

**Methode zur Planung und Gestaltung
energieeffizienter Prozessketten für die Serienfertigung
am Beispiel ausgewählter Feinbearbeitungsverfahren**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
des Doktors der Ingenieurwissenschaften
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät III
Chemie, Pharmazie, Bio- und Werkstoffwissenschaften
der Universität des Saarlandes

von

Herrn Martin Swat

Saarbrücken, 2015

Tag des Kolloquiums:	07.08.2015
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber
Vorsitz:	Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herrmann
Akad. Mitarbeiter:	Dr.-Ing. Dr. rer. nat. Anne Jung

Kurzzusammenfassung

Für Unternehmen der industriellen Fertigung wird es zunehmend wichtig, ressourcenschonende und nachhaltige Produkte zu entwickeln und herzustellen. Dabei spielt die positive Beeinflussung der Energieeffizienz bei der Herstellung eine wesentliche Rolle. Insbesondere bei der Auswahl von Fertigungsprozessketten für die Serienfertigung werden Entscheidungen getroffen, die den Energieverbrauch bei der Herstellung frühzeitig und langfristig sowie für eine große Zahl herzustellender Teile bestimmen. In dieser Arbeit wird eine Methode entwickelt, die eine Abschätzung des Energiebedarfs von Fertigungsprozessen und -prozessketten während der Planung und Gestaltung ermöglicht. Für zwei ausgewählte Feinbearbeitungsverfahren wird beispielhaft der Energieverbrauch untersucht und daraus Kennwerte für die Prognose des Energiebedarfs bestimmt. Dabei werden alle am Prozess beteiligten Verbraucher berücksichtigt, die einen direkten und unmittelbaren Beitrag bei der Durchführung des Fertigungsprozesses leisten. Auf der Grundlage der Analyseergebnisse wird ein Konzept zur Gliederung von Energieplanungsdaten erstellt, das den Einsatz der ermittelten Kennwerte für die Prognose des Energiebedarfs von Fertigungsprozessen unterstützt. Durch die Anwendung der vorgestellten Methode in der Technischen Produktionsplanung kann der Energiebedarf von alternativen Fertigungsprozessketten frühzeitig abgeschätzt und somit als ein Kriterium bei der Planung und Gestaltung der Prozessketten berücksichtigt werden.

Abstract

In industrial manufacturing, companies are challenged to develop and manufacture sustainable and resource saving products. Improving the energy efficiency plays a crucial role in achieving this goal. Especially the selection of manufacturing process chains for the series production of parts includes decisions that influence the energy consumption of the production at an early stage. The decisions made will predetermine the energy efficiency of the production system over several years and for thousands or millions of parts to be produced.

This thesis presents a method for estimating the energy consumption of manufacturing processes and process chains during the planning and design phase. The energy consumption of two selected precision machining processes is analyzed and parameters for the prediction of the energy consumption are derived from the analysis. All energy consumers providing a direct and immediate contribution to the performance of the manufacturing process are considered. Based on the results of the analysis a concept for the structuring of energy planning data is developed that supports forecasting the energy consumption of manufacturing processes. The application of the presented method in the early stage of production planning will enable predicting the energy consumption of alternative manufacturing process chains. Thus, energy consumption can become a criterion for the planning and design of process chains.

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungstechnik der Universität des Saarlandes.

Meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre danke ich für die Ermöglichung dieser Dissertationsschrift, die motivierende fachliche und menschliche Führung, die Chance, themenübergreifend in zahlreichen Projekten mitzuarbeiten und dabei Untersuchungen für meine Arbeit durchzuführen sowie für die vielfältigen Möglichkeiten zur Weiterbildung. Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber danke ich für die freundliche Übernahme des Zweitgutachtens und die wertvollen Hinweise bei der Erstellung der Arbeit.

Die Forschungsarbeit war nur durch die umfangreiche Unterstützung von Projekt- und Kooperationspartnern möglich. Herrn Henning Klein und den Mitarbeitern der Kadia Produktion GmbH + Co. danke ich für die gemeinsame Projektarbeit und die Möglichkeit, umfassende Messungen an Hon-Prozessen durchführen zu können. Mein Dank gilt ebenso Herrn Frank Otto (PEMTec SNC) für die Hilfsbereitschaft und Unterstützung bei der Durchführung von Untersuchungen zum Elektrochemischen Abtragen.

Ferner gilt mein Dank den ehemaligen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls für Fertigungstechnik für den intensiven wissenschaftlichen Austausch, die Unterstützung bei umfangreichen Messungen im Labor des Lehrstuhls und am Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik sowie für das sehr gute Arbeitsklima. Meinen wissenschaftlichen Hilfskräften und DAAD-RISE-Studierenden danke ich für ihr Interesse an den Aufgabenstellungen sowie für die Durchführung von Messungen und Auswertungen. Darüber hinaus danke ich Jakub W. Wewiór und Tim Stock vom Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) in Berlin für die vertrauensvolle Zusammenarbeit bei unseren gemeinsamen Veröffentlichungen.

Für die Durchsicht der Arbeit sowie für die wertvollen Anregungen und Diskussionen danke ich Kirsten Trapp, Dr.-Ing. Horst Brünnet und Dr. Horst-Henning Jank. Nicht zuletzt danke ich Marion Rath für die vielfältige Unterstützung in der Endphase und für das Lektorat der Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die immer ihr vollstes Vertrauen in mich gesetzt und mir Rückhalt gegeben haben. Sie haben mir diesen beruflichen Werdegang erst ermöglicht und bei meinen Entscheidungen stets alle Freiheiten gelassen.

**Ohne Klarheit in der Sprache
ist der Mensch doch nur ein Gartenzwerg.**

Element of Crime

Lebenslauf

Persönliche Angaben

Name: Martin Swat
Geburtsdatum und -ort: 20. März 1983 in Cottbus

Beruflicher Werdegang

Seit 04/2015 Wissenschaftlicher Mitarbeiter,
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik,
Universität des Saarlandes, Saarbrücken

08/2010 - 03/2015 Wissenschaftlicher Mitarbeiter,
Lehrstuhl für Fertigungstechnik,
Universität des Saarlandes, Saarbrücken

09/2009 - 06/2010 Junior Accountant,
BASF Services Europe GmbH, Berlin

09/2008 - 02/2009 Diplomand,
Robert Bosch GmbH, Salzgitter

11/2007 - 05/2008 Praktikant,
Robert Bosch GmbH, Salzgitter

Studium und Schulbildung

10/2003 - 03/2009 Wirtschaftsingenieurwesen (Dipl.-Ing.),
Brandenburgisch Technische Universität, Cottbus

09/1995 - 06/2002 Hochschulreife, Fürst-Pückler-Gymnasium, Cottbus

08/1989 - 06/1995 20. Grundschule, Cottbus

Zivildienst

09/2002 - 06/2003 Jugendgästehaus, Dresden

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS	I
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	III
SYMBOLVERZEICHNIS	IV
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VI
TABELLENVERZEICHNIS	IX
1 EINLEITUNG	1
1.1 AUSGANGSSITUATION UND ZIELSETZUNG.....	1
1.2 AUFBAU UND VORGEHEN DER ARBEIT.....	3
2 GRUNDLAGEN	5
2.1 PRODUKTIONSPLANUNG.....	5
2.1.1 Begriffsdefinitionen.....	5
2.1.2 Aufgaben der Technischen Produktionsplanung.....	7
2.2 ENERGIEEINSATZ IN DER INDUSTRIELLEN FERTIGUNG.....	11
2.2.1 Begriffsdefinitionen.....	11
2.2.2 Kennzahl zur Bewertung der Energieeffizienz von Prozessketten ..	13
3 STAND DER FORSCHUNG UND TECHNIK	15
3.1 UNTERSUCHUNGEN ZUM ENERGIEBEDARF VON FERTIGUNGSPROZESSEN.....	15
3.1.1 Gliederung des Untersuchungsraumes.....	15
3.1.2 Beschreiben des Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen.....	17
3.1.3 Energieverbrauch von peripheren Anlagen.....	21
3.2 PLANUNG DES ENERGIEBEDARFS VON FERTIGUNGSPROZESSKETTEN.....	25
3.3 SOFTWARE ZUM ABSCHÄTZEN VON ENERGIEBEDARF UND UMWELTWIRKUNGEN...	31
4 HANDLUNGSBEDARF UND ZIELSETZUNG	33
4.1 HANDLUNGSBEDARF.....	33
4.2 ZIELSETZUNG UND VORGEHEN.....	35
5 ANALYSE DES ENERGIEBEDARFS VON FERTIGUNGSPROZESSEN	39
5.1 METHODE ZUR ANALYSE DES ENERGIEBEDARFS VON FERTIGUNGSPROZESSEN ...	39
5.1.1 Systemgrenzen.....	39
5.1.2 Analyse des Energieverbrauchs von Fertigungsprozessen.....	41
5.1.2.1 Werkzeugmaschine.....	41
5.1.2.2 Prozessperipherie.....	45
5.1.3 Messmethoden.....	49
5.1.3.1 Elektrische Leistungsmessungen.....	49
5.1.3.2 Druckluftmessungen.....	50
5.1.3.3 Ermitteln des Volumenstromes flüssiger Medien.....	51
5.1.4 Vorgehen.....	52

5.2	ANWENDUNGSBEISPIEL ELEKTROCHEMISCHES ABTRAGEN (PECM)	54
5.2.1	Verfahrensprinzip und -grundlagen	54
5.2.2	Festlegen der Systemgrenze	55
5.2.3	Analyse des Energieverbrauchs beim PECM.....	57
5.2.3.1	Messvorgehen	57
5.2.3.2	Werkzeugmaschine.....	59
5.2.3.3	Elektrolytversorgung und -aufbereitung	61
5.2.3.4	Elektrolytkühlung.....	63
5.2.3.5	Druckluftversorgung.....	64
5.2.4	Zusammenfassung und Übersicht der Leistungskennwerte.....	66
5.3	ANWENDUNGSBEISPIEL HONEN	69
5.3.1	Verfahrensprinzip und -grundlagen	69
5.3.2	Festlegen der Systemgrenze	70
5.3.3	Analyse des Energieverbrauchs beim Honen	72
5.3.3.1	Messvorgehen	72
5.3.3.2	Werkzeugmaschine.....	73
5.3.3.3	Kühlschmierstoffversorgung und -aufbereitung.....	75
5.3.3.4	Druckluftversorgung.....	77
5.3.4	Zusammenfassung und Übersicht der Leistungskennwerte.....	78
6	PLANUNG DES ENERGIEBEDARFS VON FERTIGUNGSPROZESSKETTEN 79	
6.1	KONZEPT ZUR PLANUNG ENERGIEEFFIZIENTER PROZESSKETTEN.....	79
6.2	GLIEDERUNG DER ENERGIEPLANUNGSDATEN.....	80
6.3	VALIDIERUNG DER METHODE.....	83
6.3.1	Berechnung des Energieverbrauchs	83
6.3.1.1	Elektrochemisches Abtragen (PECM).....	83
6.3.1.2	Honen	86
6.3.2	Prognose des Energiebedarfs.....	88
6.3.2.1	Anwendungsbeispiel PECM.....	88
6.3.2.2	Planungsdatensätze.....	89
6.3.2.3	Abschätzung des Energiebedarfs	91
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	93
	LITERATURVERZEICHNIS	97
ANHANG A	BEISPIEL AUTOMATISIERUNGSZEITEN PECM	106
ANHANG B	PARAMETERSÄTZE DER PECM-VERSUCHE	107
ANHANG C	WERKSTÜCKBEZOGENER ENERGIEVERBRAUCH PECM	108
ANHANG D	WERKSTÜCKBEZOGENER ENERGIEVERBRAUCH HONEN ..	110
ANHANG E	PLANUNGSDATENSÄTZE MUSTERTEIL VENTILPLATTE.....	111
ANHANG F	PROGNOSE DES ENERGIEBEDARFS BEIM PECM.....	112

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AVG	Arbeitsvorgang
AVGF	Arbeitsvorgangsfolge
DL	Druckluft
EÄ	Energieäquivalent
ECM	Elektrochemisches Abtragen, engl. Electrochemical Machining
FMEA	Fehler-Möglichkeiten-Einfluss-Analyse
i.N.	im Normzustand (Normbedingungen nach DIN 1343)
KSS	Kühlschmierstoff
LCA	Life-Cycle Assessment
LCI	Life-Cycle Inventory
MVR	Medienverbrauchsrate
PECM	Gepulstes Elektrochemisches Abtragen, engl. Pulsed Electrochemical Machining
PEP	Produktentstehungsprozess, engl. Product Engineering Process
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
SOP	Start of Production
WZM	Werkzeugmaschine

SYMBOLVERZEICHNIS

Zeichen	Bedeutung	Einheit
\dot{Q}	Wärmeleistung	W
η_E	Wirkungsgrad Elektrolyse (PECM)	---
E	Energie	kWh
E \ddot{A}	Energieäquivalent	kWh/kWh
E _{KSS/Jahr}	Energiebedarf einer Kühlschmierstoffanlage pro Jahr	kWh
E _{Peripherie}	Energieverbrauch periphere Anlagen	kWh
E _{WZM}	Energieverbrauch einer Werkzeugmaschine	kWh
f	Pulsfrequenz (PECM)	Hz
f _B	Faktor Belegungszeit	---
f _{Be}	Faktor erweiterte Belegungszeit	---
I _{Generator}	Generatorstrom (PECM)	A
N	Anzahl Werkzeugmaschinen	---
P	Leistung	W, kW
P _B	Kennwert für die mittlere Leistungsaufnahme während der Nutzungszeit	W, kW
P _{B, h}	Kennwert für die mittlere Leistungsaufnahme während der Hauptnutzungszeit	W, kW
P _{B, n}	Kennwert für die mittlere Leistungsaufnahme während der Nebennutzungszeit	W, kW
P _G	Mittlere Leistungsaufnahme im Grundzustand	W, kW
P _{KSS/WZM}	Mittlere Leistungsaufnahme einer zentralen Kühlschmierstoffanlage pro Werkzeugmaschine	W, kW
Q _B	Kennwert für den mittleren Volumenstrom während der Nutzungszeit	l/h, m ³ /h
Q _{B, h}	Kennwert für den mittleren Volumenstrom während der Hauptnutzungszeit	l/h, m ³ /h
Q _{B, n}	Kennwert für den mittleren Volumenstrom während der Nebennutzungszeit	l/h, m ³ /h
Q _{Zufluss}	Volumenstrom	l/h, m ³ /h
t	Zeit	s, h
t _{an}	Einschaltdauer eines Verbrauchers, zum Beispiel einer Pumpe	s
t _{aus}	Dauer zwischen zwei Nutzungsphasen eines Verbrauchers, zum Beispiel einer Pumpe	s
t _B	Prozessbezogene Maschinenbelegungszeit	s
T _B	Zeitraumbezogene Belegungszeit	h
t _{Be}	Erweiterte prozessbezogene Belegungszeit	s
t _h	Prozessbezogene Hautnutzungszeit	s
t _N	Prozessbezogene Nutzungszeit	s
t _n	Prozessbezogene Nebennutzungszeit	s

Zeichen	Bedeutung	Einheit
T_N	Zeitraumbezogene Nutzungszeit	h
t_O	Prozessbezogene organisatorische Ausfallzeit	s
T_O	Zeitraumbezogene organisatorische Ausfallzeit	h
t_{Puls}	Pulsdauer (PECM)	s
T_T	Zeitraumbezogene technische Ausfallzeit	h
t_T	Prozessbezogene technische Ausfallzeit	s
T_W	Zeitraumbezogene Wartungszeit	h
$T_{WZM/Jahr}$	Laufzeit einer Werkzeugmaschine pro Jahr	h
U_{Spalt}	Spaltspannung (PECM)	V
$V_{Speicher}$	Volumen eines Medienspeichers	l, m ³

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1-1: Struktur und Aufbau der Arbeit	3
Abbildung 2-1: Produktionsplanung im Produktlebenszyklus, in Anlehnung an (Fallböhmer 2000)	5
Abbildung 2-2: Technische und Betriebswirtschaftliche Produktionsplanung im PEP, in Anlehnung an (Weyand 2009)	6
Abbildung 2-3: Begriffsklärung und Synonyme der Produktionsplanung (Eversheim 1989, Kiefer, Nicolai et al. 1999, Weyand 2009, Wiendahl 2010, Zenner 2006).....	7
Abbildung 2-4: Alternative Technologieketten für eine Antriebswelle (Eversheim und Schuh 2005)	9
Abbildung 2-5: Betrachtungsebenen der Technischen Produktionsplanung, in Anlehnung an (Fallböhmer 2000, Trommer 2001).....	10
Abbildung 2-6: Energieumwandlungskette, in Anlehnung an (Müller et al. 2009, Winje und Witt 1991)	12
Abbildung 3-1: Teilbilanzräume eines Fertigungsprozesses, nach (Schiefer 2000, Schulz et al. 1999)	15
Abbildung 3-2: Aufschlüsselung des Energieverbrauchs eines Fräsbearbeitungszentrums (Kordonowy 2002).....	17
Abbildung 3-3: Leistungsaufnahme einer Fräsmaschine in Abhängigkeit von den Betriebszuständen (links) und Nutzungsprofil für den Bearbeitungsfall Planschuppen in Abhängigkeit von den Betriebszuständen (rechts), nach (Dietmair und Verl 2009, Dietmair et al. 2008)	18
Abbildung 3-4: Konzept zur Bewertung des Energie- und Medienbedarfs im Use-case „Spezialisiert“ (Kuhrke 2011)	19
Abbildung 3-5: Arbeiten zur Planung des Energiebedarfs von Fertigungsprozessketten	25
Abbildung 3-6: Kennwerte Schiefer (Schiefer 2000).....	26
Abbildung 3-7: Schematischer Ablauf der Entwicklung von EnergyBlocks am Beispiel eines Produktionslasers, nach (Weinert 2010)	28
Abbildung 3-8: Klassifikationsmerkmale der EnergyBlocks (Weinert 2010)	29
Abbildung 4-1: Vorgehen zur Bereitstellung von Energieplanungsdaten für Prozesskettenplanung während der Technischen Produktionsplanung	36
Abbildung 5-1: Systemgrenze auf Ebene der Prozesskette.	39

Abbildung 5-2: Systemgrenze auf Ebene der Prozesse, in Anlehnung an (ISO/DIS 14955-1)	40
Abbildung 5-3: Schematischer Verlauf der Leistungsaufnahme einer Werkzeugmaschine in der Serienfertigung.....	41
Abbildung 5-4: Vorgehen zur Kennwertbildung einer peripheren Anlage	47
Abbildung 5-5: Beispielhafter Verlauf des Leistungsprofils einer dezentralen Einzelanlage mit drei Verbrauchern, in Anlehnung an (Zein 2012).....	47
Abbildung 5-6: Allokationsschema für Gruppen- und Zentralanlagen.....	49
Abbildung 5-7: Verwendete Geräte zur Leistungsmessung, Bildnachweis: (Christ-Elektronik 2013, HBM, Hobut 2015)	50
Abbildung 5-8: Verwendeter Durchflusssensor SFAB, Bildnachweis: (Festo 2013) .	51
Abbildung 5-9: Vorgehen für die Analyse des Energieverbrauchs von Fertigungsprozessen	52
Abbildung 5-10: Prinzip des ECM, in Anlehnung an (Regel 2012)	54
Abbildung 5-11: Systemgrenze für die Untersuchung des Energieverbrauchs beim PECM	56
Abbildung 5-12: Untersuchte Maschine PEM 600 mit den Anlagenteilen (PEMTec 2015b)	57
Abbildung 5-13: Datenerfassung im untersuchten PECM-Prozess	58
Abbildung 5-14: Werkzeug, Werkstück und Versuchsaufbau (rechts) (Swat et al. 2013a)	58
Abbildung 5-15: Beispielhafte Darstellung eines Leistungsprofils beim PECM (PEMCenter 8000, Parametersatz 2)	59
Abbildung 5-16: Gesamtleistung und Leistungsanteile der PECM-Maschinen in Abhängigkeit von der Prozesseleistung (grau – PEMCenter 8000, blau – PEM 600)	60
Abbildung 5-17: Mittlere Leistungsaufnahme der Elektrolytanlage in Abhängigkeit vom eingestellten Volumenstrom, bei einem Druck von 5 bar	62
Abbildung 5-18: Druckluftvolumenstrom der Elektrolytaufbereitungsanlage [l/min i.N.] in Abhängigkeit von Volumenstrom des Elektrolyten.....	65
Abbildung 5-19: Prinzipdarstellung des Langhub-Innen-Rundhönens, in Anlehnung an (Flores 1992)	70
Abbildung 5-20: Datenerfassung im untersuchten Hon-Prozess	71
Abbildung 5-21: Untersuchte Kadia 2LH 60/350 R (links), Rundtisch im Bearbeitungsraum mit sechs Bearbeitungsstationen (rechts) (Kadia 2014)	72

Abbildung 5-22: Datenerfassung im untersuchten Hon-Prozess	73
Abbildung 5-23: Leistungsmessung der Hon-Maschine 1 (Bearbeitungsaufgabe: Magnetkern)	74
Abbildung 5-24: Leistungsmessung der Hon-Maschine 2 (Bearbeitungsaufgabe: Exzenterring)	75
Abbildung 5-25: Skizze KSS-Anlage beim Honen	76
Abbildung 6-1: Konzept zur Einbindung der hier vorgestellten Methode in die Planung von Fertigungsprozessketten im Rahmen der TPP	80
Abbildung 6-2: Bereitstellung von Planungsdaten bezogen auf die Datenebene	81
Abbildung 6-3: Konzept zur Gliederung der Energieplanungsdaten	82
Abbildung 6-4: Energiemengenintensität der untersuchten PECM-Prozesse – PEMCenter 8000 und PEM 600	85
Abbildung 6-5: Energiemengenintensität der untersuchten Hon-Prozesse	88
Abbildung 6-6: CAD-Modell des Werkzeugs (links) und Foto des fertigen Werkstücks (rechts) (PEMTec 2015a)	89
Abbildung 6-7: Gliederung der erfassten Planungsdatensätze	90

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 3-1: Auswahl von Softwarelösungen und Datenbanken.....	32
Tabelle 5-1: Parametersätze für die PECM-Versuche.....	59
Tabelle 5-2: Leistungskennwerte der PECM-Maschinen.....	61
Tabelle 5-3: Mittlere Leistungsaufnahme der Elektrolytanlage bei 5 bar	62
Tabelle 5-4: Interpolierte Leistungskennwerte der Elektrolytversorgung für die untersuchten Parametersätze.....	63
Tabelle 5-5: In den Elektrolyten eingebrachte Wärmeleistung und benötigte elektrische Leistung für die Bereitstellung der Kühlleistung.....	64
Tabelle 5-6: Druckluftvolumenstrom der Elektrolytanlage.....	65
Tabelle 5-7: Druckluftvolumenstrom der Elektrolytaufbereitungsanlage [l/min i.N.]..	65
Tabelle 5-8: Druckluftbedarf Schutztür	66
Tabelle 5-9: Zusammenfassung der Leistungskennwerte für die untersuchten PECM-Prozesse.....	67
Tabelle 5-10: Leistungskennwerte der Hon-Maschinen.....	75
Tabelle 5-11: Kennwerte für den KSS-Volumenstrom der Hon-Maschinen	76
Tabelle 5-12: Äquivalent für die elektrische Leistungsaufnahme zur Kühlschmierstoffbereitstellung.....	77
Tabelle 5-13: Kennwerte für den Druckluftvolumenstrom der Hon-Maschinen (in l/min, bei Normbedingungen).....	77
Tabelle 5-14: Kennwerte für die mittlere elektrische Leistungsaufnahme der Druckluftbereitstellung	78
Tabelle 5-15: Zusammenfassung der Leistungskennwerte für die untersuchten Hon-Prozesse.....	78
Tabelle 6-1: Zeitkennwerte der untersuchten PECM-Prozesse	84
Tabelle 6-2: Zeitkennwerte der untersuchten Hon-Prozesse.....	86
Tabelle 6-3: Untersuchte Parametersätze für die Bearbeitungsschritte.....	91
Tabelle 6-4: Leistungskennwerte, Einsenktiefe und Bearbeitungsdauer der Bearbeitungsschritte.....	92

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Zielsetzung

„Die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen ist nicht nur durch Qualität und Kosten ihrer Erzeugnisse bestimmt, sondern zunehmend auch durch die Umweltverträglichkeit ihrer Produkte in allen Phasen des Produktlebenszyklus“ (Eversheim und Schuh 2005). Insbesondere bei der Großserienfertigung von technischen Produkten gewinnt der effiziente Einsatz von Energie als ein Aspekt der Umweltverträglichkeit bei der Herstellung der Produkte an Bedeutung. Dabei wird der zukünftige Energieverbrauch bereits bei der konstruktiven Gestaltung sowie der Auswahl und Kombination der Fertigungsverfahren weitgehend festgelegt. Die Einflussmöglichkeiten sind in dieser frühen Phase der Produktentstehung am größten und die getroffenen Entscheidungen legen den späteren Energieverbrauch wesentlich fest (Müller et al. 2008, Schulz et al. 1999). Die Planung und Gestaltung energieeffizienter Fertigungsprozessketten kann demzufolge einen wesentlichen Beitrag zum effizienten Energieeinsatz in der Produktion liefern und damit zur Umweltverträglichkeit der Produktion beitragen.

Die Umweltverträglichkeit der Energienutzung wird zum einen durch die Art der Energieerzeugung und zum anderen durch die Effizienz des Energieeinsatzes bestimmt. Der Umbau des Energieversorgungssystems hin zu einer nachhaltigen Energieversorgung ist eine politische und gesellschaftliche Herausforderung und führt mittelfristig zu steigenden Energiekosten (Fouquet und Pearson 2012). Langfristig kann jedoch der Verbrauch knapper und damit teurer werdender fossiler Brennstoffe reduziert werden (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2012). Aus diesen Rahmenbedingungen ergibt sich für produzierende Unternehmen die Anforderung, sowohl aus Kostengründen als auch im Hinblick auf die Umweltverträglichkeit die Effizienz des Energieeinsatzes zu steigern und somit einen wesentlichen Beitrag zur Umstellung des Systems zu leisten. Dabei ist elektrische Energie aufgrund ihrer Flexibilität und dem großen Anwendungsgebiet beim Betrieb von Maschinen und Anlagen eine der am häufigsten genutzten Energieformen in der industriellen Fertigung. Im Jahr 2013 machte der Stromverbrauch rund 31 % des gesamten Energieverbrauchs im Industriesektor aus (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2015). Sowohl in Deutschland als auch weltweit betrug der Anteil der Industrie am Stromverbrauch im Jahr 2011 jeweils rund 42 % (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2013, International Energy Agency 2013).

Eine Studie zur Untersuchung der Energieeffizienz in der Produktion aus dem Jahr 2008 nennt für die gesamte industrielle Produktion ein mittelfristiges Einsparpotenzial von 25 bis 30 % (Neugebauer 2008). Um diese Energieeinsparungen zu identifizieren und zu realisieren, analysieren Industrieunternehmen den Energieverbrauch von Anlagen und Maschinen systematisch und ergreifen Maßnahmen zur Reduzierung des Energiebedarfs in der Fertigung (Beispiele: effizientere Aggregate, Druckluft und KSS richtig einstellen, Abschaltstrategien für Maschinen etc., Energiewertstrom).

Dabei sind die Methoden der Analyse und Beschreibung des Energieverbrauchs jedoch noch nicht so gestaltet, dass die gewonnenen Daten für die Planung und Gestaltung von energieeffizienten Prozessketten eingesetzt werden können.

Vor dem Hintergrund der beschriebenen Situation verfolgt die vorliegende Arbeit das Ziel, eine Planungsmethode zu entwickeln, die es ermöglicht, den Energiebedarf alternativer Prozessketten bereits in der Technischen Produktionsplanung zu berücksichtigen und die effiziente Alternative auszuwählen. Damit fokussiert die Arbeit den Energieverbrauch, der in einem produzierenden Unternehmen entsteht und vom Prozessplaner durch die Auswahl von alternativen Fertigungsprozessketten beeinflusst werden kann. Bereits die Konstruktion der herzustellenden Bauteile beeinflusst die Festlegung der möglichen Fertigungsprozessketten. Die konstruktive Gestaltung der Bauteile ist in der Phase der Technischen Produktionsplanung jedoch bereits festgelegt. Demzufolge werden Konstruktionsvarianten in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht. Der Energieverbrauch von zugekauften Materialien und Halbzeugen wird in die Betrachtung nicht einbezogen, da der Fertigungsplaner darauf nur einen indirekten Einfluss hat.

Bei der Entwicklung der Methode ist die Analyse und Beschreibung des Energiebedarfs einzelner Fertigungsprozesse vorzusehen. Dabei wird ein ganzheitliches Verständnis des Fertigungsprozesses zugrunde gelegt, das den Energiebedarf aller Einrichtungen berücksichtigt, die einen wesentlichen und unmittelbaren Beitrag zum Ergebnis des Fertigungsprozesses leisten. Um die Anwendbarkeit und die Übertragbarkeit der Methode für die Analyse unterschiedlicher Fertigungsprozesse zu gewährleisten, besteht insbesondere die Anforderung, das Vorgehen so zu konzipieren, dass es unabhängig vom eigentlichen physikalischen Verfahrensprinzip ist und unterschiedliche Hilfs- und Prozessmedien berücksichtigt werden können. Auf diese Weise wird transparent gemacht, wie sich der Energieverbrauch der Prozesse zusammensetzt.

1.2 Aufbau und Vorgehen der Arbeit

Um das formulierte Ziel zu erreichen, wird in der Arbeit folgendes Vorgehen angewandt: Ausgehend von der Zielsetzung werden die Grundlagen und der Stand der Forschung ausgearbeitet. Daraufhin wird die Zielsetzung präzisiert und die zu erfüllenden Anforderungen werden formuliert. Dem abgeleiteten Handlungsbedarf folgend wird die Methode zur Analyse des Energieverbrauchs von Fertigungsverfahren vorgestellt. Anschließend wird die Methode zur Planung des Energieverbrauchs von Prozessketten dargestellt, welche die zuvor gewonnenen Daten verwendet. Die vorliegende Arbeit gliedert sich, wie in Abbildung 1-1 dargestellt, in sieben Kapitel. Der Inhalt der einzelnen Kapitel ist im Folgenden kurz zusammengefasst.

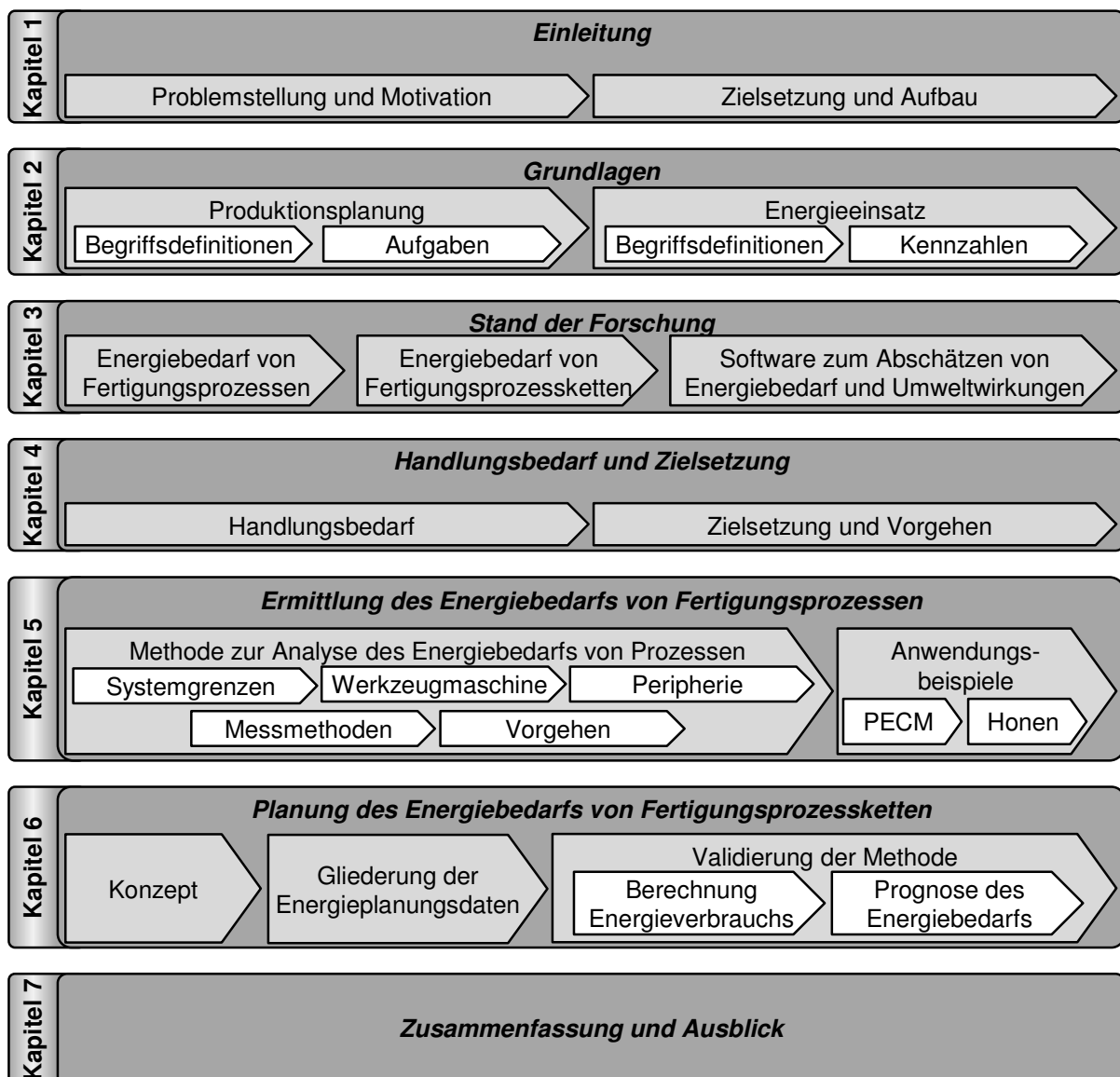


Abbildung 1-1: Struktur und Aufbau der Arbeit

Kapitel 1 beleuchtet die Problemstellung und die Motivation, die dieser Arbeit zugrunde liegt, wobei Zielsetzung und Aufbau der Arbeit vorgestellt werden. Kapitel 2 geht zunächst auf die für diese Arbeit wichtigen Grundlagen ein und stellt die Aufgaben der Technischen Produktionsplanung dar. Dabei werden die grundlegenden Begriffe der Energienutzung im Kontext der industriellen Fertigung definiert. Abschließend wird eine Kennzahl zur Beurteilung der Energieeffizienz von Prozessketten abgeleitet. Der Stand der Forschung für die relevanten Themengebiete wird in Kapitel 3 zusammengefasst. Dabei sind insbesondere Ansätze zur Analyse und Vorhersage des Energieverbrauchs von Maschinen und Anlagen von Bedeutung. Es wird aufgezeigt, wie die vorgestellten Ansätze als Grundlage für eine Methode zur Planung und Gestaltung energieeffizienter Prozessketten in der Großserienfertigung aufgegriffen werden können. Ausgehend vom Stand der Forschung und unter Berücksichtigung der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit wird in Kapitel 4 der Handlungsbedarf abgeleitet. Dabei werden die zu untersuchenden Forschungsfragen konkretisiert und das zu erarbeitende Vorgehen zur Planung und Gestaltung energieeffizienter Prozessketten für die Serienfertigung am Beispiel ausgewählter Feinbearbeitungsverfahren vorgestellt.

Das fünfte Kapitel dient der Vorstellung des ersten Teils der Methode, die in dieser Arbeit entwickelt wird. In einem ersten Schritt wird die Vorgehensweise zur Analyse des Energieverbrauchs von Fertigungsprozessen beschrieben. Dazu gehören die Gliederung des gesamten Fertigungsprozesses in einzelne Analyseobjekte, die Wahl der Systemgrenzen sowie die Beschreibung der angewendeten Messmethoden und des Vorgehens zur Analyse der Fertigungsprozesse. Anschließend wird die Methode bei der Untersuchung des Elektrochemischen Abtrags und des Honens exemplarisch angewendet. Als Ergebnis stehen Kennwerte für die vorausschauende Abschätzung des Energieverbrauchs dieser beiden Fertigungsprozesse zur Verfügung.

Kapitel 6 stellt den zweiten Teil der Methode dar, der die Kennwerte zur Beschreibung des Energiebedarfs der untersuchten Fertigungsprozesse aufgreift. Zunächst wird ein Konzept vorgestellt, wie die Prognose des Energiebedarfs in die Planung und Gestaltung von Fertigungsprozessketten eingebunden werden kann. Es wird eine Gliederung der zuvor ermittelten Energieplanungsdaten vorgenommen, um die Anwendung der Daten für die vorausschauende Abschätzung des Energiebedarfs zu ermöglichen. Anschließend erfolgt eine Validierung der in Kapitel 5 durchgeführten Analyseergebnisse. Dazu wird der werkstückbezogene Energieverbrauch der untersuchten Prozesse und der beteiligten Verbraucher berechnet. Die Gliederung der Energieplanungsdaten und ihre Anwendung für die Prognose des Energiebedarfs wird am Beispiel des Elektrochemischen Abtrags vorgenommen. Dafür wird der Energiebedarf für die Fertigung eines Musterbauteils berechnet und mit dem messtechnisch ermittelten Energieverbrauch verglichen.

Die Ergebnisse der Arbeit werden in Kapitel 7 zusammengefasst, wobei beurteilt wird, inwiefern die gesteckten Ziele erreicht werden konnten. In einem abschließenden Überblick wird dargelegt, welchen möglichen Nutzen und welches Anwendungspotenzial die vorgestellte Methode bietet.

2 Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen für diese Arbeit dargestellt. Dabei werden für die Produktionsplanung zunächst die zentralen Begriffe definiert. Es wird herausgearbeitet, welche Aufgaben bei der Planung von Fertigungsprozessketten im Rahmen der Technischen Produktionsplanung auszuführen sind. Anschließend wird das in der Arbeit verwendete Begriffsverständnis für den Energieeinsatz in der industriellen Fertigung erarbeitet und eine Kennzahl zur Bewertung des Energiebedarfs von Fertigungsprozessen und -prozessketten definiert.

2.1 Produktionsplanung

2.1.1 Begriffsdefinitionen

Der Produktentstehungsprozess kann in verschiedene Abschnitte unterteilt werden und umfasst alle Planungsaktivitäten von der Produktidee bis zur Produktrealisierung. Zu den Planungsphasen zählen die Produktplanung, die Konstruktion, die Produktionsplanung und die eigentliche physische Erstellung des Produktes, die Produktion. Abbildung 2-1 zeigt die Phasen des Produktentstehungsprozesses und macht deutlich, dass die Produktentstehung den ersten Abschnitt im Lebenszyklus eines Produktes darstellt.

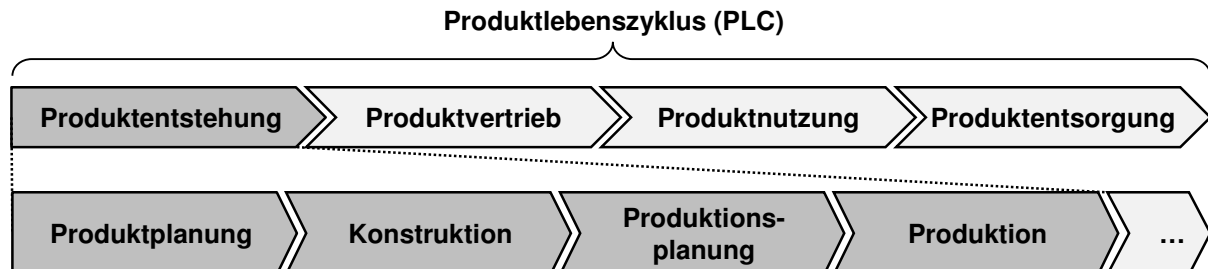


Abbildung 2-1: Produktionsplanung im Produktlebenszyklus, in Anlehnung an (Fallböhrmer 2000)

Die Produktplanung befindet sich an der Schnittstelle zwischen dem herstellenden Unternehmen und den Kunden. Auf Basis der Analyse von Kundenwünschen und Marktanforderungen werden in dieser Phase Ideen für neue Produkte entwickelt (Eversheim 1996). Aus Sicht der Produktplanung leistet der Entstehungsprozess eines Produktes einen strategischen Beitrag zur Sicherung des Unternehmenserfolges (Czichos und Hennecke 2008). Folglich bilden bereits bei der Auswahl und Ausarbeitung von Produktideen die zukünftigen Marktchancen und die Prognose von Absatzzahlen eine wesentliche Randbedingung. Die Produktplanung umfasst alle Tätigkeiten, mit denen auf der Basis strategischer Vorgaben die wesentlichen Eigenschaften der zukünftigen Produkte festgelegt werden (Seidel 2005).

In der Konstruktionsphase werden die in der Produktplanung definierten Anforderungen an das Produkt so aufbereitet, dass das Produkt physisch entstehen kann (Spur 1996). Die Produktfunktionalitäten werden unter Berücksichtigung geometrischer,

struktureller und technologischer Randbedingungen gestaltet, und es werden fertigungsreife Unterlagen geschaffen, auf deren Grundlage alternative Herstellverfahren für die Realisierung der Produkte zur Anwendung kommen können (Spur 1997).

Die Phase der Produktionsplanung umfasst alle Tätigkeiten zur ablauforganisatorischen Gestaltung des Produktionsprozesses (Spur 1997). Die Planungsaufgaben der Produktionsplanung vor und nach dem Produktionsbeginn (engl.: Start of Production, SOP) unterscheiden sich dabei stark. Zur sprachlichen und inhaltlichen Abgrenzung der beiden Planungsabschnitte werden die Planungsaktivitäten nach dem SOP als Betriebswirtschaftliche Produktionsplanung und die Aktivitäten vor dem SOP als Technische Produktionsplanung bezeichnet (Weyand 2009). Abbildung 2-2 zeigt den Produktentstehungsprozess mit den Teilgebieten der Produktionsplanung vor und nach SOP.

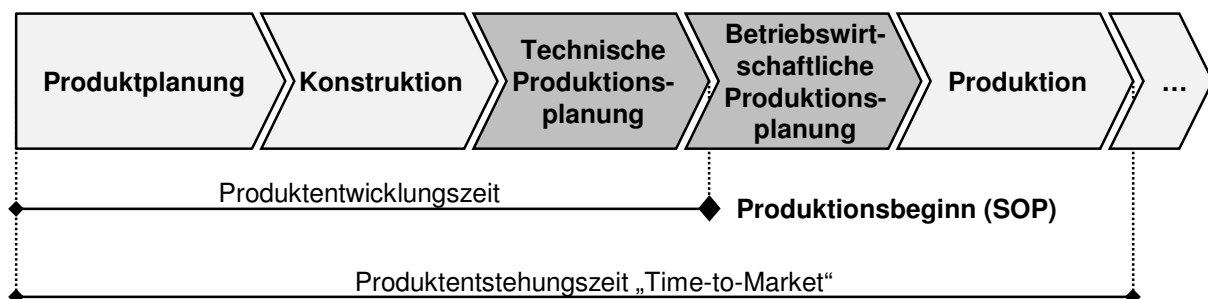


Abbildung 2-2: Technische und Betriebswirtschaftliche Produktionsplanung im PEP, in Anlehnung an (Weyand 2009)

Im Fokus der vorliegenden Arbeit steht die Technische Produktionsplanung. Diese umfasst in Anlehnung an *Zenner* (Zenner 2006) alle einmalig auftretenden Maßnahmen, die zur Planung und Realisierung eines Produktionssystems für die Fertigung von Serienprodukten notwendig sind. Die Aufgaben der Technischen Produktionsplanung werden anschließend in Kapitel 2.1.2 näher erläutert.

Die Aufgaben und Ziele der Betriebswirtschaftlichen Produktionsplanung werden in der Literatur auch mit den Begriffen der *Arbeitssteuerung* sowie der *Produktionsplanung und -steuerung (PPS)* bezeichnet. Das Ziel der Betriebswirtschaftlichen Produktionsplanung ist es, die aus den Absatzmärkten resultierenden Aufträge zu erfüllen. Dabei sind die Erzeugnisse termintreu, in der geforderten Menge, mit kurzen Durchlaufzeiten, geringen Beständen sowie mit gleichmäßig hoher Auslastung und hoher Flexibilität herzustellen (Nicolai et al. 1999, Wiendahl 2010). Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sind zahlreiche Aufgaben zu erfüllen, die im Laufe der Zeit umfangreicher geworden sind, und die heute die gesamte technische Auftragsabwicklung von der Angebotsbearbeitung bis zum letzten Versand der Erzeugnisse umfassen (Eversheim und Luczak 1999). Neben den Kernaufgaben der Programm- und Bedarfsplanung gehören dazu auch Netzwerkaufgaben der Beschaffung und Distribution (Supply Chain) sowie planende und steuernde Querschnittsaufgaben (Nicolai et al. 1999, Schuh et al. 2008).

Die Produktionsplanung wird aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht auch als *Arbeitsvorbereitung* bezeichnet und in die Teilabschnitte *Arbeitsplanung* und *Arbeitssteuerung* untergliedert (Eversheim 1989). Diese Begriffe und die ihnen zugeordneten Aufgaben sind inhaltlich weitgehend deckungsgleich mit dem in der Automobil- und Zulieferindustrie häufiger verwendeten Begriff der Produktionsplanung (Zenner 2006) und der hier getroffenen Unterscheidung in die Technische und Betriebswirtschaftliche Produktionsplanung. In Abbildung 2-3 werden die Begriffe zusammengefasst und gegenübergestellt.

PRODUKTIONSPLANUNG - auch Arbeitsvorbereitung	
TECHNISCHE PRODUKTIONSPLANUNG <i>Arbeitsplanung bestehend aus der Arbeitsablaufplanung und der Arbeitssystemplanung</i>	BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE PRODUKTIONPLANUNG <i>Arbeitssteuerung oder Produktionsplanung und -steuerung</i>

Abbildung 2-3: Begriffsklärung und Synonyme der Produktionsplanung (Eversheim 1989, Kiefer, Nicolai et al. 1999, Weyand 2009, Wiendahl 2010, Zenner 2006)

2.1.2 Aufgaben der Technischen Produktionsplanung

Unter Planung versteht Wöhe die „gedankliche Vorwegnahme zukünftigen Handelns durch Abwägen verschiedener Handlungsalternativen und Entscheidung für den günstigsten Weg“ (Wöhe und Döring 2010). Bezogen auf die Technische Produktionsplanung bedeutet dies die gedankliche Vorwegnahme der zu realisierenden Produktion oder Produktionslinie. Dies erfolgt unter dem Einsatz von etablierten Planungsmethoden, wie dem Technologie-Roadmapping, der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) und dem Wertstromdesign sowie deren Weiterentwicklung durch Reduzierung von Komplexität, Nutzung von Synergien und Erweiterung durch zusätzliche Planungsziele (Eversheim und Schuh 2005). Als günstigster Weg ist in der Technischen Produktionsplanung die wirtschaftlichste Alternative zu verstehen, die dann gegeben ist, „wenn die Kriterien Qualität, Termin, Kosten in ihrer Gesamtheit ein Optimum erreichen“ (Stiegler 1999). Aufgabe der Technischen Produktionsplanung ist es, die zur Herstellung eines Produktes notwendigen Arbeitsvorgänge und die dafür erforderlichen Betriebsmittel zu definieren (Weyand 2009). Die Handlungsalternativen der Technischen Produktionsplanung lassen sich daraus entsprechend ableiten und bestehen in der Wahl der Arbeitsvorgänge und der Betriebsmittel. Ein Arbeitsvorgang (AVG) bezeichnet dabei die „Bearbeitung, die zusammenhängend auf einer Maschine oder an einem Handarbeitsplatz ausgeführt wird“ (Spur 1994 #482: 149). Die Reihenfolge und Verkettung der Arbeitsvorgänge wird als Arbeitsvorgangsfolge (AVGF) bezeichnet und berücksichtigt die technischen sowie wirtschaftlichen Randbedingungen der Fertigung (Spur und Stöferle 1994). Die Begriffe Arbeitsvorgang und (Fertigungs-) Prozess sowie Arbeitsvorgangsfolge und (Fertigungs-) Prozesskette werden in dieser Arbeit synonym verwendet.

Eine Prozesskette beschreibt, welche Fertigungsprozesse in welcher Form eingesetzt und kombiniert werden müssen, um von einem definierten Ausgangszustand (Rohmaterial oder Halbzeug) zu einem definierten Endzustand (Endprodukt) zu gelangen. Die Auswahl und Kombination der verfügbaren Prozesse führt unter Berücksichtigung der gegebenen technologischen und wirtschaftlichen Randbedingungen zu alternativen Prozessketten. Insbesondere bedingt die Wahl bestimmter Fertigungsverfahren den Einsatz anderer Verfahren, um in der Summe der Prozesskette das gewünschte Produkt mit den definierten Eigenschaften fertigen zu können.

Ausgangspunkt für die Definition von Fertigungsprozessketten in der Technischen Produktionsplanung ist die Technologieplanung, deren Ziel darin besteht, das für das Unternehmen verfügbare Technologiespektrum langfristig optimal zu gestalten (Eversheim und Schuh 2005). Die Technologieplanung ist Bestandteil des Technologiemanagements und unterteilt sich in die strategische und operative Technologieplanung (Eversheim 1996). Bei der strategischen Technologieplanung steht die Effektivität der eingesetzten Technologien im Vordergrund. Sie muss demnach beantworten, welche Technologien benötigt werden, um zukünftige Produktanforderungen fertigungstechnisch zu realisieren. Eine erfolgreiche strategische Technologieplanung ist demnach eine Voraussetzung für die langfristige Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit (Eversheim 1996). Sie geht der Konstruktion und der Technischen Produktionsplanung voraus und verfolgt das Ziel, die Produkte und Technologien langfristig zu synchronisieren (Fallböhrmer 2000).

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der operativen Technologieplanung und den damit verbundenen Aufgaben der Technischen Produktionsplanung. Bei der operativen Technologieplanung steht der effiziente Einsatz der Technologien im Vordergrund (Eversheim 1996). Sie beginnt in der Konstruktionsphase mit der groben Festlegung des Ausgangsteils, der Auswahl der Werkstoffe sowie der Bestimmung infrage kommender Fertigungsverfahren und erstreckt sich auf das Aufgabengebiet der Technischen Produktionsplanung (Fallböhrmer 2000). In der Technischen Produktionsplanung wird der Einsatz der relevanten Fertigungsverfahren weiter ausgearbeitet, wobei folgende Tätigkeiten durchzuführen sind (Fallböhrmer 2000):

- Bestimmen des Rohteils;
- Festlegen der Fertigungsverfahren;
- Ausarbeiten der Prozessketten.

Die Komplexität der Technischen Produktionsplanung in Bezug auf die Definition und Auswahl der Prozessketten besteht darin, dass für die Herstellung eines Bauteils eine Vielzahl alternativer Fertigungsverfahren und Kombinationen von Fertigungsverfahren zum Einsatz kommen kann (Eversheim und Schuh 2005). Im Sonderforschungsbereich 361 (SFB 361) wurden daher Modelle und Methoden zur regelgestützten Generierung und Bewertung von Technologieketten entwickelt. Bei der Auswahl, Kombination und Bewertung von Technologien und Technologieketten soll der Technologieplaner durch ein aus drei Modulen bestehendes Softwaresystem unterstützt werden. Kernmodul der Softwareunterstützung ist eine Technologieda-

tenbank (TECHBASE), die strukturiert Informationen zu den technischen, wirtschaftlichen und organisatorischen Hauptmerkmalen der Fertigungstechnologien enthält. Zunächst werden mit der Software INNOTECH+ Technologien ermittelt, die dazu geeignet sind, ein Bauteil mit definierten Attributen herzustellen. Dazu werden die Bauteilattribute mit den in der Technologiedatenbank hinterlegten Leistungsmerkmalen abgeglichen. Im Anschluss daran werden aus geeigneten Technologien Technologieketten generiert, die an ein Bewertungssystem (RATECH) übergeben werden. Die Planung der Technologieketten erfolgt soweit unabhängig von unternehmensspezifischen Restriktionen (Eversheim und Schuh 2005). Abbildung 2-4 stellt beispielhaft alternative Technologieketten für zwei Gestaltvarianten einer Antriebswelle dar.

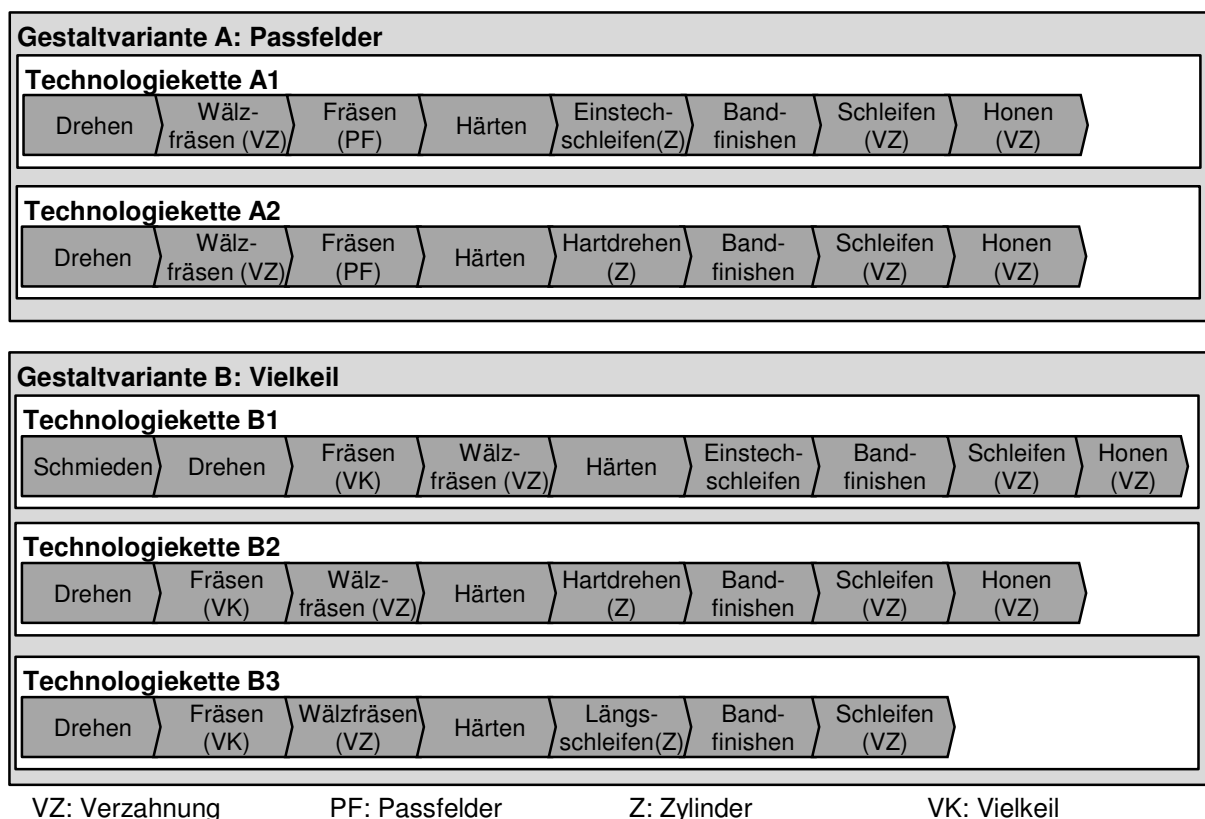


Abbildung 2-4: Alternative Technologieketten für eine Antriebswelle (Eversheim und Schuh 2005)

Aufgabe der Technischen Produktionsplanung ist es, die so generierten Technologieketten in nachfolgenden Schritten in das Unternehmensumfeld zu integrieren und weiter auszuarbeiten. Dabei werden abhängig vom Planungsstand unterschiedliche Betrachtungsebenen eingenommen. Ausgangspunkt sind die Technologieketten, die nach *Klocke et al.* wie folgt definiert werden (Klocke et al. 1998):

„Eine Technologiekette ist eine abstrakte, produktionsmittelunabhängige Kombination von Fertigungstechnologien in einer definierten Reihenfolge zur Herstellung eines Funktionsträgers. Der Funktionsträger kann dabei ein Einzelteil, eine Produktkomponente oder ein Produkt sein.“

In einem nächsten Schritt werden den abstrakten Technologieketten geeignete Produktionsmittel zugeordnet. Hierfür werden die Eigenschaften des zu fertigenden Bauteils mit den Fähigkeiten der zur Verfügung stehenden Produktionsmittel abgeglichen. Dabei wird eine Produktionsmittelmatrix generiert, in der allen Prozessen einer Technologiekette die zur Verfügung stehenden Produktionsmittel zugeordnet werden. Diese Sequenzen direkt-wertschöpfender Fertigungsprozesse mit Produktionsmittelbezug werden in Anlehnung an Trommer als Fertigungsprozessketten bezeichnet. Die geeigneten Produktionsmittel können in der Produktionsmittelmatrix ausgewählt und entlang der Technologiekette zu alternativen Fertigungsprozessketten kombiniert werden (Trommer 2001).

Abschließend werden die technologischen Fertigungsprozessketten um weitere, unterstützende Prozesse zu Handhabung, Transport, Prüfung und Lagerung der Bauteile ergänzt. Hierfür werden auf Basis bauteilneutraler und bauteilspezifischer Anforderungen sowie der Anforderungen der bereits definierten Fertigungsprozesskette geeignete Betriebsmittel bestimmt. Diese Sequenzen technologischer und unterstützender Prozesse werden als Fertigungsfolgen bezeichnet (Fallböhrer 2000, Trommer 2001). Erst im Anschluss an die Auswahl einer bevorzugten Fertigungsfolge werden die einzelnen Fertigungsprozesse weiter optimiert und hinsichtlich der Werkzeugauswahl, der Generierung der Werkzeugbahn und der Optimierung von Prozessparametern ausgearbeitet (Klocke et al. 2000). In Abbildung 2-5 sind die beschriebenen Zusammenhänge zusammengefasst.

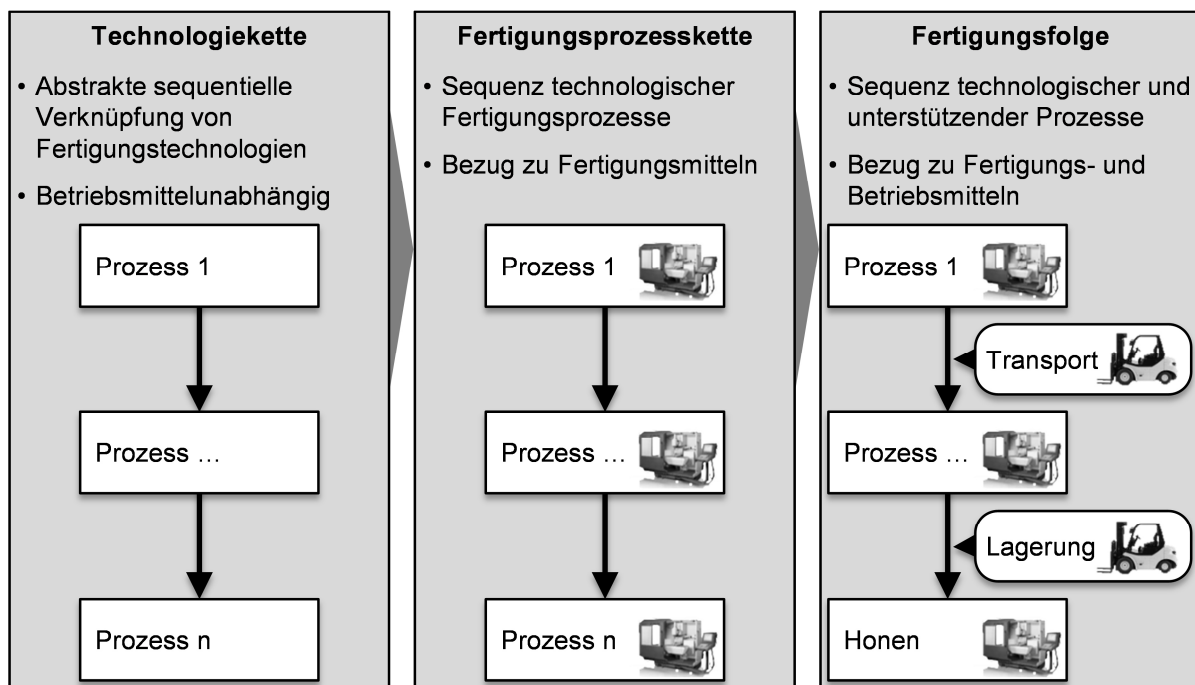


Abbildung 2-5: Betrachtungsebenen der Technischen Produktionsplanung, in Anlehnung an (Fallböhrer 2000, Trommer 2001)

2.2 Energieeinsatz in der industriellen Fertigung

2.2.1 Begriffsdefinitionen

Energie ist die Fähigkeit eines Systems, Arbeit zu verrichten und stellt eine Zustandsgröße dar. Die Verfügbarkeit von Energie (E) ist die Voraussetzung, um Änderungen an Systemen und Stoffen durchzuführen, wie etwa die Umwandlung von Rohstoffen in ein gewünschtes Material oder die Umformung von Werkstücken. Die einem System in einer bestimmten Zeit ($dt = t_1 - t_0$) zugeführte oder entnommene Energie (dE) wird als Leistung (P) bezeichnet.

$$P(t) = \frac{dE}{dt} \quad (1)$$

$$E = \int_{t_0}^{t_1} P(t) dt \quad (2)$$

Die SI-Einheit der Energie ist das Joule [J]. Die Leistung wird standardmäßig in Watt [W] angegeben. Beide Einheiten lassen sich auf Standardeinheiten des Internationalen Einheitensystems (SI) zurückführen. In der industriellen Praxis wird der Energieverbrauch, insbesondere die elektrische Energie, in Kilowattstunden [kWh] angegeben.

$$1 J = 1 W \cdot s = 1 \frac{kg \cdot m^2}{s} \quad (3)$$

Energie ist stets an das Vorhandensein eines Energieträgers gebunden. Als Energieträger werden alle Quellen oder Stoffe bezeichnet, in denen Energie mechanisch, thermisch, chemisch oder physikalisch gespeichert ist (Müller et al. 2009). Die in der Natur vorkommenden Energieträger werden umgewandelt und als sekundäre Energieträger bereitgestellt, die in der industriellen Fertigung genutzt werden können. In der Energieumwandlungskette wird die Energie in Abhängigkeit von ihrem Zustand und ihrer Funktion als Primär-, Sekundär-, End- oder Nutzenergie bezeichnet (Winje und Witt 1991). Abbildung 2-6 stellt die Begriffe zusammenfassend dar.

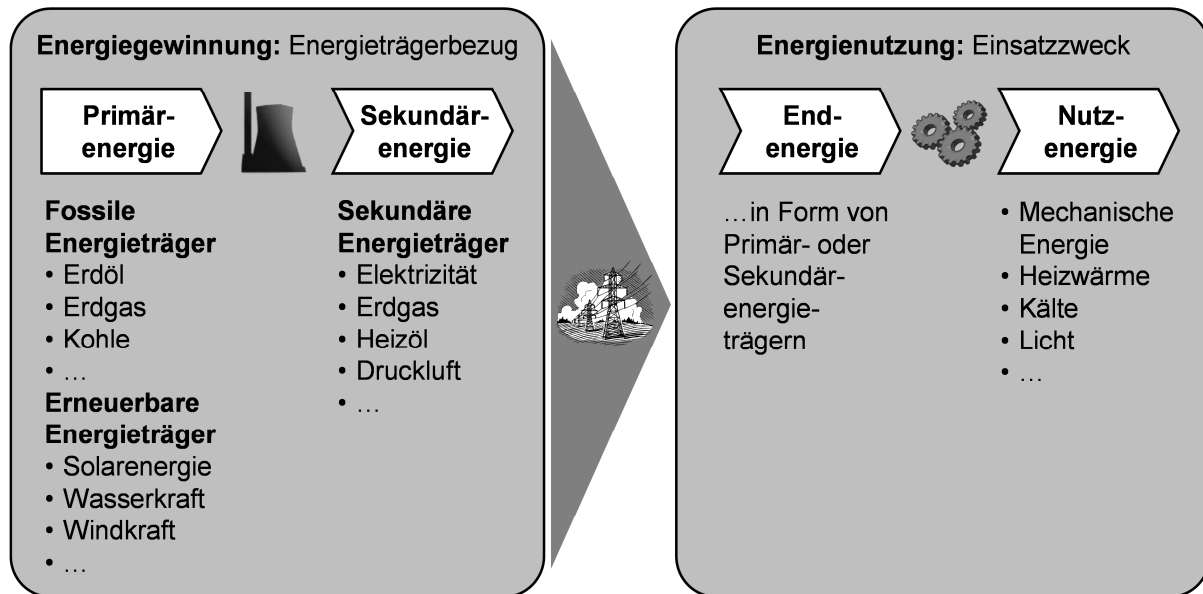


Abbildung 2-6: Energieumwandlungskette, in Anlehnung an (Müller et al. 2009, Winje und Witt 1991)

Die direkt in der Natur vorkommenden Energieträger, zum Beispiel Kohle, Rohöl oder Erdgas, werden als Primärenergieträger bezeichnet. Häufig werden diese umgewandelt, um die enthaltene Energie für technische Anwendungen in der industriellen Fertigung nutzbar zu machen, und um beispielsweise eine Werkzeugmaschine mit elektrischem Strom betreiben zu können. Die umgewandelten Energieträger wiederum werden als Sekundärenergieträger bezeichnet. Einer der am häufigsten in der industriellen Fertigung eingesetzten Sekundärenergieträger ist elektrischer Strom.

Unter *Endenergie* wird die Energiemenge aller Energieträger verstanden, die vom Endverbraucher bezogen und energetisch genutzt wird, wie zum Beispiel der aus dem Stromnetz entnommene elektrische Strom zum Betrieb einer Fertigungseinrichtung oder die zum Betrieb eines Ofens eingesetzte Menge Erdgas. Die Energiekosten eines Verbrauchers werden üblicherweise auf Basis dieses Endenergieverbrauchs bestimmt, der für Unternehmen daher gut nachvollziehbar ist und einfach wirtschaftlich bewertet werden kann (Müller et al. 2009).

Die bezogene Endenergie wird vom Endverbraucher mithilfe von Geräten und Anlagen meist erneut umgewandelt. Dabei kann die Energie in die letztendlich benötigte Energieform umgewandelt werden. Als wichtigste Energieformen sind die elektrische, mechanische, thermische und chemische Energie zu nennen. Die nach der letzten Umwandlung vom Verbraucher zur Erreichung seiner Ziele eingesetzte Energiemenge wird als *Nutzenergie* bezeichnet (VDI 4661, Winje und Witt 1991). Beispielsweise wird in einem Fertigungsunternehmen die bezogene Endenergie mittels Werkzeugmaschinen in mechanische Energie umgewandelt, die zur zerspanenden Bearbeitung benötigt wird.

In allen Schritten der Energieumwandlungskette treten Wandlungs- und Transportverluste auf, sodass bei jedem Schritt ein Teil der ursprünglichen Primärenergiemenge verloren geht. Das heißt, dass diese nicht mehr für die Deckung der Bedürfnisse der Endverbraucher zur Verfügung steht. In den

Umwandlungsketten für unterschiedliche Endenergieträger (zum Beispiel elektrischer Strom, Gas, Druckluft etc.) werden unterschiedlich große Anteile der Primärenergie umgewandelt und dem Endverbraucher zur Nutzung bereitgestellt. Ein direkter Vergleich des Energiegehaltes verschiedener Endenergieträger ist daher aus Sicht der Energieeffizienz nicht zulässig, da der Primärenergieverbrauch deutlich abweichen kann. Die Verluste in den Umwandlungsketten können über Primärenergiefaktoren berücksichtigt werden, die ausdrücken, wie viele Einheiten Primärenergie bei einer bestimmten Umwandlungskette benötigt werden, um eine Einheit Endenergie bereitzustellen (Müller et al. 2009).

Die Menge der eingesetzten Energie wird allgemein als *Energieverbrauch* bezeichnet (DIN EN ISO 50001). Im engeren Sinne wird der Begriff *Energieverbrauch* auch benutzt, um eine in der Vergangenheit tatsächlich verwendete Energiemenge zu benennen. Im Gegensatz dazu wird für eine Prognose der in der Zukunft verwendeten Energiemenge der Begriff *Energiebedarf* angewandt. Häufig werden Energieverbräuche und -bedarfe auf bestimmte Größen bezogen, um Aussagen hinsichtlich der Bewertung der eingesetzten Energiemengen zu treffen. Auf Bezugsgrößen abgebildete Energiemengen werden als *spezifischer Energieverbrauch* bezeichnet (Winje und Witt 1991). Gängige Bezugsgrößen in der industriellen Fertigung sind Produktionsmengen, Betriebsstunden oder das Zerspanvolumen. In Kapitel 2.2.2 wird näher auf die in dieser Arbeit verwendeten Kennzahlen zur Bewertung des Energiebedarfs eingegangen.

2.2.2 Kennzahl zur Bewertung der Energieeffizienz von Prozessketten

Unter Energieeffizienz versteht man allgemein das Verhältnis von einem Energieaufwand zu einem erreichten Nutzen (DIN EN ISO 50001). Ein Prozess ist effizient, wenn ein bestimmter Nutzen mit minimalem Energieaufwand erzielt wird.

Um die Energieeffizienz von Fertigungsprozessen und -prozessketten mithilfe einer geeigneten Kennzahl beurteilen zu können, ist es notwendig, den zu berücksichtigenden Energieaufwand, den erreichten Nutzen sowie die Art des Verhältnisses beider Größen konkret zu definieren. In Anlehnung an die Definition der Produktivität wird der erzielte Nutzen auf den energetischen Aufwand bezogen. Die allgemeine Definition der Energieproduktivität lautet nach Gleichung (4) (Müller et al. 2009, Posch 2011):

$$\text{Energieproduktivität} = \frac{\text{Erzielter Nutzen}}{\text{Energetischer Aufwand}} \quad (4)$$

Die Definition verdeutlicht, dass die Energieproduktivität in Abhängigkeit von der Definition des erzielten Nutzens und des energetischen Aufwands unterschiedliche

Bedeutungen haben kann (European Commission 2009). Eine konkretere Definition des Nutzens und Aufwands von Prozessen und Prozessketten ist daher notwendig.

Unter dem Nutzen, der in der Fertigung erzielt werden soll, versteht man im Allgemeinen die Herstellung von Produkten, die am Markt abgesetzt werden können. Der energetische Nutzen kann daher als Ausbringung von Gutteilen definiert werden. Um den energetischen Aufwand ebenfalls konkret bestimmen zu können, ist eine klare Definition der Systemgrenzen erforderlich, die der Ermittlung zugrunde gelegt werden. Dadurch wird die Vergleichbarkeit der Kennzahl bei der Analyse verschiedener Untersuchungsobjekte gewährleistet. Die dieser Arbeit zugrunde liegenden Systemgrenzen werden in Kapitel 5.1.1 näher erläutert. Die kleinsten in dieser Arbeit betrachteten Untersuchungsobjekte sind einzelne technologische Fertigungsprozesse, deren Ausbringungsmenge dem verursachten energetischen Aufwand gegenübergestellt wird. Gleichung (5) fasst die spezifizierte Definition der Energieproduktivität für einen Fertigungsprozess zusammen.

$$\text{Energieproduktivität} = \frac{\text{Ausbringungsmenge}}{\text{Energetischer Aufwand}} \quad (5)$$

Die Kennzahl gibt an, welche Ausbringungsmenge mit einem energetischen Aufwand erzeugt werden kann. In Unternehmungen wird jedoch häufig in Kalkulation, Kostenrechnung und Leistungsbeurteilung umgekehrt angegeben, welche Kosten oder Verbrauchsmengen durch die Herstellung einer bestimmten Ausbringungsmenge verursacht werden. Dieses Verhältnis wird durch die Energiemengenintensität ausgedrückt. Sie ist der Kehrwert der Energieproduktivität und kann als Kennzahl für die Energieeffizienz von Prozessen verwendet werden.

$$\text{Energiemengenintensität} = \frac{\text{Energetischer Aufwand}}{\text{Ausbringungsmenge}} \quad (6)$$

Die Energiemengenintensität einer Prozesskette wird bestimmt, indem die Summe des energetischen Aufwands aller Einzelprozesse zur Herstellung eines Funktionsträgers gebildet und auf die Ausbringungsmenge der gesamten Prozesskette bezogen wird. Dem ökonomischen Prinzip folgend wird darauf abgezielt, den Energiebedarf einer Prozesskette bezogen auf eine vorgegebene Ausbringungsmenge zu minimieren (Minimalprinzip). Als Kennzahl für die Beurteilung der Energieeffizienz von Fertigungsprozessen und -prozessketten wird in dieser Arbeit die Energiemengenintensität verwendet. Der energetische Aufwand bezogen auf die Ausbringungsmenge 1 wird in der Arbeit als werkstückbezogener Energiebedarf bezeichnet.

3 Stand der Forschung und Technik

Die Analyse des Energieverbrauchs von Fertigungsprozessen ist Gegenstand einer Vielzahl wissenschaftlicher Arbeiten. Die Ziele der Untersuchungen reichen dabei von Effizienzbewertungen der eingesetzten Maschinen und Anlagen bis zur Erstellung von Ökobilanzen der Verfahren. Für die vorausschauende Planung des Energiebedarfs besteht die Herausforderung darin, die Analyseergebnisse in ein anwendungsorientiertes Prognosemodell zu überführen.

3.1 Untersuchungen zum Energiebedarf von Fertigungsprozessen

3.1.1 Gliederung des Untersuchungsraumes

Welchen Energiebedarf ein Fertigungsprozess erfordert, kann nur mithilfe einer klaren Gliederung des Untersuchungsraumes sinnvoll beantwortet werden. Die Gliederung ist umso wichtiger, wenn unterschiedliche Fertigungsprozesse mit einem vergleichbaren Vorgehen untersucht werden sollen. Schulz et al. gliedern den Betrachtungsraum bei ihren Untersuchungen zur Analyse des Energie- und Ressourcenverbrauchs von Fertigungsprozessen, wie in Abbildung 3-1 dargestellt, in die drei Teilbilanzräume *Physikalische Wirkstelle*, *Werkzeugmaschine* und *Prozessperipherie*. Der gesamte Energiebedarf eines Fertigungsprozesses kann nach Gleichung (7) als Summe der Energiebedarfe in den Teilbilanzräumen berechnet werden (Schulz et al. 1999).

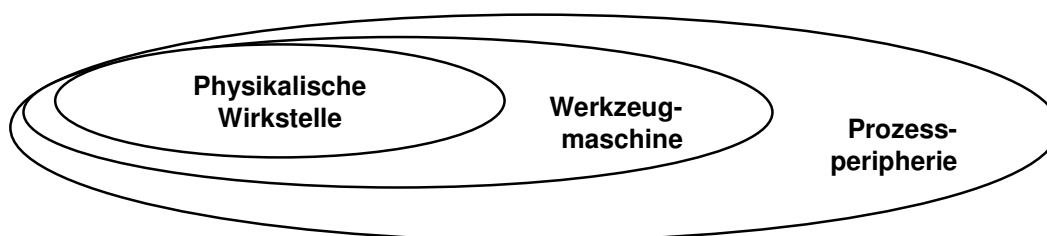


Abbildung 3-1: Teilbilanzräume eines Fertigungsprozesses, nach (Schiefer 2000, Schulz et al. 1999)

$$E_{\text{Fertigungsprozess}} = E_{\text{Wirkstelle}} + E_{\text{Werkzeugmaschine}} + E_{\text{Peripherie}} \quad (7)$$

Der Energiebedarf im Teilbilanzraum *Physikalische Wirkstelle* beschreibt die theoretisch notwendige Energie, um die gewünschte Gestaltänderung am Werkstück zu erzeugen. Die Wirkenergie wird auch als *Nutzenergie* (Wolfram 1986) oder *ideeller Energiebedarf* (Stiens 2000) bezeichnet. Für spanende Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter und unbestimmter Schneide berechnet Reeber (Reeber 1980) die Wirkenergie auf Grundlage der Schnittkraftgleichung von Victor und Kienzle

(Kienzle 1952, König et al. 1982) mit empirisch ermittelten spezifischen Schnittkraftwerten k_c . Für das Schleifen kann mit entsprechenden Korrekturfaktoren ebenfalls eine Abschätzung der Wirkenergie erfolgen (Preger und Paucksch 1977, Reeber 1980, Schiefer 2000). Aufgrund von Unsicherheiten im Zusammenhang mit der unbekanntem Schleifkorngeometrie kann es jedoch bei der Berechnung zu Abweichungen von -50 bis +100 % kommen (Paucksch 1996). Ansätze für die Berechnung der Wirkenergie existieren auch für andere Verfahren. Reeber gibt für abtragende Fertigungsverfahren entsprechende Berechnungsvorschriften für die Ermittlung der Wirkenergie an. In Anbetracht der Vielzahl zu ermittelnder Größen schätzt Wolfram die Berechnung jedoch als zu aufwendig ein (Wolfram 1986). Umfangreiche Berechnungen der Wirkenergie für Erwärmungs- und Umformprozesse unter Berücksichtigung der jeweiligen Prozessparameter sind ebenso bei Stiens zu finden (Stiens 2000).

Larek stellt in seiner Arbeit fest, dass sich die Schnittkraftgleichung nach Victor und Kienzle (Kienzle 1952) aufgrund von Umwandlungsverlusten des elektrischen Antriebs nicht dazu eignet, den Einfluss der Spindeldrehzahl einer Drehmaschine auf den Energiebedarf abzubilden. Da die Höhe der Umwandlungsverluste durch die Bauweise der Antriebskomponenten bedingt ist, muss der Wirkungsgrad im Einzelfall experimentell ermittelt werden (Larek 2012). Die Wirkenergie macht bei der spanenden Bearbeitung in der Regel nur einen geringen Anteil am gesamten Energieverbrauch des Fertigungsprozesses aus, wobei der Anteil an der Gesamtenergie von den eingesetzten Maschinen und Anlagen sowie von der ausgeführten Bearbeitungsaufgabe abhängig ist (Abele et al. 2010, Dahmus und Gutowski 2004, Kuhrke et al. 2010, Schulz et al. 1999, Wolfram 1986).

Der tatsächliche Energiebedarf von Fertigungsprozessen übersteigt die Wirkenergie deutlich und wird wesentlich vom Energiebedarf der Werkzeugmaschine bestimmt. Der Energiebedarf der eingesetzten Werkzeugmaschinen hängt von der Art und Anzahl der verbauten Aggregate und deren Wirkungsgraden ab. Messungen des Energiebedarfs können am Hauptanschluss der Maschine oder direkt an einzelnen Aggregaten durchgeführt werden (Gontarz et al. 2012). Dabei ist zu unterscheiden, ob die Wirkenergie separat ermittelt wird (Schiefer 2000) oder in der Messung des Energiebedarfs der Werkzeugmaschine enthalten ist (Swat et al. 2014). Ansätze zur Beschreibung des Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen werden in Kapitel 3.1.2 vorgestellt.

In aller Regel werden Fertigungsprozesse durch periphere Anlagen unterstützt, die zum Beispiel Druckluft, Kühlschmierstoffe und andere Medien, wie etwa Elektrolytlösungen bei der elektrochemischen Bearbeitung, bereitstellen, die der Durchführung und Unterstützung der Fertigungsprozesse dienen. Der Energiebedarf eines Fertigungsprozesses geht damit auch über den Energiebedarf der eingesetzten Werkzeugmaschinen hinaus. Häufig werden die Hilfs- und Prozessmedien von zentralen Anlagen aufbereitet und für die einzelnen Fertigungsprozesse bereitgestellt, sodass die Zuordnung des Energiebedarfs zu den Fertigungsprozessen eine wesentliche Herausforderung darstellt. Ansätze zur Bestimmung des Energieverbrauchs der Prozessperipherie sind Gegenstand von Kapitel 3.1.3.

3.1.2 Beschreiben des Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen

Kordonowy, Gutowski und Dahmus untersuchen in ihren Arbeiten die Leistungsaufnahme und den Energieverbrauch am Beispiel von Fräsmaschinen mit unterschiedlichem Automatisierungsgrad und Alter (Dahmus und Gutowski 2004, Gutowski et al. 2006, Kordonowy 2002). Dabei stellen sie fest, dass sich die Leistungsaufnahme der untersuchten Maschinen beim Einschalten, während der Laufzeit und bei der Bearbeitung in Abhängigkeit vom Alter und dem Automatisierungsgrad stark unterscheidet. Mit dem Ziel, trotzdem eine grobe Abschätzung des Energieverbrauchs für die Fräsprozesse durchführen zu können, wird der spezifische Energieverbrauch der gesamten Maschine bezogen auf das zerspante Materialvolumen ermittelt. Dafür wird auf Basis der durchgeführten Leistungsmessungen, einer Abschätzung der Zerspanungsrate und der Annahme von Nutzungsszenarien der Maschinen der spezifische Energieverbrauch ermittelt. Eine Einteilung der Kennwerte erfolgt bezogen auf die Bearbeitung von Aluminium und Stahl sowie für vier Maschinenklassen, die nach dem Grad der Automatisierung unterschieden werden (Dahmus und Gutowski 2004). Abbildung 3-2 stellt die Ergebnisse der Leistungsmessungen an einem Fräsbearbeitungszentrum dar.

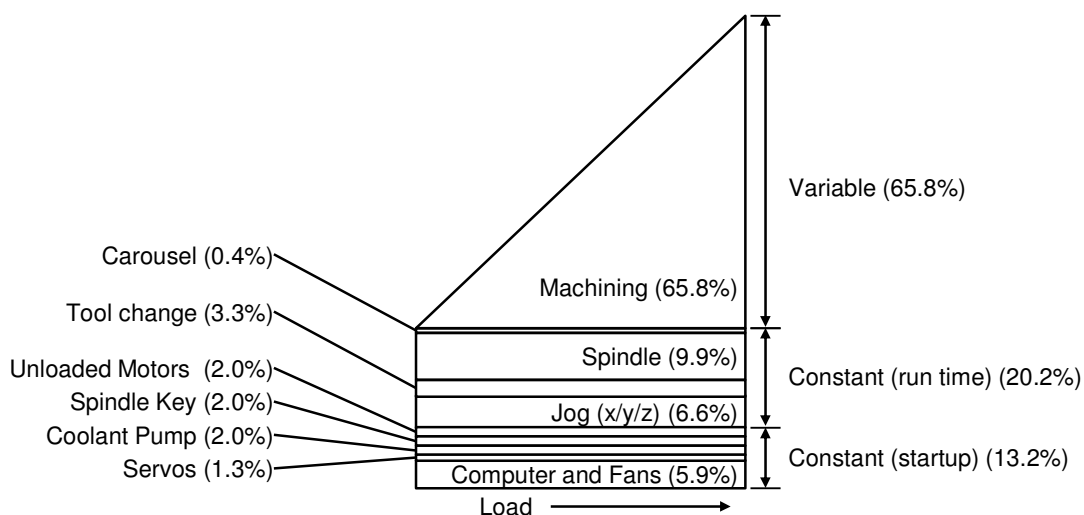


Abbildung 3-2: Aufschlüsselung des Energieverbrauchs eines Fräsbearbeitungszentrums (Kordonowy 2002)

Ausgehend von der Beobachtung, dass die Leistungsaufnahme und damit der Energiebedarf von Werkzeugmaschinen maßgeblich von der Art und Dauer der eingenommenen Betriebszustände bestimmt wird, schlagen Dietmair et al. ein zustandsbasiertes Modell zur Abbildung und Optimierung des Energieverbrauchs vor (Dietmair und Verl 2009, Dietmair et al. 2008). Die Anzahl der berücksichtigten Betriebszustände kann nach dem Ziel der Modellerstellung und der erforderlichen Modellgenauigkeit festgelegt werden. Im linken Teil der Abbildung 3-3 sind Leistungskennwerte für insgesamt neun Betriebszustände ermittelt worden. Dabei werden für die Betriebszustände konstante Leistungsniveaus angenommen. Eine

feinere Modellierung der Leistungsaufnahme für jeden Zustand in Abhängigkeit von Beschleunigung und Prozesskräften ist jedoch möglich.

Um das Leistungsprofil und den Energiebedarf zu berechnen, ist die Kenntnis des Nutzungsprofils erforderlich, das die Reihenfolge und die Dauer der Betriebszustände beschreibt. Ein Nutzungsprofil ist in Abbildung 3-3 abgebildet. Anwendungsmöglichkeiten für den Modellierungsansatz sind die Optimierung im Betrieb der Werkzeugmaschinen, die Optimierung von Bearbeitungsparametern, die Effizienzbewertung und Komponentenoptimierung sowie die Bewertung von Verfahrensalternativen (Dietmair et al. 2008).

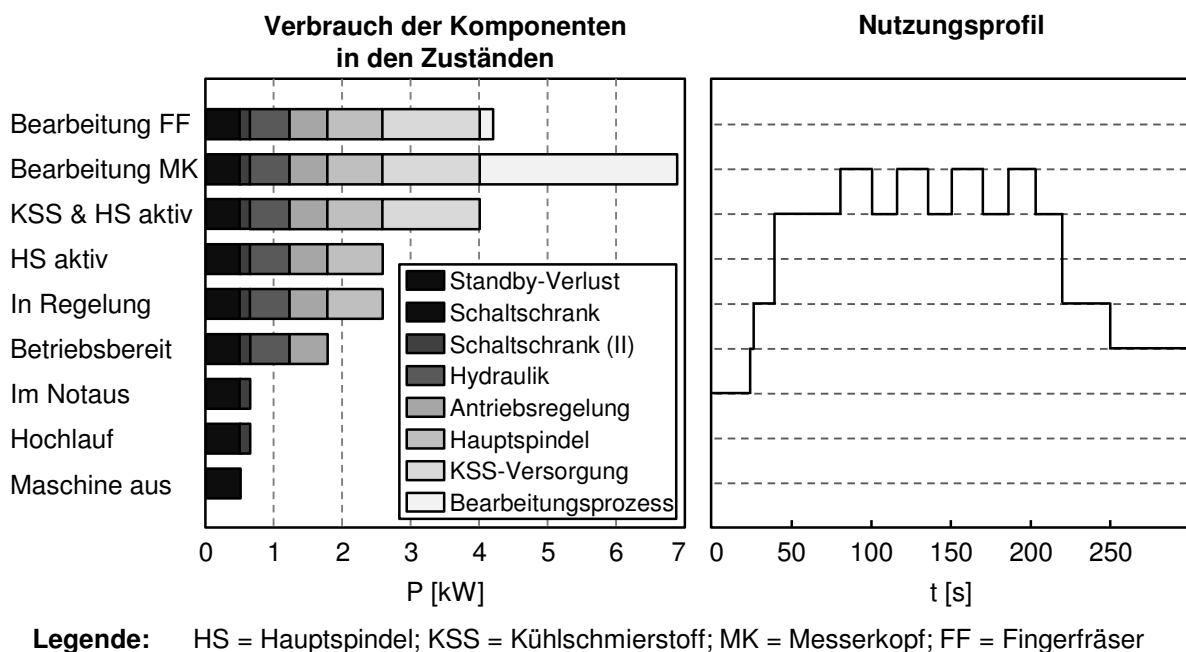


Abbildung 3-3: Leistungsaufnahme einer Fräsmaschine in Abhängigkeit von den Betriebszuständen (links) und Nutzungsprofil für den Bearbeitungsfall Planschruppen in Abhängigkeit von den Betriebszuständen (rechts), nach (Dietmair und Verl 2009, Dietmair et al. 2008)

Kuhrke erarbeitet in seiner Dissertation eine Methode zur Bewertung des Energie- und Medienbedarfs für spanende Werkzeugmaschinen (Kuhrke 2011). Das Ziel des Vorgehens besteht darin, in der Beschaffungsphase von spanenden Werkzeugmaschinen eine Prognose des Energie- und Medienbedarfs zu ermöglichen, und diese somit als Kriterium in die Auswahl des Maschinenherstellers einfließen zu lassen. Abbildung 3-4 zeigt den Ablauf des Konzeptes zur Bewertung des Energie- und Medienbedarfs. Ein wichtiger Aspekt der vorgestellten Methode ist ein erweiterter Informationsaustausch zwischen dem Maschinenbetreiber bzw. Anwender einerseits und dem Maschinenhersteller andererseits. Insbesondere ersterer muss Vorgaben zur Nutzungsweise der Maschine, zum bearbeitenden Bauteil und zur Medienanbindung machen (1). Der Maschinenhersteller seinerseits untergliedert seine Maschinen in einzelne Bedarfsgruppen, wie Antriebsverband, Hydraulik und Schaltschrankkühlung. Die Angaben des Anwenders dienen dem Maschinenhersteller anschließend als Grundlage zur Erstellung von Nutzungsprofilen für die einzelnen Bedarfsgruppen

der Maschine (2). Bei der Ausarbeitung der Methode geht Kuhrke davon aus, dass in der Angebotsphase in der Regel keine Maschine verfügbar ist, an der umfangreiche Verbrauchsmessungen durchgeführt werden können. Dementsprechend beruht die Quantifizierung des Energie- und Medienbedarfs auf Modellen für die einzelnen Bedarfsgruppen der Maschine, die eine Prognose der Verbrauchswerte ermöglichen (3). Für die Parametrierung der entwickelten Modelle werden Datenblattangaben von Lieferanten der Bedarfsgruppen sowie Basismessungen an baugleichen Referenzmaschinen genutzt. Indem die Bedarfsgruppen aufsummiert werden, wird der Energie- und Medienbedarf für die gesamte Maschine ermittelt. Die Ergebnisse der Bedarfsprognose meldet der Maschinenhersteller schließlich bei der Angebotsabgabe an den Anwender (4).

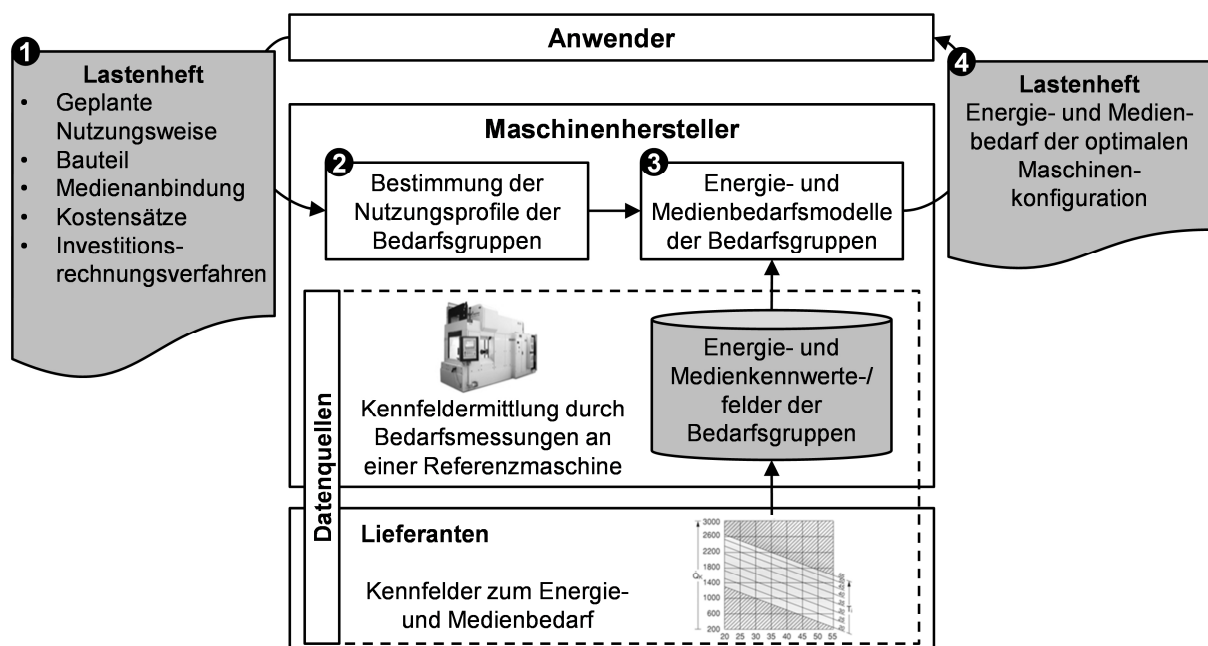


Abbildung 3-4: Konzept zur Bewertung des Energie- und Medienbedarfs im Use-case „Spezialisiert“ (Kuhrke 2011)

Eine Standardisierung des Informationsaustausches und der Vorgehensweise zur Bedarfsermittlung ist Teil der Methode. Auf diese Weise soll die Vergleichbarkeit von Herstellerangaben sichergestellt werden, sodass auch die Vergleichbarkeit der angegebenen Energie- und Medienbedarfe gewährleistet werden kann. Es wird beispielsweise eine Vorlage zum Erfassen des Produktionsprofils bereitgestellt, in welcher der Maschinenanwender Angaben über die erwartete Dauer der vorgegebenen Maschinenzustände macht.

Bei der Validierung der Methode an einer Demonstratormaschine werden Abweichungen zwischen der prognostizierten und der gemessenen Leistungsaufnahme einzelner Bedarfsgruppen festgestellt. Der Energie- und Medienbedarf kann aufgrund von Vereinfachungen bei der Erstellung der Modelle nicht absolut genau ermittelt werden. Da jedoch die Anwendung der gleichen Modelle und ein standardisiertes

Vorgehen vorausgesetzt werden, schätzt Kuhrke die Vergleichbarkeit der Angaben von Maschinenherstellern als gegeben ein.

Zein stellt in seiner Arbeit ein Vorgehen zur Quantifizierung und Bewertung der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen vor, mit dessen Hilfe Verbesserungen hin zu einem idealen Energieverbrauchsniveau von Werkzeugmaschinen angestoßen werden sollen (Zein 2012). Dabei leitet er aus der empirischen Untersuchung und dem Vergleich des Energieverbrauchs und der Materialabtragsrate von 30 Fräsmaschinen einen Maßstab für die Effizienz der untersuchten Maschinen ab. Die methodische Grundlage dafür bildet eine aus der Produktionstheorie stammende Produktionsfunktion unter Berücksichtigung der Materialabtragsrate [mm^3/s] und dem spezifischen Energieverbrauch [Wh/mm^3] der untersuchten Maschinen. Das Vorgehen umfasst neben der Festlegung des Effizienzzieles und der Messung der aktuellen Energieleistung gleichermaßen eine Analyse der Leistungsaufnahme sowie des Energieverbrauchs der untersuchten Werkzeugmaschinen auf Komponentenebene. Diese Analyse bildet den Ausgangspunkt für den letzten Schritt des Vorgehens, in dem Verbesserungsstrategien und -maßnahmen definiert werden.

Holkup et al. legen exemplarisch an drei Werkzeugmaschinen dar, inwiefern Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen umgesetzt werden können. Ihre Untersuchungen enthalten Beispiele für die Reduktion des Druckluftverbrauchs, die Optimierung des Energiebedarfs für eine Anlage zur Kühlschmierstoffbereitstellung und den Austausch einer Antriebsspindel (Holkup et al. 2013).

Die Forschergruppe 1088 (ECOMATION, 2009-2015) der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) untersucht in ihren Arbeiten die Steuerung des Energieverbrauchs in der Fertigung mit dem Ziel einer Steigerung der Energieeffizienz durch Automatisierung. Der Ansatz geht davon aus, dass ein wesentliches, bisher nicht erschlossenes Potenzial zur Steigerung der Energieeffizienz in der Fertigung darin besteht, Werkzeugmaschinen und Anlagen in der Betriebsphase energieoptimal zu steuern. Vor diesem Hintergrund werden Simulationsmodelle für Werkzeugmaschinen und Anlagen entwickelt, die den Energieverbrauch in Abhängigkeit vom tatsächlichen Maschinenzustand und den Prozessbedingungen bestimmen können. Die Herangehensweise basiert im Kern auf den von Dietmair vorgestellten zustandsbasierten Energieverbrauchsprofilen für Werkzeugmaschinen (Dietmair et al. 2008).

Aus den gestellten Anforderungen der Einfachheit, Wiederverwendbarkeit und Anpassbarkeit der Detaillierung wird ein modularer und skalierbarer Aufbau parametrierbarer Modelle abgeleitet (Heisel und Braun 2013a, Verl et al. 2011a). Das Vorgehen sieht vor, Werkzeugmaschinen als Systeme von Komponentenmodellen abzubilden. Am Anfang stehen dabei grobe Modelle, die ähnlich wie bei Kuhrke (Kuhrke 2011) mithilfe von Katalogdaten, generischen Modellen und Erfahrungswissen erstellt werden. Anhand von Energiemonitoring und einem Soll-Ist-Vergleich der Prognose- und Messwerte werden die Modelle kontinuierlich verbessert (Eberspächer et al. 2014, Verl et al. 2011b). Um auch das Zusammenspiel der Maschinenkomponenten und den Einfluss auf den Energieverbrauch der gesamten

modellierten Maschine abschätzen zu können, werden Steuerungsalgorithmen ebenso berücksichtigt (Eberspächer et al. 2014).

Ziel des Projektes ist es, die Erstellung und Anwendung der Energieverbrauchsmodelle durch Automatisierung möglichst effizient zu gestalten. Zu diesem Zweck werden Ansätze zur automatisierten Verknüpfung der Verbrauchsmodelle mit Steuerungsinformationen und dem automatisierten Austausch von Energieinformationen in einem Produktionssystem erarbeitet. Für den standardisierten Austausch von Energieinformationen wird eine Methode entwickelt, mit der auf Komponentenebene (Energy Information Description Language – EIDL) und auf Fabrikebene (F-EIDL) Informationen, wie etwa aktuelle Leistungskennwerte, Betriebszustände oder Vorgabeparameter, weitergegeben werden können (Eberspächer et al. 2012, Schlechtendahl et al. 2013, Schlechtendahl et al. 2012).

Bislang wurden Energieverbrauchsmodelle angewendet, um den Energieverbrauch eines zentralen Kühlschmierstoffsystems (Verl et al. 2011a) und einer virtuellen Drehmaschine zu berechnen (Heisel und Braun 2013b). Die Modelle werden prototypisch in einer Software für das Monitoring und die Simulation des Energieverbrauchs einer Fräsmaschine implementiert (Eberspächer et al. 2014).

Alle vorgestellten Ansätze beschreiben den Energiebedarf von Werkzeugmaschinen in Abhängigkeit von den Betriebszuständen der Maschinen. Die Anzahl der betrachteten Betriebszustände variiert und richtet sich nach der Zielstellung des jeweiligen Ansatzes. Mit steigender Anzahl unterschiedener Betriebszustände müssen nicht nur Leistungskennwerte für die einzelnen Betriebszustände ermittelt werden, sondern auch ihre Dauer und Abfolge bekannt sein. Für Ansätze wie von Dietmair und der Forschergruppe ECOMATION wird daher die Kenntnis von detaillierten Nutzungsprofilen vorausgesetzt. Da diese Informationen in der Angebotsphase noch nicht vorliegen, beschränkt sich der Ansatz von Kuhrke auf wenige Betriebszustände, deren Häufigkeit innerhalb einer Betrachtungsperiode vom Maschinenanwender abgeschätzt werden kann. In nahezu allen Ansätzen werden Werkzeugmaschinen für die geometrisch bestimmte Zerspanung untersucht. Eigenschaften des Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen anderer trennender Verfahren, wie die Parallelbearbeitung oder die Bearbeitung an mehreren Bearbeitungsstationen in einer Maschine, bleiben damit bisher wenig untersucht.

3.1.3 Energieverbrauch von peripheren Anlagen

Fertigungsprozesse werden häufig durch periphere Anlagen mit Medien versorgt, die erforderlich sind, um die Bearbeitung durchzuführen. Beispiele hierfür sind Druckluft und Kühlschmierstoffe. Druckluft wird unter anderem als Sperrluft eingesetzt, um Antriebe vor der Verunreinigung durch Schmutzpartikel zu schützen. Ebenso wird Druckluft für den Betrieb von pneumatischen Antrieben und Messeinrichtungen angewendet. Kühlschmierstoffe spülen abgetragenes Material aus der Bearbeitungszone, sorgen für den Abtransport von erzeugter Wärme und reduzieren die Reibung zwischen Werkstück und Werkzeug. Der Einsatz solcher Medien ermög-

licht es überhaupt erst, die wirtschaftlichen und qualitativen Anforderungen an die Herstellung der Erzeugnisse zu erfüllen. Andere Medien sind dagegen sogar erforderlich, um das Wirkprinzip eines Prozesses zu realisieren. Beispielsweise benötigt man bei der elektrochemischen Bearbeitung einen Elektrolyten, der die elektrische Leitfähigkeit gewährleistet, und die Voraussetzung für die elektrochemische Auflösung des zu bearbeitenden Materials schafft. Der Energiebedarf für die Bereitstellung und Aufbereitung dieser Medien durch periphere Anlagen muss erfasst und dem Fertigungsprozess zugeordnet werden.

Fertigungsprozesse werden in der Regel von dezentralen oder zentralen Anlagen mit Kühlschmierstoff versorgt. Schiefer und Schulz gehen für solche Anlagen von einem relativ konstanten Leistungsbedarf aus. Die mittlere Leistungsaufnahme von zentralen Kühlschmierstoffanlagen ($P_{KSS/WZM}$), an die mehrere Fertigungsprozesse angeschlossen sind, berechnen sie nach Gleichung (8) als Quotient aus dem Jahresenergiebedarf der Anlage ($E_{KSS/Jahr}$) und der jährlichen Maschinenlaufzeit ($T_{WZM/Jahr}$) der angeschlossenen Maschinen (Anzahl N) (Schiefer 2000, Schulz und Schiefer 1998). Der Jahresenergiebedarf der Kühlschmierstoffanlage ($E_{KSS/Jahr}$) soll dabei entweder messtechnisch erfasst oder durch die Multiplikation der mittleren jährlichen Betriebszeit mit der messtechnisch ermittelten Dauerleistung der Anlage berechnet werden (Schiefer 2000). Wie und über welchen Zeitraum die mittlere Dauerleistung zu ermitteln ist, wird nicht näher ausgeführt.

$$P_{KSS/WZM} = \frac{E_{KSS/Jahr}}{T_{WZM/Jahr} \cdot N} \quad (8)$$

Der Energiebedarf anderer peripherer Anlagen, wie beispielsweise der betriebsinternen Abwasseraufbereitung, der Heizung, der Klimatisierung oder auch Beleuchtung, wird ebenso betrachtet. Um den werkstückbezogenen Energiebedarf aller peripheren Anlagen ($E_{Peripherie}$) zu berechnen, wird Gleichung (9) herangezogen. Die Leistungsaufnahme aller am Prozess beteiligten Anlagen (P_i) wird mit der werkstückbezogenen Maschinenbelegungszeit (t_B) (Schulz und Schiefer 1998) multipliziert und aufsummiert:

$$E_{Peripherie} = \sum_i P_i \cdot t_B \quad (9)$$

Verl et al. stellen ein Simulationsmodell einer zentralen Kühlschmierstoffanlage vor, das die Berechnung des Energiebedarfs ermöglicht (Verl et al. 2011a). Das Gesamtsystem wird in einem Modell abgebildet, das aus vier Modulen für die Zuleitung, Rückleitung, Reinigung und Spanaufbereitung sowie die Kühlung besteht. Bei der

Berechnung der Leistungsaufnahme und des Energiebedarfs werden die Durchflussmenge, der Druck, die Spannmenge und der Wärmeeintrag in das Kühlschmiermittel als Modellparameter berücksichtigt. Der Detailliertheit des vorgestellten Modells steht der hohe Informationsbedarf für die Bestimmung der Modellparameter gegenüber. Diese Parameter sollen im Rahmen der DFG-Forschergruppe 1088 ebenfalls durch Simulationsmodelle von Werkzeugmaschinen in einem Produktionssystem bereitgestellt werden.

Die Druckluft für Fertigungsprozesse wird in der Regel von zentralen Druckluftanlagen erzeugt, die aus mehreren Kompressoren bestehen und einzelne Fertigungsbereiche oder ganze Standorte über ein Druckluftnetz versorgen. Für Standarddruck-Anwendungen, die über ein 7-bar-Netz versorgt werden, gibt es eine Vielzahl von Kompressoren. Welche Kompressoren in welcher Kombination am effizientesten arbeiten, wird durch die geforderte Luftmenge und -qualität bestimmt (Fraunhofer ISI 2003). Um den energetischen Aufwand für die Bereitstellung des Druckluftbedarfs von Fertigungsprozessen ebenfalls in Kilowattstunden elektrischer Energie ausdrücken zu können, wird ein Energieäquivalent für die Erzeugung von Druckluft benötigt. Thiede entwickelt ein Modell zur Simulation des Energiebedarfs einer Druckluftanlage mit bis zu sieben Druckluftkompressoren (Thiede 2011). Als Kenngröße für die Steuerung der Kompressoren verwendet er den im Druckluftsystem bereitzustellenden Systemdruck. Der aktuelle Systemdruck wird durch den von den angeschlossenen Fertigungsprozessen verursachten Druckluftverbrauch abgesenkt. Wird ein bestimmter Systemdruck unterschritten, werden die Druckluftkompressoren nach einem zu hinterlegenden Schema eingeschaltet, um den Systemdruck wieder zu erhöhen. Um das Gesamtsystem zu simulieren, werden die einzelnen Kompressoren durch Kennwerte charakterisiert. Diese Kennwerte sind die Leistungsaufnahme je Betriebszustand, der bereitgestellte Druckluftvolumenstrom sowie Variablen für das Steuerungsschema (Art der Steuerung, Systemdruck zum Ein- und Ausschalten der Kompressoren). In der von Thiede vorgestellten Simulationsumgebung wird der Druckluftverbrauch von anderen Modulen als Parameter an das Druckluftmodul übergeben. Alternativ kann der aufgezeichnete Druckluftverbrauch einer Fabrik als Nutzungsprofil für die Simulation der Leistungsaufnahme des Druckluftsystems verwendet werden (Thiede 2011).

Einer empirischen Untersuchung der Druckluftherzeugung in mittelständischen Unternehmen zufolge erzielen effiziente Druckluftanlagen Energieäquivalente für die Druckluftherzeugung von 6,5 bis 7,5 kW/(m³/min). Dies entspricht rund 0,108 bis 0,125 kWh/m³ bei Normbedingungen (Bayerisches Landesamt für Umweltschutz 2004). Die Ergebnisse basieren auf der Analyse des Energiebedarfs für die Druckluftherzeugung in 24 Unternehmen. Züst et al. schätzen das Energieäquivalent für die Erzeugung von Druckluft mittels eines Simulationsmodells. Sie bestimmen für effiziente Systeme Kennwerte von 0,11 kWh/m³ i.N. bei 6 bar Überdruck bzw. 0,12 kWh/m³ i.N. bei der Erzeugung von 8 bar Überdruck (Züst et al. 2013). Demzufolge kann das Energieäquivalent für die Erzeugung von Druckluft mit 0,12 kWh/m³ i.N. angenommen werden. Aufgrund von Verlusten durch Leckagen im Druckluftnetz wird der Energieaufwand für die Erzeugung des benötigten Druckluftvolumens in der Praxis

regelmäßig höher ausfallen. Um dies zu berücksichtigen, werden durchschnittliche Leckageverluste in Höhe von 36 % angenommen und in die Berechnung einbezogen (Bayerisches Landesamt für Umweltschutz 2004).

Periphere Anlagen stellen auch thermische Energie in Form von Kälte bzw. Wärme bereit, die benötigt wird, um Hilfs- und Prozessmedien zu temperieren. Die Bereitstellung der Kälte bzw. Wärme verursacht einen Energieverbrauch, der gleichermaßen in Betracht gezogen werden muss. Hierfür ist ein Energieäquivalent erforderlich.

Bei der Auslegung von Kälte-, Klima- und Wärmepumpensystemen werden zur Beurteilung der Energieeffizienz Leistungszahlen ermittelt, mit denen das Verhältnis der bereitgestellten Kälte- oder Wärmeleistung zur benötigten elektrischen Leistung ausgedrückt wird. Da Leistungszahlen jedoch nur einen Vergleich momentaner Bedingungen in bestimmten Betriebspunkten erlauben, werden sogenannte Arbeitszahlen verwendet. Diese Kennwerte stellen die in einer Periode bereitgestellte Kälte bzw. Wärme dem Energiebedarf gegenüber, der zu ihrer Erzeugung benötigt wird (Müller 2008). Sie bringen zum Ausdruck, wie viel elektrische Energie aufgewendet werden muss, um eine bestimmte Menge Kälte- bzw. Wärmeenergie bereitzustellen.

$$\text{Jahresarbeitszahl} = \frac{\text{kWh Kälte bzw. Wärme}}{\text{kWh elektrische Energie}} \quad (10)$$

Die Verwendung von Jahresarbeitszahlen ist üblich, um die Energieeffizienz der Wärmepumpenanlagen anzugeben. Das Vorgehen kann jedoch auch auf Kältemaschinen übertragen werden. Arbeitszahlen können durch Messungen mit Wärmezählern und Elektro-Energiezählern bestimmt werden (Erb et al. 2004). Dabei ist darauf zu achten, dass in der Betrachtung das gesamte System der Kälte- bzw. Wärmeerzeugung berücksichtigt wird. In einer Studie von insgesamt 221 Schweizer Wärmepumpenanlagen wurde für 105 Anlagen, die die Umgebungsluft als Umweltwärmequellen nutzen, im Durchschnitt eine Jahresarbeitszahl von 2,7 ermittelt (Erb et al. 2004).

Die vorgestellten Arbeiten bieten gute Ansätze zur Bestimmung des Energiebedarfs von Fertigungsprozessen, der mit der Bereitstellung von Kühlschmierstoffen, Druckluft und Kälte bzw. Wärme verbunden ist. Um zu gewährleisten, dass der Energiebedarf der peripheren Anlagen den Fertigungsprozessen verursachungsgerecht zugeordnet wird, muss ein Vorgehen erarbeitet werden, das in einem ersten Schritt die Medienverbrauchsraten eines Prozesses ermittelt. Im Anschluss daran ist der Energiebedarf zu berechnen, der zur Bereitstellung der Medien notwendig ist. Dabei sind die unterschiedlichen Gegebenheiten von Einzel- und Zentralanlagen zu berücksichtigen.

3.2 Planung des Energiebedarfs von Fertigungsprozessketten

Es liegen diverse wissenschaftliche Arbeiten zur Planung und Prognose des Energiebedarfs von Fertigungsprozessketten vor. Dieses Kapitel stellt vier ausgewählte Ansätze vor, die als Grundlage für diese Arbeit relevant erscheinen. Die Ansätze unterscheiden sich in der Wahl der Systemgrenze und berücksichtigen den Energiebedarf bzw. die gesamte Umweltwirkung der untersuchten Prozesse. Auch die betrachtete Planungsphase unterscheidet sich teilweise. Die Technische Produktionsplanung ist in allen Ansätzen Teil der Betrachtung. Eine Übersicht gibt Abbildung 3-5. Je nach Zielsetzungen der Arbeiten unterscheiden sich die Methoden zur Ermittlung der Planungsdaten und die Bereitstellung der Daten für die Prognose des Energiebedarfs von Fertigungsprozessketten.

	Schiefer (Schiefer 2000)	Weinert (Weinert 2010)	Larek (Larek 2012)	CO2PE (Kellens 2012a)
Wahl der Systemgrenzen				
Energiebedarf Betriebsmittel	●	●	●	●
Energiebedarf Peripherie	◐	○	◐	●
Weitere Umweltwirkungen	◐	○	○	●
Betrachtete Planungsphase				
Konstruktion	●	○	○	○
Technische Produktionsplanung	●	●	●	◐
Betriebswirtschaftliche Produktionsplanung	○	●	○	○
	● zutreffend	◐ teilweise zutreffend	○ nicht zutreffend	

Abbildung 3-5: Arbeiten zur Planung des Energiebedarfs von Fertigungsprozessketten

In seiner Arbeit verfolgt Schiefer das Ziel, die Entwicklung umweltgerechter Produkte zu unterstützen und Produktentwicklern das entwicklungsbegleitende Bilanzieren von Bauteilen zu ermöglichen (Schiefer 2000). Dabei sollen für alternative Produktvarianten die Umweltbeeinträchtigungen im Zusammenhang mit der Fertigung der Produkte bilanziert werden. Am Beispiel spanender Fertigungsverfahren wird die Nutzung von Energie, der Verbrauch von Materialien sowie die Entstehung von Abfällen und Emissionen berücksichtigt.

Um die Umwelteinflüsse der untersuchten spanenden Fertigungsverfahren zu ermitteln, nutzt Schiefer die in Kapitel 3.1.1 vorgestellte Gliederung des Untersuchungsraumes. Mithilfe empirischer Schnittkraftmodelle und Korrekturfaktoren für verschiedene Prozessparameter und Verfahrensvarianten berechnet er dabei den Wirkenergiebedarf für Verfahren des geometrisch bestimmten Zerspanens sowie für das Schleifen.

Der darüber hinausgehende Energiebedarf für den Betrieb der Werkzeugmaschinen wird mithilfe von zwei Kennwerten bestimmt, die messtechnisch ermittelt werden: der

Grundleistung und der mittleren Leerlaufleistung der Maschinen. Letzterer wird als Mittelwert der Leistungsaufnahme während der Ausführung der Operationen eines durchschnittlichen Bearbeitungsprozesses ohne Spanabnahme berechnet. Die Zerspanungsenergie ist demzufolge nicht in der mittleren Leerlaufleistung enthalten. Abbildung 3-6 zeigt schematisch den Verlauf der Leistungsaufnahme während eines Zerspanungsvorganges und die beiden zur Abschätzung des Energiebedarfs verwendeten Leistungskennwerte.

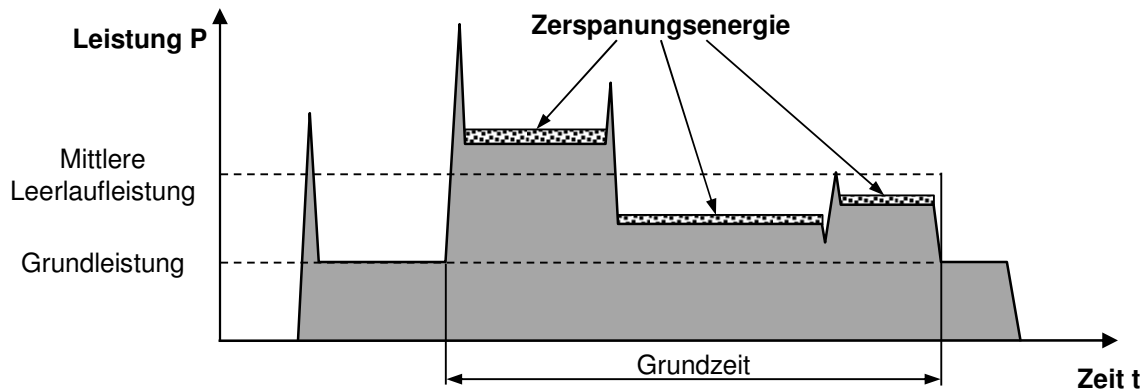


Abbildung 3-6: Kennwerte Schiefer (Schiefer 2000).

Den über die Zerspanungsenergie hinausgehenden Energiebedarf der Werkzeugmaschine berechnet Schiefer nach der Gleichung (11). Für die Abschätzung der Grundzeit (t_g) erstellt er Berechnungsmodelle, die eine Vielzahl von Einflussgrößen, wie beispielsweise Geometriedaten, Prozess- und Maschinenparameter sowie weitere Kennwerte berücksichtigen. Die erweiterte werkstückbezogene Maschinenbelegungszeit (t'_B) wird anschließend auf Basis der Grundzeit und Faktoren zur Abschätzung der Zeiten ermittelt, in denen die Maschine zwar keine Teile fertigt, aber trotzdem nicht abgeschaltet wird und im Grundzustand Energie verbraucht.

$$E_{\text{Werkzeugmaschine}} = P_{\text{leer}} \cdot t_g + P_{\text{grund}} \cdot (t'_B - t_g) \quad (11)$$

E_{WZM} = werkstückbezogener Energiebedarf der Werkzeugmaschine

P_{leer} = mittlere Leistungsaufnahme

t_g = Grundzeit

P_{grund} = Grundleistung

t'_B = erweiterte werkstückbezogene Maschinenbelegungszeit

Die Leistungskennwerte für Werkzeugmaschinen ermittelt Schiefer exemplarisch für CNC-Drehmaschinen in einer Serienfertigung und dokumentiert für die Maschinen das gefertigte Bauteilspektrum anhand der Geometriedaten und der bearbeiteten Werkstoffe. Für die Anwendung der berechneten Kennwerte trifft er die Annahme, dass ein Unternehmen eine Werkzeugmaschine in der Regel nur für ein bestimmtes Teilespektrum verwendet. Die Kennwerte sind daher nur einmalig mithilfe von be-

triebsspezifischen Referenzbauteilen zu bestimmen. Nur bei Änderungen des Teilespektrums wird eine Aktualisierung der Kennwerte notwendig.

Zur Berechnung des werkstückbezogenen Energiebedarfs der peripheren Anlagen werden, wie in Kapitel 3.1.3 und Gleichung (9) dargestellt, Leistungskennwerte für die Anlagen bestimmt und mit der werkstückbezogenen Maschinenbelegungszeit (t_b) multipliziert. Die Leistungskennwerte der Prozessperipherie werden für jede Anlage einmalig betriebsspezifisch ermittelt. Für alle weiteren Umweltbeeinträchtigungen legt Schiefer ebenfalls Kennwerte fest. Die damit verbundenen Stoffverbräuche, Emissionen und Abfälle quantifiziert er auf Basis von Bezugsgrößen, wie der werkstückbezogenen Maschinenbelegungszeit oder der Maschinenstellfläche. Weiterhin wird der Energiebedarf innerbetrieblicher Transportsysteme berücksichtigt. Dazu werden streckenbezogenen Energiebedarfe für verschiedene Transportmittel erarbeitet. Die Berechnung des Energiebedarfs für den innerbetrieblichen Transport setzt allerdings auch die Kenntnis des Produktionslayouts voraus, um den Energiebedarf für verschiedene Produkt- und Prozesskettenvarianten berechnen zu können. Dieses ist zum Zeitpunkt der Entscheidung zwischen alternativen Prozessketten jedoch noch nicht bekannt.

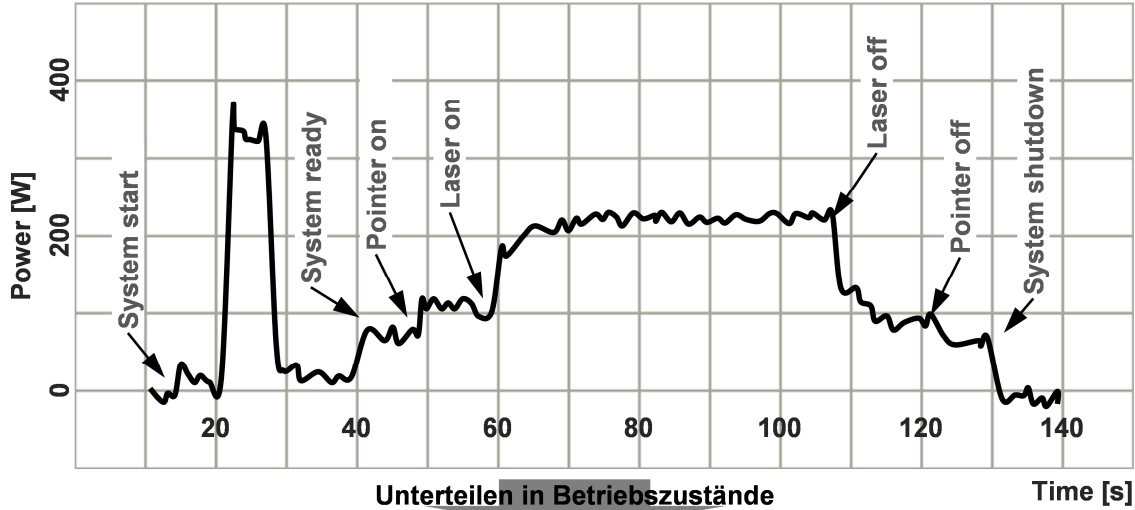
Die vorgestellte Methode basiert auf der Definition von zwei wesentlichen Betriebszuständen für Werkzeugmaschinen und zeigt auf wie neben den Leistungskennwerten auch die Zeitkennwerte ermittelt werden können, um den Energiebedarf abzuschätzen. Die Leistungskennwerte für Werkzeugmaschinen werden betriebsspezifisch für eine Produktfamilie berechnet. Damit findet der Einfluss unterschiedlicher Bearbeitungsaufgaben und Prozessparameter keine Berücksichtigung. Durch die separate Berechnung der Wirkenergie wird es notwendig, die Maschinenkennwerte im Luftschnitt zu ermitteln. Messungen im Produktivbetrieb sind dadurch nicht möglich. Die Berechnung der Wirkenergie für andere Fertigungsverfahren ist zum Teil nicht ohne weiteres möglich und erfordert die empirische Ermittlung von Werkstoff- und Verfahrenskennwerten.

Weinert erarbeitet ein Planungssystem für die Prognose des Energiebedarfs von Produktionssystemen (Weinert 2010). Ziel seiner Arbeit ist die Entwicklung eines Modells, das bereits während der Planung und Auswahl alternativer Fertigungsprozessketten (Technische Produktionsplanung) eingesetzt werden kann, und dabei gleichzeitig die Möglichkeit einer energieeffizienten Planung und Steuerung des Produktionssystems (Betriebswirtschaftliche Produktionsplanung) während der laufenden Produktion bietet. Für die Planung und Steuerung des Produktionssystems ist dabei eine zeitaufgelöste Prognose des Energiebedarfs notwendig, um beispielsweise Lastspitzen vorhersagen und vermeiden zu können. Die Bewertung alternativer Prozessketten kann dagegen auf Basis des Gesamtenergiebedarfs pro Teil ermittelt werden.

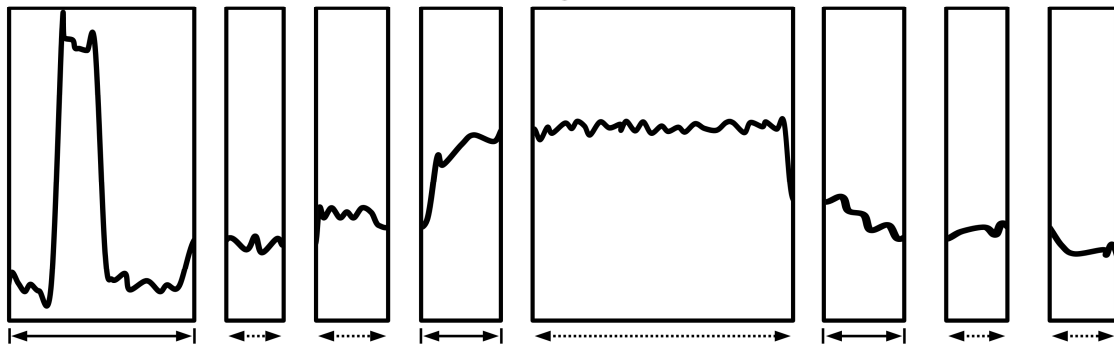
Ausgangspunkt der Modellbildung ist neben der Analyse des Leistungsprofils von Betriebsmitteln auch die Bildung von Abschnitten für unterschiedliche Betriebszustände, denen ein spezifisches Leistungsprofil und eine zeitliche Dauer zugeordnet werden. Dabei wird bei Weinert die Wirkleistung nicht getrennt von den ausführen-

den Betriebsmitteln betrachtet, sondern die Leistungsaufnahme der Betriebsmittel wird inklusive des Leistungsanteils für die Gestaltänderung gemessen.

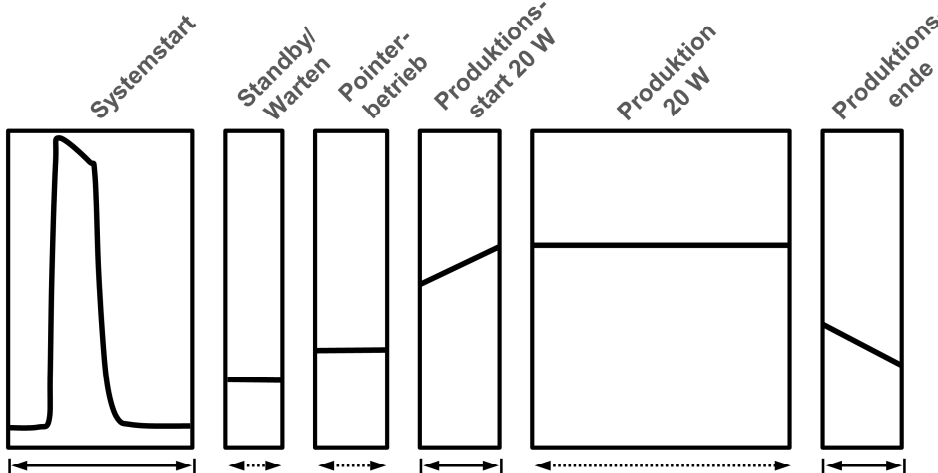
Leistungsmessung Laser , Einschaltvorgang und Betrieb mit 20 W Prozessleistung



Unterteilen in Betriebszustände



Mathematische Beschreibung der Energieaufnahme



Legende <-----> variable Dauer |-----| feste Dauer

Abbildung 3-7: Schematischer Ablauf der Entwicklung von EnergyBlocks am Beispiel eines Produktionslasers, nach (Weinert 2010)

Die festgelegten Abschnitte werden als EnergyBlocks bezeichnet, deren Dauer zeitkonstant oder zeitvariabel sein kann. Beispielsweise ist der Maschinenhochlauf zeitlich konstant, während zeitvariable Abschnitte wie Prozess- und Wartezeiten technisch und organisatorisch von der auszuführenden Produktionsaufgabe sowie der Produktionssteuerung abhängen. Der Verlauf der Leistungsaufnahme in den Betriebszuständen wird messtechnisch ermittelt und in den EnergyBlocks mathematisch als Potenzreihen beschrieben. Um den Energiebedarf eines geplanten, noch nicht realisierten Prozesses zu prognostizieren, werden die einzelnen EnergyBlocks zu Sequenzen angeordnet. Hierbei wird der Ablauf der Bearbeitungsschritte eingehalten, der durch die Produktionsaufgabe vorgegeben wird. Dabei müssen zeitvariable Abschnitte parametrisiert werden. In Abbildung 3-7 ist der Ablauf zur Entwicklung der EnergyBlocks am Beispiel eines Produktionslasers schematisch dargestellt. Abbildung 3-8 zeigt die hierarchische Klassifizierung der Betriebsmittel, die Weinert für die Speicherung und Verwendung dieser EnergyBlocks für die Planungsaufgaben zugrunde legt. Um den Modellierungsaufwand zu begrenzen, schlägt er vor, generische Modelle für die Hauptklassen zu bilden. Anschließend sollen die Modelle soweit wie nötig differenziert werden, um den Energiebedarf relevanter Betriebsmitteltypen und -modelle hinreichend genau beschreiben zu können (Weinert et al. 2009). Die Merkmale der Verfahrenszuordnung folgen der Einteilung der Fertigungsverfahren und dienen lediglich der Gliederung. Als zwingend erforderliche Merkmale für die Klassifizierung der Daten werden der Maschinentyp sowie der Betriebszustand festgelegt. Bei Bedarf können weitere Merkmale, wie die Leistungsklasse oder das Modell, herangezogen werden. Für den Fall, dass die Betriebsmittel noch nicht spezifiziert sind, wird die Annahme getroffen, dass unterschiedliche Betriebsmittelmodelle gleicher Bauart und Leistungsklasse für ähnliche Bearbeitungsaufgaben vergleichbare Profile der Leistungsaufnahme aufweisen (Weinert 2010).

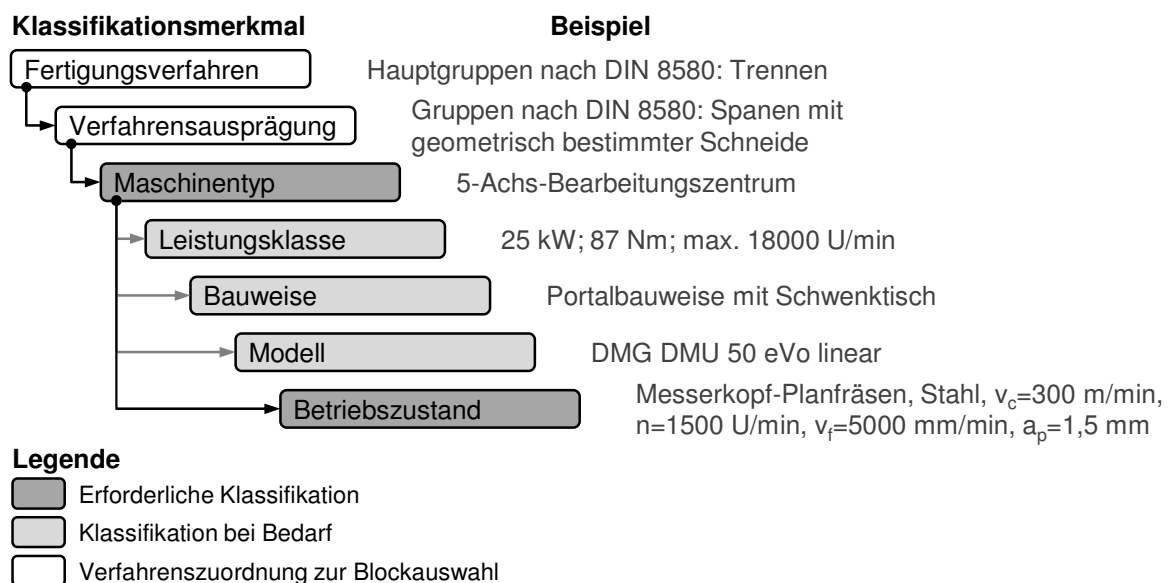


Abbildung 3-8: Klassifikationsmerkmale der EnergyBlocks (Weinert 2010)

Voraussetzung für die Anwendung der Methode ist die mathematische Beschreibung der Leistungsaufnahme eines Betriebsmittels in allen wesentlichen Betriebszuständen. Um das Energieprofil bilden zu können, ist außerdem die Kenntnis der Ablaufsequenz der Betriebszustände sowie die zeitliche Parametrierung der EnergyBlocks erforderlich. Es werden Klassifikationsmerkmale verwendet, um die EnergyBlocks in einer Datenbank zu speichern. Hauptmerkmale sind dabei die verwendete Maschinenart und der Betriebszustand. Dabei ist jede Bearbeitungsaufgabe und jede Änderung der Bearbeitungsparameter als eigener Betriebszustand zu verstehen. Das Vorgehen zielt darauf ab, den Energiebedarf ganzer Produktionssysteme zu prognostizieren, wobei jedoch periphere Anlagen zur Versorgung mit Druckluft und Kühlschmierstoffen nicht berücksichtigt werden.

Die Arbeit von Larek verfolgt das Ziel, den Energie- und Ressourcenverbrauch für Prozesse und Prozessketten mithilfe von Simulationsmodellen vorherzusagen und numerisch optimieren zu können (Larek 2012). Ausgangspunkt der Modellbildung ist die Annahme, dass sich der Energieverbrauch einer Werkzeugmaschine, wie in Gleichung (12) beschrieben, aus der Grundleistung während der Haupt- und Nebenzeiten sowie der Prozessleistung während der Prozesszeit zusammensetzt.

$$E = P_{Grund} \cdot (t_N + t_H) + \int_{t_1}^{t_2} P_{Prozess}(t) dt \quad (12)$$

Die Grundleistung (P_{Grund}) wird als Summe der Nennleistung aller Verbraucher definiert, die im betriebsbereiten Zustand einer Werkzeugmaschine erforderlich sind. Unter der Prozesslast ($P_{Prozess}$) versteht Larek die über die Grundlast hinausgehende Leistungsaufnahme, die sich als Summe der zeitabhängigen Leistungsaufnahme aller am Bearbeitungsprozess beteiligten Komponenten, wie Achsen und Spindeln, berechnet. Die Leistungsaufnahme der einzelnen Komponenten wird dabei über sogenannte Komponentenabbilder im Simulationsmodell dargestellt, die die zeitabhängige Leistungsaufnahme der Komponenten modellieren (Larek et al. 2013). Für die Simulation der Energie- und Ressourcenverbräuche sind neben den Komponentenabbildern auch die Werkstückgeometrie sowie eine Ablaufbeschreibung der Bearbeitungsaufgabe (NC-Programm) als Eingangsinformationen für die Simulation notwendig (Larek 2012). Das Vorgehen wird auf die Prozesse Außenlängsdrehen, Außenrundscheifen, Außenrundscheifhärten, Vakuumhärten, Induktionshärten und das Anlassen angewendet.

Die Prognose des Energiebedarfs erfolgt auf der Basis von Simulationsmodellen und weitgehend ohne weitere praktische Versuche und Messungen. Allerdings können nicht alle Einflüsse auf den Energiebedarf im Modell abgebildet werden. Die Leistungsaufnahme von Antriebskomponenten beispielsweise ist sowohl abhängig vom elektrischen Antrieb selbst als auch von Reibungsverlusten, sodass die Leistungsaufnahme in Abhängigkeit von Bearbeitungsparametern weiter experimentell ermittelt werden muss. Wesentlicher Kritikpunkt sind die für die Nutzung der Simulationsmo-

delle erforderlichen Informationen zur Werkstückgeometrie sowie die Ablaufbeschreibung der Bearbeitungsaufgabe in einer für die Simulationsmodelle lesbaren Form. Diese Informationen sind bei der Prozesskettenauswahl in der Technischen Produktionsplanung noch nicht verfügbar. Der durch unproduktive Zeiten verursachte Energiebedarf bleibt in den Modellen unberücksichtigt. Hinsichtlich des peripheren Energiebedarfs wird ein dezentrales Kühlschmierstoffsystem in der Simulation abgebildet. Weder die Möglichkeit einer zentralen Kühlschmierstoffversorgung noch der Energiebedarf für den Druckluftverbrauch von Maschinen werden in Betracht gezogen.

Der Energiebedarf fertigungstechnischer Verfahren ist in Sachbilanz-Datenbanken nur unvollständig oder gar nicht dokumentiert. Vorhandene Daten beschränken sich häufig auf weit verbreitete Verfahren wie Bohren, Drehen oder Fräsen (Kellens et al. 2012a). Vor diesem Hintergrund hat sich die CO₂PE!-Initiative (Cooperative Effort on Process Emissions in Manufacturing), ein internationaler Verbund von Forschungseinrichtungen, mit dem Ziel gegründet, den Umwelteinfluss von Fertigungsprozessen zu untersuchen, und dabei insbesondere den Energieverbrauch und CO₂-Ausstoß der Prozesse zu berücksichtigen (CO₂PE! 2014). Um eine möglichst standardisierte Datenaufnahme zu gewährleisten, wird ein Vorgehen für die Analyse der Fertigungsverfahren definiert. Für jedes untersuchte Verfahren sollen ähnliche Maschinen unterschiedlicher Hersteller und Leistungsklassen untersucht werden, um parametrisierbare Modelle für die Abschätzung des Energiebedarfs und der Emissionen zu gewinnen. Die Untersuchungsergebnisse sollen für die Verwendung in Sachbilanz-Datenbanken aufbereitet und bereitgestellt werden (Kellens et al. 2012b, 2012a). Erste Ergebnisse liegen für das CO₂-Laserschneiden (Duflo et al. 2010, Kellens et al. 2013), das Erodieren (EDM) (Kellens et al. 2011) und das Selektive Lasersintern (Kellens et al. 2014) vor.

3.3 Software zum Abschätzen von Energiebedarf und Umweltwirkungen

Im Zuge der Verbreitung von Ökobilanzierungen zur Beurteilung der Umweltwirkungen von Produkten und Prozessen wurden Planungstools entwickelt, die den Anwender beim Erstellen von Analysen des Energieverbrauchs und der Umweltwirkungen unterstützen. Die Werkzeuge bestehen jeweils aus einer Software zur Modellierung von Prozessen, wie die Herstellung von Materialien, die Erzeugung von Strom und der Transport von Gütern, und sogenannten Lebenszyklusdatenbanken. Diese Datenbanken enthalten Datensätze mit Informationen zum Ressourcenverbrauch der abgebildeten Prozesse und der eingesetzten Materialien. Sowohl für die Softwarelösungen als auch für die Bereitstellung von Datensätzen gibt es kommerzielle Anbieter und kollaborative Angebote, die frei zugänglich sind.

Viele Modellierungsprogramme nutzen die Daten mehrerer Datenbanken. Dabei sind *ecoinvent* (ecoinvent 2015) mit über 10.000 und *GaBi* (thinkstep AG 2015) mit über 8.000 Datensätzen die am weitesten verbreiteten kommerziellen Datenbanken, die von den meisten Softwarelösungen verwendet werden. Die Mehrzahl der verfügbaren Datensätze bezieht sich jedoch auf die Erzeugung von Materialien (zum Beispiel

Stahl, Aluminium, Kunststoffe usw.), die Herstellung von Textilien oder Elektronikkomponenten und die Bereitstellung von Energieträgern wie Öl, Gas und Strom. Im Gegensatz dazu sind Fertigungsprozesse nur in sehr geringem Umfang dokumentiert. So enthält zum Beispiel die GaBi-Datenbank nur 59 Einträge in der Kategorie „Manufacturing processes“. Tabelle 3-1 gibt einen Überblick über Softwarelösungen und die jeweils verwendeten Datenbanken.

Tabelle 3-1: Auswahl von Softwarelösungen und Datenbanken.

Software	Datenbank
GaBi Software (thinkstep AG 2015)	GaBi Databases ecoinvent U.S. LCI database
SimaPro (SimaPro 2015)	ecoinvent ELCD-Datenbank U.S. LCI database Ökobau.dat weiter Datenbanken
SolidWorks Sustainability (Dassault 2015)	GaBi Databases
openLCA (openLCA 2015)	ecoinvent GaBi weitere Datenbanken
Umberto (ifu Hamburg)	ecoinvent GaBi Databases EstiMol

Einige Softwarelösungen bieten die Flexibilität, eine Vielzahl von Prozessen und Prozesskombinationen darzustellen und wären demzufolge auch geeignet, um Fertigungsprozesse und -prozessketten abzubilden. Die Herausforderung besteht jedoch darin, für Fertigungsverfahren Kennwerte bereitzustellen, die ein Abschätzen des Energiebedarfs der Fertigungsprozesse und -prozessketten in der Technischen Produktionsplanung ermöglicht. Die in Kapitel 3.2 vorgestellte Initiative CO2PE! versucht diese bisher fehlenden Datensätze für Fertigungsverfahren in einem kooperativen Ansatz zu ermitteln. Dabei wird der Energieverbrauch der Fertigungsprozesse von den an der Initiative beteiligten wissenschaftlichen und industriellen Einrichtungen untersucht und dokumentiert. Es bleibt jedoch fraglich, inwiefern die auf diese Weise erfassten Daten geeignet sind, um in der Technischen Produktionsplanung den Energiebedarf von Fertigungsprozessketten abzuschätzen. Die Übertragung der Ergebnisse für die untersuchten Maschinen und Anlagen, die bearbeiteten Werkstücke sowie die verwendeten Prozessparameter auf eine andere zu planende Fertigungsprozesskette bleibt hierbei die größte Herausforderung.

4 Handlungsbedarf und Zielsetzung

Ausgehend vom Stand der Wissenschaft wird in diesem Kapitel die Zielsetzung der Arbeit präzisiert. Die Defizite, die bei den bestehenden Ansätzen im Hinblick auf die Planung und Gestaltung energieeffizienter Prozessketten festgestellt wurden, ermöglichen es, den Handlungsbedarf im Folgenden weiter zu konkretisieren.

4.1 Handlungsbedarf

Produzierende Unternehmen stehen heute vor der Herausforderung, ihre Wettbewerbsfähigkeit durch die hervorragende Qualität, geringe Kosten und auch die Umweltverträglichkeit ihrer Produkte zu sichern. Bei der Planung und Gestaltung von Fertigungsprozessketten während der Technischen Produktionsplanung kann der später in der Produktion verursachte Energiebedarf frühzeitig beeinflusst werden. Die mit dem Energiebedarf der Produktion verbundenen Kosten veranlassen Industrieunternehmen schon heute, Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz zu ergreifen. Die zu erwartenden Steigerungen der Energiekosten lassen für die Zukunft eine zunehmende Notwendigkeit von langfristig und methodisch geplanten Effizienzsteigerungen erwarten.

Im Kapitel zum Stand der Forschung wurde aufgezeigt, dass bereits verschiedene Ansätze und Methoden zur Ermittlung und Beschreibung des Energiebedarfs von Fertigungsprozessen und -prozessketten existieren. Bei diesen Ansätzen wird der Energiebedarf von Werkzeugmaschinen und anderen Anlagenteilen untersucht, die einen wesentlichen und unmittelbaren Beitrag zum Ergebnis des Fertigungsprozesses leisten.

Ein wesentlicher Nachteil vieler der vorgestellten Methoden besteht im hohen Informationsbedarf und Modellierungsaufwand zur Vorhersage des Energiebedarfs von Fertigungsprozessketten. Insbesondere der Umstand, dass detaillierte Ablaufsequenzen und Nutzungsprofile der Maschinen und Anlagen für die Prognose des Energiebedarfs erforderlich sind, stellt einen zentralen Kritikpunkt dar. Diese Informationen sind in der Technischen Produktionsplanung zum Zeitpunkt einer Entscheidung über alternative Prozessketten in aller Regel noch nicht verfügbar und werden erst im Anschluss an die Auswahl der bevorzugten Fertigungsprozesskette ausgearbeitet.

Die Planung und Gestaltung alternativer Fertigungsprozessketten und die Auswahl einer Vorzugsvariante stellt für den Planer eine komplexe und umfassende Aufgabe dar. Ausgehend von einer oder mehreren alternativen Gestaltvarianten des zu fertigenden Produktes müssen geeignete Technologien für die Fertigung ausgewählt und miteinander kombiniert werden. Bei der anschließenden Bewertung der Fertigungsalternativen spielt neben der technischen Machbarkeit, den Kosten und der Qualität zunehmend auch die Umweltverträglichkeit eine Rolle. In einem zeitlich eng getakteten Planungsprozess muss der Planer die Alternativen bewerten und kann sich dabei nur auf begrenzt detaillierte Planungsinformationen stützen. Eine Methode zur Bewertung des Energiebedarfs von Fertigungsprozessketten muss dieser Situation Rechnung tragen.

Die Berechnung der Wirkenergie zur Bestimmung des Energiebedarfs von Fertigungsprozessen ist immer spezifisch für das jeweilige Verfahrensprinzip und kann die detaillierte Kenntnis von Prozessparametern erfordern. Gleichzeitig ist es mit der theoretischen Berechnung der Wirkenergie jedoch nicht möglich, den Energiebedarf des Maschinensystems für die Gestaltänderung zu beschreiben, da die Umwandlungsverluste des Maschinensystems nicht berücksichtigt werden. Messungen bzw. eine Modellierung der verwendeten Maschinensysteme zur Realisierung der Fertigungsverfahren können damit nicht vermieden werden.

In den vorgestellten Ansätzen werden überwiegend spanende Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide untersucht, die häufig durch eine sequentielle Bearbeitung einzelner Werkstücke an einer Bearbeitungsstation in einer Maschine gekennzeichnet sind. Andere Bearbeitungssituationen, wie die gleichzeitige Parallelbearbeitung mehrerer Werkstücke in einer Maschine oder die sequentielle Bearbeitung von Werkstücken in Maschinen mit mehreren Bearbeitungsstationen, werden daher in den bisherigen Ansätzen nicht berücksichtigt. Umfassende Analysen zum Energiebedarf von Feinbearbeitungsverfahren, wie dem Elektrochemischen Abtragen und dem Honen, liegen ebenfalls noch nicht vor.

Die Systemgrenzen für die Prognose des Energiebedarfs der Fertigungsprozesse werden in den verschiedenen Ansätzen sehr unterschiedlich gewählt. Zum Teil werden Verbraucher, die einen wesentlichen und unmittelbaren Beitrag zur Durchführung des Fertigungsprozesses und zur Erzielung des Fertigungsergebnisses leisten, nicht berücksichtigt. Larek beispielsweise bezieht in seiner Arbeit zwar den Energiebedarf der Rückförderpumpe des Kühlschmierstoffes mit ein, der Energiebedarf für die gesamte Aufbereitung des Kühlschmierstoffes wird jedoch nicht in die Betrachtung einbezogen (Larek 2012). Bei Schiefers umfassender Untersuchung zur ökologischen Bilanzierung von spanend gefertigten Bauteilen wird hingegen nicht auf den Druckluftbedarf der Fertigungsprozesse eingegangen (Schiefer 2000). Dieser kann jedoch einen signifikanten Beitrag zum Gesamtenergiebedarf eines Prozesses leisten. Bei Weinerts Konzept für die Planung und den Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme findet der Energiebedarf von peripheren Anlagen keinen Eingang in die Betrachtungen (Weinert 2010).

Bei der Bereitstellung von Kennwerten zur Prognose des Energiebedarfs werden zwei unterschiedliche Ansätze deutlich. Die CO₂PE!-Initiative verfolgt einen kooperativen Ansatz zur Ermittlung des Energiebedarfs von Fertigungsprozessen (CO₂PE! 2014). Dadurch ist eine Erweiterung der Datenbasis auf Fertigungsprozesse möglich, die im Unternehmen nicht zur Analyse zur Verfügung stehen. Für außerhalb des Unternehmens ermittelte Datensätze besteht jedoch die Herausforderung, diese richtig zu interpretieren und auf den jeweiligen Planungsfall zu übertragen. In den Arbeiten von Schiefer und Weinert werden daher Kennwerte zur Prognose des Energiebedarfs unternehmensbezogen ermittelt. Auf diese Weise können die Daten für verwendete Maschinen und Anlagen, die auszuführenden Bearbeitungsaufgaben und anzuwendenden Prozessparameter besser auf die zu planenden Fertigungsprozesse angewendet werden.

Die festgestellten Defizite können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- häufig hoher Informationsbedarf und Modellierungsaufwand für die Vorhersage des Energiebedarfs von Fertigungsprozessen und –prozessketten;
- umfassende Untersuchungen zum Energiebedarf von Feinbearbeitungsverfahren wie dem Elektrochemischen Abtragen und dem Honen liegen nicht vor;
- oft nicht alle Verbraucher berücksichtigt, die einen wesentlichen und unmittelbaren Beitrag zum Prozess leisten;
- nicht unternehmensbezogen ermittelte Energiekennwerte sind für die Abschätzung nur begrenzt geeignet.

4.2 Zielsetzung und Vorgehen

Diese Arbeit verfolgt das Ziel, eine Methode zur Planung und Gestaltung energieeffizienter Fertigungsprozessketten für die Serienfertigung zu entwickeln. Fertigungsplaner sollen damit befähigt werden, den Energiebedarf von alternativen Fertigungsprozessketten bereits in der Technischen Produktionsplanung abzuschätzen. Dadurch wird es möglich, langfristig eine Verringerung der Energiemengenintensität bei der Herstellung von Bauteilen der Serienfertigung zu erzielen, womit auch eine Reduzierung der Energiekosten in der Fertigung erreicht werden kann. Das Gesamtziel der Arbeit lässt sich in fünf Teilziele gliedern:

Teilziel 1: Entwicklung einer Methode zur technologieunabhängigen, empirischen Analyse des Energiebedarfs von Fertigungsprozessen.

Teilziel 2: Anwendung der Methode für Fertigungsverfahren mit unterschiedlichen Verfahrensprinzipien.

Teilziel 3: Erarbeitung eines Vorgehens zur Planung und Gestaltung energieeffizienter Prozessketten in der Technischen Produktionsplanung.

Teilziel 4: Entwicklung eines generischen und technologieunabhängigen Konzeptes zur Gliederung unternehmensbezogener Energieplanungsdaten.

Teilziel 5: Validierung der Analyse- und Prognosemethode.

Ausgangspunkt für die Methode ist die Bereitstellung von Energieplanungsdaten für die Vorhersage des Energiebedarfs einzelner Fertigungsprozesse und gesamter Fertigungsprozessketten. Die Grundlage hierfür ist der Aufbau einer unternehmensbezogenen Energiedatenbank. Das Vorgehen ist in Abbildung 4-1 dargestellt. Als Grundlage für die Energiedatenbank dienen die empirische Analyse des Energiebedarfs von Fertigungsprozessen in der Produktionsphase und die standardisierte Ermittlung von Leistungs- und Zeitkennwerten für die Prognose des Energiebedarfs der Prozesse. Aus Zeit- und Kostengründen können mitunter nicht alle benötigten Energieplanungsdaten unternehmensbezogen ermittelt werden. Die Methode sieht daher neben der empirischen Analyse im eigenen Unternehmen auch die Nutzung weiterer Datenquellen vor. Die ermittelten Energieplanungsdaten wer-

den in der Technischen Produktionsplanung verwendet, um den Energiebedarf zu planender Fertigungsprozessketten vorausschauend zu bestimmen. Dabei werden die in der Konstruktionsphase ausgearbeiteten Konstruktionen als Eingangsgröße für die Prozesskettenplanung verwendet.

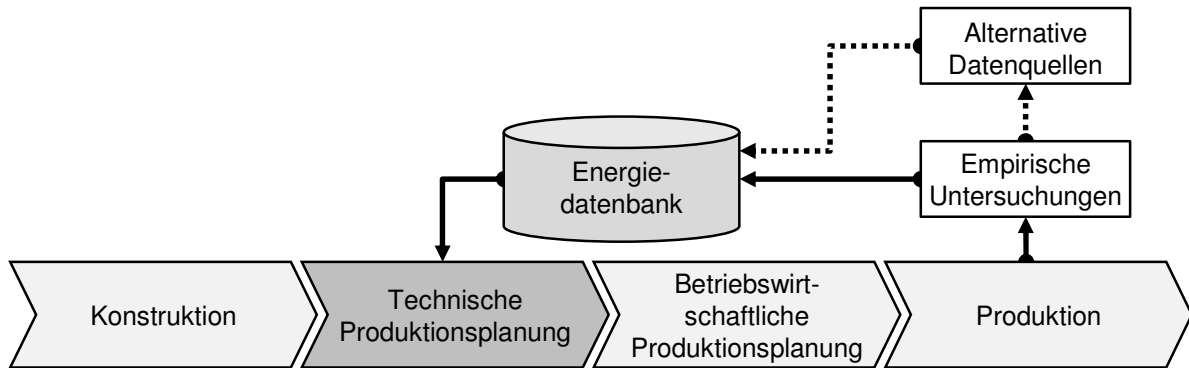


Abbildung 4-1: Vorgehen zur Bereitstellung von Energieplanungsdaten für Prozesskettenplanung während der Technischen Produktionsplanung

In der betrieblichen Praxis kann die Zugänglichkeit und Verfügbarkeit von Fertigungsprozessen und -einrichtungen für die Ermittlung von Energieplanungsdaten eingeschränkt sein. Es ist daher vorgesehen, auch alternative Datenquellen für die Ermittlung von Energieplanungsdaten zu nutzen. Aus folgenden Quellen können weitere Daten für die Energieplanung gewonnen werden (in Anlehnung an Thiede et al. 2013):

- (1) Kooperationen und Netzwerke;
- (2) öffentlich verfügbare Daten;
- (3) mathematische und empirische Modelle.

Die Kooperation mit Herstellern von Werkzeugmaschinen und anderen Fertigungseinrichtungen bietet dabei die Möglichkeit, Zugang zu Energieplanungsdaten zu erhalten, die im eigenen Unternehmen nicht verfügbar sind. So können zum Beispiel neue Maschinenkonzepte und Fertigungsprozesse berücksichtigt werden, die bisher im Unternehmen nicht im Einsatz sind. Um Energieplanungsdaten in Kooperationen frühzeitig ermitteln zu können, ist ein intensivierter und standardisierter Austausch von Informationen zwischen dem Hersteller und dem Maschinenanwender notwendig (Kuhrke 2011). Der Austausch von Energieplanungsdaten kann auch in Netzwerken (CO2PE! 2014) oder als Teil eines innovativen Geschäftsmodells organisiert sein (Wewiór et al. 2012).

Wenn keine unternehmensbezogenen Daten vorliegen, können auch öffentlich verfügbare Energieplanungsdaten für die Ermittlung des Energiebedarfs herangezogen werden. Für die Erzeugung von Druckluft in Produktionsunternehmen sind beispielsweise Daten aus Forschungsarbeiten und Feldstudien öffentlich zugänglich, die

verwendet werden können, um den mit dem Druckluftverbrauch verbundenen Energiebedarf abzuschätzen (Bayerisches Landesamt für Umweltschutz 2004, Züst et al. 2013).

Es können ebenfalls Modelle des Energieverbrauchs von Fertigungsverfahren, die auf mathematischen, physikalischen oder empirisch ermittelten Zusammenhängen beruhen, für die Abschätzung des Energiebedarfs genutzt werden. Das mathematische Modell zur Berechnung von Schnittkräften bei der Zerspanung mit geometrisch bestimmten Schneiden nach Kienzle (Kienzle 1952) basiert auf der empirischen Ermittlung von werkstoffspezifischen Schnittkraftkennwerten und kann auch für die Abschätzung der Zerspanungsenergie eingesetzt werden. Allerdings kann das Modell den zusätzlichen Energiebedarf der Werkzeugmaschine nicht berücksichtigen, der durch Reibungs- und Wärmeverluste bei der Umwandlung von Energie im Maschinensystem entsteht. Um den gesamten Energiebedarf eines Prozesses zu erfassen, müssen daher der Wirkungsgrad der eingesetzten Maschinen sowie der Energiebedarf weiterer unterstützender Anlagen berücksichtigt werden, um auch den über die Wirkenergie hinausgehenden Energiebedarf abschätzen zu können. Die Zielsetzung besteht somit darin, eine Struktur für die Energiedatenbank zu entwickeln, die es erlaubt, für zukünftige Planungsaufgaben Energieplanungsdaten zu bestimmen, mit denen es möglich ist, den Energiebedarf der benötigten Fertigungsprozesse und alternativen Prozessketten zu ermitteln.

In Kapitel 5 wird eine Methode zur Analyse des Energiebedarfs von Fertigungsprozessen erarbeitet. Dazu werden zunächst die Systemgrenzen der Untersuchung festgelegt. Die Beschreibung des Energiebedarfs erfolgt mithilfe von Kennwerten für die Leistungsaufnahme und die Dauer von Maschinenzuständen der eingesetzten Betriebsmittel. Die Methode ist derart zu gestalten, dass der Energiebedarf von Fertigungsprozessen mit unterschiedlichen technologischen Verfahrensprinzipien abgebildet werden kann. Im Anschluss an die Methodenentwicklung erfolgt die exemplarische Anwendung am Beispiel zweier Feinbearbeitungsverfahren. Beim Elektrochemischen Abtragen werden zwei Prozesse untersucht, bei denen zwei unterschiedliche Werkzeugmaschinen eines Herstellers verwendet werden. Die Untersuchungen erfolgen im Umfeld einer Einzelteilerfertigung. Für das Anwendungsbeispiel Honen werden zwei Prozesse analysiert, die in einer Großserienfertigung für die Endbearbeitung von zwei unterschiedlichen Bauteilen betrieben werden. Auf diese Weise kann der Einfluss der Fertigungsumgebung auf die Anwendung der entwickelten Methode berücksichtigt werden. Beide Prozesse und die verwendeten Maschinen und Anlagen entsprechen dem aktuellen Stand der Technik. Es wird ein Standardvorgehen erarbeitet, das eine Analyse des Verfahrensprinzips eines zu untersuchenden Prozesses sowie eine qualitative und quantitative Analyse der am Prozess beteiligten Verbraucher umfasst. Abschließend werden Energiekennwerte für die untersuchten Prozesse gebildet.

Im anschließenden Kapitel 6 wird das Konzept zur Planung und Gestaltung energieeffizienter Prozessketten vorgestellt. Dabei wird erläutert, wie der werkstückbezogene Energiebedarf alternativer Fertigungsprozessketten während der Technischen Produktionsplanung bestimmt werden kann. Die Energiekennwerte

können grundsätzlich angewendet werden, um den Energiebedarf als ein Kriterium in eine ganzheitliche Bewertung und Auswahl von Fertigungsprozessketten einzubeziehen. Die ganzheitliche Bewertung selbst mit einer Auswahl und Gewichtung der im Einzelnen zu berücksichtigenden Kriterien ist nicht Bestandteil der in dieser Arbeit entwickelten Methode.

Um die zuvor durch die Analyse der Prozesse gewonnenen Energieplanungsdaten für die Prognose des Energiebedarfs von Fertigungsprozessketten nutzen zu können, wird ein generisches und technologieunabhängiges Konzept zur Gliederung der Planungsdaten in einer Datenbank entwickelt. Die Gliederung der Energieplanungsdaten berücksichtigt dabei drei Kriterien: die eingesetzten Betriebsmittel, die ausgeführten Bearbeitungsaufgaben und die angewendeten Prozessparameter. Ziel ist es, die Daten derart zu strukturieren, dass es möglich wird, aus dem vorhandenen Datenbestand einen passenden Datensatz auszuwählen, der eine Prognose des Energiebedarfs für bisher nicht analysierte Kombinationen von Betriebsmitteln, Bearbeitungsaufgabe und Prozessparametern ermöglicht. Mit sukzessive zunehmendem Umfang der Energieplanungsdaten für einen Prozess ist eine steigende Prognosegenauigkeit zu erwarten.

Die erarbeitete Vorgehensweise wird anschließend in zwei Teilschritten validiert. Im ersten Schritt werden die zuvor in Kapitel 5 ermittelten Energieverbrauchskennwerte für das Elektrochemische Abtragen und das Honen angewendet, um aufzuzeigen, wie der werkstückbezogene Energieverbrauch der untersuchten Prozesse berechnet werden kann. Dabei werden die Zeitkennwerte für die Belegungszeit und die erweiterte Belegungszeit der Prozesse ebenfalls einbezogen. Die Ergebnisse ermöglichen auch eine Analyse des Anteils einzelner Verbraucher am gesamten werkstückbezogenen Energieverbrauch der Prozesse, sodass deutlich wird, welchen Einfluss der Einsatz von Hilfs- und Prozessmedien, wie Druckluft und Kühlschmierstoffe, auf den Gesamtenergieverbrauch der Prozesse hat. Im Anschluss wird das generische Konzept zur Gliederung der Energieplanungsdaten für das Beispiel eines PECM-Prozesses beispielhaft angewendet, um die Prognosemethode zu validieren. Ein Vergleich der Prognoseergebnisse für den werkstückbezogenen Energiebedarf mit Messergebnissen des elektrochemischen Bearbeitungsprozesses ermöglicht abschließend, die Vorhersagegenauigkeit zu beurteilen.

5 Analyse des Energiebedarfs von Fertigungsprozessen

In diesem Kapitel wird eine Methode zur Analyse von Fertigungsprozessen erarbeitet, die als Grundlage für die Abschätzung des Energiebedarfs der untersuchten Prozesse dient. Anschließend wird die Methode am Beispiel von zwei ausgewählten Feinbearbeitungsverfahren angewendet, für die bisher keine umfassenden Untersuchungen des Energiebedarfs vorliegen. Durch die Auswahl eines abtragenden und eines spanenden Fertigungsverfahrens, werden außerdem zwei unterschiedliche technologische Verfahrensprinzipien betrachtet, wodurch die Technologieunabhängigkeit der Analysemethode bestätigt werden kann. Der Methodenteil umfasst die Festlegung der Systemgrenzen für die Analyse sowie die Methode zur Beschreibung des Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen und peripheren Anlagen. Ausgehend von einer kurzen Beschreibung der Verfahrensprinzipien und der relevanten Anlagenteile werden für die Anwendungsbeispiele Messungen durchgeführt und Leistungskennwerte zur Beschreibung des Energiebedarfs beim Elektrochemischen Abtragen und Honen ermittelt.

5.1 Methode zur Analyse des Energiebedarfs von Fertigungsprozessen

5.1.1 Systemgrenzen

Der vorgestellten Methode liegt eine klare Abgrenzung und Gliederung des Untersuchungsgegenstandes zugrunde. Zuerst wird der zu untersuchende Bilanzraum abgegrenzt, indem die Systemgrenzen festgelegt werden. In einem zweiten Schritt wird der Bilanzraum so in seine Teilelemente gegliedert, dass Kennwerte für den Energieeinsatz für diese Teilelemente ermittelt werden können. Abschließend werden die Kennwerte aggregiert und Planungsdatensätze für die untersuchten Prozesse gebildet.

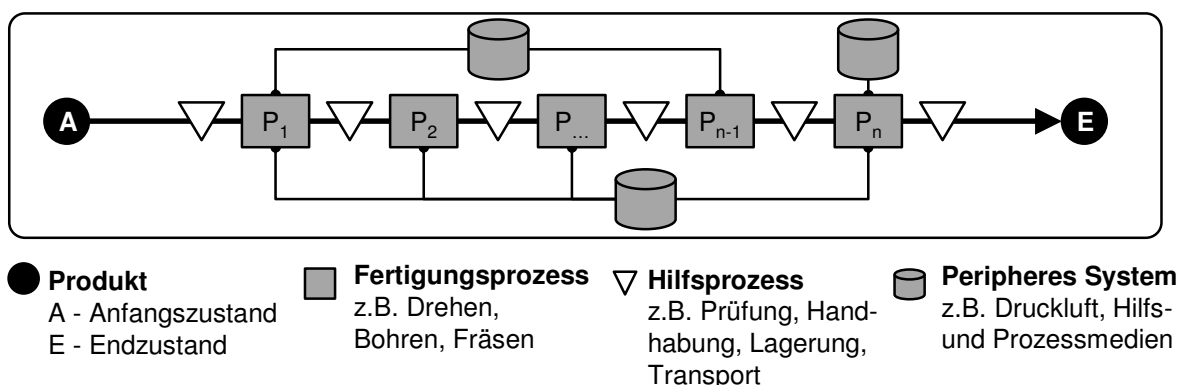


Abbildung 5-1: Systemgrenze auf Ebene der Prozesskette.

In Abbildung 5-1 ist eine Prozesskette schematisch dargestellt, die eine vollständige Prozesskette oder auch eine Teilprozesskette innerhalb eines Unternehmens repräsentiert. Die Fertigungsprozesskette umfasst die Sequenz der technologischen Fertigungsprozesse. Unterstützende Hilfsprozesse, wie der Transport und die Prü-

fung von Produkten, werden erst im Anschluss an die Auswahl einer Fertigungsprozesskette geplant. Sie sind, wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, nicht Teil der zu bewertenden Fertigungsprozessketten und werden bei der Bilanzierung des Energieverbrauchs nicht berücksichtigt. Fertigungsprozesse umfassen alle Anlagen und Einrichtungen, die für die Realisierung eines Fertigungsprozesses benötigt werden. Dies sind in erster Linie die eingesetzten Werkzeugmaschinen (Kapitel 5.1.2.1), aber auch periphere Anlagen zur Aufbereitung und Bereitstellung von Hilfs- und Prozessmedien wie Druckluft oder Kühlschmierstoffe. Periphere Anlagen sind dadurch gekennzeichnet, dass sie über eine von der Werkzeugmaschine separate Energieversorgung verfügen. Sie können einem Fertigungsprozess direkt zugeordnet sein (dezentral) oder mehrere Fertigungsprozesse mit den entsprechenden Hilfs- und Prozessmedien versorgen (zentral). Bei zentralen Anlagen erfolgt eine Allokation des peripheren Energieverbrauchs zu den Fertigungsprozessen (Kapitel 5.1.2.2).

Abbildung 5-2 verdeutlicht die Systemgrenze für die Energiebilanzierung auf der Ebene eines Fertigungsprozesses als Input-/Output-Modell. In Anlehnung an Zein (Zein 2012) kann das Kriterium zur Festlegung der Systemgrenze wie folgt formuliert werden: Die Systemgrenze des Prozesses umfasst alle elektrischen Verbraucher, die einen wesentlichen und unmittelbaren Beitrag bei der Durchführung des Fertigungsprozesses und zur Erzielung des Fertigungsergebnisses leisten. Der Energieverbrauch der eingesetzten Werkzeugmaschine sowie der wesentlichen peripheren Anlagen zur Bereitstellung und Wiederaufbereitung von konditionierten Hilfs- und Prozessmedien für den Fertigungsprozess ist demzufolge zu berücksichtigen. Weitere Anlagen der technischen Gebäudeausstattung, wie Heizung, Beleuchtung und Klimatisierung stellen keinen wesentlichen und unmittelbaren Beitrag zur Durchführung des Fertigungsprozesses dar und liegen außerhalb der Systemgrenze.

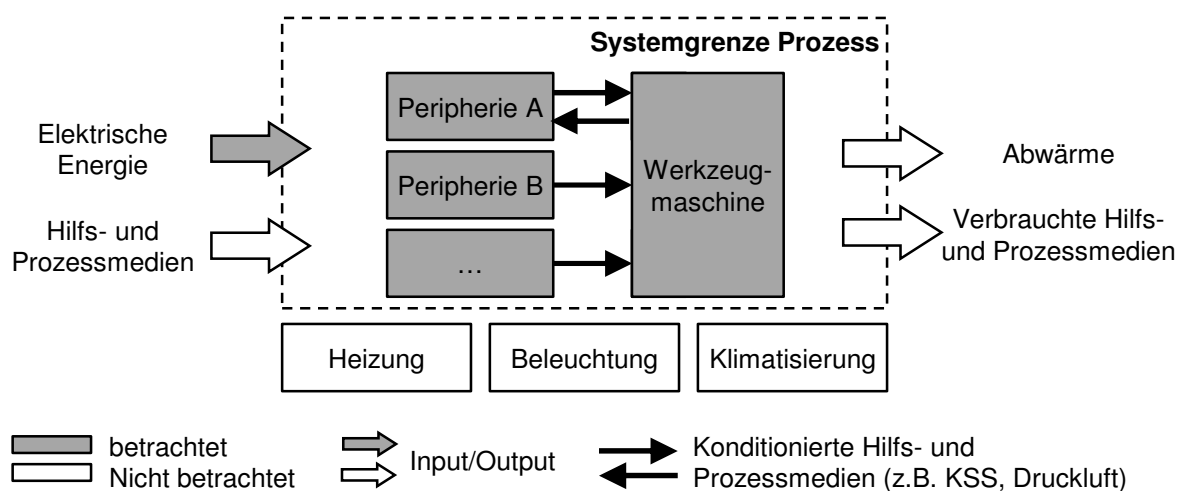


Abbildung 5-2: Systemgrenze auf Ebene der Prozesse, in Anlehnung an (ISO/DIS 14955-1)

5.1.2 Analyse des Energieverbrauchs von Fertigungsprozessen

5.1.2.1 Werkzeugmaschine

Eine Werkzeugmaschine ist ein System von Energieverbrauchern, wie Antrieben, Pumpen und Steuerungen, die in Abhängigkeit von der auszuführenden Bearbeitungsaufgabe genutzt werden und elektrische Leistung umsetzen. Abbildung 5-3 zeigt schematisch das Leistungsprofil einer Werkzeugmaschine in einem Prozess der Serienfertigung, wie es am Hauptanschluss der Maschine gemessen werden kann. Dargestellt sind mehrere aufeinanderfolgende Bearbeitungszyklen und eine Unterbrechung der Bearbeitung. Innerhalb der Bearbeitungszyklen ist das Verhalten der Verbraucher für eine bestimmte Bearbeitungsaufgabe von Zyklus zu Zyklus weitgehend gleich. Für die Bearbeitungszyklen zeigt das Leistungsprofil einen charakteristischen Verlauf und kann vereinfacht mit drei Maschinenzuständen beschrieben werden: dem Grundzustand sowie der Bearbeitung in der Haupt- und Nebenzeit. Der Energiebedarf einer Werkzeugmaschine kann demnach in Abhängigkeit von der Leistungsaufnahme und der Zeit in den verschiedenen Betriebszuständen beschrieben werden.

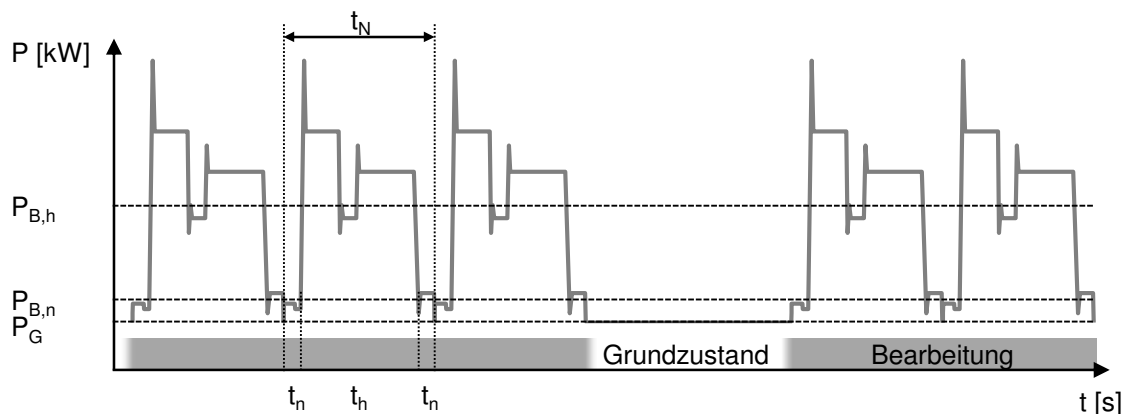


Abbildung 5-3: Schematischer Verlauf der Leistungsaufnahme einer Werkzeugmaschine in der Serienfertigung

Unter Grundleistung (P_G) versteht man die elektrische Leistungsaufnahme einer Werkzeugmaschine, wenn das Werkstück und das Werkzeug keine Relativbewegung zueinander ausführen und die Aggregate, wie Steuerung, Hydraulik, Pneumatik, Lüfter sowie Pumpen, ihre Funktion zur Aufrechterhaltung der Betriebsbereitschaft erfüllen. Sie tritt während des Einrichtens, Messens und Prüfens sowie in Arbeitspausen auf (Schiefer 2000, Wolfram 1986). Der Kennwert für die Grundleistung ist spezifisch für die eingesetzte Werkzeugmaschine.

Die Leistung während der Hauptnutzungszeit ($P_{B,h}$) ist der Mittelwert der elektrischen Leistungsaufnahme der Werkzeugmaschine während des Ausführens einer Bearbeitungsaufgabe mit den für diese Bearbeitungsaufgabe charakteristischen Bewegungsabläufen und Beanspruchungen der Aggregate. Während der Bearbeitung werden die gewünschten Werkstückeigenschaften erzeugt. Der Kennwert für

die Bearbeitungsleistung während der Hauptnutzung ist abhängig von der eingesetzten Werkzeugmaschine, der auszuführenden Bearbeitungsaufgabe und den Bearbeitungsparametern, wie zum Beispiel Drehzahl und Vorschub.

Der Kennwert für die Leistungsaufnahme während der Nebennutzungszeit ($P_{B,n}$) wird definiert als der Mittelwert der elektrischen Leistungsaufnahme der Werkzeugmaschine während des Ausführens von Nebentätigkeiten, wie dem Zurück- und Heranfahren von Achsen für Be- und Entladeoperationen. Die Leistungsaufnahme während der Nebennutzungszeit ist unabhängig von der Bearbeitungsaufgabe und den Prozessparametern.

Die Konstruktion von Werkzeugmaschinen und der Fertigungsablauf innerhalb der Maschinen werden in Abhängigkeit vom Fertigungsverfahren und der Bearbeitungsaufgabe unterschiedlich gestaltet. So kann eine Werkzeugmaschine eine oder mehrere Bearbeitungsstationen umfassen. Ein Beispiel für den ersten Fall ist eine Einspindel-Drehmaschine, für den zweiten Fall die Realisierung mehrerer Operationen für das Vor- und Fertighonen in einer Hon-Maschine mit mehreren Bearbeitungsspindeln. Weiterhin unterschieden werden können die sequenzielle Bearbeitung einzelner Werkstücke und die parallele Bearbeitung mehrerer Werkstücke in einem Arbeitsgang. Werkstücke auf einer Fräsmaschine werden typischerweise einzeln und nacheinander bearbeitet. Beim Erodieren dient dagegen die Parallelbearbeitung mehrerer Werkstücke in einem Arbeitsgang der wirtschaftlichen Gestaltung des Verfahrens.

Der werkstückbezogene Energiebedarf einer Werkzeugmaschine (E_{WZM}) berechnet sich nach Gleichung (13) mithilfe der mittleren Bearbeitungsleistung während der Hauptzeit ($P_{B,h}$) und der Nebennutzungszeit ($P_{B,n}$) sowie der mittleren Grundleistung (P_G). Durch Multiplikation mit den entsprechenden Zeitanteilen für die prozessbezogene Hauptzeit (t_h) und Nebenzeit (t_n) kann der Energiebedarf ermittelt werden. Der Energiebedarf der Maschine im Grundzustand wird mit der über die prozessbezogene Nutzungszeit (t_N) hinausgehenden erweiterten prozessbezogenen Belegungszeit (t_{Be}) nach Gleichung (14) berechnet (in Anlehnung an Schiefer 2000). Bei der Parallelbearbeitung von mehreren Werkstücken in einem Bearbeitungsprozess ist bei der Berechnung des werkstückbezogenen Energiebedarfs auch die Anzahl der Werkstücke (n) zu berücksichtigen.

$$E_{WZM} = \frac{1}{n} \cdot \left((P_{B,h} \cdot t_h + P_{B,n} \cdot t_n) + P_G \cdot (t_{Be} - t_N) \right) \quad (13)$$

$$t_N = t_h + t_n \quad (14)$$

Bei hochautomatisierten Prozessen der Großserienfertigung mit mehreren Bearbeitungsoperationen erfolgt deren Ausführung häufig gleichzeitig zum Be- und Entladen der Maschine. In diesem Fall können die Dauer und die Leistungsaufnahme für die

Haupt- und Nebennutzung im Leistungsprofil der Werkzeugmaschine nicht voneinander unterschieden werden. Die Berechnung des werkstückbezogenen Energiebedarfs erfolgt dann nach Gleichung (15) mit einem Kennwert für die Leistungsaufnahme der gesamten Bearbeitung (P_B) während der prozessbezogenen Nutzungszeit der Maschine (t_N).

$$E_{WZM} = \frac{1}{\eta} \cdot (P_B \cdot t_N + P_G \cdot (t_{Be} - t_N)) \quad (15)$$

Ermitteln der Zeitkennwerte

Unter der prozessbezogenen Nutzungszeit (t_N) wird die Zeit zur Ausführung eines Bearbeitungsprozesses auf der Werkzeugmaschine inklusive der Nebenzeiten zum Be- und Entladen verstanden. Sie entspricht der Summe aus Hauptnutzungszeit (t_h) und Nebennutzungszeit (t_n). Der Energiebedarf während der prozessbezogenen Nutzungszeit kann direkt den bearbeiteten Werkstücken zugeordnet werden. Darüber hinaus treten auch Zeitanteile auf, in denen die Nutzung der Maschine geplant ist, aber kein Produktionsfortschritt erfolgt. Diese Zeitanteile müssen bei der Berechnung des werkstückbezogenen Energieverbrauchs der Werkzeugmaschine ebenfalls berücksichtigt werden.

Die VDI-Richtlinie zur Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen definiert die Belegungszeit (T_B) einer Maschine als Zeitanteil innerhalb eines Betrachtungszeitraums, für den die Nutzung einer Maschine oder Anlage geplant ist. Weiter treten im Betrachtungszeitraum für eine Maschine oder Anlage nicht belegte und nicht geplante Zeiten auf, wie etwa Sonn- und Feiertage (s. Gleichung (16)). Der betrachtete Zeitraum kann dabei zum Beispiel ein gesamtes Jahr, einen Monat, eine Woche oder eine Schicht umfassen. Die Belegungszeit innerhalb des Betrachtungszeitraumes wird durch die Anzahl der Arbeitstage und die Schichten pro Arbeitstag bestimmt. In der Regel wird pro Arbeitstag in einem System von 1, 2 oder 3 Schichten produziert, wobei eine Schicht 8 Zeitstunden umfasst. Um die Anzahl der Arbeitstage pro Jahr zu bestimmen, kann von 5 oder 6 Arbeitstagen pro Woche und durchschnittlich 10 Feiertagen pro Jahr ausgegangen werden. Nach Gleichung (17) umfasst die zeitraumbezogene Belegungszeit (T_B) neben der Nutzungszeit (T_N) auch Ausfallzeiten der Maschine, die organisatorische (T_O), technische (T_T) oder wartungsbedingte (T_W) Ursachen haben. Ursachen für technisch und organisatorisch bedingte Ausfallzeiten sind unter anderem das Rüsten und der Warmlauf der Maschine sowie das Fehlen von Werkstücken. Mögliche Datenquellen für die Ermittlung der Zeitanteile sind manuelle Protokolle oder die Auswertung von Daten der Maschinen- und Betriebsdatenerfassung (VDI 3423).

$$\text{Betrachtungszeitraum} = \text{Belegungszeit} + \text{nicht belegte Zeit} + \text{nicht geplante Zeit} \quad (16)$$

$$T_B = T_N + T_O + T_T + T_W \quad (17)$$

Aufgrund von langen Warmlaufphasen und der Bedienung durch mehrere Mitarbeiter sowie möglichen Problemen mit der Steuerung beim Hochfahren werden die Maschinen in der Serienfertigung auch in nicht produktiven Phasen selten heruntergefahren oder ausgeschaltet (Mertz 2008 zitiert nach Kührke 2011). Die prozessbezogene Belegungszeit (t_B) kann dann nach Gleichung (18) auf Basis der prozessbezogenen Nutzungszeit und einem Faktor für die Belegungszeit berechnet werden, um den Energiebedarf in nicht produktiven Zeiten zu berücksichtigen. Wie in Gleichung (19) zusammengefasst, ergibt sich der Belegungszeitfaktor (f_B) als die Summe der organisatorischen (A_O), der technischen (A_T) und der wartungsbedingten (A_W) Ausfallrate.

$$t_B = t_N \cdot (1 + f_B) \quad (18)$$

$$f_B = A_O + A_T + A_W = \frac{T_O + T_T + T_W}{T_B} \quad (19)$$

Werden Maschinen auch außerhalb der Belegungszeit, zum Beispiel in produktionsfreien Schichten oder an Sonntagen, aus organisatorischen oder technischen Gründen nicht abgeschaltet, dann ist das in einer erweiterten prozessbezogenen Belegungszeit (t_{Be}) nach Gleichung (20) zu berücksichtigen. Der Faktor für die erweiterte Belegungszeit (f_{Be}) errechnet sich als Summe aller nicht geplanten Zeiten in einem Betrachtungszeitraum, zum Beispiel eine Woche, in denen die Maschine nicht abgeschaltet wird. Gleichung (21) fasst dies zusammen.

$$t_{Be} = t_B \cdot (1 + f_{Be}) \quad (20)$$

$$f_{Be} = \frac{\sum t_{\text{nicht geplant und nicht abgeschaltet}}}{\text{Betrachtungszeitraum}} \quad (21)$$

$$f_{Be} = \frac{\sum 5 \text{ Nachtschichten}}{\text{Eine Woche}} = \frac{\sum 5 \cdot 8 \text{ h}}{168 \text{ h}} = \frac{40 \text{ h}}{168 \text{ h}} = 0,24 \quad (22)$$

Im Beispiel einer Serienfertigung mit Zweischichtbetrieb von Montag bis Samstag, bei der die Maschinen am Sonntag abgeschaltet, aber in den produktionsfreien

Nachtschichten im Grundzustand gehalten werden, ergibt sich nach Gleichung (22) ein Faktor für die erweiterte Belegungszeit von rund 24 %.

Ermitteln der Leistungskennwerte

Die mittlere Leistungsaufnahme während eines Bearbeitungszyklus i ($P_{\text{Bearbeitung } i}$) wird als Mittelwert der momentanen Leistungsaufnahme ($P(t)$) während der prozessbezogenen Nutzungszeit (t_N) berechnet, wie in Gleichung (23) dargestellt. Um zufällige Schwankungen der Leistungsaufnahme zu berücksichtigen, wird die mittlere Bearbeitungsleistung (P_B) nach Gleichung (24) als Mittelwert aus n Bearbeitungszyklen gebildet und als Kennwert verwendet (Schiefer 2000). Die Berechnung der Leistungskennwerte für die Haupt- und Nebennutzungszeit ($P_{B,h}$ und $P_{B,n}$) erfolgt in gleicher Weise. Die Leistungskennwerte berechnen sich entsprechend als Mittelwert der momentanen Leistungsaufnahme während der Hauptnutzungszeit (t_h) und der Nebennutzungszeit (t_n).

$$P_{B_i} = \frac{1}{t_N} \cdot \int_0^{t_N} P(t) dt \quad (23)$$

$$P_B = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n P_{\text{Bearbeitung } i} \quad (24)$$

Die Anzahl der für die Kennwertbildung ausgewerteten Bearbeitungszyklen (n) ist in Abhängigkeit von der Untersuchungssituation, der Datenlage und dem Messaufwand zu wählen. Je höher n gewählt wird, desto geringer ist der Einfluss zufälliger Schwankungen. An einer betriebswarmen Maschine wird die Grundleistung gemessen und über den Messzeitraum (t) gemittelt. Der Messzeitraum für die Kennwertbildung wird auf 60 s festgelegt. Die Grundleistung ist spezifisch für die untersuchte Maschine.

$$P_G = \frac{1}{t} \cdot \int_0^t P(t) dt \quad (25)$$

5.1.2.2 Prozessperipherie

Anlagen der Prozessperipherie werden eingesetzt, um für den Fertigungsprozess Hilfs- und Prozessmedien bereitzustellen und für die Wiederverwendung aufzubereiten. Der Einsatz dieser Medien ist notwendig, um das Verfahrensprinzip des Prozesses zu realisieren, und um die geforderte Qualität des Arbeitsergebnisses zu

erzielen. In der spanenden Bearbeitung werden beispielsweise regelmäßig Kühlschmierstoffe eingesetzt, die unter anderem gewährleisten, dass sich das Werkstück nicht zu sehr erwärmt und Späne aus der Bearbeitungsstelle entfernt werden. Diese Kühlschmierstoffe werden in einem Kreislauf gefiltert, gekühlt und durch Pumpen erneut für den Prozess bereitgestellt.

Periphere Anlagen sind, ebenso wie Werkzeugmaschinen, Systeme von Energieverbrauchern. Im Gegensatz zu Werkzeugmaschinen ist das Verhalten der einzelnen Verbraucher der Prozessperipherie jedoch langzyklischer und nur indirekt mit den auf der Werkzeugmaschine ausgeführten Bearbeitungsaufgaben verbunden. Damit der Energieverbrauch werkstückbezogen angegeben werden kann, muss daher eine möglichst verursachungsgerechte Allokation durchgeführt werden.

Nach der Anzahl der angeschlossenen Fertigungsprozesse können in Produktionsbetrieben zwei unterschiedliche Konzepte der Gestaltung von Anlagen der Prozessperipherie unterschieden werden:

- dezentrale Einzelanlagen;
- Gruppen- und Zentralanlagen.

Dezentrale Einzelanlagen versorgen ausschließlich einen Fertigungsprozess. Der Energieverbrauch dieser Anlagen kann direkt einem Fertigungsprozess zugeordnet werden. Im Fall von Gruppen- und Zentralanlagen werden dagegen mehrere Fertigungsprozesse eines Bereichs oder alle Prozesse eines Fertigungsstandortes von einer gemeinsamen Anlage versorgt. In diesem Fall ist es nötig, den Energieverbrauch für die Bereitstellung der Hilfs- und Prozessmedien zu berechnen, und verursachungsgerecht den angeschlossenen Fertigungsprozessen zuzuordnen.

In beiden Fällen ist der werkstückbezogene Energieverbrauch eines Fertigungsprozesses in zwei Schritten zu ermitteln. Im ersten Schritt werden wie bei den Werkzeugmaschinen Leistungskennwerte für die periphere Anlage im Grundzustand und im Bearbeitungszustand bestimmt. Anschließend wird der werkstückbezogene Energieverbrauch der Peripherie für den angeschlossenen Prozess berechnet. In der Regel treten für periphere Anlagen nur zwei Betriebszustände auf, weswegen die vereinfachte Berechnung nach Gleichung (26) erfolgen kann.

$$E_{\text{Peripherie}} = P_B \cdot t_N + P_G \cdot (t_{Be} - t_N) \quad (26)$$

Für dezentrale Einzelanlagen und Zentralanlagen ergeben sich unterschiedliche Möglichkeiten, die Leistungskennwerte der Prozessperipherie in Abhängigkeit vom Zustand der angeschlossenen Prozesse zu ermitteln.

Dezentrale Einzelanlagen

Für dezentrale Einzelanlagen kann aufgrund der direkten Zuordnung der peripheren Anlage zu einem Prozess angenommen werden, dass die Leistungskennwerte der

Peripherie in Abhängigkeit vom Zustand der angeschlossenen Maschine zu bestimmen sind. Das Vorgehen zur Kennwertermittlung umfasst vier Schritte und ist in Abbildung 5-4 dargestellt.

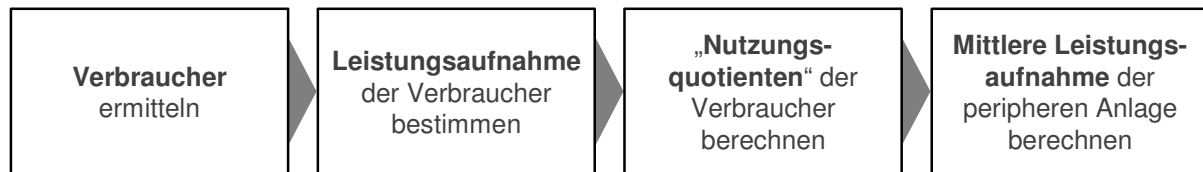


Abbildung 5-4: Vorgehen zur Kennwertbildung einer peripheren Anlage

Zunächst werden die einzelnen Energieverbraucher der Anlage ermittelt. Abbildung 5-5 zeigt beispielhaft das Leistungsprofil einer dezentralen Einzelanlage mit drei Verbrauchern. In Ergänzung zum Leistungsprofil sind das Einschaltverhalten der drei Verbraucher und der Zustand der angeschlossenen Maschine dargestellt. Es ist zu erkennen, dass Verbraucher 1 der peripheren Anlage unabhängig vom Maschinenzustand kontinuierlich eingeschaltet ist. Im Gegensatz dazu schaltet sich der Verbraucher 2 nur ein, wenn sich die Maschine im Bearbeitungszustand befindet. Das Einschaltverhalten von Verbraucher 3 ist im Vergleich dazu periodisch und abhängig vom Zustand von Verbraucher 2 und damit nur mittelbar vom Zustand der Maschine.

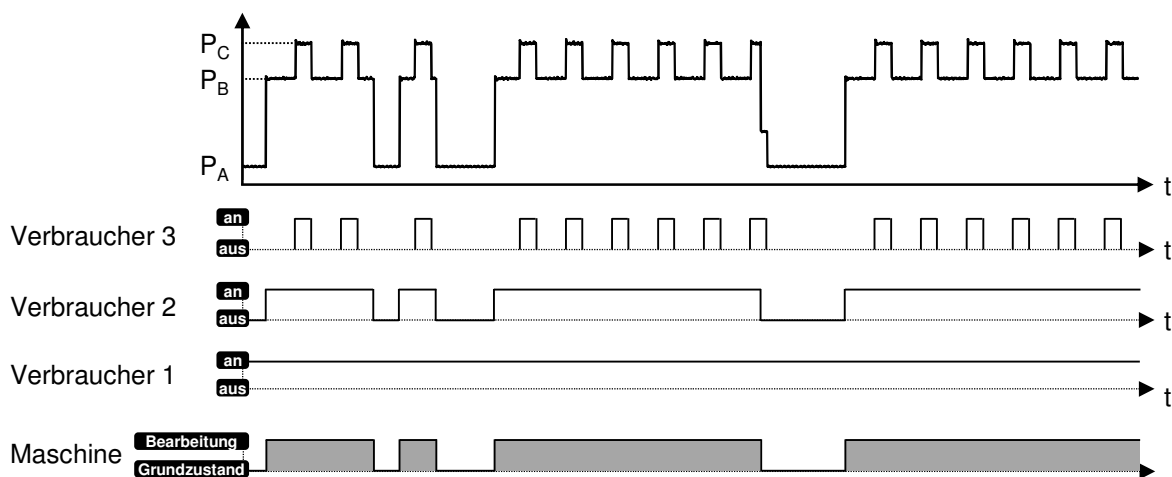


Abbildung 5-5: Beispielhafter Verlauf des Leistungsprofils einer dezentralen Einzelanlage mit drei Verbrauchern, in Anlehnung an (Zein 2012)

Für die ermittelten Verbraucher ist im zweiten Schritt die Leistungsaufnahme der Verbraucher zu bestimmen. Dies ist durch die Auswertung der unterschiedlichen Leistungsniveaus des Leistungsprofils der Anlage möglich. Beispielsweise ergibt sich die Leistungsaufnahme des Verbrauchers 2 als Differenz aus den Leistungsniveaus P_B und P_A .

Das Einschaltverhalten von zyklischen Verbrauchern ist in den meisten Fällen durch eine Zwei-Punkt-Regelung festgelegt. Dabei werden Verbraucher, wie Pumpen, Filter

oder Kühlaggregate, in Abhängigkeit von Steuergrößen ein- und ausgeschaltet. Größen für die Steuerung der Verbraucher können zum Beispiel der Füllstand oder die Temperatur eines Mediums in einem Behälter sein. Andere Verbraucher werden auch nach einem festen Zeitschema gesteuert. Um das Nutzungsverhalten der einzelnen Verbraucher berechnen zu können, wird im dritten Schritt des Vorgehens der Nutzungsquotient der Verbraucher nach Gleichung (27) berechnet. Er gibt an, in welchem Zeitanteil (t_{an}) der Verbraucher i aktiv ist, wenn sich die angeschlossene Maschine im Grundzustand oder in der Bearbeitung befindet. Beispielsweise ist Verbraucher 1 in Abbildung 5-5 ein kontinuierlich aktiver Verbraucher, sodass sich unabhängig vom Maschinenzustand ein Nutzungsquotient von 100 % ergibt.

$$\text{Nutzungsquotient}_{i, j} = \frac{t_{an}}{t_{an} + t_{aus}} \quad (27)$$

i = Verbraucher
 j = Maschinenzustand

Im vierten Schritt wird die mittlere Leistungsaufnahme der peripheren Anlage in Abhängigkeit vom Zustand der angeschlossenen Maschine j berechnet. Sie ergibt sich nach Gleichung (28).

$$P_{\text{Peripherie}, j} = \sum_{i=1}^n P_{i, \text{Zustand } j} \cdot \text{Nutzungsquotient}_{\text{Verbraucher } i, \text{Zustand } j} \quad (28)$$

i = Verbraucher
 j = Maschinenzustand
 P_{ij} = Leistungsaufnahme des Verbrauchers i bei Maschinenzustand j

Gruppenanlagen und Zentralanlagen

Bei Gruppen- und Zentralanlagen kann häufig bereits bei zwei angeschlossenen Prozessen kein einfacher Zusammenhang mehr zwischen dem Zustand der angeschlossenen Prozesse und der Leistungsaufnahme der peripheren Anlage hergestellt werden. Es empfiehlt sich daher, ein anderes Vorgehen zur Ermittlung von Leistungskennwerten anzuwenden, und für die periphere Anlage den Energieverbrauch bezogen auf das bereitgestellte Medienvolumen zu berechnen. Der Energieverbrauch und das von der Anlage bereitgestellte Medienvolumen werden dafür über einen repräsentativen Zeitraum, zum Beispiel eine Schicht, ermittelt. Werden die Betriebsdaten kontinuierlich auf Ebene der peripheren Anlagen erfasst, können auch Jahreskennwerte herangezogen werden. Das Energieäquivalent der Peripherie ($E\ddot{A}_{\text{Peripherie}}$) gibt an, wie viel Energie die periphere Anlage benötigt, um das Hilfs- oder Prozessmedium bereitzustellen. Die an die Anlage angeschlossenen Fertigungsprozesse werden durch eine Medienverbrauchsrate (MVR_{Prozess}) charakterisiert, die sich im Grund- und Bearbeitungszustand unterscheiden kann. Durch

Multiplikation der Energieverbrauchsrate der Peripherie mit der Medienverbrauchsrate des Prozesses ergeben sich die Leistungskennwerte für die Bereitstellung der Prozessmedien im Grundzustand und betriebsbereiten Zustand der Maschine (P_G und P_B). Dies in Abbildung 5-6 dargestellt.

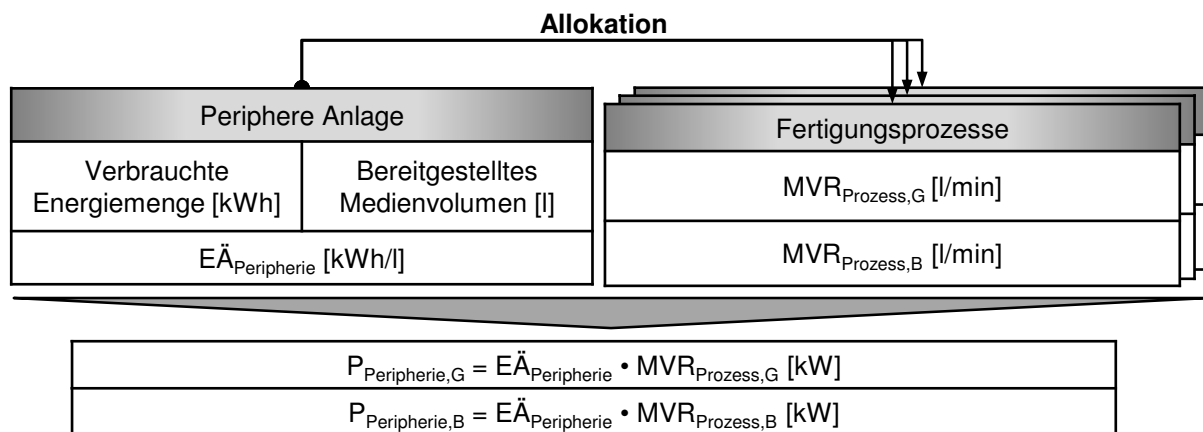


Abbildung 5-6: Allokationsschema für Gruppen- und Zentralanlagen

5.1.3 Messmethoden

5.1.3.1 Elektrische Leistungsmessungen

Für die Messung der elektrischen Leistung werden im Rahmen dieser Arbeit zwei Messgeräte des Typs CLT313 der Firma Christ Elektronik verwendet. Das CLT313 ist für Messungen von Wechselströmen im dreiphasigen Drehstromnetz geeignet. Spannung und Strom können mit einer Abtastrate von 4000 Hz gemessen werden. Aus den Messwerten bestimmt das Messgerät die Phasenverschiebung zwischen dem Strom und der Spannung für alle drei Phasen. Als Kennwert wird die gemessene Gesamtwirkleistung über eine analoge Schnittstelle ausgegeben, wobei die Messwerte mit einer Messfrequenz von 1, 2 oder 5 Hz übertragen werden können. Für die Untersuchung der Leistungsaufnahme wird eine Messfrequenz von 1 Hz, also einem Messwert pro Sekunde, gewählt. Mit dieser zeitlichen Auflösung ist es möglich, die Abläufe, wie einzelne Bearbeitungszyklen und Nutzungsintervalle, hinreichend genau zu analysieren. Gleichzeitig bleibt die Menge der erzeugten Messdaten in einem Umfang, der auch mit normalen Tabellenkalkulationsprogrammen ausgewertet werden kann (Kara et al. 2011, Zein 2012).

Der Messfehler für die Stromstärke und die Spannung beträgt 1,0 % vom jeweiligen Messbereich. Da die direkte Strommessung des CLT313 auf 16 A pro Phase beschränkt ist, werden zusätzlich klappbare Stromwandler der Firma Hobut mit einem Wandlungsverhältnis von 100/5 A verwendet. Dadurch ist das Messen höherer Ströme möglich und die Installation der Messtechnik wird vereinfacht, da die Leitung für die Strommessung nicht aufgetrennt werden muss. Die verwendeten Stromwandler entsprechen der Genauigkeitsklasse 1 nach DIN IEC 60044/1. Diese definiert für den

Strom in Abhängigkeit von der Ausnutzung des Bemessungsstroms einen Fehlergrenzwert zwischen 3 % und 1 % (Redur Messwandler GmbH 2014). Die Aufzeichnung aller Messdaten erfolgt mit dem Datenaufzeichnungsgerät Gen5i der Firma HBM. Das Leistungsmessgerät, die Stromwandler und das Datenaufzeichnungsgerät sind in Abbildung 5-7 dargestellt.



CLT 313 (Christ Elektronik)

Messfehler: $U, I \leq \pm 1,0 \%$ vom jeweiligen Messbereich



Stromwandler (Hobut)

Genauigkeitsklasse: 1



Gen5i (HBM)

Abbildung 5-7: Verwendete Geräte zur Leistungsmessung, Bildnachweis: (Christ-Elektronik 2013, HBM, Hobut 2015)

5.1.3.2 Druckluftmessungen

In dieser Arbeit wird der Volumenstrom der Druckluft nach dem kalorimetrischen Prinzip gemessen. Das für die Messungen eingesetzte Messgerät SFAB der Firma Festo verfügt über einen Druckluftmessbereich von 6 – 600 l/min. Der gemessene Druckluftverbrauch wird in l/min bei Normbedingungen nach DIN 1343 angegeben:

- Luftfeuchte = 0 %;
- Luftdruck (absolut) = 1,001325 bar;
- Temperatur = 0 °C.

Das Messgerät berechnet den Volumenstrom bei Normbedingungen ausgehend von Referenzbedingungen mit einem Nenndruck von 6 bar Überdruck und einer Nenn-temperatur von 23 °C (Festo 2013). Bei von den Referenzbedingungen abweichenden Messbedingungen muss das Messergebnis auf Basis der thermischen Zustandsgleichung idealer Gase umgerechnet werden (Atlas Copco 2015, Ruppelt 2003). Für die Umrechnung kann die relative Luftfeuchte vernachlässigt werden.

$$Q_N = \frac{p_i \cdot Q_i \cdot T_N}{T_i \cdot p_N} \quad (29)$$

- Q_N - Volumenstrom bei Normbedingungen
 p_N - Normdruck
 T_N - Normtemperatur

- Q_i - Volumenstrom bei Messbedingungen
 p_i - Druck bei der Messung
 T_i - Temperatur bei der Messung

Die Messwerte werden als analoges Spannungssignal ausgegeben und ebenfalls mit dem Datenaufzeichnungsgerät Gen5i von HBM aufgezeichnet. Die Fehlergrenze des Messgerätes setzt sich zusammen aus einem Nullpunktfehler in Höhe von 0,3 % des Messbereichs und einer linearen Abweichung in Höhe von 3 % des Messwerts. Abbildung 5-8 zeigt das verwendete Messgerät.



Normbedingungen nach DIN 1343	Luftfeuchte = 0 % Luftdruck = 1,01325 bar (absolut) Temperatur = 0 °C
Referenzbedingungen	Nenndruck = 6 bar (Überdruck) Nenntemperatur = 23 °C
Durchflussmessbereich	6...600 l/min
Fehlergrenze	± (0,3% vom Messbereich + 3% vom Messwert)

Abbildung 5-8: Verwendeter Durchflusssensor SFAB, Bildnachweis: (Festo 2013)

5.1.3.3 Ermitteln des Volumenstromes flüssiger Medien

Flüssige Prozessmedien wie Kühlschmierstoffe werden in der Regel mehrfach verwendet und nach dem Einsatz im Prozess in einen Kreislauf zur Wiederaufbereitung geführt. Dabei werden die Medien häufig in Zwischenspeichern gesammelt und von Pumpen in Intervallen weitergefördert. In der Regel sind die eingesetzten Pumpen Zwei-Punkt geregelt, sodass sie sich bei einem festgelegten oberen Füllstand des Zwischenspeichers einschalten und beim Erreichen eines festgelegten unteren Füllstands wieder abschalten. Der Volumenstrom flüssiger Medien kann in diesem Fall indirekt über das Volumen des Zwischenspeichers (V_{Speicher}) und die Zykluszeiten der Pumpen (t_{an} , t_{aus}) berechnet werden. Nach Gleichung (30) kann aus dem Speichervolumen und der Einschaltdauer der Volumenstrom berechnet werden, der in einen Zwischenspeicher fließt.

$$Q_{\text{Zufluss}} = \frac{V_{\text{Speicher}}}{t_{\text{aus}}} \quad (30)$$

Um das Speichervolumen (V_{Speicher}) zu berechnen, kann die Differenz aus dem festgelegten oberen und unteren Füllstand des Zwischenspeichers herangezogen werden. Die Zykluszeiten von Pumpen lassen sich durch Zeitaufnahmen ermitteln oder können aus Daten der Maschinensteuerung oder aus Aufzeichnungen des elektrischen Leistungsprofils der Pumpen abgeleitet werden.

5.1.4 Vorgehen

Die Methode zum Energiebilanzieren verfolgt das Ziel, den Energiebedarf von Fertigungsverfahren zu analysieren und Kennwerte für die vorausschauende Bilanzierung von Fertigungsprozessen und Fertigungsprozessketten bereitzustellen. Der Ansatz folgt dabei einem Vorgehen mit vier Teilschritten. In Abbildung 5-9 ist das Vorgehen zusammengefasst.

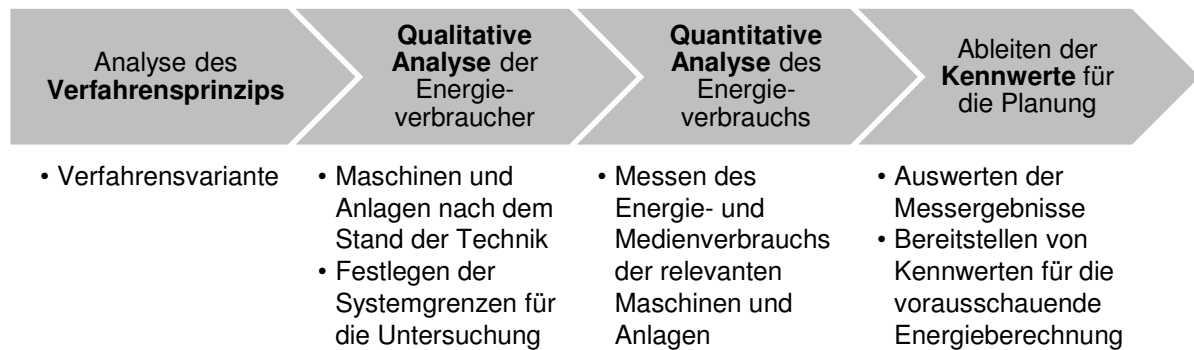


Abbildung 5-9: Vorgehen für die Analyse des Energieverbrauchs von Fertigungsprozessen

Analyse des Verfahrensprinzips

Im ersten Schritt wird das zugrunde liegende Verfahrensprinzip analysiert. Die Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN8580 (DIN 8580) ermöglicht es, die technologischen Wirkweisen und Merkmale der einzelnen Fertigungsverfahren einfach zu bestimmen. Spezielle Verfahrensvarianten sowie Einsatzgebiete und Anwendungsbeispiele der Verfahren sind häufig in weiterführenden Normen (zum Beispiel VDI Norm zum Elektrochemischen Abtragen, s. VDI 3401) beschrieben. Der Stand der Technik der Verfahrensvarianten und der eingesetzten Anlagentechnik kann Fachveröffentlichungen (zum Beispiel Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, s. Hoffmeister und Denkena 2013) entnommen werden.

Qualitative Analyse der Energieverbraucher

Aus der Analyse des Verfahrensprinzips kann im zweiten Schritt abgeleitet werden, welche Maschinen- und Anlagenteile nach dem Stand der Technik zur Realisierung des untersuchten Verfahrens eingesetzt werden. Auf der Grundlage dieser qualitativen Analyse der Energieverbraucher werden die Systemgrenzen zur Untersuchung des Energiebedarfs des Verfahrens festgelegt. Dazu wird die in Kapitel 5.1.1 eingeführte Definition angewendet, wonach alle Energieverbraucher berücksichtigt werden, die einen wesentlichen und unmittelbaren Beitrag zur Realisierung des Fertigungsprozesses und zur Erzielung des Fertigungsergebnisses leisten.

Quantitative Analyse des Energiebedarfs

Bei der quantitativen Analyse des Energiebedarfs werden die festgelegten Systemgrenzen auf einen konkret zu untersuchenden Prozess übertragen. Das Vorgehen zum Vermessen der Energieverbraucher wird festgelegt. Dazu zählen das Festlegen der Messstellen sowie die Beschreibung der Versuchsbedingungen, des Versuchsaufbaus und der angewendeten Prozessparameter. Die elektrische Leistungsaufnahme der Werkzeugmaschine und der peripheren Anlagenteile sowie der Verbrauch an Prozessmedien werden messtechnisch erfasst und analysiert.

Kennwerte ermitteln und zusammenfassen

Im letzten Schritt werden die ermittelten Kennwerte für die elektrische Leistungsaufnahme der Werkzeugmaschine (Kapitel 5.1.2.1) und der peripheren Anlagen (Kapitel 5.1.2.2) sowie die Kennwerte für den Medienverbrauch zusammengefasst. Der so ermittelte Datensatz dient zur Bilanzierung des Energieverbrauchs des untersuchten Fertigungsprozesses und wird für die vorausschauende Planung von Prozessketten (Kapitel 6) bereitgestellt.

5.2 Anwendungsbeispiel Elektrochemisches Abtragen (PECM)

5.2.1 Verfahrensprinzip und -grundlagen

Die Anforderungen an die mechanischen Werkstoffeigenschaften und die Komplexität der zu erzeugenden Geometrien steigen kontinuierlich. Spanende Bearbeitungsverfahren können diese Anforderungen zum Teil nur eingeschränkt erfüllen. Vergütete Stähle und Hartmetalle können beispielsweise nur schwierig bearbeitet werden (Klocke und König 2007). In solchen Fällen stellt das Elektrochemische Abtragen (engl.: Electrochemical Machining, ECM) eine technologische und wirtschaftliche Alternative dar. Häufige Einsatzgebiete des Verfahrens finden sich bei der Bearbeitung sehr harter Eisenwerkstoffe im Werkzeug- und Flugzeugbau sowie in der Medizintechnik (Regel 2012). Typische Anwendungsfälle für das ECM sind die Bearbeitung von Turbinenschaufeln, Triebwerksteilen, Getrieben sowie von Prägestempeln, Tablettenwalzen und chirurgischen Implantaten (Rajurkar et al. 2013, VDI 3401).

Das Elektrochemische Abtragen gehört nach DIN 8580 zu den abtragenden und damit zu den trennenden Fertigungsverfahren (DIN 1986). Nach DIN 8590 werden beim Abtragen Stoffteilchen von einem festen Körper auf nichtmechanischem Wege getrennt. Nach dem Abtragprinzip werden das thermische, chemische und elektrochemische Abtragen unterschieden (Regel 2012). Beim Elektrochemischen Abtragen wird ein metallischer Werkstoff unter Einwirkung eines elektrischen Stromes und einer Elektrolytlösung anodisch aufgelöst. Die Erzeugung des Stromflusses erfolgt unter Anwendung einer externen Stromquelle (DIN 1986). Das Werkzeug (Kathode) enthält dabei die negative Form der zu erzeugenden Geometrie. Durch das schichtweise elektrochemische Auflösen des Werkstückmaterials und einen Vorschub der Elektrode wird die Elektrodengeometrie im Werkstück (Anode) abgebildet. Die Elektrolytlösung steuert in diesem Prozess die chemische Reaktion, leitet den elektrischen Strom und sorgt für den Abtransport von Reaktionswärme und Reaktionsprodukten aus dem Stirrspalt (Regel 2012, VDI 3401). In Abbildung 5-10 ist das Verfahrensprinzip des Elektrochemischen Abtragens dargestellt.

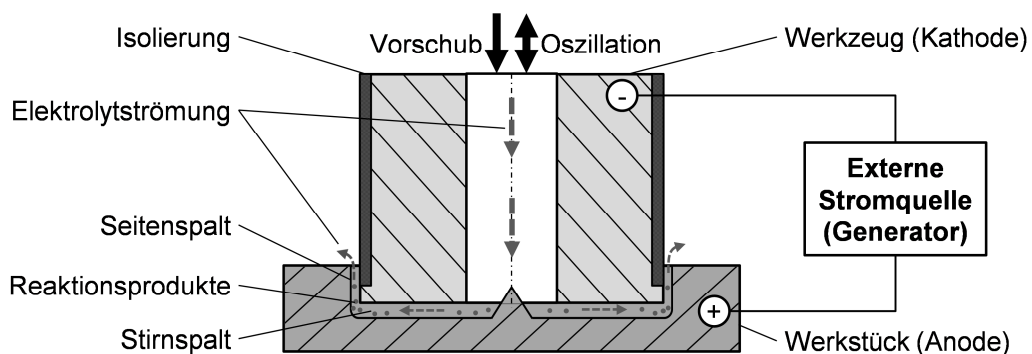


Abbildung 5-10: Prinzip des ECM, in Anlehnung an (Regel 2012)

Die Größe des Stirnspaltes während der Bearbeitung bestimmt das Bearbeitungsergebnis. Mit kleiner werdendem Stirnspalt kann eine bessere Abbildungsgenauigkeit erzielt werden (Uhlmann et al. 2001). Aus diesem Grund wurde das Verfahren weiterentwickelt. Mithilfe von gepulstem Strom anstatt von Gleichstrom kann eine höhere Stromdichte verwendet und somit die Spaltweite reduziert werden (Klocke und König 2007). Diese Verfahrensweiterentwicklung wird als PECM (Pulsed Electrochemical Machining) bezeichnet (Rajurkar et al. 1999). Bei reduzierter Spaltweite entsteht jedoch das Problem, dass die Elektrolytlösung den Spalt nicht mehr optimal spülen kann und Reaktionsprodukte im Spalt verbleiben. Dadurch werden der Stromfluss und die elektrochemische Auflösung behindert. Dieses Problem wird gelöst, indem die Vorschubbewegung mit einer Oszillation der Werkzeugelektrode überlagert wird. Auf diese Weise werden die Pulspausen genutzt, um den Stirnspalt zu vergrößern und die Bearbeitungsstelle kontinuierlich und vollständig zu spülen (Klocke und König 2007).

Das Prinzip des Elektrochemischen Abtrags beim PECM bringt charakteristische Eigenschaften des Verfahrens mit sich. Im Gegensatz zu spanenden Fertigungsverfahren hängt die Bearbeitbarkeit des Werkstoffs nur von den elektrochemischen Eigenschaften ab. Die mechanischen und physikalischen Eigenschaften wie Härte und Zugfestigkeit haben dagegen keinen Einfluss (Klocke und König 2007, VDI 3401). Die Elektrode arbeitet berührungslos und der Materialabtrag erfolgt nur anodisch, sodass beim PECM kein Werkzeugverschleiß auftritt (Klocke und König 2007). Dadurch zeichnet sich das Verfahren durch eine hohe Form-, Wiederhol- und Abbildgenauigkeit aus. Die Vorschubgeschwindigkeit und die Bearbeitungsdauer sind abhängig von der verwendeten Stromdichte. Die maximal verfügbare Stromdichte wird bei gegebener Stromstärke durch die Größe der zu bearbeitenden Oberfläche bestimmt. Daher kann der Prozess bei kleineren Bearbeitungsflächen parallelisiert werden, indem Mehrfachwerkzeuge verwendet werden. Die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens wird auch dadurch begünstigt, dass mehrere Bearbeitungsschritte, wie das Schruppen, Schlichten und Polieren, in einem Arbeitsgang ohne Werkzeugwechsel möglich sind (VDI 3401). Bei normaler Bearbeitung können Oberflächen mit einer Rauheit von $R_z = 10 \mu\text{m}$ erzielt werden. Elektrochemisches Polieren erlaubt Oberflächengüten von $R_z < 2 \mu\text{m}$ (Regel 2012). Durch die erzeugten Bearbeitungstemperaturen von bis zu $80 \text{ }^\circ\text{C}$ tritt nur eine geringe thermische Belastung des zu bearbeitenden Werkstücks auf (Regel 2012). Die Elektrolytlösung transportiert die bei der Elektrolyse entstehende Wärme und die Reaktionsprodukte aus dem Stirnspalt. Da die Temperatur und die Reinheit der Elektrolytlösung einen wesentlichen Einfluss auf das Arbeitsergebnis haben, muss die Lösung entsprechend gereinigt und gekühlt werden. Je nach Anforderung muss die Temperatur zwischen 15 und $60 \text{ }^\circ\text{C}$ betragen (VDI 3401).

5.2.2 Festlegen der Systemgrenze

Aus dem Verfahrensprinzip der elektrochemischen Bearbeitung ergeben sich funktionelle Anforderungen an die Anlagentechnik zur Realisierung des PECM-Prozesses. Diese Funktionen werden in einzelne Anlageneinheiten zusammengefasst. Die Glieder-

derung der Anlagenteile unter dem Gesichtspunkt des Energieverbrauchs erfolgt danach, welche Module über einen eigenen Stromanschluss verfügen, an dem der Energieverbrauch gemessen werden kann. Zum grundsätzlichen Aufbau einer Fertigungsanlage zur elektrochemischen Bearbeitung gehören die Werkzeugmaschine und periphere Anlagenteile. Die PECM-Maschine umfasst die Bearbeitungskammer, den Stromgenerator sowie die Maschinensteuerung. Zu den peripheren Anlagenteilen zählen die Elektrolytversorgung, die Kühlung der Generatoren und die Druckluftversorgung der Anlage (Klocke und König 2007, Regel 2012, VDI 3401).

Dem Prozess wird elektrische Energie zugeführt, um die einzelnen Anlagenteile zu betreiben. In Abbildung 5-11 sind die Anlagentechnik für den PECM-Prozess und die Systemgrenzen zur Ermittlung des Energieverbrauchs dargestellt. In der PECM-Maschine werden mechanische Komponenten wie der Vorschub und die Oszillation der Elektrode sowie die Maschinensteuerung elektrisch betrieben. Der Generator nutzt den Wechselstrom aus dem Stromnetz und wandelt diesen in gepulsten Gleichstrom für den Bearbeitungsprozess um. Modular aufgebaute Generatoren mit einer Pulsleistung von bis zu 20.000 A sind verfügbar (EMAG 2012, PEMTec 2014). Bei der Erzeugung des gepulsten Gleichstroms für die Bearbeitung entsteht im Stromgenerator Abwärme, die von einem Kühlsystem abgeführt und an die Umgebung abgegeben wird. Weitere elektrische Energie wird von den peripheren Anlagenteilen verbraucht. Im Elektrolytmodul wird die Elektrolytlösung gefiltert, temperiert und mit Pumpen in einem Kreislauf zwischen der Bearbeitungsmaschine und der Elektrolytaufbereitung geführt. Die Elektrolytversorgung erfolgt meist durch ein separates peripheres Modul mit Förderleistungen von bis zu 1.000 l/min und Drücken bis 50 bar (EMAG 2012, Fritz 2012). Elektrische Energie wird auch eingesetzt, um Druckluft zu erzeugen, die unter anderem für den Betrieb von pneumatischen Ventilen benötigt wird.

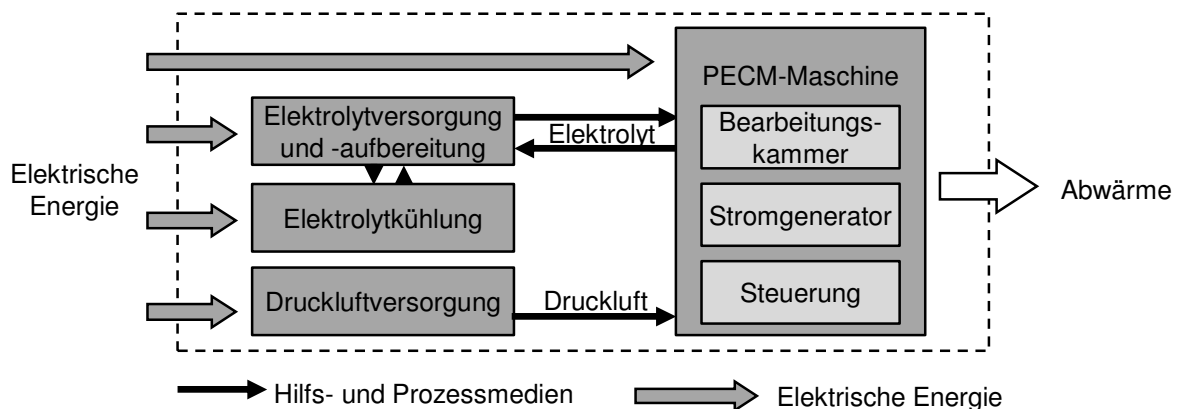


Abbildung 5-11: Systemgrenze für die Untersuchung des Energieverbrauchs beim PECM

5.2.3 Analyse des Energieverbrauchs beim PECM

5.2.3.1 Messvorgehen

Es werden zwei Maschinen der Firma PEMTec SNC herangezogen, um die Messung und Analyse des Energieverbrauchs beim PECM durchzuführen. Die Versuchsmaschinen werden an zwei unterschiedlichen Standorten jeweils in einer Forschungsumgebung betrieben. Bei der ersten Maschine handelt es sich um eine PEMCenter 8000, die einen Generatorstrom von bis zu 8.000 A für den Prozess bereitstellen kann. Der Nachfolger dieses Maschinentyps ist eine PEM 600 mit einem Generatorstrom von bis zu 9.600 A. In Bezug auf den zu erwartenden Energiebedarf sind zwei wesentliche Unterschiede zwischen den Maschinengenerationen zu berücksichtigen. Zum einen wurde die Generatortechnik der PEM 600 gegenüber dem Vorgänger PEMCenter 8000 in ihrem Wirkungsgrad weiterentwickelt, sodass eine signifikante Reduktion der Umwandlungsverluste zu erwarten ist. Zum anderen wurde die Kühlung der Generatoren weiterentwickelt. Beide Maschinen verfügen über Lüfter, welche die Abwärme der Generatoren an die Umgebung abgeben. Aufgrund des verbesserten Wirkungsgrades der Generatoren ist die Anzahl der Lüfter in der PEM 600 reduziert worden. Zudem sind die Lüfter der neuen Maschine drehzahlregelt im Vergleich zu den im Vorgängermodell verbauten unregulierten Lüftern. Abbildung 5-12 zeigt beispielhaft eine Maschine vom Typ PEM 600 mit der Bearbeitungskammer, den Generatoren sowie der Steuerungseinheit, die über einen gemeinsamen Stromanschluss angeschlossen sind. Die ebenfalls dargestellte periphere Anlage zur Elektrolytaufbereitung verfügt über einen separaten Stromanschluss.



Abbildung 5-12: Untersuchte Maschine PEM 600 mit den Anlagenteilen (PEMTec 2015b)

Die elektrische Leistungsaufnahme der PECM-Maschinen wird während der Versuche mit einem Leistungsmessgerät vermessen. Zusätzlich werden über die Maschinensteuerung Daten zu Strom, Spannung, Pulsbreite und Pulsfrequenz erfasst. Aus diesen Steuerungsdaten kann die für die Elektrolyse aufgewendete

Leistungsaufnahme berechnet werden. Die Leistungskennwerte für die PECM-Maschinen werden in Kapitel 5.2.3.2 ermittelt. Um die Leistungsaufnahme der Elektrolytversorgung zu bestimmen, werden der Druck und der Volumenstrom des Elektrolyten ebenfalls über die Maschinensteuerung erfasst und gemeinsam mit der gemessenen Leistungsaufnahme der Elektrolytanlage ausgewertet (Kapitel 5.2.3.3). In Kapitel 5.2.3.4 wird der Wärmeeintrag in die Elektrolytlösung in Abhängigkeit von den Prozessparametern berechnet und der Energiebedarf zum Kühlen des Elektrolyten bestimmt. Der Druckluftverbrauch des Prozesses wird ebenfalls messtechnisch erfasst und in Kapitel 5.2.3.5 ermittelt. Abbildung 5-13 fasst zusammen, welche Daten zur Analyse des Energieverbrauchs beim untersuchten PECM-Prozess aufgenommen und ausgewertet werden.

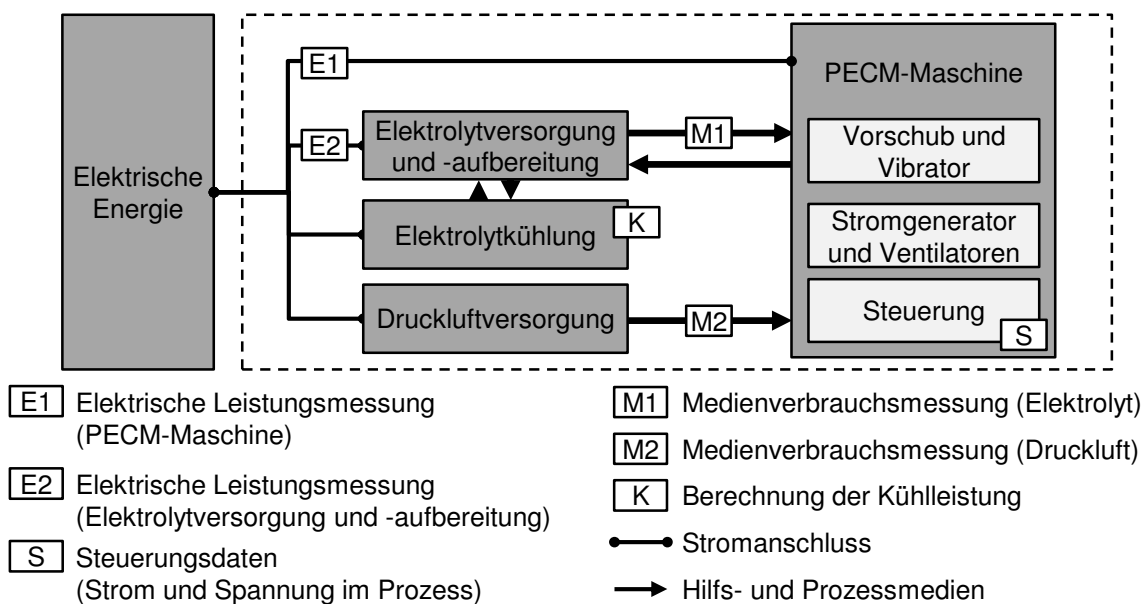


Abbildung 5-13: Datenerfassung im untersuchten PECM-Prozess

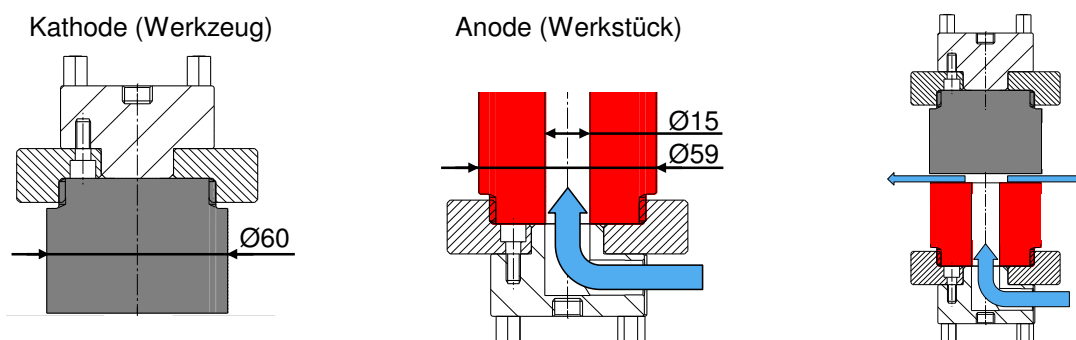


Abbildung 5-14: Werkzeug, Werkstück und Versuchsaufbau (rechts) (Swat et al. 2013a)

Als Bearbeitungsaufgabe für die Untersuchungen wird das Abtragen einer planen Anode (Werkstück) mit einer ebenfalls planen Kathode (Werkzeug) aus Edelstahl

1.4301 definiert. Die Bearbeitungsaufgabe wird im Folgenden als Bearbeitungsaufgabe „Planar“ bezeichnet. Das zylindrische Werkstück hat einen Durchmesser von 59 mm und beinhaltet eine zentrale Bohrung mit einem Durchmesser von 15 mm, die für die Elektrolytspülung verwendet wird. Die Größe der bearbeiteten Oberfläche beträgt 2.557 mm^2 . In den Experimenten werden jeweils 3 g Material vom Werkstück abgetragen. Abbildung 5-14 zeigt das Werkzeug und das Werkstück sowie den Versuchsaufbau. Die Untersuchungen werden für drei Parametersätze durchgeführt. Der eingesetzte Elektrolyt (Natriumnitrat, NaNO_3) besitzt eine Leitfähigkeit von 71 mS/cm und einen pH-Wert von 6,5. Tabelle 5-1 fasst die gewählten Parametersätze zusammen.

Tabelle 5-1: Parametersätze für die PECM-Versuche

Parametersatz	Pulsfrequenz [Hz]	Spannung [V]	Pulsbreite [ms]	Vorschub [mm/min]
1	50	12	2,5	0,080
2				0,113
3				0,160

5.2.3.2 Werkzeugmaschine

Um die Leistungskennwerte der Maschinen für die Bearbeitungsaufgabe zu ermitteln, werden drei Bearbeitungszyklen je untersuchtem Parametersatz ausgewertet. Wie in Abbildung 5-15 am Beispiel eines Bearbeitungszyklus dargestellt, können im Leistungsprofil der PECM-Maschinen die Hauptzeit (t_h) und die Nebenzeit (t_n) sowie die Leistungsparameter unterschieden werden.

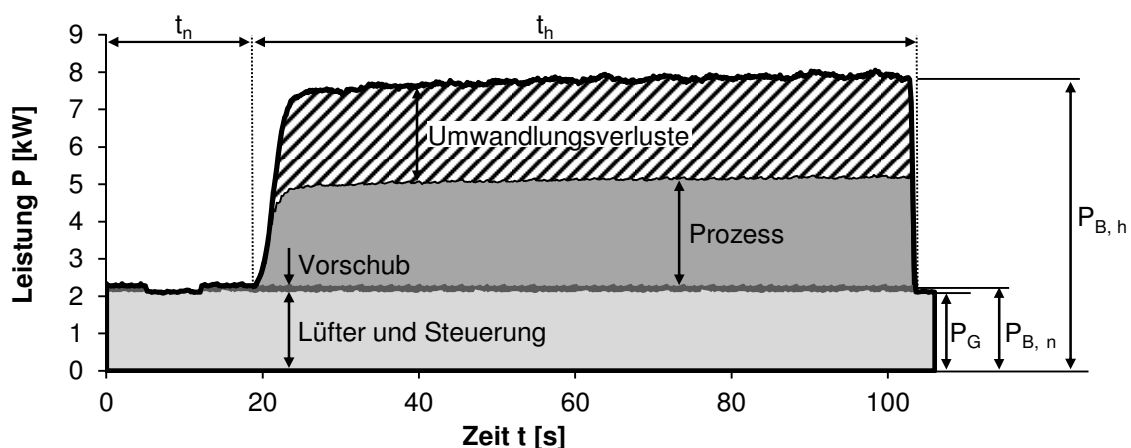


Abbildung 5-15: Beispielhafte Darstellung eines Leistungsprofils beim PECM (PEMCenter 8000, Parametersatz 2)

Die Nebenzeit umfasst das Be- und Entladen der Maschine und das Heranfahren der Z-Achse an die Startposition. Im Grundzustand ist die Steuerung der Maschine aktiviert und die Lüfter der Generatoren laufen kontinuierlich (P_G). Beim Be- und Entladen der Maschine wird zusätzlich die Z-Achse zum Verfahren zwischen Lade-

und Bearbeitungsposition aktiviert ($P_{B, n}$). Mit dem Beginn der Bearbeitung steigt die Leistungsaufnahme an ($P_{B, h}$). Im Prozess stellt sich eine Stromstärke ein, bei der die Geschwindigkeit der Materialauflösung dem im Parametersatz vorgegebenen Vorschub der Maschine entspricht. Die Leistungsaufnahme während der Bearbeitung kann weiter differenziert werden, indem aus den Daten der Maschinensteuerung der Leistungsanteil berechnet wird, der von der Maschine für den Prozess bereitgestellt wird. Der darüber hinausgehende Anteil der am Hauptanschluss der Maschine gemessenen Leistungsaufnahme ist auf Umwandlungsverluste in den Generatoren zurückzuführen.

Gemäß der in Kapitel 5.1.2.1 beschriebenen Vorgehensweise werden die Leistungskennwerte der Maschinen ermittelt. Der Kennwert für die Leistungsaufnahme während der Hauptzeit der Bearbeitung ($P_{B, h}$) wird als Mittelwert der drei Versuche je Parametersatz angegeben. Dabei ist die gemessene Leistungsaufnahme abhängig vom eingestellten Parametersatz. Je höher der Vorschub gewählt wird, desto höher ist die für die Materialauflösung benötigte Stromstärke. Die Hauptzeit (t_h) nimmt bei höherem Vorschub entsprechend ab und beträgt für die Parametersätze 1, 2 und 3 rund 134 s, 87 s und 61 s. Abbildung 5-16 zeigt die Leistungsaufnahme der Maschinen für die Prozessleistung der drei untersuchten Parametersätze auf beiden Maschinen dargestellt. Die Leistungskennwerte und die Prozessleistung für die untersuchten Parametersätze sind in Tabelle 5-2 zusammengefasst.

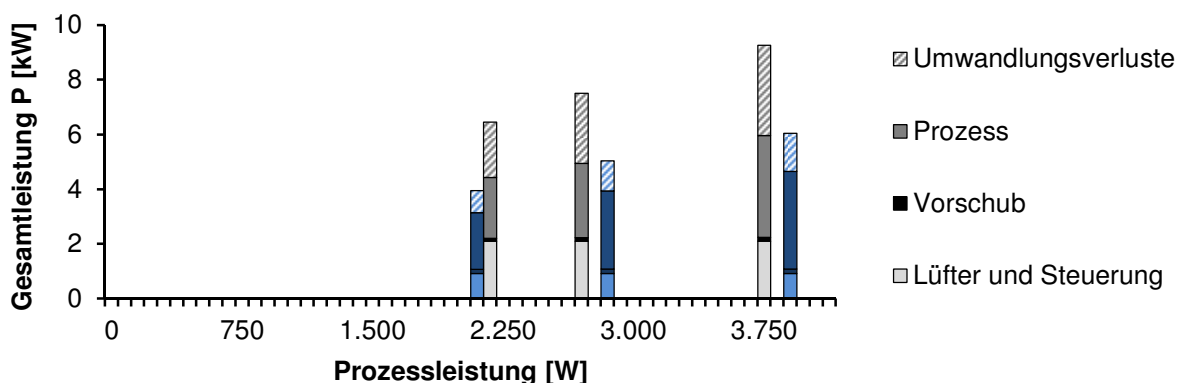


Abbildung 5-16: Gesamtleistung und Leistungsanteile der PECM-Maschinen in Abhängigkeit von der Prozessleistung (grau – PEMCenter 8000, blau – PEM 600)

Die Nebenzeit für das Be- und Entladen der Maschinen wird in der Serienfertigung automatisiert und kann für die jeweilige Automatisierungsvariante abgeschätzt werden. Im Fall der untersuchten Maschinen wird für die Serienfertigung ein automatisiertes Be- und Entladen durch einen Roboter mit einer Nebenzeit von 17 Sekunden angenommen (siehe ANHANG A). Der Leistungskennwert ($P_{B, n}$) wird als Mittelwert der Leistungsaufnahme während der Nebenzeit berechnet. Bei den Versuchen wird jeweils nur ein Werkstück bearbeitet, in der Serienfertigung ist hingegen eine Parallelbearbeitung von bis zu 40 Werkstücken möglich. Für den Grundzustand der Maschinen (P_G) ergeben sich Werte von 2,10 kW für das PEMCenter 8000 und 0,93 kW für die PEM 600.

Tabelle 5-2: Leistungskennwerte der PECM-Maschinen

PEMCenter 8000		Parametersatz 1	Parametersatz 2	Parametersatz 3
Prozessleistung	[W]	2.220	2.700	3.740
P_G	[kW]	2,10		
$P_{B,n}$	[kW]	2,17		
$P_{B,h}$	[kW]	6,45	7,50	9,26
PEM 600		Parametersatz 1	Parametersatz 2	Parametersatz 3
Prozessleistung	[W]	2.070	2.870	3.890
P_G	[kW]	0,93		
$P_{B,n}$	[kW]	0,99		
$P_{B,h}$	[kW]	3,94	5,03	6,04

Aus den Messergebnissen kann als ein zusätzlicher Kennwert der Wirkungsgrad für die in den Werkzeugmaschinen verwendeten Generatoren nach Gleichung (31) bestimmt werden. Zur Berechnung des Wirkungsgrades wird die Leistungsaufnahme des Prozesses (P_{Prozess}) auf die gesamte Leistungsaufnahme der Generatoren während der Bearbeitung ($P_{\text{Prozess}} + P_{\text{Umwandlungsverluste}}$) bezogen.

$$\text{Wirkungsgrad Generator} = \frac{P_{\text{Prozess}}}{P_{\text{Prozess}} + P_{\text{Umwandlungsverluste}}} \quad (31)$$

Auf diese Weise kann für das PEMCenter 8000 ein Wirkungsgrad der Generatoren von 0,52 ermittelt werden. Für die in der PEM 600 verwendete neue Generatortechnologie ergibt sich dagegen ein Wirkungsgrad von 0,72. In beiden Fällen ist der Wirkungsgrad über dem untersuchten Bereich der von den Generatoren abgerufenen Prozessleistung konstant.

5.2.3.3 Elektrolytversorgung und -aufbereitung

Die untersuchten PECM-Prozesse werden jeweils von einer dezentralen Einzelanlage mit Elektrolyt versorgt, wobei es sich bei beiden Maschinen um die Elektrolytaufbereitungsanlage des gleichen Typs handelt. Das Modul zur Elektrolytversorgung und -aufbereitung umfasst mehrere Pumpen, die den aufbereiteten Elektrolyt im Prozess bereitstellen und nach dem Einsatz zur Aufbereitung zurückpumpen. Die Pumpen und Filter haben unterschiedliche Betriebsprofile. Die Förderpumpe für den Prozess arbeitet kontinuierlich, solange die Bearbeitung läuft. Im Gegensatz dazu zeigen andere Verbraucher ein zyklisches Betriebsverhalten, das einem festgelegten Zeitschema folgt oder in Abhängigkeit vom Füllstand der Elektrolytbecken einer Zwei-Punkt-Regelung unterliegt.

Um Leistungskennwerte für die periphere Anlage zur Elektrolytversorgung mit Bezug zu den Maschinenzuständen ermitteln zu können, wird das in Kapitel 5.1.2.2 be-

schriebene Vorgehen angewendet. Im Grundzustand und während der Nebenzeiten beim Be- und Entladen der PECM-Maschine findet keine Elektrolytspülung statt und der Volumenstrom beträgt 0 l/min. Die Elektrolytspülung ist nur während der Hauptnutzungszeit der PECM-Maschine aktiv. Der abgerufene Volumenstrom ist dann abhängig vom eingestellten Spüldruck, vom Arbeitsspalt und von der Art der Spülung. Dabei resultiert der Arbeitsspalt aus den eingestellten Prozessparametern und ist umso kleiner, je größer die erreichte Stromdichte ist. Für die Untersuchung der Leistungsaufnahme der Elektrolytanlage werden bei einem Druck von 5 bar Volumenströme zwischen 0 und 40 l/min eingestellt. Die Spülung erfolgt offen, das heißt ohne Einsatz einer Spülkammer. Auf Basis der ermittelten Leistungsaufnahme der einzelnen Pumpen sowie deren Nutzungsquotienten kann die mittlere Leistungsaufnahme der Elektrolytanlage in Abhängigkeit vom eingestellten Volumenstrom ermittelt werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5-17 grafisch dargestellt.

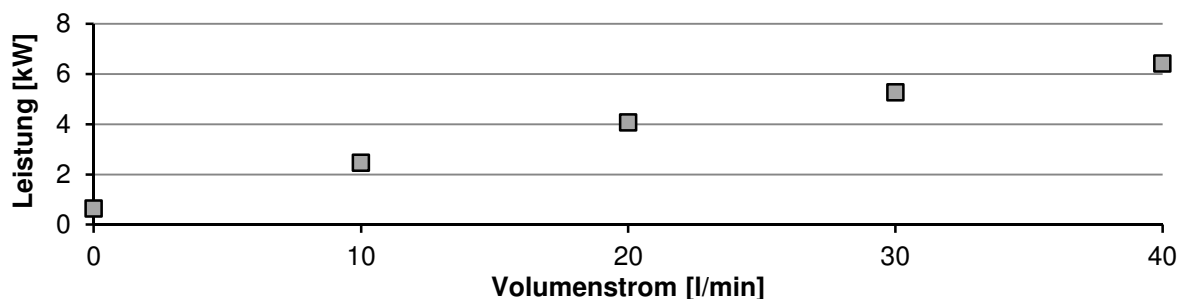


Abbildung 5-17: Mittlere Leistungsaufnahme der Elektrolytanlage in Abhängigkeit vom eingestellten Volumenstrom, bei einem Druck von 5 bar

Mit steigendem Volumenstrom steigen die Nutzungsdauer der einzelnen Pumpen und damit auch die mittlere Leistungsaufnahme der Elektrolytanlage. Tabelle 5-3 gibt einen Überblick über die Kennwerte der mittleren Leistungsaufnahme der Elektrolytanlage für die untersuchten Volumenströme.

Tabelle 5-3: Mittlere Leistungsaufnahme der Elektrolytanlage bei 5 bar

Volumenstrom Q	[l/min]	0	10	20	30	40
Leistung P	[kW]	0,63	2,46	4,07	5,26	6,41

Mit höherem Vorschub ergibt sich während der Bearbeitung ein kleinerer Stirnspalt, wodurch bei dem eingestellten Elektrolytdruck von 5 bar die Durchflussmenge abnimmt. Für die untersuchten Parametersätze liegen die Volumenströme daher zwischen 16,9 und 12,5 l/min. Die mittlere Leistungsaufnahme der Elektrolytanlage bei diesen Volumenströmen wird mittels Interpolation der Messergebnisse berechnet. In Tabelle 5-4 sind die so ermittelten Kennwerte dargestellt. Im Grundzustand und während der Nebenzeit der Bearbeitung findet keine Elektrolytspülung statt, sodass die Elektrolytanlage in beiden Zuständen nur eine Leistung von 0,63 kW aufnimmt.

Tabelle 5-4: Interpolierte Leistungskennwerte der Elektrolytversorgung für die untersuchten Parametersätze

		Parametersatz 1	Parametersatz 2	Parametersatz 3
Q	[l/min]	16,9	15,2	12,5
P_G	[kW]	0,63		
P_{B, n}	[kW]	0,63		
P_{B, h}	[kW]	3,57	3,30	2,86

5.2.3.4 Elektrolytkühlung

Der Elektrolyt dient bei der elektrochemischen Bearbeitung als Leiter des elektrischen Stromes zwischen Werkzeug und Werkstück und erfüllt eine Funktion als Kühlmedium. Die Temperatur des Elektrolyten beeinflusst die Abtragungsvorgänge und ist somit eine Größe zur Regelung des PECM-Prozesses. Abhängig vom geforderten Arbeitsergebnis werden in der Regel Elektrolyttemperaturen zwischen 15°C und 30°C eingestellt und konstant gehalten (VDI 3401).

Bei der elektrochemischen Auflösung des Werkstoffes wird ein Teil der zur Bearbeitung eingesetzten Energie in joulesche Wärme umgesetzt, die vom Elektrolyten aufgenommen und aus dem Arbeitsspalt abtransportiert wird. Die Kühlung des Elektrolyten erfolgt bei der untersuchten Maschine durch einen Wärmetauscher, der an ein zentrales Kühlaggregat angeschlossen ist. Die Elektrolyttemperatur wird in den durchgeführten Versuchen auf 20°C eingestellt. Um den Energiebedarf im Zusammenhang mit der Elektrolytkühlung bestimmen zu können, wird im ersten Schritt die vom Elektrolyten im Bearbeitungsprozess aufgenommene Wärmeleistung berechnet. Es wird von einer konstanten Elektrolyttemperatur ausgegangen, sodass die aufgenommene Wärmeleistung der abzuführenden Wärmeleistung entspricht. Der mit der Kühlung des Elektrolyten verbundene Energiebedarf wird im zweiten Schritt mithilfe eines Energieäquivalentes für die Bereitstellung der benötigten Kühlleistung berechnet.

Die in den Elektrolyten eingebrachte Wärmeleistung kann nach Gleichung (32) abgeschätzt werden. Dabei ergibt sich aus der anliegenden Spaltspannung (U_{Spalt}), dem Generatorstrom ($I_{\text{Generator}}$), der Pulslänge (t_{Puls}) sowie der Pulsfrequenz (f) die elektrische Leistung, die dem Prozess zugeführt wird. Über den Wirkungsgrad der Elektrolyse (η_E) kann der Anteil der elektrischen Leistung abgeschätzt werden, der als joulesche Wärme verloren geht und vom Elektrolyten abtransportiert wird. Der Wirkungsgrad der Elektrolyse hängt dabei unter anderem vom bearbeiteten Werkstoff und der Höhe der Stromdichte ab. Vereinfachend kann für die Berechnungen der Wärmeleistung ein Wirkungsgrad von 50 % ($\eta_E = 0,5$) angenommen werden. Daraus ergibt sich eine Abschätzung für die in den Elektrolyten eingebrachte Wärmeleistung (\dot{Q}). Eine Übersicht über die verwendeten Parametersätze befindet sich in ANHANG B.

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = U_{Spalt} \cdot I_{Generator} \cdot (t_{Puls} \cdot f) \cdot (1 - \eta_E) \quad (32)$$

\dot{Q} = Wärmeleistung

U_{Spalt} = Spaltspannung

$I_{Generator}$ = Generatorstrom

t_{Puls} = Dauer eines einzelnen Pulses

η_E = Wirkungsgrad der Elektrolyse

f = Pulsfrequenz

Tabelle 5-5 stellt die Ergebnisse für die eingebrachte Wärmeleistung bei den untersuchten Parametersätzen dar. Für die Berechnung der erforderlichen elektrischen Leistung für die Bereitstellung der Kälteleistung wird für das Kühlsystem ein Energieäquivalent von 3 angenommen. Damit wird ausgedrückt, dass für die Erzeugung einer Kältemenge von 3 kWh eine elektrische Energiemenge von 1 kWh benötigt wird.

Tabelle 5-5: In den Elektrolyten eingebrachte Wärmeleistung und benötigte elektrische Leistung für die Bereitstellung der Kühlleistung

Parametersatz	Stromstärke [A]	\dot{Q} [kW]	$E\ddot{A}_{K\ddot{u}hlsystem}$ [kWh _{Kälte} /kWh _{elektrisch}]	$P_{el, Elektrolytk\ddot{u}hlung}$ [kW]
PEMCenter 8000				
1	1.480	1,11	3,0	0,37
2	1.800	1,35		0,45
3	2.490	1,87		0,62
PEM 600				
1	1.380	1,04	3,0	0,35
2	1.910	1,43		0,48
3	2.590	1,94		0,65

5.2.3.5 Druckluftversorgung

Die Werkzeugmaschine und die periphere Anlage zur Elektrolytversorgung sind an die Druckluftversorgung mit 6 bar angeschlossen. In der Werkzeugmaschine wird die Schutztür der Bearbeitungskammer zum Be- und Entladen pneumatisch betrieben. In der Anlage für die Elektrolytversorgung werden Ventile, die den Elektrolytfluss lenken, pneumatisch geschaltet. Der Druckluftverbrauch je Schaltvorgang der Ventile wird mit 1,5 bis 1,8 l i.N. gemessen. Aus dem Schaltverhalten der einzelnen Pumpen kann die Häufigkeit der Schaltvorgänge abgeleitet werden. Der benötigte Druckluftvolumenstrom für das Schalten der Ventile ist damit ebenso wie die mittlere Leistungsaufnahme der Elektrolytanlage vom Elektrolytvolumenstrom abhängig. Abbildung 5-18 veranschaulicht die Ergebnisse der Berechnungen. Der benötigte

Druckluftvolumenstrom zum Schalten der Ventile ist sehr gering und liegt für die untersuchten Elektrolytvolumenströme von 0 bis 40 l/min zwischen 0,15 und 1,02 l/min.

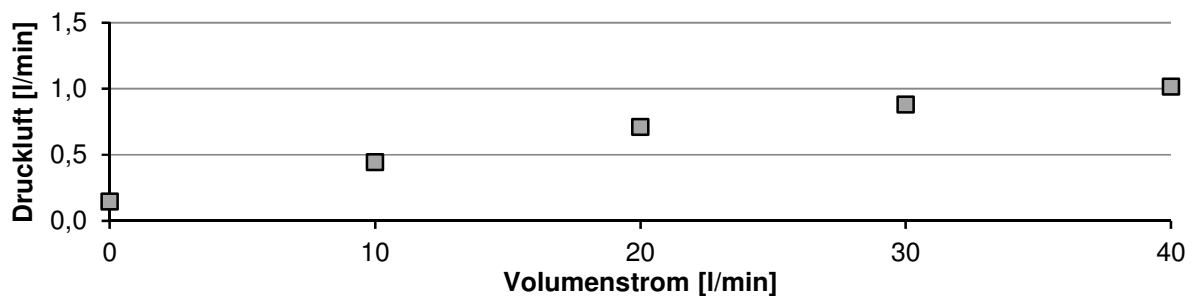


Abbildung 5-18: Druckluftvolumenstrom der Elektrolytaufbereitungsanlage [l/min i.N.] in Abhängigkeit von Volumenstrom des Elektrolyten

Tabelle 5-6: Druckluftvolumenstrom der Elektrolytanlage

Volumenstrom Q [l/min]	0	10	20	30	40
Q [l/min i.N.]	0,15	0,45	0,71	0,88	1,02

Der ermittelte Volumenstrom wird, wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben, mit einem Energieäquivalent von $0,12 \text{ kWh/m}^3$ (im Normzustand) in elektrische Leistungskennwerte für die Druckluftherzeugung umgerechnet. Dabei werden Leckageverluste in Höhe von 36 % angenommen und in der Rechnung berücksichtigt. Die Leistungskennwerte für das Erzeugen des benötigten Druckluftvolumenstroms sind in Tabelle 5-7 zusammengefasst. Die Werte für den Druckluftvolumenstrom während der Bearbeitung ($Q_{DL, B}$) sind für die untersuchten Parametersätze interpoliert.

Tabelle 5-7: Druckluftvolumenstrom der Elektrolytaufbereitungsanlage [l/min i.N.]

Parametersatz		1	2	3
$Q_{\text{Elektrolyt}}$	[l/min]	16,9	15,2	12,5
Q_G	[l/min]	0,15		
$Q_{B, n}$	[l/min]	0,15		
$Q_{B, h}$	[l/min]	0,63	0,59	0,52
P_G	[kW]	0,0015		
$P_{B, n}$	[kW]	0,0015		
$P_{B, h}$	[kW]	0,006	0,006	0,005

Der werkstückbezogene Druckluftvolumenstrom für das Öffnen und Schließen der Schutztür ($Q_{DL, \text{Schutztür}}$) ist abhängig von der Bearbeitungszeit und der Anzahl der parallel bearbeiteten Werkstücke. Für das Öffnen und Schließen der Schutztür wird ein Druckluftverbrauch von 4 l pro Zyklus gemessen. Ein Zyklus entspricht der prozessbezogenen Nutzungszeit (t_N). Damit ergibt sich nach Gleichung (33) für die untersuchten Parametersätze ein Druckluftvolumenstrom von 1,8 bis 3,9 l/min.

$$Q_{DL, \text{Schutztür}} = \frac{V_{DL, \text{pro Zyklus}} \cdot \text{Zyklen pro Minute}}{\text{Anzahl parallel bearbeiteter Werkstücke}} \quad (33)$$

Tabelle 5-8: Druckluftbedarf Schutztür

Parametersatz		1	2	3
$t_N (=t_n + t_h)$	[s]	151	104	78
Q_G	[l/min]	0,00		
$Q_{B, n}$	[l/min]	1,59	2,31	3,08
$Q_{B, h}$	[l/min]	1,59	2,31	3,08
P_G	[kW]	0,00		
$P_{B, n}$	[kW]	0,02	0,03	0,03
$P_{B, h}$	[kW]	0,02	0,03	0,03

Beim Elektrochemischen Abtragen werden häufig mehrere Werkstücke parallel bearbeitet und die Dauer pro Bearbeitungszyklus kann mehrere Minuten betragen. Aus diesem Grund wird der Druckluftverbrauch für den Betrieb der Schutztür in vielen Anwendungsfällen noch unter den hier ermittelten Werten liegen. Insgesamt ist der mit dem Druckluftverbrauch verbundene Energieeinsatz als sehr gering einzuschätzen.

5.2.4 Zusammenfassung und Übersicht der Leistungskennwerte

Die Analyse der Energieverbraucher im PECM-Prozess zeigt, dass neben der Werkzeugmaschine auch die Anlage zur Elektrolytversorgung und -aufbereitung sowie die Kühlung des Elektrolyten und die Druckluftversorgung für ein vollständiges Bild des Energieverbrauchs zu berücksichtigen sind. Für die beiden untersuchten PECM-Maschinen konnten Leistungskennwerte für die relevanten Maschinenzustände ermittelt werden. Dabei war es auch möglich, die Leistungsaufnahme verschiedener Verbraucher innerhalb der Maschine zu bestimmen. Insbesondere konnte der Anteil der Umwandlungsverluste der Generatoren festgestellt und der Wirkungsgrad der Generatoren berechnet werden.

Bereits aus der Analyse des Verfahrensprinzips zum Elektrochemischen Abtragen wird die Bedeutung der Elektrolytspülung für den PECM-Prozess ersichtlich. Für die Anlage zur Elektrolytversorgung und -aufbereitung konnten Kennwerte für die mittlere elektrische Leistungsaufnahme bei einem Bearbeitungsdruck von 5 bar und in Abhängigkeit vom geförderten Elektrolytvolumen bestimmt werden. Der Wärmeeintrag in den Elektrolyten wurde auf Basis der Prozessparameter und einer Abschätzung des Wirkungsgrades der Elektrolyse berechnet. Mithilfe eines Energieäquivalentes für das verwendete Kühlsystem konnten anschließend Kennwerte für

die Leistungsaufnahme zur Elektrolytkühlung ermittelt werden. Für das Schalten von Ventilen in der Elektrolytanlage und das Betätigen der Schutztür der Maschine wird nur sehr wenig Druckluft verbraucht. Die Leistungsäquivalente für die Druckluftversorgung fallen entsprechend gering aus.

Tabelle 5-9 fasst die Leistungskennwerte aller Verbraucher zusammen, die einen wesentlichen und unmittelbaren Beitrag zur Durchführung des Prozesses leisten. Die Kennwerte werden in Kapitel 6.3.1.1 angewendet, um den werkstückbezogenen Energieverbrauch der untersuchten PECM-Prozesse zu berechnen, und damit zu überprüfen, ob die Analyseverfahren für das Bestimmen des Energieverbrauches von Fertigungsprozessen geeignet ist.

Tabelle 5-9: Zusammenfassung der Leistungskennwerte für die untersuchten PECM-Prozesse

Kennwert	Parametersatz 1	Parametersatz 2	Parametersatz 3
Werkzeugmaschine			
PEMCenter 8000			
P_G	2,10 kW		
$P_{B,n}$	2,17 kW		
$P_{B,h}$	6,45 kW	7,50 kW	9,26 kW
PEM 600			
P_G	0,93 kW		
$P_{B,n}$	0,99 kW		
$P_{B,h}$	3,94 kW	5,03 kW	6,04 kW
Elektrolytversorgung			
Q_G	0,0 l/min		
$Q_{B,n}$	0,0 l/min		
$Q_{B,h}$	16,9 l/min	15,2 l/min	12,5 l/min
P_G	0,63 kW		
$P_{B,n}$	0,63 kW		
$P_{B,h}$	3,57 kW	3,30 kW	2,86 kW
Elektrolytkühlung			
PEMCenter 8000			
\dot{Q}_G	0,00 kW		
$\dot{Q}_{B,n}$	0,00 kW		
$\dot{Q}_{B,h}$	1,11 kW	1,35 kW	1,87 kW
P_G	0,00 kW		
$P_{B,n}$	0,00 kW		
$P_{B,h}$	0,37 kW	0,45 kW	0,62 kW

PEM 600			
\dot{Q}_G	0,00 kW		
$\dot{Q}_{B,n}$	0,00 kW		
$\dot{Q}_{B,h}$	1,04 kW	1,43 kW	1,94 kW
P_G	0,00 kW		
$P_{B,n}$	0,00 kW		
$P_{B,h}$	0,35 kW	0,48 kW	0,65 kW

Druckluftversorgung			
Elektrolytanlage			
Q_G	0,15 l/min		
$Q_{B,n}$	0,15 l/min		
$Q_{B,h}$	0,63 l/min	0,59 l/min	0,52 l/min
P_G	0,002 kW		
$P_{B,n}$	0,002 kW		
$P_{B,h}$	0,006 kW	0,006 kW	0,005 kW
Schutztür			
Q_G	0,00 l/min		
$Q_{B,n}$	1,59 l/min	2,31 l/min	3,08 l/min
$Q_{B,h}$	1,59 l/min	2,31 l/min	3,08 l/min
P_G	0,00 kW		
$P_{B,n}$	0,02 kW	0,02 kW	0,03 kW
$P_{B,h}$	0,02 kW	0,02 kW	0,03 kW

5.3 Anwendungsbeispiel Honen

5.3.1 Verfahrensprinzip und -grundlagen

Unter Honen versteht man ein Fertigungsverfahren, das ausschließlich der Verbesserung der Form- und Maßgenauigkeit sowie der Oberflächengüte dient. Das Verfahren wird daher zur Endbearbeitung von Werkstücken eingesetzt, das heißt am Ende einer Fertigungsprozesskette (Flores 1992, Klocke und König 2005, Regel und Müller 2012). Typische Vorbearbeitungsprozesse zum Honen sind beispielsweise Bohren, Tiefbohren, Drehen oder Reiben. Gehobte Oberflächen dienen im Allgemeinen zum Gleiten, Dichten und Führen in mechanisch beanspruchten Bauteilen (Flores 1992). Einsatzgebiete des Verfahrens sind der Automobilbau, der Werkzeug- und Maschinenbau, die Flugzeugindustrie sowie die Hydraulik- und Pneumatikindustrie. Häufige Anwendung findet das Honen bei Motorblöcken, Zylinderbuchsen, Pleuelstangen, Hydraulikventilen sowie Bohrungen in Hochdruckeinspritzpumpen und hydraulischen Systemen (Klocke und König 2005, Regel und Müller 2012, Schmitt et al. 2011).

Nach DIN8589 wird das Honen allgemein als spanendes Verfahren mit geometrisch unbestimmten Schneiden definiert, bei dem das Werkzeug eine aus zwei Komponenten bestehende Schnittbewegung ausführt. Als Schneidmittel kommen Schneidstoffe zum Einsatz, die ähnlich wie die Schleifkörner einer Schleifscheibe in einer Trägermatrix gebunden sind. Mindestens eine der Schnittkomponenten des Werkzeugs ist oszillierend, wodurch eine Oberfläche mit sich definiert überkreuzenden Spuren erzeugt wird (DIN 8589-14). Zusätzlich erfolgt eine Zustellbewegung des Honwerkzeugs. Neben der Einteilung in Innen- und Außenbearbeitung können die Verfahrensvarianten in drei Hauptgruppen unterschieden werden (Klocke und König 2005):

- 1) Langhubhonen (Honen, Ziehschleifen);
- 2) Kurzhubhonen (Feinhonen, Superfinish);
- 3) Verzahnungshonen (Schabschleifen).

Im Folgenden wird das Innenlanghubhonen als eine der am häufigsten angewendeten Verfahrensvarianten betrachtet. Der in der Praxis allgemein verwendete Begriff des Honens wird dafür synonym verwendet. Das Verfahrensprinzip ist in Abbildung 5-19 dargestellt.

Durch die für das Honen charakteristische Schneidkinematik entstehen typische Bearbeitungsspuren (Kreuzschliff), die Schmierstoffe aufnehmen können, und das Einlaufverhalten sowie die Lebensdauer tribologisch beanspruchter Bauteile verbessern (Regel und Müller 2012). Gusseisen sowie gehärtete und ungehärtete Stähle zählen zu den am häufigsten bearbeiteten Werkstoffen (Flores 1992). Als Schneidstoffe werden herkömmliche (Korund, Siliziumkarbid) und superharte Kornwerkstoffe (Diamant, kristallines Bornitrid cBN) eingesetzt. Dabei konzentriert sich das Einsatzgebiet superharter Schneidwerkstoffe auf Gusseisen und gehärtete Stähle (Klocke

und König 2005). Beim Honen werden typischerweise Werkstücke mit Bohrungsdurchmessern von 1,5 mm bis zu 1500 mm bearbeitet (Flores 1992, Klocke und König 2005, Todd et al. 1994). Der Materialabtrag beträgt im Allgemeinen nur 25 – 250 μm (Todd et al. 1994). Erzielbare Toleranzen in der Rundheit, Geradheit und Parallelität liegen im Bereich $\leq 1 \mu\text{m}$. Mit dem Honen können Rauheitswerte von $R_z < 1 \mu\text{m}$ prozesssicher erreicht werden (Risse 2012, Schmitt et al. 2013). Formkorrekturen machen den Einsatz grob gekörnter Hon-Leisten erforderlich, um den dafür notwendigen Mindestabtrag zu erzielen, während für die Verbesserung der Rauheitswerte feine Schneidleisten eingesetzt werden. Der Hon-Prozess kann daher mehrere Operationen umfassen, wenn sowohl die Formtoleranz als auch die Oberflächengüte verbessert werden sollen (Flores 1992).

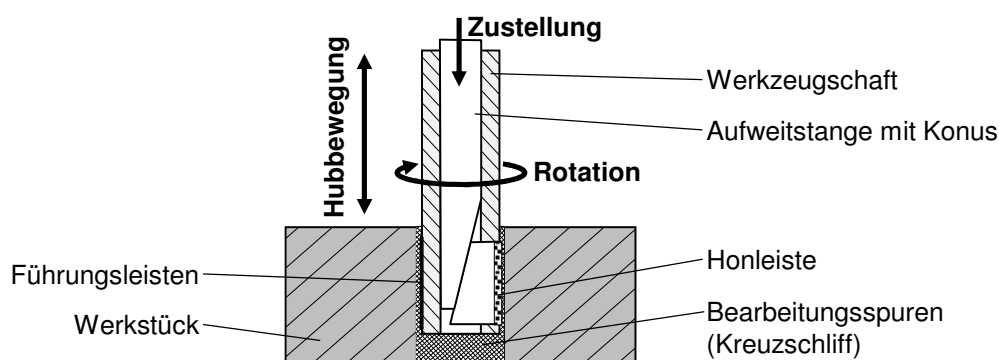


Abbildung 5-19: Prinzipdarstellung des Langhub-Innen-Rundhonsens, in Anlehnung an (Flores 1992)

Für die Qualität des Bearbeitungsergebnisses spielt beim Honen der Einsatz von Kühlschmierstoffen eine entscheidende Rolle. Die sogenannten Hon-Öle sind wichtig, um die Bearbeitungsstelle zu spülen, zu schmieren und zu kühlen (Flores 1992). Insbesondere das zuverlässige Entfernen von Materialabrieb und ausgebrochenen Schneidkörnern ist von Bedeutung, um Fress- und Aufschweißspuren zu vermeiden (Regel und Müller 2012). Die gewünschte Spülwirkung wird erzielt, indem große Mengen Hon-Öl während der Bearbeitung zugeführt werden (Klocke und König 2005). Da die Bearbeitungstemperaturen beim Honen mit 100 – 200 $^{\circ}\text{C}$ relativ gering sowie räumlich und zeitlich begrenzt sind, ist der Kühleffekt eher von untergeordneter Bedeutung. Eine konstante Temperatur muss dennoch sichergestellt werden (Flores 1992). Trotz des Trends zur Trockenbearbeitung in der Produktion ist ein Verzicht auf den Einsatz von Kühlschmierstoffen beim Honen aktuell nicht möglich (Dröder et al. 2013).

5.3.2 Festlegen der Systemgrenze

Als wesentliche Energieverbraucher im Hon-Prozess sind die Hon-Maschine selbst und die Anlagentechnik zur Aufbereitung des Kühlschmierstoffs zu nennen. Die Ausführungsformen von Hon-Maschinen reichen in Abhängigkeit von der zu erzielenden Bearbeitungsqualität und der geforderten Taktzeit bzw. der angestrebten Produkti-

onsmenge von einfachen Hand-Hon-Maschinen bis hin zu ein- oder mehrspindeligen Produktionsmaschinen (Regel und Müller 2012, Schmitt et al. 2011). Ein Hon-Prozess, der aus drei aufeinander aufbauenden Bearbeitungsoperationen besteht, kann zum Beispiel bei geringer Fertigungsstückzahl und häufigem Werkzeugwechsel auf einer 1-Spindel-Maschine realisiert werden. Wenn hohe Fertigungsstückzahlen und geringe Taktzeiten gefordert sind, kann derselbe Prozess auf einer vollautomatischen 3-Spindelmaschine wirtschaftlicher durchgeführt werden. Die Anforderungen der Praxis bedingen häufig hohe Stückzahlen bei geringen Taktzeiten und die Durchführung mehrerer Hon-Operationen, um die nötige Bearbeitungsqualität zu erzielen. Aufgrund dessen haben sich für den Transport der Werkstücke in der Maschine Rundtische und Längstransferlinien durchgesetzt und bilden neben der Anzahl der Spindeln ein wichtiges Kriterium zur Unterscheidung der Maschinen (Schmitt et al. 2011).

Für den Betrieb eines Hon-Prozesses ist die Kühlschmiermittelaufbereitung und -versorgung notwendig. Die Bearbeitungsstelle wird kontinuierlich überflutet und bei kleineren Durchmessern wird das Hon-Öl mit Drücken von 6 bis 10 bar zugeführt. Um die Qualität des Bearbeitungsergebnisses sicherzustellen, muss das Kühlschmiermittel sorgfältig gereinigt und gekühlt werden. Zum Reinigen werden Magnetabscheider und Filtereinrichtungen, zum Beispiel Bandfilter mit Faserfließ und Anschwemmfilter, eingesetzt. Eine konstante Temperatur des Kühlschmierstoffes muss durch den Einsatz eines Kühlaggregates im Aufbereitungskreislauf des Kühlschmierstoffes sichergestellt werden (Flores 1992). Der Energieverbrauch wird durch den erforderlichen Volumenstrom und die Temperatur des Kühlschmierstoffes bestimmt. Die Kühlschmiermittel können entweder in Anlagen direkt an der Maschine oder in zentralen Anlagen aufbereitet werden.

Hon-Maschinen mit mehreren Spindeln sind weiterhin mit pneumatischer In- und Post-Prozess-Messtechnik ausgestattet (Regel und Müller 2012, Schmitt et al. 2011). Abwärme, die zum Beispiel vom Schaltschrank der Maschine an die Hallenumgebung abgegeben wird, wird bei den Untersuchungen nicht weiter betrachtet. Abbildung 5-20 skizziert die energieverbrauchenden Maschinen- und Anlagenteile des Hon-Prozesses sowie die Systemgrenze für die Untersuchungen.

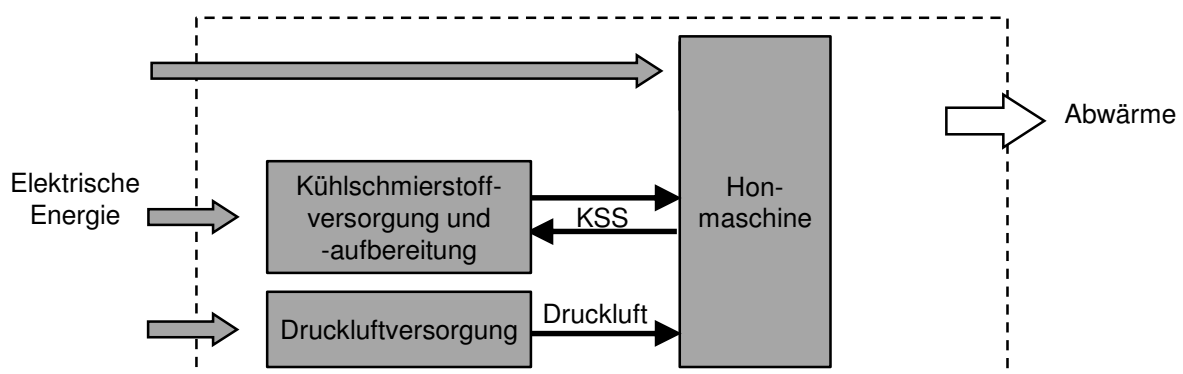


Abbildung 5-20: Datenerfassung im untersuchten Hon-Prozess

5.3.3 Analyse des Energieverbrauchs beim Honen

5.3.3.1 Messvorgehen

Für die Untersuchung des Energiebedarfs beim Honen werden Messungen und Analysen an zwei Hon-Maschinen vom Typ Kadia 2LH 60/350 R der Firma Kadia durchgeführt. Die zwei Hon-Prozesse werden in der Serienfertigung betrieben, wobei auf den baugleichen Maschinen unterschiedliche Bearbeitungsaufgaben ausgeführt werden. Die Maschinen sind jeweils mit zwei Hon-Spindeln ausgestattet und verfügen über je zwei pneumatische Düsenmessstationen. In Maschine 1 wird zusätzlich eine pneumatisch betriebene Entgratstation eingesetzt. Beide Maschinen werden über eine gemeinsame periphere Anlage mit Kühlschmiermittel versorgt. Eine Versuchsmaschine vom Typ Kadia 2LH 60/350 R ist in Abbildung 5-21 zu sehen.



Abbildung 5-21: Untersuchte Kadia 2LH 60/350 R (links), Rundtisch im Bearbeitungsraum mit sechs Bearbeitungsstationen (rechts) (Kadia 2014)

Alle Messungen finden während des normalen Produktionsablaufes statt. Die elektrische Leistungsaufnahme der beiden Hon-Maschinen sowie der Kühlschmierstoffversorgung und -aufbereitung wird in den Versuchen mit zwei Leistungsmessgeräten erfasst. Um den Betriebszustand der Hon-Maschinen bestimmen zu können, wird von beiden Maschinen jeweils ein Signal der Maschinensteuerung aufgezeichnet, das den Beginn eines neuen Bearbeitungszyklus kennzeichnet. Abbildung 5-22 gibt einen Überblick über die erfassten Daten. Die Analyse der Leistungsaufnahme der Maschinen in Abhängigkeit vom Bearbeitungszustand erfolgt in Kapitel 5.3.3.2. Anschließend wird in Kapitel 5.3.3.3 der elektrische Leistungsbedarf der Kühlschmierstoffversorgung näher untersucht. Kapitel 5.3.3.4 ermittelt den Druckluftbedarf für beide Prozesse.

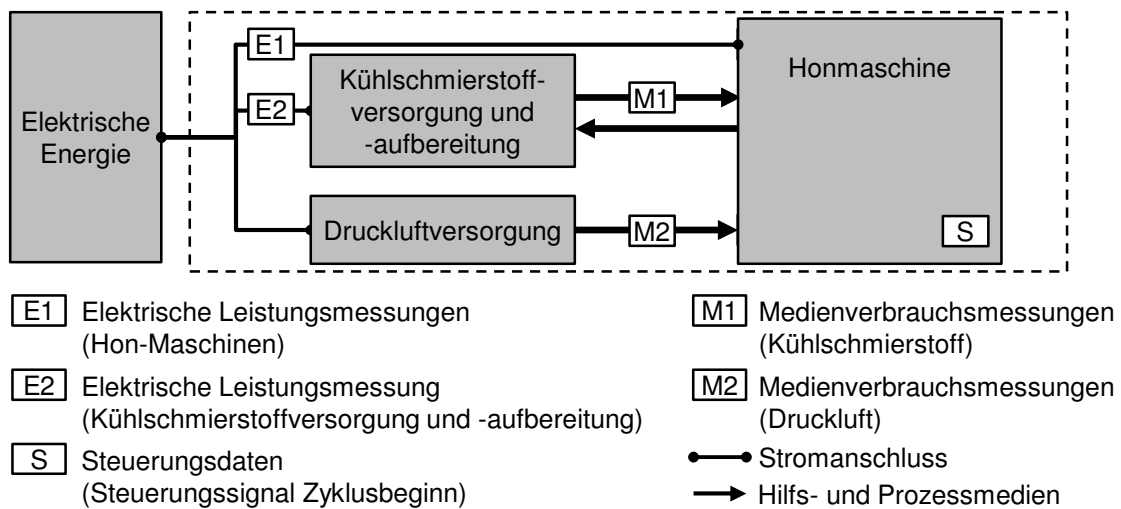


Abbildung 5-22: Datenerfassung im untersuchten Hon-Prozess

Die beiden untersuchten Maschinen führen zwei unterschiedliche Bearbeitungsaufgaben aus. Auf Maschine 1 werden Magnetkerne mit einem Innendurchmesser von 7 mm gehont. In Abhängigkeit von der Vorbearbeitungstoleranz wird der Innendurchmesser durch die Bearbeitung um 25 μm aufgeweitet. Im Hon-Prozess auf Maschine 2 werden Exzenterringe mit einem Innendurchmesser von 34 mm fertigbearbeitet. Der Innendurchmesser wird dabei um 50 μm vergrößert. Der Materialabtrag bei beiden Bearbeitungsaufgaben ist somit sehr gering und typisch für das Honen kleiner Bohrungen. Dennoch ist der Einfluss der Bearbeitungsaufgabe auf die Leistungskennwerte der Hon-Maschinen in den Untersuchungen erkennbar.

5.3.3.2 Werkzeugmaschine

Für die Untersuchungen wird die Leistungsaufnahme am Hauptanschluss der Maschinen gemessen und während des normalen Produktionsablaufes für die Dauer von vier Stunden erfasst. Dabei treten neben Zeiten der Bearbeitung auch Zeiten auf, in denen kein Produktionsfortschritt stattfindet. Diese Zeiten sind, wie in Kapitel 5.1.2.1 ausgeführt, den Ausfallzeiten der Maschine zuzuordnen. In der Maschine werden mehrere Bearbeitungs- und Messoperationen sowie das Be- und Entladen gleichzeitig ausgeführt, sodass die Haupt- und Nebenzeit im Leistungsprofil der Maschine nicht unterschieden werden können. Als Kennwerte für die Bestimmung des Energiebedarfs werden in diesem Fall die prozessbezogene Nutzungszeit (t_N) und die mittlere Leistungsaufnahme während der Bearbeitung (P_B) verwendet. Die prozessbezogene Nutzungszeit beträgt für Maschine 1 rund 12 s und für Maschine 2 etwa 16 s.

Das Leistungsprofil von Maschine 1 in Abbildung 5-23 zeigt, wie sich die Leistungsaufnahme der Maschine im Verlauf der Bearbeitungszyklen zwischen 1,0 und 1,5 kW bewegt. Diese Bandbreite der Leistungsaufnahme ist charakteristisch für das Honen und spiegelt die Oszillation der Hubbewegung während der Bearbeitung wider. Um diese zufälligen Schwankungen bei der Kennwertbildung zu berücksichtigen, wird für

die Berechnung der mittleren Bearbeitungsleistung (P_B) der Mittelwert über die gemessenen Bearbeitungszyklen gebildet. Der Kennwert für die mittlere Leistungsaufnahme für die Bearbeitung der Magnetkerne auf Hon-Maschine 1 beträgt $P_B = 1,26 \text{ kW}$.

Die Beschickung der Maschine mit neuen, unbearbeiteten Teilen führt ablaufbedingt zu regelmäßigen kurzen Unterbrechungen der Bearbeitung beim Wechsel der Roh-teil-Paletten. Die Maschine befindet sich dann kurzfristig im Grundzustand. Am Ende des aufgezeichneten Leistungsprofils in Abbildung 5-23 befindet sich die Maschine aufgrund fehlender Rohteile für die Bearbeitung für eine längere Phase im Grundzustand. Die Grundleistung entspricht dem Mittelwert der gemessenen Leistungsaufnahme im Grundzustand während der Messdauer. Die Messdauer wird mit 60 s gewählt. Im Grundzustand ist für Maschine 1 eine mittlere Leistungsaufnahme von 0,33 kW festzustellen.

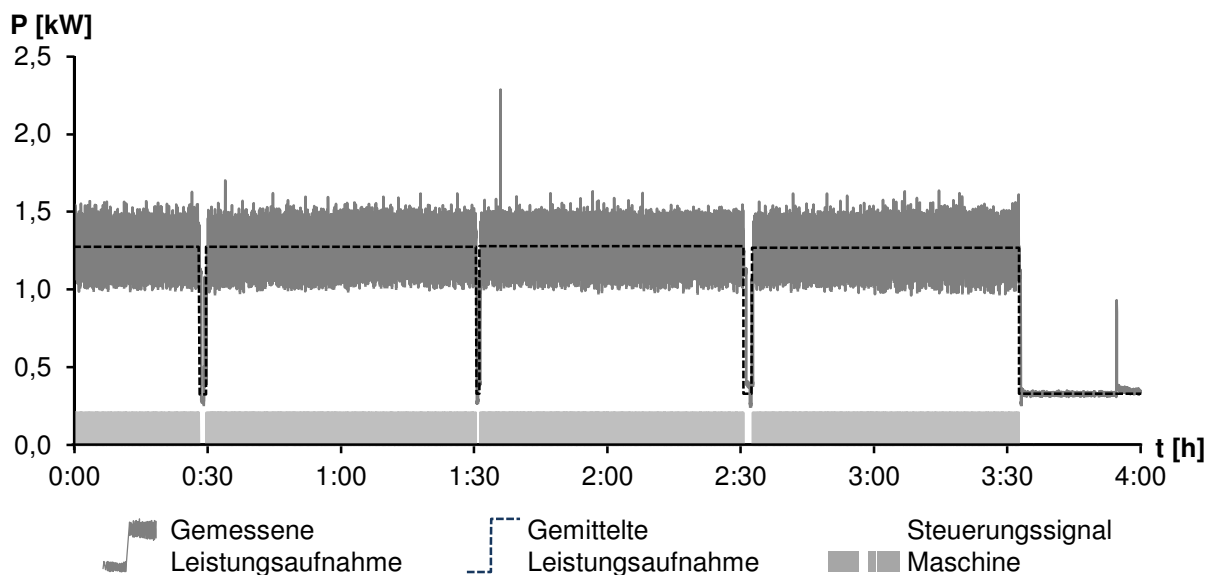


Abbildung 5-23: Leistungsmessung der Hon-Maschine 1
(Bearbeitungsaufgabe: Magnetkern)

Abbildung 5-24 veranschaulicht das gemessene Leistungsprofil von Maschine 2. Zu Beginn der Messung stehen keine Werkstücke für die Bearbeitung zur Verfügung, sodass sich die Maschine im Grundzustand befindet und betriebsbereit ist. Für die Leistungsaufnahme im Grundzustand wird ein Wert von 0,35 kW festgestellt. Im Vergleich zur Bearbeitungsaufgabe „Magnetkern“ ist der Materialabtrag bei der auf Hon-Maschine 2 ausgeführten Bearbeitungsaufgabe „Exzenterring“ höher. Die Leistungsaufnahme bewegt sich daher im Verlauf der Bearbeitungszyklen zwischen 0,8 und 2,2 kW. Der Wert der mittleren Bearbeitungsleistung wird mit $P_B = 1,53 \text{ kW}$ ermittelt.

Im Leistungsprofil ist auch ein Zustand zu erkennen, der von den beiden definierten Betriebszuständen abweicht. Dieser Zustand ist auf einen manuellen Eingriff aufgrund eines Fehlers zurückzuführen. Solche Zustände sind möglich, treten aber nicht in signifikantem Umfang auf.

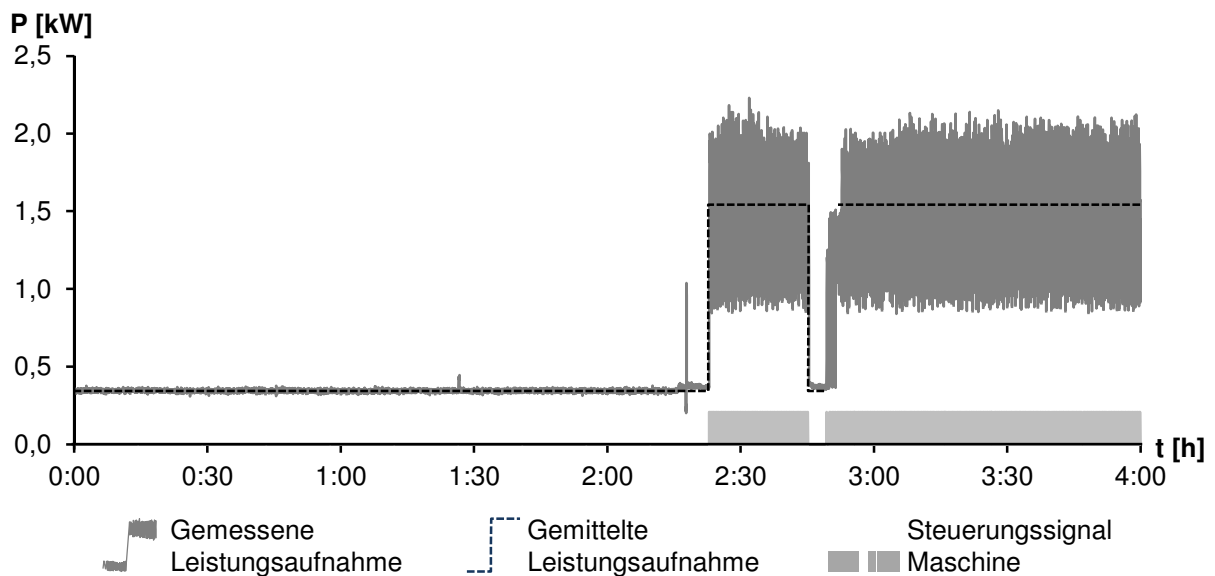


Abbildung 5-24: Leistungsmessung der Hon-Maschine 2
(Bearbeitungsaufgabe: Exzenterring)

Tabelle 5-10 gibt einen Überblick über die Leistungskennwerte für die beiden Hon-Maschinen. Die Werte für die Grundleistung der beiden baugleichen Maschinen sind vergleichbar groß. Für die Bearbeitung ergibt sich ein Unterschied in der Leistungsaufnahme, der auf den höheren Materialabtrag bei der Bearbeitungsaufgabe „Exzenterring“ zurückzuführen ist.

Tabelle 5-10: Leistungskennwerte der Hon-Maschinen

Hon-Maschine 1 (Bearbeitungsaufgabe: Magnetkern)		Hon-Maschine 2 (Bearbeitungsaufgabe: Exzenterring)	
P_G	P_B	P_G	P_B
0,33 kW	1,26 kW	0,35 kW	1,53 kW

5.3.3.3 Kühlschmierstoffversorgung und -aufbereitung

Der Kühlschmierstoff wird beim Honen zum Spülen und Kühlen der Bearbeitungsstelle genutzt. Zusätzlich werden bei den untersuchten Anlagen auch die Motoren der Hon-Spindeln mit dem Hon-Öl gekühlt. Die zwei untersuchten Hon-Prozesse werden dabei von einer gemeinsamen peripheren Anlage mit Kühlschmierstoff versorgt. Abbildung 5-25 skizziert den Aufbau der Anlage mit den einzelnen Aggregaten.

Förderpumpe 1 stellt das Hon-Öl zur Kühlung der Spindelmotoren in beiden Hon-Maschinen bereit. Das Hon-Öl wird in einem Kreislauf direkt in den Reintank der Kühlschmierstoffanlage zurückgeführt und dort gekühlt. Förderpumpe 2 stellt für beide Maschinen den Volumenstrom zum Spülen und Kühlen des Bearbeitungsprozesses bereit. Nach dem Einsatz im Prozess wird das Hon-Öl von zwei Pumpen zur Kühlschmierstoffanlage zurückgepumpt und anschließend gereinigt sowie temperiert.

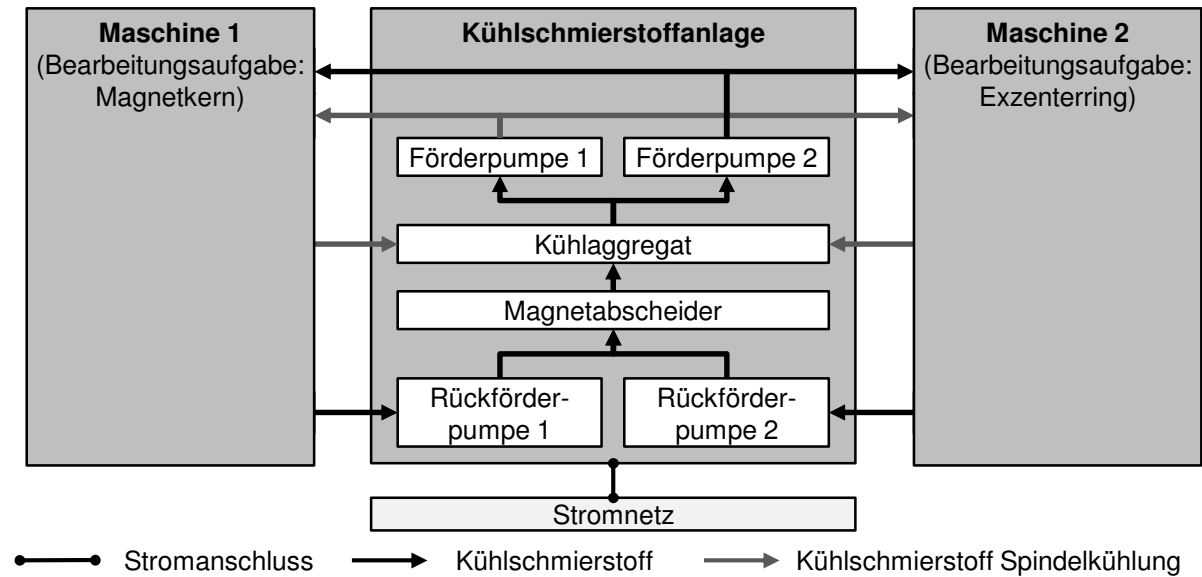


Abbildung 5-25: Skizze KSS-Anlage beim Honen

Für den Kühlschmierstoffvolumenstrom der beiden Maschinen wurden die in Tabelle 5-11 zusammengefassten Werte ermittelt. Der Kühlschmierstoff für den Prozess und die Spindel wird kontinuierlich und unabhängig vom Bearbeitungszustand der Maschine bereitgestellt. Nur in freien Schichten wird die Kühlschmierstoffzufuhr ausgeschaltet.

Tabelle 5-11: Kennwerte für den KSS-Volumenstrom der Hon-Maschinen

	Hon-Maschine 1 (Bearbeitungsaufgabe: Magnetkern)		Hon-Maschine 2 (Bearbeitungsaufgabe: Exzenterring)	
	$Q_{KSS\ G}$	$Q_{KSS\ B}$	$Q_{KSS\ G}$	$Q_{KSS\ B}$
Prozess	7 l/min	7 l/min	12 l/min	12 l/min
Spindel	26 l/min	26 l/min	26 l/min	26 l/min
Summe	33 l/min	33 l/min	38 l/min	38 l/min

Eine Messung ermittelt den Energieverbrauch der Kühlschmierstoffanlage während einer repräsentativen Schicht von acht Stunden. Der gemessene Energieverbrauch wird auf das geförderte Kühlschmierstoffvolumen während der Messdauer bezogen. Aus der Messung ergibt sich ein Energieäquivalent für den Energiebedarf zur Aufbereitung und Bereitstellung des Kühlschmierstoffes mit einem Wert von $1,16 \text{ kWh/m}^3$. Durch eine kontinuierliche Erfassung des Energieverbrauchs und des geförderten Kühlschmierstoffvolumens über längere Messzeiträume, zum Beispiel ein Jahr, können auch jahreszeitliche Einflüsse auf den Energiebedarf zur Kühlung des Hon-Öls erfasst werden. Mithilfe des Energieäquivalents kann die mittlere Leistungsaufnahme für die Bereitstellung der ermittelten Volumenströme berechnet werden. Die Kennwerte sind in Tabelle 5-12 aufgeführt.

Tabelle 5-12: Äquivalent für die elektrische Leistungsaufnahme zur Kühlschmierstoffbereitstellung

Hon-Maschine 1 (Bearbeitungsaufgabe: Magnetkern)		Hon-Maschine 2 (Bearbeitungsaufgabe: Exzenterring)	
$P_{KSS, G}$	$P_{KSS, B}$	$P_{KSS, G}$	$P_{KSS, B}$
2,30 kW	2,30 kW	2,64 kW	2,64 kW

5.3.3.4 Druckluftversorgung

Die zwei Hon-Maschinen werden mit einem Druck von 5 bar aus dem Druckluftnetz der Produktionsstätte versorgt. Um den Druckluftvolumenstrom der Maschinen zu bestimmen, werden an beiden Maschinen Messungen während des normalen Produktionsablaufes durchgeführt. Im Grundzustand verbrauchen die Maschinen dabei Druckluft als Sperrluft, um die Spindelmotoren und die Glasmaßstäbe der Hubmotoren vor Verunreinigungen durch Schmutzpartikel zu schützen. Darüber hinaus verbrauchen die pneumatischen Düsenmessstationen im Grundzustand Druckluft, um in der Grundstellung den „Nullring“ ölfrei zu halten. Im Bearbeitungszustand werden zusätzlich Indexzylinder zur genauen Positionierung und zum Anheben der Werkstücke mit Druckluft betrieben. In Maschine 1 (Bearbeitungsaufgabe: Magnetkern) wird zusätzlich eine pneumatische Entgratstation verwendet. Bei den Messungen des Druckluftverbrauchs können Kennwerte für den Grund- und Bearbeitungszustand der Maschinen ermittelt werden, die in Tabelle 5-13 aufgeführt sind.

Tabelle 5-13: Kennwerte für den Druckluftvolumenstrom der Hon-Maschinen (in l/min, bei Normbedingungen)

Hon-Maschine 1 (Bearbeitungsaufgabe: Magnetkern)		Hon-Maschine 2 (Bearbeitungsaufgabe: Exzenterring)	
$Q_{DL, G}$	$Q_{DL, B}$	$Q_{DL, G}$	$Q_{DL, B}$
69 l/min	117 l/min	78 l/min	106 l/min

Der Volumenstrom im Grundzustand ist bei Maschine 2 mit 78 l/min höher als bei Maschine 1 mit 69 l/min, da die zwei Düsenmessstationen von Maschine 1 mit je nur einem Messkanal ausgestattet sind. In Maschine 2 werden zwei Messkanäle pro Düsenmessstation verwendet. Im Bearbeitungszustand benötigt Maschine 1 mit rund 117 l/min dagegen einen höheren Volumenstrom als Maschine 2 mit rund 106 l/min. Der höhere Verbrauch bei Maschine 1 ist durch die Bearbeitungsaufgabe bedingt, die den zusätzlichen Einsatz einer pneumatisch betriebenen Station zum Entgraten erfordert. Der gemessene Volumenstrom wird mithilfe des Energieäquivalents von 0,163 kWh/m³ i.N. (siehe Kapitel 3.1.3) in elektrische Leistungskennwerte für die Bereitstellung des Druckluftvolumenstroms in Abhängigkeit vom Bearbeitungszustand umgerechnet. Tabelle 5-14 fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 5-14: Kennwerte für die mittlere elektrische Leistungsaufnahme der Druckluftbereitstellung

Hon-Maschine 1 (Bearbeitungsaufgabe: Magnetkern)		Hon-Maschine 2 (Bearbeitungsaufgabe: Exzenterring)	
$P_{DL, G}$	$P_{DL, B}$	$P_{DL, G}$	$P_{DL, B}$
0,68 kW	1,14 kW	0,77 kW	1,04 kW

5.3.4 Zusammenfassung und Übersicht der Leistungskennwerte

Bei den untersuchten Hon-Prozessen sind für eine vollständige Analyse des Energiebedarfs neben der Werkzeugmaschine auch die Kühlschmierstoffversorgung und der Druckluftverbrauch zu berücksichtigen. Die Leistungsaufnahme der Werkzeugmaschinen fällt aufgrund der effizienten Gestaltung und des geringen Materialabtrags sehr gering aus, wobei ein Einfluss der Bearbeitungsaufgabe auf die Leistungsaufnahme festzustellen ist. Im Vergleich fallen die Leistungskennwerte für das Pumpen, Kühlen und Reinigen des Kühlschmierstoffes hoch aus. Hieran ist zu erkennen, dass die Aufbereitung und Bereitstellung von Hilfs- und Prozessmedien bei der energetischen Beurteilung des Prozesses unbedingt zu berücksichtigen ist. Auch die Bereitstellung von Druckluft, die beim Honen insbesondere für den Betrieb der pneumatischen Messtechnik eingesetzt wird, muss in die Betrachtung einbezogen werden. Tabelle 5-15 gibt einen Überblick über die Leistungskennwerte für die untersuchten Hon-Prozesse.

Tabelle 5-15: Zusammenfassung der Leistungskennwerte für die untersuchten Hon-Prozesse

Kennwert	Maschine 1 (Magnetkern)	Maschine 2 (Exzenterring)
Werkzeugmaschine		
P_G	0,33 kW	0,35 kW
P_B	1,26 kW	1,53 kW
Kuschmierstoffversorgung		
$Q_{KSS, G}$	33 l/min	38 l/min
$Q_{KSS, B}$	33 l/min	38 l/min
$P_{KSS, G}$	2,30 kW	2,64 kW
$P_{KSS, B}$	2,30 kW	2,64 kW
Druckluftversorgung		
$Q_{DL, G}$	69 l/min	78 l/min
$Q_{DL, B}$	117 l/min	106 l/min
$P_{DL, G}$	0,68 kW	0,76 kW
$P_{DL, B}$	1,15 kW	1,04 kW

6 Planung des Energiebedarfs von Fertigungsprozessketten

Zu Beginn dieses Kapitels wird das Gesamtkonzept zur Auswahl energieeffizienter Prozessketten in der Technischen Produktionsplanung vorgestellt. Dabei wird aufbauend auf den Ergebnissen des vorangegangenen Kapitels dargelegt, inwiefern der Energiebedarf prognostiziert und bei der Auswahl alternativer Prozessketten berücksichtigt werden kann. Im zweiten Abschnitt wird eine generische Datenstruktur vorgestellt, die dazu dient, die vorhandenen Energiedaten eines Fertigungsprozesses zu gliedern und für die Prognose des Energiebedarfs eines zu planenden Prozesses zu nutzen. Anschließend erfolgt die Anwendung und Validierung des Vorgehens in zwei Schritten. Zunächst wird der Energiebedarf der beiden zuvor analysierten Prozesse berechnet. Auf diese Weise kann gezeigt werden, wie die ermittelten Leistungs- und Zeitkennwerte angewendet werden, um den werkstückbezogenen Energiebedarf von Fertigungsprozessen zu bestimmen. Um die Methode zur Prognose des Energiebedarfs zu validieren, wird nachfolgend der Energiebedarf für ein elektrochemisch zu bearbeitendes Beispielbauteil prognostiziert. Als Grundlage hierfür werden zuvor messtechnisch erfasste Daten herangezogen. Das Prognoseergebnis wird im Anschluss daran durch einen Vergleich mit Messergebnissen zu diesem Bauteil überprüft und die Vorhersagegenauigkeit beurteilt.

6.1 Konzept zur Planung energieeffizienter Prozessketten

Die Methode zur Planung und Gestaltung energieeffizienter Prozessketten soll den Planer dabei unterstützen, in der Phase der Technischen Produktionsplanung alternative Fertigungsprozessketten hinsichtlich ihres Energiebedarfs zu beurteilen. Dabei ermittelt der Fertigungsplaner zunächst die alternativen Fertigungsprozessketten, die zur Herstellung eines Bauteils infrage kommen. Diese können sich hinsichtlich der Reihenfolge und Kombination der eingesetzten Prozesse sowie der Wahl der Bearbeitungsparameter und der eingesetzten Betriebsmittel unterscheiden. Den Ausgangspunkt für die Ermittlung von Energiebedarfskennwerten stellt hierbei die Ausarbeitung der Prozesskettenalternativen dar.

Abbildung 6-1 zeigt, wie die Methode zur Planung und Gestaltung energieeffizienter Prozessketten in die Technische Produktionsplanung integriert ist. Die Analyse des Energiebedarfs von Fertigungsprozessen, wie sie in Kapitel 5 erarbeitet und für das Elektrochemische Abtragen und das Honen beispielhaft durchgeführt wurde, ist der prospektiven Ermittlung des Energiebedarfs der Prozessketten vorgelagert. Im Anschluss daran finden die ermittelten Kennwerte Eingang in die Energieplanungsdatenbank. Kapitel 6.2 erläutert den konzeptionellen Aufbau und die Struktur der Datenbank. Als Kriterien für die Auswahl der Energieplanungsdaten werden die Betriebsmittel, die Prozessparameter und die Bearbeitungsaufgaben der einzelnen Fertigungsprozesse herangezogen. Mithilfe dieser Informationen werden aus der Energieplanungsdatenbank passende Datensätze für die Prognose des Energiebedarfs ausgewählt. Bei der Berechnung des werkstückbezogenen Energiebedarfs der Fertigungsprozesse wird auch der Energiebedarf aller Verbraucher ermittelt, die an den Prozessen beteiligt sind.

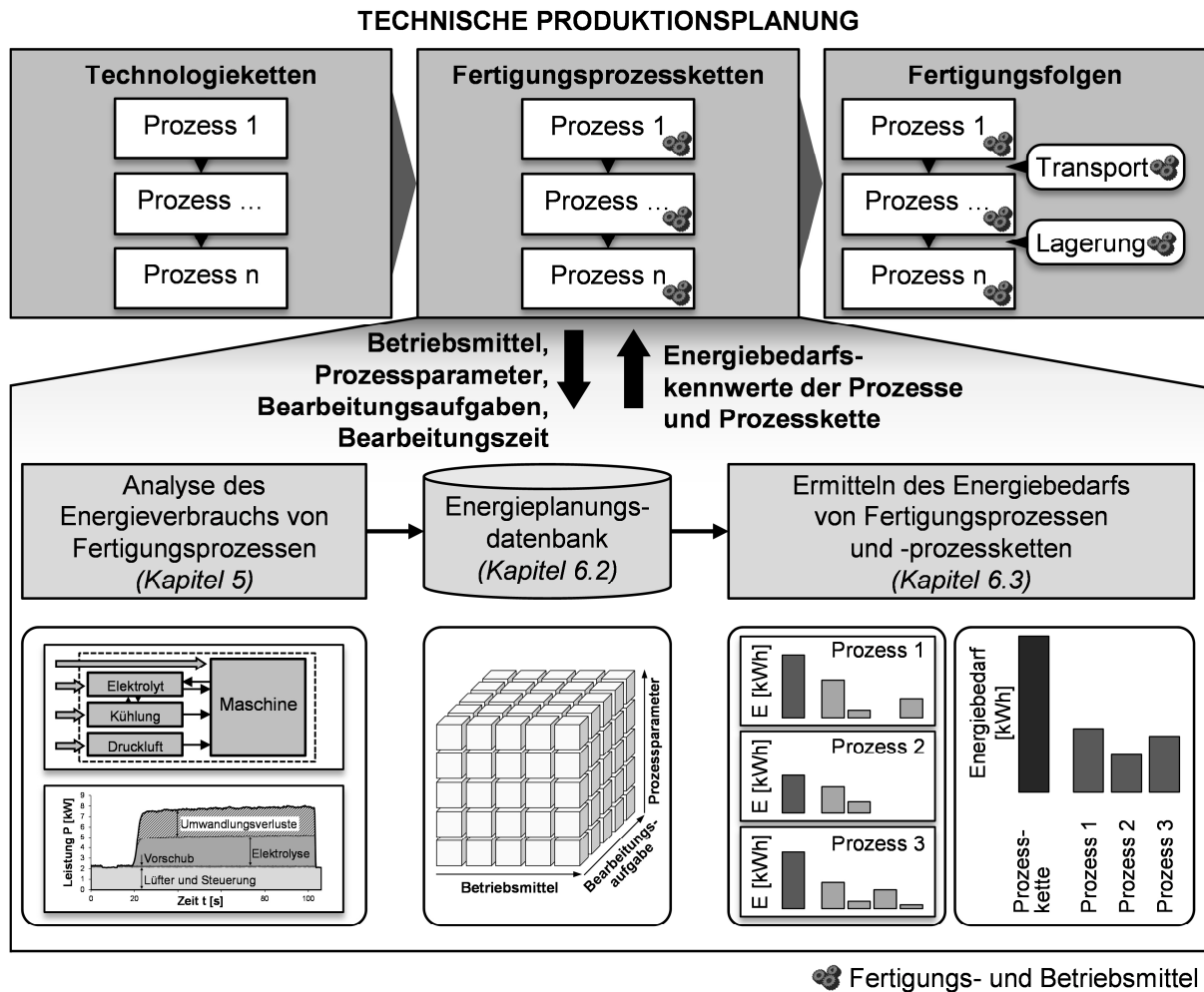


Abbildung 6-1: Konzept zur Einbindung der hier vorgestellten Methode in die Planung von Fertigungsprozessketten im Rahmen der TPP

Der werkstückbezogene Energiebedarf der untersuchten Prozesse ergibt sich abschließend als Summe aller beteiligten Prozesse. Die Berechnung und Prognose des Energiebedarfs wird in Kapitel 6.3 validiert. Der Fertigungsplaner erhält für die untersuchten Fertigungsprozessketten die Energiebedarfskennwerte und kann diese in einer ganzheitlichen Bewertung und Auswahl der besten Alternative berücksichtigen. Dabei spielen neben dem Energiebedarf weitere Kriterien, wie etwa Investitionskosten, Produktionskosten und Taktzeiten, eine wichtige Rolle. Auf der Grundlage der Auswahl der besten Fertigungsprozesskette erfolgt die weitere Ausarbeitung von Fertigungsfolgen, wobei auch Hilfsprozesse, wie der Transport und die Lagerung, in die Planung einbezogen werden.

6.2 Gliederung der Energieplanungsdaten

Um die bei der Analyse der Fertigungsprozesse gewonnenen Daten für die Prognose und Bewertung des Energiebedarfs von Fertigungsprozessen anwenden zu können, ist eine Gliederung der Planungsdaten notwendig. Dabei muss zunächst festgelegt werden, wie detailliert die einzelnen Daten zu ermitteln sind. Kennwerte, wie die

Energieäquivalente für die Bereitstellung von Druckluft oder anderen Medien, müssen zum Beispiel unternehmensspezifisch bestimmt und verwendet werden. Eine weiter detaillierte Ermittlung der Kennwerte ist bei Bedarf möglich und kann insbesondere bei dezentralen Einzelanlagen sinnvoll sein, um Effizienzunterschiede einzelner Anlagen berücksichtigen zu können. Die Belegungszeitfaktoren geben an, welcher Zeitanteil über die eigentliche Nutzungszeit der Maschinen und Anlagen hinaus energetisch zu berücksichtigen ist, weil Maschinen und Anlagen im Grundzustand betrieben werden. Sie sind standortspezifisch zu bestimmen. Eine technologie- oder anlagenspezifische Erhebung ist jedoch möglich und kann die Vorhersagegenauigkeit verbessern.

Die Leistungskennwerte und Medienverbrauchsdaten für die im Fertigungsprozess eingesetzten Betriebsmittel wie Werkzeugmaschinen sind hingegen charakteristisch für jeden Anlagentyp und müssen anlagenspezifisch vorliegen. Die Untersuchungen in Kapitel 5 zeigten auf, dass sich beispielsweise die Leistungskennwerte bereits in Abhängigkeit vom Maschinentyp stark unterscheiden können. Abbildung 6-2 gibt einen Überblick über die Energieplanungsdaten und zeigt auf, in welcher Detaillierung die Daten erfasst werden müssen.

Energieplanungsdaten ► Datendetaillierung ▼	Energie- äquivalente	Belegungszeit- faktoren	Medienver- brauchsdaten	Leistungs- kennwerte
Unternehmensspezifisch	●			
Standortspezifisch	◐	●		
Technologiespezifisch	◐	◐		
Anlagenspezifisch	◐	◐	●	●
			● erforderlich	◐ möglich

Abbildung 6-2: Bereitstellung von Planungsdaten bezogen auf die Datenebene

Die vorangegangenen Untersuchungen legten ebenso dar, dass die Medienverbrauchsdaten und Leistungskennwerte nicht nur von den eingesetzten Maschinen und Anlagen beeinflusst werden, sondern dass auch die auszuführende Bearbeitungsaufgabe und die gewählten Prozessparameter zu berücksichtigen sind. Um die erfassten Energieplanungsdaten entsprechend dieser Einflussfaktoren abzubilden, wird eine generische und technologieunabhängige Strukturierung der Planungsdaten angewendet. Die Datenstrukturierung erfolgt in Form eines Würfels, in dem die drei Einflussfaktoren abgebildet werden. Dabei werden die Energieplanungsdaten für jede Technologie in einem separaten Datenwürfel verarbeitet. Abbildung 6-3 zeigt die Struktur der Energieplanungsdatenbank für einen Prozess einer zu planenden Prozesskette. Darin werden die Energieplanungsdaten nach den Kriterien Betriebsmittel, Bearbeitungsaufgabe und Prozessparameter gegliedert. Die Struktur eines Datensatzes ist beispielhaft dargestellt. Jeder Datensatz enthält die Leistungskennwerte des Betriebsmittels, die Kennwerte für den Medienverbrauch, die Energieäquivalente für die Bereitstellung der Medien sowie die Belegungszeitfaktoren. Sofern Energieäquivalente und Belegungszeitfaktoren nicht anlagenspezifisch vorliegen, werden diese Werte aus standort- oder unternehmensspezifischen Daten übernommen.

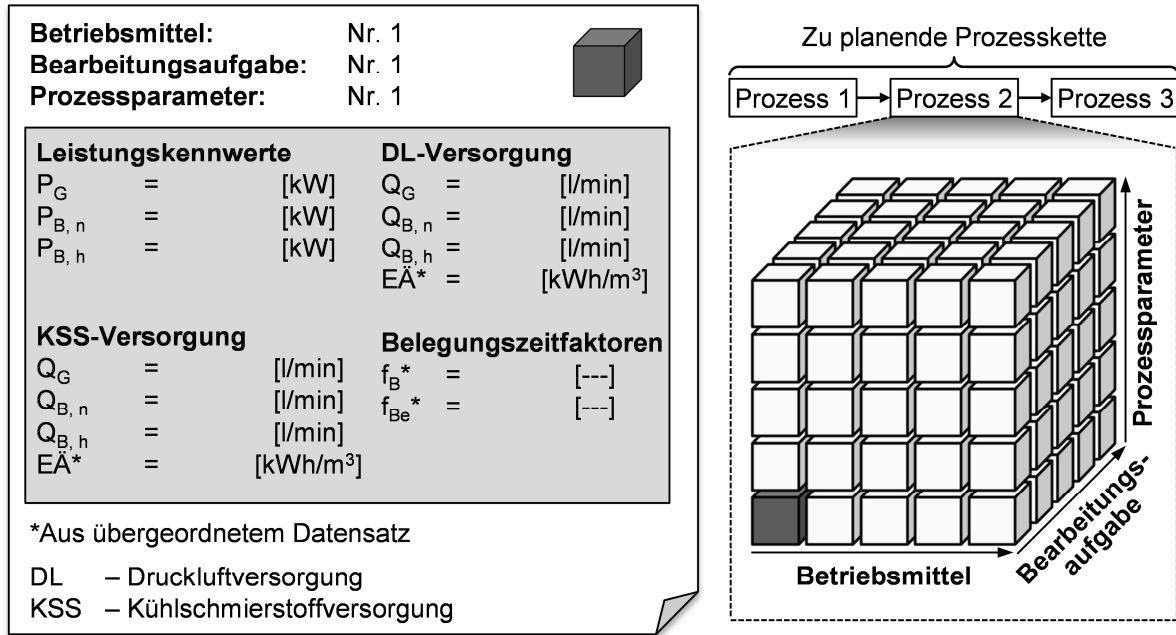


Abbildung 6-3: Konzept zur Gliederung der Energieplanungsdaten

Bereits die Wahl der Betriebsmittel wirkt sich auf den Energiebedarf eines Prozesses aus (Swat et al. 2013b). So können sich Art und Anzahl von Nebenaggregaten in einer Werkzeugmaschine in unterschiedlichen Kennwerten für die Leistungsaufnahme der Maschine im Grundzustand niederschlagen. Der Wirkungsgrad von Motoren und Antriebseinheiten beeinflusst wesentlich die Leistungsaufnahme während der Prozessausführung. Bei der Gliederung der Energieplanungsdaten bezüglich der verwendeten Betriebsmittel ist eine Einteilung nach Maschinentyp vorzusehen. In Anlehnung an Weinert (Weinert 2010) können weitere Gliederungsmerkmale, wie etwa die Leistungsklasse, Bauweise und auch das Modell des Betriebsmittels, bei Bedarf berücksichtigt werden.

Die Bearbeitungsaufgabe beschreibt Merkmale des zu fertigenden Werkstückes, die die Höhe der Leistungsaufnahme des Betriebsmittels beeinflussen. Abhängig vom eingesetzten Fertigungsverfahren kann unter anderem der zu bearbeitende Werkstoff einen Einfluss auf die Leistungsaufnahme des Betriebsmittels haben. Es wirken sich beispielsweise die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes auf die aufzubringenden Schnittkräfte bei zerspanenden Verfahren aus und damit auch auf die Leistungsaufnahme der Werkzeugmaschinen während der Bearbeitung. Wenn das Werkstück für die Bearbeitung bewegt werden muss, kann auch das Gewicht des Werkstückes die Leistungskennwerte der Betriebsmittel bestimmen. Dieser Aspekt ist zum Beispiel bei Bearbeitungsverfahren wie dem Drehen zu berücksichtigen (Schiefer 2000). Bei anderen Verfahren wie dem Elektrochemischen Abtragen wird die Leistungsaufnahme der Werkzeugmaschine wesentlich von der Größe der zu bearbeitenden Fläche beeinflusst.

Um die vorgegebene Bearbeitungsqualität eines Prozesses zu erreichen, wird eine Kombination von Verfahrensparametern für die Bearbeitung gewählt. Ebenso werden solche Parametersätze für einzelne Bearbeitungsschritte wie das Schruppen und

Schichten verwendet. Die Prozessauslegung und Wahl der geeigneten Parametersätze ist Teil der Planung von Fertigungsprozessketten. Letztlich beeinflusst auch die Wahl der Prozessparameter die Leistungskennwerte der Betriebsmittel während der Bearbeitung. Demzufolge ist die Berücksichtigung der gewählten Parametersätze als Merkmal für die Gliederung der Energieplanungsdaten vorgesehen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Leistungsaufnahme im Grundzustand charakteristisch für den Typ des Betriebsmittels ist. Hingegen werden Leistungskennwerte für die Bearbeitung auch durch Merkmale der Bearbeitungsaufgabe und durch die gewählten Prozessparameter bestimmt. Das vorgestellte Konzept zur Gliederung von Energieplanungsdaten dient der Auswahl passender Datensätze für die Vorhersage des Energiebedarfs einer Fertigungsprozesskette. Dies erfordert, dass die Gliederungskriterien bereits bei der Analyse von Fertigungsprozessen erfasst werden. Mit zunehmender Datenverfügbarkeit kann sukzessive eine Ausdifferenzierung der Gliederung erfolgen. Für die Anwendung des Konzeptes ist eine technologie- und unternehmensbezogene Ausgestaltung der Datenstrukturierung notwendig. Ein Anwendungsbeispiel für die Prognose des Energiebedarfs eines Prozesses des Elektrochemischen Abtragens wird in Kapitel 6.3.2 vorgestellt.

6.3 Validierung der Methode

6.3.1 Berechnung des Energieverbrauchs

6.3.1.1 Elektrochemisches Abtragen (PECM)

Die untersuchten Prozesse zum Elektrochemischen Abtragen werden in einer Forschungsumgebung betrieben. Eine Zeitstudie zum Betrieb der Maschinen und Anlagen sowie eine Analyse der Ausfallzeiten der Prozesse in einer Serienfertigung sind daher nicht möglich. Es werden entsprechende Annahmen für den Einsatz der Prozesse in einer Großserienfertigung getroffen, um die Energiemengenintensität beispielhaft zu berechnen.

Die Fertigung soll an sechs Arbeitstagen pro Woche in einem 3-Schichtsystem erfolgen. Bei 300 Arbeitstagen pro Jahr und 24 Stunden pro Schicht, ergibt sich damit für die Prozesse eine zeitraumbezogene Belegungszeit (T_B) von 7200 h pro Jahr. Es wird angenommen, dass der Anteil der Ausfallzeiten (Belegungszeitfaktor, f_B) 30 % der Belegungszeit beträgt. In der ungeplanten Zeit an Sonn- und Feiertagen sollen die Maschinen abgeschaltet werden, um Energie zu sparen. Damit ergibt sich nach Gleichung (22) in Kapitel 5.1.2.1 für den Faktor für die erweiterte Belegungszeit (f_{Be}) ein Wert von 0,00.

Tabelle 6-1 fasst die Zeitkennwerte für die untersuchten PECM-Prozesse zusammen. Aus den durchgeführten Messungen ist die Hauptnutzungszeit (t_h) der Prozesse bekannt. Für das Be- und Entladen der Maschine wird eine Automatisierungsvariante mit einer Nebennutzungszeit (t_n) von 17 s zugrunde gelegt. Davon ausgehend wird mithilfe des angenommenen Belegungszeitfaktors (f_B) die Bele-

gangszeit ($t_B = t_N \cdot (1+f_B)$) berechnet. Unter der getroffenen Annahme, dass die Maschinen in ungeplanten Zeiten abgeschaltet werden, ist die Belegungszeit (t_B) mit der erweiterten Belegungszeit ($t_{Be} = t_B \cdot (1+f_{Be})$) identisch. Um den Energieverbrauch der Maschinen und Anlagen im Grundzustand bestimmen zu können, wird die über die Nutzungszeit (t_N) hinausgehende erweiterte Belegungszeit ($t_{Be} - t_N$) berechnet.

Tabelle 6-1: Zeitkennwerte der untersuchten PECM-Prozesse

	t_h	t_n	t_N	f_B	t_B	f_{Be}	t_{Be}	$t_{Be} - t_N$
Parametersatz 1	134 s	17 s	151 s	0,30	196,3 s	0,00	196,3 s	45,3 s
Parametersatz 2	87 s	17 s	104 s	0,30	135,2 s	0,00	135,2 s	31,2 s
Parametersatz 3	61 s	17 s	78 s	0,30	101,4 s	0,00	101,4 s	23,4 s

Für die untersuchten PECM-Prozesse können die Hauptnutzungszeit (t_h) und die Nebennutzungszeit (t_n) im Leistungsprofil der Maschine klar differenziert werden. Folglich konnten für diese Zeiten, wie in Kapitel 5.1.2.1 beschrieben, separate Leistungskennwerte ($P_{B,h}$, $P_{B,n}$) für die Maschine und alle anderen am Prozess beteiligten Verbraucher ermittelt werden.

Der Elektrolytvolumenstrom fließt nur während der Hauptnutzungszeit des Prozesses. Während der Nebennutzungszeit der Bearbeitung sowie während der Stillstandzeiten fließt kein Elektrolyt. Ebenso wird auch nur während der Hauptnutzungszeit Wärme in den Elektrolyten eingebracht, die durch das Kühlsystem abgeführt werden muss, um den Elektrolyten auf der geforderten Temperatur zu halten. Für die Anlagen zur Elektrolytversorgung und -kühlung entsprechen daher die Leistungskennwerte für die Nebenzeit der Bearbeitung ($P_{B,n}$), den Kennwerten für den Grundzustand der Anlagen (P_G).

Der Energieverbrauch der Werkzeugmaschine und aller am Prozess beteiligten Anlagen kann nach Gleichung (34) berechnet werden. Der werkstückbezogene Gesamtenergieverbrauch des Prozesses (E_{PECM}) ergibt sich nach Gleichung (35) als Summe aller am Prozess beteiligten Verbraucher. Für die Berechnungen werden die in Kapitel 5.2 ermittelten und in Kapitel 5.2.4 zusammengefassten Leistungskennwerte der Verbraucher angewendet. Das Vorgehen zur Ermittlung der Energieverbräuche ist ANHANG C zu entnehmen.

$$E = (P_{B,h} \cdot t_h + P_{B,n} \cdot t_n) + P_G \cdot (t_{Be} - t_N) \quad (34)$$

$$E_{PECM} = E_{WZM} + E_{Elektrolytversorgung} + E_{Elektrolytkühlung} + E_{DL} \quad (35)$$

Die Berechnung des werkstückbezogenen Energieverbrauchs wird jeweils für die drei untersuchten Prozessparametersätze sowie die zwei eingesetzten Maschinen PEMCenter 8000 und PEM 600 durchgeführt. Alle anderen am Prozess beteiligten Verbraucher sowie die Bearbeitungsaufgabe („Planar“) sind gleich/bleiben unverän-

dert. In Abbildung 6-4 sind die Berechnungsergebnisse für die sechs untersuchten Fälle grafisch dargestellt. Neben dem Gesamtenergieverbrauch sind jeweils auch die Anteile der Werkzeugmaschine, der Anlage zur Elektrolytversorgung, des Kühlsystems und der Anlage zur Druckluftbereitstellung am Gesamtenergieverbrauch der Prozesse abgebildet.

Der Gesamtenergieverbrauch der untersuchten PECM-Prozesse ist abhängig von dem gewählten Parametersatz und der eingesetzten Werkzeugmaschine. Für Parametersätze mit höherer Abtragsgeschwindigkeit fällt der Gesamtenergieverbrauch aufgrund der kürzeren Bearbeitungszeit geringer aus. Unter den getroffenen Annahmen für die Belegungszeit der Maschinen und Anlagen sowie für die Ausfallzeiten in einer Serienfertigung, liegt der werkstückbezogene Gesamtenergieverbrauch für den Prozess mit dem PEMCenter 8000 zwischen 0,435 und 0,248 kWh. Im Vergleich fällt der Gesamtenergieverbrauch für die Maschine der neuen Generation, PEM 600, signifikant geringer aus, und liegt abhängig vom gewählten Parametersatz zwischen 0,322 und 0,180 kWh pro gefertigtem Teil.

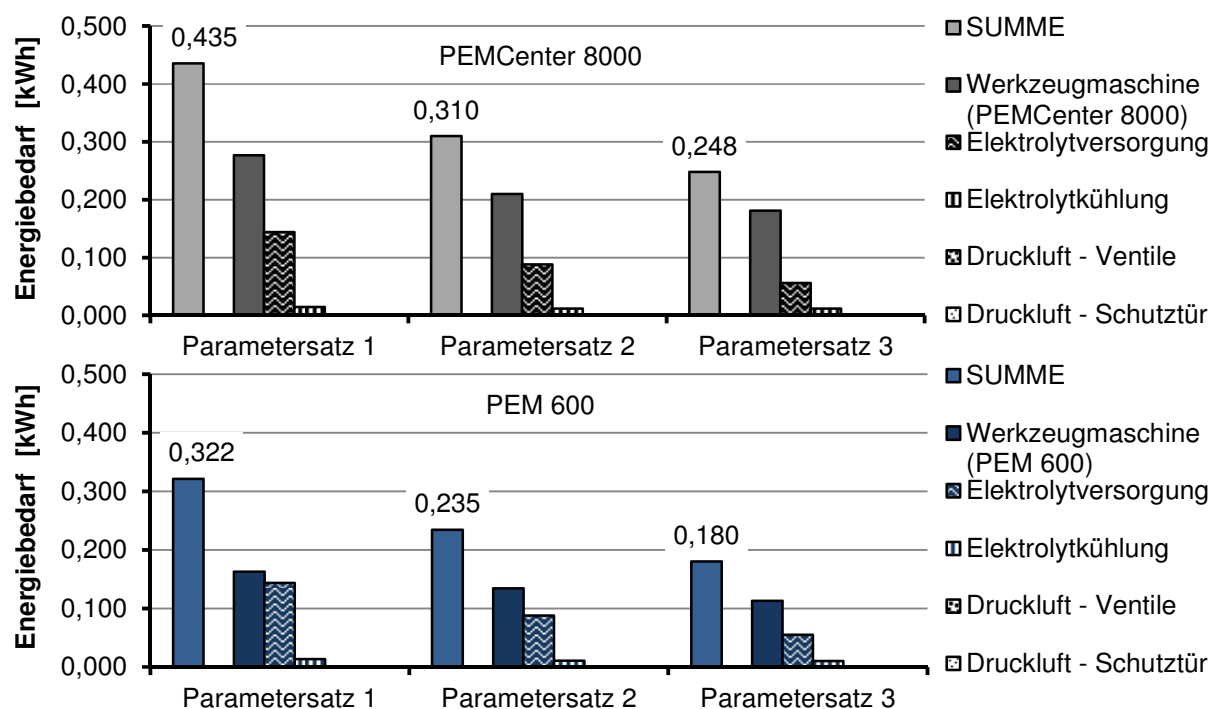


Abbildung 6-4: Energiemengenintensität der untersuchten PECM-Prozesse – PEMCenter 8000 und PEM 600

Beim Vergleich des Energieverbrauchs der Anlagenteile des Prozesses hat die Maschine PEMCenter 8000 den größten Anteil. Die Anlage zur Elektrolytversorgung verursacht nach der Werkzeugmaschine bei den untersuchten Beispielen den zweitgrößten Anteil am Energieverbrauch des gesamten Prozesses. Für die Elektrolytkühlung ist nur ein geringer Energieverbrauch zu verzeichnen. Da Druckluft in den untersuchten PECM-Prozessen nur für das Schalten von Ventilen und den Betrieb der Schutzhaube eingesetzt wird, fällt der Energieverbrauch für die Druckluftbereitstellung sehr gering aus. Abbildung 6-4 zeigt den werkstückbezogenen

nen Energieverbrauch der Prozesse sowie den Anteil der einzelnen Verbraucher. Der Energieverbrauch für die Druckluftbereitstellung ist so gering, dass er in der Abbildung nicht darstellbar ist.

6.3.1.2 Honen

Um das vorgestellte Vorgehen zu validieren, wird die Energiemengenintensität für die in Kapitel 5 untersuchten Prozesse zum Honen der Magnetkerne und Exzenterringe berechnet. Die untersuchten Hon-Prozesse werden in einer Großserienfertigung betrieben. Die Bearbeitung erfolgt in einem 3-Schichtsystem mit 16 Schichten pro Woche. Unter der Annahme von 300 Arbeitstagen pro Jahr ergibt sich damit eine zeitraumbezogene Belegungszeit der Prozesse (T_B) von rund 5.500 Stunden pro Jahr. Für die zwei untersuchten Prozesse werden die Ausfallzeiten in einem manuellen Schichtprotokoll dokumentiert und für den Zeitraum eines Jahres ausgewertet. Für Hon-Prozess 1 und Hon-Prozess 2 werden Ausfallzeiten von rund 2000 h und 1600 h im untersuchten Kalenderjahr festgestellt. Mithilfe der ermittelten Ausfallzeiten wird der Belegungszeitfaktor (f_B) berechnet. Nach Gleichung (19) in Kapitel 5.1.2.1 ergeben sich demzufolge für die untersuchten Hon-Prozesse Belegungszeitfaktoren von 0,36 und 0,29.

Um Verzögerungen des Betriebsablaufs im Zusammenhang mit dem Neustart der Maschinen zu vermeiden, werden die Maschinen auch während nicht geplanter Schichten nicht abgeschaltet, sondern im Automatikmodus betrieben. Der damit verbundene Energiebedarf wird, wie in Kapitel 5.1.2.1 ausgeführt, mithilfe des Faktors für die erweiterte Belegungszeit (f_{Be}) berücksichtigt. Bei dem vorliegenden 3-Schichtsystem mit 16 Schichten pro Woche ergeben sich daraus fünf nicht geplante Schichten pro Woche. Nach Gleichung (36) resultiert daraus ein Faktor für die erweiterte Belegungszeit von 0,24:

$$f_{Be} = \frac{\text{nicht geplante Zeit pro Woche}}{\text{Betrachtungszeitraum (Woche)}} = \frac{40 \text{ h}}{168 \text{ h}} = 0,24 \quad (36)$$

In Tabelle 6-2 sind die Zeitkennwerte für die zwei untersuchten Hon-Prozesse aufgeführt. Ausgehend von der prozessbezogenen Nutzungszeit (t_N) wird mithilfe des Belegungszeitfaktors (f_B) die Belegungszeit ($t_B = t_N \cdot (1+f_B)$) berechnet. Die erweiterte Belegungszeit ($t_{Be} = t_B \cdot (1+f_{Be})$) berechnet sich durch Multiplikation mit dem Faktor für die erweiterte Belegungszeit.

Tabelle 6-2: Zeitkennwerte der untersuchten Hon-Prozesse

	t_N	f_B	t_B	f_{Be}	t_{Be}	$t_{Be} - t_N$
Hon-Prozess 1 (Bearbeitungsaufgabe: Magnetkern)	12,3 s	0,36	16,7 s	0,24	20,7 s	8,4 s
Hon-Prozess 2 (Bearbeitungsaufgabe: Exzenterring)	16,0 s	0,29	20,6 s	0,24	25,6 s	9,6 s

Beim Honen kann aufgrund der Parallelbearbeitung und des automatisierten Be- und Entladens im Leistungsprofil der Werkzeugmaschinen nicht zwischen den Leistungskennwerten für die Bearbeitung während der Hauptzeiten und Nebenzeiten unterschieden werden. Aus diesem Grund wird, wie in Kapitel 5.1.2.1 ausgeführt, der Leistungskennwert (P_B) verwendet, der als Mittelwert der Leistungsaufnahme während der prozessbezogenen Nutzungszeit (t_N) definiert ist. Für die Berechnung des Energiebedarfs pro gefertigtem Bauteil werden die in Kapitel 5.3.4 zusammengefassten Leistungskennwerte für die Werkzeugmaschine sowie für die Bereitstellung der Druckluft und des Kühlschmierstoffes verwendet. Die Berechnung des Energiebedarfs der einzelnen Verbraucher erfolgt nach Gleichung (37). Bei der Kühlschmierstoffbereitstellung ist zu berücksichtigen, dass die Kühlschmierstoffversorgung in nicht geplanten Zeiten abgeschaltet wird und dann keinen Energieverbrauch verursacht. Die Grundleistung der Kühlschmierstoffversorgung wird demzufolge nur mit der über die Nutzungszeit hinausgehenden Belegungszeit ($t_B - t_N$) berechnet. Der Gesamtenergieverbrauch des Hon-Prozesses pro Werkstück ergibt sich nach Gleichung (38) als Summe des Energieverbrauchs der am Prozess beteiligten Verbraucher.

$$E = P_B \cdot t_N + P_G \cdot (t_{Be} - t_N) \quad (37)$$

$$E_{Honen} = E_{WZM} + E_{DL} + E_{KSS} \quad (38)$$

Abbildung 6-5 zeigt die Ergebnisse für die Berechnung der Energiemengenintensität der untersuchten Hon-Prozesse. Neben dem Gesamtenergiebedarf sind auch die Anteile der Werkzeugmaschine, der Kühlschmierstoffversorgung und der Druckluftbereitstellung am Gesamtenergiebedarf dargestellt. Das Vorgehen der Berechnung ist in ANHANG D dokumentiert.

Der gesamte Energiebedarf für das Honen eines Magnetkerns beträgt rund 0,021 kWh. Für das Honen eines Exzenterringes werden rund 0,030 kWh elektrischer Energie benötigt. Der Hauptgrund für den höheren Energiebedarf in Hon-Prozess 2 ist die längere prozessbezogene Nutzungszeit (t_N) für die Bearbeitung der Exzenterringe. Weitere Gründe für den höheren Energieverbrauch sind außerdem die höhere Leistungsaufnahme der Hon-Maschine sowie der höhere Volumenstrom von Kühlschmierstoff in Prozess 2. Da es sich um zwei Maschinen des gleichen Typs handelt, ist die unterschiedliche Leistungsaufnahme der Maschinen auf die ausgeführten Bearbeitungsaufgaben zurückzuführen. Bei der Bearbeitung der Exzenterringe wird ein deutlich höherer Materialabtrag vorgenommen, was sich in der höheren Leistungsaufnahme und dem höheren Kühlschmierstoffvolumenstrom widerspiegelt.

Bei beiden Prozessen hat der Energieverbrauch für die Kühlschmierstoffversorgung den größten Anteil am gesamten Energieverbrauch des Prozesses. Der Anteil der Werkzeugmaschinen und der Druckluftbereitstellung am Gesamtenergieverbrauch der Prozesse ist vergleichbar hoch und liegt jeweils deutlich unter dem Energieverbrauch der Kühlschmierstoffversorgung.

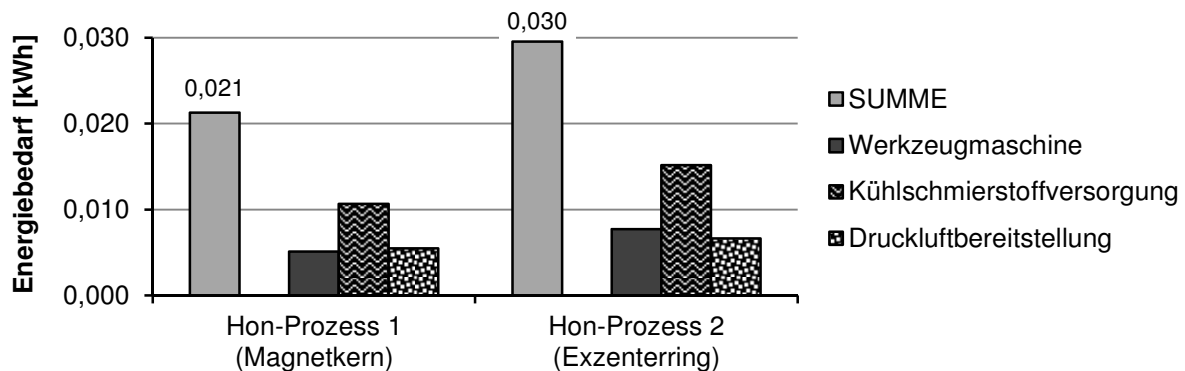


Abbildung 6-5: Energiemengenintensität der untersuchten Hon-Prozesse

6.3.2 Prognose des Energiebedarfs

6.3.2.1 Anwendungsbeispiel PECM

Die in Kapitel 6.2 vorgestellte Gliederung der Energieplanungsdaten wird im Folgenden auf ein Beispiel der elektrochemischen Bearbeitung angewendet und dazu genutzt, den Energiebedarf für die Herstellung eines Musterbauteils abzuschätzen. Dabei wird die Betrachtung zunächst auf den Energiebedarf der eingesetzten Werkzeugmaschine begrenzt. Das Prognoseergebnis wird anschließend mit dem Ergebnis einer Messung des Energieverbrauchs der Werkzeugmaschine verglichen und bewertet.

Bei dem herzustellenden Werkstück handelt es sich um ein Musterbauteil, das vom Maschinenhersteller zu Demonstrationszwecken angefertigt wird. Das Musterbauteil erfüllt keine technische Funktion, ist in seiner Geometrie und dem verwendeten Werkstoff jedoch an Ventilplatten angelehnt, wie sie beispielsweise in Hubkolbenverdichtern (GEA AWP 2013), Rückschlagventilen (RITAG 2015) und bei Diesel-Einspritzsystemen zum Einsatz kommen (Reif 2012). Der Rohling für das Musterbauteil ist eine runde Edelstahlplatte (1.4112, X90CrMoV18) mit einem Außendurchmesser von 18 mm und einer zentrischen Bohrung mit einem Durchmesser von 4,5 mm. Während der Bearbeitung wird der Elektrolyt durch die Bohrung des Werkstücks gespült.

Das Werkzeug für die Herstellung des Musterteils hat einen Durchmesser von 14 mm und beinhaltet verschiedene Geometrielemente, wie zum Beispiel Kugelkanten, Einsenkungen und Stege. Es wird bei der Bearbeitung rund 900 µm in das Musterbauteil eingesenkt. Abbildung 6-6 zeigt ein Modell des Werkzeugs (links) und ein fertig bearbeitetes Musterbauteil (rechts).

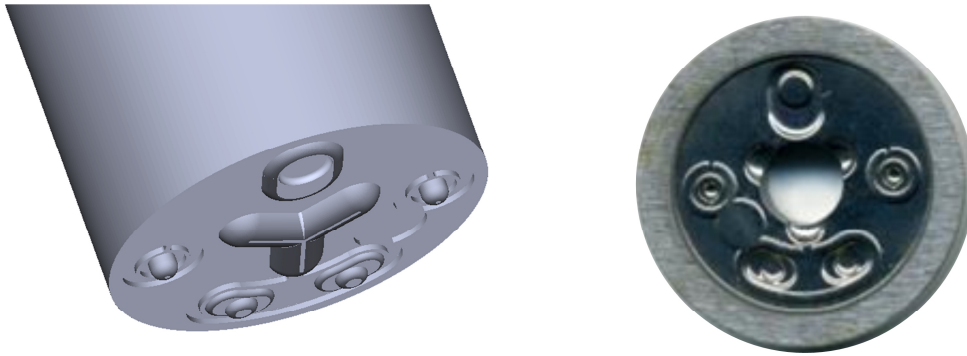


Abbildung 6-6: CAD-Modell des Werkzeugs (links) und Foto des fertigen Werkstücks (rechts) (PEM Tec 2015a)

Das Musterbauteil soll in mehreren Schritten bearbeitet werden. Dabei werden zu Beginn des Prozesses zwei Schrupp-Bearbeitungsschritte mit hohem Materialabtrag durchgeführt. Anschließend erfolgt ein Schlichten. Bevor das Bauteil poliert wird, wird ein Zwischenschritt zur Reinigung der Werkzeugelektrode durchgeführt. Dabei wird die Polung zwischen Werkzeug und Werkstück umgekehrt, um die Werkzeugelektrode von möglichen Ablagerungen zu säubern, und um beim Polieren die gewünschte Oberfläche und die Detailtreue der Geometriemerkmale zu erzielen. Während des Reinigungsschrittes wird kein Material abgetragen. Die einzelnen Bearbeitungsschritte werden nacheinander in einem Arbeitsgang durchgeführt. Die Prozessparameter, wie Vorschub, Spannung, Pulsfrequenz und Pulsbreite, werden während des Arbeitsganges den Bearbeitungsschritten entsprechend angepasst. Um eine wirtschaftlichere Fertigung zu erzielen, werden im Prozess zwei Werkstücke parallel bearbeitet.

6.3.2.2 Planungsdatensätze

Aufgrund der Komplexität des elektrochemischen Abtragprozesses können die Prozessparameter für einzelne Bearbeitungsschritte bislang nicht exakt vorhergesagt werden. Es ist jedoch möglich, die Wahl der Prozessparameter auf einen Bereich sinnvoller Werte einzugrenzen, sodass die Parametersätze im ersten Schritt grob festgelegt werden können. Die detaillierte Auslegung der Prozessparameter erfolgt in der Regel im Anschluss durch Vorversuche. Intelligente wissensbasierte Planungssysteme zur frühzeitigen Auswahl von Prozessparametern anhand der Bearbeitungsaufgabe, wie sie von Amalnik et al. (Amalnik et al. 1998, Amalnik und McGeough 1996) vorgeschlagen wurden, haben sich in der Praxis bisher nicht etabliert, sodass die Auslegung des Prozesses und die Wahl der Prozessparameter weitgehend auf der Durchführung von Vorversuchen sowie der Erfahrung des Prozessplaners beruhen. Aktuelle Forschungsarbeiten zielen darauf ab, ein Vorgehen zu entwickeln, das die Prozessauslegung mithilfe von material- und prozessspezifischen Daten und ohne umfangreiche Vorversuche ermöglicht (Steuer et al. 2015). Dazu werden die material- und prozessspezifischen Daten durch empirische Untersuchungen ermittelt.

Für die Prognose des Energiebedarfs der Werkzeugmaschine bei der Fertigung des Musterteils liegen insgesamt acht Parametersätze vor. Neben den drei in Kapitel 5.2 erarbeiteten Datensätzen wurden fünf weitere Datensätze ermittelt, die die Maschine PEM 600 und die in Kapitel 5.2.3.1 beschriebene Bearbeitungsaufgabe „Planar“ abbilden. Die in den Datensätzen verwendeten Prozessparameter erlauben die Durchführung der für die Fertigung des Musterteils benötigten Bearbeitungsschritte. Alle vorhandenen Planungsdatensätze können im Konzept zur Gliederung der Planungsdaten nach den Kriterien Betriebsmittel, Bearbeitungsaufgabe und Prozessparameter eingeordnet werden. Abbildung 6-7 zeigt die Gliederung der für den PECM-Prozess erfassten Planungsdatensätze für die zwei untersuchten Maschinen, die Bearbeitungsaufgabe „Planar“ sowie die acht untersuchten Parametersätze. Im linken Teil der Abbildung ist der Datensatz für die Maschine PEM 600, die Bearbeitungsaufgabe „Planar“ und den „Parametersatz 3“ beispielhaft dargestellt.

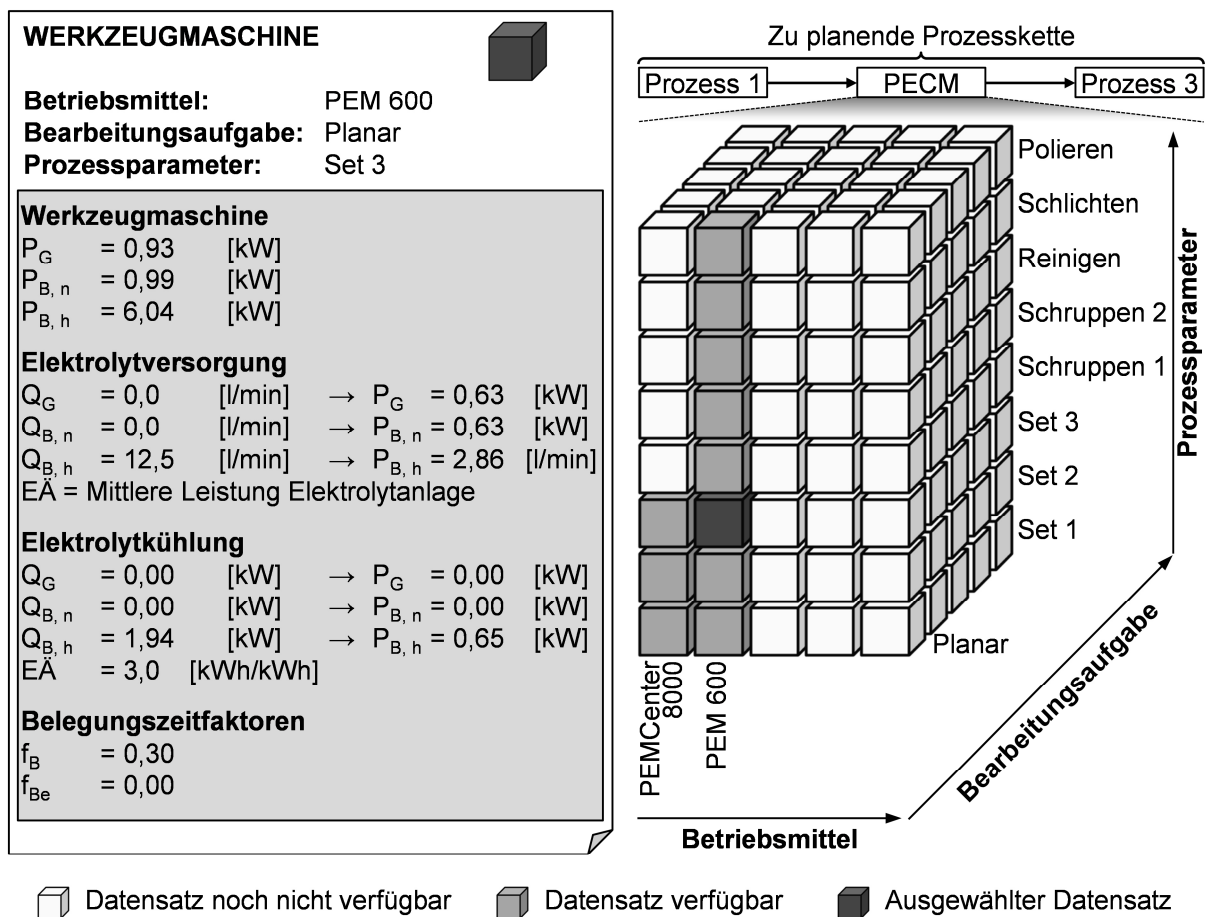


Abbildung 6-7: Gliederung der erfassten Planungsdatensätze

Tabelle 6-3 gibt eine Übersicht über die einzelnen Bearbeitungsschritte und die verwendeten Sätze der Prozessparameter. Die ermittelten Kennwerte für die untersuchten Parametersätze sind in ANHANG E dokumentiert.

Tabelle 6-3: Untersuchte Parametersätze für die Bearbeitungsschritte

Bearbeitungs-schritt	Pulsfrequenz [Hz]	Spannung [V]	Pulsbreite [ms]	Vorschub [mm/min]
Schruppen 1	70	9,5	3,0	0,25
Schruppen 2	70	8,5	2,0	0,20
Schlichten	50	7,5	1,4	0,08
Reinigen	50	Bipolar 2,4	0,0	0,00
Polieren	25	12	0,8	0,10

6.3.2.3 Abschätzung des Energiebedarfs

Die vorliegenden Planungsdatensätze bilden den Ausgangspunkt für die Prognose des werkstückbezogenen Energiebedarfs der Werkzeugmaschine zur Herstellung des Musterteils. Um die schrittweise Bearbeitung des Musterteils mit verschiedenen Bearbeitungsparametern zu berücksichtigen, erfolgt die Berechnung des Energiebedarfs abschnittsweise für die fünf Bearbeitungsschritte des Prozesses. Der Gesamtenergiebedarf wird nach Gleichung (39) als Summe des Energiebedarfs der Bearbeitungsschritte ($i = 1 \dots 5 =$ Schruppen...Polieren) berechnet. Dabei werden die Leistungskennwerte der Maschine für den jeweiligen Bearbeitungsschritt ($P_{B,h,i}$) verwendet. In dem untersuchten Prozess werden zwei Werkstücke parallel bearbeitet. Bei der Berechnung des werkstückbezogenen Energiebedarfs ist dementsprechend die Anzahl der parallel bearbeiteten Werkstücke ($n = 2$) zu berücksichtigen.

$$E_{WZM} = \frac{1}{n} \left(\left(\left(\sum_{i=1}^5 P_{B,h,i} \cdot t_{h,i} \right) + P_{B,n} \cdot t_n \right) + P_G \cdot (t_{Be} - t_N) \right) \quad (39)$$

$$t_N = t_h + t_n = \sum_{i=1}^5 t_{h,i} + t_n \quad (40)$$

Die Leistungskennwerte der Planungsdatensätze beziehen sich auf die Bearbeitungsaufgabe „Planar“ und die bearbeitete Fläche von 2.557 mm^2 . Um den Energiebedarf der Werkzeugmaschine für die Fertigung des Musterteils abschätzen zu können, müssen die vorliegenden Leistungskennwerte der Maschine angepasst werden. Dazu wird für jeden Bearbeitungsschritt die in den Planungsdaten berechnete mittlere Stromdichte auf die mittlere Bearbeitungsfläche des Musterteils bezogen und die angepassten Leistungskennwerte berechnet. Aufgrund der Erhebungen und Einsenkungen in der Geometrie des Musterteils ist die Bearbeitungsfläche nicht konstant und wird mit zunehmender Einsenktiefe des Werkzeugs in das Werkstück größer. Mithilfe des CAD-Modells der Werkzeugelektrode wird daher die mittlere Be-

arbeitungsfläche für jeden Bearbeitungsschritt ermittelt. Die berechneten Leistungskennwerte der Maschine ($P_{B,h,i}$) für die Bearbeitung des Musterteils sind in Tabelle 6-4 zusammengefasst.

Die Werkzeugelektrode muss für die Bearbeitung insgesamt 900 μm tief in das Werkstück eingesenkt werden. Anhand der Einteilung der Einsenktiefe auf die Bearbeitungsschritte und mithilfe der Vorschubgeschwindigkeit wird die Bearbeitungsdauer ($t_{h,i}$) je Bearbeitungsschritt berechnet. Die Dauer für das Reinigen der Elektrode wird mit 10 s abgeschätzt. Die Aufteilung der Einsenktiefe auf die einzelnen Bearbeitungsschritte wird abgeschätzt und ist in Tabelle 6-4 aufgeführt.

Tabelle 6-4: Leistungskennwerte, Einsenktiefe und Bearbeitungsdauer der Bearbeitungsschritte

Bearbeitungsschritt	i	Einsenktiefe	Bearbeitungsdauer $t_{h,i}$	Leistungskennwert $P_{B,h,i}$
Schruppen 1	1	500 μm	120,0 s	1,14 kW
Schruppen 2	2	250 μm	75,0 s	1,37 kW
Schlichten	3	130 μm	97,5 s	1,27 kW
Reinigen	4	0 μm	10,0 s	1,08 kW
Polieren	5	20 μm	12,0 s	1,24 kW
Summe		900 μm	314,5 s	

Der Leistungskennwert der Maschine während der Nebennutzungszeit ist aus dem Planungsdatensatz bekannt und für die Bestimmung der Nebennutzungszeit ($t_n = 17$ Sekunden) wird eine Automatisierungsvariante für das Be- und Entladen zugrunde gelegt (ANHANG A). Die Grundleistung (P_G) ist ebenfalls ein maschinenspezifischer Kennwert, der aus den Planungsdatensätzen übernommen werden kann. Für die Berechnung der erweiterten prozessbezogenen Belegungszeit (t_{Be}) werden die Belegungszeitfaktoren ($f_B = 0,30$, $f_{Be} = 0,00$) verwendet, wie sie in Kapitel 6.3.1.1 hergeleitet wurden.

Basierend auf den Planungsdaten ergibt sich für die Fertigung des Musterteils ein werkstückbezogener Energiebedarf der Werkzeugmaschine von 0,069 kWh. Demgegenüber kann bei der Messung und Berechnung des Energieverbrauchs für die Fertigung des Musterteils ein Kennwert von 0,072 kWh pro Werkstück festgestellt werden. Damit weicht die Prognose des werkstückbezogenen Energiebedarfs um rund 4 % von dem gemessenen Energiebedarf ab. Die Berechnung des werkstückbezogenen Energiebedarfs der Werkzeugmaschine ist ANHANG F zu entnehmen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Der effiziente Einsatz von Energie stellt einen wichtigen Teil der Umweltverträglichkeit bei der Herstellung technischer Produkte dar. Große Potenziale für die Reduzierung des Energieverbrauchs finden sich dabei in der frühen Phase der Produktentstehung, in der der Prozessplaner Entscheidungen über die Auswahl und Kombination der einzusetzenden Fertigungsverfahren trifft. Die Planung und Gestaltung energieeffizienter Prozessketten während der Technischen Produktionsplanung kann daher einen wesentlichen Beitrag dazu leisten, die Energiemengenintensität für die Serienfertigung technischer Produkte langfristig und nachhaltig zu senken.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Methode erarbeitet, die den Fertigungsplaner unterstützt, den werkstückbezogenen Energiebedarf von Fertigungsprozessen und -prozessketten frühzeitig abzuschätzen. Im Wesentlichen basiert die Methode auf folgender Herangehensweise: In empirischen Untersuchungen ermittelte Kennwerte werden angewendet, um den Energiebedarf von Fertigungsprozessen zu prognostizieren. Eine unternehmensbezogene Energiedatenbank stellt die Datenbasis für die Planung des Energieverbrauchs dar. Die Nutzung von Energieäquivalenten für die Druckluftbereitstellung hat gezeigt, dass auch Daten aus anderen Quellen, wie Forschungsarbeiten und Feldstudien, genutzt werden können, um den Energiebedarf eines Prozesses zu bestimmen. Die in Kapitel 4.2 festgelegten fünf Teilziele wurden folgendermaßen erreicht:

Als Ausgangspunkt für die Planung des Energiebedarfs wurde eine technologieunabhängige Methode zur Analyse und kennwertbasierten Beschreibung des Energieverbrauchs von Fertigungsprozessen erarbeitet (*Teilziel 1*). Dabei wurden die Systemgrenzen für die Untersuchungen so gewählt, dass der Energieverbrauch aller Anlagen und Einrichtungen herangezogen wird, die für die Realisierung des Fertigungsprozesses benötigt werden. Diese umfassen neben den eingesetzten Werkzeugmaschinen auch periphere Anlagen zur Aufbereitung und Bereitstellung von Hilfs- und Prozessmedien, wie Druckluft und Kühlschmierstoffe, wodurch alle relevanten Energieverbräuche der Prozesse berücksichtigt werden. Die Beschreibung des Energieverbrauchs aller Anlagen erfolgte mithilfe von drei Betriebszuständen, für die Leistungskennwerte bestimmt wurden. Für periphere Anlagen wurden in gleicher Weise Kennwerte für den Volumenstrom der bereitgestellten Hilfs- und Prozessmedien erfasst, die mithilfe von Energieäquivalenten für die Bereitstellung der Medien ebenfalls in Leistungskennwerte umgerechnet wurden.

Am Beispiel des Elektrochemischen Abtragens (PECM) und des Honens wurde die erarbeitete Analysemethode exemplarisch auf zwei ausgewählte Fertigungsverfahren der Feinbearbeitung angewendet (*Teilziel 2*). Die Analyse des Verfahrensprinzips und des Standes der Technik ermöglichte es, festzulegen, welche Maschinen und Anlagen beim Ermitteln des Energieverbrauchs der Prozesse einbezogen werden müssen. Aus den Messungen wurden die Leistungskennwerte für die Maschinen und Anlagen der Prozesse abgeleitet und anschließend Datensätzen für die Energieplanung zusammengefasst.

Die Flexibilität der Methode macht es möglich, auch charakteristische Eigenschaften im Ablauf der Prozesse in Betracht zu ziehen. Beispielsweise ist beim PECM die Parallelbearbeitung mehrerer Werkstücke eine häufig vorkommende Prozessvariante. Die Anzahl der parallel bearbeiteten Werkstücke wird bei der Berechnung des werkstückbezogenen Energiebedarfs berücksichtigt, wodurch das Vorgehen auch auf andere Chargenprozesse, wie zum Beispiel zur Wärmebehandlung, angewendet werden kann. Weiterhin unterscheidet sich beim PECM die Leistungsaufnahme der Werkzeugmaschine während der Nebenzeit zum Be- und Entladen der Maschine signifikant von der Leistungsaufnahme während der Hauptzeit der Bearbeitung. Die Leistungskennwerte für die Beschreibung des Energiebedarfs werden folglich in Kennwerte für die Neben- und die Hauptzeit unterschieden. Im Vergleich dazu wird die Bearbeitung der Werkstücke beim Honen sequentiell an mehreren Bearbeitungsstationen in der Werkzeugmaschine ausgeführt. Die Neben- und Hauptzeit des Prozesses kann in diesem Fall im Leistungsprofil der Maschine nicht unterschieden werden. Die Kennwertbildung erfolgte daher bezogen auf die gesamte Bearbeitungszeit des Prozesses. Die Anwendungsbeispiele stellen die Anwendbarkeit der entwickelten Methode für unterschiedliche technologische Verfahrensprinzipien und organisatorische Abläufe unter Beweis. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Methode verallgemeinert werden kann und auf weitere Fertigungsverfahren anwendbar ist.

Im Hinblick auf die Planung und Gestaltung energieeffizienter Prozessketten wurde ein Konzept zur Integration der Energiebedarfsprognose in die Auswahl alternativer Fertigungsprozessketten in der Technischen Produktionsplanung erarbeitet (*Teilziel 3*). In diesem Zusammenhang wurde auch definiert, welche Informationen an der Schnittstelle zwischen beiden Abläufen ausgetauscht werden. Aus dem Planungsstand der Fertigungsprozessketten werden dabei folgende Informationen für die Energiebedarfsprognose bereitgestellt: die zu verwendenden Betriebsmittel, die Definition der auszuführenden Bearbeitungsaufgabe sowie die vorgesehenen Prozessparameter. Umgekehrt werden die ermittelten Energiebedarfskennwerte zurückgegeben und können bei der Bewertung und Auswahl der Fertigungsprozessketten berücksichtigt werden. Für die Energiebedarfsprognose wurde auf der Basis der empirisch ermittelten Daten ein generisches und technologieunabhängiges Konzept zur Gliederung der Energieplanungsdaten vorgestellt (*Teilziel 4*). Die im Prozess verwendeten Betriebsmittel, die auszuführende Bearbeitungsaufgabe und die gewählten Prozessparameter für die Bearbeitung dienen dafür als Gliederungskriterien.

Durch das Ermitteln von Energieverbrauchskennwerten für die zuvor untersuchten PECM- und Hon-Prozesse, konnte die Anwendbarkeit der Analysemethode dahingehend validiert werden, dass die ermittelten Kennwerte grundsätzlich für die Berechnung des werkstückbezogenen Energieverbrauchs der Prozesse geeignet sind. Abschließend wurde die Methode zur Abschätzung des Energiebedarfs validiert (*Teilziel 5*). Dabei erfolgte die technologiebezogene Konkretisierung der Gliederung der Energieplanungsdaten für den untersuchten PECM-Prozess. Als Anwendungsbeispiel wurde die elektrochemische Bearbeitung eines Musterbauteils und der damit

verbundene Energiebedarf der Werkzeugmaschine betrachtet. Die Abschätzung des werkstückbezogenen Energiebedarfs der Werkzeugmaschine ergab, dass der tatsächlich gemessene Energieverbrauch der Werkzeugmaschine um rund 4 % unterschätzt wurde. Damit konnte die Anwendbarkeit der Prognosemethode dargelegt werden. Die Genauigkeit der Prognose ist als sehr gut einzuschätzen. Das Ergebnis kann jedoch zunächst nicht verallgemeinert werden, da die Prognosegenauigkeit im Einzelfall davon abhängt, wie gut der Bestand von verfügbaren Energieplanungsdaten die zu planenden Prozesse abbildet.

Die fünf Teilziele dieser Arbeit konnten erreicht werden. Bezüglich des Arbeitsaufwands für die Anwendung der Methode sind das Auswerten der Leistungs- und Volumenstrommessungen und das Bestimmen der Kennwerte bisher als Schwerpunkte zu nennen. Grund hierfür ist, dass die Zuordnung der Messdaten zu einem Betriebszustand bisher manuell erfolgt ist. Die Implementierung des Vorgehens in der Praxis kann durch die Automatisierung dieser Abläufe unterstützt werden. Beispielsweise können Signale der Maschinensteuerung dazu genutzt werden, Informationen über den Betriebszustand einer Maschine mit den Leistungs- und Volumenstrommessungen zu verknüpfen. Auch eine regelbasierte Identifikation der Betriebszustände kann ein Ansatzpunkt sein, um den Anwender bei der Ermittlung der Energieplanungsdaten zu unterstützen.

Die Energiekosten der Fertigung werden heutzutage in der Kalkulation der Fertigungskosten häufig noch als Gemeinkostenzuschläge verrechnet. Die werkstückbezogene Abschätzung des Energiebedarfs im Rahmen der Prozesskettenplanung kann hier den Ausgangspunkt für eine differenziertere Kostenkalkulation bilden.

Das Ziel der in dieser Arbeit entwickelten Methode besteht darin, die Planung und Gestaltung energieeffizienter Fertigungsprozessketten in der Technischen Produktionsplanung zu ermöglichen. Dabei wird die konstruktive Gestaltung des zu fertigenden Bauteils als bereits festgelegt angenommen. Um weitere Effizienzpotenziale in der Produktentstehung zu erschließen, kann die Methode dahingehend weiterentwickelt werden, dass der Energiebedarf bereits für verschiedene konstruktive Gestaltungsvarianten eines Bauteils ermittelt wird. Da in der Konstruktionsphase die Informationen zu den einzusetzenden Betriebsmitteln, der Bearbeitungsaufgabe und den zu wählenden Prozessparametern noch unvollständig sind, wäre die in Kapitel 6.2 erarbeitete Gliederung der Energieplanungsdaten weiter zu verallgemeinern. Als Folge ist damit zu rechnen, dass die Vorhersagegenauigkeit und die Trennschärfe zwischen den betrachteten Alternativen nachteilig beeinflusst werden.

Der Fokus der Betrachtungen lag in dieser Arbeit auf dem Bedarf elektrischer Energie für den Betrieb von Fertigungsprozessen und -prozessketten. Die entwickelte Methode bietet die Grundlage, den Einsatz von Betriebsstoffen, Hilfs- und Prozessmedien ebenfalls abzuschätzen und in Richtung der Planung und Gestaltung ressourceneffizienter Prozessketten weiterzuentwickeln. Die Ermittlung von Medienverbrauchsdaten für den Elektrolyten beim PECM oder der Druckluft und des Kühlschmiermittels beim Honen sind Beispiele hierfür. Ähnliche Verbrauchsdaten können auch für den Einsatz von Werkzeugen und anderen Betriebsstoffen ermittelt

werden. Um dabei die Intensität des Einsatzes verschiedener Ressourcen beurteilen zu können, ist auch eine mehrstufige Betrachtung unter Einbeziehung von Vorprozessen bei Lieferanten vorstellbar.

LITERATURVERZEICHNS

- Abele, E., Kuhrke, B., Rothenbücher, S. (2010): Entwicklungstrends zur Erhöhung und Bewertung der Energieeffizienz spanender Werkzeugmaschinen. In: R. Neugebauer (Hg.): Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik. Auerbach, Verl. Wiss. Scripten, S. 99–120, 2010.
- Amalnik, M. S., El-Hofy, H. A., McGeough, J. A. (1998): An intelligent knowledge-based system for wire-electro-erosion dissolution in a concurrent engineering environment. In: *Journal of Materials Processing Technology* (79), S. 155–162, 1998.
- Amalnik, M., McGeough, J. (1996): Intelligent Concurrent Manufacturability Evaluation of Design for Electrochemical Machining. In: *Journal of Materials Processing Technology* (61), S. 130–139, 1996.
- Atlas Copco (2015): Handbuch der Drucklufttechnik. 7. Aufl. Hg. v. Atlas Copco Kompressoren und Drucklufttechnik GmbH, 2015. Online verfügbar unter http://www.gross-gmbh.eu/fileadmin/dokumente/pdf/Handbuch_der_Drucklufttechnik_7.pdf, zuletzt geprüft am 29.01.2015.
- Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (2004): Effiziente Druckluftsysteme, 2004. Online verfügbar unter http://www.lfu.bayern.de/energie/co2_minderung/doc/druckluftsysteme.pdf, zuletzt geprüft am 21.10.2014.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2015): Zahlen und Fakten. Energiedaten. Nationale und internationale Entwicklung, 2015. Online verfügbar unter <http://bmwi.de/BMWi/Redaktion/Binaer/energie-daten-gesamt,property=blob,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.xls>, zuletzt geprüft am 13.05.2015.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2012): Die Energiewende in Deutschland. Mit sicherer, bezahlbarer und umweltschonender Energie ins Jahr 2050, 2012. Online verfügbar unter <http://www.bmwi.de/Dateien/BMWi/PDF/energiewende-in-deutschland,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>, zuletzt geprüft am 15.05.2015.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2013): Energie in Deutschland. Trends und Hintergründe zur Energieversorgung. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 2013. Online verfügbar unter <http://www.bmwi.de/Dateien/Energieportal/PDF/energie-in-deutschland>, zuletzt geprüft am 15.05.2015.
- Christ-Elektronik (2013): CLT 313. Hg. v. Christ-Elektronik GmbH, 2013. Online verfügbar unter http://www.christ-elektronik.de/elements/products/files/15_E462790_DB_REV08_02-10-13_CLT313.1_deutsch.pdf, zuletzt geprüft am 28.01.2015.
- CO2PE! (2014): Cooperative Effort on Process Emissions in Manufacturing. Online verfügbar unter <http://www.co2pe.org/>, zuletzt geprüft am 15.05.2015.
- Czichos, H., Hennecke, M. (2008): Hütte. Das Ingenieurwissen. 33. Aufl. Berlin, Springer, 2008.
- Dahmus, J. B., Gutowski, T. G. (2004): An Environmental Analysis of Machining. In: ASME 2004 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Manufacturing Engineering and Materials Handling Engineering. Anaheim, Cali-

- fornia. International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York, American Society of Mechanical Engineers, S. 643–652, 2004.
- Dassault (2015): SolidWorks Sustainability. Dassault Systèmes SolidWorks Corp. Online verfügbar unter <http://www.solidworks.com/sustainability/products/frequently-asked-questions.htm#5>, zuletzt geprüft am 01.05.2015.
- DIN 1343 (1990): Referenzzustand, Normzustand, Normvolumen; Begriffe und Werte. Berlin, Beuth, 1990.
- DIN 8580 (2003): Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung. Berlin, Beuth, 2003.
- DIN 8589-14 (2003): Fertigungsverfahren Spanen. Teil 14: Honen. Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin, Beuth, 2003.
- DIN EN ISO 50001 (2011): Energiemanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung. Berlin, Beuth, 2011.
- Dietmair, A., Verl, A. (2009): Energy consumption forecasting and optimisation for tool machines. In: *MM Science Journal*, S. 62–67, 2009.
- Dietmair, A., Verl, A., Wosnik, M. (2008): Zustandsbasierte Energieverbrauchsprofile. Eine Methode zur effizienten Erfassung des Energieverbrauchs von Produktionsmaschinen. In: *wt Werkstattstechnik online* 98 (7/8), S. 640–645, 2008.
- DIN (1986): Fertigungsverfahren 2 - Trennen. 1. Aufl., Stand der abgedruckten Normen: 31 Dezember 1985. Berlin, Beuth (DIN-Taschenbuch), 1986.
- Dröder, K., Hoffmeister, H.-W., Große, T., Winter, M., Herrmann, C. (2013): Untersuchungen zum Einsatz alternativer Kühlschmierstoffe beim Honen. In: H.-W. Hoffmeister und B. Denkena (Hg.): *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. Verfahren und Maschinen*. 66. Aufl. Essen, Ruhr, Vulkan, 2013.
- Dufloy, J. R., Kellens, K., Devoldere, T. (2010): Energy related environmental impact reduction opportunities in machine design: case study of a laser cutting machine. In: *International Journal Sustainable Manufacturing* (2), S. 80–98, 2010.
- Eberspächer, P., Haag, H., Rahäuser, R., Schlechtendahl, J., Verl, A., Bauernhansl, T., Westkämper, E. (2012): Automated Provision and Exchange of Energy Information throughout the Production Process. In: D. A. Dornfeld und B. S. Linke (Hg.): *Leveraging Technology for a Sustainable World. Proceedings of the 19th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, University of California at Berkeley, Berkeley*. Heidelberg, Springer, S. 381–386, 2012.
- Eberspächer, P., Schraml, P., Schlechtendahl, J., Verl, A., Abele, E. (2014): A Model- and Signal-based Power Consumption Monitoring Concept for Energetic Optimization of Machine Tools. In: *Procedia CIRP* 15, S. 44–49, 2014.
- ecoinvent (2015): The ecoinvent Database. Online verfügbar unter <http://www.ecoinvent.org/database/database.html>, zuletzt geprüft am 01.05.2015.
- EMAG (2012): ECM / PECM Technologie. Polieren, Entgraten, 3D-Konturen. Hg. v. EMAG ECM GmbH, 2012. Online verfügbar unter <http://www.li-fung.biz/ecm-machine/image2/8/download/1.pdf>, zuletzt geprüft am 21.01.2015.
- Erb, M., Hubacher, P., Ehrbar, M. (2004): Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen FAWA 1996-2003. Schlussbericht. Hg. v. Bundesamt für Energie BFE, 2004. Online verfügbar unter http://www.pro-dx.de/download/FAWA_Auszug_deutsch.pdf, zuletzt geprüft am 16.09.2014.

- European Commission (2009): Reference Document on Best Available Technologies for Energy Efficiency, 2009. Online verfügbar unter http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/ENE_Adopted_02-2009.pdf, zuletzt geprüft am 18.05.2015.
- Eversheim, W. (1989): Organisation in der Produktionstechnik: Arbeitsvorbereitung. 2. Aufl. Düsseldorf, VDI (Band 3), 1989.
- Eversheim, W. (1996): Organisation in der Produktionstechnik: Grundlagen. 3. Aufl. Düsseldorf, VDI (Band 1), 1996.
- Eversheim, W.; Luczak, H. (Hg.) (1999): Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 2. Aufl. Berlin, Springer, 1999.
- Eversheim, W., Schuh, G. (2005): Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. 1. Aufl. Berlin, Springer (VDI), 2005.
- Fallböhrmer, M. (2000): Generieren alternativer Technologieketten in frühen Phasen der Produktentwicklung. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen, 2000.
- Festo (2013): Durchflusssensoren SFAB, 2013. Online verfügbar unter http://www.festo.com/cat/de_de/data/doc_de/PDF/DE/SFAB_DE.PDF, zuletzt geprüft am 29.01.2015.
- Flores, G. (1992): Grundlagen und Anwendungen des Honens. Essen, Vulkan, 1992.
- Fouquet, R., Pearson, P. J. (2012): Past and prospective energy transitions: Insights from history. In: *Energy policy* 50, S. 1–7, 2012.
- Fraunhofer ISI (2003): Druckluft effizient: Fakten zur Druckluft, 2003. Online verfügbar unter http://okolje.arso.gov.si/ippc/uploads/File/Fakten_zur_Druckluft_de.pdf, zuletzt geprüft am 18.05.2015.
- Fritz, A. H. (2012): Fertigungstechnik. 10. Aufl. Berlin, Springer Vieweg, 2012.
- GEA AWP (2013): GEA auf der China Refrigeration 2013. Hg. v. GEA AWP GmbH. Online verfügbar unter http://www.awpvalves.com/de-de/Neuigkeiten/Aktuell/Pages/CSGEAR_2013.03.21_ChinaRefrigeration2013.aspx, zuletzt geprüft am 27.01.2015.
- Gontarz, A., Hänni, F., Weiss, L., Wegener, K. (2012): Machine Tool Optimization Strategies: Evaluation of Actual Machine Tool Usage and Modes. In: G. Seliger (Hg.): Sustainable Manufacturing. Berlin, Heidelberg, Springer, S. 131–136, 2012.
- Gutowski, T., Dahmus, J., Thiriez, A. (2006): Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes. In: *13th CIRP International Conference on Lifecycle Engineering LCE*, S. 623–627, 2006.
- HBM: Data Acquisition System GEN5i. Hg. v. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. Online verfügbar unter http://www.disensors.com/downloads/products/Genesis%20GEN5i%20Portable%20High%20Speed%20DAQ_367.pdf, zuletzt geprüft am 29.01.2015.
- Heisel, U., Braun, S. (2013a): Prognose des prozessabhängigen Energieverbrauchs. Simulations- und Prognosemodell des prozessabhängigen Energieverbrauchs von Werkzeugmaschinen - Teil 1. In: *Werkstattstechnik online* 103 (1/2), S. 16–21, 2013.

- Heisel, U., Braun, S. (2013b): Prognose des prozessabhängigen Energieverbrauchs. Simulations- und Prognosemodell des prozessabhängigen Energieverbrauchs von Werkzeugmaschinen - Teil 2. In: *Werkstattstechnik online* 103 (1/2), S. 22–27, 2013.
- Hobut (2015): Clip Together Split-Core Current Transformers. Hg. v. Howard Butler (HOBUT) Ltd. Online verfügbar unter <http://www.hobut.co.uk/images/mini-transformer.jpg>, zuletzt geprüft am 29.01.2015.
- Hoffmeister, H.-W.; Denkena, B. (Hg.) (2013): Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. Verfahren und Maschinen. 66. Aufl. Essen, Ruhr, Vulkan, 2013.
- Holkup, T., Vyroubal, J., Smolik, J. (2013): Improving energy efficiency of machine tools. In: G. Seliger (Hg.): Innovative Solutions. Proceedings of the 11th Global Conference on Sustainable Manufacturing, S. 130–135, 2013.
- ifu Hamburg: LCA-DATA. Online verfügbar unter <http://www.umberto.de/en/lca-data/>, zuletzt geprüft am 01.05.2015.
- International Energy Agency (2013): Key World Energy Statistics 2013, 2013. Online verfügbar unter <http://www.qibebt.cas.cn/xscbw/yjbg/201312/P020131219323434673634.pdf>, zuletzt geprüft am 18.05.2014.
- ISO/DIS 14955-1 (2012): Machine tools - Environmental evaluation of machine tools - Part 1: Design methodology for energy-efficient machine tools, 2012.
- Kadia (2014): Produktabbildung U6 Hon-Maschine mit sechs Bearbeitungsstationen, 2014.
- Kara, S., Bogdanski, G., Li, W. (2011): Electricity Metering and Monitoring in Manufacturing Systems. In: J. Hesselbach und C. Herrmann (Hg.): Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing. Proceedings of the 18th Conference on Life Cycle Engineering. Heidelberg [u.a.], Springer, S. 1–10, 2011.
- Kellens, K., Dewulf, W., Lauwers, B., Kruth, J.-P., Duflou, J. (2013): Environmental Impact Reduction in Discrete Manufacturing: Examples for Non-Conventional Processes. In: *Procedia CIRP* 6, S. 27–34, 2013.
- Kellens, K., Dewulf, W., Overcash, M., Hauschild, M. Z., Duflou, J. R. (2012a): Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory (UPLCI) - CO2PE! Initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing) - Part 1: Methodology description. In: *Int J Life Cycle Assess* 17 (1), S. 69–78, 2012.
- Kellens, K., Dewulf, W., Overcash, M., Hauschild, M. Z., Duflou, J. R. (2012b): Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life cycle inventory (UPLCI) - CO2PE! initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing) - Part 2: case studies. In: *Int J Life Cycle Assess* 17 (2), S. 242–251, 2012.
- Kellens, K., Renaldi, R., Dewulf, W., Duflou, J. (2011): Preliminary Environmental Assessment of Electrical Discharge Machining. In: J. Hesselbach und C. Herrmann (Hg.): Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing. Proceedings of the 18th Conference on Life Cycle Engineering. Heidelberg [u.a.], Springer, S. 377–382, 2011.
- Kellens, K., Renaldi, R., Dewulf, W., Kruth, J.-P., Duflou, J. (2014): Environmental Impact Modeling of Selective Laser Sintering Processes. In: *Rapid Prototyping Journal* 20 (6), S. 459–470, 2014.

- Kiefer, J.: Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau. Universität des Saarlandes, Saarbrücken.
- Kienzle, O. (1952): Die Bestimmung von Kräften und Leistungen an spanenden Werkzeugen und Werkzeugmaschinen. In: *VDI-Z* (11/12), S. 299–305, 1952.
- Klocke, F., Fallböhmer, M., Kopner, A., Trommer, G. (2000): Methods and tools supporting modular process design. In: *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* (16), S. 411–423, 2000.
- Klocke, F., Fallböhmer, M., Trommer, G. (1998): Generierung und Bewertung von Prozeßketten. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF)* 93 (10), S. 461–464, 1998.
- Klocke, F., König, W. (2005): *Fertigungsverfahren. Schleifen, Honen, Läppen*. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York, Springer (1), 2005.
- Klocke, F., König, W. (2007): *Fertigungsverfahren. Abtragen, Generieren Lasermaterialbearbeitung*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg (3), 2007.
- König, W. A., Essel, K., Witte, L. (1982): *Specific cutting force data for metal-cutting*. Düsseldorf, Stahleisen, 1982.
- Kordonowy, D. (2002): *A Power Assessment of Maching Tools*. Bachelor of Science Thesis in Mechanical Engineering. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 2002.
- Kuhrke, B. (2011): *Methode zur Energie- und Medienbedarfsbewertung spanender Werkzeugmaschinen*. Dissertation. TU Darmstadt, Darmstadt, 2011.
- Kuhrke, B., Schrems, S., Eisele, C., Eberhard, A. (2010): Methodology to access the energy consumption of cutting machine tools. In: Hong-chao Zhang, Zhifeng Liu und Guangfu Liu (Hg.): *Proceedings of the 17th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*. Life Cycle Engineering. Hefei, 19.-21. Mai, 2010.
- Larek, R. (2012): *Ressourceneffiziente Auslegung von fertigungstechnischen Prozessketten durch Simulation und numerische Optimierung*. Aachen, Shaker, 2012.
- Larek, R., Brinksmeier, E., Pawletta, T., Hagendorf, O. (2013): Model-Based Planning of Resource Efficient Process Chains Using System Entity Structures. In: G. Schuh, R. Neugebauer und E. Uhlmann (Hg.): *Future Trends in Production Engineering*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, S. 361–371, 2013.
- Mertz, P. (2008): *Analyse des Aufwärmverhaltens und Stand-by Verbrauchs spanender Werkzeugmaschinen*. Studienarbeit. TU Berlin, Darmstadt. Institut für Produktionsmanagement, 2008.
- Müller, C. (2008): Leistungszahlen für Kälte-, Klima- und Wärmepumpensysteme. In: *friscaldo* (1), S. 31–33. Online verfügbar unter <http://www.reftec.ch/downloads/Leistungszahlen.pdf>, 2008.
- Müller, E., Engelmann, J., Löffler, T., Strauch, J. (2009): *Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben*. 1. Aufl. Berlin, Springer, 2009.
- Müller, E., Engelmann, J., Strauch, J. (2008): Energieeffizienz als Zielgröße in der Fabrikplanung. Energieeffizienzorientierte Planung von Produktionsanlagen am Beispiel der Automobilindustrie. In: *wt Werkstattstechnik online* 98 (7/8), S. 634–639, 2008.

- Neugebauer, R. (2008): Untersuchung zur Energieeffizienz in der Produktion. Hg. v. Fraunhofer, 2008.
- Nicolai, H., Schotten, M., Much, D. (1999): Aufgaben. In: W. Eversheim und H. Luczak (Hg.): Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 2. Aufl. Berlin, Springer, S. 29–74, 1999.
- openLCA (2015): LCA data. Online verfügbar unter <http://www.openlca.org/web/14826/15>, zuletzt geprüft am 01.05.2015.
- Paucksch, E. (1996): Zerspantechnik. Mit 36 Tabellen. 11. Aufl. Braunschweig, Wiesbaden, Vieweg, 1996.
- PEMTec (2014): PEM 800. Hg. v. PEMTec SNC. Online verfügbar unter <http://www.pemtec.de/index.php/maschinen/pem-max>, zuletzt geprüft am 02.02.2014.
- PEMTec (2015a): Abbildung Musterbauteil, 2015.
- PEMTec (2015b): PEM 600. Hg. v. PEMTec SNC. Online verfügbar unter <http://www.pemtec.de/images/maschinen/pem600.jpg>, zuletzt geprüft am 29.01.2015.
- Posch, W. (2011): Ganzheitliches Energiemanagement für Industriebetriebe. Wiesbaden, Gabler, 2011.
- Preger, K.-T., Paucksch, E. (1977): Zerspantechnik. 4. Aufl. Braunschweig, Vieweg, 1977.
- Rajurkar, K., Sundaram, M., Malshe, A. (2013): Review of Electrochemical and Electrodischarge Machining. In: *Proceedings of the Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM) 6*, S. 13–26, 2013.
- Rajurkar, K., Zhu, D., McGeough, J., Kozak, J., Silva, A. de (1999): New Developments in Electro-Chemical Machining. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 48 (2), S. 567–579, 1999.
- Redur Messwandler GmbH (2014): Stromwandler. Technische Informationen. Merzenich, 2014. Online verfügbar unter http://www.redur.de/img/pdf/ti_wandler.pdf, zuletzt geprüft am 23.01.2014.
- Reeber, R. (1980): Der Energiebedarf bei trennenden Fertigungsverfahren. In: *Werkstatt und Betrieb* 113 (2), S. 109–113, 1980.
- Regel, J. (2012): Ausgewählte abtragende Werkzeugmaschinen. In: R. Neugebauer (Hg.): Werkzeugmaschinen. Aufbau, Funktion und Anwendung von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen. Berlin, Heidelberg, Springer, S. 217–251, 2012.
- Regel, J., Müller, M. (2012): Ausgewählte spanende Werkzeugmaschinen. In: R. Neugebauer (Hg.): Werkzeugmaschinen. Aufbau, Funktion und Anwendung von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen. Berlin, Heidelberg, Springer, S. 69–216, 2012.
- Reif, K. (2012): Klassische Diesel-Einspritzsysteme. Reiheneinspritzpumpen, Verteilereinspritzpumpen, Düsen, Mechanische Und Elektronische Regler. Wiesbaden, Vieweg + Teubner, 2012.
- Risse, A. (2012): Fertigungsverfahren der Mechatronik, Feinwerk- und Präzisionsgerätetechnik. Wiesbaden, Springer Vieweg, 2012.

- RITAG (2015): FAQ/Anwendungsbeispiele. Hg. v. RITAG Ritterhuder Armaturen GmbH & Co. Online verfügbar unter <http://www.ritag.de/produkte/faq/default4.htm>, zuletzt geprüft am 08.02.2015.
- Ruppelt, E. (2003): Druckluft-Handbuch. 4. Aufl. Essen, Vulkan, 2003.
- Schiefer, E. (2000): Ökologische Bilanzierung von Bauteilen für die Entwicklung umweltgerechter Produkte am Beispiel spanender Fertigungsverfahren. Dissertation. TU Darmstadt, Darmstadt, 2000.
- Schlechtendahl, J., Eberspächer, P., Schrems, S., Sekler, P., Verl, A., Abele, E. (2013): Automated Approach to Exchange Energy Information. In: G. Schuh, R. Neugebauer und E. Uhlmann (Hg.): Future Trends in Production Engineering. Berlin, Heidelberg, Springer, S. 47–54, 2013.
- Schlechtendahl, J., Sommer, P., Eberspächer, P., Verl, A. (2012): Automated Linkage of Consumption Models and Control Information in Control Systems. In: D. A. Dornfeld und B. S. Linke (Hg.): Leveraging Technology for a Sustainable World. Proceedings of the 19th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, University of California at Berkeley, Berkeley. Heidelberg, Springer, S. 387–391, 2012.
- Schmitt, C., Bähre, D., Forsch, K., Klein, H. (2011): Feinstbearbeiten hochgenauer Bohrungen durch Honen. In: H.-W. Hoffmeister und B. Denkena (Hg.): Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. 65. Aufl. Essen, Ruhr, Vulkan, S. 259–271, 2011.
- Schmitt, C., Bähre, D., Moos, U., Forsch, K., Klein, H., Regler, R., Maier, R. (2013): Kraftregelung zur Erhöhung der Prozessstabilität und Genauigkeit beim Bohrungshonen. In: H.-W. Hoffmeister und B. Denkena (Hg.): Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. Verfahren und Maschinen. 66. Aufl. Essen, Ruhr, Vulkan, S. 333–341, 2013.
- Schuh, G., Stich, V., Schmidt, C. (2008): Produktionsplanung und -steuerung in Logistiknetzwerken. In: P. Nyhuis (Hg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin, Heidelberg, Springer, S. 249–273, 2008.
- Schulz, H., Atik, A., Schiefer, E. (1999): Product development must consider environmental aspects. In: E. Kuljanic (Hg.): Advanced manufacturing systems and technology, AMST '99. Proceedings of the fifth international conference. 406. Aufl. Vienna, New York, Springer, S. 39–52, 1999.
- Schulz, H., Schiefer, E. (1998): Prozeßführung und Energiebedarf bei spanenden Fertigungsverfahren. In: *ZfW Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 93 (6), S. 266–271, 1998.
- Seidel, M. (2005): Methodische Produktplanung. Grundlagen, Systematik und Anwendung im Produktentstehungsprozess. Karlsruhe, Univ.-Verl., 2005.
- SimaPro (2015): Datenbanken. GreenDelta GmbH. Online verfügbar unter <http://www.simapro.de/Datenbanken.263.0.html>, zuletzt geprüft am 01.05.2015.
- Spur, G. (1996): Die Genauigkeit von Maschinen. Eine Konstruktionslehre. München, Hanser, 1996.
- Spur, G. (1997): Das virtuelle Produkt. Management der CAD-Technik. München, Hanser, 1997.
- Spur, G.; Stöferle, T. (Hg.) (1994): Handbuch der Fertigungstechnik. Fabrikbetrieb. München, Hanser (6), 1994.

- Steuer, P., Rebschläger, A., Ernst, A., Bähre, D. (2015): Process design in Pulse Electrochemical Machining based on material specific data - 1.4301 and electrolytic copper as an example. In: *Key Engineering Materials* (651-653), S. 732–737, 2015.
- Stiegler, G. (1999): Produktionsplanung und Produktionssysteme im Fahrzeugbau. Wien, Manz, 1999.
- Stiens, H. (2000): Ermittlung des gesamtheitlichen Wirkungsgrades als Kennzahl zur rationellen Energienutzung in der Produktionstechnik. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen, 2000.
- Swat, M., Brünnet, H., Bähre, D. (2014): Selecting manufacturing process chains in the early stage of the product engineering process with focus on energy consumption. In: A. Silva, E. Henriques und P. Pecas (Hg.): *Technology and Manufacturing Process Selection: the Product Life Cycle Perspective*. London, Springer, S. 153–173, 2014.
- Swat, M., Rebschläger, A., Bähre, D. (2013a): Investigation of the energy consumption for the pulse electrochemical machining (PECM) process. In: A. Schubert und M. Hackert-Oschätzchen (Hg.): *International Symposium on ElectroChemical Machining Technology INSECT 2013*. Proceedings, November 12-13, 2013, Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology IWU Chemnitz. Chemnitz, 12.-13. November 2013. Chemnitz (7), S. 65–71, 2013.
- Swat, M., Stock, T., Bähre, D., Seliger, G. (2013b): Monitoring production systems for energy-aware planning and design of process chains. In: G. Seliger (Hg.): *Innovative Solutions*. Proceedings of the 11th Global Conference on Sustainable Manufacturing, S. 703–708, 2013.
- Thiede, S. (2011): *Energy Efficiency in Manufacturing Systems*. Berlin, Springer, 2011.
- Thiede, S., Seow, Y., Andersson, J., Johansson, B. (2013): Environmental aspects in manufacturing system modelling and simulation—State of the art and research perspectives. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 6 (1), S. 78–87, 2013.
- thinkstep AG (2015): GaBi Databases. Online verfügbar unter <http://www.gabi-software.com/deutsch/databases/gabi-databases/>, zuletzt geprüft am 01.05.2015.
- Todd, R. H., Allen, D. K., Alting, L. (1994): *Manufacturing processes reference guide*. 1. Aufl. New York, Industrial Press, 1994.
- Trommer, G. (2001): *Methodik zur konstruktionsbegleitenden Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen*. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen, 2001.
- Uhlmann, E., Doll, U., Förster, R., Schikowsky, R. (2001): High Precision Manufacturing using PEM. In: *Proceedings of the 13th International Symposium for Electromachining ISEM XIII*, Bd. 1. International Symposium for Electromachining ISEM. Bilbao, 09.-11. Mai 2001. 2 Bände (1), S. 261–268, 2001.
- VDI 3401 (2009): *Elektrochemisches Abtragen*. Berlin, Beuth, 2009.
- VDI 3423 (2002): *Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen*. Berlin, Beuth, 2002.
- VDI 4661 (2003): *Energiekenngrößen. Definitionen - Begriffe - Methodik*. Berlin, Beuth, 2003.

- Verl, A., Abele, E., Heisel, U., Dietmair, A., Eberspächer, P., Rahäuser, R. et al. (2011a): Modular Modeling of Energy Consumption for Monitoring and Control. In: J. Hesselbach und C. Herrmann (Hg.): Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing. Proceedings of the 18th Conference on Life Cycle Engineering. Heidelberg [u.a.], Springer, S. 341–346, 2011.
- Verl, A., Westkämper, E., Abele, E., Dietmair, A., Schlechtendahl, J., Friedrich, J. et al. (2011b): Architecture for Multilevel Monitoring and Control of Energy Consumption. In: J. Hesselbach und C. Herrmann (Hg.): Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing. Proceedings of the 18th Conference on Life Cycle Engineering. Heidelberg [u.a.], Springer, S. 347–352, 2011.
- Weinert, N. (2010): Vorgehensweise für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme. Dissertation. TU Berlin, Berlin, 2010.
- Weinert, N., Chiotellis, S., Seliger, G. (2009): Concept for Energy-Aware Production Planning Based on Energy Blocks. In: M. S. Shunmugam und N. R. Babu (Hg.): Proceedings of the 7th Global Conference on Sustainable Manufacturing. Madras, India, S. 75–80, 2009.
- Wewiór, J., Swat, M., Seliger, G., Bähre, D. (2012): Planning energy efficiency in manufacturing process chains - an innovative approach for an Industrial Product-Service System. In: Y. Shimomura und K. Kimita (Hg.): The Philosopher's Stone for Sustainability. Proceedings of the 4th CIRP International Conference on Industrial Product-Service Systems. Tokyo, Japan, November 8th-9th, Springer, S. 197–202, 2012.
- Weyand, L. (2009): Risikoreduzierte Endmontageplanung am Beispiel der Automobilindustrie. Dissertation. Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2009.
- Wiendahl, H.-P. (2010): Betriebsorganisation für Ingenieure. 7. Aufl. München, Hanser, 2010.
- Winje, D.; Witt, D. (Hg.) (1991): Energiewirtschaft. Berlin, Springer (2), 1991.
- Wöhe, G., Döring, U. (2010): Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 24. Aufl. München, Vahlen, 2010.
- Wolfram, F. (1986): Aspekte der energetischen Bewertung von Produkten und Prozessen der Abtrenntechnik nach dem Prinzip der vergegenständlichten Energie. Dissertation. Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt, Karl-Marx-Stadt, 1986.
- Zein, A. (2012): Transition Towards Energy Efficient Machine Tools. Berlin, Springer, 2012.
- Zenner, C. (2006): Durchgängiges Variantenmanagement in der Technischen Produktionsplanung. Dissertation. Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2006.
- Züst, S., Gontarz, A., Wegener, K. (2013): Energy equivalent of compressed air consumption in a machine tool environment. In: G. Seliger (Hg.): Innovative Solutions. Proceedings of the 11th Global Conference on Sustainable Manufacturing, S. 394–399, 2013.

ANHANG A Beispiel Automatisierungszeiten PECM

Die Tabelle zeigt beispielhaft mögliche Zeiten für das automatisierte Be- und Entladen eines PECM-Prozesses in der Serienfertigung. Je nach Applikation können diese Zeiten abweichen.

Ausgangssituation:

- Werkstücke befinden sich auf einem Werkstückträger oder auf einer Kassette
- Parallelbearbeitung möglich, in der Praxis ca. 8 bis 40 Teile
- Be- und Entladen erfolgt durch einen Roboter

Nr	Schritt	Dauer
1	Seitentüren öffnen	5 Sekunden
2	Gleichzeitig Z-Achse in Ladeposition	
3	Gleichzeitig Spannsystem öffnen	
4	Teile ausfahren	5 Sekunden
5	Gleichzeitig Teile einfahren	
6	Werkstückträger oder Kassette in Position	2 Sekunden
7	Spannen	
8	Z-Achse von Ladeposition in Startposition	5 Sekunden
Summe		17 Sekunden

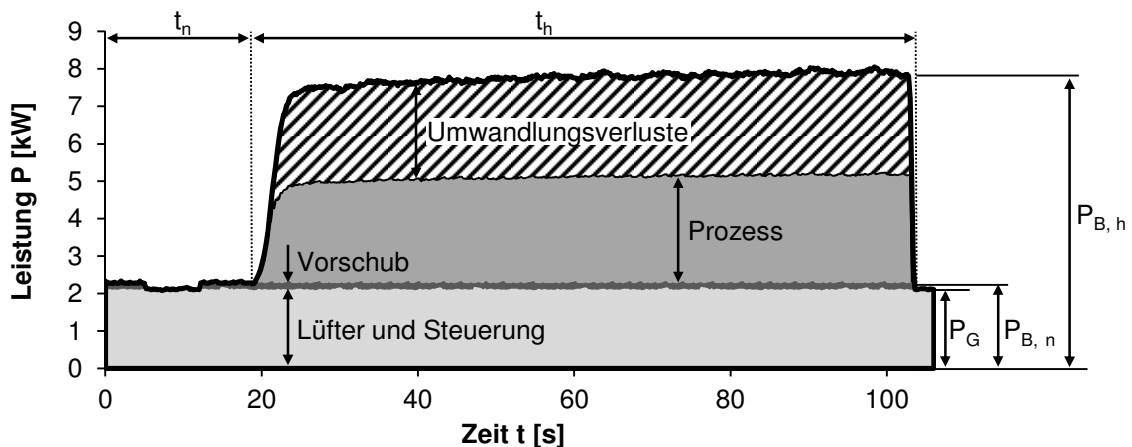


Abbildung A-1: Darstellung eines Leistungsprofils beim PECM

t_n = Nebenzeit der Bearbeitung (entspricht den Automatisierungszeiten)

t_h = Hauptzeit der Bearbeitung

P_{Grund} = Gemittelte Leistungsaufnahme im Grundzustand

$P_{\text{Bearbeitung, n}}$ = Gemittelte Leistungsaufnahme während der Nebenzeit

$P_{\text{Bearbeitung, h}}$ = Gemittelte Leistungsaufnahme während der Hauptzeit

ANHANG B Parametersätze der PECM-Versuche

Tabelle B-1: Kennwerte PEM 600, Planar, Parametersätze für das Schruppen, Schlichten, Reinigen und Polieren

	Parametersatz 1	Parametersatz 2	Parametersatz 3
Vorschub [mm/min]	0,080	0,113	0,160
Spaltspannung [V]	12	12	12
Pulsfrequenz [Hz]	50	50	50
Pulsdauer [ms]	2,5	2,5	2,5
Stromstärke [A]	1.500	1.870	2.630
Bearbeitete Oberfläche [mm ²]	2.557	2.557	2.557
Stromdichte [A/mm ²]	0,59	0,73	1,03

ANHANG C Werkstückbezogener Energieverbrauch PECM

	Einheit	Parametersatz 1	Parametersatz 2	Parametersatz 3
LEISTUNGSKENNWERTE				
WERKZEUGMASCHINE				
PEMCenter 8000				
P _{Grund}	[kW]	2,10		
P _{Bearbeitung, n}	[kW]	2,17		
P _{Bearbeitung, h}	[kW]	6,45	7,50	9,26
PEM 600				
P _{Grund}	[kW]	0,93		
P _{Bearbeitung, n}	[kW]	0,99		
P _{Bearbeitung, h}	[kW]	3,94	5,03	6,04
ELEKTROLYTVERSORGUNG				
Q _{Grund}	[l/min]	0,0		
Q _{Bearbeitung, n}	[l/min]	0,0		
Q _{Bearbeitung, h}	[l/min]	16,9	15,2	12,5
P _{Grund}	[kW]	0,63		
P _{Bearbeitung, n}	[kW]	0,63		
P _{Bearbeitung, h}	[kW]	3,57	3,30	2,86
ELEKTROLYTKÜHLUNG				
Q ^w _{Grund}	[kW]	0,00		
Q ^w _{Bearbeitung, n}	[kW]	0,00		
Q ^w _{Bearbeitung, h}	[kW]	1,13	1,40	1,97
P _{Grund}	[kW]	0,00		
P _{Bearbeitung, n}	[kW]	0,00		
P _{Bearbeitung, h}	[kW]	0,38	0,47	0,66
DRUCKLUFTVERSORGUNG				
VENTILE ELEKTROLYTANLAGE				
Q _{Grund}	[l/min]	0,15		
Q _{Bearbeitung, n}	[l/min]	0,15		
Q _{Bearbeitung, h}	[l/min]	0,63	0,59	0,52
P _{Grund}	[kW]	0,0015		
P _{Bearbeitung, n}	[kW]	0,0015		
P _{Bearbeitung, h}	[kW]	0,0062	0,0058	0,0051
SCHUTZTÜR				
Q _{Grund}	[l/min]	0,00		
Q _{Bearbeitung, n}	[l/min]	1,59	2,31	3,08
Q _{Bearbeitung, h}	[l/min]	1,59	2,31	3,08
P _{Grund}	[kW]	0,00		
P _{Bearbeitung, n}	[kW]	0,02	0,02	0,03
P _{Bearbeitung, h}	[kW]	0,02	0,02	0,03

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

ZEITKENNWERT				
ZEITFAKTOREN				
T _B - Belegungszeit (300 AT mit 3-Schicht-System)	[h/Jahr]	7200		
T _O - Ausfallzeit organisatorisch (geschätzt zu 30%)	[h/Jahr]	2160		
T _T - Ausfallzeit technisch	[h/Jahr]	0		
T _W - Ausfallzeit Wartung	[h/Jahr]	0		
f _B (= (T _O +T _T +T _W)/T _B)	[---]	0,30		
t _B [*] (=t _N [*] (1+f _B))	[s]	196,3	135,2	101,4
Zeit nicht geplant + nicht abgeschaltet (nur Sonntag)	[h]	0	0	0
Betrachtungszeitraum (eine Woche)	[h]	168	168	168
f _{BE} (= (nicht geplant + nicht abgeschaltet)/Betrachtungszeitraum)	[---]	0,00	0,00	0,00
t _{Be} [*] (=t _B [*] (1+f _{BE}))	[s]	196,3	135,2	101,4
PROZESSBEZOGENE ZEITPARAMETER				
t _n	[s]	17	17	17
t _h	[s]	134	87	61
t _N (=t _n + t _h)	[s]	151	104	78
t _{Be}	[s]	196,3	135,2	101,4
t _{Grund} (=t _{Be} -t _n)	[s]	45,3	31,2	23,4
Losgröße Prozess	[---]	1	1	1
ENERGIEBEDARF PRO TEIL - PEMCenter 8000				
Werkzeugmaschine (PEMCenter 8000)	[kWh]	0,2768	0,2097	0,1808
Elektrolytversorgung	[kWh]	0,1438	0,0882	0,0555
Elektrolytkühlung	[kWh]	0,0140	0,0113	0,0111
Druckluft - Ventile	[kWh]	0,0003	0,0002	0,0001
Druckluft - Schutztür	[kWh]	0,0007	0,0007	0,0007
SUMME	[kWh]	0,4355	0,3100	0,2482
ENERGIEBEDARF PRO TEIL - PEM 600				
Werkzeugmaschine (PEM600)	[kWh]	0,1630	0,1343	0,1131
Elektrolytversorgung	[kWh]	0,1438	0,0882	0,0555
Elektrolytkühlung	[kWh]	0,0140	0,0113	0,0111
Druckluft - Ventile	[kWh]	0,0003	0,0002	0,0001
Druckluft - Schutztür	[kWh]	0,0007	0,0007	0,0007
SUMME	[kWh]	0,3217	0,2346	0,1805

Abbildung C-1: Werkstückbezogener Energieverbrauch PECM

ANHANG D Werkstückbezogener Energieverbrauch Honen

	Einheit	Hon-Prozess 1 (Magnetkern)	Hon-Prozess 2 (Exzenterring)
LEISTUNGSKENNWERTE			
WERKZEUGMASCHINE			
P_{Grund}	[kW]	0,33	0,35
$P_{\text{Bearbeitung}}$	[kW]	1,26	1,53
KÜHLSCHMIERSTOFFVERSORGUNG			
Q_{Grund}	[l/min]	33,0	38,0
$Q_{\text{bearbeitung}}$	[l/min]	33,0	38,0
P_{Grund}	[kW]	2,30	2,64
$P_{\text{Bearbeitung}}$	[kW]	2,30	2,64
DRUCKLUFTVERSORGUNG			
Q_{Grund}	[l/min]	69,00	78,00
$Q_{\text{bearbeitung}}$	[l/min]	117,00	106,00
P_{Grund}	[kW]	0,68	0,76
$P_{\text{Bearbeitung}}$	[kW]	1,15	1,04
ZEITKENNWERTE			
ZEITFAKTOREN			
T_B - Belegungszeit	[h/Jahr]	5846	5486
T_O - Ausfallzeit organisatorisch	[h/Jahr]	1979	1606
T_T - Ausfallzeit technisch	[h/Jahr]	0	0
T_W - Ausfallzeit Wartung	[h/Jahr]	0	0
$f_B (= (T_O + T_T + T_W) / T_B)$	[---]	0,36	0,29
$t_B (= t_N^* (1 + f_B))$	[s]	16,7	20,6
Zeit nicht geplant + nicht abgeschaltet	[h]	24	24
Betrachtungszeitraum (eine Woche)	[h]	168	168
$f_{BE} (= (\text{nicht geplant} + \text{nicht abgeschaltet}) / \text{Betrachtungszeitraum})$	[---]	0,24	0,24
$t_{Be} (= t_B * (1 + f_{Be}))$	[s]	20,7	25,6
PROZESSBEZOGENE ZEITPARAMETER			
t_n	[s]	N/A	N/A
t_h	[s]	N/A	N/A
$t_N (= t_n + t_h)$	[s]	12,3	16,0
t_{Be}	[s]	20,7	25,6
$t_{\text{Grund}} (= t_{Be} - t_N)$	[s]	8,4	9,6
Losgröße Prozess	[---]	1,0	1,0
ENERGIEBEDARF PRO WERKSTÜCK			
Werkzeugmaschine	[kWh]	0,0051	0,0077
Kühlschmierstoffversorgung	[kWh]	0,0107	0,0152
Druckluftbereitstellung	[kWh]	0,0055	0,0066
SUMME	[kWh]	0,0213	0,0295

Abbildung D-1: Werkstückbezogener Energieverbrauch Honen

ANHANG E Planungsdatensätze Musterteil Ventilplatte

Tabelle E-1: Kennwerte PEM 600, Planar, Parametersätze für das Schruppen, Schlichten, Reinigen und Polieren

Bearbeitungsschritt	i	Pulsfrequenz [Hz]	Spannung [V]	Pulsbreite [ms]	Vorschub [mm/min]	Stromdichte [A/cm ²]	Leistungskennwert P _{B,h,i}
Schruppen 1	1	70	9,5	3,0	0,25	98	3,59
Schruppen 2	2	70	8,5	2,0	0,20	95	3,52
Schlichten	3	50	7,5	1,4	0,08	81	3,15
Reinigen	4	50	Bipolar 2,4	0,0	0,00	0	1,16
Polieren	5	25	12	0,8	0,10	131	4,42

ANHANG F Prognose des Energiebedarfs beim PECM

Tabelle F-1: Berechnung der Bearbeitungsdauer je Bearbeitungsschritt

Bearbeitungsschritt	i	Einsenktiefe	Vorschub	Bearbeitungsdauer $t_{h,i}$
Schruppen 1	1	500 μm	0,25 mm/min	120,0 s
Schruppen 2	2	250 μm	0,20 mm/min	75,0 s
Schlichten	3	130 μm	0,08 mm/min	97,5 s
Reinigen	4	0 μm	0,00 mm/min	10,0 s
Polieren	5	20 μm	0,10 mm/min	12,0 s

Tabelle F-2: Mittlere Bearbeitungsfläche in Abhängigkeit der Einsenktiefe der Elektrode (aus den CAD-Daten der Werkzeugelektrode) und Prognose der Leistungskennwerte (basierend auf der mittleren Bearbeitungsfläche und Stromdichte je Bearbeitungsschritt und dem Wirkungsgrad des Generators)

Bearbeitungsschritt	i	Einsenktiefe	Mittlere Bearbeitungsfläche	Leistungskennwert $P_{B,h,i}$
Schruppen 1	1	500 μm	20 mm^2	1,14 kWh
Schruppen 2	2	250 μm	185 mm^2	1,37 kWh
Schlichten	3	130 μm	329 mm^2	1,27 kWh
Reinigen	4	0 μm	329 mm^2	1,08 kWh
Polieren	5	20 μm	356 mm^2	1,24 kWh

Der Gesamtenergiebedarf wird nach Gleichung (41) als Summe des Energiebedarfs der Bearbeitungsschritte ($i = 1 \dots 5 = \text{Schruppen} \dots \text{Polieren}$) berechnet. Dabei werden die Leistungskennwerte der Maschine für den jeweiligen Bearbeitungsschritt ($P_{B,h,i}$) verwendet. In dem untersuchten Prozess werden zwei Werkstücke parallel bearbeitet. Bei der Berechnung des werkstückbezogenen Energiebedarfs ist dementsprechend die Anzahl der parallel bearbeiteten Werkstücke ($n = 2$) zu berücksichtigen.

$$E_{WZM} = \frac{1}{n} \left(\left(\sum_{i=1}^5 P_{B,h,i} \cdot t_{h,i} \right) + P_{B,n} \cdot t_n \right) + P_G \cdot \left((t_N \cdot (1 + f_{Be})) - t_N \right) \quad (41)$$

$$t_N = t_h + t_n = \sum_{i=1}^5 t_{h,i} + t_n = 312 \text{ s} + 17 \text{ s} = 329 \text{ s} \quad (42)$$

Tabelle F-3: Prognose des Energiebedarfs für t_h

Bearbeitungsschritt	i	Leistungs- kennwert $P_{B,h,i}$	Bearbeitungs- dauer $t_{h,i}$	Energiebedarf t_h
Schruppen 1	1	1,14 kWh	120,0 s	0,039 kWh
Schruppen 2	2	1,37 kWh	75,0 s	0,017 kWh
Schlichten	3	1,27 kWh	97,5 s	0,041 kWh
Reinigen	4	1,08 kWh	10,0 s	0,003 kWh
Polieren	5	1,24 kWh	12,0 s	0,006 kWh
Summe			312,0 s	0,106 kWh

$$E_{WZM} = \frac{1}{2} \left((0,106 \text{ kWh} + 0,99 \text{ kW} \cdot 17 \text{ s}) + 0,93 \text{ kW} \cdot ((329 \text{ s} \cdot (1 + 0,3)) - 329 \text{ s}) \right) \quad (43)$$

$$E_{WZM} = \frac{1}{2} \left((0,106 \text{ kWh} + 0,005 \text{ kWh}) + 0,025 \text{ kWh} \right) = 0,068 \text{ kWh} \quad (44)$$