RIEDL 2006, S. 106). Durch gewichtete Nutzwerte können die Entscheidungsalternativen schließlich verglichen werden.

### **Multi-Attributive Nutzentheorie (MAUT)**

Die MAUT (englisch: Multiple Attribute Utility Theory) ist ein Verfahren zur Lösung von Mehrzielproblemen, mit dem analog zur NWA oder zum AHP Nutzwerte für Entscheidungsalternativen berechnet werden können. Der Unterschied zu den ersten beiden Verfahren ist jedoch das Aufstellen von Wertefunktionen, die jedem Element der Entscheidungsstruktur einen Präferenzwert zuordnen und somit eine Rangordnung der Entscheidungsalternativen liefern (WENGER 2010, S. 13). Die Funktionen basieren auf Substitutionsraten zwischen den Elementen. Dies bedeutet, dass ein Ausgleich der Änderung eines Zielkriteriums durch ein anderes stattfinden kann. Eine Bewertungsskala, wie sie z. B. beim AHP genutzt wird, ist aufgrund der Wertefunktion nicht notwendig.

Zur Durchführung der MAUT werden zunächst Attribute bzw. Kriterien ausgewählt und anschließend deren Unabhängigkeit voneinander untersucht. Dies ist eine Voraussetzung für die Substituierbarkeit. Ist diese sichergestellt, können Einzelfunktionen für die einzelnen Attribute mit Hilfe des Medianverfahrens bestimmt werden. Dazu ist die jeweils günstigste und die ungünstigste Ausprägung eines Attributs notwendig (GÖTZE 2008, S. 206 f.). Mit Hilfe der Einzelnutzenfunktionen lassen sich die Einzelnutzwerte der Attribute berechnen, die dann wiederum analog zu den beiden vorherigen Verfahren mittels additiver Nutzenfunktion zu einem Gesamtnutzwert aggregiert werden (GÖTZE 2008, S. 211).

### 2.5 Fazit

Kapitel 2 enthält die Grundlagen der vorliegenden Arbeit. Neben wichtigen Grundkenntnissen zur Quantifizierung von Energie und zu den Phasen der Energie-wandlungskette wurden durch die Aufbereitung der Thematik *Energieverschwendung in der Fertigung* auch Maßnahmenkategorien und mögliche Stellhebel zur Reduzierung von Energieverschwendung vorgestellt. Nach der Beschreibung des Ursprungs und des typischen physischen Aufbaus von GPS als Fließfertigung erfolgte die Analyse wichtiger Zielgrößen zur Bewertung von GPS und die Vorstellung der Methode Wertstromdesign inkl. ihrer energetischen Erweiterung.

Vor dem Hintergrund einer notwendigen Prognose von Zielgrößenveränderungen in GPS (vgl. Abschnitt 1.3) folgten systemtheoretische Grundsätze und die Aufbereitung der Systemstruktur eines GPS inkl. dessen Wirkbeziehungen. Zur Modellierung eines GPS-Simulationsmodells, das zur Prognose des systemischen Verhaltens verwendet werden soll, wurde der System-Dynamics-Ansatz vorgestellt. Durch die Aufbereitung der Thematik einer erweiterten Wirtschaftlichkeitsbewertung erfolgte die Erläuterung von Möglichkeiten einer multikriteriellen Umsetzungsempfehlung von Energieeffizienz-Maßnahmen.

Auf Basis dieser Erkenntnisse und der in Abschnitt 1.3 formulierten Zielsetzung können nun konkrete Anforderungen an die zu entwickelnde methodische Vorgehensweise zur Reduzierung von Energieverschwendung in GPS gestellt werden. Durch die Aufarbeitung des aktuellen Standes der Erkenntnisse zu bereits bestehenden Vorgehensweisen und Untersuchungen in den relevanten Forschungsfeldern wird daran anschließend der Handlungsbedarf abgeleitet, der mit Hilfe der methodischen Vorgehensweise abzudecken ist.

### 3 Stand der Erkenntnisse und Handlungsbedarf

#### 3.1 Anforderungen an eine methodische Vorgehensweise zur Reduzierung von Energieverschwendung in GPS

Aus der Zielsetzung mitsamt den formulierten Forschungsfragen (vgl. Abschnitt 1.3) leitet sich ein Ablaufschema für die methodische Vorgehensweise zur Reduzierung von Energieverschwendung in GPS ab. Diesem Ablaufschema werden insgesamt elf Anforderungen an eine solche Vorgehensweise zugeordnet (Abbildung 19). Die Anforderungen sind nachfolgend erläutert.

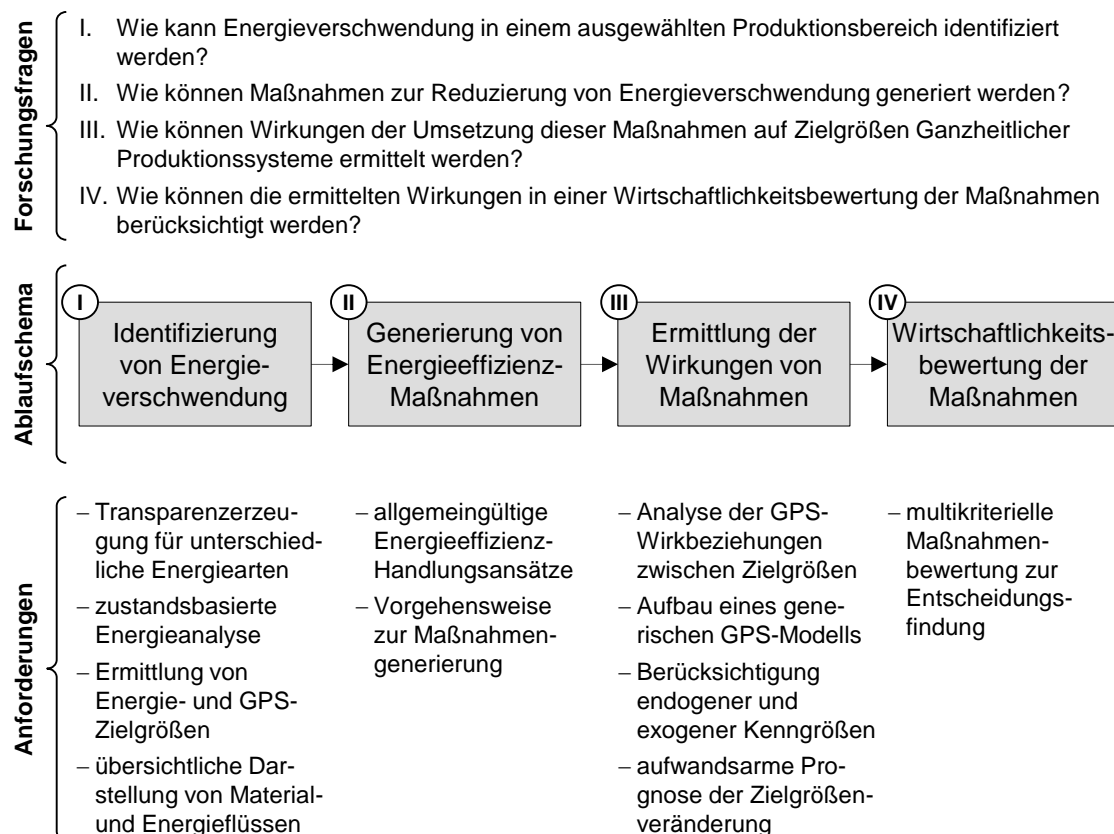


Abbildung 19: Ableitung der Anforderungen an die zu entwickelnde methodische Vorgehensweise

Aus den ersten beiden Forschungsfragen gehen insgesamt sechs Anforderungen hervor, die innerhalb des Ablaufschemas den Phasen *Identifizierung von Energieverschwendung* und *Generierung von Energieeffizienz-Maßnahmen* zugeordnet werden.

Zur Identifizierung von Energieverschwendung bedarf es der entsprechenden Transparenz in der Fertigung. Daher soll es dem Anwender möglich sein, mit Hilfe der Vorgehensweise eine *Transparenzerzeugung für unterschiedliche Energiearten* (Anforderung 1) durchführen zu können. Zur ganzheitlichen Erfassung von Energieverschwendung ist eine ausschließliche Betrachtung der elektrischen Energie nicht ausreichend, sondern muss um weitere Energiearten (z. B. Druckluft, Wärme, etc.) ergänzt werden, die als Endenergie im Unternehmen genutzt werden. Auch Energiebedarfe aus peripheren Anlagen sind aus Gründen der Vollständigkeit zu berücksichtigen. Da der Energiebedarf in den Prozessschritten während der Fertigung nicht konstant, sondern betriebszustandsabhängig ist, soll eine entsprechende *zustandsbasierte Energieanalyse* (Anforderung 2) möglich sein.

Für die spätere Betrachtung der Wirkbeziehungen zwischen der energetischen Zielgröße Energieintensität und den GPS-Zielgrößen soll schon in der Analysephase der Grundstein gelegt werden. Während der Transparenzerzeugung ist daher eine *Ermittlung von Energie- und GPS-Zielgrößen* (Anforderung 3) notwendig. Auf der Suche nach Energieverschwendung ist eine Konzentration auf wesentliche Kenngrößen hilfreich und daher die Aufnahme unnötiger Daten zu vermeiden. Angestrebt wird eine *übersichtliche Darstellung von Material- und Energieflüssen* (Anforderung 4), die alle für das weitere Vorgehen notwendigen Informationen enthält. Zur Sicherstellung einer umfassenden Betrachtung bestehender Energieverschwendungen sollen *allgemeingültige Energieeffizienz-Handlungsansätze* (Anforderung 5) unterstützend eingesetzt werden. Aufbauend auf diesen Handlungsansätzen soll dem Anwender eine systematische *Vorgehensweise zur Maßnahmengenerierung* (Anforderung 6) bereitgestellt werden.

Aus der dritten und der vierten Forschungsfrage resultieren Anforderungen zur Ermittlung der Wirkungen von Maßnahmen auf die Zielgrößen und zur Wirtschaftlichkeitsbewertung. Dazu ist zunächst eine *Analyse der Wirkbeziehungen zwischen Zielgrößen und Maßnahmen* (Anforderung 7) zur Reduzierung von Energieverschwendung obligatorisch, um ein Verständnis für die Abläufe innerhalb eines GPS zu schaffen.

Zur allgemeingültigen Anwendung in nach dem Prinzip der Fließfertigung gestalteten Prozessketten ist anschließend der *Aufbau eines generischen GPS-Modells* (Anforderung 8) notwendig, welches das dynamische Verhalten des GPS widerspiegelt. Die generische Betrachtung verhindert einen hohen Adaptionaufwand und stellt eine aufwandsarme Anwendung der Methodik in der Praxis sicher. Das dynamische Verhalten von GPS resultiert aus deren Komplexität. Eine



weitere Anforderung ist daher die *Berücksichtigung endogener und exogener Kenngrößen* (Anforderung 9), welche die Komplexität bestimmen und Unsicherheiten im System verursachen. Durch bestehende Wirkbeziehungen kann eine Umsetzung von Energieeffizienz-Maßnahmen Auswirkungen auf GPS-Zielgrößen haben. Diese Zielgrößenveränderung soll durch die Methodik prognostizierbar sein. Aufgrund der Komplexität des GPS ist eine mathematische Bestimmung der Zielgrößenveränderung durch den Einsatz analytischer Verfahren jedoch nicht möglich (PETER 2009, S. 38). Stattdessen bietet sich die Anwendung von Simulationsverfahren an. Entsprechende Simulationsläufe sind je nach Detailgrad sehr zeitaufwändig und wirken sich negativ auf die Praktikabilität aus. Eine Anforderung an die Methodik ist folglich die aufwandsarme *simulationsgestützte Prognose der Zielgrößenveränderung* (Anforderung 10). Die letzte Anforderung, die an die methodische Vorgehensweise gestellt wird, ist eine *multikriterielle Maßnahmenbewertung zur Entscheidungsfindung* (Anforderung 11). Diese Bewertung soll sowohl die aus einer Investitionsrechnung hervorgehenden Berechnungen, als auch die aus der Prognose der Zielgrößenveränderung gewonnenen Erkenntnisse bei der Umsetzungsentscheidung von Energieeffizienz-Maßnahmen berücksichtigen.

Nach der Ableitung von Anforderungen an eine methodische Vorgehensweise zur Reduzierung von Energieverschwendung in GPS sind im folgenden Abschnitt bestehende wissenschaftliche Ansätze hinsichtlich der Erfüllung dieser Anforderungen zu überprüfen. Die daraus ermittelten Defizite bestimmen schließlich den Handlungsbedarf der vorliegenden Arbeit.

## 3.2 Vorstellung und Einordnung betrachteter Ansätze

### 3.2.1 Ansätze zur Verbesserung der Energieeffizienz auf Basis des Wertstromdesigns

Zum Abgleich der Anforderungen, die sich aus den ersten beiden Forschungsfragen ergeben, werden zunächst Ansätze zur Verbesserung der Energieeffizienz auf Basis des Wertstromdesigns untersucht. Das Wertstromdesign ist fester Bestandteil des Methodenrepertoires in GPS (vgl. Abschnitt 2.2.5). Die vorgestellten Ansätze sind allesamt Weiterentwicklungen der Methode, um Energieverschwendung zu identifizieren und Energieeffizienz-Maßnahmen abzuleiten.

ERLACH & WESTKÄMPER (2009) orientieren sich mit der Methode *Energiewertstrom* stark am ursprünglichen Wertstromdesign. Die Methode gliedert sich in die

Schritte *Energiewertstromanalyse* (I), *Energiewertstromdesign* (II) und *Energiemanagement* (III). Während der Analysephase wird zunächst die innerbetriebliche Ausgangssituation erfasst und um die Energiearten *elektrische Energie*, *Erdgas* und *Druckluft* ergänzt. Zur Berechnung des erforderlichen Energiebedarfs zur Herstellung eines einzelnen Produktes im Prozessschritt dient die Energieintensität als Kenngröße. In die Berechnung der Kenngröße fließen der Leistungsbedarf während der Bearbeitung und – falls bekannt – der Stand-by-Leistungsbedarf ein. Während der *Energiewertstromdesign*-Phase werden identifizierte Verbesserungsmöglichkeiten mit Hilfe eines systematischen Leitfadens umgesetzt. Acht Gestaltungsrichtlinien helfen dabei, die Energieeffizienz in der Produktion zu steigern. Zur nachhaltigen Verankerung der kontinuierlichen Reduzierung von Energieverschwendung in der Unternehmenskultur schlagen die Autoren im dritten Schritt die Einführung eines Energiemanagementsystems vor. Durch die Nähe zur klassischen Wertstromanalyse ist die Aufnahme von GPS- und Energiedaten grundsätzlich möglich. Allerdings werden nur drei verschiedene Energiearten aufgenommen. Eine zustandsbasierte Energieaufnahme findet nur bedingt statt. Zur Umsetzung der sehr nützlichen Gestaltungsrichtlinien erscheint der Informationsgehalt des Energiewertstroms als nicht ausreichend, sondern muss um weitere Analysen ergänzt werden.

BRÜGGEMANN & MÜLLER (2009) stellen unter dem Begriff *nachhaltiges Wertstromdesign* einen Ansatz zur Steigerung der Energie- und Materialeffizienz als Erweiterung des Energiewertstroms nach ERLACH & WESTKÄMPER (2009) vor. Neben Produktionsdaten zum Personaleinsatz, Zyklus- und Rüstzeiten sowie Lagerbeständen werden Energiearten ermittelt und um Material- und CO<sub>2</sub>-Daten ergänzt. Mit Hilfe der Datenbasis kann anschließend die Berechnung der Kenngrößen Durchlaufzeit, Energie- und Materialintensität durchgeführt werden. Die Energieintensität wird als Quotient aus dem Gesamtbedarf an Energie und der Anzahl der in diesem Zeitraum produzierten Produkte berechnet. Eine Differenzierung verschiedener Zustände erfolgt nicht. Zur Ableitung von Energieeffizienzmaßnahmen werden die Gestaltungsrichtlinien von ERLACH & WESTKÄMPER (2009) um die Richtlinie *Prozessverbesserung* erweitert. Zusätzlich geben die Autoren Hinweise auf bestehende Checklisten zur Maßnahmengenerierung. Der Ansatz nach BRÜGGEMANN & MÜLLER (2009) weist im Hinblick auf die zu entwickelnde Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit dieselben Defizite auf, die im Ansatz von ERLACH & WESTKÄMPER (2009) festzustellen sind.

Die Methode *Green Value Stream* von WILLS (2009) basiert ebenfalls auf dem klassischen Wertstromdesign. Im Unterschied zu den ersten beiden Ansätzen behandelt der Autor die Energie neben den Themen Wasser, Material, Abfall,

Transport, Emissionen und Biodiversität nur als eine von sieben „grünen“ Verschwendungsarten. Durch diese ganzheitliche Betrachtung sollen alle negativen Einflüsse auf die Umwelt identifiziert und schrittweise eliminiert werden. Das erwartete Resultat sind reduzierte Kosten, höhere Wertschöpfung und Wettbewerbsvorteile. Durch die umfassende Betrachtung werden in diesem Ansatz theoretisch alle Umwelteinflüsse erfasst. Dies geschieht jedoch auf einem abstrakten Level. Eine Herangehensweise zu detaillierten Analysen von Energieverschwendung fehlt. Kenngrößen zur Steuerung des Verbesserungsprozesses werden zudem nicht vorgegeben.

Mit der Methode *Energiewertstromdesign* verfolgen REINHART ET AL. (2011A) das Ziel der Steigerung der Energieproduktivität, die als Synonym zur Energieeffizienz gesehen wird. Zur Identifikation von Energieverschwendung bietet die Methode sieben Energieverschwendungsarten an, die sich aus den Verschwendungsarten der GPS ableiten. Während der Analysephase führt der Anwender der Methode eine sehr detaillierte Aufnahme der Energieflüsse durch, die alle verwendeten Energiearten und zusätzlich Peripherien und Energietransporte berücksichtigt. Als Kennzahl wird der Energiebedarf pro Prozessschritt und Bauteil ermittelt. Die typischen Zielgrößen der Wertstromanalyse (z. B. Durchlaufzeit, OEE-Wert, etc.) finden keine Berücksichtigung. Nach der Analysephase werden während der Designphase Verbesserungsmöglichkeiten systematisch erarbeitet. Die Generierung von Maßnahmen zur Steigerung der Energieproduktivität findet anhand von acht Schlüsselfragen und mit Hilfe eines Designkatalogs statt. Abgeleitete Verbesserungsmaßnahmen werden anschließend mit Hilfe einer statischen Amortisationsrechnung einer Priorisierung unterzogen. Außerdem erfolgt mit Hilfe von Matrizen eine qualitative Analyse der Wirkbeziehungen zwischen den umzusetzenden Maßnahmen und verschiedenen Zielgrößen der Fertigung. Die detaillierte Energieaufnahme erzeugt eine hohe Transparenz, kann jedoch bei größeren Produktionsbereichen zu Unübersichtlichkeit führen. Mit der Energieproduktivität wird eine Steuerungskennzahl eingeführt, die sich aus dem Quotienten des Nutzens und der eingesetzten Energie berechnet. Die praktische Anwendung der Kennzahl ist jedoch dadurch erschwert, dass eine Herleitung des Nutzens nicht erläutert wird. Die Schlüsselfragen und der Designkatalog sind hilfreich bei der Generierung von Maßnahmen. Die Identifikation von Auswirkungen auf die Fertigung ist hingegen sehr subjektiv, da sie nicht auf einer Prognose von Zielgrößenveränderungen, sondern auf einer Einschätzung des Anwenders basiert.

SCHILLIG ET AL. (2013) bieten durch ihre Methode der *Energiewertstromanalyse* die Möglichkeit, duale Energiesignaturen zu erstellen. Die Autoren betrachten in erster

Linie die Bearbeitungsprozesse in der Produktion und unterteilen den Energieeinsatz während der Zykluszeit in wertschöpfende und nicht-wertschöpfende Anteile. Diese werden in einer erweiterten Visualisierung der klassischen Wertstromanalyse unterhalb der Durchlaufzeit festgehalten. Eine Einteilung findet sowohl für die Zykluszeit selbst, als auch für den Energieeinsatz statt. Durch diese Einteilung kann für jeden Prozessschritt sowohl ein energetischer, als auch ein zeitlicher Wertschöpfungswirkungsgrad ermittelt und über Produktionsbereiche hinaus bis auf Supply-Chain-Ebene aggregiert werden. Zur Identifizierung von Verschwendung aus energetischer Sicht wird äquivalent zu REINHART ET AL. (2011A) eine Übertragung der klassischen Verschwendungsarten der GPS auf den Bereich Energie empfohlen. Die Autoren bieten einen systematischen Ansatz zur Identifikation von nicht-wertschöpfendem Energieeinsatz und erweitern nebenbei die Betrachtung der wertschöpfenden Zeitanteile der Wertstromanalyse. Energieverschwendungen werden mit Hilfe von detaillierten Energiesignaturen in Form von Leistungs-Zeit-Diagrammen visualisiert. Die Methode beschränkt sich jedoch auf die Analysephase und bietet keine Vorgehensweise zur Maßnahmengenerierung.

BOGDANSKI ET AL. (2013) erweitern den Ansatz von ERLACH & WESTKÄMPER (2009) in ihrer Methode EXTENDED ENERGY VALUE STREAM um drei Aspekte. Der erste Aspekt ist die Unterteilung des Energiebedarfs einer Maschine in die drei Zustände Bearbeitung, Anlauf und Stand-by. Anhand der Zustände werden äquivalent zu SCHILLIG ET AL. (2013) Energieprofile in Form von Leistungs-Zeit-Diagrammen erstellt. Der zweite Aspekt ist die Einbeziehung der Energiebedarfe der Produktionsperipherie, die – je nach Möglichkeit – einem einzelnen Prozessschritt oder dem gesamten Produktionsbereich zugerechnet werden. Der letzte Aspekt ist schließlich die zusätzliche Betrachtung des Einflusses von Merkmalen des Produktdesigns auf den Energiebedarf. Der Ansatz beschäftigt sich nicht mit Fragen der konkreten Maßnahmengenerierung. Er bietet jedoch eine detaillierte ganzheitliche Betrachtung des Energiebedarfs in der Produktion inkl. einer übersichtlichen Visualisierung.

POSSELT ET AL. (2014) nennen ihre Methode ebenfalls EXTENDED ENERGY VALUE STREAM und orientieren sich an dem Ansatz von BOGDANSKI ET AL. (2013). Allerdings wird der Fokus der Analyse hier noch stärker auf die peripheren Prozesse der *Technischen Gebäudeausrüstung* (TGA) gerichtet. Nach dem Modell der peripheren Ordnung (SCHENK ET AL. 2014, S.137) werden vier verschiedene Peripherieebenen unterschieden und entsprechende Berechnungsmethoden erläutert. Wie bei BOGDANSKI ET AL. (2013) wird zwischen drei verschiedenen Maschinenzuständen differenziert. Außerdem berücksichtigt der Ansatz die Energiebedarfe

unterschiedlicher Produkte, die im Rahmen desselben Prozessschrittes produziert werden. Auch mit diesem Ansatz lässt sich eine ganzheitliche Bewertung der Energiebedarfe in der Produktion erreichen. Die Autoren vermeiden dabei aufwändige Langzeitenergiemessungen zur Steigerung der Praktikabilität. Sie beschränken sich bei der Maßnahmenfindung auf Beispiele, bieten hier jedoch keine standardisierte Vorgehensweise.

### **3.2.2 Allgemeine Ansätze zur Verbesserung der Energieeffizienz in der Fertigung**

Die zuvor beschriebenen Ansätze stellen allesamt Erweiterungen der Methode Wertstromdesign dar. In der Literatur werden jedoch auch weitere allgemeine methodische Ansätze zur Verbesserung der Energieeffizienz aufgeführt, die sich teilweise auch mit der Untersuchung der Wirkungen zwischen Energieeffizienz-Maßnahmen und GPS-Zielgrößen befassen. Diese werden nachfolgend vorgestellt.

RAGER (2008) entwickelt ein Vorgehen zur energieorientierten Maschinenbelegung für identische, parallele Maschinen im Rahmen einer Werkstattfertigung. Ziel des Vorgehens sind möglichst geringe Kosten für die eingesetzten Energieträger. Der Autor beschreibt zur Erreichung der energieorientierten Maschinenbelegung die Lösungswege *Minimierung der Anzahl der belegten Maschinen* und die *Glättung des zeitlichen Verlaufs des Energiebedarfs*. Dazu erstellt RAGER (2008) ein Simulationsmodell, in das er heuristische Lösungsansätze auf Basis von evolutionären Algorithmen integriert. Durch eine energieorientierte Terminierung kann mit Hilfe des Ansatzes ein ausgeglichenes Lastprofil erreicht werden. Der Ansatz ist speziell für die Werkstattfertigung vorgesehen und bietet weder Visualisierungsmöglichkeiten noch weitere Richtlinien über die erwähnten Lösungswege hinaus zur Reduzierung von Energieverschwendung. Im Zielsystem werden die Kosten des Produktionssystems berücksichtigt.

Laut ENGELMANN (2009) ist die in der Produktion häufig bestehende Energieeffizienzlücke auf Planungsdefizite zurückzuführen. Basierend auf dem Systems-Engineering-Konzept entwickelt der Autor daher einen Ansatz zur Integration von Energieeffizienz in die Planung von Produktionsprozessen. Dabei wird das Ziel der Reduzierung von Energieverschwendung bei der Herstellung von Automobilen verfolgt. Der Autor beschreibt die Vorgehensweise anhand eines Fallbeispiels aus dem Karosseriebau. Zunächst findet eine Systembestimmung statt, die zur Erzeugung von Transparenz über Produktions- und Energiedaten sowie -kenngrößen dient. Anschließend wird ein Planungskonzept für eine energieeffiziente

Produktion erstellt. Mit Hilfe von allgemeinen Handlungsansätzen zur Steigerung der Energieeffizienz werden Alternativen bei der Anschaffung von Maschinen und Anlagen verglichen und wirtschaftlich bewertet. Die Realisierungs- und die Nutzungsphase bilden den Abschluss der Vorgehensweise. ENGELMANN (2009) konzentriert sich auf die Identifizierung von Energieeffizienz-Potenzialen und die Ableitung geeigneter Maßnahmen. Eine Prognose von Auswirkung der Maßnahmen auf die Fertigung ist nicht Bestandteil der Vorgehensweise.

WEINERT (2010) stellt eine *Vorgehensweise für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme* vor. Ziel dieses Ansatzes ist die Prognose des Energiebedarfs eines Produktionssystems und seiner Elemente mit Hilfe sog. *EnergyBlocks*. Dadurch wird die Planung eines energieeffizienten Systems ermöglicht. Diese *EnergyBlocks* resultieren aus einer zustandsbasierten Gliederung des Energiebedarfs unterschiedlicher Betriebsmittel. Auf Basis der Annahme, dass ähnliche Betriebsmittel auch über ähnliche Energieprofile bzw. *EnergyBlocks* verfügen, präsentiert der Autor ein mathematisches Konzept, durch welches *EnergyBlocks*-Sequenzen mittels Funktionsreihen modelliert werden können. Innerhalb einer Fallstudie wird unter Verwendung einer Materialflusssimulation die Praktikabilität der Vorgehensweise nachgewiesen. Allerdings beschränkt sich die Betrachtung auf den elektrischen Energiebedarf. Neben den Energiekosten, die für verschiedene Simulationsszenarien erhoben werden, spielt in diesem Ansatz auch die GPS-Zielgröße Durchlaufzeit eine entscheidende Rolle für die Planung eines energieeffizienten Produktionssystems.

In seiner Arbeit *Energy Efficiency in Manufacturing Systems* entwickelt THIEDE (2011) ein Vorgehen zum Aufbau eines generischen Simulationsmodells, welches die Auswirkungen von Energieeffizienz-Maßnahmen auf die Zielgrößen Energiebedarf, Energiekosten und Produktionszeit abbildet. Der Autor legt den Fokus dabei nicht auf einzelne Maschinen, sondern auf das Gesamtsystem unter zusätzlicher Berücksichtigung der TGA. Zudem werden während der Simulationsläufe Unsicherheiten durch endogene und exogene Größen einbezogen. THIEDE (2011) setzt hohe Anforderungen an sein Simulationsmodell, um die Praktikabilität für den Anwender sicherzustellen. Das Ergebnis ist eine allgemein anwendbare Vorgehensweise, die kein spezielles Wissen zur Simulationsanwendung erfordert. Dabei wird eine auf sechs verschiedenen Betriebszuständen basierende Energieanalyse der Maschinen und Anlagen durchgeführt. Für eine übersichtliche Darstellung von Material- und Energieflüssen wird die Verwendung von Sankey-Diagrammen empfohlen, in den Fallstudien der Arbeit jedoch nicht angewandt. Eine Vorgehensweise zur Maßnahmengenerierung steht nicht im Fokus. Neben der

elektrischen Energie finden die Energiearten Druckluft, Dampf und Gas Berücksichtigung im Simulationsmodell. Der Autor empfiehlt darüber hinaus die Verknüpfung verschiedener Zielgrößen durch eine multikriterielle Maßnahmenbewertung, führt diese jedoch nicht weiter aus.

KHALAF (2012) erarbeitet ein sechsstufiges Vorgehensmodell zur Erstellung energieeffizienter Fertigungsstrategien für verkettete Fertigungssysteme mit Hilfe der Materialflusssimulation. Innerhalb des Ansatzes werden Interdependenzen der Zielgrößen Qualität, Zeit, Kosten und Energie betrachtet. Dazu führt der Autor Optimierungsszenarien unter Verwendung genetischer Algorithmen durch und überprüft, wie sich die Verbesserung einer Zielgröße auf die übrigen Zielgrößen auswirken. Im Vorgehensmodell werden verschiedene Energiearten berücksichtigt. Allgemeine Handlungsansätze und Vorgehensweisen zur Energieeffizienz-Maßnahmengenerierung werden nicht betrachtet. KHALAF (2012) bildet das dynamische Verhalten eines beispielhaften Produktionssystems mit einer Materialflusssimulation ab, ohne dem Anwender jedoch ein generisches Modell zu bieten. Eine multikriterielle Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen findet nicht statt.

*Eine Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion* beschreibt HAAG (2013). Ziel des Ansatzes ist die Ableitung eines durch Simulationsszenarien optimierten Produktionsablaufs, der neben dem energetischen Effizienzgrad auch die Zielgrößen Durchlaufzeit, OEE-Wert und Bestand im System berücksichtigt. Die Energieanalyse erfolgt sowohl zustandsbasiert als auch energieartenübergreifend. In Optimierungsstudien werden organisatorische Parameter der Produktion variiert und anschließend die Auswirkungen auf die Zielgrößen bewertet. Die Bewertung wird mittels Gewichtung und Normierung multikriteriell durchgeführt. Der Schwerpunkt des Ansatzes liegt auf der energetisch optimalen Gestaltung eines Produktionssystems während der Arbeitsvorbereitung. Eine übersichtliche Darstellung von Material- und Energieflüssen zur Identifizierung von Energieverschwendung anhand von allgemeinen Energieeffizienz-Handlungsansätzen wird nicht berücksichtigt. Anhand eines Kennzahlensystems stellt der Autor die wichtigen Wirkbeziehungen zwischen verschiedenen Zielgrößen dar. Ein generisches GPS-Modell wird darauf aufbauend mit Hilfe einer Materialflusssimulation abgeleitet. Exogene und endogene Größen werden jedoch nicht betrachtet.

REINHARDT (2013) präsentiert eine Methode zur Bewertung der Ressourceneffizienz von Fertigungsprozessketten. Die Methode erzeugt eine zustandsbasierte Transparenz hinsichtlich des Verbrauchs von Ressourcen inkl. verschiedener

Energiearten und bewertet die Ressourceneffizienz anhand einer übergeordneten Kennzahl, die aus der gewichteten Summe der Material- und Energieeffizienz gebildet wird. Zur Bestimmung der Kennzahl wird ein Vorgehen zur Modellierung der Ressourcenströme in Fertigungsprozessketten festgelegt. Die Methode ermöglicht es dem Anwender, die aus Sicht der Ressourceneffizienz vorteilhafteste Fertigungsprozesskette aus verschiedenen Alternativen zu ermitteln. Eine simulationsgestützte Prognose kommt dabei nicht zum Einsatz. Die Autorin konzentriert sich zudem auf die Bewertung alternativer Prozessketten, ohne ein Vorgehen zur Erzeugung von Verbesserungsmaßnahmen zu definieren. Zur Bestimmung von Ressourcenfaktoren, die die Umweltauswirkungen eingesetzter Ressourcen wiedergeben, kommt eine multikriterielle Bewertung zum Einsatz.

#### **3.2.3 Ansätze zur Identifizierung und Bewertung von Wirkbeziehungen in GPS**

Nach der Betrachtung von Ansätzen auf Basis des Wertstromdesigns und allgemeinen methodischen Ansätzen zur Verbesserung der Energieeffizienz, folgt nun eine Übersicht über Ansätze, die sich mit Wirkbeziehungen in GPS und den Auswirkungen von Maßnahmen auf GPS befassen. Der Aspekt Energie muss bei diesen Ansätzen nicht zwangsweise eine Rolle spielen. Entscheidend für die Betrachtung der Ansätze sind die Vorgehensweisen zur Abbildung des systemischen Verhaltens der GPS.

WINKLER (2007) entwickelt in seinem Ansatz *Modellierung vernetzter Wirkbeziehungen im Produktionsanlauf* ein Prognosemodell zur Bestimmung der Zielgrößen von Anlaufprojekten in Abhängigkeit von Störeinflüssen und Maßnahmen. Die Arbeit inkludiert die Identifikation der während des Anlaufs auftretenden Wirkbeziehungen und deren Verbindung zu Zielgrößen, die quantitativ abgebildet werden und typischen Produktionskenngrößen entsprechen. Durch eine abschließende Analyse sollen die für das Anlaufprojekt wichtigsten Parameter identifiziert werden. Auf eine multikriterielle Bewertung der Auswirkungen wird dabei verzichtet. Zur Prognose des Anlaufs baut der Autor mit Hilfe einer empirischen Modellierung ein generisches Wirkgefüge auf, das aus einzelnen Wirkbeziehungen in Form von Teilmodellen besteht. Durch eine Typisierung der Wirkbeziehungen wird deren funktionale Abhängigkeit in *logisch*, *linear* und *stagnierend* unterschieden. Da die Teilmodelle z. B. aufgrund von Unsicherheiten mathematisch nicht immer eindeutig lösbar sind, greift WINKLER (2007) auf spezielle Berechnungstabellen und aufwändige Simulationsmodelle zurück. Der



Ansatz ist generisch aufgebaut, konzentriert sich jedoch auf die Anlaufphase des Produktionssystems.

In ihrer Arbeit mit dem Titel *Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden in der Kleinserienfertigung* untersucht PETER (2009) die Auswirkung der Einführung von Lean-Methoden wie *Kanban* oder *Total Productive Maintenance* auf GPS-Zielgrößen. Dazu wird ein generisches Wirkgefüge eines GPS zur qualitativen Darstellung der Wirkbeziehungen zwischen Einflussfaktoren und Zielgrößen aufgebaut. Für die Betrachtung eines spezifischen GPS schlägt die Autorin eine Produktionsdatenaufnahme mit Hilfe des Wertstromdesigns vor. Anschließend werden mit der ereignisgesteuerten Materialflusssimulation unter Berücksichtigung von Unsicherheiten Bewertungen der Auswirkungen der Lean-Methoden im GPS prognostiziert. Mit Hilfe von Optimierungsstudien können im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse alternative Lean-Methodenkombinationen ermittelt und deren Auswirkungen auf die Zielgrößen quantifiziert werden. Über eine Normierung und Gewichtung der Zielgrößen folgt anschließend die Auswahl der Alternative, welche die besten Auswirkungen auf das Zielsystem liefert und im Rahmen eines Handlungsplans umgesetzt werden soll.

*Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes* ist der Titel der Forschungsarbeit von JONDRALE (2013), die auf den Forschungsergebnissen von PETER (2009) aufbaut. Die Methodik ist in die drei Phasen *Datenaufnahme und Lean-Check*, *Simulation und Optimierung* und *Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes* unterteilt und betrachtet laufende Serienproduktionen der Automobilzulieferindustrie. Im Unterschied zu PETER (2009) ermöglicht die Methodik zusätzlich zu einer einmaligen Auslegung des Lean-Methodeneinsatzes eine Robustheitsanalyse bei Stückzahlschwankungen und Änderungen des Produktmix im GPS, woraus sich Adaptionmöglichkeiten ergeben. Zur Beschreibung des systemischen Verhaltens des GPS wird eine Materialflusssimulation verwendet, die aus generischen Modellbausteinen auf Maschinenebene besteht. Der Fokus der Wirtschaftlichkeitsbewertung liegt auf den Gesamtkosten des Systems.

AULL (2013) erarbeitet in seinem Ansatz ein *Modell zur Ableitung effizienter Implementierungsstrategien für Lean-Production-Methoden* im Rahmen des Aufbaus eines GPS. Dazu werden achtzehn Lean-Methoden identifiziert und deren Interdependenzen qualitativ bewertet. Mit Hilfe eines generischen System-Dynamics-Modells bildet der Autor anschließend die Methoden und die Zielgrößen Qualität, Kosten und Zeit im Rahmen eines GPS ab. Durch Sensitivitätsanalysen erfolgt die

Bestimmung einer bestmöglichen Einführungsreihenfolge der Methoden. Durch den generischen Aufbau des Modells wird eine aufwandsarme Prognose der Zielgrößenveränderung sichergestellt. Eine Berücksichtigung von endogenen oder exogenen Größen findet jedoch nicht statt.

### 3.3 Ermittlung des Handlungsbedarfs und Zielspezifikation

Abbildung 20 zeigt einen Überblick über die bestehenden Ansätze und ihre Erfüllung der Anforderungen an eine methodische Vorgehensweise zur Reduzierung von Energieverschwendung in GPS.

<ul style="list-style-type: none"> <li>● = erfüllt Anforderung</li> <li>◐ = erfüllt Anforderung teilweise</li> <li>○ = erfüllt Anforderung nicht</li> </ul>	Anforderungen an die Identifizierung von Energieverschwendung und Maßnahmengenerierung						Anforderungen an die Identifizierung von Wirkungen und Umsetzungsentscheidung für Maßnahmen				
	Transparenzzeugung für unterschiedliche Energiearten	zustandsbasierte Energieanalyse	Ermittlung von Energie- und GPS-Zielgrößen	übersichtliche Darstellung von Material- und Energieflüssen	allgemeingültige Energieeffizienz-Handlungsansätze	Vorgehensweise zur Maßnahmengenerierung	Analyse der Wirkbeziehungen zwischen Zielgrößen & Maßnahmen	Aufbau eines generischen GPS-Modells	Berücksichtigung endogener und exogener Kenngrößen	simulationsgestützte Prognose der Zielgrößenveränderung	multikriterielle Maßnahmenbewertung zur Entscheidungsfindung
<b>Ansätze zur Verbesserung der Energieeffizienz auf Basis des Wertstromdesigns</b>											
Ertach & Westkämper 2009	◐	◐	●	●	●	◐	○	○	○	○	○
Brüggemann & Müller 2009	◐	◐	◐	◐	◐	◐	○	○	○	○	○
Wills 2009	○	○	◐	●	◐	○	○	○	○	○	○
Reinhart et al. 2011A	●	◐	○	◐	●	●	◐	○	○	○	○
Schillig et al. 2013	◐	◐	◐	●	◐	○	○	○	○	○	○
Bogdanski et al. 2013	●	●	◐	●	○	○	○	○	○	○	○
Posselt et al. 2014	●	●	◐	●	◐	○	○	○	○	○	○
<b>Allgemeine Ansätze zur Verbesserung der Energieeffizienz in der Fertigung</b>											
Rager 2006	○	◐	○	○	◐	○	○	◐	◐	◐	◐
Engelmann 2009	●	○	◐	◐	●	◐	○	○	◐	○	◐
Weinert 2010	○	●	◐	○	◐	○	○	○	○	◐	○
Thiede 2011	◐	●	◐	○	◐	○	○	●	●	◐	◐
Khalaf 2012	◐	○	◐	○	○	○	○	◐	◐	◐	○
Haag 2013	●	●	◐	○	○	○	●	●	○	○	●
Reinhardt 2013	●	●	◐	◐	○	○	○	○	○	○	◐
<b>Ansätze zur Identifizierung und Bewertung von Wirkbeziehungen in GPS</b>											
Winkler 2007	○	○	○	○	○	○	●	◐	●	◐	○
Peter 2009	○	○	○	○	○	○	●	●	●	◐	○
Jondral 2013	○	○	○	○	○	○	○	◐	●	◐	◐
Aull 2013	○	○	○	○	○	○	◐	●	○	●	○

Abbildung 20: Erfüllung der Anforderungen durch bestehende Ansätze

Da die Reduzierung von Verschwendung in der Fertigung als ein Hauptbestandteil der GPS-Prinzipien angesehen wird (vgl. 2.2.2), ist die energetische Erweiterung des Wertstromdesigns zur Identifizierung von Energieverschwendung naheliegend und sinnvoll (BRÜGGEMANN & MÜLLER 2009, S. 895). Bestehende Ansätze aus der Literatur sind jedoch durch erhebliche Unterschiede bezüglich der Detailtiefe der Datenaufnahme gekennzeichnet. Teilweise erfolgt eine Beschränkung auf wenige Energiearten. Zudem bestehen häufig keine festen Vorgaben für zu ermittelnde Daten. Um die zum Wertstromdesign bestehende Expertise zu nutzen, soll für die angestrebte methodische Vorgehensweise eine Analysephase entwickelt werden, die sich eng am originären Wertstromdesign orientiert. Der Anwender soll klare Vorgaben erhalten, welche Daten aufzunehmen sind. Dies schließt eine zustandsbasierte Energieaufnahme und die zusätzliche Berücksichtigung von Peripherien ein (vgl. u. a. BOGDANSKI ET AL. 2013) und gewährleistet eine Vollständigkeit der Datenbasis für die nachfolgenden Schritte.

Die vorgestellten Ansätze bieten bereits mehrere Lösungen für allgemeine Handlungsansätze bzw. Richtlinien zur Steigerung der Energieeffizienz in der Produktion. Zur Auswahl der Handlungsansätze für die zu entwickelnde methodische Vorgehensweise sollen die Vorschläge der Ansätze um weitere Sammlungen aus der Literatur ergänzt und im Rahmen einer umfassenden Recherche untersucht werden. Die geforderte systematische Vorgehensweise zur Maßnahmengenerierung soll derart entwickelt werden, dass sie eine Unterstützung für den Anwender bei der Generierung darstellt (vgl. bspw. ERLACH & WESTKÄMPER 2009; REINHART ET AL. 2011A) und darüber hinaus Aussagen zu quantitativen Auswirkungen im GPS ermöglicht.

Zur Untersuchung und Beschreibung von Wirkbeziehungen in GPS ergeben sich aus der Literaturrecherche verschiedene Vorgehensweisen. PETER (2009, S. 72 ff.) stellt diese in einem statischen Kenngrößensystem in Form eines qualitativen Wirkgefüges dar. WINKLER (2007) und HAAG (2013) verfolgen ähnliche Ansätze. Zur Abbildung des dynamischen Systemverhaltens ist häufig die Nutzung von ereignisdiskreten Simulationsmodellen (z. B. mit Plant Simulation<sup>®</sup>) zu beobachten (vgl. WINKLER 2007; PETER 2009; JONDRALE 2013). Diese Art der Simulation hat sich zur Beschreibung von Materialflüssen unter Berücksichtigung von Unsicherheiten in Produktionssystemen vielfach bewährt (PETER 2009, S. 38). Sie ermöglicht eine realitätsnahe Abbildung eines Produktionssystems, setzt für die Modellierung jedoch ein spezifisches Anwenderwissen voraus und ist durch einen hohen Zeitbedarf zur Modellerstellung gekennzeichnet (WINKLER 2007, S. 141). Der Aufbau eines generischen GPS-Modells ist zwar möglich, durch vorgefertigte

Modellierungsbausteine laufen im Hintergrund jedoch Berechnungen und Auswertungen ab, die für die spezifische Aufgabenstellung unwichtig sind und einen hohen Zeitaufwand bei der späteren Simulationsdurchführung verursachen (PETER 2009, S. 40; TOLUJEW & REGGELIN 2008, S. 589).

Zur Abbildung der Wirkbeziehungen und simulationsgestützten Prognose der Zielgrößenveränderung in GPS soll daher ein System-Dynamics-Ansatz gewählt werden. Wie bereits in Abschnitt 2.3.4 erläutert, ermöglicht dieser eine vereinfachte generische Darstellung eines GPS mit der Konzentration auf entscheidende Elemente und Wirkbeziehungen. Häufig werden System-Dynamics-Modelle von flussorientierten, auf Differentialgleichungen basierenden Systemen auf makroskopischer Ebene erstellt (TOLUJEW & REGGELIN 2008, S. 585). Solche Modelle werden in der Regel mit dynamischen, kontinuierlichen Simulationsmodellen beschrieben und können zwar Rückkopplungen, jedoch keine stochastisch auftretenden diskontinuierlichen Ereignisse wie Maschinenstörungen abbilden. Für die simulationsgestützte Prognose soll daher eine dynamische zeitdiskrete Simulation nach der Klassifizierung von BORRMANN ET AL. (2011, S. 164) gewählt werden, die mit modernen Simulatoren wie bspw. *Vensim*<sup>®</sup> abbildbar ist (TOLUJEW & REGGELIN 2008, S. 587).

Zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit des GPS sollen, wie bereits in Abschnitt 2.2.4 beschrieben, die GPS-Zielgrößen EPEI-Wert, OEE-Wert, Qualitätsgrad und Durchlaufzeit festgelegt und um die energetische Zielgröße Energieintensität ergänzt werden. Da die vorliegende Arbeit sich im Gesamtkontext mit einer Integration von Energieaspekten in GPS beschäftigt, wird an dieser Stelle die Festlegung getroffen, dass unter dem Begriff der GPS-Zielgrößen auch die Energieintensität verstanden wird. Eine Unterscheidung zwischen GPS- und energetischen Zielgrößen ist nicht weiter notwendig.

Eine multikriterielle Bewertung von Maßnahmen findet kaum Anwendung in den untersuchten Ansätzen. Der Empfehlung von THIEDE (2011, S. 176) folgend soll für die methodische Vorgehensweise das Ergebnis einer klassischen dynamischen Investitionsrechnung (Abschnitt 2.4.2) um Erkenntnisse aus der Prognose der Zielgrößenveränderung ergänzt und zu einer multikriteriellen Bewertung zusammengeführt werden. Dazu wurden bereits in Abschnitt 2.4.3 verschiedene Vorgehensweisen vorgestellt.

Die Ausarbeitung der methodischen Vorgehensweise zur Reduzierung von Energieverschwendung in GPS erfolgt im nachfolgenden Kapitel.

## 4 Entwicklung der Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendung in GPS

### 4.1 Allgemeines

Dieses Kapitel beschreibt die Entwicklung der methodischen Vorgehensweise zur Reduzierung von Energieverschwendung in GPS. Für diese Entwicklung ist zunächst eine Analyse der in GPS bestehenden Wirkbeziehungen notwendig. In einer Vorarbeit werden daher in Abschnitt 4.2 zunächst ein statisches GPS-Wirkgefüge für einen generischen Prozessschritt aufgebaut und daran anschließend die Wirkbeziehungen zwischen Prozessschritt und Prozesskette untersucht. Auf Basis dieser Erkenntnisse können die für eine Transparenzerzeugung notwendigen Daten definiert werden. Außerdem bildet der statische Aufbau des GPS-Wirkgefüges eine gute Grundlage für den Aufbau eines dynamischen Simulationsmodells, welches zur Prognose von Zielgrößenveränderungen benötigt wird (vgl. Abschnitt 3.3).

Dem Ablaufschema aus Abbildung 19 folgend wird die methodische Vorgehensweise in vier Schritten aufgebaut. Die Beschreibung des Aufbaus jedes einzelnen Schrittes erfolgt jeweils in einem eigenen Abschnitt (vgl. Abbildung 21).

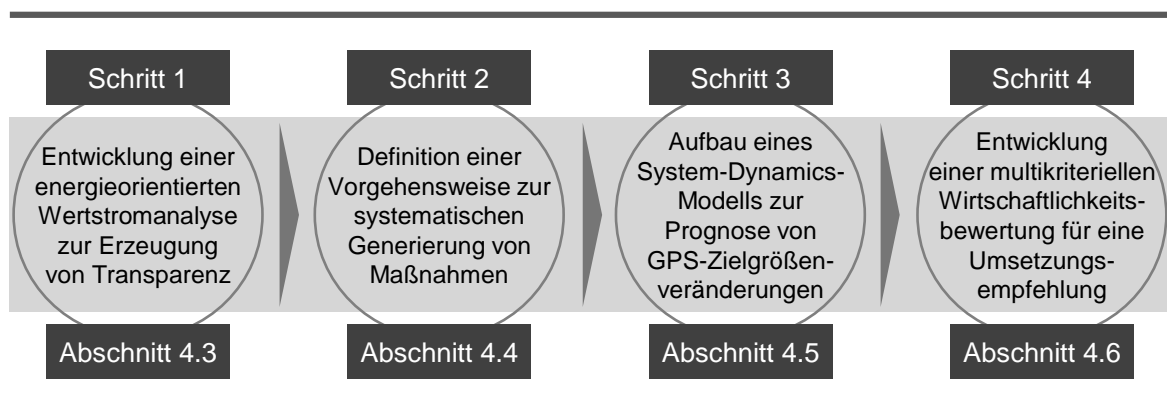


Abbildung 21: Übersicht über Aufbau und Inhalt des vierten Kapitels

Nach der Entwicklung einer energieorientierten Wertstromanalyse in Abschnitt 4.3 folgt im nächsten Abschnitt 4.4 die Definition einer Vorgehensweise zur systematischen Generierung von Energieeffizienz-Maßnahmen. Der Aufbau des generischen System-Dynamics-Modells zur Prognose der Veränderung von GPS-Zielgrößenwerten wird anschließend in Abschnitt 4.5 beschrieben. Nach der Entwicklung einer multikriteriellen Wirtschaftlichkeitsbewertung als letzter Schritt

der Methodik in Abschnitt 4.6 schließt das Kapitel in Abschnitt 4.7 mit einem Fazit, das die Vorteile der entwickelten methodischen Vorgehensweise verdeutlicht.

Da während der Entwicklung mehrere Einzelmethoden wie das Wertstromdesign, System Dynamics und verschiedene Investitionsrechnungs- und Bewertungsverfahren zusammengeführt werden, wird die gesamte Vorgehensweise als *Methodik* bezeichnet (vgl. LINDEMANN 2009, S. 333).

## 4.2 Untersuchung von Wirkbeziehungen in GPS

### 4.2.1 Generischer Aufbau des Wirkgefüges eines Prozessschrittes

Aufbauend auf den in Abschnitt 2.2.3 beschriebenen Strukturebenen sollen zur Darstellung des systemischen Verhaltens eines GPS nun dessen Wirkbeziehungen ermittelt werden. Da die Anordnung der Fertigungsmittel individuell variiert, wird das Element des Prozessschrittes als geeigneter Betrachtungsbereich für eine generische Analyse und Visualisierung der Wirkbeziehungen ausgewählt. Durch eine anschließende Betrachtung der Wirkbeziehungen zwischen Prozessschritten ist die Abbildung des Verhaltens einer Prozesskette möglich.

Wie bereits erläutert, werden Wirkbeziehungen zur Beschreibung von Zusammenhängen in komplexen Systemen verwendet. Nach PETER (2009, S. 13) und HORVÁTH (2011, S. 500 ff.) können diese Zusammenhänge zur generischen Betrachtung eines GPS in einem Kenngrößensystem bzw. Wirkgefüge statisch abgebildet werden. Zwar ist eine Abbildung der Dynamik des Systems aufgrund seiner Komplexität ausschließlich mit Hilfe einer Simulation möglich, durch die statische Abbildung werden jedoch Wirkbeziehungen definiert, die in der Beschreibung des dynamischen Modells berücksichtigt werden müssen.

Im Allgemeinen unterscheidet man bei der Darstellung eines komplexen Systems als Wirkgefüge zwischen deduktiver und empirischer Modellierung (Abbildung 22). Ein deduktives Modell formuliert die mathematischen Zusammenhänge mit möglichst wenigen ergebnisspezifischen Wirkbeziehungen, die direkt messbare quantitative Effekte auf die Zielgrößen haben. In einem empirischen Modell hingegen werden die notwendigen Strukturen, die Logik und die Parameter des zu modellierenden Systems mit abgebildet. Es besteht aus vernetzten Wirkbeziehungen, durch welche Ursachen und Wirkungen besser nachvollziehbar sind (WINKLER 2007, S. 63 f.).

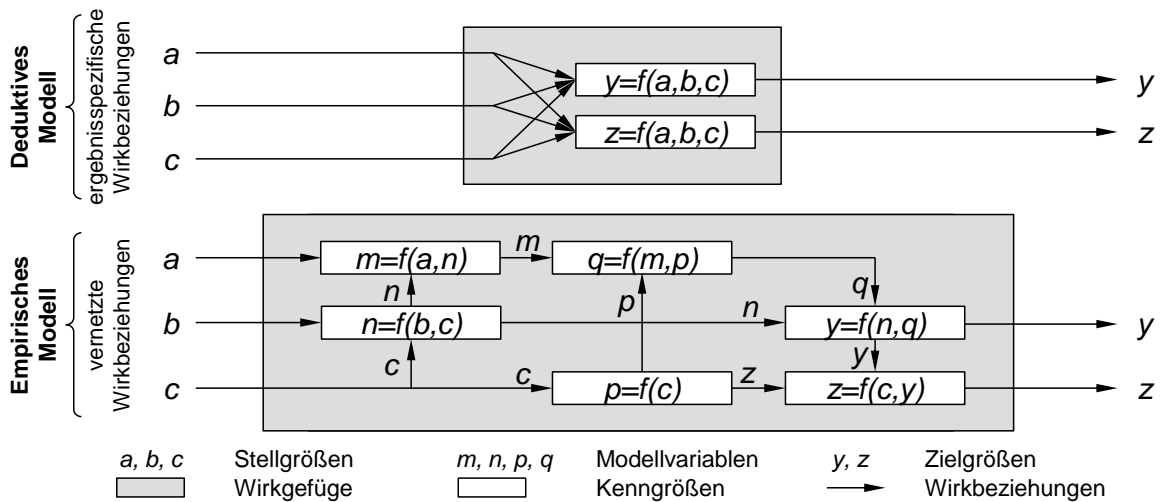


Abbildung 22: Schematischer Vergleich der Ansätze zur Modellierung (in Anlehnung an WINKLER 2007, S. 64)

Aufgrund der vorliegenden Problemstellung erweist sich der empirische Ansatz als geeignet, da er einen umfassenden Überblick über die Wirkbeziehungen gibt. Die in Abschnitt 2.2.4 vorgestellten, klassischen GPS-Zielgrößen EPEI-Wert, OEE-Wert, Qualitätsgrad und Durchlaufzeit bilden zunächst den Ursprung einer vollständigen Ermittlung aller relevanten Kenngrößen und Wirkbeziehungen des Wirkgefüges. Für die vier GPS-Zielgrößen erfolgt nun die Ableitung einer Baumstruktur, die alle zur Berechnung der Zielgrößen notwendigen Kenngrößen enthält. Abbildung 23 zeigt die Baumstruktur der EPEI-Wert-Berechnung nach Gleichung (2-6).

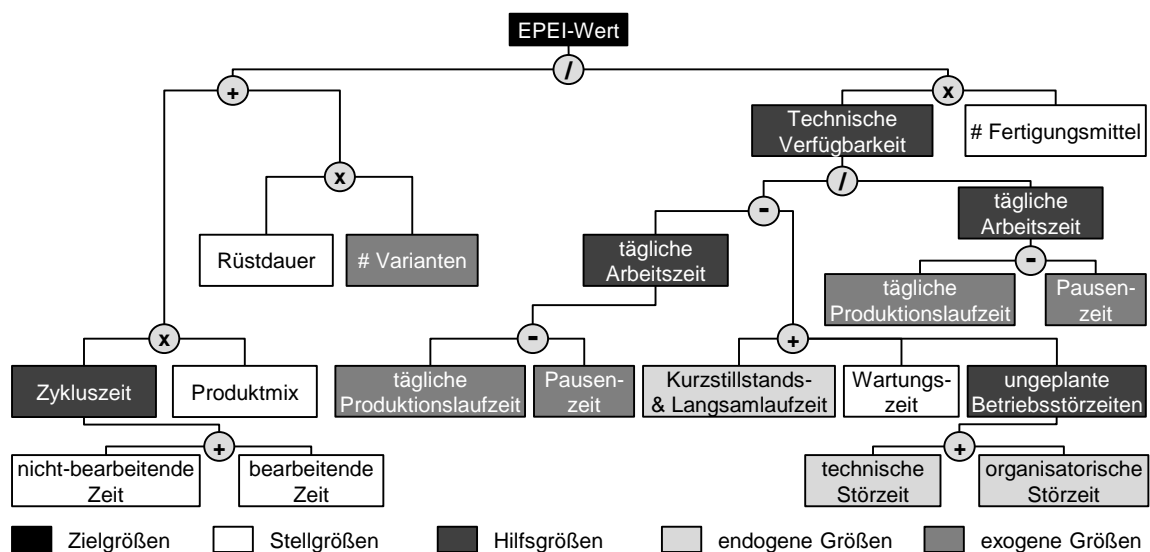


Abbildung 23: Baumstruktur der EPEI-Wert-Berechnung

Die Kenngrößen der Baumstrukturen werden nach den in Abschnitt 2.3.4 bereits vorgestellten Typen – Hilfsgrößen, Stellgrößen, exogene Größen und endogene Größen – klassifiziert. Einige Kenngrößen wie bspw. die tägliche Arbeitszeit, die als Hilfsgröße fungiert, werden dabei redundant verwendet. Durch eine anschließende Zusammenführung der Baumstrukturen der vier GPS-Zielgrößen entsteht nach der Beseitigung aller Redundanzen ein vollständiges Wirkgefüge, welches die Abhängigkeiten der Kenngrößen untereinander und deren Einfluss auf die GPS-Zielgrößen eines generischen Prozessschrittes visualisiert.

Abbildung 24 zeigt das generische Wirkgefüge, das alle relevanten Kenngrößen und die Wirkbeziehungen zwischen den Kenngrößen enthält. Der Übersichtlichkeit wegen sind die mathematischen Zusammenhänge der Wirkbeziehungen nur qualitativ in Form von gleichgerichteten bzw. entgegen gerichteten Wirkungspfeilen dargestellt. Alle Kenngrößen des GPS-Wirkgefüges inkl. deren Beschreibung und Berechnung können Anhang A1 entnommen werden.

Insgesamt werden sieben Kenngrößen als Stellgrößen klassifiziert. Diese sind durch Energieeffizienz-Maßnahmen unmittelbar veränderbar und haben dadurch direkten Einfluss auf weitere Kenngrößen des Wirkgefüges. Neben der bearbeitenden bzw. nicht-bearbeitenden Zeit pro Stück, die in Summe die Zykluszeit bilden, gehören dazu auch Anlauf- und Wartungszeiten sowie die Rüstdauer im Prozessschritt. Die Anzahl der für die Bearbeitung genutzten Fertigungsmittel und der Produktmix vervollständigen die Gruppe, die im Wirkgefüge der Abbildung 24 unten mittig positioniert ist. Im linken Bereich des Wirkgefüges sind in Summe fünf als exogene Größen klassifizierte Kenngrößen zu finden. Die Anzahl der produzierten Varianten und der Tagesbedarf werden durch den Kundenbedarf außerhalb des betrachteten Systems vorgegeben. Pausenzeiten unterliegen gesetzlichen Vorgaben, die nicht beeinflusst werden können. Die tägliche Produktionslaufzeit kann im GPS zwar festgelegt werden, orientiert sich letztendlich jedoch am Kundenbedarf. Der Anfangsbestand des Tages hängt vom Fertigungsablauf des Vortages ab und unterliegt damit ebenfalls externen Einflüssen.

Die Gruppe der endogenen Größen ist im rechten Bereich des Wirkgefüges zu finden. Dabei handelt es sich um jede Art von ungeplanten Unterbrechungszeiten durch organisatorische und technische Störungen, durch Kurzstillstands- und Langsamlaufzeiten sowie durch Ausschuss- und Nacharbeitszeiten. Zeiten ohne Auftrag sind ebenfalls nur bedingt planbar, da sie unmittelbar von Störzeiten abhängen. Sie vervollständigen die Gruppe der endogenen Größen.





Stellgrößen, exogene und endogene Größen haben Einfluss auf die Gruppe der fünfzehn Hilfsgrößen im mittleren Bereich des Wirkgefüges, die wiederum auf die vier GPS-Zielgrößen im oberen Bereich einwirken. Vor dem Hintergrund der späteren System-Dynamics-Modellierung müssen die im Wirkgefüge enthaltenen Kenngrößen zudem auf ihre Eignung als Bestandsgrößen hin überprüft werden. Die Hilfsgrößen *Umlaufbestand* und *produzierte Teile* sind Bestandsgrößen. In der Literatur sind sie bei der Darstellung von GPS mit Hilfe von System Dynamics häufig zu finden (vgl. u. a. STERMAN 2000, S. 713; SCHÖNEBORN 2004, S. 98 f.).

Das statische Wirkgefüge inkl. der mathematischen Relationen bildet die Basis für den späteren Aufbau des System-Dynamics-Modells. Zusätzlich gibt es eine Übersicht über alle produktionsorientierten Kenngrößen, die bei der Datenaufnahme im Rahmen einer energieorientierten Wertstromanalyse zu erheben sind. In der Zielspezifikation in Abschnitt 3.3 wurde jedoch auch die Ergänzung der Energieintensität als weitere Zielgröße zur Bewertung von GPS festgelegt. Anhand des Wirkgefüges kann nun eine Integration dieser Zielgröße inkl. deren Kenngrößen vorgenommen werden.

Die Berechnung der Energieintensität erfolgt nach Formel (2-5) durch die Division der eingesetzten Energie durch den Nutzen, der z. B. am Produktionsausstoß in [Stk] gemessen wird. Die in der Fertigung eingesetzte Energie berechnet sich wiederum durch das mathematische Produkt aus Leistung und Zeit (vgl. Formel (2-2)). Während eines Fabriktages kann diese Zeit für einen Prozessschritt in die nach dem Aufbau des OEE-Wertes definierten Zeitanteile gegliedert werden (vgl. Abbildung 11). Zur Berechnung eines möglichst genauen Wertes für die Energieintensität werden diese Zeitanteile mit den entsprechenden Leistungsbedarfen der im Prozessschritt auftretenden Betriebszustände multipliziert (vgl. Anforderung 2 in Abschnitt 3.1) und anschließend durch die Anzahl an produzierten Teilen dividiert.

Für eine Integration der Energieintensität im GPS-Wirkgefüge ist folglich die Definition von Betriebszuständen notwendig, denen Leistungsbedarfe zuzuordnen sind. Die Leistungsbedarfe sind durch eine Energieeffizienz-Maßnahme (z. B. durch einen Komponentenaustausch) direkt veränderlich und müssen folglich als Stellgrößen klassifiziert werden. Die zur Berechnung der Energieintensität notwendigen Zeitanteile und die Anzahl an produzierten Teilen sind bereits vollständig im Wirkgefüge enthalten.

Eine visuelle Integration der Zielgröße Energieintensität und der Leistungsbedarfe verschiedener Betriebszustände in das statische GPS-Wirkgefüge wird aus Gründen der Übersichtlichkeit an dieser Stelle nicht vorgenommen. In die Entwicklung der energieorientierten Wertstromanalyse und des dynamischen Simulationsmodells müssen die gewonnenen Kenntnisse zur Berechnung der Energieintensität jedoch zwingend eingehen.

### 4.2.2 Wirkbeziehungen zwischen Prozessschritt und Prozesskette

Das zuvor beschriebene Wirkgefüge bildet die Wirkbeziehungen eines einzelnen Prozessschrittes ab. Die Auswirkungen von Energieeffizienz-Maßnahmen auf GPS-Zielgrößen müssen jedoch ebenso auf Prozesskettenebene betrachtet werden, um einer ganzheitlichen Analyse gerecht zu werden.

Nach LÖDDING (2005, S. 95) ist eine Fließfertigung durch einen hohen Automatisierungsgrad und eine meist geringe Kapazitätsflexibilität charakterisiert. Aufgrund der im Sinne der GPS-Prinzipien geringen Puffer- bzw. Umlaufbestände wirken sich Veränderungen wie z. B. Störungen in einzelnen Prozessschritten auf den Durchsatz und damit eventuell auch auf vorgelagerte oder nachgelagerte Prozessschritte aus. Durch einen geringeren oder keinen Durchsatz des Prozessschrittes füllt sich der Umlaufbestand vor dem Prozessschritt. Ist der maximale Umlaufbestand erreicht, wird der vorgelagerte Prozessschritt blockiert. Auf der anderen Seite leert sich der Puffer nach dem Prozessschritt, was zu einer verzögerten Bearbeitung oder einem Stillstand im nachfolgenden Prozessschritt führen kann. Die Veränderung der Umlaufbestände bildet somit die Wirkbeziehungen zwischen Prozessschritt und Prozesskette ab. Wird eine Veränderung der Umlaufbestände festgestellt, die zu Verzögerungen bzw. Stillständen in angrenzenden Prozessschritten führt, so müssen auch diese auf Veränderungen ihrer GPS-Zielgrößen überprüft werden. Dies kann zu einer Kettenreaktion führen, die ggfs. die gesamte Prozesskette betrifft (vgl. WIENDAHL & HEGENSCHIEDT 2012, S. 344 ff.). Bei der Umsetzung einer Energieeffizienz-Maßnahme ist demnach immer die Auswirkung auf die GPS-Zielgrößen der gesamten Prozesskette zu ermitteln. Die entsprechende Vorgehensweise ist nachfolgend beschrieben.

Die Gesamtwerte der Zielgrößen Durchlaufzeit (vgl. Formel (2-13)) und Energieintensität können durch einfache Addition der Prozessschrittswerte berechnet werden. Der EPEI-Wert der Prozesskette entspricht dem maximalen EPEI-Wert aller Prozessschritte (vgl. Formel (2-6)). Für die Berechnung des OEE-Wertes und des Qualitätsgrads auf Prozesskettenebene ist jedoch die Berücksichtigung der

Pufferkapazitäten notwendig. Sie geben an, wie viele Teile zwischen den Prozessschritten gespeichert werden können, um die Auswirkungen von Produktionsunterbrechungen zu kompensieren. Zur optimalen Auslegung der Pufferkapazitäten wurden zahlreiche mehr oder weniger aufwendige Näherungsverfahren entwickelt (vgl. u. a. BULLINGER ET AL. 1993, S. 170 ff.; HEGENSCHIEDT 2003).

Eine praxisorientierte Vorgehensweise zur Bestimmung der Pufferkapazitäten wird in der VDI-Richtlinie 3649 vorgeschlagen (VDI 3649). Sie orientiert sich an der mittleren Unterbrechungsdauer MTTR des Prozessschrittes. MTTR steht dabei für „Mean Time to Repair“ oder auch „Mean Time to Recover“, um zu verdeutlichen, dass eine Unterbrechung nicht ausschließlich durch einen technischen Defekt ausgelöst wird (HOPP & SPEARMAN 2001, S. 256; KYNE 2010, S. 3). In Abbildung 25 ist ein typisches Beispiel für eine Verteilung der Unterbrechungsdauer dargestellt.

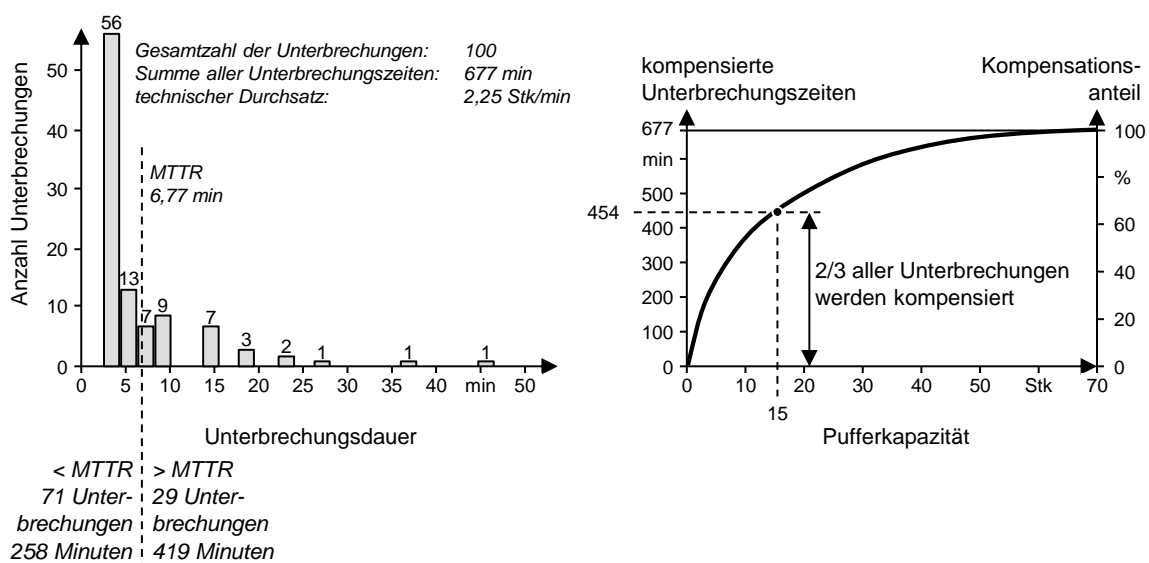


Abbildung 25: Unterbrechungsverteilung und Unterbrechungskompensation in Abhängigkeit von der Pufferkapazität (in Anlehnung an VDI 3649, S. 9; WIENDAHL & HEGENSCHIEDT 2012, S. 346)

Das linke Diagramm der Abbildung zeigt die Anzahl aufgetretener Produktionsunterbrechungen unterteilt nach unterschiedlichen Unterbrechungsdauern. Die mittlere Unterbrechungsdauer MTTR berechnet sich aus dem Quotienten der Unterbrechungszeit und der Anzahl der Unterbrechungen (WIENDAHL & HEGENSCHIEDT 2012, S. 362). Im vorliegenden Beispiel liegt sie bei 6,77 min. 71 Unterbrechungen weisen im Vergleich zur MTTR eine kürzere Dauer auf. In 29 Fällen ist die Unter-

brechungsdauer länger als die MTTR. Als sinnvoll wird nun eine Auslegung der Pufferkapazität nach der MTTR angesehen. Berechnet wird die Soll-Pufferkapazität aus dem Produkt der MTTR und dem technischen Durchsatz  $\lambda_{\text{Tech}}$  (VDI 3649, S. 9):

$$\text{Soll-Pufferkapazität} = \text{MTTR} \cdot \lambda_{\text{Tech}} \quad (4-1)$$

mit

MTTR: mittlere Unterbrechungsdauer in [ZE]

$\lambda_{\text{Tech}}$ : technischer Durchsatz in [Stk/ZE]

Im Beispiel ergibt sich für  $\lambda_{\text{Tech}} = 2,25$  Stk/min eine Soll-Pufferkapazität von etwa 15 Stück. Durch diesen Puffer kann in Summe eine Unterbrechungszeit von  $258 \text{ min} + (29 \cdot 6,77 \text{ min}) = 454 \text{ min}$  kompensiert werden. Dies entspricht etwa einem Kompensationsanteil  $f_K$  von 67 % bzw.  $2/3$ .

Im rechten Diagramm der Abbildung sind die kompensierten Unterbrechungszeiten in Abhängigkeit verschiedener Pufferkapazitäten abgebildet. Der Kompensationsanteil  $f_K$  kann für jede Pufferkapazität direkt abgelesen werden. Für den Fall, dass eine Verteilung der Unterbrechungskompensation nicht bekannt ist, jedoch von einem typischen Unterbrechungsverhalten ausgegangen werden kann, bietet sich eine exponentielle Verteilungsfunktion zur Beschreibung des Verhaltens an (vgl. BULLINGER ET AL. 1993, S. 180 ff.; SACHS & HEDDERICH 2009, S. 244):

$$f_K(x) = 1 - e^{-\mu x} \quad \text{für } x \geq 0 \wedge x \in \mathbb{N}_0 \quad (4-2)$$

mit

$f_K(x)$ : Kompensationsanteil in Abhängigkeit der Pufferkapazität in [%]

$x$ : Pufferkapazität in [Stk]

$\mu$ : Parameter der exponentiellen Verteilungsfunktion [1/Stk]

Der mittlere Umlaufbestand eines Prozessschrittes dient dabei näherungsweise als Wert für die Pufferkapazität. Der Parameter  $\mu$  kann über die Annahme ermittelt werden, dass der Kompensationsanteil  $f_K$  für die Soll-Pufferkapazität bei  $2/3$  liegt (VDI 3649, S. 8, GÜNTNER 2010, S. 6-31).

Zur Berechnung des Gesamtwerts  $\text{OEE}_{\text{gesamt}}$  einer Prozesskette ohne Puffer- bzw. Umlaufbestände werden die Einzelwerte der Prozessschritte entsprechend der

Berechnung der technischen Verfügbarkeit multipliziert (vgl. VDI 3649, S. 5; BULLINGER ET AL. 1993, S. 168):

$$OEE_{\text{gesamt}} = \prod_{i=1}^n OEE_i \quad (4-3)$$

mit

$OEE_i$ : Overall Equipment Effectiveness des Prozessschrittes  $i$

$n$ : Anzahl der Prozessschritte

Im Regelfall sind die einzelnen Prozessschritte jedoch durch Puffer voneinander entkoppelt. Zur Berechnung des  $OEE_{\text{gesamt}}$ -Wertes ist dann die Kenntnis des oben erläuterten Kompensationsanteils  $f_K$  des nachgelagerten Puffers nötig. Die Beispielrechnung aus Abbildung 26 weist nach den ersten drei Prozessschritten der Prozesskette einen Puffer mit einem Kompensationsanteil von  $f_K = 2/3$  auf. Unter Berücksichtigung der Pufferkapazität berechnet sich der  $OEE_{P1,2,3}$ -Wert der ersten drei Prozessschritte unter Berücksichtigung des Puffers durch die Gleichung

$$OEE_{P1,2,3} = \left( \prod_{i=1}^3 OEE_i \right) + f_K \cdot \left( 1 - \prod_{i=1}^3 OEE_i \right), \quad (4-4)$$

während sich der Gesamtwert  $OEE_{\text{gesamt}}$  wiederum aus dem Produkt der Werte  $OEE_{P1,2,3}$  und  $OEE_{4,5,6}$  berechnet.

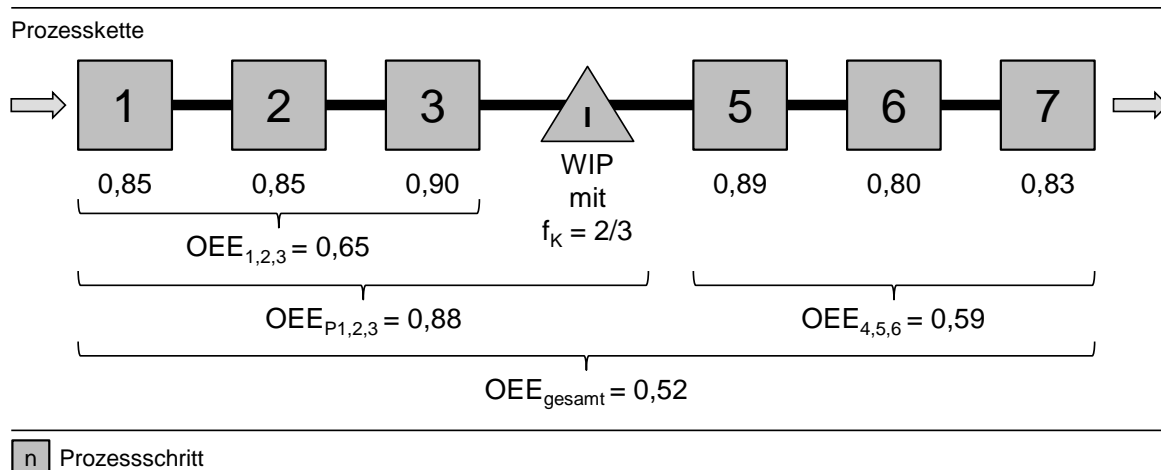


Abbildung 26: Berechnung des Wertes  $OEE_{\text{gesamt}}$  einer Prozesskette mit Entkopplung durch einen Puffer (in Anlehnung an VDI 3649, S. 8)

Äquivalent zur OEE-Berechnung auf Prozesskettenebene müssen die Qualitätsgrade der einzelnen Prozessschritte unter Berücksichtigung der Pufferkapazitäten multipliziert werden, um einen Gesamtwert zu erhalten. Anhand der Berechnung der Gesamtwerte für OEE und Qualitätsgrad wird die Bedeutung der Pufferkapazitäten für die Wirkbeziehungen zwischen Prozessschritten deutlich. Diese Wirkbeziehungen sind bei der Entwicklung der Methodik zur Reduzierung der Energieverschwendung in GPS zu berücksichtigen.

## 4.3 Energieorientierte Wertstromanalyse

### 4.3.1 Erläuterung der Vorgehensweise

In Abschnitt 3.2.1 wurden bereits diverse Ansätze zur Erweiterung des Wertstromdesigns um Energieaspekte beschrieben. Da sich die klassische Designphase aus energetischer Perspektive weniger bewährt hat (vgl. Abschnitt 2.2.6), beschränkt sich der hier vorgestellte Ansatz auf die Analysephase. Dabei handelt es sich nicht um eine Energiewertstromanalyse. Da nach wie vor der Produktionswertstrom im Fokus der Analyse steht, der lediglich um Energiedaten erweitert wird, trägt der Ansatz den Titel *energieorientierte Wertstromanalyse*. Die standardisierte Vorgehensweise zur Datenaufnahme und -auswertung ist in Tabelle 3 beschrieben.

*Tabelle 3: Vorgehensweise zur Durchführung der energieorientierten Wertstromanalyse*

<b>Schritt</b>	<b>Beschreibung</b>
1.	Auswahl der Prozesskette (Systemgrenze)
2.	Aufnahme der Produktionsdaten
3.	Aufnahme der Energiedaten
4.	Datenauswertung (Energie- und GPS-Zielgrößen)

### 4.3.2 Auswahl der Prozesskette

Entsprechend der in Abschnitt 2.2.5 beschriebenen ursprünglichen Wertstromanalyse wird zunächst eine Produktfamilie ausgewählt, die untersucht werden soll. Die zur Produktfamilie zugehörige Prozesskette sollte der Übersichtlichkeit wegen aus einer überschaubaren Anzahl von (mindestens jedoch aus zwei) Prozess-

schritten bestehen.<sup>9</sup> Von Vorteil sind Prozessketten, die ein abgeschlossenes (Teil-) Produkt fertigen, das an einen nachfolgenden Fertigungsbereich geliefert wird. In diesem Fall übernimmt der nachfolgende Bereich die Rolle des Kunden und gibt den Bedarf vor. Durch die Auswahl der Prozesskette findet außerdem eine Festlegung der Systemgrenze statt. Zur Gewährleistung einer holistischen Untersuchung sollte zu diesem Zeitpunkt bereits ein Vermerk über alle Energiearten erfolgen, die der Prozesskette zugeordnet werden können. Dazu ist eine Betrachtung der peripheren Betriebsmittel notwendig (vgl. DIETMAIR & VERL 2010, S. 187).

Wie in Abbildung 27 dargestellt, werden die gewonnenen Informationen üblicherweise auf einem Blatt Papier im DIN A3 Format aufgezeichnet (vgl. Abschnitt 2.2.5). Alternativ können Tabellenkalkulations- oder spezielle Visualisierungsprogramme verwendet werden. Im rechten oberen Bereich wird ein Fabriksymbol als Zeichen des Kunden eingezeichnet. Darunter werden im mittleren Bereich die Prozessschritte seriell verteilt. Der obere linke Bereich ist für die Darstellung der zentralen Energiearten vorgesehen, mit denen die Prozesskette beliefert wird.

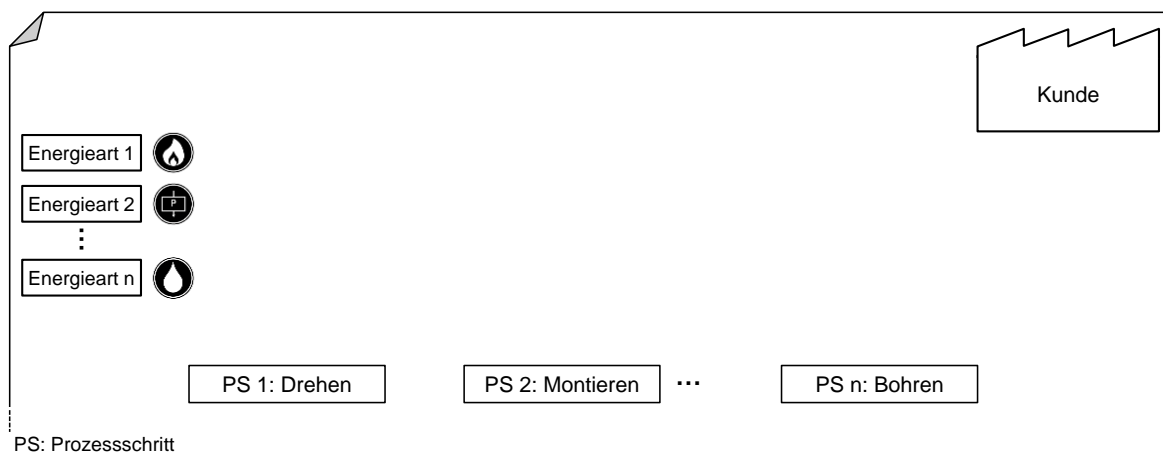




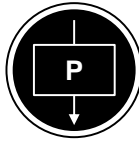




Abbildung 27: Darstellung des Kunden, der Prozesskette und der peripheren Energiearten

Symbole der Energiearten erhöhen die Anschaulichkeit und tragen zur Übersichtlichkeit bei. Die Symbole typischer, in produzierenden Unternehmen verwendeter Energiearten sind Tabelle 4 zu entnehmen (vgl. ENGELMANN 2009, S. 64). Sollten darüber hinaus weitere Energiearten auftreten, so können diese beliebig ergänzt werden.

<sup>9</sup> Übersichtlichkeit ist im Normalfall gegeben, wenn die Anzahl der Prozessschritte auf einem DIN A3 Blatt im Querformat horizontal verteilt aufgezeichnet werden kann.



Tabelle 4: Symbole der Energiearten der Automobilproduktion

						
Elektrische Energie	Kühlwasser	Druckluft	Öl	Erdgas	Kühlschmierstoffe	weitere

Da die elektrische Energie im Normalfall in allen Prozessschritten zum Einsatz kommt (außer es handelt sich um einen rein manuellen Prozessschritt), wird sie nicht gesondert aufgeführt. Gemäß ERLACH & WESTKÄMPER (2009, S. 22) ist bei der Auswahl der zu berücksichtigenden peripheren Energiedaten auf einen eindeutigen Produktionsbezug zu achten. Energiebedarfe die bspw. durch die Klimatisierung oder Beleuchtung der Fabrikhallen entstehen und nicht direkt einer Produktionsprozesskette zuzuordnen sind, werden nicht betrachtet. Für Energiearten wie z. B. Kühlwasser und Druckluft wird die elektrische Energie betrachtet, die zu deren Bereitstellung benötigt wird (z. B. Energiebedarf des Druckluftkompressors). Energiearten, die dezentral für einen einzelnen Prozessschritt erzeugt werden, werden an dieser Stelle zunächst nicht aufgenommen, finden jedoch während der Energiedatensammlung Berücksichtigung. Der eigentliche Teilelieferant der Prozesskette ist für Fragestellungen der Energieverschwendung von geringer Bedeutung und wird daher aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht aufgeführt.

### 4.3.3 Aufnahme der Produktionsdaten

Wie bereits beschrieben, werden dem Anwender des originären Wertstromdesigns viele Freiräume bei der Wahl der aufzunehmenden Produktionsdaten gestattet. Auch die hier vorgestellte energieorientierte Wertstromanalyse stellt es dem Anwender frei, für individuelle Fälle weitere – an dieser Stelle nicht berücksichtigte – Daten aufzunehmen. Der Ansatz gibt jedoch einen Produktionsdatensatz vor, der zwingend aufgenommen werden muss. Dieser Datensatz kann fast vollständig aus dem zuvor erarbeiteten GPS-Wirkgefüge abgeleitet werden und wird für die weiteren Schritte der Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendung in GPS benötigt.

Zunächst werden exogene Größen unterhalb des Fabriksymbols eingetragen (Tabelle 5). Der Tagesbedarf entspricht der durch den Kunden geforderte Menge an Produkten. Darunter werden die Anzahl der Varianten innerhalb der Produktfamilie, die Pausenzeit, die tägliche Produktionslaufzeit und die Taktzeit angegeben. Es

folgt der Kundentakt, der gemäß Formel (2-11) aus Tagesbedarf und täglicher Arbeitszeit ermittelt wird.<sup>10</sup> Sollten mehr als eine Variante in der Produktfamilie enthalten sein, werden die Tagesbedarfe der einzelnen Varianten darunter angegeben. Die Daten können bei Mitarbeitern der Produktionsplanung abgefragt oder einem Betriebsdatenerfassungssystem (BDE) entnommen werden (KLETTI & SCHUMACHER 2011, S. 16 ff.).

Die Kenngröße Taktzeit ist kein Bestandteil des GPS-Wirkgefüges. In einer unterbrechungsfreien, perfekten Produktion entspricht die Taktzeit dem Kundentakt. An dieser Stelle sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Taktzeit in der Praxis stets kürzer angesetzt wird als der Kundentakt, da sie Störungen bereits berücksichtigt. Anderenfalls würde der dem Tagesbedarf entsprechende Produktionsausstoß im Normalbetrieb nicht erreicht werden (ERLACH 2010B, S. 109).

Die exogene Größe *Anfangsbestand* entspricht im Normalfall dem mittleren *Umlaufbestand* und wird prozessschrittspezifisch ermittelt. Sie wird daher nicht im Datenkasten der exogenen Größen aufgenommen.

*Tabelle 5: Datenkasten der exogenen Größen*

Tagesbedarf (TB)	[Stk]
# Varianten (#Var)	
Pausenzeit (PZ)	[ZE]
tägl. Produktionslaufzeit (tPLZ)	[ZE]
Taktzeit (TZ)	[ZE/Stk]
Kundentakt (KT)	[ZE/Stk]
Variante 1 (Var 1)	[Stk]
Variante 2 (Var 2)	[Stk]
⋮	
Variante n (Var n)	[Stk]

Nach dem Eintragen der exogenen Größen in den Wertstrom folgt für jeden Prozessschritt die Aufnahme der entsprechenden Stellgrößen und endogenen Größen. Gemäß dem Vorbild des Ansatzes von SCHILLIG ET AL. (2013) wird die Zykluszeit des Prozessschrittes entsprechend der Wertschöpfung in ein bearbeitende und eine nicht-bearbeitende Zeit je Stück aufgeteilt. Für eine zustandsbasierte Energiedatenaufnahme ist diese Unterscheidung notwendig. Die Summe aus beiden Zeitenintervallen ergibt die Zykluszeit. Zusätzlich werden die Anzahl der Fertigungsmittel, der Produktionsmix, die Rüstdauer für einen durchschnittlichen Rüstvorgang, die Anlaufzeit zu Produktionsbeginn und die Wartungszeit des

<sup>10</sup> tägliche Arbeitszeit = tägliche Produktionslaufzeit - Pausenzeit

Prozessschrittes aufgenommen. ROTHER & SHOOK (2000, S. 12) empfehlen, bei der Datensammlung selbst in die Produktion zu gehen, um die Daten mit Hilfe von Stoppuhren bzw. durch Interviews mit Maschinenbedienern zu ermitteln.

Bei den endogenen Größen handelt es sich hauptsächlich um Verlustzeiten, die sich am Zeitmodell der OEE-Berechnung orientieren (vgl. Abbildung 11). Die unterschiedlichen Verlustarten sind nach Verfügbarkeits-, Zeit- und Qualitätsverlusten untergliedert und wurden im Abschnitt 2.2.4 bereits vorgestellt. Die Verlustzeit *Störung* ist im GPS-Wirkgefüge unter der Bezeichnung *ungeplante Betriebsstörzeiten* zu finden und setzt sich aus der Summe der organisatorischen und der technischen Störzeiten zusammen.

$$\text{ungepl. Betriebsstörzeiten} = \text{org. Störzeiten} + \text{technische Störzeit} \quad (4-5)$$

Organisatorische Störzeiten sind jegliche Art von Störungen des Prozessschrittes, die keine technische Ursache haben. Die endogene Größe *Zeit ohne Auftrag* muss an dieser Stelle nicht aufgenommen werden. Sie kann durch die Subtraktion aller bereits erfassten Zeitbausteine berechnet werden (vgl. Abbildung 11). Der zugehörige Datenkasten für Stellgrößen und endogene Größen ist in Tabelle 6 abgebildet.

Tabelle 6: Datenkasten der Stellgrößen und endogenen Größen

# Fertigungsmittel (#FM)		} Stellgrößen
Zykluszeit (ZZ)	[ZE/Stk]	
bearbeitende Zeit (bZ)	[ZE/Stk]	
nicht-bearbeitende Zeit (nbZ)	[ZE/Stk]	
Produktmix (MIX)	[Stk]	
Anlaufzeit (ALZ)	[ZE]	
Rüstdauer (RD)	[ZE]	
Wartungszeit (WZ)	[ZE]	
technische Störzeit (tZ)	[ZE]	} endogene Größen
organisatorische Störzeit (oZ)	[ZE]	
Kurzstillstands- & Langsamlaufzeit (K&L)	[ZE]	
Ausschuss- und Nacharbeitszeit (A&N)	[ZE]	

Zum Abschluss der Produktionsdatenaufnahme wird der Materialfluss zwischen den Prozessschritten inkl. der Umlaufbestände aufgenommen. Im Unterschied zur originären Wertstromanalyse müssen zusätzlich zum durchschnittlichen Puffer- bzw. Umlaufbestand auch der minimale und der maximale Umlaufbestand ermittelt werden. Diese Informationen sind im weiteren Verlauf der Methodik wichtig, um

das systemische Verhalten des Prozessschrittes abzubilden. Die Materialflusssymbole unterscheiden sich dagegen nicht. In Abbildung 28 ist der Wertstrom mitsamt Produktionsdaten dargestellt.

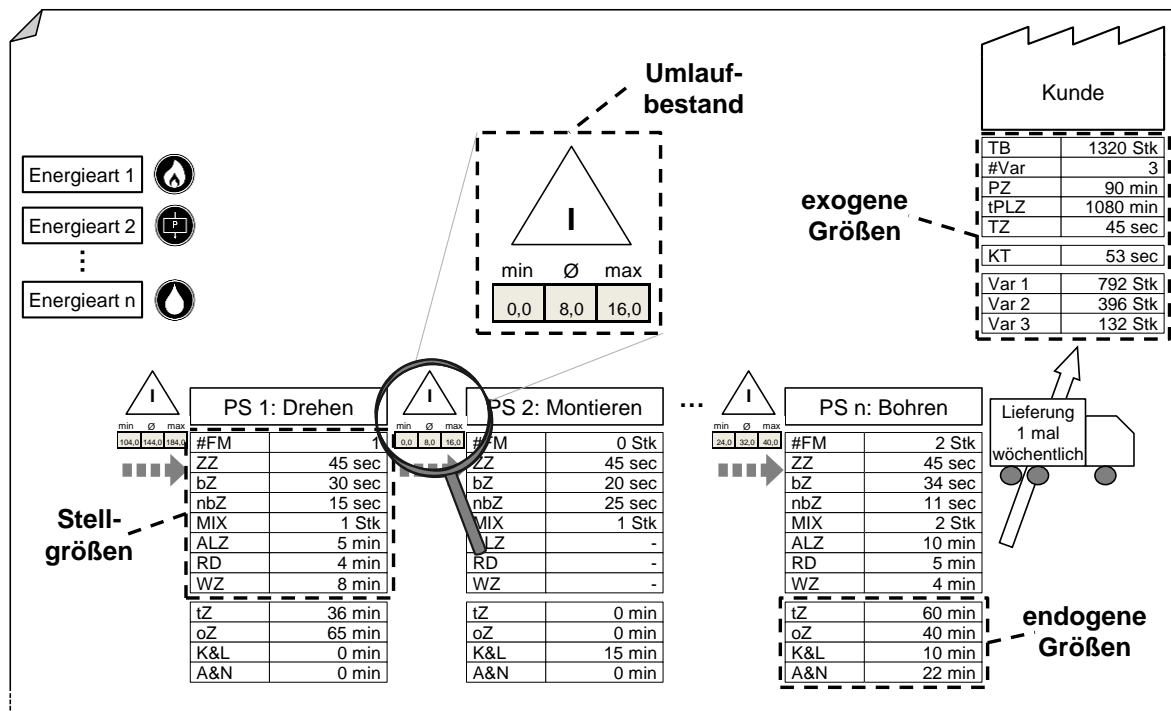


Abbildung 28: Ergänzung des Wertstroms um Produktionsdaten

### 4.3.4 Aufnahme der Energiedaten

Nach der Fertigstellung der Produktionsdatensammlung folgt nun die Erfassung von Energiedaten. Unter Beachtung der in Abschnitt 3.1 festgelegten Anforderungen wird zunächst eine zustandsbasierte Datenaufnahme auf Prozessschritzebene mit Hilfe einer Energiedatenmatrix durchgeführt. Anschließend müssen die bereits ermittelten unterschiedlichen Energiearten untersucht und bewertet werden.

Für die Erfassung von zustandsbasierten Energiedaten der Prozessschritte wird eine Strukturierung möglicher Betriebszustände benötigt. Da für diese Strukturierung kein einheitlicher Standard existiert (vgl. BUSCHMANN 2012, S. 130), wird auf Basis bestehender Ansätze (vgl. DIETMAIR ET AL. 2008, S. 641; GÖTZE ET AL. 2010, S. 164; BUSCHMANN 2012, S.131) eine eigene Strukturierung definiert, die in Tabelle 7 dargestellt ist. Die Strukturierung hält sich eng an den Ansatz von BUSCHMANN (2012). Es existieren jedoch zwei wesentliche Aspekte der Diversifizierung. Zunächst ist die Summe der Betriebszustände im Gegensatz zu bestehenden

Ansätzen nicht fest definiert. Sollte ein Prozessschritt aufgrund eines speziellen Fertigungsmittels zusätzliche, in der Strukturierung nicht berücksichtigte Betriebszustände einnehmen, können diese unter *sonstiger aktiver Zustand 1* bis *n* ergänzt werden.

Das zweite Unterscheidungsmerkmal ist die zusätzliche Definition von Zeitanteilen, die den Betriebszuständen in einer Matrix zugeordnet werden können. GÖTZE (2010, S. 164) führt diese Unterteilung ebenfalls durch, beschränkt sich dabei jedoch auf die Zeitanteile *Hauptzeit* und *Nebenzeit*. Diese zweite Dimension wird eingeführt, da die Fertigungsmittel der Prozessschritte teilweise während eines Zeitanteils zwischen unterschiedlichen Betriebszuständen wechseln. Ein Beispiel hierfür ist ein Bearbeitungszentrum (BAZ), das sich während einer organisatorischen Störung in einem Bereitschaftszustand befindet. Überschreitet die Störung eine definierte Zeitdauer, so wechselt das BAZ automatisch in einen energieintensiveren Warmhaltezustand, befindet sich jedoch immer noch im Zeitanteil der organisatorischen Störung.

*Tabelle 7: Strukturierung möglicher Betriebszustände inkl. Beispiele (in Anlehnung an BUSCHMANN 2012, S.131)*

#	Betriebszustand	Beispiel
1	produktionsfreier Zustand (pZ)	Freischicht, produktionsfreies Wochenende
2	Anlagenstillstand (AS)	Störung, Wartung, Zeit ohne Auftrag
3.1	arbeitender Zustand (aZ)	aktiver Schweißvorgang
3.2	fördernder Zustand (fZ)	geschweißtes Bauteil wird aus der Anlage gefördert
3.3	Bereitschaftszustand (BZ)	Wartezustand zwischen zwei Schweißvorgängen
3.4	sonstiger aktiver Zustand 1 (saZ 1)	Wechselvorgang der Schweißkappen
3.n	sonstiger aktiver Zustand n (saZ n)	...

Die zur Aufnahme der Energiedaten entwickelte Strukturierung von Zeitanteilen orientiert sich am bereits vorgestellten Zeitmodell der OEE-Berechnung (vgl. Abbildung 11). Durch dieses Zeitmodell werden sämtliche Zeitanteile der täglichen Produktionslaufzeit definiert. Die Strukturierung der Zeitanteile ist in Abbildung 29 dargestellt.

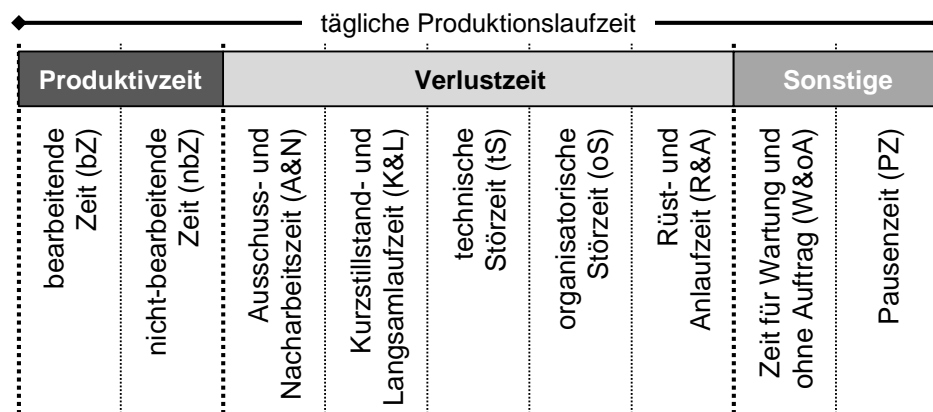


Abbildung 29: Strukturierung der Zeitanteile der täglichen Produktionslaufzeit<sup>11</sup>

Die Zeitanteile sind in Form von Kenngrößen im GPS-Wirkgefüge zu finden. Der Übersichtlichkeit wegen werden einige Kenngrößen sinnvoll zu einem Zeitanteil zusammengefasst. Dies gilt für die *Rüst- und Anlaufzeit* und für die *Zeit für Wartung und ohne Auftrag*. Die Leistungsbedarfe während Ausschuss- und Nacharbeitszeiten sind identisch, da im Normalfall erst nach der Bearbeitung ein Qualitätsmangel festgestellt wird, der zur Nacharbeit oder zur Deklaration als Ausschuss führt. Leistungsbedarfe für Rüst- und Anlaufzeiten werden zusammengefasst, da beide Zeiten aus planbaren Unterbrechungen resultieren. Ihre Leistungsbedarfe können als prozentual gewichteter Mittelwert angegeben werden. Wartungsvorgänge werden außerhalb der Produktivzeit durchgeführt und können daher mit Zeiten ohne Produktionsauftrag zusammengelegt werden.

Abbildung 30 zeigt das schematische Energieprofil eines BAZ im Leistungs-Zeit-Diagramm. Durch die Analyse des Diagramms können die Betriebszustände des Fertigungsmittels und die Zeitanteile des Prozessschrittes ermittelt werden. Jedem Betriebszustand wird ein Durchschnittswert des entsprechenden Leistungsbedarfs in Kilowatt bzw. Watt zugeordnet. Wie aus dem Beispiel ersichtlich wird, können einem Zeitanteil mehrere, verschiedene Betriebszustände zugeteilt werden. Zudem ist es möglich, dass ein Betriebszustand in unterschiedlichen Zeitanteilen vorkommt.

<sup>11</sup> Die schematische Abbildung impliziert eine gleichmäßige Verteilung der verschiedenen Zeitanteile. Dies entspricht nicht der allgemeinen Praxiserfahrung, in der die Produktivzeit den größten Anteil der täglichen Produktionslaufzeit ausmachen sollte (vgl. WIENDAHL & HEGENSCHIEDT 2012, S. 341).

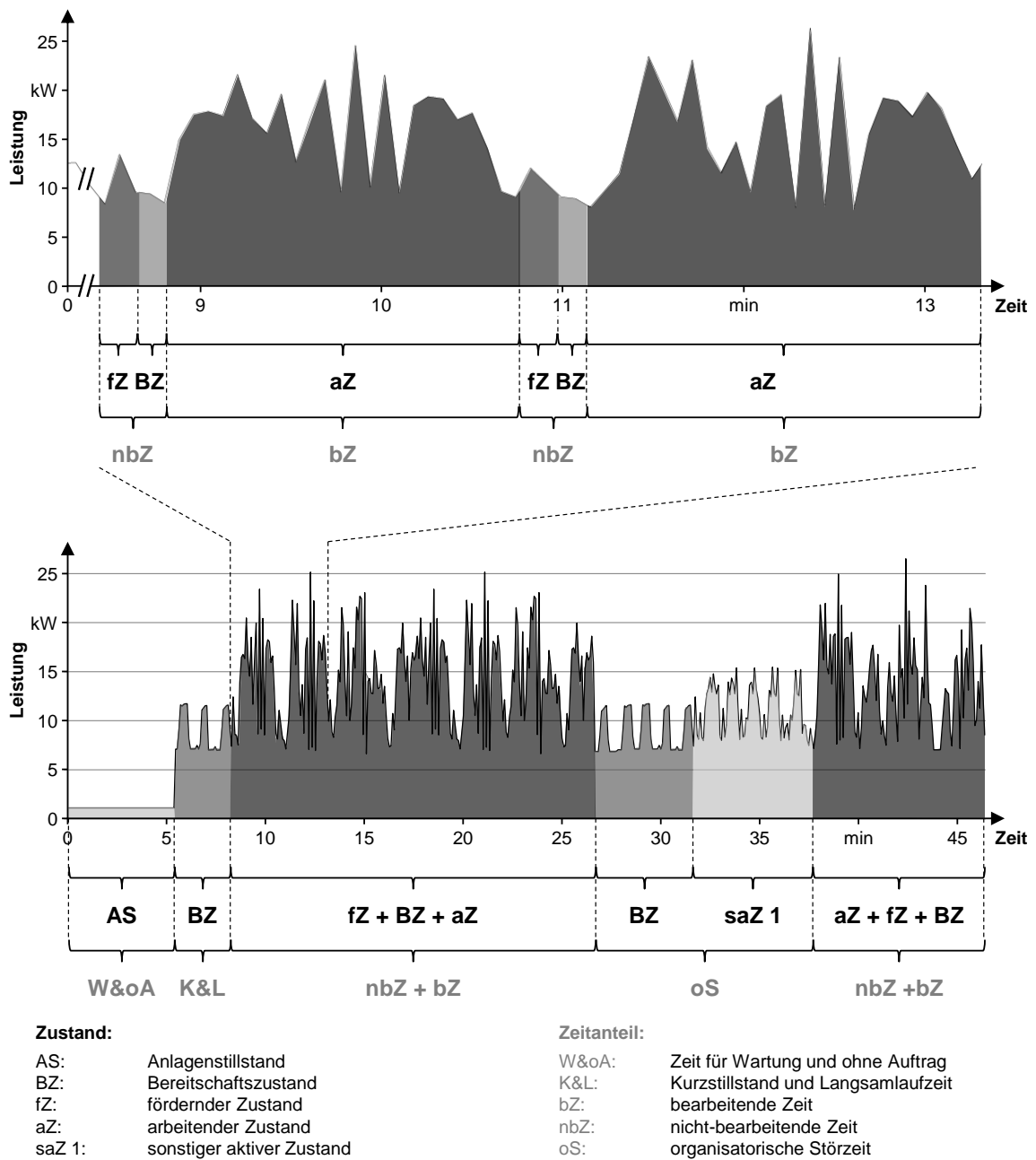


Abbildung 30: Schematisches Energieprofil eines BAZ im Leistungs-Zeit-Diagramm

Durch die Zusammenführung der zustandsbasierten und der zeitlichen Strukturierungen in einer Matrix, ist es möglich, ein exaktes Energieprofil des Prozessschrittes über die tägliche Produktionslaufzeit abzubilden. Mit Hilfe dieser Energieprofile kann nun die prozentuale Verteilung der Betriebszustände auf die Zeitanteile ermittelt und in der Energiedatenmatrix erfasst werden. Eine beispielhafte Darstellung ist Tabelle 8 zu entnehmen.

Tabelle 8: Schematisches Beispiel einer Energiedatenmatrix inkl. der prozentualen Verteilung der Betriebszustände auf die Zeitanteile

		bZ	nbZ	A&N	K&L	tS	oS	R&A	W&oA	PZ	Leistung [Watt]
1	pZ	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
2	AS	0%	0%	0%	0%	100%	0%	100%	100%	0%	
3.1	aZ	100%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
3.2	fZ	0%	60%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
3.3	BZ	0%	40%	0%	100%	0%	60%	0%	0%	100%	
3.4	saZ 1	0%	0%	0%	0%	0%	40%	0%	0%	0%	
3.5	saZ 2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
3.6	saZ 3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	

**Erläuterung:**

- während der nicht-bearbeitenden Zeit befindet sich das Fertigungsmittel des Prozessschrittes zu 60% im fördernden Zustand und zu 40% im Bereitschaftszustand
- während der organisatorischen Störzeit befindet sich das Fertigungsmittel zu 60% im Bereitschaftszustand und zu 40% in einem Warmhaltezustand

Nach der Zuordnung der Betriebszustände zu den Zeitanteilen müssen die Leistungsbedarfe der Betriebszustände erfasst werden. Die in der Energiedatenmatrix einzutragenden Leistungsbedarfe der rechten Spalte entsprechen der Summe der Leistungsbedarfe aller, dem Prozessschritt zugeordneten Energiearten. Im Wertstrom findet daher nun eine Zuordnung der zu Beginn ermittelten Energiearten zu den Prozessschritten statt. Dazu werden die den Energiearten entsprechenden Symbole über den Prozessschritten eingezeichnet. Durch die anschließende Verbindung der Symbole der Energielieferanten mit den Symbolen der Prozessschritte entsteht ein übersichtliches Netz der Energieflüsse. Verfügt ein Prozessschritt über eine dezentrale Energieversorgung für eine oder mehrere Energiearten, so wird diese über dem Prozessschritt eingezeichnet. Ein Pfeil über dem Energiesymbol kennzeichnet die dezentrale Versorgung.

Zur Messung der Leistungsbedarfe durch Fluide und Gase kommen Durchflussmessgeräte zum Einsatz (vgl. REINHART ET AL. 2010, S. 872 f.). Die bei der Durchflussmessung erfassten Werte werden im Normalfall im Verhältnis Volumen pro Zeiteinheit (z. B. in [m<sup>3</sup>/min]) angegeben und müssen anschließend in [Wh/min] bzw. in [W] umgerechnet werden, um eine Aggregation zu einem Gesamtwert elektrischer Leistung für einen Betriebszustand zu ermöglichen. Am Beispiel der Energieart Druckluft wird das entsprechende Berechnungsprinzip verdeutlicht. Druckluftkompressoren wandeln Endenergie in Nutzenergie in Form von Druckluft um. Zur Messung des elektrischen Leistungsbedarfs  $P_{DL}$ , der durch die Verwendung von Druckluft im arbeitenden Zustand entsteht, wird zunächst der Energiebedarf der Kompressoren zur Erzeugung der Druckluft über einen längeren Zeitraum (z. B. 1 Jahr) in [Wh/ZE] und das in diesem Zeitraum durch die Kompressoren erzeugte Normvolumen in der Einheit [m<sup>3</sup>/ZE] erfasst. Aus diesen beiden Werten ist eine



Berechnung des Medienfaktors  $M_{DL}$  möglich, der das Verhältnis aus dem Energiebedarf und dem Druckluftvolumen angibt. Durch die anschließende Durchflussmessung des spezifischen Normvolumenbedarfs  $N_{spez}$  im Prozessschritt kann die Umrechnung auf den elektrischen Leistungsbedarf  $P_{DL}$  in [W] erfolgen:



$$P_{DL} = M_{DL} \cdot N_{spez} \quad (4-6)$$

mit

$M_{DL}$ : Medienfaktor Druckluft in [Wh/m<sup>3</sup>]

$N_{spez}$ : Normvolumenbedarf in [m<sup>3</sup>/ZE]

Nach diesem Prinzip funktioniert auch die Berechnung der Leistungsbedarfe weiterer Energiearten, die nicht direkt im Prozessschritt gemessen werden können. Im Fall einer dezentralen Energieversorgung gilt das Prinzip zur Berechnung der Leistungsbedarfe unverändert, wird jedoch dadurch vereinfacht, dass dem Prozessschritt der gesamte Energiebedarf des dezentralen Versorgers (z. B. Druckluftkompressor) zugeordnet werden kann. Die Summe der Leistungsbedarfe aller während eines Betriebszustands benötigten Energiearten wird in die Energiedatenmatrix eingetragen. Optional können rechts neben der Energiedatenmatrix die Summanden jeder Energieart aufgeführt und mit dem entsprechenden Symbol versehen werden (Abbildung 31). Aus Platzgründen bietet sich jedoch eine separate Dokumentation außerhalb der Wertstrom-Zeichnung an.

		bZ	nbZ	A&N	K&L	tS	OS	R&A	W&oA	PZ	Leistung [Watt]		
1	pZ	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-	-	-
2	AS	0%	0%	0%	0%	100%	0%	100%	100%	0%	1.400	1.200	200
3.1	aZ	100%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	16.200	14.700	1.500
3.2	fZ	0%	60%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	10.600	8.900	1.700
3.3	BZ	0%	40%	0%	100%	0%	60%	0%	0%	100%	8.700	8.500	200
3.4	saZ 1	0%	0%	0%	0%	0%	40%	0%	0%	0%	12.700	11.200	1.500
3.5	saZ 2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-	-	-
3.6	saZ 3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-	-	-




  
  
 optional

Abbildung 31: Beispiel einer Energiedatenmatrix inkl. Leistungsbedarfe der unterschiedlichen Energiearten

## 4 Entwicklung der Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendung in GPS

Zwischen dem Produktionsdatenkasten und der Energiedatenmatrix wird zudem zusätzlich ein Feld für die Prozesstemperatur eines Prozessschrittes eingefügt. Die entsprechenden Temperaturen können an installierten Thermometern direkt am Fertigungsmittel abgelesen oder mit Hilfe geeigneter Messgeräte (z. B. einer Thermographie-Kamera oder einem Multimeter mit Thermofühler) erfasst werden. Sie geben Hinweise auf Abwärmepotenziale (REINHART ET AL. 2010, S. 873). Der um Energiedaten erweiterte Wertstrom kann Abbildung 32 entnommen werden.

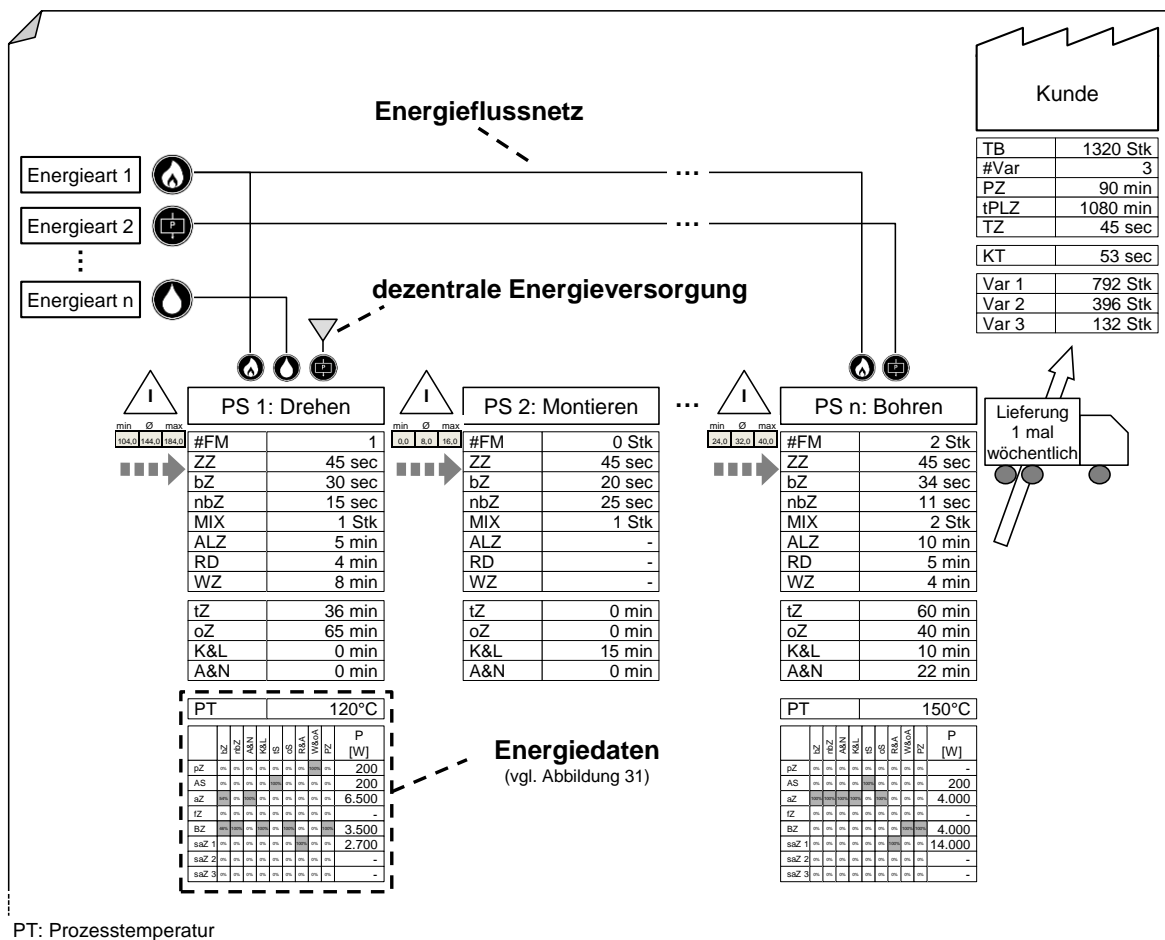


Abbildung 32: Ergänzung des Wertstroms um Energiedaten

### 4.3.5 Datenauswertung

Nach Vervollständigung der Datenaufnahme findet abschließend eine Auswertung der Produktions- und Energiedaten statt. Bei den Daten handelt es sich um Durchschnittswerte, die mit überschaubarem Aufwand ermittelt werden können.

Wie in Abschnitt 2.2.4 beschrieben, werden zunächst die Durchlaufzeiten entsprechend dem originären Wertstromdesign nach dem Prinzip der Warteschlangentheorie nach Formel (2-12) berechnet und auf einer oszillierenden Linie unterhalb der Umlaufbestände erfasst. In die Berechnung der Durchlaufzeiten gehen die durchschnittlichen Umlaufbestände ein. Die bearbeitende Zeit wird unterhalb der Prozessschritte eingetragen. Durch die Addition der Durchlaufzeiten und der bearbeitenden Zeiten pro Prozessschritt lassen sich die Prozesskettenwerte berechnen. Sie werden am Ende der oszillierenden Linie erfasst. Auch die GPS-Zielgrößen OEE-Wert, Qualitätsgrad und EPEI-Wert können auf Basis der erfassten Produktionsdaten nach den in Abschnitt 2.2.4 erläuterten Gleichungen berechnet werden. Zur Wahrung der Übersichtlichkeit werden sie jedoch separat dokumentiert und sind nicht Bestandteil der Wertstromzeichnung.

Abschließend führt der Anwender eine Berechnung der Energieintensitäten durch. Für die zustandsbasierte Berechnung der in einem Prozessschritt eingesetzten Energie müssen zunächst die Leistungsbedarfe aller, während eines Zeitanteils auftretenden Betriebszustände mit ihren jeweiligen prozentualen Anteilen am Zeitanteil multipliziert werden. Durch die Multiplikation des Zeitanteils mit dem ermittelten gewichteten Leistungsbedarf wird die Energie berechnet, die während des Zeitanteils eingesetzt wird. Aus der Summe dieser Energien lässt sich die gesamte eingesetzte Energie des Prozessschrittes berechnen. Diese ist anschließend durch die Anzahl fehlerfreier Einheiten zu dividieren, um die Energieintensität des Prozessschrittes zu erhalten. Die dazu notwendigen Energiedaten können der Energiedatenmatrix entnommen werden:

$$EI_n = \frac{\sum_{i=1}^r (T_i \cdot \sum_{j=1}^s (BZ_j \cdot P_j))}{pT_n} \quad (4-7)$$

mit

$EI_n$ :	Energieintensität des Prozessschrittes n in [Wh/Stk]
r:	Anzahl der Zeitanteile pro tägl. Produktionslaufzeit
$T_i$ :	Zeitanteil i in [h]
s:	Anzahl der Betriebszustände im Prozessschritt
$BZ_j$ :	prozentualer Anteil des Betriebszustands j in [%]
$P_j$ :	Leistungsbedarf des Betriebszustands j in [W]
$pT_n$ :	produzierte Teile im Prozessschritt n in [Stk]

#### 4 Entwicklung der Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendung in GPS

Die pro Prozessschritt berechneten Energieintensitäten werden im Wertstrom unterhalb der bearbeitenden Zeiten eingetragen. Äquivalent zur Durchlaufzeit werden Energieintensitäten der Prozessschritte zu einem Gesamtwert der Prozesskette summiert und am Ende der oszillierenden Linie eingezeichnet.

Während der Datenaufnahme und -auswertung bekommt der Anwender bereits einige Hinweise auf Energieverschwendung. Eine strukturierte Maßnahmenableitung ist zu diesem Zeitpunkt nicht möglich, jedoch sollten jegliche vermuteten Potenziale zur Reduzierung von Energieverschwendung mit Hilfe der in Abschnitt 2.2.5 eingeführten Kaizen-Blitze im Wertstrom visualisiert werden (vgl. ERLACH & WESTKÄMPER 2009, S. 80 f.). Das beispielhafte Ergebnis der energieorientierten Wertstromanalyse kann Abbildung 33 entnommen werden.

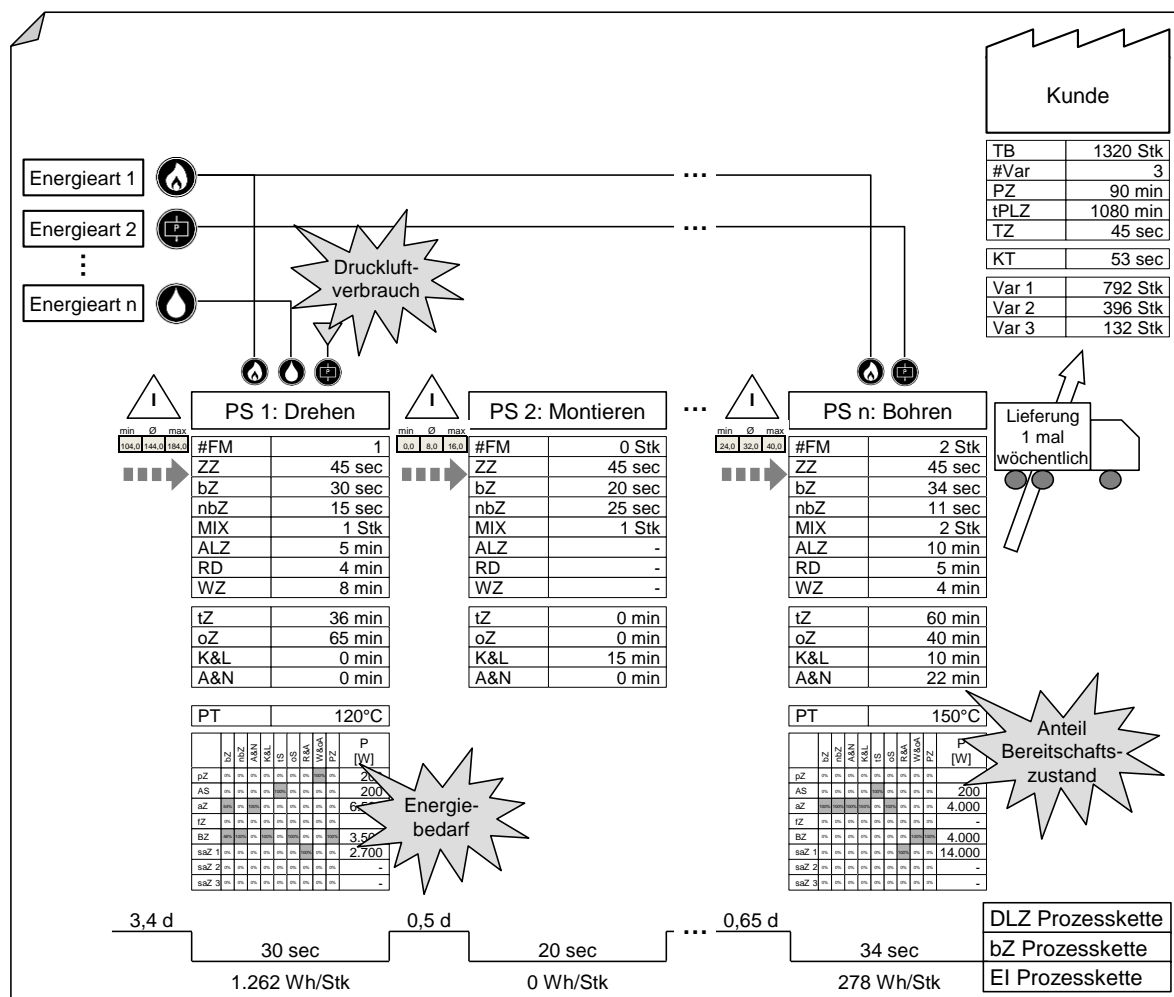


Abbildung 33: Vollständige Darstellung des energieorientierten Wertstroms inkl. Energieverschwendungspotenzialen

## 4.4 Generierung von Energieeffizienz-Maßnahmen

### 4.4.1 Ableitung von Energieeffizienz-Handlungsansätzen

Mit Hilfe der energieorientierten Wertstromanalyse werden sowohl Produktions- als auch Energiedaten transparent. Zudem weisen Kaizen-Blitze auf mögliche Potenziale zur Reduzierung von Energieverschwendung hin. Basierend auf diesen Informationen wird eine Vorgehensweise zur Generierung von Energieeffizienz-Maßnahmen abgeleitet. Zu diesem Zweck werden zunächst allgemeingültige Energieeffizienz-Handlungsansätze definiert, die bei der Generierung von Maßnahmen unterstützen. Da die Untersuchung der Auswirkungen der Maßnahmen auf GPS-Zielgrößen ein wichtiger Bestandteil der Methodik ist, werden die Maßnahmen anschließend hinsichtlich ihres energetischen Ansatzes und ihrer Strukturebene bewertet und quantifiziert.

Die Literatur bietet keine eindeutige Definition des Begriffs *Handlungsansatz*. Die Herleitung einer gültigen Definition wird daher über die Bedeutung der Begriffe *Handlung* und *Ansatz* erreicht. Eine Handlung ist eine „[bewusst ausgeführte] Tat“ (DUDEN 2014A). Das Synonym einer Tat ist eine Aktion oder eine Maßnahme. Ein Ansatz wird definiert als „erstes sichtbares Zeichen“ – also sinngemäß als *Anzeichen* bzw. *Anhalts-* oder *Ausgangspunkt* (DUDEN 2014B). Sprachlich gesehen wird eine Maßnahme nicht ausgeführt, sondern umgesetzt. Ein Energieeffizienz-Handlungsansatz ist folglich definiert als *Ausgangspunkt zur Umsetzung einer Energieeffizienz-Maßnahme*. Handlungsansätze sollten daher allgemeingültig formuliert sein, um für verschiedene Fertigungsbereiche einsetzbar zu sein. Daraus abgeleitete Maßnahmen wiederum sind Spezifizierungen für individuelle Fälle.

Zur einmaligen Ableitung allgemeingültiger Energieeffizienz-Handlungsansätze für die Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendung in GPS wird die in Abbildung 34 vorgestellte Vorgehensweise angewandt. Mit Hilfe einer Literaturrecherche werden im ersten Schritt bestehende Handlungsansätze gesammelt. Für die Recherche sind Literaturquellen mit Produktionsmanagement- oder Produktionstechnikbezug relevant, die sich mit allgemeinen Handlungsansätzen zur Reduzierung von Energieverschwendung beschäftigen. Handlungsansätze werden in der Literatur dabei häufig auch als *Ansatzpunkte*, *Maßnahmenkategorien*, *Gestaltungsrichtlinien*, *etc.* bezeichnet. Entscheidend ist die Allgemeingültigkeit der Ansätze.

Im nächsten Schritt werden Ausschlusskriterien zur Reduktion der recherchierten Handlungsansätze festgelegt. Die Kriterien leiten sich aus der Spezifizierung des Betrachtungsraums der Arbeit (vgl. Abschnitt 1.2) und den Anforderungen an die Methodik ab (vgl. Abschnitt 3.1). Danach muss zunächst eine Anwendbarkeit des Handlungsansatzes in einer Prozesskette gewährleistet sein, die nach dem Prinzip der Fließfertigung aufgebaut ist. Energieeffizienz-Maßnahmen, die anhand des Handlungsansatzes abgeleitet werden, müssen außerdem während der Betriebsphase im Sinne eines KVP möglich sein. Zudem werden nur Handlungsansätze betrachtet, die den Fokus auf die dem Unternehmen zur Verfügung stehenden End- bzw. Nutzenergie legen. Wirkungsgradverbesserungen bei der Umwandlung von Primär- in Sekundärenergie oder verlustarme Transporte von Sekundärenergie sind Ansätze, die außerhalb der betrachteten Systemgrenze liegen und daher keine Berücksichtigung finden. Darüber hinaus werden nur Handlungsansätze betrachtet, die eine Reduzierung des Energiebedarfs bzw. der Energieverschwendung anstreben. Handlungsansätze zur Lastspitzenglättung oder zur Erhöhung des Produktionsausstoßes bei unverändertem Energiebedarf sind aus bereits erläuterten Gründen nicht relevant (vgl. Abschnitte 2.1.3 und 2.1.4). Das letzte Ausschlusskriterium leitet sich aus der Kategorisierung von Energieeffizienz-Maßnahmen ab (vgl. Abschnitt 2.1.5). Demnach kommen nur Handlungsansätze mit technischem Ansatz infrage. Die nach der Reduktion verbleibenden Handlungsansätze werden im letzten Schritt der Vorgehensweise klassifiziert und gebündelt. Anschließend erfolgt durch die Selektion die finale Auswahl der allgemeingültigen Energieeffizienz-Handlungsansätze.

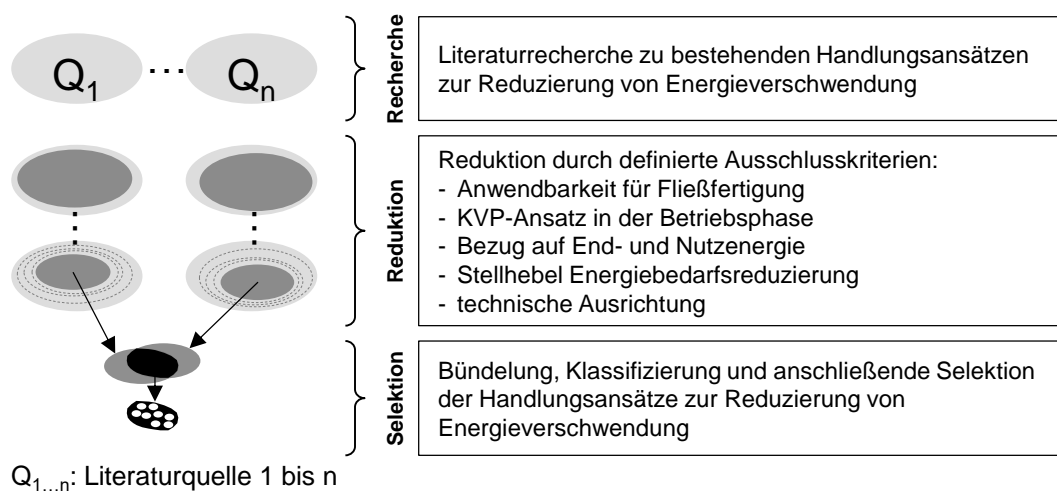


Abbildung 34: Vorgehensweise zur Ableitung von Energieeffizienz-Handlungsansätzen (in Anlehnung an ULLMANN 2009)

In Abbildung 35 sind die abgeleiteten Energieeffizienz-Handlungsansätze inklusive ihrer Berücksichtigung in den ausgewählten Literaturquellen dargestellt. Im nachfolgenden Abschnitt werden die einzelnen Handlungsansätze beschrieben.

	Energieeffizienz-Handlungsansätze							
	Rückgewinnung/ Weiterverwendung	Komponentenaddition/ -substitution/-reduktion	Prozessschrittinte- gration/- substitution	energieorientierte Instandhaltung	energieorientierte Transporte und Wege	energetisch optimaler Betriebspunkt	energieorientierte Auslastung	bedarfsgerechte Energieversorgung
Symbol								
Borch et al. 1986	●	○	●	●	○	○	○	○
Binding 1988	●	○	○	○	○	○	○	○
VDI 3922 1998	●	○	○	●	○	●	●	○
Schieferdecker et al. 2006	●	○	○	●	○	○	○	○
Prognos 2007	●	●	●	●	○	○	○	●
Engelmann 2009	●	●	○	●	○	○	●	○
Erlach & Westkämper 2009	●	○	○	●	○	●	○	●
Müller et al. 2010	○	○	○	●	●	○	●	○
Abele et al. 2010	●	●	○	●	○	○	●	●
Neugebauer et al. 2010	●	○	○	○	○	●	○	●
Weinert 2010	○	○	●	●	○	●	●	○
Müller et al. 2011	●	●	○	●	●	●	●	●
Reinhart et al. 2011A	●	○	○	○	●	●	○	○
Reinema et al. 2011	●	●	○	○	○	●	●	○
Thiede 2011	○	●	○	○	○	○	○	○
Abele & Beckmann 2012	●	●	●	●	○	○	●	●
Hesselbach 2012	●	●	○	○	○	●	○	●
Böhner 2013	○	●	○	○	○	●	○	○

Abbildung 35: Aus Literaturquellen abgeleitete Energieeffizienz-Handlungsansätze

Von insgesamt 40 untersuchten Quellen enthielten 18 Quellen insgesamt 188 Handlungsansätze. Nach Durchführung der Reduktion blieben 91 Handlungsansätze übrig, aus welchen nach einer Klassifizierung und Bündelung acht allgemeingültige Energieeffizienz-Handlungsansätze selektiert wurden.

#### 4.4.2 Erläuterung der Energieeffizienz-Handlungsansätze

##### Handlungsansatz: Rückgewinnung/Weiterverwendung

Unter diesem Handlungsansatz werden alle Aktionen zusammengefasst, die sich mit der Verwertung nutzbarer Energieverluste beschäftigen (SCHIEFERDECKER ET AL. 2006, S. 200). Neben der mechanischen Rückgewinnung von Bremsenergie, z. B.

aus elektrischen Antrieben (PROGNOS 2007, S. 105), bestehen Potenziale zur Reduzierung von Energieverschwendung hauptsächlich durch die Wiederverwendung von Wärme- oder Kälteverlusten und durch die nachhaltige Isolation von Leitungen oder Fertigungsmitteln (MÜLLER ET AL. 2009, S. 127). Darüber hinaus ist auch die Speicherung von aktuell nicht benötigter Nutzenergie zur späteren Nutzung bei Bedarf möglich (BORCH ET AL. 1986, S. 62).

Während der energieorientierten Wertstromanalyse können z. B. hohe Prozesstemperaturen auf Potenziale zur Anwendung des Handlungsansatzes *Rückgewinnung/Weiterverwendung* hinweisen.

### **Handlungsansatz: Komponentenaddition/-substitution/-reduktion**

Dieser Handlungsansatz steht für den Austausch, die Ergänzung oder die Eliminierung einzelner Komponenten in Fertigungsmitteln. Ziel ist die Verbesserung des Wirkungsgrads im Prozessschritt (HESSELBACH 2012, S. 287). Mögliche Aktionen sind z. B. der Austausch typischer Komponenten wie Pumpen, Ventilatoren, Kompressoren usw. (ERLACH & WESTKÄMPER 2009, S. 54) oder die Installation von Frequenzumrichtern zur Steigerung des Wirkungsgrads durch Drehzahlregulierung (PROGNOS 2007, S. 106).

Im energieorientierten Wertstrom ist ein hoher Leistungsbedarf im Bereitschaftszustand eines Prozessschrittes ein Indiz für Potenziale zur *Komponentenaddition/-substitution/-reduktion*.

### **Handlungsansatz: Prozessschrittintegration/-substitution**

Dieser Handlungsansatz steht einerseits für die Zusammenfassung mindestens zweier Prozessschritte innerhalb einer Prozesskette zu einem Prozessschritt (Integration) (BINDING 1988, S. 73). Andererseits werden hier die Möglichkeiten des Ersetzens eines Prozessschrittes durch einen gleichwertigen Substituenten analysiert (Substitution) (BINDING 1988, S. 66). So können mehrere einzelne Bearbeitungsschritte bspw. durch ein Bearbeitungszentrum in einem Prozessschritt zusammengefasst werden. Eine solche Kombination wirkt sich zusätzlich positiv auf die Energiebedarfe der Transporte aus (ERLACH & WESTKÄMPER 2009, S. 60).

Ein hoher Anteil nicht-bearbeitender Zeit während der Zykluszeiten von aufeinanderfolgenden Prozessschritten ist ein Merkmal für mögliche Prozessschrittintegrationen im Wertstrom. Zur Untersuchung der Substitutionspotenziale sollte für energieintensive Prozessschritte ein zusätzliches Technologie-Screening durchgeführt werden. Generell sind die Möglichkeiten für die Integration bzw.



Substitution von Prozessschritten in der Betriebsphase begrenzt und müssen individuell geprüft werden.

### **Handlungsansatz: energieorientierte Instandhaltung**

Aufgrund ihres täglichen Umgangs mit Maschinen und Anlagen verfügen Instandhaltungsmitarbeiter über ein breites Fachwissen bezüglich deren technischer Eigenschaften. Eine Erweiterung ihres Tätigkeitsspektrums um energieorientierte Aspekte birgt Potenziale. Dieser Handlungsansatz steht folglich für die energetisch sinnvolle Pflege und Reparatur von Fertigungsmitteln. Beispiele sind die Vermeidung von Leckageverlusten durch regelmäßiges Überprüfen und Abdichten von Pneumatik- und Hydraulikleitungsnetzen und -schläuchen (MÜLLER ET AL. 2011) oder die Vermeidung von Effizienzverschlechterungen durch Komponentenverschleiß und erhöhte Reibung (WEINERT 2010, S. 28). Aus dem Handlungsansatz abgeleitete Maßnahmen sind entweder dem Bereich Wartung oder dem Bereich Instandsetzung zugeordnet (DIN 31051, S. 5-6).

Kennzeichen für mögliche Potenziale durch die energieorientierte Instandhaltung sind im Wertstrom z. B. in langen technischen Störzeiten zu finden. Außerdem sollten Prozessschritte untersucht werden, die leckageanfällige Energiearten wie Druckluft benötigen.

### **Handlungsansatz: energieorientierte Transporte und Wege**

In der Literatur wird der Fokus zur Reduzierung von Energieverschwendung häufig auf die bearbeitenden, wertschöpfenden Zeiten gelegt (vgl. SCHILLIG ET AL. 2013). Dieser Handlungsansatz steht für eine energieorientierte Gestaltung des gesamten Materialflusses der Prozesskette (REINHART ET AL. 2011A, S. 256). Beispiele für abgeleitete Maßnahmen sind der Einsatz von energiesparenden Fördertechniken und Schwerkrafttransporten, die Optimierung von Transportrouten bzw. -bündelung durch Schleppzugtransporte (MÜLLER ET AL. 2011, S. 7) oder die Reduzierung bzw. Optimierung von Greifwegen und Roboterbahnen sowie übrigen automatisierten Fahrwegen (MÜLLER ET AL. 2010, S. 555).

Im Wertstrom sind Potenziale für energieorientierte Transporte und Wege z. B. durch hohe prozentuale Anteile der fördernden Zustände in den Prozessschritten ersichtlich, die ein Anzeichen für hohe Transportaufwände sein können.

### **Handlungsansatz: energetisch optimaler Betriebspunkt**

Mit diesem Handlungsansatz wird das Bestreben verfolgt, Fertigungsmittel am energetisch optimalen Betriebspunkt zu betreiben (ERLACH & WESTKÄMPER 2009, S. 53). Dies bedeutet, dass die Bearbeitungsgeschwindigkeit während der bearbei-

tenden Zeit so auszulegen ist, dass der bestmögliche Wirkungsgrad erreicht wird. Während der nicht-bearbeitenden Zeit sollte die Energieintensität hingegen möglichst gering sein. Dazu müssen die Prozessparameter auf Einbeziehung von Sicherheitsreserven durch das Bedienpersonal überprüft und ggfs. angepasst werden (VDI 3922, S. 12). Beispiele für abgeleitete Maßnahmen sind die Einstellung der Bearbeitungsgeschwindigkeiten (NEUGEBAUER ET AL. 2010, S. 798) oder die Anpassung des Temperaturniveaus zur Erreichung des optimalen Betriebspunkts (HESSELBACH 2012, S. 287).

Im Wertstrom können Prozessschritte mit hohen Leistungsbedarfen während langen nicht-bearbeitenden Zeiten ein Hinweis für ein Potenzial zur Ausrichtung auf einen optimalen Betriebspunkt sein. Bei identischen Fertigungsmitteln, die innerhalb eines Prozessschrittes in paralleler Anordnung Teile bearbeiten, müssen Leistungsbedarfe verglichen werden. Unterschiede sind hier ebenfalls ein Indiz für Abweichungen vom optimalen Betriebspunkt.

### **Handlungsansatz: energieorientierte Auslastung**

Dieser Handlungsansatz steht für eine energetisch sinnvolle Auslastung von Fertigungsmitteln. Energetisch sinnvoll ist in diesem Kontext gleichbedeutend mit der Vermeidung von unproduktiven Betriebszeiten oder der Minimierung von belegten Maschinen. Eine mögliche Maßnahme ist die Bündelung von Produktionszeiten durch die Bildung von Fertigungsblöcken (ABELE & BECKMANN 2012, S. 262). RAGER (2008, S. 33) verweist auf die Möglichkeiten der Minimierung der Anzahl belegter Fertigungsmittel einer Maschinengruppe. Dies ist verbunden mit einer möglichst hohen Auslastung der Fertigungsmittel und der Verminderung von Leerlaufzeiten (vgl. VDI 3922, S. 12; REINHART ET AL. 2011B, S. 598).

Eine geringe Auslastung durch hohe Rüst- oder Wartungszeiten deutet im Wertstrom ebenso auf Potenziale zur energieorientierten Auslastung hin wie unterschiedlich ausgelastete identische Fertigungsmittel innerhalb eines Prozessschrittes.

### **Handlungsansatz: bedarfsgerechte Energieversorgung**

Der letzte Handlungsansatz beschreibt das Bestreben einer zeitlich, qualitativ und quantitativ bedarfsgerechten Versorgung der Fertigungsmittel mit End- bzw. Nutzenergie innerhalb des GPS. Gemäß dem im GPS bestehenden Pull-Prinzip sollen Prozessschritte nur dann mit Energie beliefert werden, wenn sie diese benötigen. Ein bedarfsgerechter Energieeinsatz kann z. B. durch Bewegungssensoren (ABELE & BECKMANN 2012, S. 262) oder die manuelle bzw. automatische

Abschaltung von Anlagen während Wartezeiten erreicht werden (PROGNOS 2007, S. 107). Darüber hinaus müssen auch die Peripherien hinsichtlich bedarfsgerechter Dimensionierung überprüft werden (z. B. Betriebsdruck des Druckluftnetzes) (MÜLLER ET AL. 2011, S. 7).

Im Wertstrom können lange Bereitschaftszeiten ein Zeichen für nicht bedarfsgerechten Energieeinsatz sein. Außerdem sollten hohe Leistungsbedarfe aus der peripheren Versorgung hinsichtlich des eigentlichen Bedarfs der Prozessschritte überprüft werden.

### **4.4.3 Positionierung im Energieeffizienz-Maßnahmenportfolio**

Mit Hilfe der Transparenz aus der energieorientierten Wertstromanalyse und den Energieeffizienz-Handlungsansätzen können nun individuelle Energieeffizienz-Maßnahmen generiert werden. Für jede Maßnahme ist die Kenntnis der durch ihre Umsetzung verursachten Veränderungen auf die Prozesskette notwendig, um in einem späteren Schritt der Methodik die Auswirkungen auf GPS-Zielgrößen zu prognostizieren. Elektrische Energie ist definiert als das Produkt der Faktoren Leistung und Zeit (vgl. Abschnitt 2.1.2). Dadurch ergeben sich verschiedene energetische Ansätze zur Reduzierung von Energieverschwendung. Jede umgesetzte Energieeffizienz-Maßnahme verursacht entweder eine leistungs- und/oder eine zeitbezogene Veränderung in der Prozesskette (Abbildung 36).

Rein leistungsbezogene Energieeffizienz-Maßnahmen bewirken eine Veränderung der Leistungsbedarfe der stationären Betriebszustände ohne Veränderungen der Zeitanteile. Ein Beispiel für eine leistungsbezogene Energieeffizienz-Maßnahme ist der Austausch des Antriebs eines Fertigungsmittels durch einen energieeffizienteren Antrieb mit besserem Wirkungsgrad. Der Austausch verursacht eine Reduzierung des Leistungsbedarfs im arbeitenden Zustand. Die zeitlichen Abläufe bleiben jedoch unverändert.

Rein zeitbezogene Energieeffizienz-Maßnahmen wirken sich auf die Zeitanteile der täglichen Produktionslaufzeit aus, ohne die Leistungsbedarfe der stationären Betriebszustände zu verändern. Als Beispiel sei an dieser Stelle ein Fertigungsmittel zu nennen, das sich während der nicht-bearbeitenden Zeit zunächst in einem Bereitschaftszustand befindet und nach einer vorgegebenen Zeit in einen Anlagenstillstand übergeht. Eine rein zeitbezogene Energieeffizienz-Maßnahme bewirkt nun ein früheres Umschalten vom Bereitschaftszustand in den Anlagenstillstand. Dadurch werden die Zeitanteile innerhalb der nicht-bearbeitenden Zeit verändert,

ohne jedoch den Leistungsbedarf der Betriebszustände zu ändern. Ein weiteres Beispiel ist die Reduzierung der Rüstzeiten eines Prozessschrittes. Handelt es sich bei dem Prozessschritt um einen Engpassprozessschritt, so könnte eine Reduzierung der Rüstzeiten dazu führen, dass der produzierte Tagesbedarf schneller erreicht wird. Dies wirkt sich dann zusätzlich auf die Zeit ohne Auftrag aus, deren Anteil am Ende des Fabriktages höher wird. Auch in diesem Beispiel findet keine Veränderung der Leistungsbedarfe der stationären Betriebszustände statt.

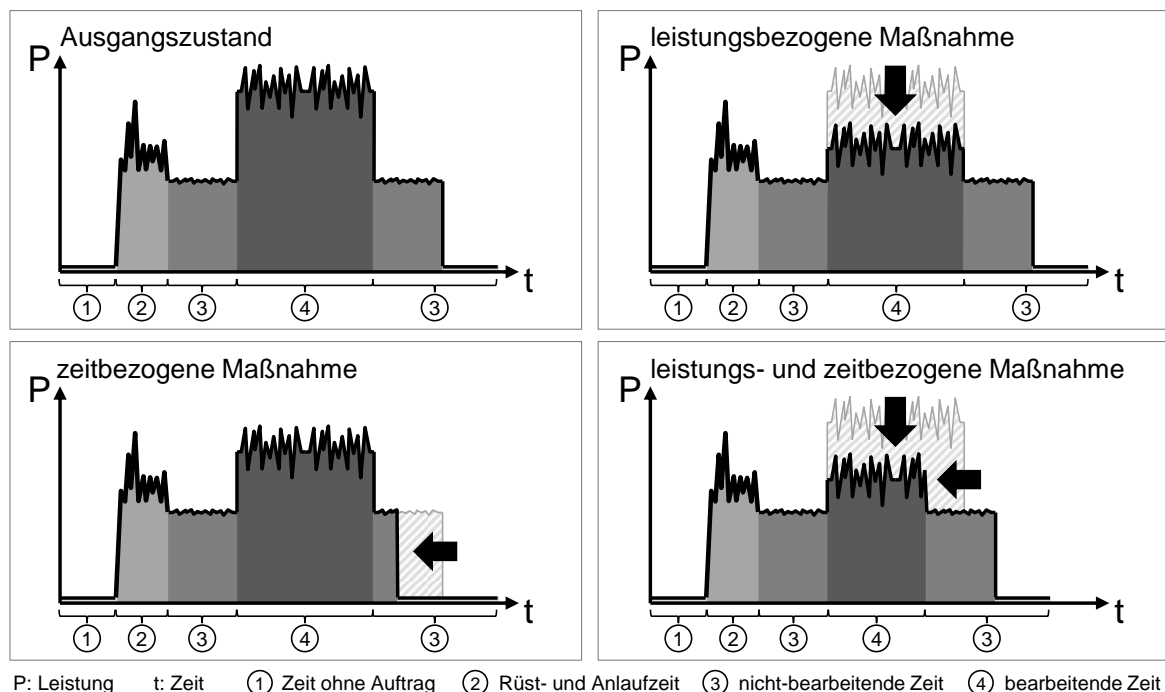


Abbildung 36: Energetische Ansätze von leistungs- bzw. zeitbezogenen Energieeffizienz-Maßnahmen

Häufig sind Energieeffizienz-Maßnahmen jedoch leistungs- und zugleich zeitbezogen und wirken sich dementsprechend auf die Prozesskette aus. Als Beispiel wird erneut der bereits beschriebene Antriebsaustausch herangezogen. Jedoch wird der Austausch zusätzlich mit einer Erhöhung der Bearbeitungsgeschwindigkeit kombiniert. Dies kann zu einer Verkürzung der bearbeitenden Zeit bei gleichzeitiger Verringerung des Leistungsbedarfs aufgrund des besseren Wirkungsgrads des neuen Antriebs führen.

Neben den Auswirkungen auf Leistung und Zeit können Energieeffizienz-Maßnahmen zusätzlich anhand der Strukturebene klassifiziert werden, auf der sie wirken. Wie in Abschnitt 2.2.3 erläutert, wird hierbei zwischen der Prozessschritt-

und der Prozesskettenebene unterschieden. Betrifft die Umsetzung einer Maßnahme nur einen einzelnen Prozessschritt, so wird diese auf Prozessschrittbene eingeordnet. Weitere Auswirkungen, die durch Wirkbeziehungen zur Prozesskette entstehen und vor der Umsetzung oft nicht absehbar sind, werden zunächst nicht berücksichtigt. Energieeffizienz-Maßnahmen, die sich direkt auf mehrere Prozessschritte auswirken, werden auf Prozesskettenebene eingeordnet.

Zur qualitativen Klassifizierung der abgeleiteten Maßnahmen ist in Abbildung 37 ein sog. Energieeffizienz-Maßnahmenportfolio dargestellt. Beispielhaft sind drei nicht näher erläuterte Maßnahmen im Portfolio positioniert. Die Abszisse des Koordinatensystems im Portfolio beschreibt den energetischen Ansatz einer Maßnahme. Da die GPS-Zielgrößen allesamt zeitabhängig sind (vgl. Abbildung 24), haben rein leistungsbezogene Maßnahmen ausschließlich direkte Auswirkungen auf die Zielgrößen Energieintensität. Allerdings ist eine indirekte Beeinflussung endogener Größen möglich. Ein neuer, energieeffizienterer Antrieb kann beispielsweise anfälliger für Ausfälle sein und somit Auswirkungen auf Störzeiten haben. Durch Studien oder Testreihen kann solchen Auswirkungen vor der Umsetzung vorgebeugt werden. Da sie jedoch in jedem Fall auf die Energieintensität wirken, wird rein leistungsbezogenen Maßnahmen im Energieeffizienz-Maßnahmenportfolio mindestens eine geringe Wahrscheinlichkeit für Auswirkungen auf GPS-Zielgrößen zugeordnet.

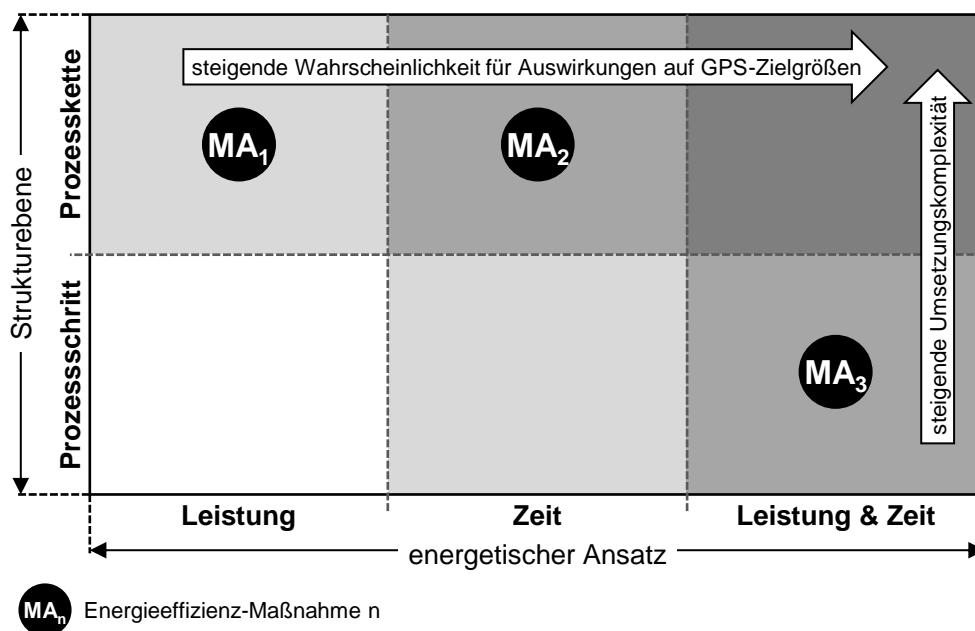


Abbildung 37: Energieeffizienz-Maßnahmenportfolio

Aufgrund ihrer zeitlichen Veränderungen wird die Wahrscheinlichkeit für Auswirkungen auf GPS-Zielgrößen für die Umsetzung zeitbezogener Maßnahmen im mittleren Bereich eingestuft. Auch bei dieser Art von Energieeffizienz-Maßnahmen sind indirekte Auswirkungen auf endogene Größen möglich. DIETMAIR & VERL (2010, S. 195 f.) erläutern z. B. Effekte, die das vorübergehende Abschalten von Anlagen auf die Produktqualität haben kann und bieten ein Vorgehen zur Ermittlung der kritischen Stillstandzeiten zur Vermeidung von Qualitätsverschlechterungen an. Mit einer hohen Wahrscheinlichkeit für Auswirkungen auf GPS-Zielgrößen werden Maßnahmen eingestuft, die sowohl leistungs- als auch zeitbezogen wirken und damit theoretisch die größten Veränderungen im System verursachen.

Die ordinale Achse beschreibt die Strukturebene des Energieeffizienz-Maßnahmenportfolios. Hierbei wird aus den bereits erläuterten Ebenen des Prozessschrittes und der Prozesskette eine Umsetzungscomplexität abgeleitet (vgl. REINHART ET AL. 2010, S. 874). Die Umsetzung einer Maßnahme innerhalb eines Prozessschrittes gestaltet sich tendenziell weniger komplex als die Umsetzung einer Maßnahme, die mehrere Prozessschritte zeitgleich betrifft und daher auf Prozesskettenebene eingeordnet wird.

#### **4.4.4 Quantifizierung der Auswirkungen von Energieeffizienz-Maßnahmen auf Stellgrößen und endogene Größen**

Die qualitative Positionierung der Maßnahmen im Energieeffizienz-Maßnahmenportfolio gibt Aufschluss darüber, welche Gruppen der Kenngrößen innerhalb der Prozessschritte auf quantitative Veränderungen hin untersucht werden müssen. Wie bereits erläutert, bewirken leistungsbezogene Maßnahmen keine Veränderungen der Stellgrößen des GPS-Wirkgefüges, müssen jedoch auf indirekte Veränderungen bei endogenen Größen hin überprüft werden. Maßnahmen im mittleren und rechten Bereich des Portfolios müssen hinsichtlich Veränderungen auf Stellgrößen und auf endogene Größen untersucht werden. Die Überprüfung wird für jeden einzelnen Prozessschritt durchgeführt, der durch die Energieeffizienz-Maßnahme direkt betroffen ist.

Nach der Positionierung im Energieeffizienz-Maßnahmenportfolio kann daher nun die quantitative Untersuchung der Veränderungen erfolgen. Alle für die nächsten Schritte der Methodik benötigten Informationen werden für jede Maßnahme pro Prozessschritt in einem Energieeffizienz-Maßnahmensteckbrief erfasst, der als Vorlage in Abbildung 38 dargestellt ist.

### Energieeffizienz-Maßnahmensteckbrief

Titel:  Bereich:

---

#	Energieeffizienz-Handlungsansatz	Prozessschritt
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

---

Maßnahmenbeschreibung

Positionierung im EE-Maßnahmenportfolio

---

Kenngrößen-Veränderungen durch Umsetzung der Maßnahme

Stellgröße	vorher	nachher	endogene Größe	Vorher	nachher
bZ			tS		
nbZ			oS <sub>ToR</sub>		
RD			K&L		
# FM			A&N		
MIX			oS <sub>TiR</sub>		
ALZ					

---

Veränderungen in der Energiedatenmatrix durch Umsetzung der Maßnahme

		bZ	nbZ	A&N	K&L	tS	oS	R&A	W&oA	PZ	Leistung vorher	Leistung nachher
1	pZ											
2	AS											
3.1	aZ											
3.2	fZ											
3.3	BZ											
3.4	saZ 1											
3.5	saZ 2											
3.6	saZ 3											

auszufüllende Felder

EE: Energieeffizienz

allgemeine Informationen  
 Informationen zu Kenngrößenveränderungen  
 Informationen zu Veränderungen in der Energiedatenmatrix

Abbildung 38: Vorlage eines Energieeffizienz-Maßnahmensteckbriefs

Im oberen Teil des Steckbriefs erfasst der Anwender der Methodik allgemeine Informationen zu einer Energieeffizienz-Maßnahme. Im mittleren Teil werden die Veränderungen der Kenngrößen des GPS-Wirkgefüges eingetragen. Bei rein leistungsbezogenen Maßnahmen muss die linke Tabelle der Stellgrößen dabei nicht

berücksichtigt werden. Die Werte der Spalte „vorher“ können dem energieorientierten Wertstrom entnommen werden. In der Spalte „nachher“ werden erwartete Veränderungen nach Umsetzung der Maßnahme eingetragen. Ist keine Veränderung zu erwarten, so werden in beide Spalten dieselben Werte eingetragen.

Im unteren Bereich des Steckbriefs erfolgt die Bewertung und Erfassung erwarteter Veränderungen in der Energiedatenmatrix des betrachteten Prozessschrittes. Dazu müssen zunächst in der Spalte „Leistung vorher“ die Leistungsbedarfe der stationären Betriebszustände aus dem energieorientierten Wertstrom entnommen werden. Die Spalte rechts daneben bietet dem Anwender Platz zur Erfassung der Veränderungen. Zuletzt müssen die prozentualen Anteile der Betriebszustände, die nach der Umsetzung der Maßnahme gelten, eingetragen werden. In Abbildung 39 ist die gesamte Vorgehensweise zur Generierung von Energieeffizienz-Maßnahmen zusammenfassend dargestellt.

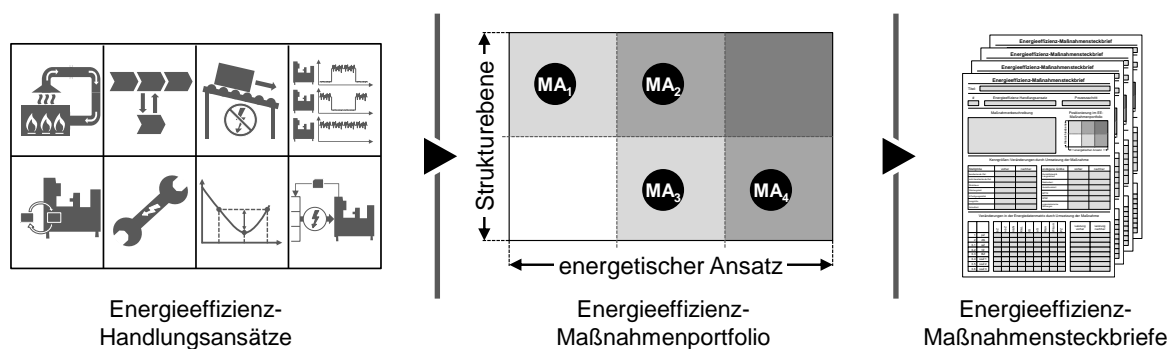


Abbildung 39: Zusammenfassende Darstellung der Vorgehensweise zur Generierung von Energieeffizienz-Maßnahmen

## 4.5 Generisches System-Dynamics-Modell

### 4.5.1 Erläuterung der Vorgehensweise

Zur Prognose der Auswirkungen der in Abschnitt 4.4 beschriebenen Maßnahmen auf die GPS-Zielgrößen der betrachteten Prozesskette ist die Beschreibung des systemischen Verhaltens der Prozessschritte und der Prozesskette in einer Simulation notwendig. Diese Simulation wird mit Hilfe eines System-Dynamics-Modells durchgeführt, dessen Aufbau in diesem Abschnitt beschrieben ist. Der Aufbau folgt der in Abschnitt 2.3.4 erläuterten Standardvorgehensweise in fünf Phasen (vgl. Tabelle 2).



### 4.5.2 Phase 1: Problemartikulation

Die Problemartikulation, welche initial für den Aufbau des System-Dynamics-Modells formuliert wird, ist das Resultat aus den Analysen zum Handlungsbedarf. Benötigt wird ein Simulationsmodell, das in der Lage ist, eine Prognose der GPS-Zielgrößenveränderungen zu liefern, die durch die Umsetzung einer Energieeffizienz-Maßnahme ausgelöst werden können. Da bestehende Wirkbeziehungen zwischen Maßnahmen und GPS-Zielgrößen im GPS-Wirkgefüge bereits auf Prozessschritzebene vorgestellt wurden, ist die Festlegung einer Systemgrenze um einen einzelnen Prozessschritt sinnvoll. Als teiloffenes System soll das Modell zudem Schnittstellen zu den benachbarten Prozessschritten und somit zur Prozesskette besitzen. Aufgrund der Verkettung der Prozessschritte müssen die Auswirkungen auf GPS-Zielgrößen immer auf Prozesskettenebene analysiert werden.

Die Eingangsdaten der Simulationsexperimente gewinnt der Anwender aus der energieorientierten Wertstromanalyse und den Energieeffizienz-Maßnahmensteckbriefen. Endogene Größen unterliegen jedoch unvorhergesehenen Schwankungen, die für Unsicherheiten im System sorgen. In der Wertstromanalyse ist die Aufnahme von Durchschnittswerten für eine Transparenzerzeugung ausreichend. Für die Abbildung des systemischen Verhaltens müssen die Unsicherheiten jedoch mit Hilfe von statistischen Verteilungsfunktionen realitätsnah abgebildet werden. Dies macht eine zusätzliche detaillierte Dokumentation des Unterbrechungsverhaltens notwendig. Dadurch wird eine genaue Ermittlung der GPS-Zielgrößen inkl. der Energieintensität vor und nach der Umsetzung einer Energieeffizienz-Maßnahme möglich. Die Differenz dieser beiden Werte spiegelt die durch die Maßnahme verursachte GPS-Zielgrößenveränderung im Prozessschritt wieder. Anhand des Simulationsergebnisses wird darüber hinaus ersichtlich, ob die vor- und nachgelagerten Prozessschritte ebenfalls von Veränderungen betroffen sind und näher untersucht werden müssen. Schlussendlich erfolgt eine Veränderungsbeurteilung der GPS-Zielgrößen für die gesamte Prozesskette.

### 4.5.3 Phase 2: Qualitative Analyse des Systems

Nach der Problemartikulation wird in dieser zweiten Phase das qualitative Systemverhalten eines generischen Prozessschrittes mit Hilfe eines Kausaldiagramms beschrieben (vgl. Abbildung 40).

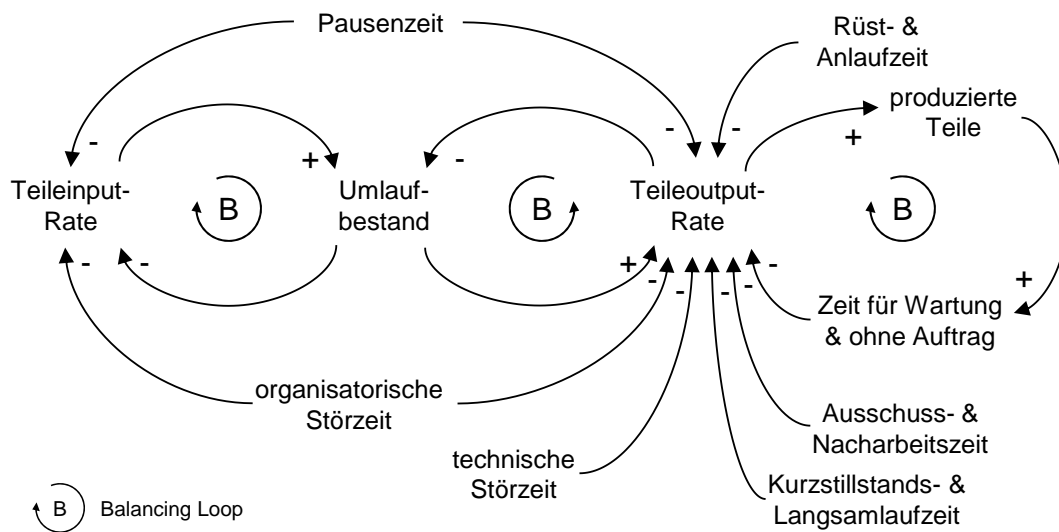


Abbildung 40: Kausaldiagramm des generischen Prozessschritts

Ausgangspunkt des Diagramms sind die beiden Bestandsgrößen *Umlaufbestand* und *produzierte Teile*, die im GPS-Wirkgefüge ermittelt wurden. Ein Zusammenhang zwischen den beiden Bestandsgrößen wird durch das Element *Teileoutput-Rate* (ToR) hergestellt. Es beschreibt, wie viele Teile pro Takt aus dem Umlaufbestand entnommen, bearbeitet und anschließend zum Bestand der produzierten Teile weitergereicht werden. Wenn aus dem Umlaufbestand des Prozessschrittes Teile zur Bearbeitung entnommen werden, muss der Umlaufbestand durch den vorgelagerten Prozessschritt mit neuen Teilen beliefert werden. Dazu wird das Element *Teileinput-Rate* (TiR) ergänzt. Die beiden Raten sind Flussgrößen, die für den Teilefluss im System sorgen. Die Anzahl der produzierten Teile sollte am Ende des Fabriktages dem vom Kunden vorgegebenen Tagesbedarf entsprechen. Der Zeitanteil, der nach Erreichen des Tagesbedarfs von der täglichen Produktionslaufzeit noch übrig ist, wird *Zeit ohne Auftrag* genannt. Diese Zeit kann auch für geplante Wartungen verwendet werden. Je früher der Tagesbedarf erreicht wird, desto höher ist der Zeitanteil des Elements *Zeit für Wartung und ohne Auftrag*.

Die fünf genannten Elemente werden durch Wirkbeziehungen in Form von Pfeilen verbunden. Dabei entstehen drei abschwächende Kreisläufe (Balancing Loops). Der linke Kreislauf beschreibt die Wirkungen zwischen der TiR und dem Umlaufbestand. Eine hohe TiR sorgt für ein schnelles Ansteigen des Umlaufbestands. Hat der Umlaufbestand sein Maximum erreicht, können erst wieder Teile nachgeliefert werden, wenn der Umlaufbestand durch die Fertigung von Teilen abgebaut wird. Bei Erreichen des Maximalbestands sinkt die TiR folglich auf Null. Ähnlich kann das Verhältnis zwischen Umlaufbestand und ToR im mittleren

Kreislauf beschrieben werden. Eine hohe ToR führt zu einem sinkenden Umlaufbestand. Sinkt der Umlaufbestand jedoch auf ein Minimum (meistens Null), so sinkt auch die ToR auf Null, da keine Teile mehr gefertigt werden können. Durch die Wirkbeziehungen der ToR, der *produzierten Teile* und der *Zeit für Wartung und ohne Auftrag* entsteht der rechte Kreislauf in Abbildung 40. Durch eine hohe ToR steigt die Anzahl an produzierten Teilen bis der Tagesbedarf erreicht ist. Je schneller dieser erreicht wird, desto höher ist der Anteil an der *Zeit für Wartung und ohne Auftrag*. Da Überproduktion im Sinne der GPS-Prinzipien vermieden werden soll, sinkt die ToR mit Erreichen der *Zeit für Wartung und ohne Auftrag* auf Null<sup>12</sup>.

TiR und ToR werden zudem durch weitere Kenngrößen beeinflusst. Diese können dem GPS-Wirkgefüge entnommen werden und müssen im Kausaldiagramm als Elemente hinzugefügt werden. Die ToR wird durch die *Rüst- & Anlaufzeit* gesenkt. Außerdem wirken die Elemente *Nacharbeits- & Ausschusszeit*, *Kurzstillstands- und Langsamlaufzeit*, *technische Störzeit* und *organisatorische Störzeit* negativ auf die *Teile-Outputrate*.

Das Auftreten von organisatorischen Störungen resultiert aus verschiedenen Ursachen (vgl. Abschnitt 4.3.3). Neben Störungen, die durch fehlendes Material oder Bedienpersonal im betrachteten Prozess auftreten, wird ein Teil der organisatorischen Störungen durch Unterbrechungen des vorgelagerten Prozessschrittes verursacht und wirkt sich negativ auf die TiR aus. Ein weiterer Teil wird durch Unterbrechungen des nachgelagerten Prozessschrittes verursacht und wirkt sich negativ auf die ToR aus. Vom Element *organisatorische Störzeit* ausgehend wird im Kausaldiagramm folglich eine Wirkbeziehung zur TiR und weiterhin eine Wirkbeziehung zur ToR eingezeichnet. Die exakten Zeitanteile innerhalb der organisatorischen Störzeit werden idealerweise der Störungsdokumentation entnommen. Ist dies nicht möglich, so müssen sie näherungsweise berechnet werden. Ein entsprechendes Vorgehen ist in Abschnitt 4.5.4 erläutert. Zusätzlich kann das Element *Pausenzeit* für ein Absinken beider Raten auf Null sorgen. Wird während der Pausenzeit produziert, hat sie keinen Einfluss.

Das Kausaldiagramm beschreibt das grundsätzliche Verhalten des betrachteten Systems qualitativ und fördert dadurch das Systemverständnis des Anwenders. Es ist generisch aufgebaut und dient als Grundlage zur Erstellung des System-Dynamics-Modells in der nachfolgenden Phase.

---

<sup>12</sup> Ausgehend von einer verketteten Fließfertigung sollte zum Zeitpunkt des Erreichens des Tagesbedarfs auch der vorgelagerte Prozessschritt den Tagesbedarf erreicht haben. In diesem Fall sinkt auch die TiR des betrachteten Prozessschrittes auf Null.

#### 4.5.4 Phase 3: Erstellung des System-Dynamics-Modells

Das zuvor erstellte Kausaldiagramm wird in dieser Phase in ein Flussdiagramm übertragen. Das Flussdiagramm stellt das eigentliche System-Dynamics-Modell dar. Zunächst müssen jedoch die qualitativen Wirkbeziehungen des Kausaldiagramms mit Hilfe mathematischer Relationen beschrieben werden. In der Literatur existiert dafür kein standardisiertes Vorgehen (vgl. Abschnitt 2.3.4). Da im GPS-Wirkgefüge die mathematischen Zusammenhänge der Kenngrößen bereits erläutert sind, stellt dieses die Grundlage zur quantitativen Modellbeschreibung dar. In Abbildung 41 ist das Flussdiagramm des generischen Prozessschrittes abgebildet.

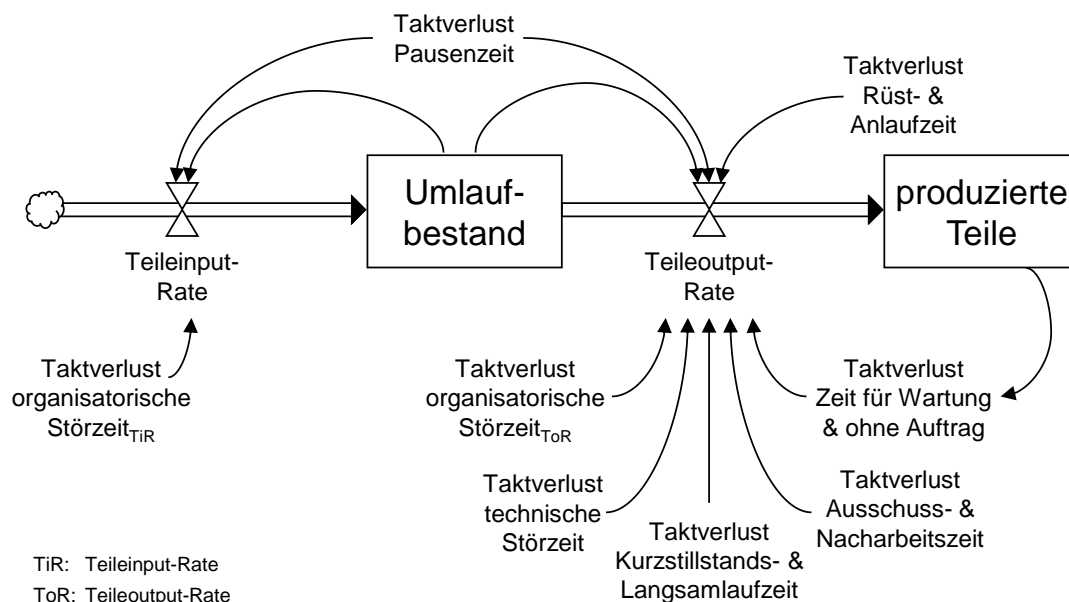


Abbildung 41: Flussdiagramm des generischen Prozessschritts

Dem Kausaldiagramm entsprechend sind auch hier die Bestandsgrößen *Umlaufbestand* und *produzierte Teile* und die Flussgrößen  $T_{iR}$  und  $T_{oR}$  die Hauptbestandteile des Flussdiagramms. Das systemische Verhalten dieser Größen wurde bereits im Kausaldiagramm qualitativ erläutert. Zur Beschreibung des Systems im Flussdiagramm ist die exklusive Darstellung von Bestands- und Flussgrößen generell ausreichend. Für ein besseres Verständnis des Anwenders kann eine Ergänzung verschiedener Hilfsvariablen jedoch hilfreich sein (STERMAN 2000, S. 202). Wichtige Hilfsvariablen sind Taktverluste, die eine Unterbrechung des Flusses bewirken können. Sie treten teilweise zufällig, z. B. in Form von technischen Störungen auf und sorgen für Unsicherheiten im System. Die acht

verschiedenen Arten von Taktverlusten des Flussdiagramms können aus dem Kausaldiagramm abgeleitet werden.

In der Praxis stehen mehrere Softwarelösungen zur Abbildung von System-Dynamics-Modellen zur Verfügung. Häufig verwendete Lösungen sind *Powersim Studio 10*<sup>®</sup>, *Stella*<sup>®</sup>, *Dynamo*<sup>®</sup> oder *Vensim*<sup>®</sup>. Die Anwendungen bieten weitestgehend identische Funktionsumfänge an. Allerdings zeigen sich Unterschiede bei der Benutzerfreundlichkeit und bei Anschaffungs- und Lizenzkosten. Für die Modellierung des System-Dynamics-Modells der vorliegenden Arbeit wurde die Software *Vensim*<sup>®</sup> in der Version *PLE Plus* des Herstellers *Ventana Systems* ausgewählt. Nachfolgend wird der Aufbau des System-Dynamics-Modells und dessen Adaption als Simulationsmodell in der Software *Vensim*<sup>®</sup> *PLE Plus* beschrieben. Nach der Beschreibung allgemeiner Rahmenbedingungen werden dazu anschließend die mathematischen Zusammenhänge von Bestandsgrößen, Flussgrößen und Hilfsvariablen erläutert.

### **Allgemeine Rahmenbedingungen**

Für das System-Dynamics-Modell sind zunächst einige Rahmenbedingungen festzulegen. Zunächst ist die Definition eines Start- und eines Zielzeitpunkts für den späteren Ablauf der Simulationsexperimente notwendig. Außerdem muss ein äquidistantes Zeitintervall für das Fortschreiten des Ablaufs bestimmt werden. Für einen Simulationsablauf wird der Zeitraum eines Fabriktages festgelegt. Startzeitpunkt ist somit der Beginn der täglichen Produktionslaufzeit. Zielzeitpunkt ist entsprechend das Ende der täglichen Produktionslaufzeit. Als äquidistantes Zeitintervall bietet sich die Taktzeit der Prozesskette an, da diese in einer getakteten Fließfertigung für jeden Prozessschritt der Prozesskette identisch ist. Die Werte der täglichen Produktionslaufzeit und der Taktzeit können der energieorientierten Wertstromanalyse entnommen werden. Sie werden als konstant angenommen. Die Division der täglichen Produktionslaufzeit durch die Taktzeit ergibt die Anzahl der Zeitschritte eines Simulationslaufes.

Bei den GPS-Zielgrößen handelt es sich um aggregierte Kenngrößen, die nicht kontinuierlich erfasst werden und deshalb auch nicht Teil des System-Dynamics-Modells sind. Sie werden anhand der ermittelten Daten aus dem Simulationsexperiment berechnet. Das zugehörige Vorgehen zur Ermittlung der GPS-Zielgrößenwerte ist in Abschnitt 4.5.6 beschrieben.

### Bestandsgrößen

Die Bestandsgröße *Umlaufbestand*  $WIP(T)$  lässt sich im Modell mathematisch durch eine integrale Differenzbetrachtung zwischen den beiden Flussgrößen beschreiben. Als Zeitintervall fungiert die *Taktzeit*. Die  $TiR$  und die  $ToR$  werden in der Einheit [Stk/Takt] angegeben. Die Einheit [Takt] entspricht genau der Zeiteinheit und -dauer der Taktzeit. Bei einer Losgröße von einem Stück sollte der *Umlaufbestand* während eines Taktes um ein Teil ansteigen und zeitgleich um ein Teil abnehmen, d. h. in der Summe unverändert bleiben. Zu Beginn des Fabriktages startet der Umlaufbestand mit dem Wert des *Anfangsbestands*  $WIP(T_0)$ . Dabei gilt die Annahme, dass der Anfangsbestand dem durchschnittlichen Umlaufbestand entspricht. Die mathematische Berechnung des Umlaufbestands ist in der nachfolgenden Gleichung beschrieben:

$$WIP(T) = \int_{T_0}^T ([TiR(t) - ToR(t)] dt) + WIP(T_0) \quad (4-8)$$

mit

- $WIP(T)$ : Umlaufbestand zum Zeitpunkt T in [Stk]
- $TiR(t)$ : Teileinput-Rate als Funktion der Zeit t in [Stk/Takt]
- $ToR(t)$ : Teileoutput-Rate als Funktion der Zeit t in [Stk/Takt]
- $WIP(T_0)$ : Anfangsbestand zum Anfangszeitpunkt  $T_0$  in [Stk]

Die Bestandsgröße *produzierte Teile* ( $pT$ ) gibt an, wie viele Teile an einem Fabriktag in Summe produziert werden. Mit jedem Teileoutput steigt die Anzahl produzierter Teile um die Anzahl der Teile, die pro Takt fertiggestellt werden. Die Bestandsgröße  $pT$  wird mathematisch ebenfalls als zeitliches Integral beschrieben:

$$pT(T) = \int_{T_0}^T [ToR(t)] dt \quad (4-9)$$

mit

- $pT(T)$ : produzierte Teile zum Zeitpunkt T in [Stk]

In *Vensim*<sup>®</sup> *PLE Plus* kann das Verhalten der Bestandsgrößen als Differentialgleichung mit einer *INTEG*-Funktion abgebildet werden (VENTANA SYSTEMS 2012). Die Veränderung der Bestandsgrößen im System-Dynamics-Modell hängt von den Flussgrößen ab (STERMAN 2000, S. 202). Diese wiederum werden durch

Hilfsvariablen beeinflusst. Die entsprechenden mathematischen Zusammenhänge sind in den nächsten Absätzen erläutert.

### Flussgrößen

Die TiR berechnet sich als Quotienten der Taktzeit in [ZE/Takt] und der Zykluszeit  $ZZ_{\text{VPS}}$  des vorgelagerten Prozessschrittes in [ZE/Stk]. Da die Zykluszeit in einer Fließfertigung nach der Taktzeit der Prozesskette ausgerichtet wird und somit der Taktzeit entspricht, ist das Ergebnis dieser Berechnung immer 1,0 Stk/Takt. Für den Fall der Fertigung mehrerer Teile pro Takt wird die TiR in [Los/Takt] angegeben und wiederum auf den Wert 1,0 normiert. Durch eine Unterbrechung des vorgelagerten Prozessschrittes kommt es zu einem oder mehreren Taktverlusten. Folglich fließen keine Teile mehr vom vorgelagerten Prozessschritt an den betrachteten Prozessschritt. In diesem Fall sinkt die TiR für eine definierte Anzahl an Takten auf den Wert 0,0 Stk/Takt. Diese Anzahl berechnet sich aus dem Quotienten der Unterbrechungsdauer und der Taktzeit. Um dies mathematisch auszudrücken, wird stellvertretend für jede Verlustart eine Hilfsvariable mit der Ergänzung *Taktverluste* eingeführt (vgl. Abbildung 41), deren Wert ebenfalls in der Einheit [Stk/Takt] angegeben ist. Tritt eine beliebige Unterbrechung auf, die zu einem Verlust von Takten führt, so nimmt die entsprechende Hilfsvariable für die Dauer der Taktverluste denselben Betrag an, wie die betroffene Input-Rate. Durch Subtraktion der beiden Werte sinkt die TiR während dieser Zeit auf den Wert 0,0 Stk/Takt. Im Falle der Fertigung mehrerer Teile pro Takt wird entsprechend die Einheit [Los/Takt] gewählt. Die detaillierte Berechnung aller Hilfsvariablen erfolgt in diesem Abschnitt unter der Zwischenüberschrift *Hilfsvariablen*.

Verursacht die Verlustart *Pausenzeit* eine Unterbrechung der Fertigung, so resultiert dies – unter der Annahme, dass die gesamte Prozesskette während der Pause unterbrochen wird – zu einem Absinken beider Inputraten auf den Wert 0,0 Stk/Takt.

Unterbrechungen, die durch den vorgelagerten Prozessschritt verursacht sind, werden im betrachteten Prozessschritt der organisatorischen Störzeit zugeordnet. Der Anteil der organisatorischen Störzeit, der zu Taktverlusten aufgrund von Unterbrechungen im vorgelagerten Prozessschritt führt, wird mit dem Index *TiR* versehen, da er auf die *Teileinput-Rate* wirkt. Der übrige Teil der organisatorischen Störungen wird aufgrund der Wirkung auf die *Teileoutput-Rate* mit dem Index *ToR* versehen. Darüber hinaus führt der Fall des Erreichens des *maximalen Umlaufbestands*  $WIP_{\text{max}}$  ebenfalls dazu, dass die TiR den Wert 0,0 Stk/Takt annimmt, da zu diesem Zeitpunkt kein weiteres Teil mehr geliefert werden kann. Sobald der

Umlaufbestand wieder sinkt, steigt auch die TiR. Mathematisch werden diese beiden Fälle folgendermaßen ausgedrückt:

$$TiR(t) = \begin{cases} \frac{TZ}{ZZ_{vPS}} - V_P(t) - V_{oS_{TiR}}(t) & \text{für } WIP(T) < WIP_{max} \\ 0 & \text{für } WIP(T) \geq WIP_{max} \end{cases} \quad (4-10)$$

mit

- TZ: Taktzeit in [ZE/Takt]  
 ZZ<sub>vPS</sub>: Zykluszeit des vorgelagerten Prozessschritts in [ZE/Stk]  
 V<sub>P</sub>(t): Taktverlust Pausenzeit in [Stk/Takt]  
 V<sub>oS<sub>TiR</sub></sub>(t): Taktverlust organisatorische Störzeit<sub>TiR</sub> in [Stk/Takt]

*Vensim*<sup>®</sup> *PLE Plus* verwendet zur Beschreibung dieser mathematischen Funktionen Kontrollstrukturen in imperativer Programmiersprache. Die Funktion der TiR lässt sich mit Hilfe einer *IF-Schleife* ausdrücken (VENTANA SYSTEMS 2012).

Die ToR berechnet sich aus dem Quotienten der Taktzeit und der Zykluszeit ZZ des betrachteten Prozessschrittes. Auch hier kann es zu Unterbrechungen durch insgesamt sieben verschiedene Taktverluste kommen (vgl. Abbildung 41). Die Summe der Taktverluste berechnet sich wie folgt:

$$V(t) = V_{tS}(t) + V_{K\&L}(t) + V_{A\&N}(t) + V_{W\&oA}(t) + V_P(t) + V_{R\&A}(t) + V_{oS_{ToR}}(t) \quad (4-11)$$

mit

- V(t): Summe der Taktverluste zum Zeitpunkt t in [Stk/Takt]  
 V<sub>tS</sub>(t): Taktverlust technische Störzeit in [Stk/Takt]  
 V<sub>K&L</sub>(t): Taktverlust Kurzstillstands- & Langsamlaufzeit in [Stk/Takt]  
 V<sub>A&N</sub>(t): Taktverlust Ausschuss- & Nacharbeitszeit in [Stk/Takt]  
 V<sub>W&oA</sub>(t): Taktverlust Zeit für Wartung & ohne Auftrag in [Stk/Takt]  
 V<sub>P</sub>(t): Taktverlust Pausenzeit in [Stk/Takt]  
 V<sub>R&A</sub>(t): Taktverlust Rüst- & Anlaufzeit in [Stk/Takt]  
 V<sub>oS<sub>ToR</sub></sub>(t): Taktverlust organisatorische Störzeit<sub>ToR</sub> in [Stk/Takt]

Nach demselben Prinzip, das bereits für die TiR beschrieben wurde, sinkt auch die ToR bei Auftreten eines Taktverlustes durch Subtraktion auf den Wert 0,0 Stk/Takt.



Denkbar ist in diesem Fall auch das Auftreten mehrerer verschiedener Taktverluste zur gleichen Zeit. Da ein negativer Wert für die ToR jedoch nicht sinnvoll ist, sinkt sie auch dann auf den Wert 0,0 Stk/Takt. Auch im Falle der ToR muss im Rahmen der mathematischen Beschreibung eine Fallunterscheidung erfolgen. Sinkt der Umlaufbestand  $WIP(T)$  auf einen Minimalwert  $WIP_{\min}$ , so kann kein weiteres Teil fertiggestellt werden. Die ToR sinkt auf Null und steigt erst wieder mit steigendem Umlaufbestand an. Mathematisch müssen daher drei Fälle unterschieden werden:

$$ToR(t) = \begin{cases} \frac{TZ}{ZZ} \cdot V(t) & \text{für } WIP(T) > WIP_{\min} \wedge V(t) \leq \frac{TZ}{ZZ} \\ 0 & \text{für } WIP(T) > WIP_{\min} \wedge V(t) > \frac{TZ}{ZZ} \\ 0 & \text{für } WIP(T) \leq WIP_{\min} \end{cases} \quad (4-12)$$

mit

TZ: Taktzeit in [ZE/Takt]

ZZ: Zykluszeit des betrachteten Prozessschritts in [ZE/Stk]

V(t): Summe der Taktverluste zum Zeitpunkt t in [Stk/Takt]

Auch diese Funktion wird in *Vensim*<sup>®</sup> *PLE Plus* mit einer *IF-Schleife* beschrieben. Zusätzlich wird die Funktion *MAX(x,y)* verwendet, um zu verhindern, dass die ToR im Falle mehrerer gleichzeitiger Taktverluste einen negativen Wert annimmt (VENTANA SYSTEMS 2012).

### Hilfsvariablen

Nach der Beschreibung der Bestands- und der Flussgrößen werden nun die mathematischen Zusammenhänge der Hilfsvariablen erläutert. In Abbildung 41 sind aus Gründen der Übersichtlichkeit ausschließlich die acht Taktverlustarten als Hilfsvariablen aufgeführt. Darüber hinaus werden jedoch weitere Kenngrößen wie bspw. die Taktzeit oder die Zykluszeit als Hilfsvariablen genutzt. Sie können in *Vensim*<sup>®</sup> *PLE Plus* auf anderen Ebenen in sog. *Views* dargestellt werden (VENTANA SYSTEMS 2012). Eine vollständige Sammlung der Bestand- und Flussgrößen und der genutzten Hilfsvariablen ist Anhang A2 zu entnehmen.

Alle acht Arten der Taktverluste werden schematisch anhand der Anzahl der Unterbrechungen und der Unterbrechungsdauer klassifiziert. In Tabelle 9 ist eine Übersicht über das Unterbrechungsverhalten der Taktverlustarten dargestellt, das nachfolgend erläutert wird.

Tabelle 9: Übersicht des Unterbrechungsverhaltens

Art des Taktverlustes	Anzahl der Unterbrechungen	Unterbrechungsdauer	Beschreibung	Unterbrechungsschema
organisatorische Störzeit <sub>TiR</sub>	nicht planbar	zufällig	zufällig auftretende Unterbrechungen verursacht durch den vorgelagerten Prozessschritt	
organisatorische Störzeit <sub>ToR</sub>	nicht planbar	zufällig	zufällig auftretende Unterbrechungen verursacht durch den nachgelagerten oder im betrachteten Prozessschritt	
technische Störzeit	nicht planbar	zufällig	zufällig auftretende Unterbrechung verursacht durch eine technische Störung	
Ausschuss- & Nacharbeitszeit	nicht planbar	zufällig	zufällig auftretende Unterbrechung verursacht durch Ausschuss oder Nacharbeit	
Kurzstillstands- & Langsamlaufzeit	nicht planbar	zufällig (tendenziell kurze Unterbrechungsdauer)	zufällig auftretende Unterbrechung verursacht durch einen Kurzstillstand oder einen Langsamlauf	
Pausenzeit	gesetzlich vorgegeben und planbar	konstant	geplante Unterbrechungen mit konstanter Dauer durch Pausen	
Rüst- & Anlaufzeit	planbar	konstant	geplante Unterbrechungen mit konstanter Dauer durch einen Produktionsanlauf oder Rüstvorgänge	
Zeit für Wartung & ohne Auftrag	maximal eine Unterbrechung am Ende des Fabriktages	abhängig vom Verlauf der Fertigung	gewünschte Unterbrechung nach Erreichen der durch den Tagesbedarf vorgegebenen Anzahl an Teilen	

TiR: Teileinput-Rate

ToR: Teileoutput-Rate

Taktverluste durch organisatorische Störzeiten, technische Störzeiten, Kurzstillstands- und Langsamlaufzeiten sowie Nacharbeits- und Ausschusszeiten weisen eine nicht planbare Anzahl von Unterbrechungen auf, die sich täglich ändert. Die Dauer dieser Unterbrechungen wird als zufällig beschrieben. Unterbrechungen durch Kurzstillstands- und Langsamlaufzeiten sind tendenziell durch eine kurze Unterbrechungsdauer charakterisiert (vgl. ERLACH 2010B, S. 72 f.).

Die Anzahl der Unterbrechungen durch Pausen- und durch Rüst- und Anlaufzeiten sind planbar. Im Falle von Pausenzeiten ist sie ebenso gesetzlich vorgegeben wie die konstante Dauer der Pausenzeiten. Anlaufzeiten treten zu Beginn der Produktion einmalig mit konstanter Dauer auf. Im Sinne der GPS-Prinzipien sind Rüstvorgänge

standardisiert und durch eine konstante Rüstdauer gekennzeichnet. Die Anzahl der Rüstvorgänge leitet sich über den Produktmix der zu fertigenden Varianten ab.

Taktverluste durch die *Zeit für Wartung und ohne Auftrag* treten immer dann auf, wenn der Tagesbedarf an produzierten Teilen erreicht ist und halten bis zum Ende der täglichen Produktionslaufzeit an. Sie sind gewünscht, um Überproduktion zu vermeiden. Diese Zeiträume ohne Auftrag können für Wartungsvorgänge genutzt werden. Sollte der Tagesbedarf nicht oder exakt zum Ende der täglichen Produktionslaufzeit erreicht werden, fällt an diesem Fabriktag keine Zeit ohne Auftrag an. Wartungen können dann ebenfalls nicht durchgeführt werden und müssen auf einen anderen Fabriktag verschoben werden. Infolgedessen tritt am Ende eines jeden Fabriktages maximal eine Unterbrechungsphase durch die Zeit für Wartung und ohne Auftrag auf. Die Dauer der Unterbrechung ergibt sich aus dem Fertigungsablauf, der vom Auftreten der übrigen Taktverluste abhängig ist.

In der Tabelle werden bei organisatorischen Störzeiten zwei verschiedene Arten der Taktverluste unterschieden. Wie bereits anhand des Kausaldiagramms (vgl. Abbildung 40) erklärt, wirken Taktverluste der organisatorischen Störzeit nicht ausschließlich auf die ToR (vgl. Abschnitt 4.2.2). Der Anteil der organisatorischen Störzeit, der durch Unterbrechungen des vorgelagerten Prozessschrittes ausgelöst wird, wirkt auf die TiR und muss separat betrachtet werden. Das Unterbrechungsschema der beiden Taktverlustarten unterscheidet sich jedoch nicht.

Zur Beschreibung der Taktverluste im System-Dynamics-Modell muss für jede Taktverlustart die mittlere Unterbrechungsdauer (MTTR<sub>i</sub>) und die mittlere Dauer zwischen zwei Unterbrechungen (MTBF<sub>i</sub>) ermittelt werden. Die mittlere Unterbrechungsdauer berechnet sich aus dem Quotienten der summierten Unterbrechungszeit und der Anzahl der Unterbrechungen (WIENDAHL & HEGENSCHIEDT 2012, S. 362). Nach der VDI Richtlinie 3649 gilt zudem folgender Zusammenhang (VDI 3649, S. 2):

$$\frac{\text{tägl. Produktionslaufzeit} - \text{Unterbrechungszeit}_i}{\text{tägl. Unterbrechungszeit}} = \frac{\text{MTBF}_i}{\text{MTBF}_i + \text{MTTR}_i} \quad (4-13)$$

mit

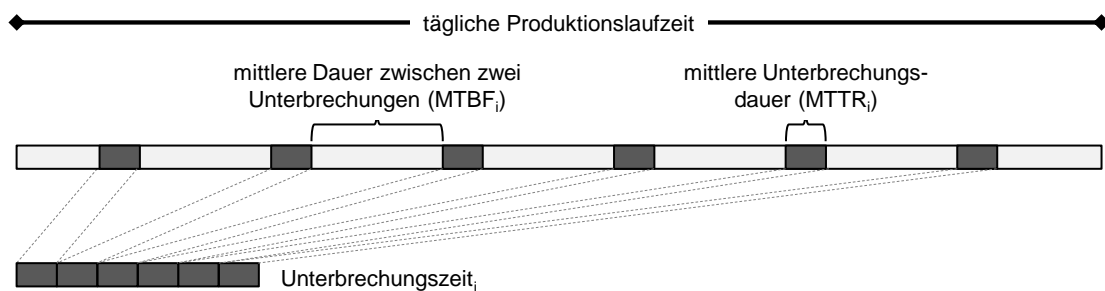
MTBF<sub>i</sub>: Dauer zwischen zwei Unterbrechungen der Taktverlustart i in [ZE]

MTTR<sub>i</sub>: Unterbrechungsdauer der Taktverlustart i in [ZE]

Daraus ergibt sich die Gleichung zur Berechnung der mittleren Dauer zwischen zwei Unterbrechungen:

$$MTBF_i = MTTR_i \cdot \left( \frac{\text{tägl. Produktionslaufzeit}}{\text{Unterbrechungszeit}_i} - 1 \right) \quad (4-14)$$

Die schematische Darstellung von Unterbrechungen während der täglichen Produktionslaufzeit ist Abbildung 42 zu entnehmen.



*Abbildung 42: Schematische Darstellung von Unterbrechungen während der täglichen Produktionslaufzeit*

Die für diese Berechnungen benötigte durchschnittliche Anzahl der Unterbrechungen sollte aus der BDE oder einer anderen Art der Produktionsdokumentation hervorgehen (vgl. KLETTI & SCHUMACHER 2011, S. 16 ff.). Die Unterbrechungszeit der Taktverlustarten kann im Fall der technischen Störzeit, der Kurzstillstands- und Langsamlaufzeit sowie der Ausschuss- und Nacharbeitszeit direkt dem energieorientierten Wertstrom entnommen werden. Pausenzeiten und die Anlaufzeit der Fertigung können ebenfalls dem Wertstrom entnommen werden. Eine Berechnung der Rüstzeit ist durch die Multiplikation der Anzahl der Rüstvorgänge und der im Wertstrom angegebenen Rüstdauer möglich.

Im Falle der organisatorischen Störzeiten muss die bereits beschriebene Unterscheidung zwischen Taktverlusten, die auf die TiR sowie Taktverlusten, die auf die ToR wirken, erfolgen. Taktverluste, die auf die TiR wirken, entstehen durch Unterbrechungen im vorgelagerten Prozessschritt. Sie resultieren jedoch nur dann in einer Unterbrechung im betrachteten Prozessschritt, wenn sie nicht durch den dazwischenliegenden Puffer kompensiert werden. Nur der Anteil an Taktverlusten, der auf die TiR wirkt und tatsächlich in einer Unterbrechung resultiert, geht in die Berechnung der gesamten organisatorischen Störzeit des Prozessschritt ein, der z. B.

für die Berechnung des OEE-Wertes notwendig ist. Der Zusammenhang ist in Abbildung 43 dargestellt.

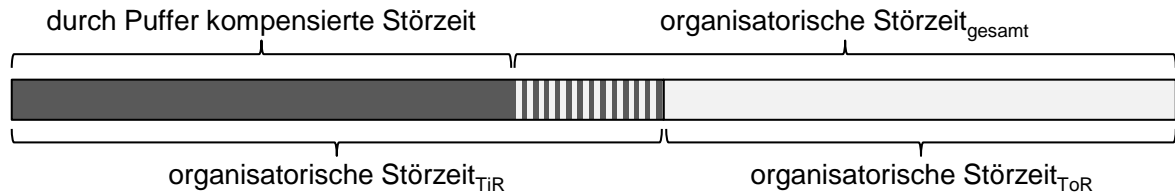


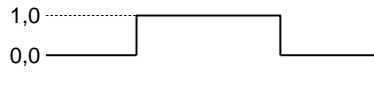

Abbildung 43: Schematischer Aufbau der organisatorischen Störzeit

Die organisatorische Störzeit<sub>TiR</sub> berechnet sich aus der Summe aller Unterbrechungszeiten des vorgelagerten Prozessschrittes abzüglich der *Pausenzeit* und der *Zeit für Wartung und ohne Auftrag*. Aus diesem Eingangswert berechnet das System-Dynamics-Modell automatisch den Anteil der Störzeit des vorgelagerten Prozessschrittes, der zu Unterbrechungen im betrachteten Prozessschritt führt. Für den Fall, dass die organisatorische Störzeit<sub>gesamt</sub> nicht der Unterbrechungsdokumentation entnommen werden kann, ist ihre näherungsweise Berechnung unter Verwendung des Kompensationsanteils  $f_K$  möglich:

$$\text{org. Störzeit}_{\text{gesamt}} = (1 - f_K) (\text{org. Störzeit}_{\text{TiR}}) + (\text{org. Störzeit}_{\text{ToR}}) \quad (4-15)$$

In *Vensim*<sup>®</sup> *PLE Plus* können die beschriebenen Taktverlustarten mit Hilfe der Funktionen *PULSE* und *PULSE TRAIN* abgebildet werden. Die *PULSE*-Funktion gibt solange den Wert 0,0 als Ergebnis aus, bis ein zu definierender Zeitpunkt erreicht ist. Ab diesem Zeitpunkt gibt die Funktion den Wert 1,0 für eine zu definierende Dauer aus und wechselt anschließend wieder zum Wert 0,0. Die *PULSE TRAIN*-Funktion bietet die Möglichkeit, das Zeitintervall, während dessen der Wert 1,0 ausgegeben wird, in konstanten Zeitabständen zu wiederholen. Neben dem Startzeitpunkt für das erste Intervall und der Intervalldauer wird zusätzlich die Zeitdauer zwischen zwei Zeitintervallen angegeben und ein Endzeitpunkt festgelegt (VENTANA SYSTEMS 2012). Der dimensionslose Ausgabewert der *PULSE*- bzw. *PULSE TRAIN*-Funktion wird anschließend mit dem Quotienten aus der Taktzeit und der Zykluszeit multipliziert, um die Einheit [Stk/Takt] der TiR bzw. ToR zu erhalten. Das Prinzip der beiden Funktionen ist in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Prinzip der Funktionen *PULSE* und *PULSE TRAIN*

Funktion in Vensim PLE Plus	Schema	mögliche Anwendung
<i>PULSE</i> ( {Startzeitpunkt}, {Dauer} )		Anlaufzeit, Pausenzeit, Zeit für Wartung & ohne Auftrag
<i>PULSE TRAIN</i> ( {Startzeitpunkt}, {Dauer}, {Dauer dazwischen}, {Endzeitpunkt} )		Rüstzeit, technische Störzeit, organisatorische Störzeit, Ausschuss- & Nacharbeitszeit, Kurzstillstands- & Langsamlaufzeit

Mit Hilfe der *PULSE*-Funktion ist die Abbildung einer einmaligen Unterbrechung möglich. Die Funktion eignet sich daher zur Beschreibung der Taktverluste durch die Anlaufzeit, die Pausenzeit und die Zeit für Wartung und ohne Auftrag. Sich wiederholende Unterbrechungen können mit der *PULSE TRAIN*-Funktion abgebildet werden. Sie ist für die Beschreibung der Taktverluste durch die Rüstzeit, die technische Störzeit, die organisatorische Störzeit, die Ausschuss- und Nacharbeitszeit und die Kurzstillstands- und Langsamlaufzeit geeignet.

Durch die beiden beschriebenen Funktionen kann ein regelmäßiges Unterbrechungsverhalten und dessen Auswirkung auf Taktverluste simuliert werden. Wie bereits erläutert, ist das generische System-Dynamics-Modell eines Prozessschrittes jedoch durch nicht planbare Unterbrechungen mit zufälliger Dauer gekennzeichnet, die für die Unsicherheit im System verantwortlich sind. Zur Simulation dieses unregelmäßigen Unterbrechungsverhaltens und dessen Auswirkung auf Taktverluste stehen in *Vensim*<sup>®</sup> *PLE Plus* eine Vielzahl statistischer Verteilungsfunktionen zur Verfügung.

### Eingangsdaten und Auswertung

Zur Förderung eines anwendergerechten Ablaufs wird das eigentliche Simulationsmodell, das mit der Software *Vensim*<sup>®</sup> *PLE Plus* erstellt wurde, mit einer Datei der Tabellenkalkulationssoftware *Microsoft EXCEL*<sup>®</sup> verknüpft. In dieser Datei kann der Anwender alle Eingangsdaten des jeweiligen Prozessschrittes in eine vordefinierte Maske eingeben. Die Daten werden anschließend automatisch in das Simulationsmodell übertragen. In Abbildung 44 ist der Aufbau der Eingangs-Maske dargestellt.

Mit Hilfe der Eingangsdaten ist im Rahmen einer Monte-Carlo-Studie die Simulation eines typischen Fabriktages für den betrachteten Prozessschritt möglich. Dazu wird zunächst die Anzahl der Simulationsläufe pro Studie festgelegt. Zur Abbildung eines Fabrikjahres bietet sich dabei die Anzahl der Fabriktage pro Jahr an. Zur Vereinfachung der späteren Interpretation der Simulationsergebnisse wird die

Kundennachfrage als konstant angenommen. Durch den Kunden der Prozesskette erfolgt während des Zeitraums der Simulationsstudie dementsprechend der Abruf eines konstanten Tagesbedarfs. Die Erzeugung der Unsicherheit im System geschieht durch die bereits vorgestellten Taktverlustarten. Die Beschreibung des Unterbrechungsverhaltens erfolgt in der Monte-Carlo-Studie mit Hilfe von statistischen Verteilungsfunktionen. Diese Funktionen können durch statistische Tests auf Basis der Dokumentation historischer Daten bestimmt werden. Sollten diese historischen Daten nicht vorhanden sein, bietet die Literatur Vorschläge zur Auswahl typischer Verteilungsfunktionen (vgl. u. a. HEGENSCHIEDT 2003; LI 2007; PETER 2009).

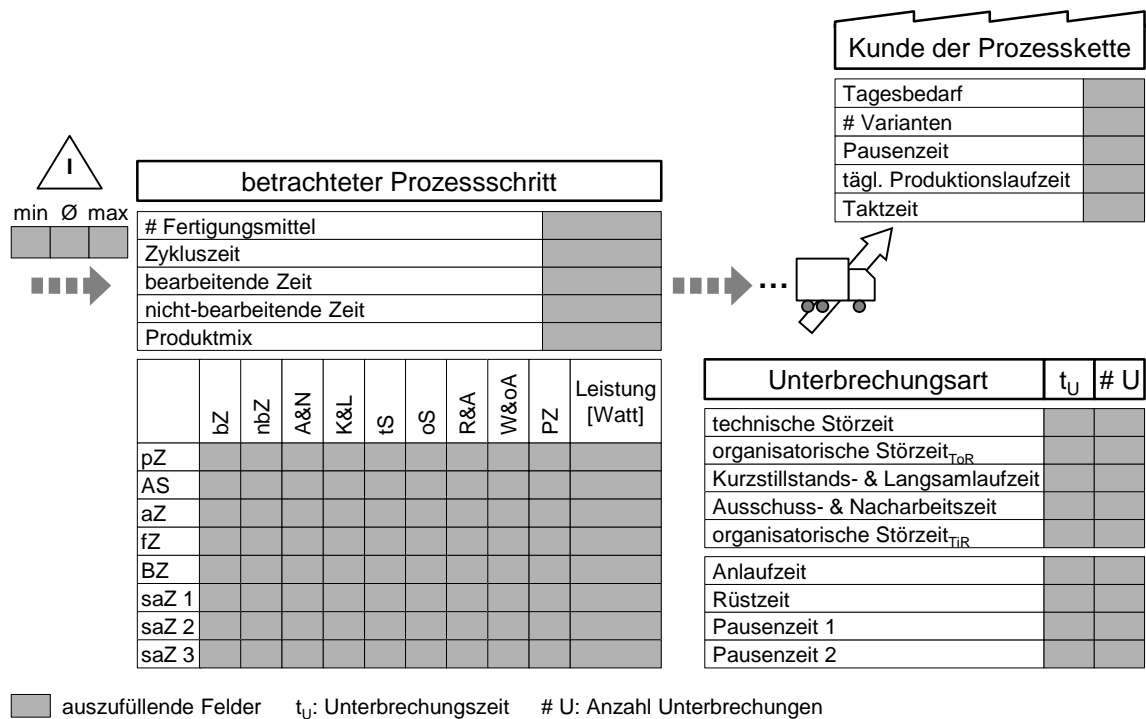


Abbildung 44: Eingangsdaten und Unterbrechungsverhalten des Prozessschrittes

Die aus der Simulationsstudie generierten Datensätze werden in die *Microsoft EXCEL*<sup>®</sup>-Datei exportiert und automatisch ausgewertet. Ergebnisse der Auswertung sind die GPS-Zielgrößenwerte des Prozessschrittes.

Die Überprüfung und beispielhafte Anwendung des Modells auf Prozessschrittebene ist Bestandteil von Phase 4. In Phase 5 wird schließlich die Vorgehensweise der Simulationsdurchführung auf Prozesskettenebene beschrieben.

### 4.5.5 Phase 4: Verifikation und Validierung

Zur Validierung und Verifikation des System-Dynamics-Modells wurde eine Kombination verschiedener V & V-Techniken ausgewählt. Dadurch kann die Wahrscheinlichkeit der Fehlerfreiheit des Modells erhöht werden (RABE 2008B, S. 93). Die Verifikation wurde anhand der Techniken *Strukturiertes Durchgehen* und *Dimensionstest* durchgeführt. Durch die Techniken *Festwerttest*, *Grenzwerttest* und *Monitoring* fand die Validierung des Modells für einen Prozessschritt statt.

#### **Strukturiertes Durchgehen und Dimensionstest**

Bei der Technik *Strukturiertes Durchgehen* wurde jede einzelne Anweisung des System-Dynamics-Modells auf seine Richtigkeit überprüft (vgl. RABE 2008B, S. 104 ff.). Dazu ausgewählte System-Dynamics-Experten waren zwar mit den Inhalten zur Entwicklung der Methodik vertraut, am Aufbau des Modells jedoch nicht beteiligt. Dadurch wurde ein offener und unvoreingenommener Blick auf die Ergebnisse sichergestellt. Zusätzlich dazu bietet die Software *Vensim<sup>®</sup> PLE Plus* die Möglichkeit der Syntaxüberprüfung, die in das *Strukturierte Durchgehen* miteinbezogen wurde.

Durch den *Dimensionstest* konnten Dimensionsfehler in mathematischen Formeln aufgedeckt und beseitigt werden. Auch hier bietet *Vensim<sup>®</sup> PLE Plus* die Möglichkeit einer integrierten Überprüfung der Dimensionskonsistenz auf beiden Seiten der mathematischen Gleichungen. Fehlende Übereinstimmungen wurden durch die Software dokumentiert und anschließend korrigiert.

#### **Festwerttest, Grenzwerttest und Monitoring**

Beim Einsatz der Techniken *Festwerttest* und *Grenzwerttest* werden stochastisch verteilte Werte wie bspw. technische Störzeiten durch konstante Werte ersetzt. Dadurch erfolgt die Transformierung eines durch Unsicherheiten geprägten stochastischen Modells in ein deterministisches Modell, das Prognosen zu dessen Verhalten durch einfache Kontrollrechnungen ermöglicht. Anschließend ist das Grenzwertverhalten des Modells mit Hilfe von Hypothesen zu überprüfen (SARGENT 1996, S. 57). Die Technik *Monitoring* beschreibt die graphische Darstellung der überprüften Werte während der Simulation. Diese Werte können sowohl zu bestimmten Zeitpunkten, als auch im Zeitverlauf dargestellt werden (RABE 2008A, S. 101). Zur Anwendung der beschriebenen Techniken wurde ein Prozessschritt einer typischen Fließfertigung ausgewählt. Im Prozessschritt wurde mit Hilfe einer Drehmaschine eine spanende Bearbeitung durchgeführt. Für die Validierung galten die folgenden Rahmenbedingungen:



Die Drehmaschine ist Bestandteil einer getakteten Prozesskette. Die Taktzeit beträgt 3,6 min. Während dieser Zeit wird der Prozessschritt manuell durch einen Mitarbeiter bestückt und gestartet. Nach der Bearbeitung entnimmt der Mitarbeiter das bearbeitete Teil und transportiert es zum nächsten Prozessschritt. Die Bearbeitung dauert 1,6 min. Während der restlichen, nicht-bearbeitenden Zeit von 2,0 min befindet sich die Drehmaschine in einem Bereitschaftsmodus. Die Produktion läuft in zwei Schichten mit einer täglichen Produktionslaufzeit von 1080 min bzw. 300 Takten. In Summe wird an 250 Tagen im Jahr eine Produktfamilie produziert. Der Tagesbedarf beträgt 238 Teile. Alle weiteren Daten, die für die Simulationsstudie benötigt werden, sind in Abbildung 45 enthalten.

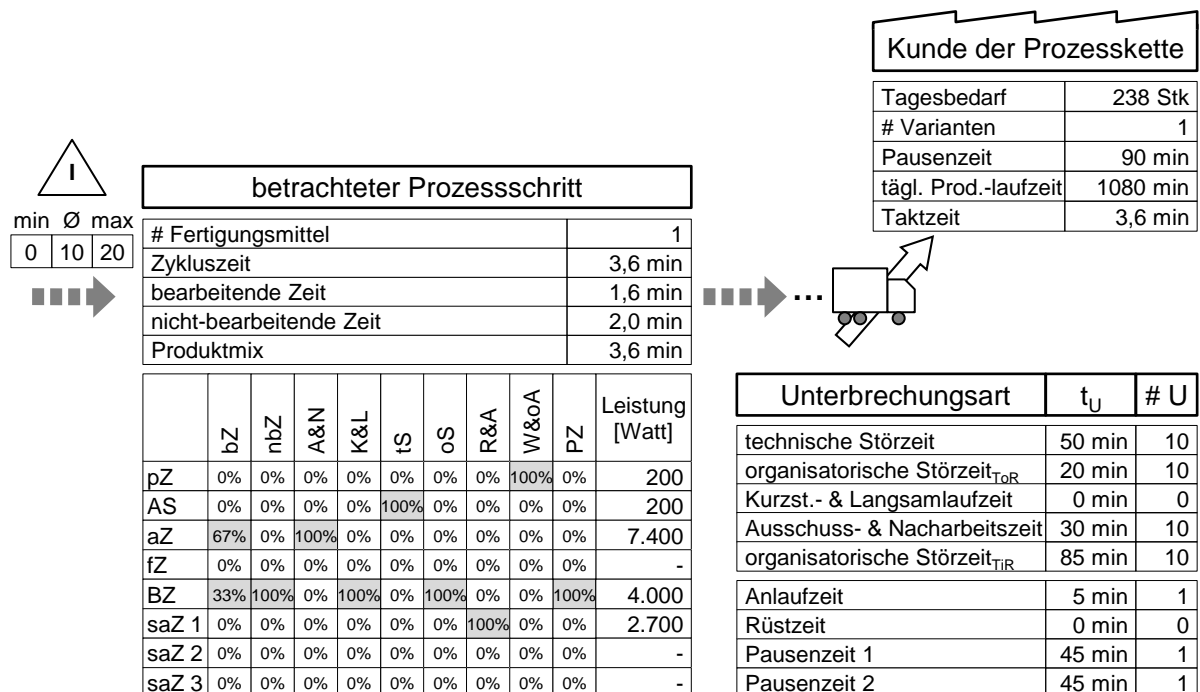


Abbildung 45: Eingangsdaten und Unterbrechungsverhalten des Prozessschrittes

Vor der Aufstellung von Hypothesen wurden zunächst drei unterschiedliche Produktionsszenarien festgelegt. Szenario A beschreibt die reale Ausgangssituation des Prozessschrittes mit typischen, jedoch konstanten Unterbrechungszeiten (vgl. Abbildung 45). Szenario B stellt einen vollkommen störungsfreien Produktionsablauf dar, der lediglich zweimal pro Tag durch Pausen unterbrochen wird. Alle weiteren Unterbrechungszeiten werden auf den Wert 0,0 min gesetzt. Szenario C beschreibt einen kontinuierlich gestörten Produktionsablauf. Zur Abbildung dieses Szenarios wird sowohl für die organisatorische Störzeit<sub>T<sub>IR</sub></sub> als auch für die technische Störzeit der Wert 1.000 min festgelegt.

In Tabelle 11 sind die Hypothesen der Fest- und Grenzwerttests aufgelistet. Sie wurden formuliert, um das Verhalten der Bestands- und Zielgrößen des Modells für die Szenarien B und C mit jenem des Ausgangsszenarios A zu vergleichen.

*Tabelle 11: Hypothesen des Fest- und Grenzwerttestes*

Bestands- und Zielgrößen	Hypothesen für Szenario B (störungsfreier Produktionsablauf)	Hypothesen für Szenario C (kontinuierlich gestörter Produktionsablauf)
produzierte Teile	Die Kurve der produzierten Teile weist eine stärkere Steigung im Vergleich zu Szenario A auf. Nur an zwei Stellen treten Unterbrechungen aufgrund von Pausenzeiten auf. Der Tagesbedarf wird früher erreicht.	Die Kurve weist keine Steigung auf, sondern liegt als Strecke auf der Abszisse des Koordinatensystems. Bei kontinuierlich gestörtem Produktionsablauf wird kein Teil produziert.
Umlaufbestand	Die Kurve des Umlaufbestands beschreibt eine parallele Strecke zur Abszisse mit dem Ausgangswert 10,0 Stk. Da bei einem störungsfreien Ablauf kontinuierlich Teile zu- und abfließen, ändert sich der Wert des Umlaufbestands nicht.	Die Kurve des Umlaufbestands beschreibt eine parallele Strecke zur Abszisse mit dem Ausgangswert 10,0 Stk. Da bei einem kontinuierlich gestörten Ablauf Teile weder zu- noch abfließen, ändert sich der Wert des Umlaufbestands nicht.
Durchlaufzeit	Bei einem Umlaufbestand von 10,0 Stk und einem Kundentakt von 4,55 min/Stk beträgt die Durchlaufzeit 45,5 min.	Bei einem Umlaufbestand von 10,0 Stk und einem Kundentakt von 4,55 min/Stk beträgt die Durchlaufzeit 45,5 min.
OEE-Wert	Der OEE-Wert liegt für den Fall eines störungsfreien Produktionsablaufs bei 100 %.	Der OEE-Wert liegt für den Fall eines kontinuierlich gestörten Produktionsablaufs bei 0 %.
Qualitätsgrad	Da im Falle eines störungsfreien Produktionsablaufs weder Ausschuss- noch Nacharbeitszeiten anfallen, liegt der Qualitätsgrad bei 100 %.	Da im Falle eines kontinuierlich gestörten Produktionsablaufs kein Teil produziert wird, liegt der Qualitätsgrad bei 0 %.
EPEI-Wert	Im Falle eines störungsfreien Produktionsablaufs liegt die Technische Verfügbarkeit bei 100 %. Da keine Rüstvorgänge anfallen, entspricht der EPEI nach dem Prinzip des One-Pice-Flow daher der Taktzeit von 3,6 min.	Im Falle eines kontinuierlich gestörten Produktionsablaufs wird kein Teil produziert, was zu einer sehr niedrigen Technischen Verfügbarkeit führt. Dies lässt den EPEI-Wert massiv ansteigen.
Energieintensität	Der Prozessschritt befindet sich bei einem störungsfreien Ablauf nur noch während der Pausenzeiten in einem Bereitschaftsmodus. Die Energieintensität sinkt daher im Vergleich zur Ausgangssituation.	Die Energieintensität kann für einen kontinuierlich gestörten Produktionsablauf nicht ermittelt werden, da kein Teil produziert wird. Mit der Annahme, dass ein einziges Teil produziert wurde, entspricht die Energieintensität dem Energiebedarf des Prozessschrittes für den gesamten Fabriktag.

Nach Aufstellung der Hypothesen wurden für alle drei Szenarien Simulationsstudien mit konstanten Eingangswerten durchgeführt. Die Ergebnisse der Simulationsstudien sind mit Hilfe der V & V-Technik *Monitoring* in Abbildung 46 dargestellt. Die Vorhersagen stimmen gut überein und entsprechen dem erwarteten Verhalten. Somit wurde keine der aufgestellten Hypothesen falsifiziert.

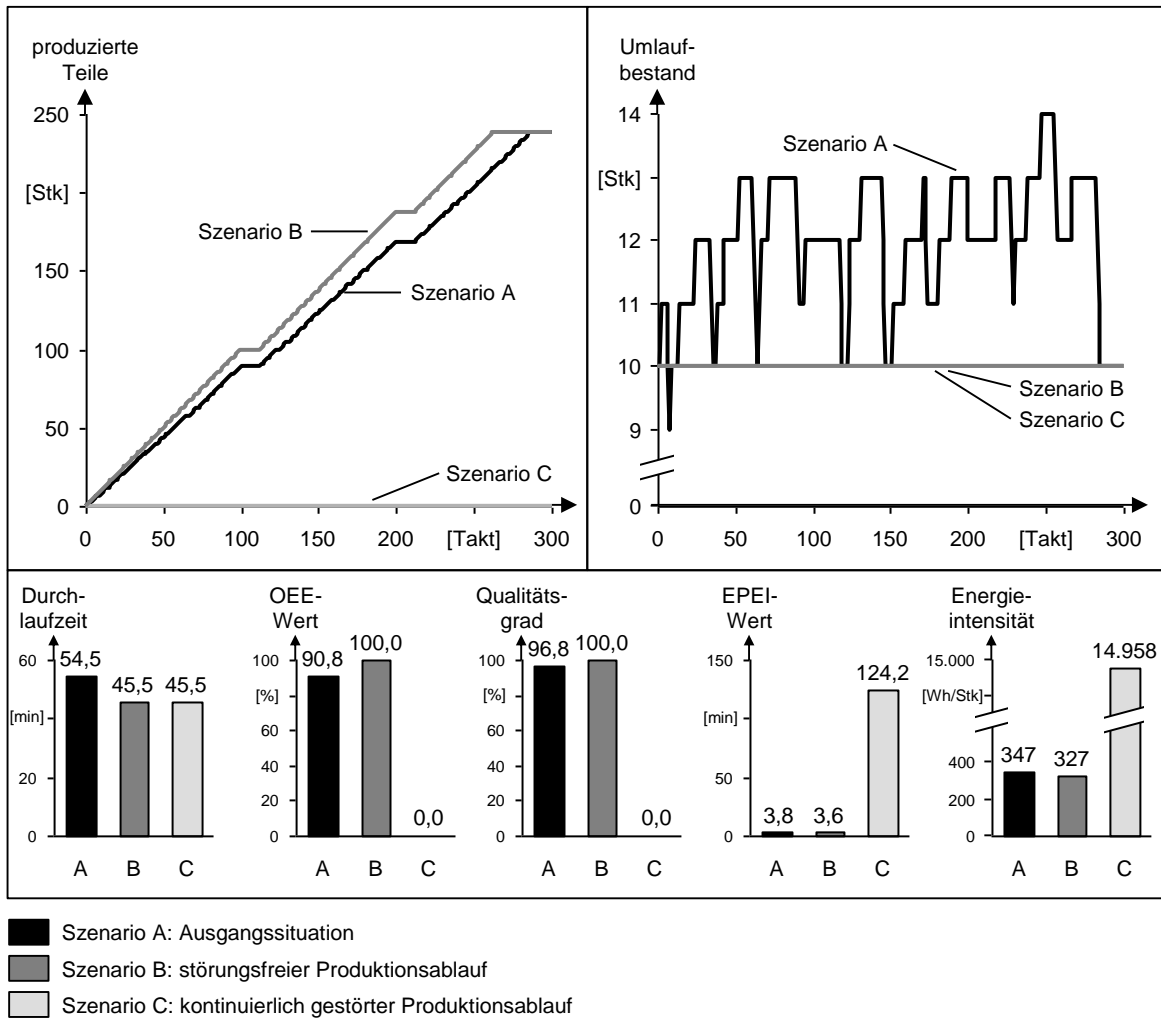


Abbildung 46: Monitoring der Bestands- und Zielgrößen des Fest- und Grenzwerttests

Mit den beschriebenen V & V-Techniken konnte eine Überprüfung des Aufbaus und der Funktionalität des System-Dynamics-Modells für einen einzelnen Prozessschritt durchgeführt werden. Zur Validierung der Vorgehensweise zur GPS-Zielgrößenprognose auf Prozesskettenebene bietet sich die Technik *Validierung von Vorhersagen* an. Sie wird im Rahmen der Durchführung von Fallstudien in der Praxis in Kapitel 5 erläutert und angewandt.

#### 4.5.6 Phase 5: Simulationsdurchführung und Auswertung

Die Simulationsdurchführung und die Auswertung auf Prozesskettenebene werden in zwei Schritten mit Hilfe von Ablaufplänen beschrieben. Zunächst erfolgt eine Simulation der Ausgangssituation zur Definition von Referenzwerten für die GPS-Zielgrößen. Zur Überprüfung der Abbildungsgenauigkeit der Ausgangssituation

werden diese Referenzwerte mit den realen Werten der GPS-Zielgrößen verglichen. Der dazugehörige Ablaufplan ist in Abbildung 47 dargestellt und wird nachfolgend schrittweise erläutert.

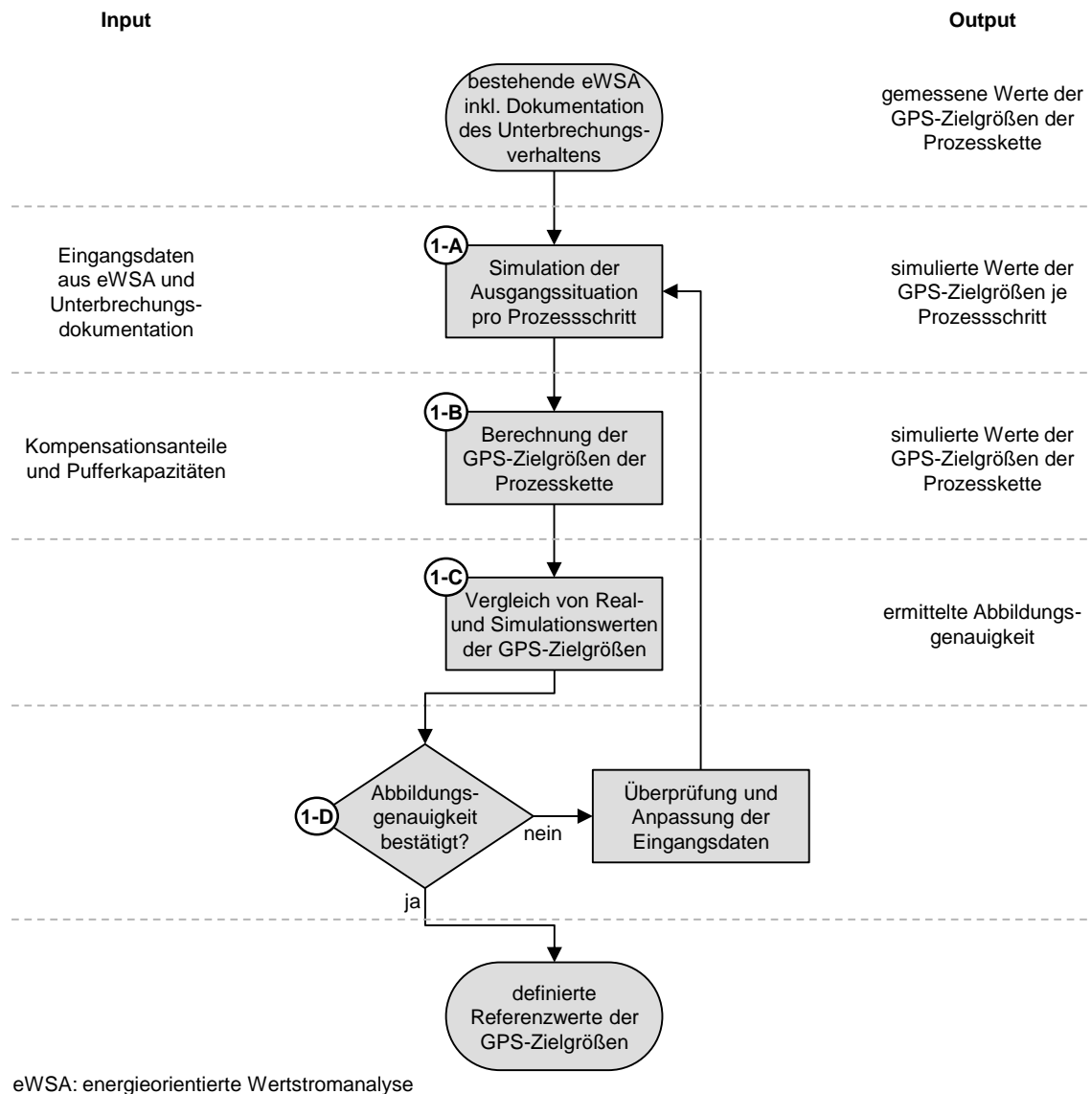


Abbildung 47: Ablaufplan zur Definition von Referenzwerten für GPS-Zielgrößen

Voraussetzung für die Simulation der Ausgangssituation ist eine zuvor durchgeführte energieorientierte Wertstromanalyse inkl. der Dokumentation des Unterbrechungsverhaltens. Für den Abgleich von simulierten und gemessenen Werten sind außerdem die GPS-Zielgrößenwerte der Ausgangssituation auf Prozesskettenebene notwendig. Sie können entweder der BDE entnommen oder aus der energieorientierten Wertstromanalyse abgeleitet werden.

Beginnend mit dem ersten Prozessschritt der Kette erstellt der Anwender für jeden Prozessschritt eine Simulationsstudie eines typischen Fabriktages (Ablaufschritt 1-A). Zufällig auftretende Unterbrechungen der Fertigung werden mit Hilfe von statistischen Verteilungsfunktionen generiert. Durch den generischen Aufbau des Modells sind pro Simulationsstudie lediglich die Eingangsdaten des Prozessschrittes anzupassen. Aufgrund des überschaubaren Aufbaus des System-Dynamics-Modells benötigt die Durchführung einer Studie zudem keine hohe Rechenleistung und kann mit geringem Zeitaufwand erfolgen. Ergebnis der Simulationsstudien sind die GPS-Zielgrößenwerte je Prozessschritt.

Mit Hilfe der Kompensationsanteile und der Pufferkapazitäten ist es nun möglich, die GPS-Zielgrößen entsprechend Abschnitt 4.2.2 auf Prozesskettenebene zu berechnen (Ablaufschritt 1-B). Wie in Tabelle 12 beispielhaft abgebildet, sind diese anschließend mit den Realdaten der Prozesskette zu vergleichen (Ablaufschritt 1-C).

*Tabelle 12: Beispielhafter Vergleich von Real- und Simulationsdaten*

	GPS-Zielgrößen				
	Durchlaufzeit [ZE]	EPEI-Wert [ZE]	OEE [%]	Qualitätsgrad [%]	Energieintensität [Wh/Stk]
reale GPS-Zielgrößenwerte	2,23 h	7,5 min	71,2%	95,2%	192 Wh/Stk
simulierte GPS-Zielgrößenwerte	2,20 h	7,8 min	73,0%	95,0%	189 Wh/Stk

Die Abbildungsgenauigkeit wird durch die Berechnung der prozentualen Abweichung zwischen Real- und Simulationsdaten geprüft. Der Anwender sollte hierfür zu Beginn der Simulationsstudien eine maximale prozentuale Abweichung festlegen. Sollte die Abbildungsgenauigkeit nun aufgrund einer Überschreitung der maximalen Abweichung nicht ausreichend sein, so sind an dieser Stelle die Eingangsdaten des Simulationsmodells zu überprüfen und ggfs. anzupassen (Ablaufschritt 1-D). Bei zufriedenstellender Abbildungsgenauigkeit werden die durch die Simulation ermittelten Werte der GPS-Zielgrößen als Referenzwerte der Prozesskette festgelegt. Die Simulation der Ausgangssituation ist damit abgeschlossen.

Anschließend erstellt der Anwender Prognosen der GPS-Zielgrößenveränderungen, die aus der Umsetzung von Energieeffizienz-Maßnahmen resultieren. Das entsprechende Vorgehen ist anhand eines Ablaufplans in Abbildung 48 dargestellt. Zur Beherrschung der Komplexität wird stets die Umsetzung einer einzigen Maßnahme simuliert. Können dieselben Energieeffizienz-Maßnahmen unabhängig voneinander

in mehreren Prozessschritten durchgeführt werden (z. B. durch den Austausch von Elektromotoren in den Fertigungsmitteln verschiedener Prozessschritte), so ist jede Umsetzung der Maßnahme als Einzelmaßnahme zu behandeln und wird in separaten Simulationsstudien betrachtet.

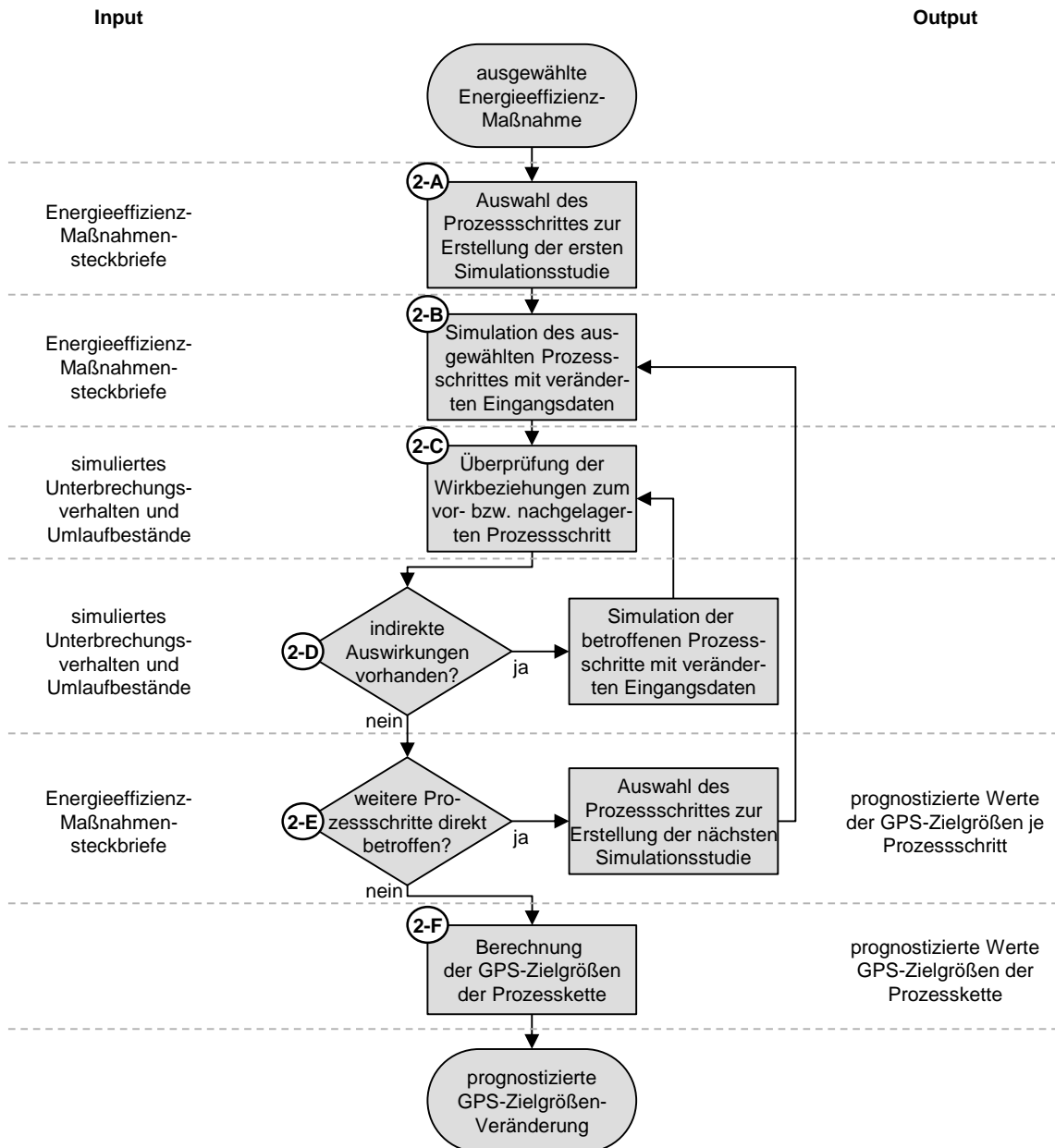


Abbildung 48: Ablaufplan zur Prognose der GPS-Zielgrößenveränderung

Nach der Auswahl einer zuvor generierten Energieeffizienz-Maßnahme prüft der Anwender zunächst die Anzahl der Prozessschritte, deren Eingangsgrößen durch die die Umsetzung der Maßnahme direkten Veränderungen ausgesetzt sind. Prozess-

schritte, die aufgrund der Wirkbeziehungen der Prozesskette (vgl. Abschnitt 4.2.2) indirekt von Veränderungen betroffen sind, werden zu einem späteren Zeitpunkt berücksichtigt. Die Anzahl der durch eine Maßnahme direkt betroffenen Prozessschritte entspricht der Anzahl ihrer Energieeffizienz-Maßnahmensteckbriefe. Sollte nur ein Steckbrief vorhanden sein, so wählt der Anwender diesen für die erste Simulationsstudie aus. Bei mehr als einem Steckbrief schätzt der Anwender das Ausmaß der Wirkungen auf die Prozesskette qualitativ ab, welches die Veränderungen in den Prozessschritten verursacht. Der Prozessschritt, für den die stärksten Wirkungen auf benachbarte Prozessschritte zu erwarten sind, wird für die erste Simulationsstudie ausgewählt (Ablaufschritt 2-A).

Anschließend simuliert der Anwender den Ablauf eines Fabriktages des ausgewählten Prozessschrittes  $PS_n$  (Ablaufschritt 2-B). Die veränderten Eingangsdaten können dem zugehörigen Energieeffizienz-Maßnahmensteckbrief entnommen werden. Als Ergebnis erhält der Anwender die prognostizierten GPS-Zielgrößenwerte des Prozessschrittes  $PS_n$ , die ggfs. von den Referenzwerten der Ausgangssituation abweichen. Um eine Aussage über deren Häufigkeitsverteilung zu ermöglichen, werden sie bei der Simulationsauswertung als unteres Quartil, als Median und als oberes Quartil angegeben (SACHS & HEDDERICH 2009, S. 66).

Nach der Prognose der GPS-Zielgrößenwerte des Prozessschrittes  $PS_n$  folgt nun eine Überprüfung der Wirkbeziehungen zum vorgelagerten Prozessschritt  $PS_{n-1}$  und zum nachgelagerten Prozessschritt  $PS_{n+1}$  (Ablaufschritt 2-C).

Zur Überprüfung der Wirkbeziehungen auf den Prozessschritt  $PS_{n-1}$  wird von der Simulationsstudie eine Auswertung der Taktverluste durchgeführt, die aus dem Erreichen des maximalen Umlaufbestands resultieren und auf die TiR wirken. Eine Steigerung bzw. Senkung der Unterbrechungszeit durch diese Taktverluste führt zu einer proportionalen Steigerung bzw. Senkung der organisatorischen Störzeit $_{ToR}$  des Prozessschrittes  $PS_{n-1}$  (vgl. LÖDDING 2005, S. 95). Sollte eine solche Veränderung festgestellt werden, so ist zusätzlich eine Simulationsstudie des Prozessschrittes  $PS_{n-1}$  mit der angepassten organisatorischen Störzeit $_{ToR}$  durchzuführen (Ablaufschritt 2-D). Ergibt die Überprüfung der Simulationsstudie für Prozessschritt  $PS_{n-1}$  ebenfalls eine Veränderung der Taktverluste, die aus dem Erreichen des maximalen Umlaufbestands resultieren, ist wiederum eine Simulationsstudie des Prozessschrittes  $PS_{n-2}$  durchzuführen. Dieser Vorgang ist fortzuführen bis ein vorgelagerter Prozessschritt  $PS_{n-x}$  keine weitere Veränderung entsprechender Taktverluste im Vergleich zur Ausgangssituation aufweist.

Die Wirkbeziehungen auf den nachgelagerten Prozessschritt  $PS_{n+1}$  kann der Anwender durch eine Veränderung der Anzahl an Taktverlusten auf die ToR überprüfen. Das Auftreten einer solchen Veränderung resultiert aus einer Steigerung bzw. Senkung der Unterbrechungszeit und führt zu einer proportionalen Steigerung bzw. Senkung der *organisatorischen Störzeit* $_{TIR}$  des Prozessschrittes  $PS_{n+1}$  (vgl. LÖDDING 2005, S. 95). Stellt der Anwender ein entsprechendes Delta der Unterbrechungszeit gegenüber der Ausgangssituation fest, so ist zusätzlich eine Simulationsstudie des Prozessschrittes  $PS_{n+1}$  mit der angepassten organisatorischen Störzeit $_{TIR}$  durchzuführen. Das Ergebnis der Studie muss seinerseits wiederum auf Wirkbeziehungen zum nachgelagerten Prozessschritt  $PS_{n+2}$  überprüft werden. Dieser Vorgang ist ebenfalls fortzuführen bis ein nachgelagerter Prozessschritt  $PS_{n+x}$  keine weitere Veränderung entsprechender Taktverluste im Vergleich zur Ausgangssituation aufweist.

Eine im Prozessschritt  $PS_n$  verursachte Veränderung kann sich somit auf mehrere vor- und nachgelagerte Prozessschritte auswirken, was zusätzliche Simulationsstudien erforderlich macht (Abbildung 49).

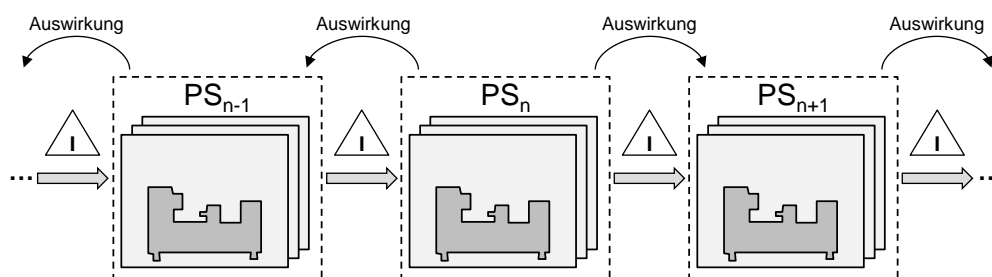


Abbildung 49: Schema möglicher Auswirkungen der Umsetzung einer Energieeffizienz-Maßnahme im Prozessschritt  $n$

Sind keine weiteren Auswirkungen auf vor- bzw. nachgelagerte Prozessschritte feststellbar, so ist anhand der Maßnahmensteckbriefe zu überprüfen, ob die Energieeffizienz-Maßnahme direkte Auswirkungen auf weitere Prozessschritte aufweist (Ablaufschritt 2-E). Nach dem bereits erläuterten Vorgehen führt der Anwender die entsprechenden Simulationsstudien unter Berücksichtigung der Wirkbeziehungen durch, bis die Maßnahme vollständig simuliert ist. Ergebnis sind schließlich die prognostizierten Werte der GPS-Zielgrößen je Prozessschritt.

Abschließend werden die prognostizierten GPS-Zielgrößenveränderungen der Prozesskette nach bewährtem Schema berechnet und wie in Abbildung 50 dargestellt aufbereitet.



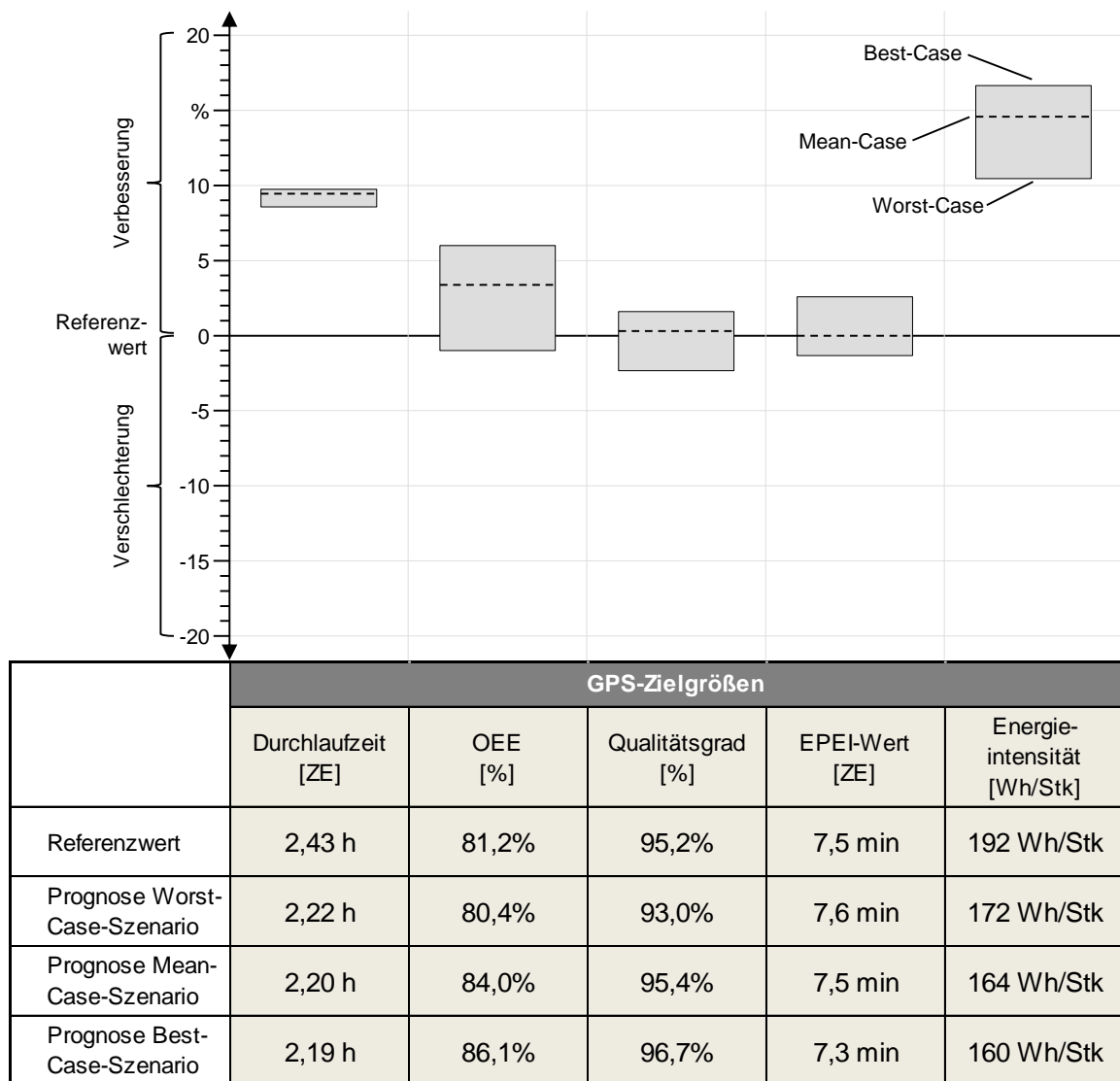


Abbildung 50: Beispielhafte Prognose der GPS-Zielgrößenveränderung der Prozesskette durch eine Energieeffizienz-Maßnahme

Aus den Prognosewerten des Median sowie des unteren und oberen Quartils leitet der Anwender ein Worst-Case-, ein Mean-Case- und ein Best-Case-Szenario ab. Das Diagramm in Abbildung 50 zeigt die prozentuale Veränderung der Zielgrößen in Form einer Box an. Die obere und die untere Begrenzung der Box stellen die Best-Case- und Worst-Case-Szenarien dar. Die gestrichelte Linie repräsentiert das Mean-Case-Szenario.

Die Verbesserung einer Zielgröße wird im Diagramm dabei stets als positive Veränderung abgebildet. Die Absolutwerte der Zielgrößen verhalten sich jedoch teilweise reziprok. So ist die Reduzierung der Durchlaufzeit bspw. eine Verbesserung und wird im Diagramm als Veränderung in positive Richtung be-

schrieben. Die Reduzierung des OEE-Wertes bedeutet jedoch eine Verschlechterung und ist im Diagramm als Veränderung in negativer Richtung eingetragen. Die prognostizierten Werte der GPS-Zielgrößenveränderung gehen in die erweiterte Wirtschaftlichkeitsbewertung ein, deren Aufbau im nachfolgenden Abschnitt beschrieben ist.

### **4.6 Erweiterte Wirtschaftlichkeitsbewertung**

#### **4.6.1 Genereller Aufbau des erweiterten Bewertungsverfahrens**

Nach der Prognose der GPS-Zielgrößenveränderungen durch die mögliche Umsetzung einer Energieeffizienz-Maßnahme leitet der Anwender im letzten Schritt der Methodik eine Umsetzungsempfehlung durch eine mehrdimensionale Wirtschaftlichkeitsbewertung der Maßnahme ab. Diese Bewertung setzt sich aus einem der gängigen, in Abschnitt 2.4.2 vorgestellten, eindimensionalen Investitionsrechnungsverfahren und einem der in Abschnitt 2.4.3 beschriebenen Verfahren zur multikriteriellen Entscheidungsfindung zusammen.

Das Investitionsrechnungsverfahren gibt Aufschluss über die monetär bewertbare Wirtschaftlichkeit der Maßnahme. Wie bereits in Abschnitt 2.4.2 erläutert, existiert dabei kein einheitlicher Standard. Stattdessen werden unterschiedliche Verfahren der statischen und dynamischen Investitionsrechnung verwendet (vgl. POGGENSEE 2011; GÖTZE 2008). Auch für den Umfang der zu berücksichtigenden Kosten gibt es keine einheitliche Regelung (VDI 3922, S.13). Für die Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendung in GPS soll die Wahl des Investitionsrechnungsverfahrens daher dem Anwender überlassen werden. Folgendes ist dabei jedoch zu beachten: Das Verfahren soll dem entsprechen, das typischerweise im Unternehmen praktiziert wird. Für die Bewertung unterschiedlicher Maßnahmen ist zudem stets dasselbe Verfahren zu wählen, um Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Durch das Unternehmen ist darüber hinaus ein Referenzwert für eine gegebene Wirtschaftlichkeit vorzugeben, mit dem das Ergebnis der Investitionsrechnung verglichen werden kann.

Das Verfahren zur multikriteriellen Entscheidungsfindung wird benötigt, um die prognostizierten GPS-Zielgrößenveränderungen in die Bewertung zu integrieren. Für diese Integration ist zunächst eine Normierung der einzelnen GPS-Zielgrößenwerte notwendig, die aus der Prognose der Zielgrößenveränderung gewonnen werden. Die Bedeutsamkeiten der GPS-Zielgrößen unterscheiden sich

jedoch untereinander und je nach Unternehmen. So wird z. B. die Zielgröße Qualitätsgrad in der produzierenden Industrie häufig als wichtiger erachtet als die Energieintensität (vgl. SCHNELLBACH ET AL. 2013, S. 435). Der Anwender der Methodik sollte daher die Möglichkeit zur Gewichtung der normierten GPS-Zielgrößenwerte erhalten. Nach der Gewichtung ist die Aggregation aller Zielgrößen zu einem Nutzwert notwendig, der einen Vergleich mit dem ebenfalls normierten Ergebnis der Investitionsrechnung ermöglicht. Ein Verfahren zur multikriteriellen Entscheidungsfindung muss neben der Möglichkeit der Aggregation normierter GPS-Zielgrößenwerte zu einem Nutzwert folglich ein Vorgehen zur Gewichtung der einzelnen Zielgrößen bieten.

Mit den jeweils normierten Nutzwerten der Investitionsrechnung und der multikriteriellen Bewertung wird schließlich mit Hilfe eines Entscheidungsportfolios eine Umsetzungsempfehlung für eine Energieeffizienz-Maßnahme abgeleitet. Der schematische Aufbau der erweiterten Wirtschaftlichkeitsbewertung ist in Abbildung 51 dargestellt.

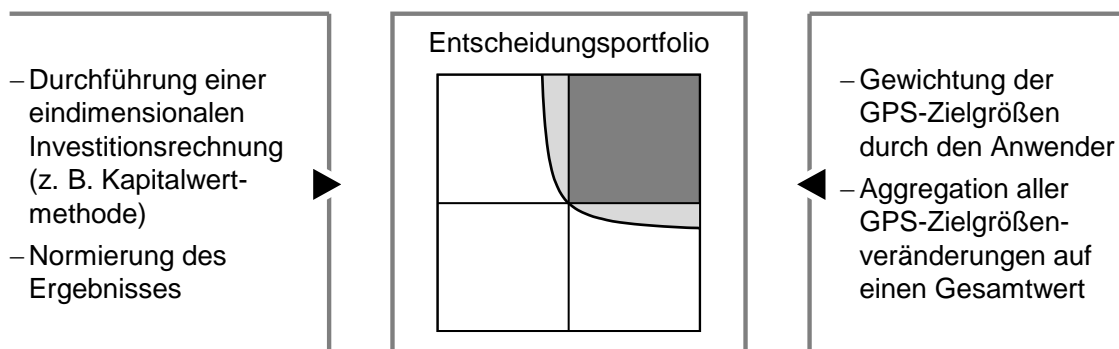


Abbildung 51: Schematischer Aufbau der erweiterten Wirtschaftlichkeitsbewertung für Energieeffizienz-Maßnahmen

Die Auswahl und Anwendung eines geeigneten Verfahrens zur multikriteriellen Bewertung der GPS-Zielgrößenveränderungen wird in Abschnitt 4.6.2 behandelt. In Abschnitt 4.6.3 folgt schließlich die Beschreibung des Entscheidungsportfolios.

#### 4.6.2 Bewertung der GPS-Zielgrößenveränderungen

Die in Abschnitt 2.4.3 vorgestellten Verfahren zur multikriteriellen Bewertung erfüllen die zuvor genannten Anforderungen einer möglichen Gewichtung und Normierung von Kriterien, bei denen es sich im vorliegenden Fall um die GPS-Zielgrößen handelt. Die Nutzwertanalyse (NWA) ist ein gut nachvollziehbares

Verfahren, das mit geringem Aufwand durchgeführt werden kann (GÖTZE 2008, S. 187). Die Gewichtung von Kriterien erfolgt jedoch direkt durch den Anwender und unterliegt somit einer hohen Subjektivität (RIEDL 2006, S. 119). Der Analytische Hierarchieprozess (AHP) verwendet hierfür das weniger subjektive Verfahren der Paarvergleiche von Kriterien mit anschließender Konsistenzüberprüfung (MEIXNER & HAAS 2002, S. 168 ff.). Eine Konsistenzüberprüfung ist mit Hilfe der Multi-Attributiven Nutzentheorie (MAUT) ebenfalls möglich. Sie setzt jedoch zur Verwendung einer additiven Gesamtnutzenfunktion die Unabhängigkeit der zu bewertenden Kriterien voraus (GÖTZE 2008, S. 207). Die hier genannten Kriterien entsprechen in der erweiterten Wirtschaftlichkeitsbewertung den GPS-Zielgrößen. Durch das GPS-Wirkgefüge wird jedoch ersichtlich, dass eine vollständige Unabhängigkeit der Zielgrößen nicht gegeben ist (vgl. Abbildung 24). Die MAUT kann daher keine Anwendung finden. Auch für die NWA und den AHP ist eine Unabhängigkeit der Kriterien von Vorteil. Sie ist jedoch keine Bedingung für deren Anwendung (GÖTZE 2008, S. 189). Aufgrund der zusätzlichen Möglichkeit zur Konsistenzprüfung bietet sich zur Durchführung der multi-kriteriellen Bewertung daher in diesem Fall der AHP an. Dessen Anwendung wird nachfolgend allgemein erläutert und mit Hilfe eines Beispiels verdeutlicht.

Im ersten Schritt der Anwendung des AHP ist die Zielstellung festzulegen, die als Umsetzungsentscheidung für eine Energieeffizienz-Maßnahme betitelt werden kann. Anschließend folgt die Strukturierung der Entscheidungshierarchie. Sie ist in drei Ebenen untergliedert und in Abbildung 52 dargestellt.

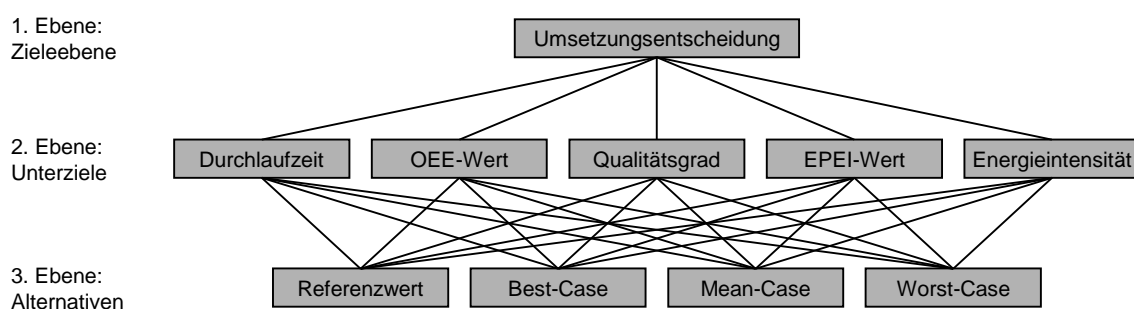


Abbildung 52: Entscheidungshierarchie für GPS-Zielgrößenveränderungen (in Anlehnung an GÖTZE 2008, S. 198)

Die erste Ebene stellt die Zielebene dar und besteht aus der betitelten Zielstellung der Umsetzungsentscheidung. Die zweite Ebene der Unterziele enthält die fünf GPS-Zielgrößen, die durch den Anwender mit Hilfe von Paarvergleichen einer

Gewichtung unterzogen werden können. Die dritte Ebene bildet sich aus den quantitativen Daten der vier Alternativen der Maßnahmenumsetzung. Die erste Alternative beschreibt die Referenzwerte der GPS-Zielgrößen der Ausgangssituation vor der Maßnahmenumsetzung. Die weiteren Alternativen stellen die Szenarien des Worst-Case, des Mean-Case sowie des Best-Case dar.

Nach dem Aufbau der Entscheidungshierarchie folgt die Gewichtung der GPS-Zielgrößen. Für den allgemeinen Gewichtungsvorgang mit Hilfe des AHP muss der Anwender zwei Elemente  $i$  und  $j$  sinnvoll mittels Paarvergleich  $a_{ij}$  in Beziehung setzen. Der Wert  $a_{ij}$  gibt an, um wieviel das Element  $i$  bedeutender ist als  $j$ . Abbildung 53 zeigt die Bewertungsskala zur Durchführung der Paarvergleiche.

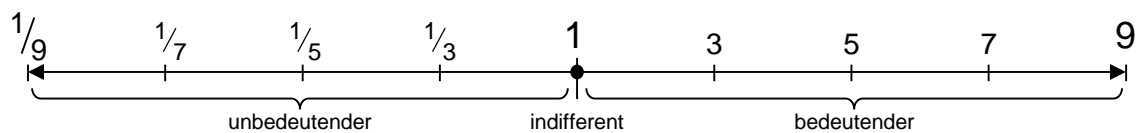


Abbildung 53: AHP-Bewertungsskala (MEIXNER & HAAS 2002, S. 139)

Der Anwender muss zunächst die Spaltensummen  $c_i$  der Paarvergleich-Matrix bilden. Mittels der Spaltensummen werden anschließend alle Matrixeinträge  $a_{ij}$  normiert und die Zeilensummen  $r_i$  der normierten Matrix gebildet. Schließlich lassen sich die Gewichtungen  $w_i$  für jedes Element bestimmen (Tabelle 13).

Tabelle 13: Vorgehensweise zur Berechnung der Gewichtungen (MEIXNER & HAAS 2002, S. 146)

	Paarvergleich-Matrix				Normierung				$r_i$	Gewichtung $w_i$
	$a_1$	$a_2$	...	$a_n$	$a_1$	$a_2$	...	$a_n$		
$a_1$	$a_{11}=1$	$a_{12}$	...	$a_{1n}$	$\frac{a_{11}}{c_1}$	$\frac{a_{12}}{c_2}$	...	$\frac{a_{1n}}{c_n}$	$r_1$	$w_1 = \frac{r_1}{n}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$a_n$	$a_{n1} = \frac{1}{a_{1n}}$	$a_{n2}$	...	$a_{nn}=1$	$\frac{a_{n1}}{c_1}$	$\frac{a_{n2}}{c_2}$	...	$\frac{a_{nn}}{c_n}$	$r_n$	$w_n = \frac{r_n}{n}$
$c_i$	$c_1 = \sum_{i=1}^n a_{i1}$	$c_2 = \sum_{i=1}^n a_{i2}$	...	$c_n$	1	1	...	1	n	1

Nach beschriebenem Schema folgt eine beispielhafte Gewichtung der GPS-Zielgrößen (Tabelle 14). Diese Gewichtung sollte nicht für jede einzelne Energieeffizienz-Maßnahme durchgeführt werden, sondern eine für das entsprechende Unternehmen oder zumindest für einen Produktionsbereich allgemeingültige Fest-

legung sein. Dadurch kann eine Manipulation der Evaluationsergebnisse für individuelle Maßnahmen ausgeschlossen werden (vgl. RIEDL 2006, S. 119).

Tabelle 14: Beispielhafter Gewichtungsvorgang der GPS-Zielgrößen

	Paarvergleich-Matrix					Normierung					Gewichtung	
	DLZ	OEE	QG	EPEI	EI	DLZ	OEE	QG	EPEI	EI	$r_i$	$w_i$
DLZ	1	1/3	1/3	5	5	0,14	0,13	0,13	0,25	0,22	0,85	0,17
OEE	3	1	1	7	7	0,41	0,38	0,38	0,34	0,30	1,82	0,36
QG	3	1	1	7	7	0,41	0,38	0,38	0,34	0,30	1,82	0,36
EPEI	1/5	1/7	1/7	1	3	0,03	0,05	0,05	0,05	0,13	0,32	0,06
EI	1/5	1/7	1/7	1/3	1	0,03	0,05	0,05	0,02	0,04	0,20	0,04
$\Sigma$	7,40	2,62	2,62	20,33	23,00	1	1	1	1	1	5	1

DLZ: Durchlaufzeit    OEE: OEE-Wert    QG: Qualitätsgrad    EPEI: EPEI-Wert    EI: Energieintensität

Im Beispiel nehmen die GPS-Zielgrößen OEE-Wert und Qualitätsgrad die bedeutendsten Stellungen ein. Von mittlerer Bedeutung ist die Durchlaufzeit. Der EPEI-Wert und die Energieintensität sind weniger bedeutend gewichtet.

Bei der Durchführung von Paarvergleichen zur Bewertung der Bedeutsamkeit von Elementen kann es zu Inkonsistenzen kommen. Daher hat SAATY (1987, S. 171) ein standardisiertes Verfahren zur Konsistenzprüfung im AHP integriert. Dazu ist anhand der Paarvergleich-Matrix zunächst die Ermittlung der Durchschnittsmatrix notwendig (Tabelle 15).

Tabelle 15: Berechnung der Durchschnittsmatrix (MEIXNER & HAAS 2002, S. 170)

	Durchschnittsmatrix				Zeilensumme
	$a_1$	$a_2$	...	$a_n$	$\bar{r}_i$
$a_1$	$w_1 \cdot a_{11}$	$w_2 \cdot a_{12}$	...	$w_n \cdot a_{1n}$	$\bar{r}_1 = \sum_{i=1}^n w_i \cdot a_{1i}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$
$a_n$	$w_1 \cdot a_{n1}$	$w_2 \cdot a_{n2}$	...	$w_n \cdot a_{nn}$	$\bar{r}_n$

Die Prüfung der Konsistenz erfolgt nun durch den Vergleich der Eigenwerte der Durchschnittsmatrix und einer vollständig konsistenten Matrix. Eine inkonsistente Durchschnittsmatrix besitzt  $n$  verschiedene Eigenwerte  $\lambda$ , wobei  $n$  die Dimension der Durchschnittsmatrix ist. Eine vollständig konsistente Matrix besitzt nur einen Eigenwert  $\lambda_K = n$  (MEIXNER & HAAS 2002, S. 170). Der Quotient aus den Werten der Zeilensumme und der Einträge der Diagonalen der Durchschnittsmatrix ergibt die Eigenwerte  $\lambda_i$ :

$$\lambda_i = \frac{\bar{r}_i}{w_i \cdot a_{ii}} \quad (4-16)$$

Der maximale Eigenwert der Durchschnittsmatrix mit der Dimension  $n$  wird daraufhin anhand folgender Formel ermittelt:

$$\lambda_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{n} \quad (4-17)$$

Aus dem maximalen Eigenwert  $\lambda_{\max}$  und dem Eigenwert einer vollständig konsistenten Matrix  $\lambda_K = n$  lässt sich der Konsistenzindex CI berechnen, (SAATY 1987, S. 171):

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_K}{n - 1} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4-18)$$

Für unterschiedliche Dimensionen der Paarvergleich-Matrix sind verschiedene Abweichungen von der vollständigen Konsistenz erlaubt. Je größer die Matrix wird, desto schwieriger ist die Einhaltung der Konsistenz. Um die Dimension der Matrix zu berücksichtigen, wird der Konsistenzindex CI mit einem Durchschnittswert (Zufallskonsistenz RI) zufällig zustande gekommener, gleich großer Matrizen verglichen. Aus diesem Vergleich ergibt sich die Konsistenzverhältniszahl CR (MEIXNER & HAAS 2002, S. 171):

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4-19)$$

Werte für die Zufallskonsistenz RI für verschiedene Dimensionen  $n$  können der Literatur entnommen werden. SAATY (1987, S. 171) gibt als Maximalwerte  $CR_{\max} = 0,05$  für  $n = 3$ ,  $CR_{\max} = 0,09$  für  $n = 4$  und  $CR_{\max} = 0,1$  für  $n > 4$  an. Übersteigt CR den empfohlenen Grenzwert, wird dem Anwender nahe gelegt, die

Werte für den paarweisen Vergleich zu überarbeiten, da die Konsistenz der analysierten Matrix für eine optimale Entscheidung nicht ausreichend ist (vgl. GÖTZE 2008, S. 195). Im Beispiel aus Tabelle 14 ergibt sich für den Konsistenzindex CI der Wert 0,064 und für die Konsistenzverhältniszahl CR ein Wert von 0,058. Für eine Matrix mit  $n = 5$  Dimensionen gilt die maximale Konsistenzverhältniszahl  $CR_{\max} < 0,1$  (SAATY 1987, S. 171). Dies überprüft die Konsistenz der Paarvergleiche.

Für die untere Ebene der Alternativen ist keine Gewichtung durch einen Paarvergleich notwendig. Stattdessen gehen die aus der Simulation gewonnenen quantitativen Daten direkt in die Bewertung ein (MEIXNER & HAAS 2002, S. 158). In Tabelle 16 werden beispielhaft die Daten aus Abbildung 50 verwendet, um die Vorgehensweise zu verdeutlichen. Durch eine Normierung in der rechten Matrix werden die GPS-Zielgrößenwerte einer Gewichtung ohne Paarvergleich unterzogen.

Tabelle 16: Normierung quantitativer Daten im AHP

	quantitative Daten					Normierung				
	DLZ	OEE	QG	EPEI	EI	DLZ	OEE	QG	EPEI	EI
RW	2,43 h	81,2%	95,2 %	7,5 min	192 $\frac{\text{Wh}}{\text{Stk}}$	$\frac{(a_{11})^{-1}}{\sum(a_{n1})^{-1}}$	$\frac{a_{12}}{\sum a_{n2}}$	$\frac{a_{13}}{\sum a_{n3}}$	$\frac{(a_{14})^{-1}}{\sum(a_{n4})^{-1}}$	$\frac{(a_{15})^{-1}}{\sum(a_{n5})^{-1}}$
WC	2,22 h	80,4 %	93,0 %	7,6 min	172 $\frac{\text{Wh}}{\text{Stk}}$	$\frac{(a_{21})^{-1}}{\sum(a_{n1})^{-1}}$	$\frac{a_{22}}{\sum a_{n2}}$	$\frac{a_{23}}{\sum a_{n3}}$	$\frac{(a_{24})^{-1}}{\sum(a_{n4})^{-1}}$	$\frac{(a_{25})^{-1}}{\sum(a_{n5})^{-1}}$
MC	2,20 h	84,0 %	95,4 %	7,5 min	164 $\frac{\text{Wh}}{\text{Stk}}$	$\frac{(a_{31})^{-1}}{\sum(a_{n1})^{-1}}$	$\frac{a_{32}}{\sum a_{n2}}$	$\frac{a_{33}}{\sum a_{n3}}$	$\frac{(a_{34})^{-1}}{\sum(a_{n4})^{-1}}$	$\frac{(a_{35})^{-1}}{\sum(a_{n5})^{-1}}$
BC	2,19 h	86,1%	96,7 %	7,3 min	160 $\frac{\text{Wh}}{\text{Stk}}$	$\frac{(a_{41})^{-1}}{\sum(a_{n1})^{-1}}$	$\frac{a_{42}}{\sum a_{n2}}$	$\frac{a_{43}}{\sum a_{n3}}$	$\frac{(a_{44})^{-1}}{\sum(a_{n4})^{-1}}$	$\frac{(a_{45})^{-1}}{\sum(a_{n5})^{-1}}$
					$\Sigma$	1	1	1	1	1

RW: Referenzwert      MC: Mean-Case      DLZ: Durchlaufzeit      QG: Qualitätsgrad      EI: Energieintensität  
 WC: Worst-Case      BC: Best-Case      OEE: OEE-Wert      EPEI: EPEI-Wert

Dazu ist zunächst zu klären, ob einem höheren GPS-Zielgrößenwert eine höhere oder eine niedrigere Bedeutung zuzuordnen ist. Für den OEE-Wert und den Qualitätsgrad sind möglichst hohe Werte anzustreben. Eine Normierung  $k_{ij}$  wird in diesem Fall mit folgender Gleichung durchgeführt (MEIXNER & HAAS 2002, S. 158):



$$k_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (4-20)$$

Für die Durchlaufzeit, den EPEI-Wert und die Energieintensität sollten möglichst niedrige Werte erreicht werden. Zur Berücksichtigung dieser reversen Bedeutungsgewichte wird mit reziproken Werten gerechnet (MEIXNER & HAAS 2002, S. 159):

$$k_{ij} = \frac{(a_{ij})^{-1}}{\sum_{i=1}^n (a_{ij})^{-1}} \quad (4-21)$$

Im Anschluss an die Gewichtung bzw. Normierung der beiden unteren Ebenen folgt die Zusammenführung zu einem Gesamtnutzwert. Dazu ist die normierte Matrix der dritten Ebene mit den Gewichten der zweiten Ebene zu multiplizieren (MEIXNER & HAAS 2002, S. 163). Als Ergebnis erhält der Anwender vier Nutzwerte  $n_i$  für die vier Alternativen der dritten Ebene. Da die drei prognostizierten Szenarien des Worst-Case, des Mean-Case und des Best-Case im Verhältnis zum Referenzwert verglichen werden sollen, wird abschließend eine weitere Normierung durchgeführt, indem alle vier Nutzwerte durch den Nutzwert des Referenzwertes dividiert werden (vgl. Abbildung 54).

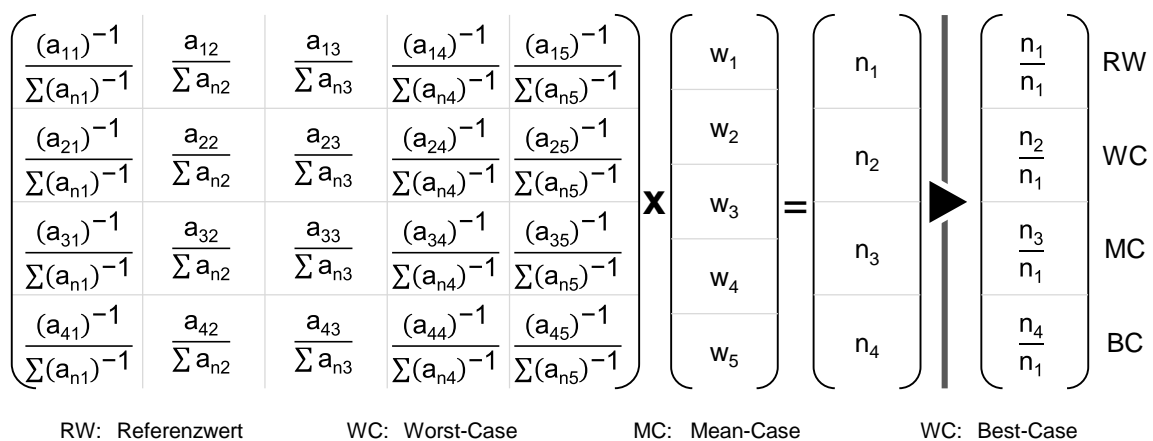


Abbildung 54: Zusammenführung der Gewichtungen

Für das in Tabelle 16 genannte Beispiel sind die Werte in Abbildung 55 berechnet. Durch die abschließende Normierung wird dem Referenzwert stets der normierte Nutzwert 1,0 zugeordnet. Liegen die übrigen Werte über dem Wert 1,0 so kommt dies einer gesamtheitlichen Verbesserung der GPS-Zielgrößen gegenüber dem Referenzwert gleich. Ein Wert  $< 1,0$  bedeutet eine Verschlechterung gegenüber dem

Referenzwert. Im Beispiel entspricht das Worst-Case-Szenario etwa dem Referenzwert. Durch das Mean-Case-Szenario ist eine Verbesserung des Referenzwertes um 3,6 % zu erwarten. Im Best-Case-Szenario beläuft sich die Verbesserung auf 5,5 % im Vergleich zum Referenzwert.

0,232	0,245	0,250	0,249	0,223	<b>x</b>	<b>=</b>	<b>→</b>	0,171	<b>=</b>	0,244	<b>→</b>	1,000	RW						
0,254	0,242	0,245	0,246	0,249				0,364		0,246		1,006	WC						
0,256	0,253	0,251	0,249	0,261				0,364		0,253		1,036	MC						
0,258	0,260	0,254	0,256	0,267				0,063		0,257		1,055	BC						
RW: Referenzwert					WC: Worst-Case					MC: Mean-Case					WC: Best-Case				

Abbildung 55: Beispielhafte Berechnung der normierten Nutzwerte

### 4.6.3 Ableitung von Umsetzungsempfehlungen

Die Ergebnisse der Bewertung der GPS-Zielgrößen werden nun im letzten Schritt der erweiterten Wirtschaftlichkeitsbewertung mit den Ergebnissen der Investitionsrechnung zusammengeführt, um eine Umsetzungsempfehlung abzuleiten. Dazu ist auch das Ergebnis der Investitionsrechnung einer Normierung zu unterziehen.

Die normierten Werte werden nun in einem sog. Entscheidungsportfolio verwendet, um die Energieeffizienz-Maßnahme zu positionieren. Auf der horizontalen Achse des Portfolios ist das Ergebnis der Investitionsrechnung abgebildet. Der Wert 1,0 stellt einen zu erreichenden Referenzwert dar. Wie bereits beschrieben kann es sich je nach Investitionsrechnungsverfahren dabei z. B. um eine Mindestrendite, eine Mindestverzinsung oder eine maximale Amortisationszeit handeln.

Die vertikale Achse stellt die Bewertung der GPS-Zielgrößenveränderungen dar. Dem Referenzwert vor der Umsetzung der Energieeffizienz-Maßnahme ist im Portfolio der Wert 1,0 zugeordnet. Das Portfolio ist in Abbildung 56 dargestellt und wird in vier Quadranten aufgeteilt. Energieeffizienz-Maßnahmen im Quadranten IV erreichen keinen der beiden Referenzwerte und sollten daher nicht umgesetzt werden. Im Quadranten II werden Energieeffizienz-Maßnahmen positioniert, die sowohl den Referenzwert der Investitionsrechnung, als auch den Referenzwert der GPS-Zielgrößenveränderung übertreffen. Diese Maßnahmen können bedenkenlos

umgesetzt werden. Energieeffizienz-Maßnahmen, die im Quadranten I bzw. III liegen, übertreffen nur einen der beiden Referenzwerte. Eine Umsetzung ist daher zur Diskussion zu stellen. Die Grenzen des Portfolios liegen jeweils bei einer 100 %-igen Abweichung in beide Richtungen. Repräsentiert der Referenzwert der Investitionsrechnung bspw. eine maximale Amortisationszeit von 12 Monaten, so würde der Nutzwert 2,0 einer sofortigen Amortisation entsprechen. Der Nutzwert 0,0 wiederum entspricht einer Amortisationszeit von 24 Monaten. Maßnahmen, die eine noch höhere Amortisationszeit benötigen, bekommen ebenfalls den Nutzwert 0,0 zugeordnet.

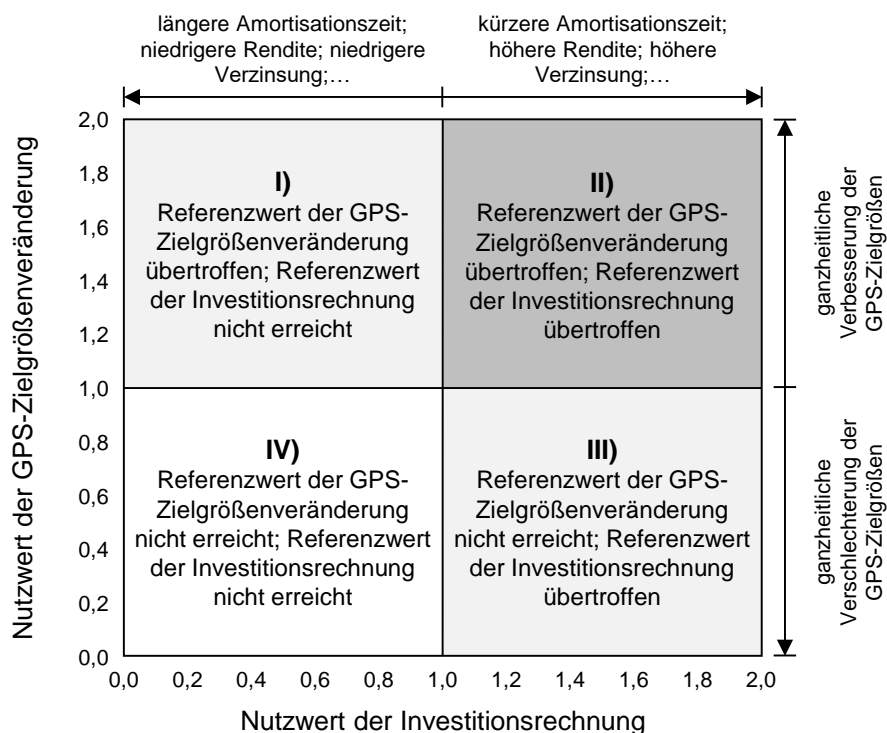


Abbildung 56: Entscheidungsportfolio

Im Einzelfall kann es sich als sinnvoll erweisen, Energieeffizienz-Maßnahmen umzusetzen, die einen der beiden Referenzwerte übertreffen, den anderen jedoch unterschreiten. Abhängig von individuellen Anforderungen soll der Anwender daher die Möglichkeit erhalten, die Grenzen des Quadranten II im Entscheidungsportfolio zu erweitern. Zu diesem Zweck kann eine Grenzkurve integriert werden, die folgende Anforderungen erfüllt: Eine Erweiterung der Grenzen darf nicht dazu führen, dass Maßnahmen, die beide Referenzwerte unterschreiten (Quadrant IV), für eine Umsetzung empfohlen werden. Daher muss die Kurve stets den Punkt

(1,0|1,0) sowie den oberen und den rechten Rand des Portfolios schneiden. Zwischen diesen Schnittpunkten muss die Funktion, die die Kurve beschreibt zudem streng monoton fallend sein. Bei Abnahme des einen Nutzwertes wird dadurch eine Zunahme des anderen Nutzwertes garantiert. Zur Beschreibung der Grenzkurve wird daher eine gebrochenrationale Funktion  $f(x)$  mit einem Zählerpolynom vom Grad 0 und einem Nennerpolynom vom Grad 1 sowie den Koeffizienten  $a$ ,  $b$  und  $c$  gewählt (vgl. PAPULA 2001, S. 85):

$$f(x) = \frac{a}{x+b} + c \text{ für } x > -b \quad (4-22)$$

Die Variable  $x$  stellt dabei die Ausprägung des Nutzwertes der Investitionsrechnung dar. Der Funktionswert  $f(x)$  repräsentiert die Ausprägung des Nutzwertes der GPS-Zielgrößenveränderung. Da die Grenzkurve die Grenzen des Quadranten II im Portfolio erweitern soll, ist sie nur im Bereich  $x > -b$  sinnvoll einsetzbar. Funktionswerte  $f(x)$  für  $x \leq -b$  sind negativ und werden nicht berücksichtigt.

Durch die Vorgabe dreier Bezugspunkte kann der Anwender eine Parametrierung mit Hilfe eines linearen Gleichungssystems durchführen. Der erste Bezugspunkt weist im Entscheidungsportfolio die Koordinaten (1,0|1,0) auf. Die Koordinaten der beiden weiteren Bezugspunkte lauten  $(x_{\min}|2,0)$  und  $(2,0|y_{\min})$ . Sie schneiden den rechten und den oberen Rand des Entscheidungsportfolios und können durch den Anwender bestimmt werden. Für den Wert  $x_{\min}$  wird der kleinste Nutzwert unterhalb des Referenzwertes 1,0 gewählt, der bei einem Nutzwert von 2,0 der GPS-Zielgrößenveränderung als Ausprägung der Investitionsrechnung erreicht werden darf. Gleiches gilt vice versa für den Wert  $y_{\min}$ . Die definierten Werte  $x_{\min}$  und  $y_{\min}$  bewegen sich jeweils in einem Intervall zwischen den Werten 0,0 und 1,0. Sie müssen jedoch nicht identisch sein. In Abbildung 57 ist die Grenzkurve des Entscheidungsportfolios beispielhaft dargestellt. Neben dem Bezugspunkt (1,0|1,0) sind dabei die Bezugspunkte (0,8|2,0) und (2,0|0,8) gewählt. Außerdem ist in der Abbildung die Positionierung der beispielhaften Energieeffizienz-Maßnahme aus Abbildung 55 dargestellt und erläutert.

Ergänzend zu den drei Szenarien der GPS-Zielgrößenveränderung wurde der Nutzwert der Investitionsrechnung mit dem Wert 1,4 bewertet. Bei einer vorgegebenen Rendite von 40 % erreicht die Beispiel-Maßnahme eine Rendite von etwa 56 %. Durch die Normierung wird ein Nutzwert von 1,4 erreicht. Die beispielhafte Energie-Effizienzmaßnahme ist in allen drei Szenarien im Quadranten II positioniert und wird daher für eine Umsetzung empfohlen.

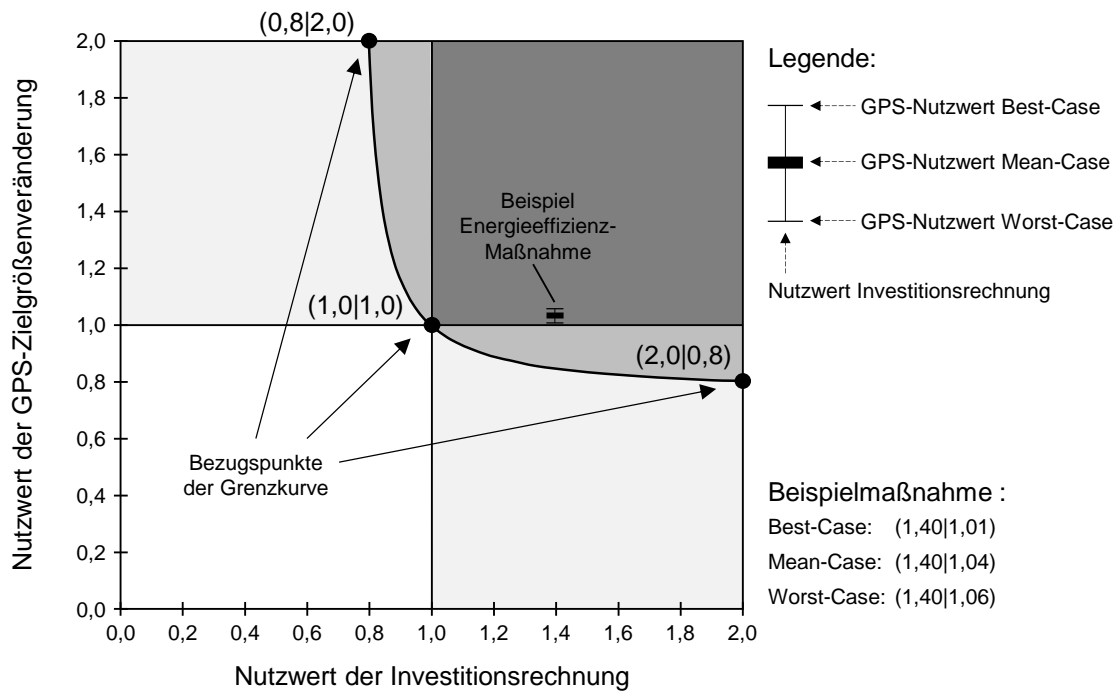


Abbildung 57: Grenzkurve und beispielhafte Positionierung einer Maßnahme im Entscheidungsportfolio

Generell gelten für Umsetzungsentscheidungen folgende Regeln:

1. Energieeffizienz-Maßnahmen, deren Koordinaten für alle drei Szenarien (Best-Case, Mean-Case und Worst-Case) im Quadranten II oder im durch die Grenzkurve erweiterten Bereich des Quadranten II positioniert werden, sind für eine Umsetzung zu empfehlen.
2. Energieeffizienz-Maßnahmen, deren Koordinaten des Worst-Case-Szenarios auf oder unterhalb der Grenzkurve oder deren Koordinaten des Mean-Case-Szenarios auf der Grenzkurve liegen, erfordern eine genauere Analyse zur Entscheidungsfindung. Durch eine Überarbeitung der Maßnahme kann die Positionierung im Portfolio eventuell verbessert werden.
3. Für alle übrigen Energieeffizienz-Maßnahmen ist eine Umsetzung abzulehnen.

Durch diesen letzten Schritt der Methodik kann eine Entscheidung für die Umsetzung einer Energieeffizienz-Maßnahme abgeleitet werden. Diese Entscheidung gilt für die individuelle Betrachtung einer Maßnahme. Eine Entscheidung zur Umsetzung eines aus mehreren Maßnahmen bestehenden Bündels kann durch das Entscheidungsportfolio nicht abgeleitet werden.

### 4.7 Fazit

In einem abschließenden Fazit werden die Vorteile der entwickelten Methodik nochmals zusammenfassend erläutert. Zudem wird herausgestellt, welche konkreten Tätigkeiten während der Anwendung der Methodik durchzuführen sind.

Das GPS-Wirkgefüge schafft ein umfassendes Verständnis für die bestehenden Wirkbeziehungen in einem GPS. Durch die Entwicklung des Wirkgefüges ist die Festlegung aller wichtigen Kenngrößen möglich, deren Werte im Rahmen der energieorientierten Wertstromanalyse aufgenommen werden müssen. Die mathematischen Relationen des Wirkgefüges (vgl. Anhang A1) bilden zudem die Grundlage zur Beschreibung des Simulationsmodells. Während der Anwendung der Methodik wird das GPS-Wirkgefüge nicht weiter benötigt.

Mit der energieorientierten Wertstromanalyse ist eine Transparenzerzeugung über alle wichtigen Produktions- und Energiedaten möglich. Die Erfassung der Bedarfe für unterschiedliche Energiearten erfolgt zustandsbasiert. Die Wertstromanalyse muss für jeden Fertigungsbereich durchgeführt werden, der hinsichtlich Energieverschwendung untersucht werden soll. Sie gibt erste Hinweise auf Energieverschwendung und liefert zudem alle Daten, die für die strukturierte Maßnahmen-generierung benötigt werden. Energieeffizienz-Handlungsansätze wurden in der vorliegenden Arbeit definiert und können allgemeingültig zur Ableitung von Maßnahmen verwendet werden. Jede Energieeffizienz-Maßnahme muss während der Anwendung der Methodik im Energieeffizienz-Portfolio positioniert und mit Hilfe der Steckbrief-Vorlage dokumentiert werden. Durch die Verwendung der Energieeffizienz-Maßnahmensteckbriefe wird ein Verständnis für die Auswirkungen der Maßnahmen auf die Prozesskette geschaffen.

Mit Hilfe der ermittelten Produktions- und Energiedaten erfolgt anschließend die Prognose der Zielgrößenveränderungen. Das notwendige System-Dynamics-Modell ist dabei generisch aufgebaut. Für die Durchführung von Simulationsstudien muss der Anwender nur die entsprechenden Eingangsdaten individuell eingeben. Das Modell selbst bleibt unverändert. Durch die erweiterte Wirtschaftlichkeitsbewertung werden die Ergebnisse von Investitionsrechnungen für Maßnahmen um die Erkenntnisse ergänzt, die der Anwender aus der Prognose der GPS-Zielgrößenveränderungen gewinnen konnte. Die Gewichtung der GPS-Zielgrößen sollte dabei nur einmalig durchgeführt werden.

In Kapitel 5 wird die Anwendung der Methodik anhand von zwei Fallbeispielen aus der Praxis erläutert.

## 5 Exemplarische Anwendung in der Praxis

### 5.1 Erläuterung der Vorgehensweise

Die Vorstellung zweier Fallstudien in diesem Kapitel dient dem Nachweis der praktischen Anwendbarkeit der Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendung. Beide Fallstudien sind nach beschriebener Standardvorgehensweise in vier Schritten aufgebaut (vgl. Abbildung 58).

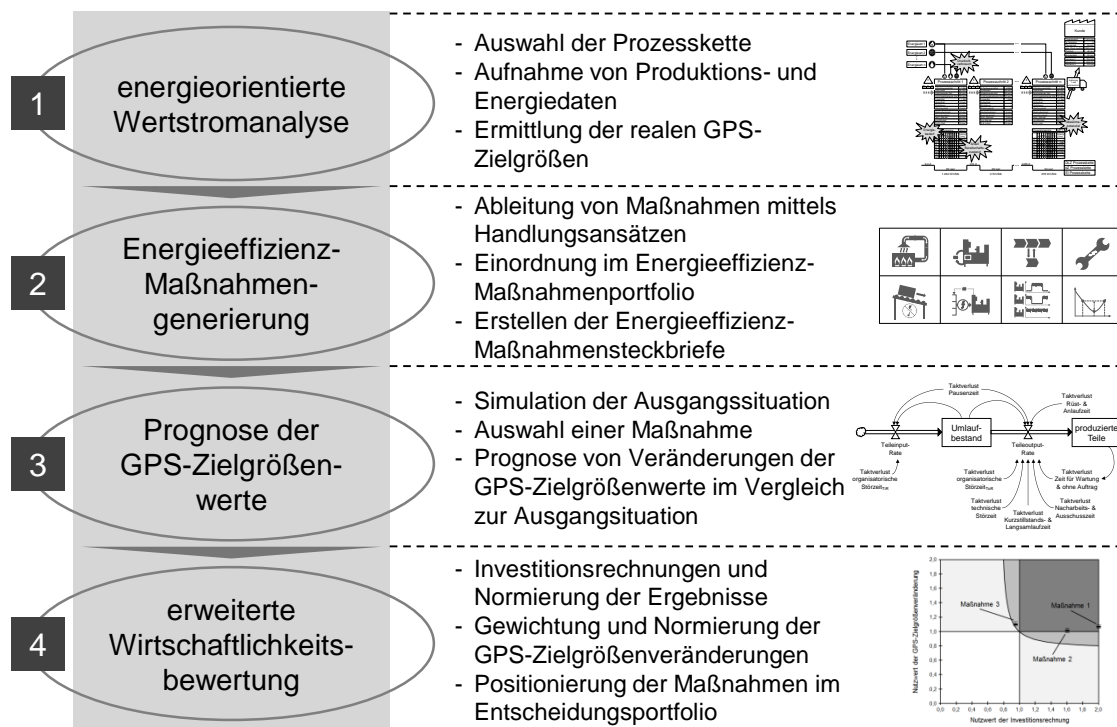


Abbildung 58: Vorgehensweise in den Fallstudien gemäß den vier Schritten der Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendung in GPS

Über den Nachweis der Anwendbarkeit hinaus tragen die Fallstudien ebenfalls zur Validierung der Methodik bei. Wie bereits in Abschnitt 4.5.5 erwähnt, wird in der ersten Fallstudie die V & V-Technik *Validierung von Vorhersagen* angewendet.

Eine *Validierung von Vorhersagen* ist per Definition unter Anwendung auf ein reales Produktionssystem durchzuführen (RABE 2008A, S. 109). Eine Prognose des Verhaltens des Produktionssystems nach der Umsetzung von Energieeffizienz-Maßnahmen kann jedoch erst dann mit dem realen System verglichen werden, wenn die Maßnahmen tatsächlich darin umgesetzt worden sind. Diese Möglichkeit ist in

der Praxis aufgrund von Hemmnissen nicht immer gegeben (vgl. KFW 2005). Daher bietet sich die *Validierung von Vorhersagen* mit Hilfe der Lernfabrik für Energieproduktivität (LEP) an, die am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München aufgebaut ist.

Die LEP ist eine Lernplattform zur gezielten Vermittlung von Wissen und Methoden zur Senkung des Energiebedarfs in der Produktion. In einer realitätsgetreuen Produktionsumgebung wird eine Prozesskette zur Herstellung einer Zahnrad-Wellenverbindung sowie im letzten Schritt die Montage eines Getriebes abgebildet. Die Prozesskette enthält typische, teilweise energieintensive Bearbeitungen wie Zerspanen, Wärmebehandeln oder Fügen, die auch in der produzierenden Industrie häufig auftreten (REINHART ET AL. 2010, S. 874). Gegenüber einem industriellen Produktionssystem bietet die LEP als Lernplattform die Möglichkeit, Energieeffizienz-Maßnahmen direkt umzusetzen und deren Auswirkung auf die Prozesskette in einer realitätsgetreuen Fertigung zu analysieren. Da die Prozesskette nach dem Prinzip der Fließfertigung aufgebaut ist, eignet sie sich grundsätzlich für eine Anwendung der Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendung in GPS. Die Prozesskette der LEP ist Gegenstand der ersten Fallstudie dieser Arbeit.

Um der Anforderung einer möglichen Anwendung in einer realen Fertigung gerecht zu werden, wurde im Rahmen der zweiten Fallstudie die Prozesskette einer Stirnwandfertigung in einem Karosseriebau der Automobilproduktion untersucht. Der Karosseriebau ist bei einer geringen Variantenvielfalt im Regelfall hoch automatisiert (KROPIK 2009, S. 13). Laut ENGELMANN (2009, S. 65) weist er mit 24,1 % den höchsten Energiebedarf der Automobilproduktion nach der Lackiererei auf (48,6 %). Neben der elektrischen Energie benötigen die Fertigungsmittel des Karosseriebaus auch einen hohen Anteil an Druckluft. Als abgeschlossene Prozesskette mit einem hohen Energiebedarf eignet sich die Fertigung der Stirnwand gut zur Anwendung der Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendung in GPS.

## **5.2 Fallbeispiel 1: Lernfabrik für Energieproduktivität (LEP)**

### **5.2.1 Schritt 1: Energieorientierte Wertstromanalyse**

Zum Aufbau des energieorientierten Wertstroms sind zunächst die Analysen des Produktionsszenarios und der Rahmenbedingungen der LEP notwendig. Insgesamt werden in einer Produktfamilie drei verschiedene Varianten eines Zahnradgetriebes



gefertigt, die sich anhand ihrer Farbe unterscheiden (weiß, schwarz, silber). Alle drei farblichen Varianten werden ansonsten einer identischen Bearbeitung unterzogen. An 250 Fabriktagen im Jahr beträgt der Tagesbedarf durch den Kunden jeweils 1.904 Stk. Davon entfallen 1.144 Stk auf die Variante *weiß*, 568 Stk auf die Variante *schwarz* und 192 Stk auf die Variante *silber*. Die Taktzeit beträgt 3,6 min. In dieser Zeit wird jeweils ein Los bestehend aus acht Teilen bearbeitet. In Summe sind folglich pro Tag 238 Lose zu produzieren.

Die Fertigung erfolgt in zwei Schichten zu je neun Stunden mit jeweils 45 min Pausenzeit. Die tägliche Produktionslaufzeit beträgt demnach 1.080 min bzw. 300 Takte. Produktions- und Energiedaten der einzelnen Prozessschritte werden über ein stationäres Messsystem erfasst. Zur Aufnahme aller für die Wertstromanalyse und die Unterbrechungsdokumentation benötigten Daten wurde die Fertigung über einen Zeitraum von einer Fabrikwoche (fünf Fabriktage) in jeweils zwei Schichten analysiert.

Die Prozesskette der LEP besteht aus den sechs Prozessschritten *Drehen*, *Wärmebehandeln*, *Abschrecken*, *Reinigen*, *Weiten & Fügen* sowie *Montieren*. Die Prozesskette setzt sich dabei genaugenommen aus zwei Strängen zusammen. Der erste Strang besteht aus dem Prozessschritt *Drehen*. Hier werden pro Takt acht Wellen auf acht Fertigungsmitteln bearbeitet. In einem zweiten Strang erfolgt die Bearbeitung von Zahnrädern. Während des Prozessschrittes *Wärmebehandeln* bestückt ein Mitarbeiter einen Werkstückträger mit acht Zahnrädern und stellt diesen auf das Fließband eines Durchlaufofens. Nach 18 min der Wärmebehandlung folgt im nächsten Prozessschritt die Handhabung des Werkstückträgers durch einen Roboter. Zum Zwecke des Abschreckens wird der Werkstückträger in ein Ölbad getaucht. Im nächsten Prozessschritt befördert ein zweiter Roboter den Werkstückträger zur Dampfreinigung und transportiert ihn anschließend zum Prozessschritt *Weiten & Fügen*. Nach einem Werkstückträgerwechsel wird das Zahnrad-Los in einem Wärmeofen ca. 28,8 min geweitet. Anschließend erfolgt im selben Prozessschritt das Fügen der zuvor bearbeiteten Wellen und der Zahnräder. Im letzten Prozessschritt werden die acht Zahnrad-Wellen-Verbindungen jeweils in ein Getriebegehäuse eingesetzt und verschraubt. Pro Takt entstehen demnach acht fertige Getriebe. Da die Tätigkeiten *Wärmebehandeln* und *Weiten* die vorgegebene Taktzeit von 3,6 min deutlich übersteigen, befinden sich in diesen Prozessschritten jeweils mehrere Lose gleichzeitig in Bearbeitung. In Abbildung 59 ist eine vereinfachte Darstellung des energieorientierten Wertstroms der LEP in der Ausgangssituation dargestellt. Der detaillierte Wertstrom kann Anhang A3 entnommen werden.

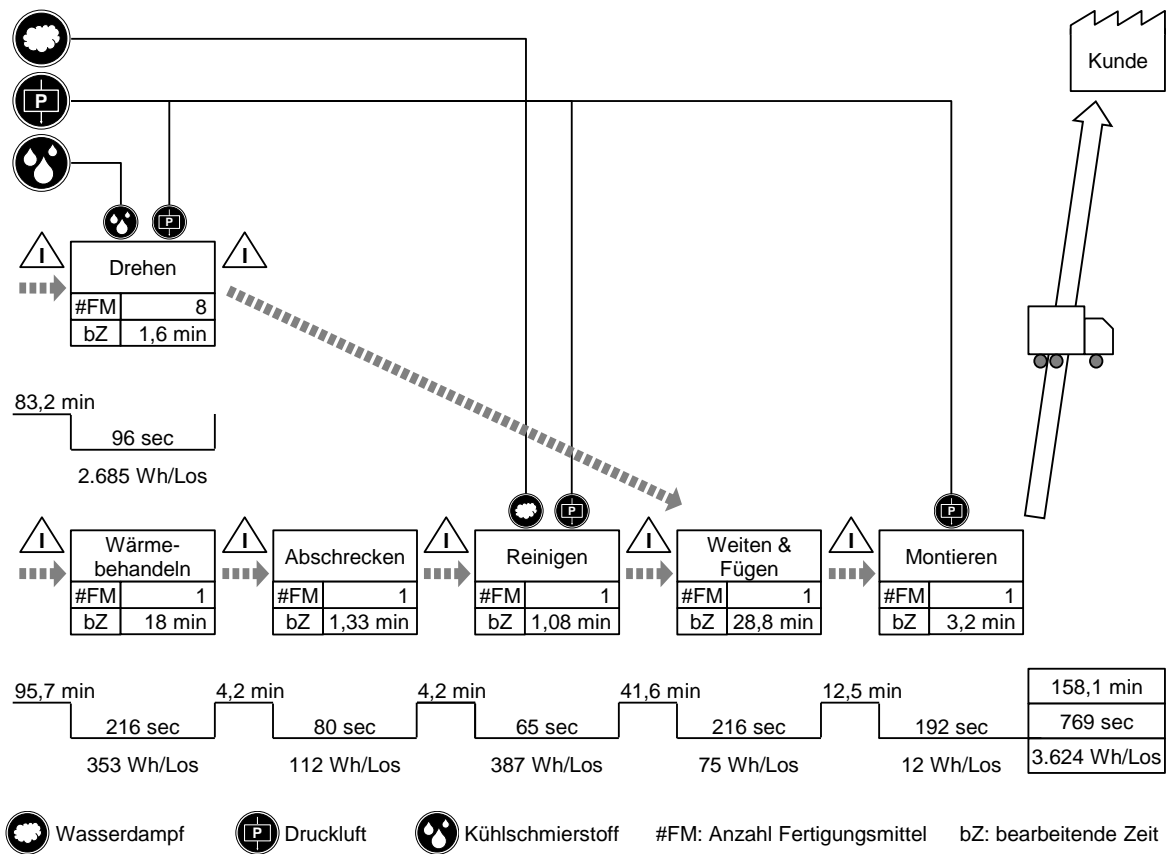


Abbildung 59: Vereinfachte Darstellung der energieorientierten Wertstromanalyse der LEP in der Ausgangssituation

Neben der elektrischen Energie werden in der LEP die Energiearten Druckluft, Wasserdampf und Kühlschmierstoffe benötigt. Die anteiligen Bedarfe an diesen Energiearten sind bereits in den Energieintensitäten der Prozessschritte enthalten. Die Anlaufzeit des Prozessschrittes *Wärmebehandeln* beträgt 30 min. Nach Schichtbeginn wird daher zunächst dieser Prozessschritt gestartet. 15 min vor Ablauf der Anlaufzeit wird der Wärmeofen des Prozessschrittes *Weiten & Fügen* gestartet. 2 min vor Ablauf der Anlaufzeit werden schließlich alle weiteren Prozessschritte gestartet, so dass nach 30 min die komplette Prozesskette betriebsbereit ist und die ersten Lose produziert werden können. Nach der Fertigung von 238 Losen ist der Tagesbedarf erfüllt. Bis auf den Prozessschritt *Drehen* verweilen anschließend alle Prozessschritte bis zum Schichtende in einem Bereitschaftszustand. Die Drehmaschinen werden hingegen ausgeschaltet, da sie die höchste Energieintensität aufweisen.

Zusätzlich erfolgt eine detaillierte Dokumentation des Unterbrechungsverhaltens, um dieses im Simulationsmodell realitätsnah abbilden zu können. Die Prozessschritte weisen ein typisches Unterbrechungsverhalten durch Störungen auf, das

näherungsweise mit einer Exponentialverteilung beschrieben werden kann. Dies ist Voraussetzung zur Berechnung der Soll-Pufferkapazität mit Hilfe des technischen Durchsatzes  $\lambda_{\text{tech}}$  und der MTTR (vgl. Formel (4-1)). In Abbildung 60 sind Unterbrechungsverteilung und -kompensation am Beispiel eines Fabriktages des Prozessschrittes *Abschrecken* dargestellt.

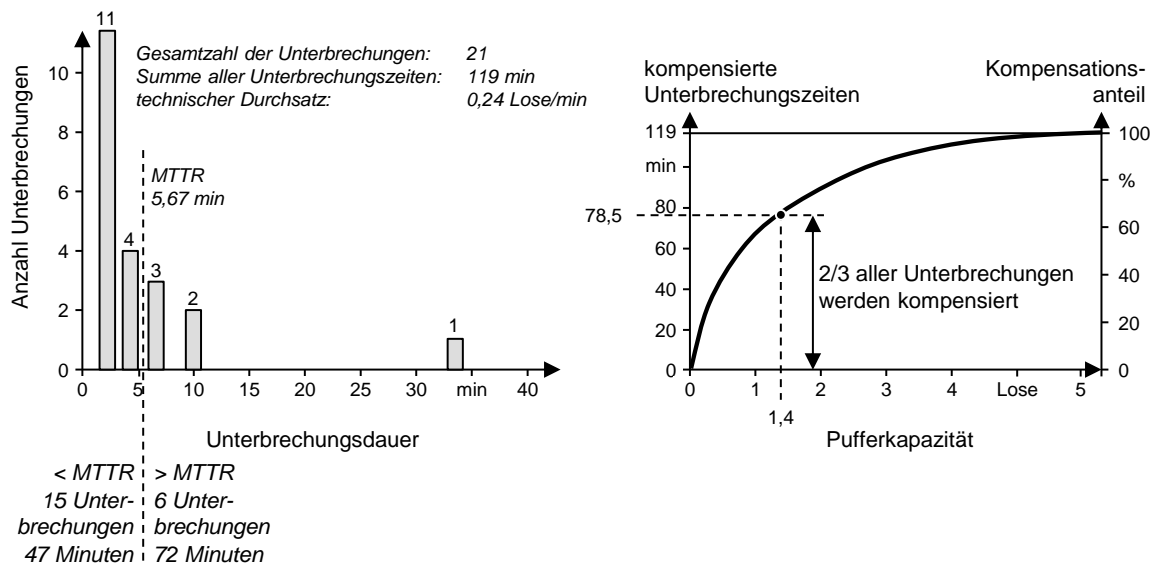


Abbildung 60: Unterbrechungsverteilung und Unterbrechungskompensation am Beispiel des Prozessschrittes „Abschrecken“

Auch die Summe der Unterbrechungszeiten variiert täglich je nach Unterbrechungsaufkommen. Über den Zeitraum eines Fabrikjahres mit 250 Fabriktagen kann anhand der täglichen Unterbrechungszeitdokumentation eine Normalverteilung zur Beschreibung ihrer Variation zugrunde gelegt werden.

Durch Messungen der stationären Messsysteme und Berechnungen mit Hilfe der Ergebnisse der energieorientierten Wertstromanalyse werden die realen GPS-Zielgrößenwerte der Ausgangssituation ermittelt (vgl. Tabelle 17). Die Berechnung der gesamten Energieintensität der Prozesskette erfolgt durch die Addition der Energieintensitäten aller Prozessschritte. Bei der Berechnung der Durchlaufzeit der Prozesskette wird jedoch der Prozessschritt *Drehen* nicht berücksichtigt, da er nicht in Reihe mit den übrigen Prozessschritten aufgebaut ist. Als EPEI-Wert wird der Maximalwert aller Prozessschritte ausgewählt. Der OEE-Wert und der Qualitätsgrad werden auf Prozesskettenebene unter Berücksichtigung der Pufferkapazitäten und des Kompensationsanteils  $f_K$  bestimmt (vgl. Abschnitt 4.2.2).

Tabelle 17: Gemessene GPS-Zielgrößenwerte in der Ausgangssituation der LEP

Ausgangssituation	GPS-Zielgrößen der LEP				
	Durchlaufzeit	OEE	Qualitätsgrad	EPEI-Wert	Energieintensität
Messung	158,1 min	84,3%	99,9%	4,9 min	3.624 Wh/Los

### 5.2.2 Schritt 2: Energieeffizienz-Maßnahmengenerierung

Der energieorientierte Wertstrom zeigt hohe Energieintensitäten in den Prozessschritten *Drehen*, *Wärmebehandeln* sowie *Reinigen*. Zudem fällt auf, dass die Prozessschritte *Drehen*, *Abschrecken* sowie *Reinigen* bearbeitende Zeiten aufweisen, die deutlich unter der Taktzeit liegen. Die Zahnräder werden in der Prozesskette zweimal erwärmt und dazwischen abgeschreckt. Dies deutet auf ein Potenzial zur Reduzierung von Wärmeverlusten hin. Durch die berechneten Energieintensitäten wird zudem deutlich, dass der Prozessschritt *Montieren* trotz Einsatz von Druckluft durch einen sehr geringen Energiebedarf charakterisiert ist. Auf Basis dieser Erkenntnisse werden mit Hilfe der Energieeffizienz-Handlungsansätze beispielhaft drei Maßnahmen zur Reduzierung von Energieverschwendung generiert.

#### Maßnahme 1: Verbesserung der Auslastung der Drehmaschinen

Die erste Maßnahme folgt dem Handlungsansatz *energieorientierte Auslastung* und soll im Prozessschritt *Drehen* umgesetzt werden. Aufgrund der geringen bearbeitenden Zeit je Welle ist es möglich, zwei Wellen pro Takt auf einer Drehmaschine zu bearbeiten. Dadurch können vier Fertigungsmittel aus dem Prozessschritt eliminiert werden. Aufgrund des hohen Energiebedarfs während des Bereitschaftszustands ist durch diese Maßnahme eine deutliche Senkung der Energieintensität zu erwarten. Zusätzlich führt die Maßnahme jedoch zu einer Mehrbelastung der vier verbleibenden Fertigungsmittel. Aus Versuchen mit einem der Fertigungsmittel geht hervor, dass bei Umsetzung der Maßnahme eine Steigerung der technischen Störzeit um 30 % zu erwarten ist. Der energetische Ansatzpunkt der Maßnahme ist die Zeit. Zudem weist sie keine direkten Auswirkungen auf die Prozesskette auf und wird daher auf Prozessschritzebene positioniert. Der entsprechende Energieeffizienz-Maßnahmensteckbrief ist in Abbildung 61 dargestellt.

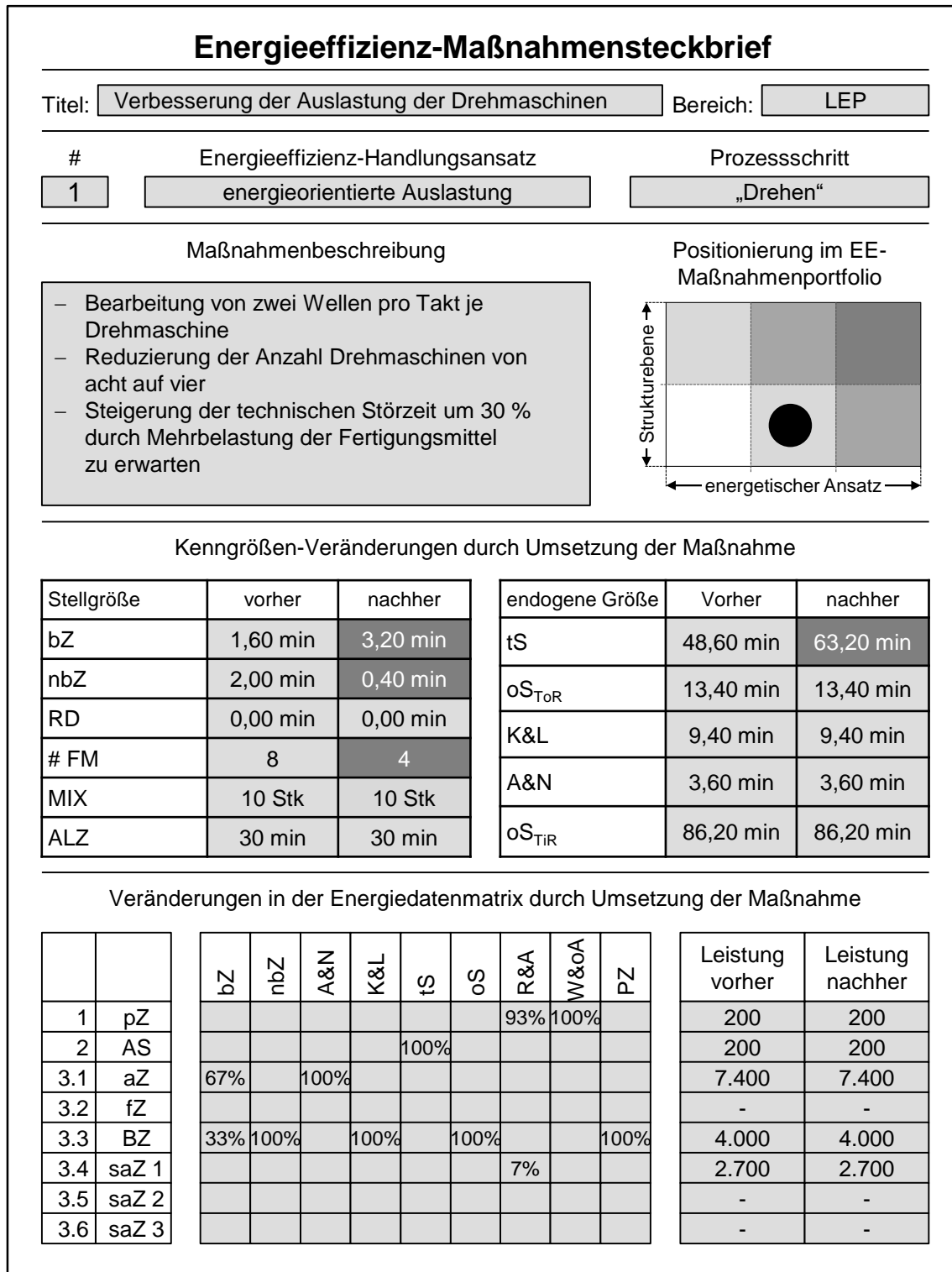


Abbildung 61: Energieeffizienz-Maßnahmensteckbrief für Maßnahme 1

### Maßnahme 2: Isolierung des Durchlaufwärmeofens

Die zweite Maßnahme orientiert sich am Energieeffizienz-Handlungsansatz *Rückgewinnung/Weiterverwendung* und soll im Prozessschritt *Wärmebehandeln*

durchgeführt werden. Dabei werden Ein- und Ausgang des Durchlaufofens mit einer Isolierung versehen, um den Abwärmeverlust zu reduzieren. Dadurch kann der Ofen zusätzlich mit einer geringeren Prozesstemperatur betrieben werden. Dies führt zu einer Reduzierung des Leistungsbedarfs im arbeitenden Zustand und im Bereitschaftszustand um 500 W. Durch den geringeren Wärmeverlust verkürzt sich die Anlaufzeit zudem von 30 min auf 15 min. Da sowohl bei der Anlaufzeit, als auch beim Leistungsbedarf in verschiedenen Betriebszuständen Änderungen zu erwarten sind, kann die Maßnahme sowohl als zeit- als auch als leistungsbezogen eingestuft werden. Direkte Auswirkungen auf die Prozesskette sind nicht zu erwarten. Die Maßnahme wird daher im Energieeffizienz-Portfolio auf Prozessschritzebene positioniert. Da der Prozessschritt jedoch die höchste Anlaufzeit der gesamten Prozesskette aufweist, kann nach Umsetzung der Maßnahme die gesamte Fertigung 15 min früher starten. Dieser Effekt soll in der Simulation mit berücksichtigt werden. Der zugehörige Energieeffizienz-Maßnahmensteckbrief kann Anhang A4 entnommen werden.

### **Maßnahme 3: Eliminierung des ersten Roboters und des zweiten Wärmeofens**

Die Generierung der dritten Maßnahme basiert auf dem Energieeffizienz-Handlungsansatz *Prozessschrittintegration/-substitution* und verursacht eine Veränderung der gesamten Prozesskette. Zur Vermeidung des zweiten Aufwärmvorgangs der Zahnräder wird das Fügen der Wellen bereits direkt nach dem Prozessschritt *Wärmebehandeln* durchgeführt. Da die Zahnräder während der Wärmebehandlung jedoch ursprünglich vertikal im Werkstückträger gelagert werden, ist nun die Umstellung auf eine horizontale Lagerung notwendig, um das unmittelbare Fügen möglich zu machen. Nach dem Fügevorgang befördert ein Mitarbeiter das Los mit der Zahnrad-Wellen-Verbindung zum Abschrecken in das Ölbad. Die Transporttätigkeit durch den ersten Roboter wird dadurch nicht mehr benötigt. Der zweite Roboter übernimmt den ölverschmierten Werkstückträger inklusive Los, befördert ihn in die Dampfreinigung und anschließend direkt zum Prozessschritt *Montieren*. Zusammenfassend werden die Prozessschritte *Weiten & Fügen* sowie *Abschrecken* in den Prozessschritt *Reinigen* integriert und verschwinden aus der ursprünglichen Prozesskette. Dadurch können der erste Roboter sowie der zweite Wärmeofen aus der Prozesskette eliminiert werden.

Durch die zusätzlichen Fertigungsinhalte wird die bearbeitende Zeit im Prozessschritt *Reinigen* von 1,08 min auf 2,05 min erhöht. In Versuchsfahrten offenbart der Roboter zudem Schwierigkeiten bei der Aufnahme des neuen Werkstückträgers. Eine Steigerung der technischen Störzeit um 24 % ist daher zu erwarten. Die Eliminierung des Prozessschrittes *Abschrecken* führt zudem zu einer

Veränderung der organisatorischen Störzeit<sub>TiR</sub> im Prozessschritt *Reinigen*. Störungen der TiR resultieren nach der Umsetzung der Maßnahme aus Unterbrechungen des Prozessschrittes *Wärmebehandeln*.

Die Maßnahme wirkt sich auf mehrere Prozessschritte aus und wird folglich im Energieeffizienz-Portfolio auf Prozesskettenebene positioniert. Da keine Änderung der Leistungsbedarfe in den bestehenden Betriebszuständen zu erwarten ist, handelt es sich um eine zeitbezogene Maßnahme. In Summe werden drei Steckbriefe für die Maßnahme erstellt (vgl. Anhang A4), da sie sich direkt auf die drei Prozessschritte *Abschrecken*, *Reinigen* sowie *Weiten & Fügen* auswirkt. Zwar führt die Maßnahme auch zum Austausch der Werkstückträger im Prozessschritt *Wärmebehandeln*, dies hat jedoch auf die Kenngrößen des Prozessschrittes keinen Einfluss. Ein vierter Steckbrief ist daher nicht notwendig.

### 5.2.3 Schritt 3: Prognose der GPS-Zielgrößenwerte

Nach der Generierung von Maßnahmen findet im dritten Schritt die Prognose der Veränderung von GPS-Zielgrößenwerten pro Maßnahme statt. Dazu wird zunächst die Ausgangssituation der Prozesskette der LEP simuliert. Anschließend folgt der Abgleich der GPS-Zielgrößenwerte zwischen Messung und Simulation (Tabelle 18). Zur Bewertung der Abbildungsgenauigkeit wird für die GPS-Zielgrößenwerte der Prozesskette eine maximal Abweichung von 2,0 % festgelegt.

Tabelle 18: Vergleich der GPS-Zielgrößenwerte aus Messung und Simulation der LEP im Ausgangszustand

	Drehen	Wärme- behandeln	Ab- schrecken	Reinigen	Weiten	Montieren	
<b>Messung</b>							<b>Gesamt</b>
Durchlaufzeit [min]	83,2	95,7	4,2	4,2	41,6	12,5	158,1
OEE-Wert [%]	89,1%	91,6%	87,9%	89,6%	90,8%	92,8%	84,3%
Qualitätsgrad [%]	99,6%	100,0%	100,0%	100,0%	98,7%	99,2%	99,9%
EPEI-Wert [min]	4,85	4,73	4,94	4,84	4,71	4,64	4,9
Energieintensität [Wh/Los]	2.685	353	112	387	75	12	3.624
<b>Simulation</b>							<b>Gesamt</b>
Durchlaufzeit [min]	84,3	95,8	4,6	4,5	41,1	13,7	159,7
OEE-Wert [%]	90,5%	91,4%	88,5%	89,8%	91,5%	93,7%	84,6%
Qualitätsgrad [%]	99,2%	100,0%	100,0%	100,0%	98,8%	99,2%	99,9%
EPEI-Wert [min]	4,76	4,75	4,91	4,83	4,69	4,60	4,9
Energieintensität [Wh/Los]	2.684	351	112	388	75	12	3.621

Bei 238 Intervallen je Simulationslauf und 250 Läufen werden ca. 60.000 Datensätze je Prozessschritt zufällig erzeugt und ausgewertet.

Alle Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Werten liegen deutlich unter dem Maximalwert von 2,0 %. Die Abbildungsgenauigkeit ist anhand des Vergleichs somit bestätigt. Die Ergebniswerte der Simulationsstudien werden folglich als Referenzwerte festgelegt. Dem Ablaufplan in Abbildung 48 folgend werden je Maßnahme nun die Differenzen der GPS-Zielgrößenwerte zu den Referenzwerten prognostiziert. Gemäß der V & V-Technik *Validierung von Vorhersagen* werden die Prognosewerte anschließend nach tatsächlicher Umsetzung der Maßnahme in der LEP mit den Realwerten verglichen.

### Maßnahme 1: Verbesserung der Auslastung der Drehmaschinen

Für die Simulationsstudie des Prozessschrittes *Drehen* werden dazu die Eingangsdaten dem Energieeffizienz-Maßnahmensteckbrief entsprechend geändert. Nach der Durchführung der Simulationsstudie sind folgende Wirkungen auf die GPS-Zielgrößenwerte zu beobachten (Tabelle 19):

*Tabelle 19: Auswertung der Simulationsstudien und reale Messwerte auf Prozesskettenebene nach Umsetzung der ersten Maßnahme in der LEP*

Maßnahme 1	GPS-Zielgrößen der LEP				
	Durchlaufzeit	OEE	Qualitätsgrad	EPEI-Wert	Energieintensität
Referenzwert	159,7 min	84,6%	99,9%	4,9 min	3.621 Wh/Los
Prognose Worst-Case	170,2 min	83,3%	99,9%	5,0 min	2.534 Wh/Los
Prognose Mean-Case	159,7 min	84,6%	99,9%	4,9 min	2.522 Wh/Los
Prognose Best-Case	145,8 min	86,0%	99,9%	4,9 min	2.508 Wh/Los
Messung	158,1 min	84,3%	99,9%	4,9 min	2.521 Wh/Los

Durch die Verbesserung der Auslastung der Drehmaschinen wird in der Simulation eine deutliche Reduzierung der Energieintensität im Prozessschritt *Drehen* erreicht. Durch die Addition zum Gesamtwert wirkt diese Reduzierung auch auf Prozesskettenebene. Eine Veränderung der Durchlaufzeit des Prozessschrittes ist nicht feststellbar. Die erhöhte Unterbrechungszeit durch technische Störungen wirkt sich negativ auf die Technische Verfügbarkeit und somit auf den EPEI-Wert aus. Dieser steigt von 4,76 min auf 4,83 min leicht an. Auf Prozesskettenebene hat diese Veränderung jedoch keine Auswirkung. Die erhöhte Störzeit beeinflusst den Qualitätsgrad nicht. Der OEE-Wert fällt jedoch auf Prozessschritzebene von 90,5% auf 89,1%. Eine erhöhte Anzahl an Taktverlusten durch die Erreichung des maximalen Umlaufbestands ist nicht festzustellen. Zur Überprüfung der Wirkbeziehungen auf



die Prozesskette ist somit lediglich im nachfolgenden Prozessschritt eine zusätzliche Simulationsstudie mit einer erhöhten organisatorischen Störzeit<sub>TIR</sub> durchzuführen. Durch den hohen Umlaufbestand des nachfolgenden Prozessschrittes werden die zusätzlichen Unterbrechungszeiten jedoch vollständig kompensiert.

Bis auf die Energieintensität gibt es im Vergleich zu den Referenzwerten folglich keine Veränderungen auf Prozesskettenebene. Die realen Messwerte nach tatsächlicher Umsetzung der Maßnahme in der LEP bestätigen diese Prognose und tragen somit zusätzlich zur Validierung der Methodik bei.

**Maßnahme 2: Isolierung des Durchlaufwärmeofens**

Auch für die Simulationsstudie des Prozessschrittes *Wärmebehandeln* werden die Eingangsdaten dem Energieeffizienz-Maßnahmensteckbrief entsprechend geändert. Wie bereits beschrieben ist der Durchlaufofen des Prozessschrittes durch die längste Anlaufzeit der Prozesskette charakterisiert. Durch die Reduzierung der Anlaufzeit um 15 min kann die Fertigung in der gesamten Prozesskette 15 min früher beginnen. Infolgedessen wird neben dem Prozessschritt *Wärmebehandeln* auch für jeden weiteren Prozessschritt eine Simulationsstudie mit verkürzter Anlaufzeit durchgeführt. Folgende Wirkungen auf die GPS-Zielgrößen sind anschließend zu beobachten (Tabelle 20):

*Tabelle 20: Auswertung der Simulationsstudien und reale Messwerte auf Prozesskettenebene nach Umsetzung der zweiten Maßnahme in der LEP*

Maßnahme 2	GPS-Zielgrößen der LEP				
	Durchlaufzeit	OEE	Qualitätsgrad	EPEI-Wert	Energieintensität
Referenzwert	159,7 min	84,6%	99,9%	4,9 min	3.621 Wh/Los
Prognose Worst-Case	169,3 min	84,6%	99,8%	5,0 min	3.609 Wh/Los
Prognose Mean-Case	158,8 min	86,2%	99,9%	4,9 min	3.584 Wh/Los
Prognose Best-Case	144,2 min	87,7%	99,9%	4,9 min	3.566 Wh/Los
Messung	158,1 min	86,4%	99,9%	4,9 min	3.587 Wh/Los

Durch die veränderten Startzeiten ergeben sich in allen Prozessschritten minimale Änderungen des mittleren Umlaufbestands. Dies führt zu einer leichten Veränderung der Durchlaufzeit im Vergleich zum Referenzwert. Die verkürzte Anlaufzeit führt in allen Prozessschritten zu einer leichten Verbesserung des OEE-Wertes, der sich auch auf den Gesamtwert auswirkt. Der Qualitätsgrad bleibt ebenso

konstant wie der EPEI-Wert, da die Anlaufzeit nicht in die Berechnung der Technischen Verfügbarkeit eingeht. Die Verringerung der Prozesstemperatur und die kürzere Anlaufzeit im Prozessschritt *Wärmebehandeln* resultieren schließlich in einer Reduzierung der Energieintensität der Prozesskette. Auch die realen Messwerte weisen entsprechende Veränderungen bei OEE-Wert und Energieintensität auf (vgl. Tabelle 20).

### Maßnahme 3: Eliminierung des ersten Roboters und des zweiten Wärmeofens

Mit direkten Veränderungen in drei verschiedenen Prozessschritten sind durch die Umsetzung von Maßnahme 3 starke Wirkungen auf die Prozesskette zu erwarten. Da die Prozessschritte *Abschrecken* sowie *Weiten & Fügen* eliminiert werden, ist zunächst eine Simulationsstudie des Prozessschrittes *Reinigen* mit angepassten Eingangsdaten durchzuführen. Aus den Ergebnissen dieser Studie können folgende Auswirkungen abgeleitet werden (Tabelle 21):

Tabelle 21: Auswertung der Simulationsstudien und reale Messwerte auf Prozesskettenebene nach Umsetzung der dritten Maßnahme in der LEP

Maßnahme 3	GPS-Zielgrößen der LEP				
	Durchlaufzeit	OEE	Qualitätsgrad	EPEI-Wert	Energieintensität
Referenzwert	159,7 min	84,6%	99,9%	4,9 min	3.621 Wh/Los
Prognose Worst-Case	122,3 min	93,2%	100,0%	4,9 min	3.452 Wh/Los
Prognose Mean-Case	110,5 min	93,8%	100,0%	4,9 min	3.439 Wh/Los
Prognose Best-Case	97,5 min	94,6%	100,0%	4,8 min	3.420 Wh/Los
Messung	112,3 min	94,0%	100,0%	4,9 min	3.442 Wh/Los

Aufgrund des größeren Arbeitsumfangs wird im Prozessschritt *Reinigen* eine leichte Steigerung der Energieintensität von 388 Wh/Los auf 392 Wh/Los prognostiziert. Durch die höhere technische Störzeit sinkt der OEE-Wert im Prozessschritt zudem von 89,8 % auf 89,1 %. Alle weiteren GPS-Zielgrößenwerte bleiben konstant.

Die höhere technische Störzeit führt darüber hinaus zu einer erhöhten Anzahl an Taktverlusten durch das Erreichen des maximalen Umlaufbestandes. Aufgrund der Eliminierung des ursprünglich vorgelagerten Prozessschrittes *Abschrecken* wird daher eine weitere Simulationsstudie im Prozessschritt *Wärmebehandeln* durchgeführt. Diese resultiert jedoch nicht in weiteren Veränderungen.

Da auch der nachfolgende Prozessschritt und der dazugehörige Umlaufbestand eliminiert werden, muss das veränderte Unterbrechungsverhalten des Prozessschrittes *Reinigen* nun durch den Umlaufbestand des Prozessschrittes *Montieren* kompensiert werden. Auch für den Prozessschritt *Montieren* wird daher eine zusätzliche Simulationsstudie mit veränderter Störzeit<sub>TIR</sub> durchgeführt. Die Prognose des Prozessschrittes zeigt jedoch ebenfalls keine weiteren Veränderungen im Vergleich zu den Referenzwerten des Prozessschrittes.

Die Durchlaufzeit der Prozesskette kann durch die Eliminierung zweier Prozessschritte deutlich reduziert werden. Da in der Ausgangssituation zudem der Prozessschritt *Abschrecken* den niedrigsten OEE-Wert und der Prozessschritt *Weiten & Fügen* den niedrigsten Qualitätsgrad der Prozesskette aufweist, können beide Werte auf Prozesskettenebene durch deren Eliminierung gesteigert werden. Der EPEI-Wert verhält sich konstant, während eine Reduzierung der Energieintensität feststellbar ist. Alle Werte können nach tatsächlicher Umsetzung im Vergleich mit den realen Messwerten bestätigt werden (vgl. Tabelle 21).

Die Prognosewerte für alle drei Maßnahmen weisen eine sehr gute Übereinstimmung mit den realen Werten nach der tatsächlichen Umsetzung der Maßnahmen auf. Die Ergebnisse der V & V-Technik *Validierung von Vorhersagen* bestätigen damit eine realitätsnahe Prognose der GPS-Zielgrößenwerte durch die Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendung in GPS.

#### 5.2.4 Schritt 4: Erweiterte Wirtschaftlichkeitsbewertung

Auf die Prognose der GPS-Zielgrößenwerte folgt zunächst für jede Maßnahme die Durchführung einer Investitionsrechnung. In der LEP umzusetzende Energieeffizienz-Maßnahmen werden dabei in der Regel mit Hilfe einer dynamischen Amortisationsrechnung bewertet, die auf der Kapitalwertmethode basiert. Die Amortisationszeit gibt den Zeitraum an, nach dem das für die Investition eingesetzte Kapital aus den Einzahlungsüberschüssen wiedergewonnen wird bzw. der Kapitalwert gleich Null ist (POGGENSEE 2011, S.166). Die Berechnung der Amortisationszeit  $t_A$  erfolgt näherungsweise durch Interpolation (GÖTZE 2008, S. 109):

$$t_A = t^* + \frac{KW_{t^*}}{KW_{t^*} - KW_{t^*+1}} \quad (5-1)$$

mit

$t_A$ :	Amortisationszeit in [ZE]
$t^*$ :	Zeitperiode nach der KW zum letzten Mal negativ ist, in [ZE]
$KW_{t^*}$ :	Kapitalwert nach der Zeitperiode $t^*$ in [€]
$KW_{t^*+1}$ :	Kapitalwert nach der Zeitperiode $t^*+1$ in [€]

Für die Berechnung der Amortisationszeit werden ein Kalkulationszinssatz von 1 % pro Monat sowie eine maximale Amortisationszeit von zwölf Monaten zugrunde gelegt. Erreicht eine Energieeffizienz-Maßnahme eine Amortisationszeit von zwölf Monaten, so entspricht dies auf der vertikalen Achse des Entscheidungsportfolios einem Nutzwert von 1,0. Amortisiert sich eine Maßnahme unmittelbar mit der Umsetzung, so liegt der Nutzwert bei 2,0. Bei einer Amortisation nach einer Zeit von 24 Monaten oder länger liegt der Nutzwert bei 0,0. Dazwischen liegende Nutzwerte können über eine Dreisatz-Rechnung ermittelt werden.

Durch die Umsetzung von Maßnahme 1 werden Einsparungen von 1.099 Wh/Los erreicht. Bei 238 Losen pro Fabriktag, 20 Fabriktagen pro Monat sowie einem Energiepreis von 0,12 €/kWh entspricht dies einer monatlichen Einsparung von 627,75 €. Die Qualifizierung von Mitarbeitern zur Erreichung der höheren Auslastung der Maschinen kostet einmalig 1.350 €. Da zwei der vier obsoleten Drehmaschinen in Summe für 4.600 € verkauft werden können, amortisiert sich die Energieeffizienz-Maßnahme sofort bei der Umsetzung. Der Nutzwert der Investitionsrechnung liegt dementsprechend bei 2,0.

Die Einsparungen, die durch die Umsetzung von Maßnahme 2 erreicht werden, belaufen sich auf 37 Wh/Los. Dies entspricht einer monatlichen Einsparung von 21,13 €. Für die Umsetzung der Maßnahme ist der Einkauf von Dämmmaterial notwendig, das kostengünstig durch eigenes Instandhaltungspersonal angebracht werden kann. Die einmaligen Auszahlungen belaufen sich auf 107 €. In Tabelle 22 ist die Berechnung der Kapitalwerte der verschiedenen Perioden aufgeführt. Für Maßnahme 2 lassen sich daraus die Amortisationszeit mit etwa 4,83 Monaten und der Nutzwert mit etwa 1,60 berechnen.

Tabelle 22: Amortisationszeit- und Nutzwertberechnung für Maßnahme 2

Periode t [Monate]	Einzahlung $E_t$ [€]	Auszahlung $A_t$ [€]	Kapitalwert $KW_t$
0	- €	107,00 €	107,00 €
1	21,13 €	- €	84,81 €
2	42,27 €	- €	62,62 €
3	63,40 €	- €	40,45 €
4	84,54 €	- €	18,29 €
5	105,67 €	- €	3,87 €
$t_A \approx 4 + (-18,29 / (-18,29 - 3,87)) \approx 4,83$		Nutzwert <sub>MA2</sub> $\approx 2,00 - (4,83 / 10 / 1,2) \approx 1,60$	

Die Prozessintegration, die aus der Umsetzung von Maßnahme 3 hervorgeht, resultiert in Energieeinsparungen von 182 Wh/Los, was einer monatlichen Reduzierung der Energiekosten um 103,96 € gleichkommt. Für den Verkauf des Roboters und des Wärmeofens können einmalige Einzahlungen von 3.820 € verbucht werden. Die Programmierung der veränderten Robotertätigkeit muss durch externe Spezialisten erfolgen und beläuft sich inkl. Testfahrten auf 3.710 €. Die Personalqualifizierungen für die veränderten Umfänge kosten einmalig 450 €. Die Kosten der Anschaffung der neuen Werkstückträger und des Umbaus der Prozesskette belaufen sich in Summe auf 1.655 €. Nach bekanntem Schema wird damit die Amortisationszeit mit einer Dauer von etwa 12,6 Monaten berechnet. Der entsprechende Nutzwert liegt folglich bei etwa 0,95.

Zur Berechnung der Nutzwerte der GPS-Zielgrößenveränderung ist zunächst eine Gewichtung der Zielgrößen festzulegen. Da die LEP speziell zur Demonstration von Energieeffizienz-Potenzialen in der Fertigung entwickelt wurde, fällt die Gewichtung der Zielgröße Energieintensität im Vergleich zu den übrigen Zielgrößen nicht geringer aus. Alle fünf Zielgrößen erhalten dieselbe Gewichtung. Abbildung 62 zeigt die Ermittlung der Nutzwerte für Maßnahme 1.

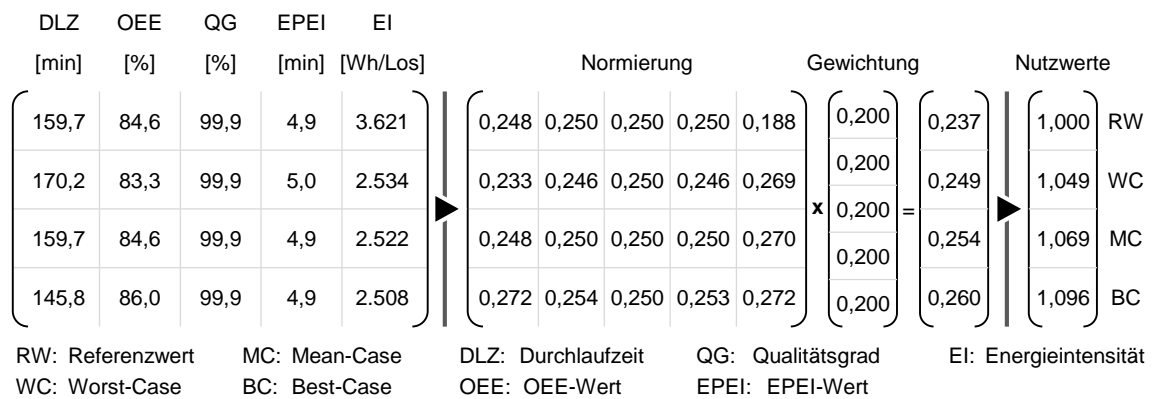


Abbildung 62: Ermittlung der Nutzwerte der GPS-Zielgrößenveränderungen für Maßnahme 2

Demnach liegt der Nutzwert des Best-Case-Szenarios bei etwa 1,10. Im Mean-Case-Szenario beträgt der Nutzwert 1,07. Der Wert des Worst-Case-Szenarios beläuft sich auf 1,05. Nach demselben Schema werden auch die Nutzwerte der beiden anderen Maßnahmen ermittelt.

Zur Bewertung der Maßnahmen mit Hilfe des Entscheidungsportfolios wird eine Grenzkurve eingesetzt. Ihre Schnittpunkte mit den Rändern des Portfolios liegen bei den Koordinaten (0,8|2,0) und (2,0|0,8). Dadurch ergibt sich folgende Funktion:

$$f(x) = \frac{0,0625}{x-0,75} + 0,75 \quad \text{für } x > 0,75 \quad (5-2)$$

In Abbildung 63 ist das Entscheidungsportfolio inkl. Positionierung und Koordinaten der drei Szenarien je Maßnahme abgebildet.

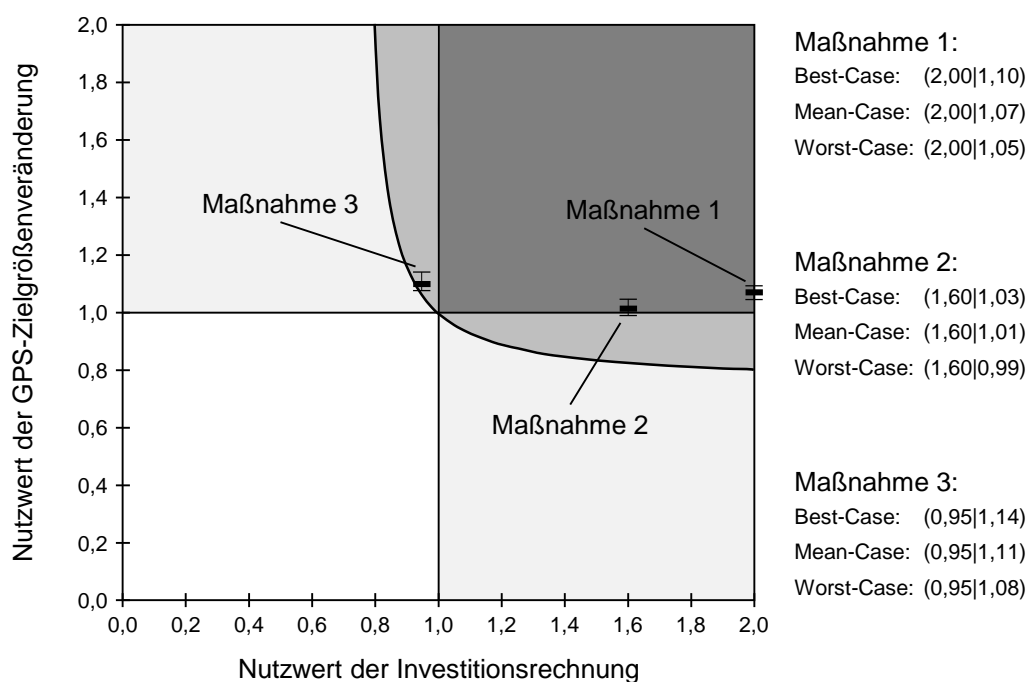


Abbildung 63: Positionierung der Maßnahmen der Fallstudie LEP im Entscheidungsportfolio

Als Empfehlung lässt sich ableiten, dass alle drei Maßnahmen in der Einzelbetrachtung umgesetzt werden sollten. Der größte Einspareffekt hinsichtlich Energieverschwendung ist durch Maßnahme 1 zu erwarten. Aufgrund der starken Eingriffe in die Prozesskette weist Maßnahme 3 die höchste Umsetzungscomplexität auf, wirkt sich jedoch sehr positiv auf die GPS-Zielgrößen aus.

## 5.3 Fallbeispiel 2: Stirnwandfertigung im Karosseriebau

### 5.3.1 Schritt 1: Energieorientierte Wertstromanalyse

Der Karosseriebau unterteilt sich in die drei Abschnitte *Unterbau* (Bodengruppe), *Aufbau* (Karosseriegerippe) und *Anbauteile*. Diese Abschnitte werden weiter in kleinere Bereiche aufgegliedert (ENGELMANN 2009, S. 67). Innerhalb des Karosseriebaus wurde die abgeschlossene Prozesskette der Stirnwandfertigung ausgewählt. Diese Prozesskette ist Teil des Abschnitts *Unterbau* und befindet sich am Anfang der gesamten Karosseriefertigung. Gefertigt wird ausschließlich eine Variante im One-Piece-Flow-Verfahren mit einer Taktzeit von 1,0 min pro Stück. In Summe sind pro Tag 980 Teile zu produzieren<sup>13</sup>.

Ein Fabriktag besteht aus drei Schichten. Die ersten beiden Schichten haben eine Länge von neun Stunden bei jeweils 45 min Pause. Die dritte Schicht endet nach sechs Stunden und beinhaltet eine Pausenzeit von 30 min. Die tägliche Produktionslaufzeit beträgt somit 24 Stunden bzw. 1.440 Takte. Die für die Wertstromanalyse benötigten Energie- und Produktionsdaten wurden über Messungen vor Ort ermittelt und durch die Daten eines vorhandenen Betriebsdatenerfassungssystems (BDE) ergänzt. Eine detaillierte einjährige Historie des Unterbrechungsverhaltens konnte ebenfalls dem BDE entnommen werden.

Zur Fertigung der Stirnwand werden die Fügeverfahren *Widerstandspunktschweißen*, *Laserschweißen* und *Kleben* angewandt. Insgesamt besteht die betrachtete Prozesskette der Stirnwandfertigung aus mehreren Robotern mit Handhabungs- und/oder Widerstandspunktschweißaufgaben sowie einem mit einer Laserschweißvorrichtung ausgestatteten Roboter. Des Weiteren befinden sich mehrere stationäre Widerstandspunktschweißzangen sowie Anlagen zur Klebstoffapplikation im betrachteten Produktionsbereich. Alle Schweißzangen werden servopneumatisch mit Hilfe eines 12 bar-Druckluftnetzes gesteuert.

Die betrachtete Prozesskette kann in sechs Prozessschritte unterteilt werden. Innerhalb der Prozessschritte kommen mehrere Fertigungsmittel zur gleichen Zeit zum Einsatz, bearbeiten dabei aber jeweils nur ein Teil. Es findet keine parallele Bearbeitung mehrerer Teile statt. In der vereinfachten Darstellung des energieorientierten Wertstroms der Stirnwandfertigung werden diese Fertigungsmittel pro Prozessschritt zu einem Fertigungsmittel zusammengefasst, um die GPS-Ziel-

---

<sup>13</sup> Zur Wahrung der Geheimhaltungsvorschriften des Industriepartners sind einzelne Produktionsdaten abgeändert worden, ohne jedoch die Logik der Auswertungsergebnisse grundsätzlich zu verfälschen.

größeren Berechnung nicht zu verfälschen. Die Energieart Druckluft macht für die Prozesskette einen hohen Anteil des gesamten Energiebedarfs aus. Daher sind die Leistungsbedarfe der Energiearten *elektrische Energie* und *Druckluft* im Wertstrom für die energieintensiven Betriebszustände separat aufgeführt (Abbildung 64). Das Ergebnis der detaillierten energieorientierten Wertstromanalyse kann Anhang A5 entnommen werden.

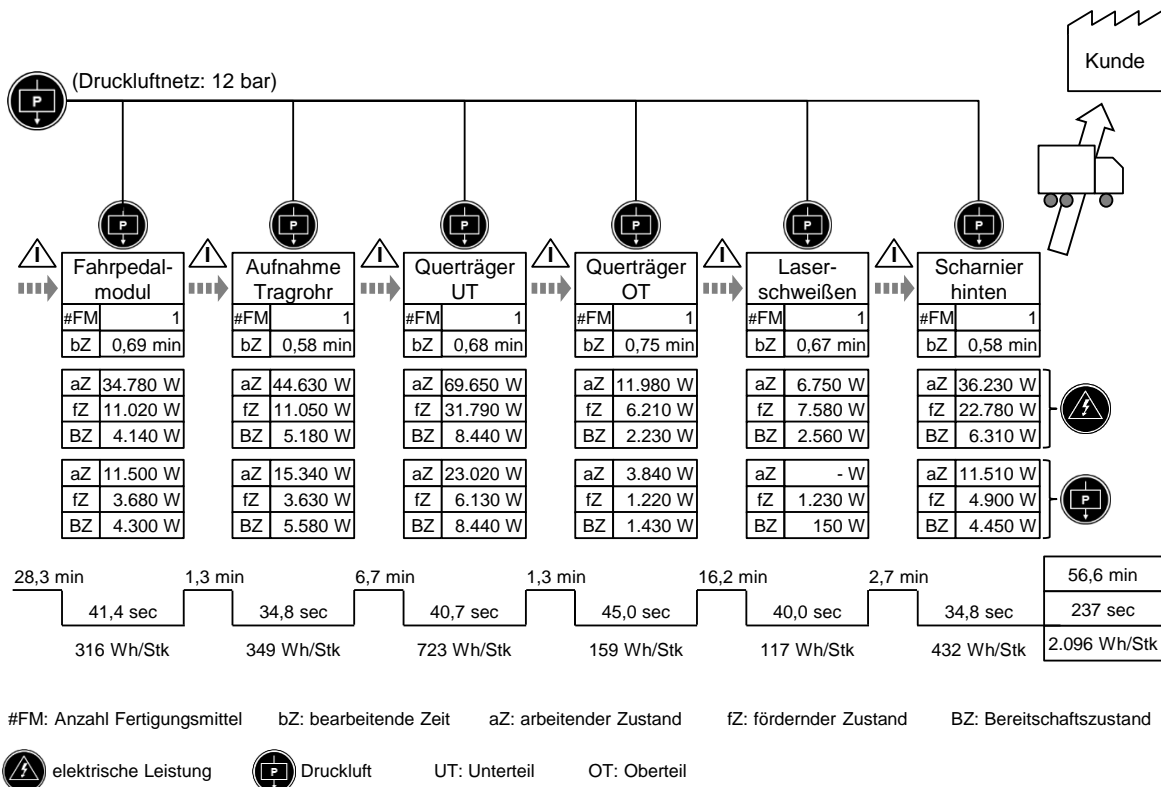


Abbildung 64: Vereinfachte Darstellung der energieorientierten Wertstromanalyse der Stirnwandfertigung in der Ausgangssituation

Anlaufzeiten sind in der Prozesskette vernachlässigbar. Nach der Fertigung des Tagesbedarfs von 980 Stück verweilen alle Fertigungsmittel für 3 min in einem Bereitschaftsmodus, bevor sie den produktionsfreien Zustand übergehen. Die restliche Zeit der dritten Schicht kann anschließend für Wartungstätigkeiten genutzt werden.

Durch die Historie der Unterbrechungsdokumentation kann auch für diese Fallstudie ein typisches Unterbrechungsverhalten nachgewiesen werden, das näherungsweise exponentialverteilt ist. Über den Zeitraum des vergangenen Fabrikjahres mit 250 Fabriktagen kann die Variation der Unterbrechungszeiten zudem mit einer Normalverteilung beschrieben werden.



Die gemessenen GPS-Zielgrößenwerte der Stirnwandfertigung in der Ausgangssituation sind in Tabelle 23 abgebildet.

Tabelle 23: Gemessene GPS-Zielgrößenwerte in der Ausgangssituation der Stirnwandfertigung

Ausgangssituation	GPS-Zielgrößen des Bereichs Stirnwandfertigung				
	Durchlaufzeit	OEE	Qualitätsgrad	EPEI-Wert	Energieintensität
Messung	56,6 min	77,2%	98,2%	1,3 min	2.096 Wh/Stk

### 5.3.2 Schritt 2: Energieeffizienz-Maßnahmengenerierung

Die höchste Energieintensität der Prozesskette ist durch den energieorientierten Wertstrom im Prozessschritt *Querträger UT* auszumachen, da in diesem Prozessschritt die meisten Roboter und Schweißzangen zum Einsatz kommen. Der hohe Anteil des Druckluftbedarfs für die gesamte Prozesskette deutet auf mögliche Einsparpotenziale hin. Äquivalent zur ersten Fallstudie werden auch diesmal drei Maßnahmen zur Reduzierung von Energieverschwendung auf Basis des energieorientierten Wertstroms generiert. Die Energieeffizienz-Maßnahmensteckbriefe der vorgestellten Maßnahmen können Anhang A6 entnommen werden.

#### Maßnahme 1: Reduzierung der Verweildauer im Bereitschaftszustand

Im Sinne einer Just-in-Time-Versorgung orientiert sich die erste Maßnahme am Energieeffizienz-Handlungsansatz *bedarfsgerechte Energieversorgung*. Durch die Analyse der Zeitanteile wird deutlich, dass sich die Fertigungsmittel aller Prozessschritte während Pausenzeiten, Zeiten für Wartung und ohne Auftrag sowie organisatorischen Störzeiten zunächst in einem Bereitschaftszustand befinden und erst nach drei Minuten in den produktionsfreien Zustand wechseln. Da der Leistungsbedarf während des Bereitschaftszustands deutlich höher ist, als im produktionsfreien Zustand, besteht die erste Maßnahme darin, die Verweilzeit von drei Minuten auf eine Minute zu verkürzen. Im Energieeffizienz-Maßnahmensteckbrief kommt dies einer Veränderung der Prozentsätze der genannten Zeitanteile gleich.

Diese Maßnahme kann theoretisch in allen Prozessschritten angewandt werden. Neben den Auswirkungen auf die Energieintensität sind keine weiteren Auswirkungen auf die GPS-Zielgrößen des betrachteten Prozessschrittes oder der benachbarten Prozessschritte zu erwarten. Daher wird die Maßnahme zunächst im ersten Prozessschritt *Fahrpedalmodul* simuliert. Bestätigt sich die Erwartung in der Prognose, so kann dasselbe Vorgehen auch in den weiteren Prozessschritten als

separate Maßnahme angewandt werden. Im Energieeffizienz-Maßnahmenportfolio wird die Maßnahme auf Prozessschrittebene mit rein zeitlichen Auswirkungen positioniert.

### **Maßnahme 2: Wechsel des Druckluftnetzes von 12 bar auf 8 bar**

Messungen der Energieart Druckluft ergeben einen Maximalbedarf von 7,4 bar für die servo-pneumatischen Schweißzangen. Ausschließlich in der Laserzelle ist während des fördernden Zustands ein Druck von 10,3 bar notwendig. Historisch bedingt ist die gesamte Stirnwandfertigung an ein 12 bar-Druckluftnetz angeschlossen. Die Reduzierung des Netzdruckes auf den benötigten Betriebsdruck wird durch Druckminderer erreicht. Der Einsatz dieser Druckminderer ist jedoch mit Energieverschwendung verbunden. Neben dem 12 bar-Druckluftnetz ist seit kurzem auch ein 8 bar-Druckluftnetz vorhanden, an das die Stirnwandfertigung angeschlossen werden kann. Bei einer Versorgungsumstellung muss jedoch der Einbau eines Verdichters in der Laserschweißzelle erfolgen, um den dort nötigen Druck von 10,3 bar zu erreichen.

Die zweite Maßnahme der Fallstudie folgt daher dem Energieeffizienz-Handlungsansatz *Komponentenaddition/-substitution/-reduktion* und soll im Prozessschritt *Laserschweißen* umgesetzt werden. Parallel dazu erfolgt die Umstellung der Druckluftversorgung von einem 12 bar- auf ein 8 bar-Netz für die gesamte Prozesskette. Pro Reduzierung des Druckluftnetzes um 1 bar kann eine Reduzierung des Energiebedarfs um 6-10 % erreicht werden (HÜTTER 2008). Für die Umstellung auf 8 bar wird daher für alle Prozessschritte eine Reduzierung des Leistungsbedarfs der Energieart Druckluft um 32 % angenommen. Während des fördernden Zustands des Prozessschrittes *Laserschweißen* wird der Druck von 8 bar auf 10,3 bar verdichtet. Der Verdichter benötigt dazu eine Leistung von 5,5 kW. Durch den zusätzlichen Einsatz des Verdichters ist im Prozessschritt *Laserschweißen* darüber hinaus eine Steigerung der technischen Störzeit um 12 % zu erwarten.

Da eine Umstellung der Druckluftversorgung alle Prozessschritte betrifft, wird die Maßnahme im Maßnahmenportfolio auf Prozesskettenebene mit Auswirkungen auf die Leistung und die Zeit positioniert.

### **Maßnahme 3: Einsatz einer servo-elektrischen Schweißzange**

Alternativ zur Umstellung des Druckluftnetzes ist auch der Einsatz von servo-elektrischen Schweißzangen denkbar. Maßnahme 3 beschäftigt sich gemäß dem Handlungsansatz *Komponentenaddition/-substitution/-reduktion* mit dem Austausch der servo-pneumatischen Schweißzange im Prozessschritt *Querträger OT* durch

eine servo-elektrische Schweißzange. Laut Herstellerangabe ist dadurch eine Reduzierung des Energiebedarfs um 90 % möglich. Nach Einbau der Zange benötigt der Prozessschritt keine Druckluft mehr. Der Bedarf an elektrischer Energie steigt jedoch um 10 % der Energie, die zuvor für die Druckluftversorgung benötigt wurde. Tests ergaben, dass durch die Umstellung auf eine servo-elektrische Schweißzange eine Veränderung des Unterbrechungsverhaltens festzustellen ist. Erwartet werden Steigerungen der technischen Störzeit um 14 %, der Kurzstillstands- & Langsamlaufzeit um 15 % sowie der Ausschuss- & Nacharbeitszeit um 20 %.

Die Durchführung der Maßnahme wirkt somit sowohl auf die Zeit, als auch auf die Leistung in einem einzelnen Prozessschritt und wird folglich im rechten unteren Bereich des Maßnahmenportfolios positioniert.

### 5.3.3 Schritt 3: Prognose der GPS-Zielgrößenwerte

Im nächsten Schritt erfolgt der Vergleich zwischen gemessenen und simulierten GPS-Zielgrößenwerten der Ausgangssituation. Entsprechend der ersten Fallstudie wird zur Bestätigung der Abbildungsgenauigkeit eine maximale Abweichung von 2,0 % für die GPS-Zielgrößen auf Prozessketteneben gewählt. Die Ergebnisse des Vergleichs können Tabelle 24 entnommen werden.

*Tabelle 24: Vergleich der GPS-Zielgrößenwerte aus Messung und Simulation der Stirnwandfertigung im Ausgangszustand*

	Fahrpedal-modul	Aufnahme Tragrohr	Querträger UT	Querträger OT	Laser-schweißen	Scharnier hinten	
<b>Messung</b>							<b>Gesamt</b>
Durchlaufzeit [min]	28,3	1,3	6,7	1,3	16,2	2,7	56,6
OEE-Wert [%]	82,0%	76,7%	87,9%	81,2%	84,0%	83,8%	77,2%
Qualitätsgrad [%]	98,7%	99,2%	99,2%	99,6%	98,8%	99,1%	98,2%
EPEI-Wert [min]	1,18	1,28	1,11	1,20	1,15	1,16	1,3
Energieintensität [Wh/Stk]	316	349	723	159	117	432	2.096
<b>Simulation</b>							<b>Gesamt</b>
Durchlaufzeit [min]	27,7	1,2	7,3	1,3	16,4	2,4	56,3
OEE-Wert [%]	82,5%	76,7%	88,8%	81,4%	84,4%	84,4%	78,0%
Qualitätsgrad [%]	98,8%	99,2%	99,8%	99,5%	98,9%	99,2%	98,8%
EPEI-Wert [min]	1,17	1,28	1,10	1,20	1,15	1,15	1,3
Energieintensität [Wh/Stk]	315	349	724	159	117	431	2.095

Bei 1440 Intervallen je Simulationslauf und 250 Läufen werden in dieser Fallstudie 360.000 Datensätze je Prozessschritt erzeugt und ausgewertet.

Beim Vergleich von simulierten und gemessenen Werten wird auch in dieser Fallstudie eine hohe Abbildungsgenauigkeit für die Ausgangssituation der

Stirnwandfertigung erreicht. Keine Abweichung überschreitet den Maximalwert von 2,0 %. Die Simulationsergebnisse können folglich als Referenzwerte festgelegt werden. Entsprechend der ersten Fallstudie werden anschließend je Maßnahme die Differenzen der GPS-Zielgrößenwerte zu den Referenzwerten prognostiziert. Die tatsächliche Umsetzung der Maßnahmen war im Rahmen der Fallstudie in der Stirnwandfertigung nicht möglich, was eine Anwendung der V & V-Technik *Validierung von Vorhersagen* ausschließt.

### Maßnahme 1: Reduzierung der Verweildauer im Bereitschaftszustand

Nach der Durchführung der Simulationsstudie für den ersten Prozessschritt der Prozesskette mit der Bezeichnung *Fahrpedalmodul* wird deutlich, dass durch die Maßnahme ausschließlich Auswirkungen auf die Energieintensität prognostiziert werden. Daher wird die Umsetzung der Maßnahme auch für die anderen Prozessschritte in separaten Simulationsstudien abgebildet. Die Prognosen für die gesamte Prozesskette sind in Tabelle 25 dargestellt. Das Mean-Case-Szenario weist ausschließlich eine Verbesserung der Energieintensität auf. Die übrigen GPS-Zielgrößen sind nicht betroffen.

Tabelle 25: Auswertung der Simulationsstudien auf Prozesskettenebene nach Umsetzung der ersten Maßnahme in der Stirnwandfertigung

Maßnahme 1	GPS-Zielgrößen des Bereichs Stirnwandfertigung				
	Durchlaufzeit	OEE	Qualitätsgrad	EPEI-Wert	Energieintensität
Referenzwert	56,3 min	78,0%	98,8%	1,3 min	2.095 Wh/Stk
Prognose Worst-Case	62,8 min	75,8%	98,4%	1,3 min	2.082 Wh/Stk
Prognose Mean-Case	56,3 min	78,0%	98,8%	1,3 min	2.074 Wh/Stk
Prognose Best-Case	33,7 min	80,5%	99,2%	1,2 min	2.067 Wh/Stk

### Maßnahme 2: Wechsel des Druckluftnetzes von 12 bar auf 8 bar

Zur Abbildung der zweiten Maßnahme in der Prozesskette der Stirnwandfertigung wird zunächst eine Simulationsstudie des Prozessschrittes *Laserschweißen* mit den veränderten Eingangsdaten des Energieeffizienz-Maßnahmensteckbriefs erstellt. Eine erhöhte Anzahl an Taktverlusten durch die Erreichung des maximalen Umlaufbestands kann dabei nicht festgestellt werden. Somit sind keine Auswirkungen auf den vorgelagerten Prozessschritt zu erwarten. Durch die Steigerung der technischen Störzeit, die aus dem Einsatz des Verdichters resultiert, verändert sich die organisatorische Störzeit<sub>T<sub>IR</sub></sub>, die auf den nachgelagerten Prozessschritt wirkt. Dadurch wird eine zusätzliche Simulationsstudie für den Prozess-

schritt *Scharnier hinten* notwendig. Aus der Simulationsstudie resultieren jedoch keine weiteren Auswirkungen auf die Prozesskette. Durch die Umstellung auf das 8 bar-Druckluftnetz ist eine Verbesserung der Energieintensität im Prozessschritt zu erwarten. Nach diesen beiden Simulationsstudien werden auch die ersten vier Prozessschritte der Prozesskette mit veränderten Leistungsbedarfen für die Druckluftversorgung in vier separaten Simulationsstudien abgebildet. Die Ergebnisse können Tabelle 26 entnommen werden

Tabelle 26: Auswertung der Simulationsstudien auf Prozesskettenebene nach Umsetzung der zweiten Maßnahme in der Stirnwandfertigung

Maßnahme 2	GPS-Zielgrößen des Bereichs Stirnwandfertigung				
	Durchlaufzeit	OEE	Qualitätsgrad	EPEI-Wert	Energieintensität
Referenzwert	56,3 min	78,0%	98,8%	1,3 min	2.095 Wh/Stk
Prognose Worst-Case	62,8 min	75,3%	98,4%	1,3 min	1.975 Wh/Stk
Prognose Mean-Case	56,5 min	77,5%	98,8%	1,3 min	1.963 Wh/Stk
Prognose Best-Case	35,0 min	80,0%	99,2%	1,2 min	1.952 Wh/Stk

Für die gesamte Prozesskette werden Veränderungen der GPS-Zielgrößen Energieintensität, Durchlaufzeit sowie OEE-Wert prognostiziert. Die Verbesserung der Energieintensität um 132 Wh/Stk im Mean-Case-Szenario resultiert aus der Druckluftnetzumstellung. Die Erhöhung der technischen Störzeit aufgrund des Verdichters wirkt sich leicht negativ auf den OEE-Wert aus. Eine damit einhergehende Veränderung des durchschnittlichen Umlaufbestands sorgt für eine leichte Steigerung der Durchlaufzeit.

### Maßnahme 3: Einsatz einer servo-elektrischen Schweißzange

Zur Prognose der GPS-Zielgrößenveränderungen durch die Verwendung einer servo-elektrischen Schweißzange wird eine Simulationsstudie des Prozessschrittes *Querträger OT* erstellt. Aufgrund der Veränderungen des Unterbrechungsverhaltens werden Auswirkungen auf den nachgelagerten Prozessschritt festgestellt, was eine zusätzliche Simulationsstudie des Prozessschrittes *Laserschweißen* notwendig macht. Weitere Auswirkungen auf die Prozesskette sind nicht feststellbar. Die Ergebnisse der Prognose zur Umsetzung der dritten Maßnahmen sind in Tabelle 27 dargestellt. Durch das veränderte Unterbrechungsverhalten verändern sich die GPS-Zielgrößen im Prozessschritt *Querträger OT*. Auf Prozesskettenebene sind diese Veränderungen jedoch zum wiederholten Male nur für die Energieintensität feststellbar. Die Veränderung der Ausschuss- und Nacharbeitszeit führt auf Prozess-

kettenebene nur zu einer minimalen Verschlechterung des Qualitätsgrads um 0,1 %. Durch veränderte Umlaufbestände sinkt dazu die Durchlaufzeit um vernachlässigbare 0,4 min. Durch den Einsatz einer servo-elektrischen Schweißzange wird eine Reduzierung der Energieintensität um 32 Wh/Stk erreicht.

*Tabelle 27: Auswertung der Simulationsstudien nach Umsetzung der dritten Maßnahme in der Stirnwandfertigung*

Maßnahme 3	GPS-Zielgrößen des Bereichs Stirnwandfertigung				
	Durchlaufzeit	OEE	Qualitätsgrad	EPEI-Wert	Energieintensität
Referenzwert	56,3 min	78,0%	98,8%	1,3 min	2.095 Wh/Stk
Prognose Worst-Case	62,6 min	75,9%	98,4%	1,3 min	2.076 Wh/Stk
Prognose Mean-Case	55,9 min	78,0%	98,7%	1,3 min	2.063 Wh/Stk
Prognose Best-Case	26,9 min	80,3%	99,2%	1,2 min	2.052 Wh/Stk

Nach Abschluss der Simulationsstudien kann nun die erweiterte Wirtschaftlichkeitsbewertung durchgeführt werden.

### 5.3.4 Schritt 4: Erweiterte Wirtschaftlichkeitsbewertung

Auch für diese Fallstudie wird das bereits vorgestellte Verfahren der dynamischen Amortisationszeit verwendet, um Investitionsrechnungen für Energieeffizienzmaßnahmen zu erstellen. Zur Berechnung der Amortisationszeit werden ein Kalkulationssatz von 1 % pro Monat sowie eine maximale Amortisationszeit von 24 Monaten zugrunde gelegt. Für eine berechnete Amortisationszeit von 24 Monaten liegt der Nutzwert auf der vertikalen Achse des Entscheidungsportfolios entsprechend bei 1,0. Bei einer Amortisation nach einer Zeit von 48 Monaten oder länger liegt der Nutzwert bei 0,0. Eine unmittelbare Amortisation bei Umsetzung einer Maßnahme führt zu einem Nutzwert von 2,0.

Die Umsetzung der ersten Maßnahme bewirkt laut Prognose eine Energieeinsparung von 21 Wh/Stk. Bei einem Tagesbedarf von 980 Stk und 20 Fabriktagen pro Monat sowie einem Energiepreis von 0,12 €/kWh ergibt sich eine monatliche Energiekosteneinsparung von 49,39 €. Die Programmierung der Roboter kann durch eigenes Personal erfolgen. Dadurch würde ein Einmalaufwand von 670,00 € entstehen. Für die erste Maßnahme kann daraus eine Amortisationszeit von 12,03 Monaten erreicht werden, was einem Nutzwert von etwa 1,50 entspricht.

Durch die Umstellung des Druckluftnetzes im Rahmen der zweiten Maßnahme wird eine Einsparung von 132 Wh/Stk erreicht. Die monatliche Kostenreduzierung liegt dementsprechend bei 310,46 €. Für die Beschaffung und den Einbau des Verdichters in der Laserschweißzelle wird eine Auszahlung von 2.100,00 € fällig. Durch die Umstellung auf das 8 bar-Druckluftnetz entstehen einmalige Kosten in Höhe von 3.250 €. Nötige Testläufe und Schulungen des Instandhaltungspersonals würden zudem einmalig 850,00 € kosten. Die auf Basis dieser Ein- und Auszahlungen berechnete Amortisationszeit beträgt 16,88 Monate. Der Nutzwert liegt daher bei 1,30.

Der Einsatz einer servo-elektrischen Schweißzange führt zu Energieeinsparungen in Höhe von 32 Wh/Stk, was einer Energiekosteneinsparung von 75,26 € entspricht. Die Anschaffung der Schweißzange kostet 3.900,00 €. Für Einbau und Testläufe ist eine Auszahlung von 270,00 € notwendig. Die gebrauchte servo-pneumatische Schweißzange kann für 850,00 € verkauft werden. Dadurch kommen eine Amortisationszeit von 30,06 Monaten und ein Nutzwert von 0,75 zustande.

Nach der Durchführung der Investitionsrechnungen und der Festlegung der zugehörigen Nutzwerte ist die Gewichtung der GPS-Zielgrößen zu überprüfen. Im Unterschied zur LEP weisen die GPS-Zielgrößen im untersuchten Karosseriebau verschiedene Gewichtungen auf. Da ausschließlich eine Variante gefertigt wird, spielt der EPEI-Wert eine untergeordnete Rolle. Den beiden Zielgrößen Qualitätsgrad und OEE-Wert wird hingegen eine hohe Bedeutung zugesprochen. Die Wichtigkeit der beiden übrigen Zielgrößen liegt dazwischen, wobei die Durchlaufzeit eine höhere Bedeutung einnimmt, als die Energieintensität. Durch die Paarvergleich-Matrix im AHP berechnen sich folgende Gewichtungen (vgl. Tabelle 28):

Tabelle 28: Gewichtung der GPS-Zielgrößen für die Stirnwandfertigung

	Paarvergleich-Matrix					Normierung					Gewichtung	
	DLZ	OEE	QG	EPEI	EI	DLZ	OEE	QG	EPEI	EI	$r_i$	$w_i$
DLZ	1	1/3	1/3	7	1	0,12	0,12	0,12	0,23	0,12	0,71	0,142
OEE	3	1	1	9	3	0,37	0,36	0,36	0,29	0,37	1,74	0,349
QG	3	1	1	9	3	0,37	0,36	0,36	0,29	0,37	1,74	0,349
EPEI	1/7	1/9	1/9	1	1/5	0,02	0,04	0,04	0,03	0,02	0,15	0,031
EI	1	1/3	1/3	5	1	0,12	0,12	0,12	0,16	0,12	0,65	0,129
$\Sigma$	8,14	2,78	2,78	31,00	8,20	1	1	1	1	1	5	1

DLZ: Durchlaufzeit

OEE: OEE-Wert

QG: Qualitätsgrad

EPEI: EPEI-Wert

EI: Energieintensität

Für die Konsistenzprüfung gilt auch hier für eine Matrix mit  $n = 5$  Dimensionen die maximale Konsistenzverhältniszahl  $CR < 0,1$ . Für die Paarvergleiche aus Tabelle 28 ergibt sich ein Konsistenzindex CI von 0,021 und eine Konsistenzverhältniszahl CR von 0,019. Die Konsistenz der Paarvergleiche ist somit überprüft und bestätigt.

Nach bewährtem Vorgehen folgt nun die Ermittlung der Nutzwerte der GPS-Zielgrößenveränderungen für die drei Maßnahmen. Für die Grenzkurve des Entscheidungsportfolios wird die Funktion aus Gleichung 5-2 gewählt. Die Positionierung der Maßnahmen inkl. der Koordinaten der jeweiligen Szenarien sind in Abbildung 65 dargestellt.

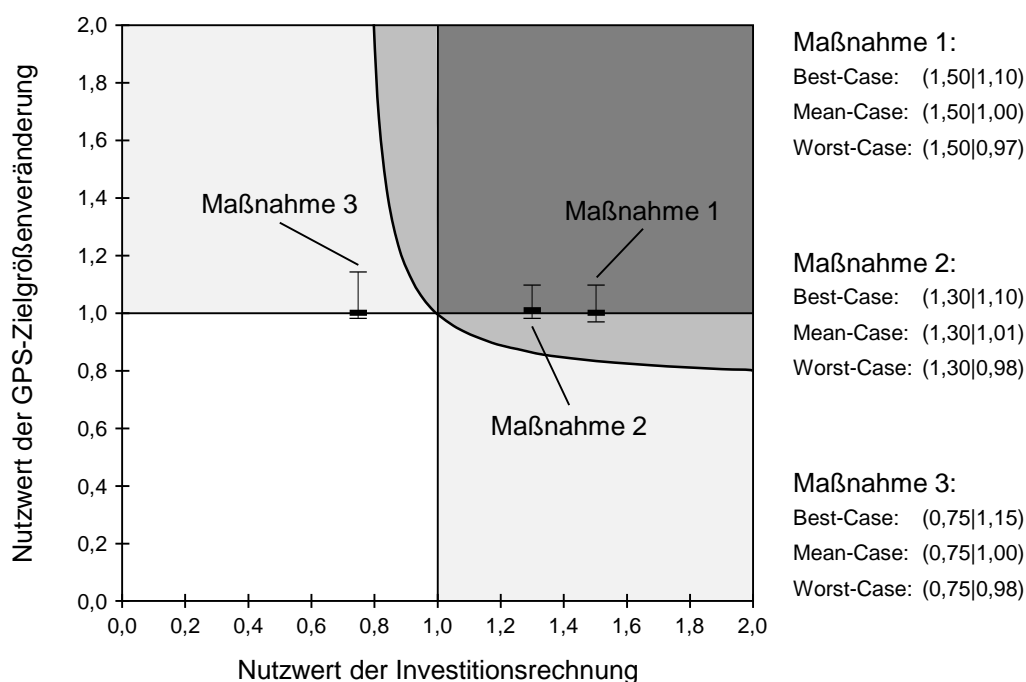


Abbildung 65: Positionierung der Maßnahmen der Fallstudie Stirnwandfertigung im Entscheidungsportfolio

Aus den Prognosen der GPS-Zielgrößenveränderungen geht bereits hervor, dass alle drei Maßnahmen auf Prozesskettenebene zwar Auswirkungen auf die Zielgröße Energieintensität, aber kaum Auswirkungen auf die übrigen Zielgrößen haben. Aufgrund der im Vergleich zum OEE-Wert und zum Qualitätsgrad geringen Gewichtung der Energieintensität ergibt sich für die Maßnahmen im Mean-Case-Szenario auf der vertikalen Achse ein Nutzwert von ca. 1,0. Da die Nutzwerte der Investitionsrechnung jedoch sehr unterschiedlich ausfallen, kann eine Empfehlung zur Umsetzung ausschließlich für die ersten beiden Maßnahmen abgeleitet werden.



Der Einsatz einer servo-elektrischen Schweißzange in Maßnahme 3 ist mit zu hohen einmaligen Investitionen verbunden. Die Prognose der Zielgrößenveränderung macht hier jedoch ebenfalls deutlich, dass das veränderte Unterbrechungsverhalten durch den Einsatz der servo-elektrischen Schweißzange kaum negativen Einfluss auf die GPS-Zielgrößen auf Prozesskettenebene hat. Für die mögliche Neuplanung einer Stirnwandfertigung sollte daher eine erneute Überprüfung der Verwendung von servo-elektrischen Schweißzangen durchgeführt werden.

## 5.4 Bewertung der Methodik

Nach der Anwendung der Methodik in der Praxis wird nachfolgend die Erfüllung der in Abschnitt 3.1 gestellten Anforderungen überprüft. Abschließend werden der notwendige Aufwand zur Anwendung und der Nutzen der Methodik in der Praxis diskutiert.

### **Erfüllung der Anforderungen**

Die Anforderung *Transparenzzeugung für unterschiedliche Energiearten* wird im Rahmen der energieorientierten Wertstromanalyse ausführlich berücksichtigt. Unterschiedliche Energiearten können mithilfe der Methodik für einzelne Prozessschritte, aber auch für die Prozesskette eindeutig zugeordnet und quantifiziert werden. In der zweiten Fallstudie wird dies am Beispiel der Energieart Druckluft deutlich. Zur detaillierten Ermittlung der Energieintensität wurde die Wertstromanalyse um eine Energiedatenmatrix erweitert. Diese ermöglicht eine prozentuale Verteilung von Zeitanteilen auf mindestens fünf verschiedene Betriebszustände eines Prozessschrittes. Die Energiedatenmatrix kam in den Prozessschritten beider Fallstudien zum Einsatz und sorgt für die Erfüllung der Anforderung *zustandsbasierte Energieanalyse*.

Durch die Erweiterung der Wertstromanalyse um Energiedaten und die Vorgabe definierter Produktionsdaten, die im Rahmen der energieorientierten Wertstromanalyse zwingend zu erfassen sind, ist eine detaillierte *Ermittlung von Energie- und GPS-Zielgrößen* möglich. Zur Verdeutlichung des holistischen Ansatzes gibt es in der Methodik jedoch keine Unterscheidung von Energie- und GPS-Zielgrößen mehr. Stattdessen wird die Zielgröße Energieintensität als fester Bestandteil der GPS-Zielgrößen definiert. Auch die Anforderung *übersichtliche Darstellung von Material- und Energieflüssen* ist durch die Methodik vollständig erfüllt. Die klassische Materialflussdarstellung der Wertstromanalyse wird um Energieflüsse erweitert, die eine Verbindung zwischen der Energieversorgung und dem Energie-

bedarf in den Prozessschritten herstellen. Besonders in der zweiten Fallstudie wird diese Information verwendet, um bestehende Energieverschwendungen zu identifizieren, die aus der Druckluftversorgung resultieren.

Durch die aus der energieorientierten Wertstromanalyse hervorgehende Transparenz zu Produktions- und Energiedaten können erste Energieverschwendungen ermittelt werden. Für eine systematische Maßnahmengenerierung wurde die zusätzliche Anforderung aufgestellt, *allgemeingültige Energieeffizienz-Handlungsansätze* zu definieren. Diese wurden durch eine umfassende Literaturrecherche ermittelt und kommen in beiden Fallstudien bei der Generierung von Energieeffizienz-Maßnahmen zum Einsatz. In Kombination mit dem Energieeffizienz-Maßnahmenportfolio und den Energieeffizienz-Maßnahmensteckbriefen bilden die Handlungsansätze eine systematische *Vorgehensweise zur Maßnahmengenerierung*, die im Handlungsbedarf ebenfalls als Anforderung festgelegt wurde. In den Fallstudien wurden mit Hilfe dieser Vorgehensweise sechs konkrete Maßnahmen abgeleitet.

Die *Analyse der Wirkbeziehungen zwischen Zielgrößen und Maßnahmen* wird im Rahmen der Entwicklung der Methodik in zwei Schritten durchgeführt und vollständig erfüllt. Durch das GPS-Wirkgefüge erfolgte zunächst die statische Abbildung von Wirkbeziehungen innerhalb eines Prozessschrittes. Basierend auf der Struktur des GPS-Wirkgefüges konnte anschließend der *Aufbau eines generischen GPS-Modells* mit Hilfe von System Dynamics erfolgen. Dieses Modell lässt zusätzlich eine dynamische Analyse der Wirkbeziehungen zwischen GPS-Zielgrößen und Energieeffizienz-Maßnahmen zu. Durch die Berücksichtigung des Verhaltens von Umlaufbeständen vor und nach dem betrachteten Prozessschritt ist eine notwendige Ausweitung der Analyse auf die Ebene der Prozesskette sichergestellt.

Eine weitere Anforderung an die Methodik ist die *Berücksichtigung endogener und exogener Kenngrößen* im Simulationsmodell. Diese Anforderung konnte durch die Methodik nur teilweise erfüllt werden. Beide Typen von Kenngrößen sind Bestandteile des GPS-Wirkgefüges und des generischen System-Dynamics-Modells. Unsicherheiten werden im dynamischen Modell jedoch nur durch endogene Größen abgebildet. Zur Beherrschung der Komplexität werden in den Simulationsstudien konstante Werte für exogene Größen wie z. B. den Tagesbedarf angenommen. Durch diese Vereinfachung ist eine Konzentration auf die Unsicherheiten möglich, die durch Kenngrößen innerhalb des betrachteten Systems verursacht werden und im Regelfall besser beeinflussbar sind. Ein schwankender

Tagesbedarf wird bspw. durch den Kunden bestimmt und bietet daher nur geringe Einflussmöglichkeiten.

Eine *simulationsgestützte Prognose der Zielgrößenveränderung* kann mit Hilfe des generischen System-Dynamics-Modells durchgeführt werden. Diese Anforderung wird durch die Methodik vollständig erfüllt. Im Rahmen der Fallstudien findet für alle sechs Maßnahmen eine Prognose der GPS-Zielgrößenveränderungen statt. Mit Hilfe der V & V-Technik *Validierung von Vorhersagen* konnten drei Prognosen nach der Umsetzung der entsprechenden Maßnahmen in der Fertigung zusätzlich validiert werden.

Die letzte Anforderung an die Methodik ist eine *multikriterielle Maßnahmenbewertung zur Entscheidungsfindung*. Auch diese Anforderung wurde bei der Entwicklung der Methodik ausführlich berücksichtigt. Die Umsetzung der Anforderung erfolgte durch die Kombination aus einer klassischen Investitionsrechnung und der zusätzlichen Anwendung des AHP.

In Abbildung 66 ist die qualitative Bewertung des Erfüllungsgrads der Anforderungen an die entwickelte Methodik zusammenfassend dargestellt.

<ul style="list-style-type: none"> <li>● = erfüllt Anforderung</li> <li>◐ = erfüllt Anforderung teilweise</li> <li>○ = erfüllt Anforderung nicht</li> </ul>	Anforderungen an die Identifizierung von Energieverschwendung und Maßnahmengenerierung						Anforderungen an die Identifizierung von Wirkungen und Umsetzungsentscheidung für Maßnahmen				
	Transparenzzeugung für unterschiedliche Energiearten	zustandsbasierte Energieanalyse	Ermittlung von Energie- und GPS-Zielgrößen	übersichtliche Darstellung von Material- und Energieflüssen	allgemeingültige Energieeffizienz-Handlungsansätze	Vorgehensweise zur Maßnahmengenerierung	Analyse der Wirkbeziehungen zwischen Zielgrößen & Maßnahmen	Aufbau eines generischen GPS-Modells	Berücksichtigung endogener und exogener Kenngrößen	simulationsgestützte Prognose der Zielgrößenveränderung	multikriterielle Maßnahmenbewertung zur Entscheidungsfindung
<b>Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendung in GPS</b>											
Schnellbach 2015	●	●	●	●	●	●	●	●	◐	●	●

Abbildung 66: Qualitative Bewertung des Erfüllungsgrads der Anforderungen an die entwickelte Methodik

### **Anwendungsaufwand der Methodik**

Der initiale Einmalaufwand zur Anwendung der Methodik wird nachfolgend monetär sowie zeitlich bewertet. Anschließend folgt die Betrachtung des Aufwands je Maßnahmenbewertung.

Zur Verwendung der Methodik wird die Anschaffung der System-Dynamics-Software *Vensim PLE Plus*<sup>®</sup> empfohlen. Diese zeichnet sich nicht nur durch ihre Anwenderfreundlichkeit aus, sondern kann kostengünstig erworben werden. Eine Einzelplatzlizenz der aktuellen Version 6.3 kostet 169 \$. Eine kurze Einarbeitung in die Software ist für den Anwender notwendig. Da die Software selbsterklärende Übungen beinhaltet, die nach Themenfelder gegliedert sind, kann die Einarbeitung zielgerichtet erfolgen. Modellierungskennnisse sind nicht notwendig, da das generische System-Dynamics-Modell nicht angepasst werden muss. Der Anwender muss jedoch mit der Durchführung einer Monte-Carlo-Simulationsstudie in *Vensim*<sup>®</sup> *PLE Plus* vertraut sein. Die Eingabe der Eingangsdaten und die automatisierte Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgen mit Hilfe der Software *Microsoft Excel*<sup>®</sup>. Eine entsprechende Lizenz muss ebenfalls verfügbar sein. Wenn in den zu untersuchenden Produktionsbereichen keine stationären Energiemesssysteme vorhanden sind, können die benötigten Daten mit Hilfe von mobilen Messgeräten ermittelt werden. Für eine Grundausstattung an Leistungs- und Durchflussmessgeräten muss mit einem Einmalaufwand von ca. 10.000 € gerechnet werden. Die Implementierung eines integrierten Messsystems für einen Produktionsbereich ist deutlich kostenintensiver.

Zur Bestimmung der Abbildungsgenauigkeit der realen Produktion im Simulationsmodell ist einmalig eine maximal zulässige prozentuale Abweichung festzulegen. Zudem sollte die Gewichtung der GPS-Zielgrößen mit Hilfe des Paarvergleichs einmalig durch ein Expertengremium bestimmt werden, das sich aus Spezialisten der Bereiche Produktionsplanung, GPS und Energieeffizienz zusammensetzt. Dieses Gremium sollte in Abstimmung mit Spezialisten aus Einkauf und Controlling auch die Grenzkurve des Entscheidungsportfolios festlegen, um die nötige Akzeptanz für Umsetzungsentscheidungen sicherzustellen.

Abhängig vom Umfang einer betrachteten Prozesskette, der Datenverfügbarkeit und der Auswirkungen von Energieeffizienz-Maßnahmen auf die Prozesskette variiert der Aufwand je Maßnahmenbewertung. Der Aufwand zur Durchführung einer vollständigen energieorientierten Wertstromanalyse für eine aus vier bis acht Schritten bestehende Prozesskette beträgt etwa drei Arbeitstage, wenn alle notwendigen Produktions- und Energiedaten durch ein BDE und integrierte Mess-

systeme vorhanden sind. Sollten Energiemessungen mit mobilen Messgeräten nötig sein, so steigt der Zeitaufwand entsprechend. Neben dem Aufwand für die Durchführung der Messung ist ebenfalls eine Einarbeitung zur korrekten Bedienung der Messgeräte erforderlich. Der Anschluss der Messgeräte zur Messung von elektrischer Leistung muss aus Arbeitsschutzgründen durch eine Elektrofachkraft durchgeführt werden, deren Kapazität als zusätzlicher Aufwand berücksichtigt werden sollte.

Die Durchführung und Auswertung der Simulationsstudien ist weitestgehend automatisiert. Abhängig von der Anzahl der Zeitintervalle pro Simulationslauf liegt die Rechnerzeit inkl. Auswertungszeit zwischen 0,5 min und 3,0 min je Simulationsstudie. Zur Durchführung der Simulationsstudien wurde ein Rechner mit einer *Intel® Core™2 Duo* CPU (2,80 GHz) und einem Arbeitsspeicher von 4,00 GB verwendet. Für Maßnahmen, die aufgrund von starken Wirkungen auf die Prozesskette eine Durchführung von mehreren Simulationsstudien notwendig machen, steigt der Aufwand mit der Anzahl der Studien. Insgesamt ist für die Prognose der Zielgrößenveränderungen und die erweiterte Wirtschaftlichkeitsbewertung bei vier bis acht Maßnahmen mit ein bis zwei Arbeitstagen zu rechnen.

### **Nutzen der Methodik in der Praxis**

Die entwickelte Methodik bringt vielfache Vorteile mit sich, die nicht vollständig quantifizierbar sind. Ein monetär bewertbarer Nutzen entsteht durch Energieeffizienz-Maßnahmen, die explizit mit Hilfe der Methodik generiert wurden und zu Energiekosteneinsparungen führen. Die detaillierte sowie nachvollziehbare Untersuchung der Wirkbeziehungen zu den GPS-Zielgrößen ist zudem nützlich, um Vorbehalte gegen die Umsetzung von Energieeffizienz-Maßnahmen in der Produktion abzubauen. Dies kann zur Erschließung von Energieeinsparpotenzialen führen, die zuvor aufgrund fehlender Kenntnisse über Wirkbeziehungen nicht berücksichtigt wurden. Mittel- und langfristig führt die Methodik somit zur kontinuierlichen Reduzierung von Energieverschwendung in der Produktion. Die Transparenzerzeugung mit Hilfe der energieorientierten Wertstromanalyse ist dabei nicht nur zur Identifizierung von Energieverschwendung nützlich, sondern kann den Anwender der Methodik auch bei der Suche nach den klassischen Verschwendungsarten unterstützen, die aus der GPS-Literatur bekannt sind. Die Verknüpfung zwischen Energieeffizienz-Anstrengungen und GPS-Prinzipien sorgt für eine hohe Akzeptanz in den produzierenden Bereichen des Unternehmens.

Einen weiteren Nutzen stellt die erweiterte Wirtschaftlichkeitsbewertung dar. Sie liefert bei bestehenden positiven Synergien zwischen der Energieintensität und den

weiteren GPS-Zielgrößen starke Argumente für die Anschaffung von Komponenten zur Reduzierung von Energieverschwendung. Andererseits kann die Identifizierung von negativen Auswirkungen auf die GPS-Zielgrößen trotz kurzer Amortisationszeit zu einer Ablehnung der Umsetzung einer Energieeffizienz-Maßnahme führen. Ohne die Prognose der GPS-Zielgrößenveränderungen wird eine solche Maßnahme mit den entsprechenden negativen Folgen für die Fertigung evtl. zur Umsetzung freigegeben. Durch die Normierung der prognostizierten Zielgrößenveränderungen im Entscheidungsportfolio kommt es zwar zu einem Informationsverlust, sie erleichtert jedoch die Entscheidungsfindung.

Vor dem Hintergrund der Ressourcenverknappung trägt die Methodik somit zur Erreichung einer nachhaltigen Produktion bei, die durch die Öffentlichkeitsarbeit auch zur Außendarstellung des Unternehmens genutzt werden kann. Eine Übertragung dieses Nachhaltigkeitsgedankens auf das Mitarbeiterumfeld kann sich dabei positiv auf die Mitarbeitermotivation und -zufriedenheit auswirken und somit indirekt zur Steigerung der Mitarbeiterproduktivität führen. Unterstützt durch Sensibilisierungsmaßnahmen für Mitarbeiter, welche durch die Methodik nicht direkt bewertbar sind, kann zudem ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess hinsichtlich einer nachhaltigen Produktion angestoßen werden. Gelingt es darüber hinaus, die Assoziationen einer nachhaltigen Produktion auf die Produkte des Unternehmens auszuweiten, kann dies ein weiteres Kaufargument für den Kunden darstellen.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

### 6.1 Zusammenfassung

Produzierende Unternehmen haben in den letzten Jahrzehnten hohe Anstrengungen aufgebracht, um ihre Produktionsprozessketten hinsichtlich wichtiger Zieldimensionen wie Qualität, Geschwindigkeit, Flexibilität und Wirtschaftlichkeit kontinuierlich zu verbessern. Durch eine konsequente Ausrichtung ihrer Prozessketten nach den Prinzipien Ganzheitlicher Produktionssysteme (GPS) konnten hier bereits große Erfolge erzielt werden. Megatrends wie die Ressourcenverknappung oder der Klimawandel sorgen dafür, dass auch die Energieeffizienz immer stärker in den Fokus dieser Verbesserungsaktivitäten gerät. Die Umsetzung von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz innerhalb eines dynamischen Produktionssystems kann jedoch zu ungewünschten Auswirkungen auf wichtige GPS-Zielgrößen führen. Zielsetzung der Arbeit ist daher die Entwicklung einer Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendung unter Berücksichtigung von Zielgrößen Ganzheitlicher Produktionssysteme. Die Methodik soll Synergien zu bestehenden GPS-Methoden aufweisen und eine systematische Vorgehensweise zur Generierung und Bewertung von Energieeffizienz-Maßnahmen in der Fertigung bieten. Ein wichtiger Bestandteil der Methodik soll die quantitative Prognose von GPS-Zielgrößenveränderungen sein, die aus der Umsetzung einer Maßnahme resultieren. Bestehende Ansätze beschäftigen sich entweder mit der Umsetzung von Energieeffizienz-Maßnahmen oder mit der Ermittlung von Wirkbeziehungen zwischen klassischen GPS-Zielgrößen, nicht jedoch mit den Wirkbeziehungen zwischen beiden Aspekten.

Als Lösungsansatz wird die Entwicklung einer Methodik festgelegt, die aus vier Schritten besteht. Nach der Transparenzerzeugung über Produktions- und Energiedaten einer betrachteten Produktionsprozesskette soll der zweite Schritt der Methodik eine systematische Vorgehensweise zur Ableitung von Energieeffizienz-Maßnahmen bieten. Im dritten Schritt soll die Quantifizierung der GPS-Zielgrößenveränderungen mithilfe eines generischen Simulationsmodells prognostiziert werden. Durch eine multikriterielle Bewertung soll im letzten Schritt eine Umsetzungsempfehlung für Energieeffizienz-Maßnahmen abgeleitet werden können.

Für die Umsetzung der Methodik in vier Schritten ist zunächst in einer Vorarbeit die Analyse bestehender Wirkbeziehungen mit Hilfe eines statischen GPS-Wirkgefüges notwendig. In diesem sind alle notwendigen mathematischen

Zusammenhänge enthalten, die für den späteren Aufbau des generischen Simulationsmodells benötigt werden. Die Transparenzerzeugung über Produktions- und Energiedaten erfolgt mit Hilfe einer energieorientierten Wertstromanalyse. Sie basiert auf der klassischen Wertstromanalyse und wird um eine Systematik zur Aufnahme detaillierter Energiedaten erweitert. Mit Hilfe der energieorientierten Wertstromanalyse und einer Dokumentation des Unterbrechungsverhaltens der betrachteten Prozesskette ist es möglich, die betrachteten GPS-Zielgrößen inkl. der Energieintensität zu ermitteln. Die anschließende Energieeffizienz-Maßnahmen-generierung erfolgt mit Hilfe von allgemeingültigen Energieeffizienz-Handlungsansätzen. Maßnahmen werden anschließend in einem Portfolio klassifiziert und mit Hilfe eines Energieeffizienz-Steckbriefs konkretisiert. Der Steckbrief enthält alle wichtigen Daten, die im dritten Schritt für die Prognose der GPS-Zielgrößenveränderungen benötigt werden. Für die Prognose wird ein System-Dynamics-Modell verwendet, das auf den Wirkbeziehungen des GPS-Wirkgefüges basiert und einen generischen Prozessschritt innerhalb einer Produktionsprozesskette abbildet. Mit Hilfe von Simulationsstudien wird ein durch die Umsetzung einer Energieeffizienz-Maßnahme veränderter Fertigungsablauf simuliert und anschließend hinsichtlich der GPS-Zielgrößenveränderungen ausgewertet. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in einem letzten Schritt in eine erweiterte Wirtschaftlichkeitsbewertung ein. Diese kombiniert eine klassische Investitionsrechnung für eine Energieeffizienz-Maßnahme mit einer multikriteriellen Bewertung der Zielgrößenveränderungen mit Hilfe des Analytischen Hierarchieprozesses (AHP). Daraus abgeleitete Nutzwerte werden als Koordinaten zur Positionierung der Maßnahmen in einem Entscheidungsportfolio verwendet. Aus der Positionierung kann eine eindeutige Umsetzungsempfehlung für eine Energieeffizienz-Maßnahme abgeleitet werden.

Die entwickelte Methodik kommt im Rahmen zweier Fallstudien exemplarisch zum Einsatz. Die erste Fallstudie wird in der Lernfabrik für Energieproduktivität durchgeführt. Gegenstand der Betrachtung ist eine Fließfertigung von Zahnradgetrieben. In der zweiten Fallstudie wird die Stirnwandfertigung eines Karosseriebaus der Automobilproduktion untersucht. In beiden Fallstudien wird die entwickelte Methodik erfolgreich eingesetzt. In Summe werden dabei sechs Energieeffizienz-Maßnahmen generiert und hinsichtlich einer Umsetzungsempfehlung bewertet. Abschließend erfolgt die Betrachtung des Erfüllungsgrads der an die Methodik gestellten Anforderungen sowie eine Aufwand- und Nutzenbetrachtung der Methodik in der praktischen Anwendung.



## 6.2 Ausblick

Im Rahmen der Entwicklung der Methodik werden weitere mögliche Forschungsbedarfe aufgedeckt, die auf die vorliegende Arbeit aufbauen können. Diese entstehen beispielsweise durch Einschränkungen des Betrachtungsraums der Forschung. Die Methodik wurde speziell für Prozessketten entwickelt, die nach dem Prinzip der Fließfertigung aufgebaut sind. Denkbar wäre hier eine Übertragung der Methodik auf eine Insel- oder eine Werkstattfertigung. Da das Grundgerüst des generischen System-Dynamics-Modells auf Prozessschritzebene konzipiert ist, kann es für ein anderes Fertigungsprinzip zumindest teilweise übernommen werden. Der Fokus der Untersuchung sollte dann auf den komplexen Wirkbeziehungen zwischen den Prozessschritten einer Insel- oder Werkstattfertigung liegen.

Gemäß den Ursprüngen des GPS wurde die Methodik für bestehende Produktionsprozessketten entwickelt, um diese kontinuierlich zu verbessern. Mittlerweile werden die GPS-Prinzipien jedoch bereits bei einer Fabrik- oder Fertigungsneuplanung mit berücksichtigt, um Verschwendungen in der Produktion direkt vorzubeugen. Eine Adaption der Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendung in GPS für die Planungsphase ist daher sinnvoll und wünschenswert. Denkbar wäre z. B. eine Erweiterung der bestehenden Planungsphasen der Fabrikplanung nach VDI-Richtlinie 5200.

Zur Beherrschung der Komplexität wird in der Methodik jede Energieeffizienz-Maßnahme durch eine separate Simulationsstudie betrachtet. Auswirkungen, die durch die Umsetzung von mehreren Maßnahmen zur gleichen Zeit entstehen, können nicht bewertet werden. Zudem ist keine Festlegung einer optimalen Umsetzungsreihenfolge für mehrere Maßnahmen möglich. Beide Aspekte können in einer weiterführenden Forschungsarbeit betrachtet werden, die sich mit der Umsetzung von Maßnahmenbündeln beschäftigt.

Eine abschließende Überlegung ist die Ausweitung der Betrachtung von Energieverschwendung auf weitere Ressourcen im Sinne einer *Methodik zur Reduzierung von Ressourcenverschwendung unter Berücksichtigung von GPS-Zielgrößen*. Darin könnte beispielweise zusätzlich der Aspekt *Materialeffizienz* betrachtet werden, da die Materialkosten in produzierenden Unternehmen häufig einen hohen Stellwert einnehmen.



---

## 7 Literaturverzeichnis

### ABELE ET AL. 2010

Abele, E.; Kuhrke, B.; Rothenbücher, S.: Entwicklungstrends zur Erhöhung und Bewertung der Energieeffizienz spanender Werkzeugmaschinen. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik. Auerbach: Verlag Wissenschaftliche Scripten 2010, S. 99-120. ISBN: 9783942267007.

### ABELE & BECKMANN 2012

Abele, E.; Beckmann, B.: Energieeffizienz in Fabriken. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 107 (2012) 4, S. 261-265.

### ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Hanser 2011. ISBN: 9783446425958.

### AULL 2013

Aull, F.: Modell zur Ableitung effizienter Implementierungsstrategien für Lean-Production-Methoden. München: Utz 2013. ISBN: 9783831642830.

### BALCI 1998

Balci, O.: Verification, Validation and Testing. In: Banks, J. (Hrsg.): Handbook of Simulation. New York: John Wiley 1998, S. 335-393. ISBN: 9780471134039.

### BECKER ET AL. 2002

Becker, M.; Korge, A.; Schlotz, O.: Ganzheitliche Produktionssysteme - Erhebung zur Verbreitung und zum Forschungsbedarf.  
<<http://www.produktionssysteme.iao.fhg.de/>> - 03.02.2015.

### BERGMILLER & MCCRIGHT 2009

Bergmiller, G.; McCright, P.: Are Lean and Green Programs synergistic? Proceedings of the 2009 Industrial Engineering Research Conference. Miami, USA (2009).

### BINDING 1988

Binding, H. J.: Grundlagen zur systematischen Reduzierung des Energie- und Materialeinsatzes. Aachen: trans-aix-press 1988.

### BLAESER-BENFER 2012

Blaeser-Benfer, A.: Kurzstudie: Materialeffizienz in kleinen und mittleren Unternehmen. <<https://www.innovation-beratung-foerderung.de>> - 19.07.2014.

### BLOHM ET AL. 2006

Blohm, H.; Lüder, K.; Schaefer, C.: Investition: Schwachstellenanalyse des Investitionsbereichs und Investitionsrechnung. 9. Aufl. München: Vahlen 2006. ISBN: 9783800631681.

### BMF 2011

Bundesministerium der Finanzen: Arbeitsanleitung Einführung in Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen. <<http://www.olev.de/w/BMF-Arbeitsanleitung.pdf>> - 03.08.2014.

### BMWi 2014

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Energiedaten: Gesamtausgabe. Stand: November 2014. <<http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/Energiedaten.html>> - 07.01.2015.

### BMWi & BMU 2011

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. <[http://www.e2a.de/data/files/energiekonzept\\_bundesregierung.pdf](http://www.e2a.de/data/files/energiekonzept_bundesregierung.pdf)> - 03.02.2015.

### BÖHNER 2013

Böhner, J.: Ein Beitrag zur Energieeffizienzsteigerung in der Stückgutproduktion (Fortschritte in Konstruktion und Produktion). Aachen: Shaker 2013. ISBN: 9783844021899.

### BOGDANSKI ET AL. 2013

Bogdanski, G.; Schönemann, M.; Thiede, S.; Andrew, S.; Herrmann, C.: An extended Energy Value Stream Approach applied on the Electronics Industry. In: Emmanouilidis, C. et al. (Hrsg.): Advances in production management systems 2013, S. 65-72. ISBN: 9783642403514.

### BORCH ET AL. 1986

Borch, G.; Fürbock, M.; Mansfeld, L.; Winje, D.: Energiemanagement: Handbuchreihe Energieberatung. Berlin: Springer 1986.

### BORRMANN ET AL. 2011

Borrmann, A.; Günthner, W. A.; Horenburg, T.; König, M.; Mack, J. P.; Wimmer, J.: Simulationsgestützte Bauablaufplanung. In: Borrmann, A. et al. (Hrsg.): Digitale Baustelle: innovativer Planen, effizienter Ausführen. Dordrecht: Springer 2011, S. 159-204. ISBN: 9783642164866.

### BRADL 2004

Bradl, P.: Einsatz von System Dynamics in der strategischen Unternehmensplanung. Arbeitsberichte des Instituts für Informatik 37/3. Erlangen-Nürnberg: Friedrich-Alexander-Universität 2004.

### BRAUN 1996

Braun, J.: Aufgaben und Ziele der Organisationsgestaltung. In: Bullinger, H.-J. et al. (Hrsg.): Neue Organisationsformen im Unternehmen. Berlin: Springer 1996, S. 7-28. ISBN: 9783662125731.

### BROCKHAUS 2014

Brockhaus: Die Brockhaus Enzyklopädie Online. Gütersloh/München: <<https://fraunhofer.brockhaus-wissensservice.com>> - 03.02.2015.

---

BRÜGGEMANN & MÜLLER 2009

Brüggemann, H.; Müller, H.: Nachhaltiges Wertstromdesign. wt Werkstattstechnik online 99 (2009) 11/12, S. 895-898.

BULLINGER ET AL. 1993

Bullinger, H.-J.; Rieth, D.; Euler, H. P.: Planung entkoppelter Montagesysteme. Puffer in der Montage. Stuttgart: Teubner Verlag 1993. ISBN: 9783519063650.

BUNSE ET AL. 2011

Bunse, K.; Vodicka, M.; Schönsleben, P.; Brühlhart, M.; Ernst, F. O.: Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis between industrial needs and scientific literature. Journal of Cleaner Production 19 (2011) 6-7, S. 667-679.

BUSCHMANN 2012

Buschmann, M.: Planung und Betrieb von Energiedatenerfassungssystemen. Chemnitz: Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme 2012.

COYLE 1996

Coyle, R. G.: System Dynamics Modelling: A practical approach. London: Chapman & Hall 1996. ISBN: 9780412617102.

CUSUMANO 1989

Cusumano, M. A.: The Japanese Automobile Industry: Technology and Management at Nissan and Toyota. London, Harvard University Press 1989. ISBN: 9780674472563.

DÄUMLER & GRABE 2007

Däumler, K.-D.; Grabe, J.: Grundlagen der Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung. 12. Aufl. Herne: NWB 2007. ISBN: 9783482523021.

DESTATIS 2014

Statistisches Bundesamt: Produzierendes Gewerbe: Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden 2012.  
<<https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/IndustrieVerarbeitendesGewerbe/Strukturdaten/Kostenstruktur2040430127004.pdf> > - 03.02.2015.

DIETMAIR & VERL 2010

Dietmair, A.; Verl, A.: Energieeffizienter Betrieb von Produktionsanlagen. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik. Auerbach: Verlag Wissenschaftliche Scripten 2010, S. 185-206. ISBN: 9783942267007.

DIETMAIR ET AL. 2008

Dietmair, A.; Verl, A.; Wosnik, M.: Zustandsbasierte Energieverbrauchsprofile. wt Werkstattstechnik online 98 (2008) 7/8, S. 640-645.

### DIN 8580

DIN 8580: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth 2003.  
(ICS 01.040.25; 25.020).

### DIN 31051

DIN 31051: Grundlagen der Instandhaltung. Berlin: Beuth 2012.  
(ICS 01.040.03; 03.080.10).

### DIN EN 1325

DIN EN 1325: Value Management - Wörterbuch. Berlin: Beuth 2011.  
(ICS 01.040.03; 03.100.40).

### DIN EN ISO 9000

DIN EN ISO 9000: Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe.  
Berlin: Beuth 2005. (ICS 01.040.03; 03.120.10).

### DOMBROWSKI ET AL. 2006A

Dombrowski, U.; Hennersdorf, S.; Schmidt, S.: Grundlagen Ganzheitlicher  
Produktionssysteme. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 101  
(2006) 4, S. 172-177.

### DOMBROWSKI ET AL. 2006B

Dombrowski, U.; Palluck, M.; Schmidt, S.: Strukturelle Analyse Ganzheitlicher  
Produktionssysteme. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 101  
(2006) 3, S. 114-118.

### DOMBROWSKI ET AL. 2006C

Dombrowski, U.; Palluck, M.; Schmidt, S.: Typologisierung Ganzheitlicher  
Produktionssysteme. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 101  
(2006) 10, S. 553-556.

### DUDEN 2014A

Duden: Definition Handlung. <<http://www.duden.de/rechtschreibung/Handlung>>  
- 03.02.2015.

### DUDEN 2014B

Duden: Definition Ansatz. <<http://www.duden.de/rechtschreibung/Ansatz>>  
- 03.02.2015.

### ENGELMANN 2009

Engelmann, J.: Methoden und Werkzeuge zur Planung und Gestaltung  
energieeffizienter Fabriken. Chemnitz: Wissenschaftliche Schriftenreihe des  
Institutes für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme 2009.

### ERLACH 2010A

Erlach, K.: Projektbeschreibung KMU-Akut.  
<[http://www.ipa.fraunhofer.de/fileadmin/www.ipa.fhg.de/pdf/Fabrikplanung\\_und\\_Produktionsoptimierung/Projekte/kmu-akut-Energiewertstrom.pdf](http://www.ipa.fraunhofer.de/fileadmin/www.ipa.fhg.de/pdf/Fabrikplanung_und_Produktionsoptimierung/Projekte/kmu-akut-Energiewertstrom.pdf)>  
- 06.08.2013.

---

ERLACH 2010B

Erlach, K.: Wertstromdesign. Der Weg zur schlanken Fabrik. Berlin: Springer 2010. ISBN: 9783540898665.

ERLACH ET AL. 2010

Erlach, K.; Kuhlmann, T.; Westkamp, M.: Kosten runter in drei Monaten. Plastverarbeiter 61 (2010) 3, S. 28-30.

ERLACH & WESTKÄMPER 2009

Erlach, K.; Westkämper, E.: Energiewertstrom: Der Weg zur energieeffizienten Fabrik. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. 2009. ISBN: 9783839600108.

EVERSHEIM 2002

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik: 3. Arbeitsvorbereitung. Berlin: Springer 2002. ISBN: 3642626408.

FORD & CROWTHER 1926

Ford, H.; Crowther, S.: Today and tomorrow. Garden City: Doubleday Page & Company 1926.

FORRESTER 1961

Forrester, J. W.: Industrial Dynamics. Cambridge: MIT Press 1961.

FORRESTER 1972

Forrester, J. W.: Grundzüge einer Systemtheorie: Ein Lehrbuch. Wiesbaden: Gabler 1972. ISBN: 3409313311.

FORRESTER 1994

Forrester, J. W.: System Dynamics, System Thinking, and Soft OR. System Dynamics Review 10 (1994) 2, S. 245-256.

FRESNER ET AL. 2009

Fresner, J.; Bürki, T.; Sittel, H. H.: Ressourceneffizienz in der Produktion. Kosten senken durch Cleaner Production. 1. Aufl. Düsseldorf: Symposium 2009. ISBN: 3939707481.

FUJIMOTO 1999

Fujimoto, T.: The evolution of a manufacturing system at Toyota. New York: Oxford University Press 1999. ISBN: 9780195123203.

GALITSKY & WORRELL 2008

Galitsky, C.; Worrell, E.: Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Vehicle Assembly Industry, March 2008.  
<<http://ies.lbl.gov/iespubs/energystar/vehicleassembly.pdf>> - 29.05.2013.

GEORGOULIAS ET AL. 2009

Georgoulias, K.; Papakostas, N.; Chryssolouris, G.; Stanev, S.; Krappe, H.; Ovtcharova, J.: Evaluation of Flexibility for the effective Change Management of Manufacturing Organizations. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 25 (2009) 6, S. 888-893.

### GÖTZE 2008

Götze, U.: Investitionsrechnung: Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 2008.  
ISBN: 9783540788720.

### GÖTZE ET AL. 2010

Götze, U.; Koriath, H.-J.; Kolesnikov, A.; Lindner, R.; Paetzold, J.; Scheffler, C.: Energetische Bilanzierung und Bewertung von Werkzeugmaschinen. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik. Auerbach: Verlag Wissenschaftliche Scripten 2010, S. 157-184. ISBN: 9783942267007.

### GOMEZ 1981

Gomez, P.: Modelle und Methoden des systemorientierten Managements: Eine Einführung. Bern, Stuttgart: Haupt 1981. ISBN: 3258030383.

### GONCE & SOMERS 2010

Gonce, A.; Somers, K.: Lean for green manufacturing.  
<[http://www.mckinsey.com/client\\_service/sustainability/people/ken\\_somers](http://www.mckinsey.com/client_service/sustainability/people/ken_somers) >  
- 03.02.2015.

### GOTTMANN 2009

Gottmann, J.: Gestaltung von Produktionssystemen. Fraunhofer IPA Interaktiv (2009) 2, S. 30-32.

### GÜNTHNER 2010

Günthner, W. A.: Materialfluss und Logistik. Institut für Materialfluss und Logistik. Technische Universität München. München (2010).

### GUTENBERG 1951

Gutenberg, E.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Band 1: Die Produktion. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1951.

### HAAG 2013

Haag, H.: Eine Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2013.  
ISBN: 9783839605479.

### HÄMMERLE & RALLY 2010

Hämmerle, M.; Rally, P.: Wertschöpfung steigern: Ergebnisse der Datenerhebung über die Verbreitung und Ausgestaltung von Methoden zur Prozessoptimierung in der Produktion mit besonderem Fokus auf die Wertstrommethode. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2010. ISBN: 9783839601198.

### HALL & FANGEN 1956

Hall, A. D.; Fagen, R. E.: Definition of System. In: Bertalanffy, L. v. et al. (Hrsg.): Yearbook of the Society for the Advancement of General Systems Theory. Ann Arbor 1956, S. 18-28.



---

HARTMANN 2007

Hartmann, E. H.: TPM: Effiziente Instandhaltung und Maschinenmanagement: Stillstandzeiten verringern, Maschinenleistungen steigern, Betriebszeiten erhöhen. 3. Aufl. München: mi-Verlag 2007. ISBN: 9783636030887.

HEGENSCHEIDT 2003

Hegenscheidt, M.: Kennliniengestützte Leistungsprognose verketteter Produktionssysteme. Düsseldorf: VDI-Verlag 2003. ISBN: 9783183646029.

HERRMANN 2010

Herrmann, C.: Ganzheitliches Life Cycle Management. Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen. Berlin: Springer 2010. ISBN: 9783642014208.

HERRMANN ET AL. 2008

Herrmann, C.; Thiede, S.; Stehr, J.; Bergmann, L.: An environmental perspective on Lean Production. In: CIRP (Hrsg.): 41st Conference on Manufacturing Systems. Tokyo, Japan 2008, S. 83-88.

HESSELBACH 2012

Hesselbach, J.: Energie- und klimaeffiziente Produktion: Grundlagen, Leitlinien und Praxisbeispiele. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2012. ISBN: 9783834804488.

HINRICHSSEN 2002

Hinrichsen, S.: Ganzheitliche Produktionssysteme. FB/IE – Zeitschrift für Unternehmensentwicklung und Industrial Engineering 51 (2002) 6, S. 251-255.

HOLWEG 2007

Holweg, M.: The Genealogy of Lean Production. Journal of Operations Management 25 (2007) 2, S. 420-437.

HON 2005

Hon, K.: Performance and Evaluation of Manufacturing Systems. CIRP Annals - Manufacturing Technology 54 (2005) 2, S. 139-154.

HOPP & SPEARMAN 2001

Hopp, W. J.; Spearman, M. L.: Factory Physics. 2. Aufl. Boston: Irwin/McGraw-Hill 2001. ISBN: 0256247951.

HORVÁTH 2011

Horváth, P.: Controlling. 12. Aufl. München: Vahlen 2011. ISBN: 9783800638789.

HÜTTER 2008

Hütter, J.: Effiziente Druckluftproduktion. International Rotating Equipment Conference. Düsseldorf 2008.

IMAI 1986

Imai, M.: Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success. 1. Aufl. New York: Random House 1986. ISBN: 9780075543329.

### JONDRAL 2013

Jondral, A. G.: Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes. Aachen: Shaker 2013.  
ISBN: 9783844018042.

### KESSLER ET AL. 2008

Kessler, S.; Stausberg, J. R.; Uygun, Y.: Ganzheitliche Produktionssysteme entlang der Wertschöpfungskette: Ergebnisse einer deutschlandweiten Umfrage in Produktionsunternehmen. < [http://www.gps.lfo.tu-dortmund.de/staff/Umfrageergebnisse\\_GPS-WSK\\_v3n.pdf](http://www.gps.lfo.tu-dortmund.de/staff/Umfrageergebnisse_GPS-WSK_v3n.pdf)> - 03.02.2015.

### KfW 2005

KfW Bankengruppe (Hrsg.): KfW-Befragung zu den Hemmnissen und Erfolgsfaktoren von Energieeffizienz in Unternehmen. Frankfurt am Main: Abteilung Volkswirtschaft 2005.

### KHALAF 2012

Khalaf, S.: Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Erstellung energieeffizienter Fertigungsstrategien für verkettete Fertigungssysteme. Aachen: Shaker 2012. ISBN: 9783844014846.

### KIRSCH 2009

Kirsch, J.: Organisation der Bauproduktion nach dem Vorbild industrieller Produktionssysteme. Karlsruhe: Universitätsverlag 2009. ISBN: 9783866443679.

### KLETTI & SCHUMACHER 2011

Kletti, J.; Schumacher, J.: Die perfekte Produktion: Manufacturing Excellence durch Short Interval Technology. Berlin: Springer 2011. ISBN: 9783642138447.

### KLEVERS 2009

Klevers, T.: Wertstrom-Mapping und Wertstrom-Design: Verschwendung erkennen, Wertschöpfung steigern. 1. Aufl. München: mi-Verlag 2009.  
ISBN: 9783868800609.

### KLUGE ET AL. 2009

Kluge, S.; Wolf, M.; Westkämper, E.: Managementsysteme vom Typ Toyota (MSTT). wt Werkstattstechnik online 99 (2009) 3, S. 141-146.

### KONSTANTIN 2009

Konstantin, P.: Praxisbuch Energiewirtschaft: Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt. 2. Aufl. Berlin: Springer 2009.  
ISBN: 9783540785910.

### KORGE & LENTES 2009

Korge, S.; Lentjes, H.-P.: Ganzheitliche Produktionssysteme. In: Bullinger, H.-J. et al. (Hrsg.): Handbuch Unternehmensorganisation. Berlin: Springer 2009, S. 569-597. ISBN: 9783540721369.

### KRAFCIK 1988

Krafcik, J. F.: Triumph of the Lean Production System. Sloan Management Review (1988), S. 41-52.

---

KREBS 2011

Krebs, P.: Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten. München: Utz 2011. ISBN: 9783831641567.

KROPIK 2009

Kropik, M.: Produktionsleitsysteme in der Automobilfertigung. Dordrecht: Springer 2009. ISBN: 9783540889908.

KYNE 2010

Kyne, F.: System z mean time to recovery best practices. Poughkeepsie: International Technical Support Organization 2010. ISBN: 9780738433936.

LAW 2001

Law, A. M.: How to build valid and credible Simulation Models. In: Peters, B. A. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference. Arlington, USA: Piscataway 2001, S. 22-29.

LAY & NEUHAUS 2005

Lay, G.; Neuhaus, R.: Ganzheitliche Produktionssysteme (GPS): Fortführung von Lean Production? Angewandte Arbeitswissenschaften (2005) 185, S. 32-47.

LINDEMANN 2009

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. 3. Aufl. Berlin: Springer 2009. ISBN: 9783642014222.

LI 2007

Li, P.: Prozessoptimierung unter Unsicherheiten. München: Oldenbourg Verlag 2007. ISBN: 9783486581942.

LITTLE 1961

Little, J. D.: A Proof for the Queuing Formula:  $L = \lambda W$ . Operations Research 9 (1961) 3, S. 383-387.

LÖDDING 2005

Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. Berlin: Springer 2005. ISBN: 9783540202325.

LORENZ 1963

Lorenz, E. N.: Deterministic Nonperiodic Flow. Journal of the Atmospheric Sciences 20 (1963), S. 130-141.

MAY & KOCH 2008

May, C.; Koch, A.: Overall Equipment Effectiveness (OEE) - Werkzeug zur Produktivitätssteigerung. Zeitschrift der Unternehmensberatung (2008) 6, S. 245-250.

MCKINSEY & COMPANY 2009

McKinsey & Company: Wettbewerbsfaktor Energie: Neue Chancen für die deutsche Wirtschaft. Düsseldorf: McKinsey & Company Deutschland 2009.

### MEADOWS ET AL. 1972

Meadows, D. H.; Meadows, D. L.; Randers, J.; Behrens III., W. W.: The Limits to Growth: A report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind. New York: Universe Books 1972. ISBN: 0876631650.

### MEIXNER & HAAS 2002

Meixner, O.; Haas, R.: Computergestützte Entscheidungsfindung: Expert choice und AHP - innovative Werkzeuge zur Lösung komplexer Probleme. Frankfurt: Redline 2002. ISBN: 9783832309091.

### MONDEN 1983

Monden, Y.: Toyota Production System: Practical Approach to Production Management. Norcross: Industrial Engineering and Management Press 1983. ISBN: 9780898060348.

### MÜLLER ET AL. 2009

Müller, E.; Engelmann, J.; Löffler, T.; Strauch, J.: Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. Berlin: Springer 2009. ISBN: 9783540896432.

### MÜLLER ET AL. 2010

Müller, E.; Götze, U.; Fischer, S.; Veit, T.; Strauch, J.; Krönert, S.: Auswirkungen von Lean Logistikstrategien auf energieeffiziente Fabrikssysteme. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik. Auerbach: Verlag Wissenschaftliche Scripten 2010, S. 551-571. ISBN: 9783942267007.

### MÜLLER ET AL. 2011

Müller, E.; Strauch, J.; Krones, M.: Energieeffizienz einsparpotenziale systematisch erkennen und erschließen. In: Müller, E. et al. (Hrsg.): Nachhaltigkeit in Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Chemnitz: Eigenverlag 2011, S. 67-76.

### NEUGEBAUER ET AL. 2010

Neugebauer, R.; Rennau, A.; Schönherr, J.; Fischer, S.; Schellenberger, S.: Energieeffizienzmaßnahmen. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 105 (2010) 9, S. 796-801.

### NEUGEBAUER 2008

Neugebauer, R. (Hrsg.): Energieeffizienz in der Produktion: Untersuchung zum Handlungs- und Forschungsbedarf. München: Fraunhofer Verlag 2008.

### NEUGEBAUER 2013

Neugebauer, R. (Hrsg.): Handbuch Ressourcenorientierte Produktion. München: Hanser 2013. ISBN: 9783446430082.

### NYHUIS ET AL. 2009

Nyhuis, P.; Fronia, P.; Pachow-Frauenhofer, J.; Wulf, S.: Wandlungsfähige Produktionssysteme. wt Werkstattstechnik online 99 (2009) 4, S. 205-210.

---

OELTJENBRUNS 2000

Oeltjenbruns, H.: Organisation der Produktion nach dem Vorbild Toyotas.  
Aachen: Shaker 2000. ISBN: 9783826579660.

OHNO 1988

Ohno, T.: The Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production.  
Portland: Productivity Press 1988. ISBN: 9780915299140.

PACE 2004

Pace, D. K.: Modeling and Simulation Verification and Validation Challenges.  
Johns Hopkins APL Technical Digest 25 (2004) 2, S. 163-172.

PAPULA 2001

Papula, L.: Mathematische Formelsammlung für Ingenieure und  
Naturwissenschaftler. 7. Aufl. Braunschweig: Vieweg 2001. ISBN: 3528644427.

PATZAK 1982

Patzak, G.: Systemtechnik: Planung komplexer innovativer Systeme. Berlin:  
Springer 1982. ISBN: 9783642818936.

PECHMANN ET AL. 2012

Pechmann, A.; Hackmann, R.; Schöler, I.: Measuring and Visualizing Different  
Energy Sources: A Concept for an Energy Management System. In: CIRP  
(Hrsg.): 19th International Conference on Life Cycle Engineering. Berkeley,  
USA 2012.

PEHNT 2010

Pehnt, M.: Energieeffizienz: Ein Lehr- und Handbuch. Berlin: Springer 2010.  
ISBN: 9783642142505.

PETER 2009

Peter, K.: Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden in  
der Kleinserienproduktion. Aachen: Shaker 2009. ISBN: 9783832287139.

POGGENSEE 2011

Poggensee, K.: Investitionsrechnung: Grundlagen - Aufgaben - Lösungen.  
Wiesbaden: Gabler 2011. ISBN: 9783834930149.

POSCH 2011

Posch, W.: Ganzheitliches Energiemanagement für Industriebetriebe: Gabler  
2011. ISBN: 9783834925855.

POSSELT ET AL. 2014

Posselt, G.; Fischer, J.; Heinemann, T.; Thiede, S.; Alvandi, S.; Weinert, N.;  
Kara, S.; Herrmann, C.: Extending Energy Value Stream Models by the TBS  
Dimension – Applied on a Multi Product Process Chain in the Railway Industry.  
Procedia CIRP 15 (2014), S. 80-85.

PRITZKE 2012

Pritzke, M.: Outlook of the Electricity Procurement Options - Regarding to Key Energy Use and CO<sub>2</sub> Emission Scores in the Car Manufacturing Process. International Management of Resources and Environment Journal 6 (2012) 1, S. 1-13.

PROBST & GOMEZ 1991

Probst, G.; Gomez, P.: Vernetztes Denken. Ganzheitliches Führen in der Praxis. 2. Aufl. Wiesbaden: Gabler 1991. ISBN: 9783409233576.

PROGNOS 2007

Prognos AG: Potenziale für Energieeinsparung und Energieeffizienz im Lichte aktueller Preisentwicklungen. Basel: Prognos AG 2007.

RABE 2008A

Rabe, M. (Hrsg.): Advances in simulation for production and logistics applications. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. 2008. ISBN: 9783816777984.

RABE 2008B

Rabe, M.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin: Springer 2008. ISBN: 9783540352815.

RAGER 2008

Rager, M.: Energieorientierte Produktionsplanung: Analyse, Konzeption und Umsetzung. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2008. ISBN: 9783835009875.

REFA 1993

REFA: Methodenlehre der Betriebsorganisation - Lexikon der Betriebsorganisation. 1. Aufl. München: Hanser 1993. ISBN: 9783446175235.

REINEMA ET AL. 2011

Reinema, C.; Schulze, C. P.; Nyhuis, P.: Energieeffiziente Fabrik - Ein Vorgehen zur integralen Gestaltung. wt Werkstattstechnik online 101 (2011) 4, S. 249-252.

REINHARDT 2013

Reinhardt, S.: Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung: Utz 2013. ISBN: 9783831643172.

REINHART ET AL. 2003

Reinhart, G.; Zäh, M. F.; Habicht, C.; Neise, P.: Einführung schlanker Produktionssysteme. wt Werkstattstechnik online 93 (2003) 9, S. 571-574.

REINHART ET AL. 2010

Reinhart, G.; Karl, F.; Krebs, P.; Reinhardt, S.: Energiewertstrom. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 105 (2010) 10, S. 870-875.

REINHART ET AL. 2011A

Reinhart, G.; Karl, F.; Krebs, P.; Maier, T.; Niehues, K.; Niehues, M.; Reinhardt, S.: Energiewertstromdesign. wt Werkstattstechnik online 101 (2011) 4, S. 253-260.

---

REINHART ET AL. 2011B

Reinhart, G.; Geiger, F.; Karl, F.; Wiedemann, M.: Handlungsfelder zur Realisierung energieeffizienter Produktionsplanung und -steuerung. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 106 (2011) 9, S. 596-600.

REINHART ET AL. 2012

Reinhart, G.; Reinhardt, S.; Graßl, M.: Energieflexible Produktionssysteme. wt Werkstattstechnik online 102 (2012) 9, S. 622-628.

RIEDL 2006

Riedl, R.: Analytischer Hierarchieprozess vs. Nutzwertanalyse. In: Fink, K. (Hrsg.): Wirtschaftsinformatik als Schlüssel zum Unternehmenserfolg. Wiesbaden: Dt. Universitäts-Verlag 2006, S. 99-128. ISBN: 9783835002937.

RIMPAU ET AL. 2010

Rimpau, C.; Karl, F.; Niehues, K.; Wiedemann, M.: Ressourceneffizienz sichert Wettbewerbsvorteile. Automobiltechnische Zeitschrift ATZ-Produktion 3 (2010) 374, S. 56-60.

ROBINSON & BROOKS 2010

Robinson, S.; Brooks, R. J.: Independent Verification and Validation of an Industrial Simulation Model. Simulation Modelling Practice and Theory 86 (2010) 7, S. 405-416.

ROTHER & SHOOK 2000

Rother, M.; Shook, J.: Sehen lernen: Mit Wertstromdesign die Wertschöpfung erhöhen und Verschwendung beseitigen. Stuttgart: LOG\_X 2000. ISBN: 9783932298110.

SAATY 1987

Saaty, R. W.: The Analytic Hierarchy Process - What it is and how it is used. Mathematical Modelling 9 (1987) 3-5, S. 161-176.

SAATY 2008

Saaty, T. L.: Decision making with the Analytic Hierarchy Process. International Journal of Services Sciences 1 (2008) 1, S. 83-98.

SACHS & HEDDERICH 2009

Sachs, L.; Hedderich, J.: Angewandte Statistik. 13. Aufl. Dordrecht: Springer 2009. ISBN: 9783540889014.

SARGENT 1996

Sargent, R. G.: Verifying and validating Simulation Models. In: Charnes, J. M. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference. Coronado, USA: Piscataway 1996, S. 55-64.

### SARGENT 2007

Sargent, R. G.: Verification and Validation of Simulation Models. In: Henderson, S. G. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference. Washington D. C., USA: Piscataway 2007, S. 124-137.

### SCHENK 2010

Schenk, M.: Instandhaltung technischer Systeme. Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs. Berlin: Springer 2010. ISBN: 9783642039492.

### SCHENK ET AL. 2014

Schenk, M.; Wirth, S.; Müller, E.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb: Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik. Berlin: Springer 2014. ISBN: 9783642054594.

### SCHIEFERDECKER ET AL. 2006

Schieferdecker, B.; Fuenfgeld, C.; Bonneschky, A.: Energiemanagement-Tools: Anwendung im Industrieunternehmen. Berlin: Springer 2006. ISBN: 9783540254782.

### SCHILLIG ET AL. 2013

Schillig, R.; Stock, T.; Müller, E.: Energiewertstromanalyse. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 108 (2013) 1-2, S. 20-26.

### SCHLOSKE & THIEME 2009

Schloske, A.; Thieme, P.: Strategische Ausrichtung der Unternehmensorganisation: In: Bullinger, H.-J. et al. (Hrsg.): Handbuch Unternehmensorganisation. Berlin: Springer 2009, S. 150-153. ISBN: 9783540721369.

### SCHNELLBACH ET AL. 2013

Schnellbach, P.; Pröbstle, J.; Reinhart, G.: Energieverschwendung und schlanke Produktion: Studie zum Stellenwert von Energieverschwendung in Ganzheitlichen Produktionssystemen (GPS). wt Werkstattstechnik online 103 (2013) 5, S. 431-436.

### SCHÖNEBORN 2004

Schöneborn, F.: Strategisches Controlling mit System Dynamics. Heidelberg: Physica 2004. ISBN: 9783790801057.

### SCHUH & STICH 2012

Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung 1. Berlin: Springer 2012. ISBN: 9783642254222.

### SIHN & PFEFFER 2013

Sihn, W.; Pfeffer, M.: A method for a comprehensive value stream evaluation. CIRP Annals - Manufacturing Technology (2013) 62, S. 427-430.

### SPATH 2003

Spath, D. (Hrsg.): Ganzheitlich produzieren. Stuttgart: Log\_X 2003. ISBN: 9783932298226.



---

STERMAN 2000

Sterman, J. D.: Business dynamics. Systems thinking and modeling for a complex world. Boston: Irwin/McGraw-Hill 2000. ISBN: 9780072311358.

STEVEN 2002

Steven, M.: BWL für Ingenieure. München: Oldenbourg 2002. ISBN: 9783486257748.

STROHHECKER 1998

Strohhecker, J.: System- und objektorientierte Simulation betriebswirtschaftlicher Entscheidungen. Berlin: Duncker & Humblot 1998. ISBN: 9783428094752.

SUH ET AL. 1998

Suh, N. P.; Cochran, D. S.; Lima, P. C.: Manufacturing System Design. CIRP Annals - Manufacturing Technology Volume 47 (1998) Issue 2, S. 627-639.

TAKEDA 2009

Takeda, H.: Das synchrone Produktionssystem: Just-in-Time für das ganze Unternehmen. 6. Aufl. München: mi-Verlag 2009. ISBN: 9783868800203.

THIEDE 2011

Thiede, S.: Energy Efficiency in Manufacturing Systems. Berlin: Springer 2011. ISBN: 9783642259135.

TIPLER & MOSCA 2007

Tipler, P. A.; Mosca, G.: Physik für Wissenschaftler und Ingenieure. 2. Aufl. München: Spektrum Akademischer Verlag 2007. ISBN: 9783827411648.

TÖPFER 2009

Töpfer, A.: Lean Six Sigma: Erfolgreiche Kombination von Lean Management, Six Sigma und Design for Six Sigma. Berlin: Springer 2009. ISBN: 9783540850595.

TOLUJEW & REGGELIN 2008

Tolujew, J.; Reggelin, T.: Mesoskopische Simulation: Zwischen der kontinuierlichen und der ereignisdiskreten Simulation. In: Rabe, M. (Hrsg.): Advances in simulation for production and logistics applications. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2008, S. 585-594. ISBN: 9783816777984.

ULLMANN 2009

Ullmann, G.: Ganzheitliche Produktionssysteme: IPH-Methodensammlung. <[http://www.iph-hannover.de/sites/default/files/IPH-Methodensammlung\\_web.pdf](http://www.iph-hannover.de/sites/default/files/IPH-Methodensammlung_web.pdf)> - 03.02.2015.

ULRICH & PROBST 1991

Ulrich, H.; Probst, G. J.: Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln: Ein Brevier für Führungskräfte. 3. Aufl. Bern: Haupt 1991. ISBN: 9783258045009.

### VDI 3922

VDI 3922: Energieberatung für Industrie und Gewerbe. Berlin: Beuth 1998. (ICS 27.010).

### VDI 3649

VDI 3649: Anwendung der Verfügbarkeitsrechnung für Förder- und Lagersysteme. Berlin: Beuth 2003. (ICS 083.132).

### VDI 4661

VDI 4661: Energiekenngrößen: Definitionen - Begriffe - Methodik. Berlin: Beuth 2003. (ICS 27.010; 01.040.27).

### VDI 2870

VDI 2870: Ganzheitliche Produktionssysteme - Grundlagen, Einführung und Bewertung. Berlin: Beuth 2012. (ICS 03.100.50).

### VENTANA SYSTEMS 2012

Ventana Systems: Vensim Reference Manual.  
<<http://www.vensim.com/documentation/index.html>> - 03.11.2014.

### WADHWA 2012

Wadhwa, R. S.: Flexibility in Manufacturing Automation: A living Lab Case Study of Norwegian Metalcasting SMEs. *Journal of Manufacturing Systems* 31 (2012) 4, S. 444-454.

### WEIGERT & ROSE 2011

Weigert, G.; Rose, O.: Stell- und Zielgrößen. In: März, L. (Hrsg.): *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik*. Heidelberg: Springer 2011, S. 29-40. ISBN: 978364214533.

### WEINERT 2010

Weinert, N.: Vorgehensweise für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2010. ISBN: 9873839601730.

### WEINERT ET AL. 2011

Weinert, N.; Chiotellis, S.; Seliger, G.: Methodology for planning and operating energy-efficient production systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60 (2011) 1, S. 41-44.

### WENGER 2010

Wenger, W.: *Multikriterielle Tourenplanung*. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2010. ISBN: 9783834922571.

### WESTKÄMPER 2009

Westkämper, E.: Rahmen, Herausforderungen und Visionen für die Unternehmensorganisation. In: Bullinger, H.-J. et al. (Hrsg.): *Handbuch Unternehmensorganisation*. Berlin: Springer 2009, S. 25-37. ISBN: 9783540721369.

### WIENDAHL 1997

Wiendahl, H.-P.: *Betriebsorganisation für Ingenieure*. 4. Aufl. München: Hanser 1997. ISBN: 9783446187764.

---

WIENDAHL & HEGENSCHIEDT 2012

Wiendahl, H.-P.; Hegenscheidt, M.: Verfügbarkeit von Montagesystemen. In: Lotter, B. et al. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin: Springer 2012, S. 331-364. ISBN: 9783642290619.

WILLS 2009

Wills, B.: Green intentions. Creating a green value stream to compete and win. Boca Raton: CRC Press 2009. ISBN: 9781420089615.

WINKLER 2007

Winkler, H.: Modellierung vernetzter Wirkbeziehungen im Produktionsanlauf. Garbsen: Produktionstechnisches Zentrum GmbH 2007. ISBN: 9783939026518.

WÖHE & DÖRING 2013

Wöhe, G.; Döring, U.: Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 25. Aufl. München: Vahlen 2013. ISBN: 9783800646876.

WOMACK & JONES 1997

Womack, J. P.; Jones, D. T.: Auf dem Weg zum perfekten Unternehmen. Frankfurt: Campus Verlag 1997. ISBN: 9783593356747.

WOMACK ET AL. 1991

Womack, J. P.; Jones, D. T.; Roos, D.: Die zweite Revolution in der Autoindustrie. 6. Aufl. Frankfurt: Campus 1991. ISBN: 9783593345482.

ZÄH & AULL 2006

Zäh, M. F.; Aull, F.: Lean Production-Methoden und Interdependenzen. wt Werkstattstechnik online 96 (2006) 9, S. 683-687.

ZANGEMEISTER 1976

Zangemeister, C.: Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. 4. Aufl. Berlin: Wittemann 1976.

ZANGEMEISTER 1993

Zangemeister, C.: Erweiterte Wirtschaftlichkeits-Analyse (EWA): Grundlagen und Leitfaden für ein "3-Stufen-Verfahren" zur Arbeitssystembewertung. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW 1993. ISBN: 3894292814.

ZARGHAMI & SZIDAROVSKY 2011

Zarghami, M.; Szidarovszky, F.: Multicriteria analysis. Applications to water and environment management. Berlin: Springer 2011. ISBN: 9783642179372.

ZOPOUNIDIS & PARDALOS 2010

Zopounidis, C.; Pardalos, P. M.: Handbook of multicriteria analysis. Berlin: Springer 2010. ISBN: 9783540928270.



## 8 Übersicht betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) bzw. in der Projektgruppe Ressourceneffiziente mechatronische Verarbeitungsmaschinen (RMV) des Fraunhofer-Instituts für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) in den Jahren 2011 bis 2014 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten (Tabelle 29). In diesen Studienarbeiten wurden verschiedene Fragestellungen zu den Themen Ganzheitliche Produktionssysteme und Energieeffizienz untersucht, deren Ergebnisse in Teilen in das vorliegende Dokument eingeflossen sind. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

*Tabelle 29: Durch den Autor betreute Studienarbeiten*

Studierende(r)	Studienarbeit
Bauer, T.	Wirtschaftlichkeitsbewertung von Energieproduktivitätsmaßnahmen unter Berücksichtigung von Zielgrößen Ganzheitlicher Produktionssysteme, abgegeben im April 2014
Delle-Case, I.	Übertragung der Verschwendungsarten schlanker Produktionssysteme auf die Energieproduktivität, abgegeben im April 2013
Fritsch, K.	Methodische Verknüpfung von Total Productive Maintenance (TPM) mit Aspekten der Energieproduktivität, abgegeben im Dezember 2012
Köstler, D.	Durchführung einer Best-Practice Analyse von energieeffizienten Technologien in der Automobilproduktion, abgegeben im Oktober 2011
Kost, T.	Konzeptentwurf und Implementierung einer Just-In-Time (JIT) Energiebedarfssteuerung in der Automobilproduktion, abgegeben im Mai 2012
Maier, F. G.	Untersuchung der Wirkbeziehungen zwischen Energieproduktivität und den Zielgrößen Ganzheitlicher Produktionssysteme, abgegeben im Dezember 2013
Pröbstle, J.	Studie über die Vermeidung von Energieverschwendung in Ganzheitlichen Produktionssystemen der deutschen Fahrzeugindustrie, abgegeben im Dezember 2012
Rodriguez, J.	Energy related Value Stream Method in mechanical manufacturing, abgegeben im Mai 2014
Schneider, O.	Entwicklung eines mobilen Messwagens zur Bestimmung von Energiebedarfsprofilen in der Automobilproduktion, abgegeben im Juli 2012
Tillmann, T.	Untersuchung zu den Auswirkungen von Heijunka auf die Energieeffizienz am Beispiel einer Zylinderkopffertigung, abgegeben im Februar 2013
Wersching, T.	Standardvorgehen zur Validierung einer Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendung sowie deren anschließende praktische Anwendung, abgegeben im Mai 2014



## 9 Anhang

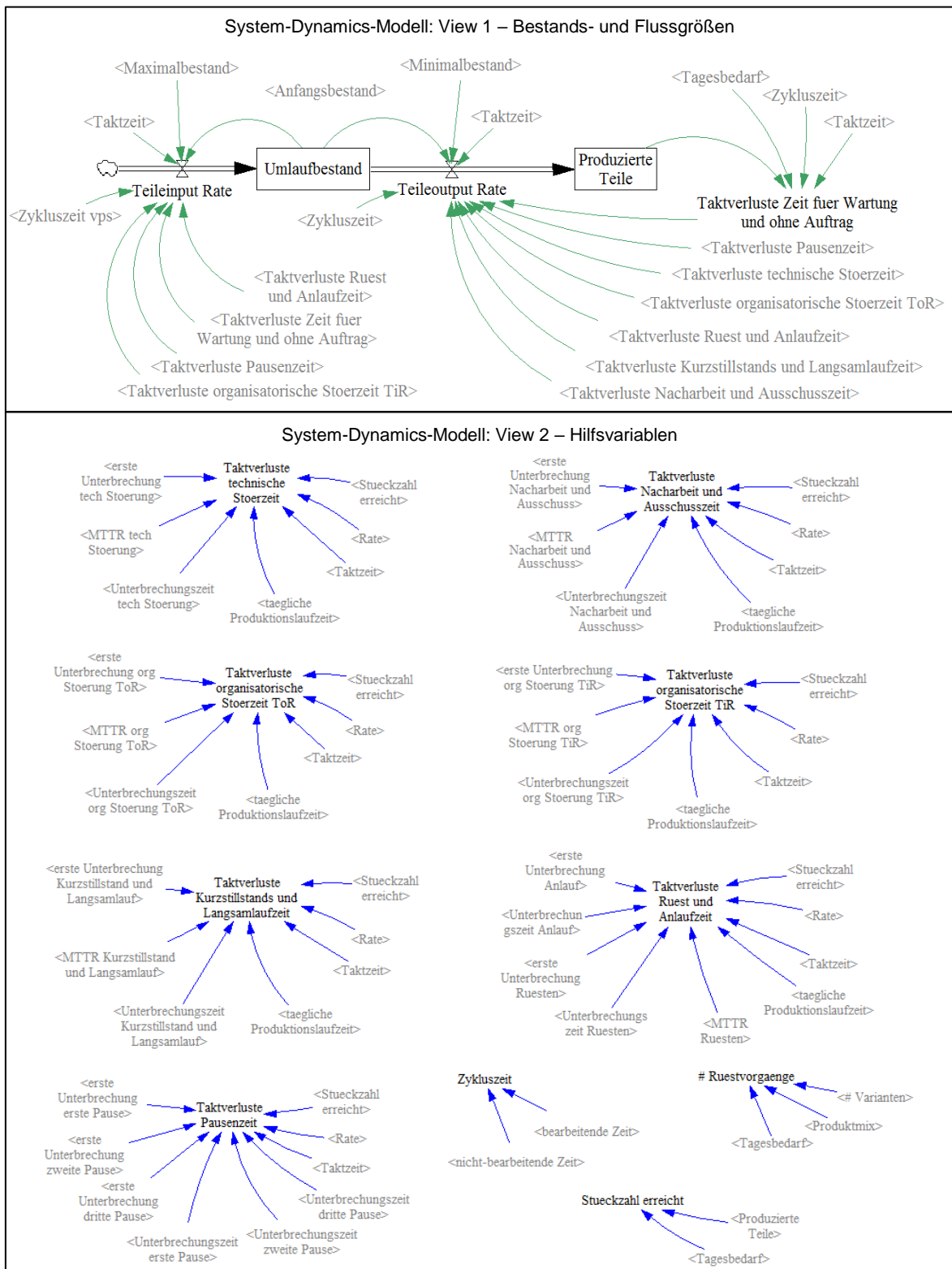
### A1 Kenngrößen des GPS-Wirkgefüges

Bezeichnung	Abkürzung	Beschreibung	Erfassung	Einheit	Typ
# Fertigungsmittel	#FM	Anzahl identischer Fertigungsmittel, die sich in einem Prozessschritt befinden und für die Bearbeitung von Produkten zur Verfügung stehen	Vorgabe	-	Stellgröße
# Varianten	#Var	Anzahl an unterschiedlichen Produkten, die in einem Prozessschritt bearbeitet werden	Vorgabe	-	Exogene Größe
Anfangsbestand	WIP(T <sub>0</sub> )	Umlaufbestand im Prozessschritt zum Beginn der Fertigung; sollte im Normalfall dem durchschnittlichen Umlaufbestand entsprechen	Messung	Stk	Exogene Größe
Anlagenverfügbarkeit	AV	Maß für die Verluste, die durch Anlagenausfälle und Rüstverluste entstehen; Anlagenverfügbarkeit gibt tatsächliche Maschinenlaufzeit an	= Betriebszeit / geplante Produktionszeit	%	Hilfsgröße
Anlaufzeit	ALZ	Zeit aller Fertigungsmittel, in der diese zu Beginn des Fabriktages hochgefahren werden	Vorgabe	ZE	Stellgröße
Ausschuss- und Nacharbeitszeit	A&N	Zeit für bereits produzierte Produkte, die nicht den Qualitätsanforderungen entsprechen	Messung	ZE	Endogene Größe
bearbeitende Zeit pro Stück	bZ <sub>Stk</sub>	Zeit pro Stück, in der ein Teil tatsächlich bearbeitet wird; kann auch als wert-schöpfende Zeit bezeichnet werden	Vorgabe	ZE/Stk	Stellgröße
Betriebszeit	BZ	Zeit, die abzüglich von Rüstzeiten sowie ungeplanten Betriebsstörungen für die Produktion zur Verfügung steht	= geplante Produktionszeit - Rüstzeit - ungeplante Betriebsstörungen - Anlaufzeit	ZE	Hilfsgröße
Durchlaufzeit	DLZ	Zeit, die das Produkt benötigt, um einen Prozessschritt zu durchlaufen	= Umlaufbestand * Kundentakt	ZE	Zielgröße
Every-Part-Every-Interval	EPEI	Zeit, die benötigt wird, um die Rüstfolge über alle Varianten unter Berücksichtigung der Ressourcenverfügbarkeit einmal komplett zu durchlaufen	= (Produktmix * Zykluszeit + # Varianten * Rüstdauer) / (# Fertigungsmittel * Technische Verfügbarkeit)	ZE	Zielgröße
geplante Produktionszeit	gPZ	geplanter Zeitraum, der für die Produktion von Produkten zur Verfügung steht abzüglich Wartungszeiten und Zeiten ohne Auftrag	= tägliche Arbeitszeit - Zeit ohne Auftrag - Wartungszeit	ZE	Hilfsgröße
Kundentakt	KT	vom Markt vorgegebener Rhythmus, in dem die Produktion idealer Weise arbeiten sollte, um kundenorientiert zu agieren	= tägliche Arbeitszeit / Tagesbedarf	ZE/Stk	Hilfsgröße
Kurzstillstands- & Langsamlaufzeit	K&L	Kurzstillstände oder Langsamlauf einer Anlage; diese geringfügigen Störungen werden meist vom Maschinenbedienpersonal behoben	Messung	ZE	Endogene Größe
Leistungsgrad	LG	Anteil der durch Leistungsverluste verringerten Betriebszeit zur nutzbaren Betriebszeit	= nutzbare Betriebszeit / Betriebszeit	%	Hilfsgröße
nicht-bearbeitende Zeit pro Stück	nbZ <sub>Stk</sub>	Zeit pro Stück, in der ein Teil ablaufbedingt nicht bearbeitet wird; wird auch als nicht-wert-schöpfende Zeit oder Nebenzeit bezeichnet	Vorgabe	ZE/Stk	Stellgröße
nutzbare Betriebszeit	nBZ	Anteil der Betriebszeit in dem tatsächlich produziert wird	= Betriebszeit - (Kurzstillstands- & Langsamlaufzeit)	ZE	Hilfsgröße
organisatorische Störzeit	oS	Zeit für Prozessschrittstillstände, die durch organisatorische Störungen (z. B. fehlendes Material oder Bedienpersonal) ausgelöst werden	Messung	ZE	Endogene Größe

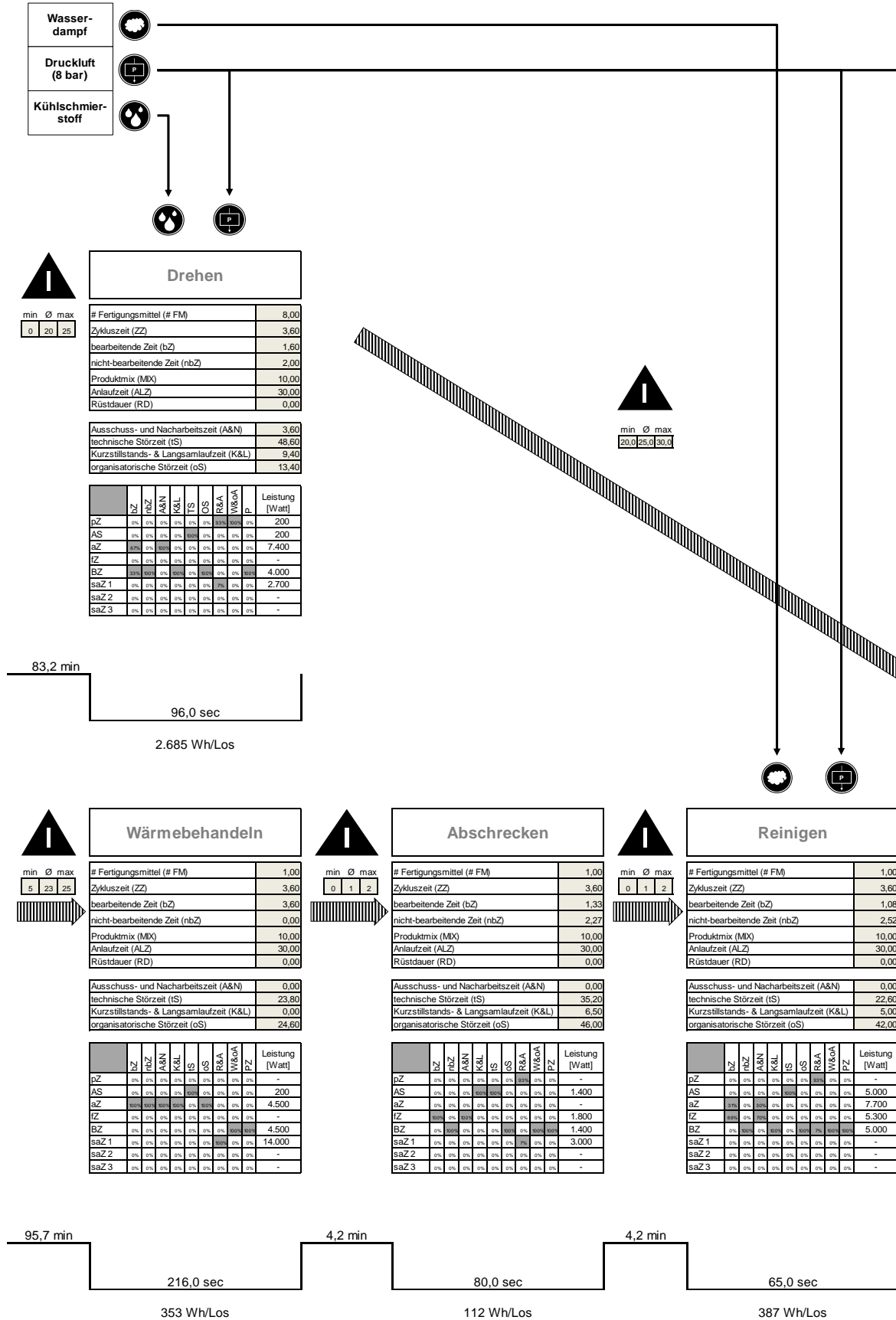
Bezeichnung	Abkürzung	Beschreibung	Erfassung	Einheit	Typ
<b>Overall Equipment Effectiveness</b>	<b>OEE</b>	Kennzahl der Gesamtanlageneffektivität, welche den Wirkungsgrad der im Prozess vorhandenen Anlagen während der Betriebszeit ausdrückt; OEE-Wert ist ein Maß für den Wirkungsgrad und die Prozesssicherheit von Maschinen, Anlagen	= Anlagenverfügbarkeit * Leistungsgrad * Qualitätsgrad	%	Zielgröße
<b>Pausenzeit</b>	<b>PZ</b>	angedachte Zeit, in der nicht gearbeitet wird	Vorgabe	ZE	Exogene Größe
<b>Produktivzeit (IST)</b>	<b>PRZ<sub>IST</sub></b>	nutzbare Betriebszeit abzüglich Nacharbeits- und Ausschusszeiten	= nutzbare Betriebszeit - Nacharbeitszeit - Ausschusszeit	ZE	Hilfsgröße
<b>Produktivzeit (MIN)</b>	<b>PRZ<sub>MIN</sub></b>	Produktivzeit die minimal notwendig ist, um den Tagesbedarf zu produzieren	= Zykluszeit * Tagesbedarf	ZE	Hilfsgröße
<b>Produktmix</b>	<b>MIX</b>	Anzahl an Teilen, die notwendig sind, um die Lose aller Varianten nacheinander einmal zu fertigen	Vorgabe	Stk	Stellgröße
<b>produzierte Teile</b>	<b>pT</b>	Tagesausstoß des Prozessschrittes an bearbeiteten Teilen	= Produktivzeit (IST) / Zykluszeit	Stück	Hilfsgröße
<b>Qualitätsgrad</b>	<b>QG</b>	Maß für die Verluste, die durch Abweichungen der hergestellten Teile von den Spezifikationen entstehen	= Produktivzeit / nutzbare Betriebszeit	%	Zielgröße
<b>Rüstdauer</b>	<b>RD</b>	Vorgabezeit für das Rüsten einer Maschine innerhalb eines Auftrages	Vorgabe	ZE	Stellgröße
<b>Rüstzeit</b>	<b>RZ</b>	Produkt aus der Anzahl an Rüstvorgängen sowie der Rüstdauer eines Rüstvorgangs	= Rüstdauer * (Tagesbedarf * # Varianten) / Produktmix	ZE	Hilfsgröße
<b>Tagesbedarf</b>	<b>TB</b>	Menge an Produkten, die in einem definierten Zeitraum zu produzieren sind	Vorgabe	Stk	Exogene Größe
<b>tägliche Arbeitszeit</b>	<b>AZ</b>	tägliche Produktionslaufzeit ohne Pausen (wenn in den Pausen produziert wird, ist tägliche Arbeitszeit gleich tägliche Produktionszeit)	= tägliche Produktionslaufzeit - Pausenzeit	ZE	Hilfsgröße
<b>tägliche Produktionslaufzeit</b>	<b>tPLZ</b>	Zeit inklusive Pausen, die pro Arbeitstag zur Verfügung steht	Vorgabe	ZE	Exogene Größe
<b>technische Störzeit</b>	<b>tZ</b>	Zeit für Prozessschrittstillstände, die durch technische Störungen ausgelöst werden	Messung	ZE	Endogene Größe
<b>Technische Verfügbarkeit</b>	<b>TV</b>	Zeitanteil, in dem ein Fertigungsmittel für die Bearbeitung zur Verfügung steht	= (tägliche Arbeitszeit - ungeplante Betriebsstörungen - (Kurzstillstands- & Langsamlaufzeit) - Wartungszeit) / tägliche Arbeitszeit	%	Hilfsgröße
<b>Umlaufbestand</b>	<b>WIP</b>	gesamte Teilmenge in einem Prozessschritt (wartend, gelagert und in Bearbeitung)	= Anfangsbestand + Tagesbedarf - produzierte Teile	Stk	Hilfsgröße
<b>ungeplante Betriebsstörzeiten</b>	<b>uBZ</b>	Stillstandzeiten des Prozessschrittes durch ungeplante Störungen	= technische Störzeit + organisatorische Störzeit	ZE	Hilfsgröße
<b>Wartungszeit</b>	<b>WZ</b>	Zeit, in der das Fertigungsmittel im Prozessschritt gewartet wird	Vorgabe	ZE	Stellgröße
<b>Zeit ohne Auftrag</b>	<b>ZoA</b>	Zeit, in der sich das Fertigungsmittel im Zustand Offline, Stand-by oder Bereitschaft befindet nachdem der Tagesbedarf erreicht wurde	Messung	ZE	Endogene Größe
<b>Zykluszeit</b>	<b>ZZ</b>	Zeit, nach der im Prozessschritt ein bearbeitetes Teil fertig wird	= (bearbeitende Zeit pro Stück + nicht-bearbeitende Zeit pro Stück) / # Fertigungsmittel	ZE	Hilfsgröße

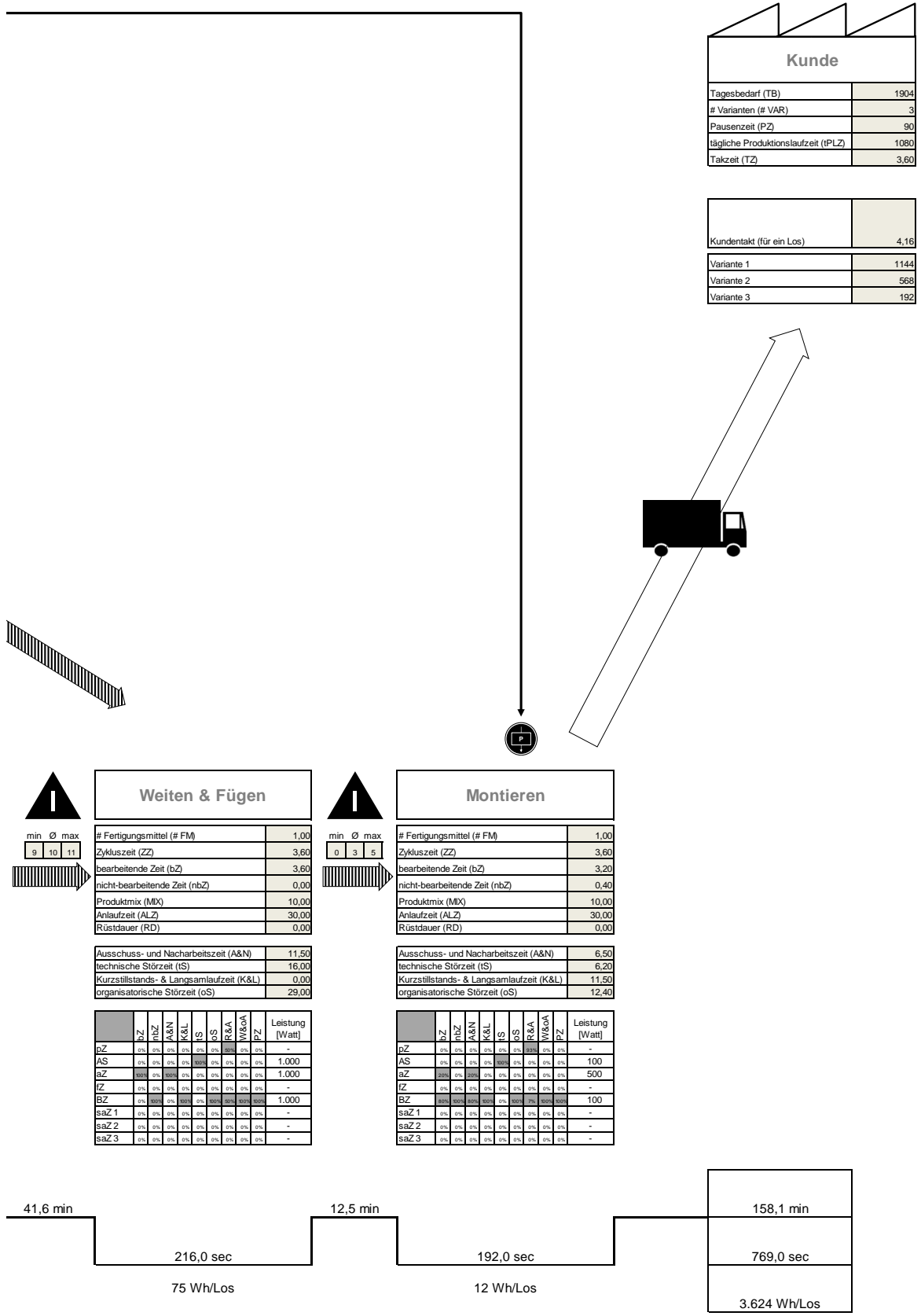


## A2 Aufbau des System-Dynamics-Modells in Vensim® PLE Plus



# A3 Fallstudie 1: Energieorientierte Wertstromanalyse





Kunde	
Tagesbedarf (TB)	1904
# Varianten (# VAR)	3
Pausenzeit (PZ)	90
tägliche Produktionslaufzeit (TPLZ)	1080
Taktzeit (TZ)	3.60

Kundentakt (für ein Los)	4.16
Variante 1	1144
Variante 2	568
Variante 3	192

Weiten & Fügen	
min Ø max	
9   10   11	
# Fertigungsmittel (# FM)	1,00
Zykluszeit (ZZ)	3,60
bearbeitende Zeit (bZ)	3,60
nicht-bearbeitende Zeit (nbZ)	0,00
Produktmix (MX)	10,00
Anlaufzeit (ALZ)	30,00
Rüstdauer (RD)	0,00

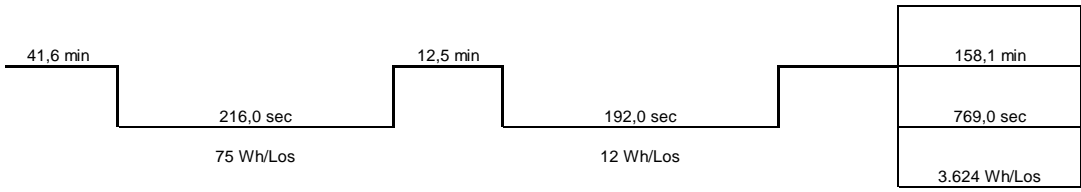
Montieren	
min Ø max	
0   3   5	
# Fertigungsmittel (# FM)	1,00
Zykluszeit (ZZ)	3,60
bearbeitende Zeit (bZ)	3,20
nicht-bearbeitende Zeit (nbZ)	0,40
Produktmix (MX)	10,00
Anlaufzeit (ALZ)	30,00
Rüstdauer (RD)	0,00

Ausschuss- und Nacharbeitszeit (A&N)	11,50
technische Störzeit (tS)	16,00
Kurzstillstands- & Langsamlaufzeit (K&L)	0,00
organisatorische Störzeit (oS)	29,00

Ausschuss- und Nacharbeitszeit (A&N)	6,50
technische Störzeit (tS)	6,20
Kurzstillstands- & Langsamlaufzeit (K&L)	11,50
organisatorische Störzeit (oS)	12,40

	pZ	nbZ	A&N	K&L	tS	oS	R&A	W&oA	PZ	Leistung [Watt]
pZ	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-
AS	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1.000
aZ	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1.000
fZ	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-
BZ	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1.000
saZ 1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-
saZ 2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-
saZ 3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-

	pZ	nbZ	A&N	K&L	tS	oS	R&A	W&oA	PZ	Leistung [Watt]
pZ	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-
AS	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100
aZ	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	500
fZ	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-
BZ	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100
saZ 1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-
saZ 2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-
saZ 3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-



# A4 Fallstudie 1: Energieeffizienz-Maßnahmensteckbriefe

### Energieeffizienz-Maßnahmensteckbrief

**Titel:** Isolierung des Durchlaufwärmeofens **Bereich:** LEP

**#** Energieeffizienz-Handlungsansatz: Rückgewinnung / Weiterverwendung **Prozessschritt:** „Wärmebehandlung“

**Maßnahmenbeschreibung:**

- Isolierung des Ein- und Ausgangs des Durchlaufwärmeofens zur Reduzierung von Abwärme
- Reduzierung der Prozesstemperatur und Reduzierung des Leistungsbedarfs während aZ und BZ um 500 W
- Reduzierung der Anlaufzeit von 30 min auf 15 min

**Positionierung im EE-Maßnahmenportfolio:** (Strukturebene, energetischer Ansatz)

**Kenngrößen-Veränderungen durch Umsetzung der Maßnahme:**

Stellgröße	vorher	nachher	endogene Größe	Vorher	nachher
bZ	3,60 min	3,60 min	tS	23,80 min	23,80 min
nbZ	0,00 min	0,00 min	oS <sub>TOR</sub>	24,60 min	24,60 min
RD	0,00 min	0,00 min	K&L	9,40 min	9,40 min
# FM	1	1	A&N	0,00 min	0,00 min
MIX	10 Stk	10 Stk	oS <sub>TIR</sub>	90,00 min	90,00 min
ALZ	30 min	15 min			

**Veränderungen in der Energiedatenmatrix durch Umsetzung der Maßnahme:**

	bZ	nbZ	A&N	K&L	tS	oS	R&A	W&oA	PZ	Leistung vorher	Leistung nachher
1 pZ										-	-
2 AS				100%						200	200
3.1 aZ	100%	100%	100%	100%	100%					4.500	4.000
3.2 fZ										-	-
3.3 BZ									100%	4.500	4.000
3.4 saZ 1							100%			14.000	14.000
3.5 saZ 2										-	-
3.6 saZ 3										-	-

### Energieeffizienz-Maßnahmensteckbrief

**Titel:** Eliminierung des 1. Roboters und des 2. Wärmeofens **Bereich:** LEP

**#** Energieeffizienz-Handlungsansatz: Prozessschrittintegration / -substitution **Prozessschritt:** „Weiten“

**Maßnahmenbeschreibung:**

- Eliminierung des Prozessschrittes durch Integration des Weitens in den Prozessschritt „Reinigen“

**Positionierung im EE-Maßnahmenportfolio:** (Strukturebene, energetischer Ansatz)

**Kenngrößen-Veränderungen durch Umsetzung der Maßnahme:**

Stellgröße	vorher	nachher	endogene Größe	Vorher	nachher
bZ	3,60 min	0,00 min	tS	16,00 min	0,00 min
nbZ	0,00 min	0,00 min	oS <sub>TOR</sub>	5,80 min	0,00 min
RD	0,00 min	0,00 min	K&L	0,00 min	0,00 min
# FM	1	0	A&N	11,50 min	0,00 min
MIX	10 Stk	0 Stk	oS <sub>TIR</sub>	34,80 min	0,00 min
ALZ	30 min	0 min			

**Veränderungen in der Energiedatenmatrix durch Umsetzung der Maßnahme:**

	bZ	nbZ	A&N	K&L	tS	oS	R&A	W&oA	PZ	Leistung vorher	Leistung nachher
1 pZ										-	-
2 AS					100%		50%			1.000	-
3.1 aZ	100%	100%								1.000	-
3.2 fZ										-	-
3.3 BZ		100%	100%	100%	50%	100%	100%			1.000	-
3.4 saZ 1										-	-
3.5 saZ 2										-	-
3.6 saZ 3										-	-

### Energieeffizienz-Maßnahmensteckbrief

**Titel:** Eliminierung des 1. Roboters und des 2. Wärmeofens **Bereich:** LEP

**#** Energieeffizienz-Handlungsansatz: Prozessschrittintegration / -substitution **Prozessschritt:** „Abschrecken“

**Maßnahmenbeschreibung:**

- Eliminierung des Prozessschrittes durch Integration des Abschreckens in den Prozessschritt „Reinigen“

**Positionierung im EE-Maßnahmenportfolio:** (Strukturebene, energetischer Ansatz)

**Kenngrößen-Veränderungen durch Umsetzung der Maßnahme:**

Stellgröße	vorher	nachher	endogene Größe	Vorher	nachher
bZ	1,33 min	0,00 min	tS	35,20 min	0,00 min
nbZ	2,27 min	0,00 min	oS <sub>TOR</sub>	9,00 min	0,00 min
RD	0,00 min	0,00 min	K&L	6,50 min	0,00 min
# FM	1	0	A&N	0,00 min	0,00 min
MIX	10 Stk	0 Stk	oS <sub>TIR</sub>	48,40 min	0,00 min
ALZ	30 min	0 min			

**Veränderungen in der Energiedatenmatrix durch Umsetzung der Maßnahme:**

	bZ	nbZ	A&N	K&L	tS	oS	R&A	W&oA	PZ	Leistung vorher	Leistung nachher
1 pZ										-	-
2 AS				100%	100%			93%		1.400	-
3.1 aZ										-	-
3.2 fZ	100%	100%								1.800	-
3.3 BZ		100%			100%			100%	100%	1.400	-
3.4 saZ 1							7%			3.000	-
3.5 saZ 2										-	-
3.6 saZ 3										-	-

### Energieeffizienz-Maßnahmensteckbrief

**Titel:** Eliminierung des 1. Roboters und des 2. Wärmeofens **Bereich:** LEP

**#** Energieeffizienz-Handlungsansatz: Prozessschrittintegration / -substitution **Prozessschritt:** „Reinigen“

**Maßnahmenbeschreibung:**

- Integration des Weitens und Abschreckens in den Prozessschritt „Reinigen“
- Förderung des Werkstückträgers durch den Roboter des Prozessschrittes „Reinigen“
- Steigerung der technischen Störzeit um 24 % durch veränderte Werkstückträgeraufnahme zu erwarten

**Positionierung im EE-Maßnahmenportfolio:** (Strukturebene, energetischer Ansatz)

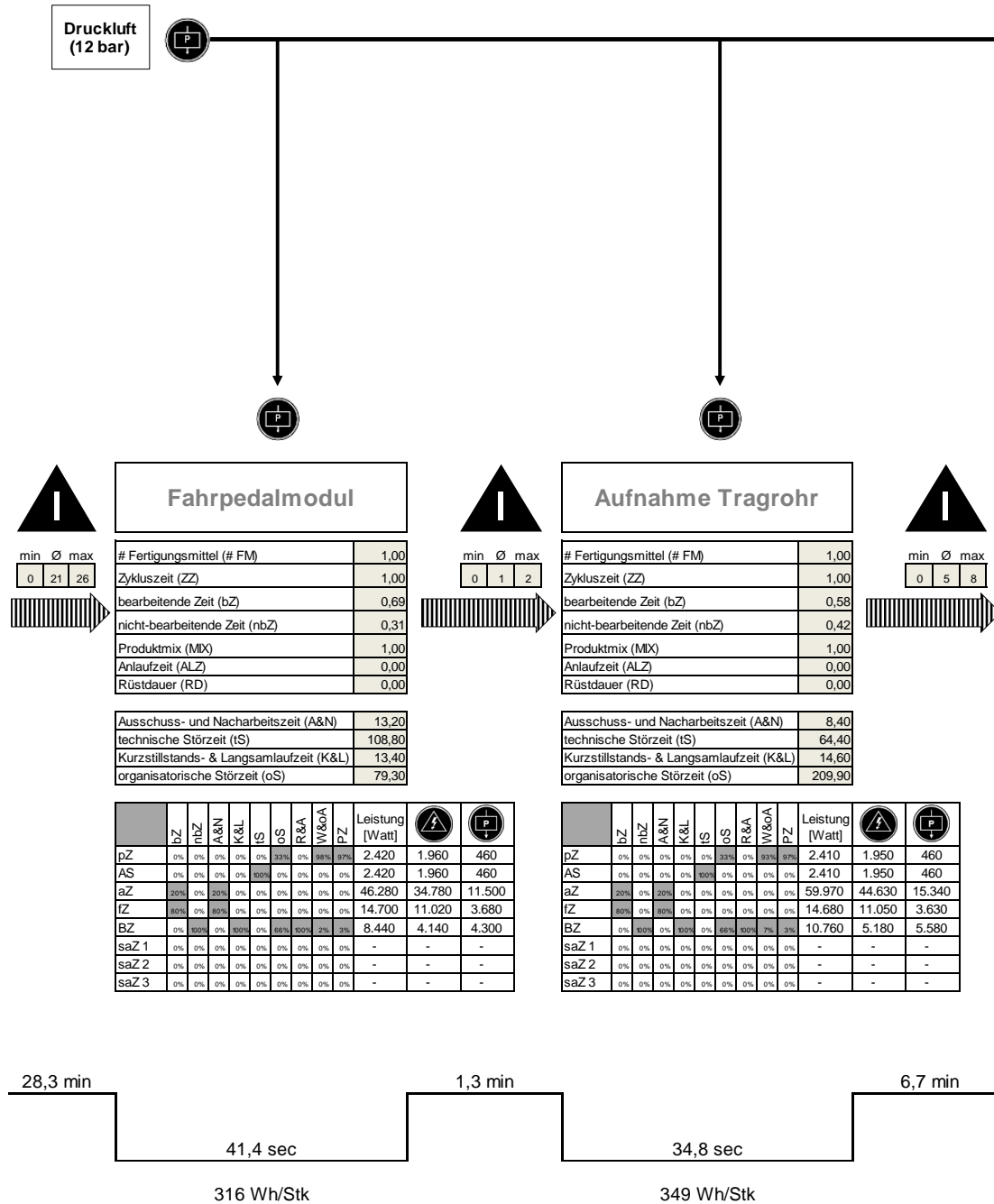
**Kenngrößen-Veränderungen durch Umsetzung der Maßnahme:**

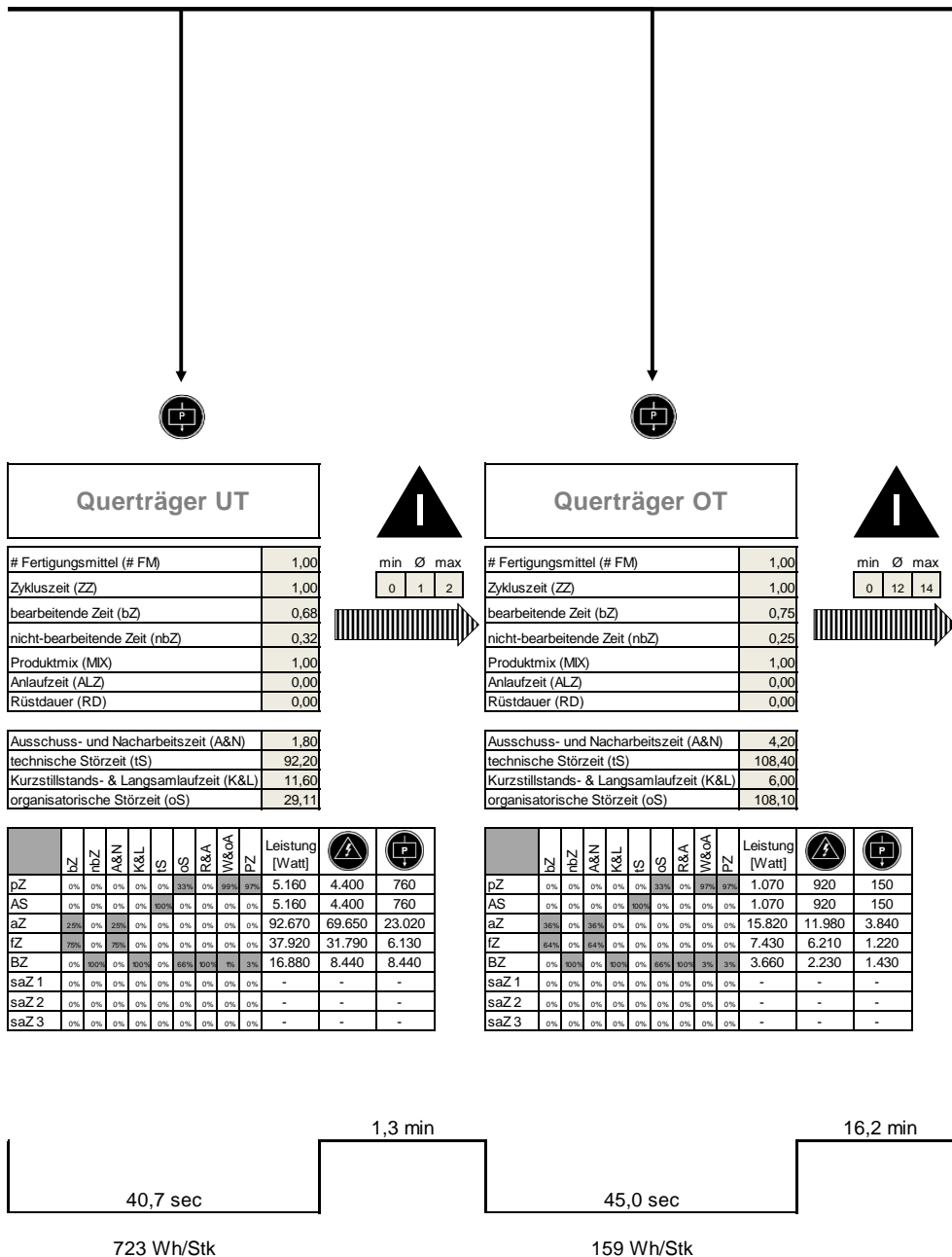
Stellgröße	vorher	nachher	endogene Größe	Vorher	nachher
bZ	1,08 min	2,05 min	tS	22,60 min	28,02 min
nbZ	2,52 min	1,55 min	oS <sub>TOR</sub>	7,20 min	7,20 min
RD	0,00 min	0,00 min	K&L	5,00 min	5,00 min
# FM	1	1	A&N	0,00 min	0,00 min
MIX	10 Stk	10 Stk	oS <sub>TIR</sub>	50,70 min	48,40 min
ALZ	30 min	30 min			

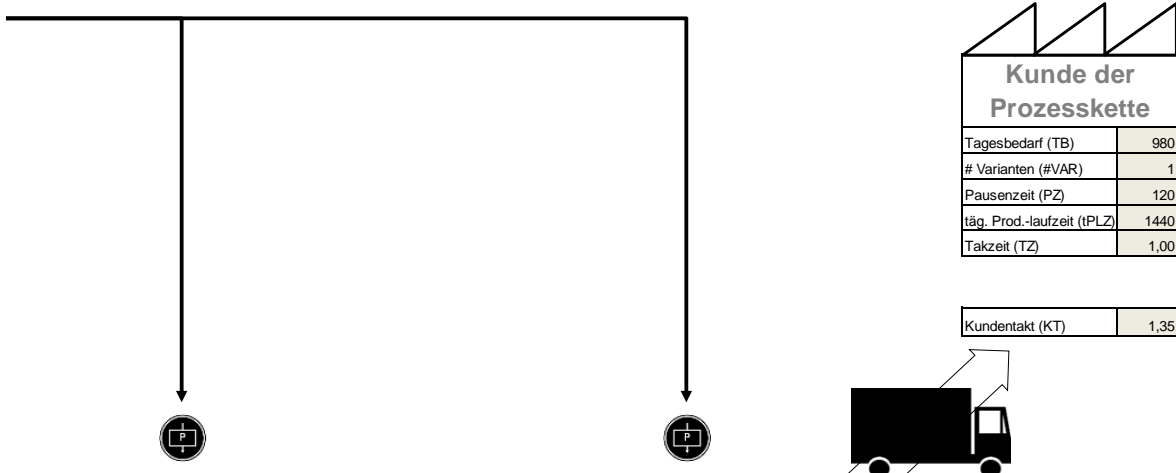
**Veränderungen in der Energiedatenmatrix durch Umsetzung der Maßnahme:**

	bZ	nbZ	A&N	K&L	tS	oS	R&A	W&oA	PZ	Leistung vorher	Leistung nachher
1 pZ										-	-
2 AS					100%					5.000	5.000
3.1 aZ	16%	16%								7.700	7.700
3.2 fZ	84%	84%								5.300	5.300
3.3 BZ		100%	100%	100%	7%	100%	100%			5.000	5.000
3.4 saZ 1										-	-
3.5 saZ 2										-	-
3.6 saZ 3										-	-

# A5 Fallstudie 2: Energieorientierte Wertstromanalyse



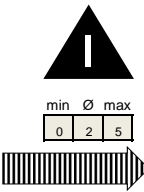




Kunde der Prozesskette	
Tagesbedarf (TB)	980
# Varianten (#VAR)	1
Pausenzeit (PZ)	120
täg. Prod.-laufzeit (tPLZ)	1440
Takzeit (TZ)	1,00

Kundentakt (KT)	1,35
-----------------	------

Laserschweißen	
# Fertigungsmittel (# FM)	1,00
Zykluszeit (ZZ)	1,00
bearbeitende Zeit (bZ)	0,67
nicht-bearbeitende Zeit (nbZ)	0,33
Produktmix (MX)	1,00
Anlaufzeit (ALZ)	0,00
Rüstdauer (RD)	0,00



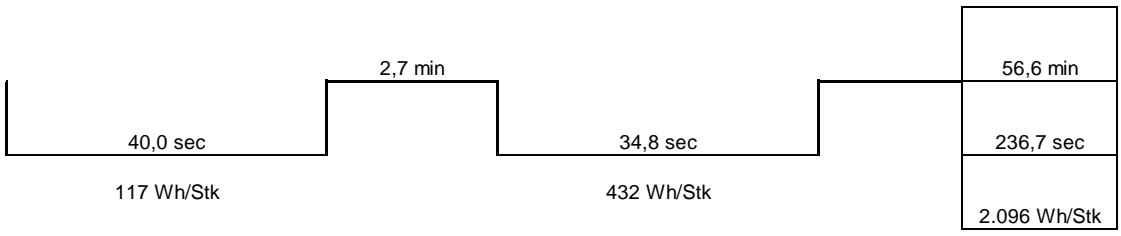
Scharnier hinten	
# Fertigungsmittel (# FM)	1,00
Zykluszeit (ZZ)	1,00
bearbeitende Zeit (bZ)	0,58
nicht-bearbeitende Zeit (nbZ)	0,42
Produktmix (MX)	1,00
Anlaufzeit (ALZ)	0,00
Rüstdauer (RD)	0,00

Ausschuss- und Nacharbeitszeit (A&N)	12,40
technische Störzeit (tS)	88,60
Kurzstillstands- & Langsamlaufzeit (K&L)	0,00
organisatorische Störzeit (oS)	85,20

Ausschuss- und Nacharbeitszeit (A&N)	8,80
technische Störzeit (tS)	81,40
Kurzstillstands- & Langsamlaufzeit (K&L)	24,40
organisatorische Störzeit (oS)	74,90

	bZ	nbZ	A&N	K&L	tS	oS	R&A	W&oA	PZ	Leistung [Watt]		
pZ	0%	0%	0%	0%	0%	33%	0%	98%	9%	1.360	1.210	150
AS	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1.360	1.210	150
aZ	40%	0%	40%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	6.750	6.750	0
IZ	80%	0%	80%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	8.810	7.580	1.230
BZ	0%	100%	0%	100%	0%	66%	100%	2%	3%	2.710	2.560	150
saZ 1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-	-	-
saZ 2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-	-	-
saZ 3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-	-	-

	bZ	nbZ	A&N	K&L	tS	oS	R&A	W&oA	PZ	Leistung [Watt]			
pZ	0%	0%	0%	0%	0%	10%	33%	0%	98%	9%	3.670	3.060	610
AS	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3.670	3.060	610	
aZ	24%	0%	24%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	47.740	36.230	11.510	
IZ	76%	0%	76%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	27.680	22.780	4.900	
BZ	0%	100%	0%	100%	0%	66%	100%	2%	3%	10.760	6.310	4.450	
saZ 1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-	-	-	
saZ 2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-	-	-	
saZ 3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-	-	-	



# A6 Fallstudie 2: Energieeffizienz-Maßnahmensteckbriefe

### Energieeffizienz-Maßnahmensteckbrief

**Titel:** Reduzierung der Verweildauer im Bereitschaftszustand **Bereich:** Karo.-Bau

**#** Energieeffizienz-Handlungsansatz: bedarfsgerechte Energieversorgung **Prozessschritt**: „Fahrpedalmodul“

**Maßnahmenbeschreibung**

- Verkürzung der Verweildauer im Bereitschaftszustand von 3 min auf 1 min bis zum automatischen Wechsel in den produktions-freien Zustand
- neben der Auswirkung auf die Energieintensität sind keine weiteren Auswirkungen auf andere GPS-Zielgrößen zu erwarten

**Positionierung im EE-Maßnahmenportfolio**

**Kenngrößen-Veränderungen durch Umsetzung der Maßnahme**

Stellgröße	vorher	nachher	endogene Größe	Vorher	nachher
bZ	0,69 min	0,69 min	tS	108,80 min	108,80 min
nbZ	0,31 min	0,31 min	oS <sub>Tor</sub>	81,20 min	81,20 min
RD	0,00 min	0,00 min	K&L	13,40 min	13,40 min
# FM	1	1	A&N	13,20 min	13,20 min
MIX	1 Stk	1 Stk	oS <sub>TIR</sub>	183,40 min	183,40 min
ALZ	0,00 min	0,00 min			

**Veränderungen in der Energiedatenmatrix durch Umsetzung der Maßnahme**

	bZ	nbZ	A&N	K&L	tS	oS	R&A	W&soA	PZ	Leistung vorher	Leistung nachher
1 pZ					100%	66%	99%	99%		2.420	2.420
2 AS					100%					2.420	2.420
3.1 aZ	20%	20%								46.280	46.280
3.2 fZ	80%	80%								14.700	14.700
3.3 BZ	100%	100%			33%	100%	1%	1%		8.440	8.440
3.4 saZ 1										-	-
3.5 saZ 2										-	-
3.6 saZ 3										-	-

### Energieeffizienz-Maßnahmensteckbrief

**Titel:** Wechsel des Druckluftnetzes von 12 bar auf 8 bar **Bereich:** Karo.-Bau

**#** Energieeffizienz-Handlungsansatz: Komponentenaddition/-substitution/-reduktion **Prozessschritt**: „Laserschweißen“

**Maßnahmenbeschreibung**

- Wechsel des Druckluftnetzes der gesamten Prozesskette von 12 bar auf 8 bar
- Einbau eines Druckluftverdichters im Prozessschritt „Laserschweißen“ für den Betriebszustand „fördernder Zustand“
- Steigerung der technischen Störzeit um 12 % durch den Einsatz der zusätzlichen Komponente zu erwarten

**Positionierung im EE-Maßnahmenportfolio**

**Kenngrößen-Veränderungen durch Umsetzung der Maßnahme**

Stellgröße	vorher	nachher	endogene Größe	Vorher	nachher
bZ	0,67 min	0,67 min	tS	88,60 min	97,46 min
nbZ	0,33 min	0,33 min	oS <sub>Tor</sub>	85,20 min	85,20 min
RD	0,00 min	0,00 min	K&L	0,00 min	0,00 min
# FM	1	1	A&N	12,40 min	12,40 min
MIX	1 Stk	1 Stk	oS <sub>TIR</sub>	125,80 min	125,80 min
ALZ	0,00 min	0,00 min			

**Veränderungen in der Energiedatenmatrix durch Umsetzung der Maßnahme**

	bZ	nbZ	A&N	K&L	tS	oS	R&A	W&soA	PZ	Leistung vorher	Leistung nachher
1 pZ						33%	98%	97%		1.360	1.312
2 AS					100%					1.360	1.312
3.1 aZ	40%	40%								6.750	6.750
3.2 fZ	60%	60%								8.810	13.916
3.3 BZ	100%	100%			66%	100%	2%	3%		2.710	2.662
3.4 saZ 1										-	-
3.5 saZ 2										-	-
3.6 saZ 3										-	-

### Energieeffizienz-Maßnahmensteckbrief

**Titel:** Einsatz einer servo-elektrischen Schweißzange **Bereich:** Karo.-Bau

**#** Energieeffizienz-Handlungsansatz: Komponentenaddition/-substitution/-reduktion **Prozessschritt**: „Querträger OT“

**Maßnahmenbeschreibung**

- Substitution der servo-pneumatischen Schweißzange durch eine servo-elektrische Schweißzange
- Steigerung der technischen Störzeit um 14 %, der Kurzstillstands- & Langsamlaufzeit um 15 % sowie der Ausschuss- & Nacharbeitszeit um 20 % durch den Einsatz der neuen Technologie zu erwarten

**Positionierung im EE-Maßnahmenportfolio**

**Kenngrößen-Veränderungen durch Umsetzung der Maßnahme**

Stellgröße	vorher	nachher	endogene Größe	Vorher	nachher
bZ	0,75 min	0,75 min	tS	108,40 min	123,58 min
nbZ	0,25 min	0,25 min	oS <sub>Tor</sub>	7,20 min	7,20 min
RD	0,00 min	0,00 min	K&L	6,00 min	6,90 min
# FM	1	1	A&N	4,20 min	5,04 min
MIX	1 Stk	1 Stk	oS <sub>TIR</sub>	133,80 min	133,80 min
ALZ	0,00 min	0,00 min			

**Veränderungen in der Energiedatenmatrix durch Umsetzung der Maßnahme**

	bZ	nbZ	A&N	K&L	tS	oS	R&A	W&soA	PZ	Leistung vorher	Leistung nachher
1 pZ						33%	97%	97%		1.070	935
2 AS					100%					1.070	935
3.1 aZ	36%	36%								15.820	12.364
3.2 fZ	64%	64%								7.430	6.332
3.3 BZ	100%	100%			66%	100%	3%	3%		3.660	2.373
3.4 saZ 1										-	-
3.5 saZ 2										-	-
3.6 saZ 3										-	-