

Lehrstuhl für
Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
der Technischen Universität München

**Energieflexible, spanende Werkzeugmaschinen –
Analyse, Befähigung und Erfolgsaussichten**

Richard Sung-Hyon Popp

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh
2. Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Die Dissertation wurde am 12.02.2020 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 29.07.2020 angenommen.

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt den Institutsleitern Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh und Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart für ihre großzügige Unterstützung und Förderung sowie das mir entgegengebrachte Vertrauen. Zudem bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh für die wohlwollende und konstruktive Betreuung meiner Arbeit sowie bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp, dem Leiter des Lehrstuhls für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, möchte ich mich für die Übernahme des Koreferats sehr herzlich bedanken.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt und begleitet haben. Besonders hervorheben möchte ich Dr.-Ing. Benny Drescher, Dr.-Ing. Corinna Liebl, M. Sc. Valerie Scharmer und Dr.-Ing. Peter Simon für die fachlichen Diskussionen und die kritische Durchsicht meiner Arbeit. Außerdem gilt den zahlreichen ehemaligen Studierenden mein besonderer Dank, die mich im Rahmen ihrer Studienarbeiten bei der Ausarbeitung meiner Dissertation tatkräftig und mit wertvollen Beiträgen unterstützt haben.

Vor allem möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken. Meine Eltern haben meinen bisherigen Lebensweg stets unterstützt und maßgeblich zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen. Der größte Dank gilt meiner Frau Andrea, die mich stets motiviert hat, diese anspruchsvolle Aufgabe erfolgreich zu bewältigen.

Augsburg, im September 2020

Richard Popp

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Formelzeichen	V
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation im Kontext der Energiewirtschaft	1
1.2 Energiemanagement in Unternehmen	3
2 Grundlagen	5
2.1 Kapitelüberblick	5
2.2 Grundlagen spanender Werkzeugmaschinen	5
2.2.1 Anforderungen	5
2.2.2 Elektrische Energieaufnahme	6
2.3 Elektrische Energieversorgung industrieller Endkunden	8
2.3.1 Energiebedarf von Industrieunternehmen	8
2.3.2 Rahmenbedingungen der Energieversorgung	9
2.3.3 Technische und rechtliche Aspekte der Eigenversorgung aus erneuerbaren Energiequellen	13
2.4 Zusammenfassung	18
3 Stand der Wissenschaft und Technik	19
3.1 Kapitelüberblick	19
3.2 Abgrenzung der Energieeffizienz von der -flexibilität	19
3.3 Energieflexibilität in der Produktion	19
3.4 Potenzialabschätzung und Bewertung der Energieflexibilität	21
3.4.1 Strategische Potenzialabschätzung	22
3.4.2 Bewertungsansätze	23
3.5 Energieflexibilität in der operativen Planung	26
3.6 Umsetzung und Steuerung der kurzfristigen Energieflexibilität	29
3.7 Zusammenfassung und Handlungsbedarf	33
4 Zielsetzung und Vorgehensweise	35
4.1 Ziel der Arbeit	35
4.2 Vorgehensweise	36

5	Anforderungen an den energieflexiblen Betrieb	39
5.1	Kapitelüberblick	39
5.2	Spannungsfeld der Zielgrößen	39
5.3	Gegenüberstellung der Zielsysteme	42
5.3.1	Dimensionen der Energieflexibilität	43
5.3.2	Identifikation der Wechselwirkungen	44
5.3.3	Ableitung der speziellen Anforderungen	47
5.4	Zusammenfassung	48
6	Methodik zur Identifikation und Bewertung der Energieflexibilität	49
6.1	Kapitelüberblick	49
6.2	Voruntersuchung zur Energieflexibilität spanender Werkzeugmaschinen	50
6.3	Energieflexibilitätsstrategie für spanende Werkzeugmaschinen	52
6.3.1	Energieflexibler Betrieb auf Komponentenebene . . .	52
6.3.2	Gegenüberstellung mit Alternativstrategien für spanende Werkzeugmaschinen	54
6.3.3	Betrachtung der Anforderungserfüllung	56
6.4	Methode zur Identifikation geeigneter Maschinenkomponenten	58
6.4.1	Eingrenzung des Suchraums	58
6.4.2	Definition der Bewertungsparameter	62
6.4.3	Ableitung der Energie-Prozess-Unabhängigkeit	66
6.5	Methode zur Quantifizierung des Energieflexibilitätspotenzials	67
6.5.1	Modellvorstellung	68
6.5.2	Kennzahlensystem zur Quantifizierung des Energieflexibilitätspotenzials	71
6.6	Zusammenfassung	74
7	Anwendung und Übertragung auf Alternativstrategien	75
7.1	Kapitelüberblick	75
7.2	Anwendung der Methodik	75
7.2.1	Maschinenauswahl und Szenarienbeschreibung	75
7.2.2	Eingrenzung des Suchraums an geeigneten Subsystemen	76
7.2.3	Ermittlung der Energie-Prozess-Unabhängigkeit . . .	78
7.2.4	Quantifizierung des Energieflexibilitätspotenzials . . .	81
7.3	Validierung des Quantifizierungsmodells	85
7.3.1	Umbaumaßnahmen an den Subsystemen	85
7.3.2	Versuchsdurchführung und Auswertung	89
7.4	Bewertung alternativer Energieflexibilitätsstrategien	95
7.4.1	Auswahl der Alternativstrategien und Beschreibung der beispielhaften Fertigungsinsel	96
7.4.2	Übertragung des Quantifizierungsmodells	101

7.4.3	Ergebnisdarstellung	102
7.5	Zusammenfassung	107
8	Fallstudie mit wirtschaftlicher Betrachtung	109
8.1	Kapitelüberblick	109
8.2	Ableitung einer geeigneten Zielerwendung	109
8.2.1	Bewertung möglicher Zielerwendungen	109
8.2.2	Detaillierung der Zielerwendung	110
8.3	Durchführung der Fallstudie	115
8.3.1	Erfassung der Datenbasis	115
8.3.2	Erweiterung der Fertigungsinsel	119
8.3.3	Erläuterung des Simulationsmodells	119
8.4	Ergebnisse der Fallstudie	121
8.4.1	Technische Betrachtung	121
8.4.2	Monetäre Betrachtung	124
8.4.3	Wirtschaftliche Würdigung	125
8.5	Zusammenfassung und Fazit	126
9	Zusammenfassung und Ausblick	127
9.1	Zusammenfassung	127
9.2	Ausblick	129
	Literaturverzeichnis	131
A	Anhang	147

Verzeichnis der Formelzeichen

Kleine und große lateinische Buchstaben

Größe	Bezeichnung
A_n	Versorgungspfad n der partiellen Eigenversorgung (aktuelle Situation)
E_F	flexible Energie
$E_{F_{0,5}}$	flexible Energie zur halben Laufzeit des aktuellen Betriebszustands
g_i	spezifischer Gleichzeitigkeitsfaktor
i	Index des betrachteten Subsystems
\bar{P}_A	mittlere Leistungsaufnahme im aktiven Betriebszustand
P_B	mittlere Leistungsaufnahme während der Bearbeitung
\bar{P}_{curr}	mittlere Leistungsaufnahme des darauffolgenden Betriebszustands
P_Δ	Leistungsdifferenz
P_i	Nennleistung des Subsystems i
P_{max}	Maximalleistung der Maschine
\bar{P}_P	mittlere Leistungsaufnahme im passiven Betriebszustand
\bar{P}_{targ}	mittlere Leistungsaufnahme des aktuellen Betriebszustands
Δt	Verschiebezeitraum durch Maßnahmeneinsatz
\bar{t}_A	Periodenverweildauer des aktiven Betriebszustands (Aktivzeit)

Verzeichnis der Formelzeichen

Größe	Bezeichnung
t_B	Bearbeitungszeit
t_{curr}	Periodenverweildauer des aktuellen Betriebszustands
t_{cycle}	Zykluszeit
t_D	energetische Nutzungszeit
$t_{D_{0,5}}$	energetische Nutzungszeit zur halben Laufzeit des aktuellen Betriebszustands
t_E	Werkstückwechselzeit
\bar{t}_P	Periodenverweildauer des passiven Betriebszustands (Passivzeit)
t_{resp}	maximale Reaktionszeit
t_{targ}	Periodenverweildauer des darauffolgenden Betriebszustands
t^*	Laufzeit des aktuellen Betriebszustands zum Zeitpunkt des Maßnahmenstarts
\bar{x}	Mittelwert der Aktiv- bzw. Passivzeiten
Z_n	Versorgungspfad n der partiellen Eigenversorgung (Zukunftsszenario)

Kleine und große griechische Buchstaben

Größe	Bezeichnung
$\sigma\%$	Standardabweichung in Prozent der Aktiv- bzw. Passivzeiten
τ	Zustandsanteil

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
Abs	Absatz
AGFW	Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BAZ	Bearbeitungszentrum
BayStMWi	Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
ct	Cent
DR	demand response
E	Maschinenzustand <i>Werkstück wechseln</i>
E.n	Klassifizierung des externen Determinismus in Stufe n
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EF	Energieflexibilität(s)-
EFK	Energieflexible Komponente
EFM	Energieflexibilitätsmanagement
EFS	Energieflexibilitätsstrategie

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
EII	Energy Independency Indicator
EPU	Energie-Prozess-Unabhängigkeit
HD	Hochdruck
I.n	Klassifizierung des internen Betriebskonzepts in Stufe n
ISO	Internationale Organisation für Normung
IW	Institut der deutschen Wirtschaft
KKL	Kühlmittelkreislauf
KSS	Kühlschmierstoff
KW	Kalenderwoche
ME(S)	manufacturing execution (system)
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde(n)
NC	numerical control
ND	Niederdruck
Nr.	Nummer
P	Maschinenzustand <i>Produzieren</i>
PV	Photovoltaik
RL	Regelleistung
S	Maschinenzustand <i>Stand-by</i>
sp. Anf.	spezielle Anforderung
VDW	Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V.
WE	Wochenende
WSK / WZK	Werkstück- bzw. Werkzeugklemmung

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation im Kontext der Energiewirtschaft

Zum Ende des 20. Jahrhunderts hatte sich in der Bundesrepublik Deutschland ein stabiles System der Energiewirtschaft etabliert. Die energiepolitischen Ziele einer *wirtschaftlichen, umweltverträglichen und sicheren Energieversorgung* (BUNDESREGIERUNG 2010) konnten durch eine stetige technologische Entwicklung nahezu flächendeckend gewährleistet werden. Zudem unterstützte der Ausbau der Verbundnetze eine fortlaufende Zielerreichung im europäischen Kontext.

Den frühen, anfangs noch verhaltenen Stimmen zur drohenden Ressourcenverknappung und den damit bevorstehenden *Grenzen des Wachstums* wurde zur Jahrtausendwende eine zunehmende Aufmerksamkeit zuteil. Der stetige Anstieg der Energiepreise für Endkunden aufgrund wachsender Erschließungs- und Förderkosten von Energierohstoffen war für jedermann ersichtlich, die Erschöpfung der fossilen Ressourcen in Jahrzehnten vorhersehbar (SYNWOLDT 2016) und daher eine Stagnation der Preise unwahrscheinlich. Neben den gesellschaftlichen Bedenken war auch die wirtschaftliche Abhängigkeit von importierten Rohstoffen ein zentraler politischer Aspekt (MÜLLER 2009).

Dem bis dahin noch evolutionären Wandel des bestehenden Energiesystems hin zu einem effizienten Energieeinsatz auf Verbraucherseite und einer systemkonformen Integration von erneuerbaren Energien wurde ein neuer Stellenwert zuteil – insbesondere aufgrund der dramatischen Ereignisse in Fukushima im Jahre 2011. Die *Energiewende* der Bundesrepublik Deutschland läutete einen Paradigmenwechsel ein, um mit den bestehenden, vor allem aber den zukünftigen Rahmenbedingungen der Energiewirtschaft die energiepolitischen Ziele – nunmehr um den Aspekt der *gesellschaftlichen Akzeptanz* erweitert – zu erfüllen (A.T. KEARNEY 2011, ACATECH 2016). In einem revolutionären Prozess strebt die Bundesregierung eine *grundlegende Umstrukturierung des Energiesystems* an und hat mit zahlreichen Werkzeugen (u. a. 6. Energieforschungsprogramm und Ausweitung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes, EEG) umfangreiche Rahmenbedingungen geschaffen, um eine Abkehr vom altbewährten System zu forcieren.

1 Einleitung

Um der anhaltenden Verknappung fossiler Ressourcen vorzubeugen, muss der weltweite Bedarf weitestgehend durch *regenerative Energiequellen* gedeckt werden, die durch einen stetigen Energiefluss der Sonne praktisch nicht versiegen können. Die Bundesrepublik Deutschland hat sich daher für die Stromversorgung ein Ausbauziel von 80 % an regenerativen Energiequellen bis zum Jahr 2050 gesetzt (§1 Abs.2 Nr.2 EEG) – bei der gleichzeitigen Reduzierung konventioneller, vor allem der nuklearen Kraftwerke. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz soll den dezentralen Ausbau durch die gezielte wirtschaftliche Förderung und die *Einspeisepriorität für erneuerbare Energien*¹ beschleunigen.

Die rein mengenorientierte Bezuschussung des Stroms aus erneuerbaren Energiequellen berücksichtigt nicht die aktuelle Nachfragesituation. Durch die neuen Rahmenbedingungen des raschen Zubaus und der zunehmenden *Volatilität* des Angebots an elektrischer Energie wird die dringende Notwendigkeit deutlich, hier eine entsprechende Abhilfe zu schaffen. Durch umfangreiche Förderprogramme zur parallelen und übergreifenden Erforschung neuer Technologien in den Bereichen der *Netzstrukturen*, der *Systemintegration*², der *Speicherung* und der *Industrieprozesse* soll der Erfolg der Energiewende sichergestellt werden (BMBF 2016).

Die Innovationen sollen dem bisherigen System der Energiewirtschaft mithilfe eines revolutionären Prozesses zu einem dynamischen und dezentralen Charakter mit ausgeprägten Markteffekten verhelfen. Einzelne Unternehmen, die bislang reine Endkunden elektrischer Energie gewesen sind, können in einem modernen System durch neue Arten von *Systemdienstleistungen* an der Stabilität der Energieversorgung mitwirken, indem sie z. B. *flexible Lasten* in Zeiten hoher Energieverfügbarkeit anbieten und hierfür entlohnt werden. Aktuell stehen der flächendeckenden Teilnahme hohe Eintrittsbarrieren gegenüber. Der Zugang zu relevanten Energiemärkten ist bislang energieintensiven Betrieben vorbehalten, sodass im Jahr 2017 in der Bundesrepublik Deutschland weniger als 100 Teilnehmer registriert gewesen sind (REGELLEISTUNG.NET 2017).

Die Entwicklung seitens der Energiewirtschaft hat in den vergangenen Jahren deutliche Schritte in Richtung eines modernen Energiesystems vollzogen. Dennoch bestehen zahlreiche Hürden, vor allem im Bereich von massentauglichen Konzepten, die einen Zugang auch für Unternehmen mit verhältnismäßig kleinem Energiebedarf ermöglichen.

¹ Gesetzliche Verpflichtung der Netzbetreiber zur vorrangigen Abnahme und Vergütung des gesamten angebotenen elektrischen Stroms aus regenerativen Quellen.

² Betrachtung der Energiewende als gesamtgesellschaftlichen Veränderungsprozess mit größtmöglicher Akzeptanz sämtlicher Teilnehmer.

1.2 Energiemanagement in Unternehmen

Ein bisher niedriger Stellenwert der Energiethematik auf der Verbraucherseite ist dem geringen Anteil der Energiekosten in zahlreichen Unternehmen zuzuschreiben. So sind diese beim verarbeitenden Gewerbe bei ca. 5,3% der Gesamtkosten (BRÜGGEMANN 2005) anzusetzen, sodass sie in der Regel den Gemeinkosten zugeordnet wurden (MÜLLER 2009). Eine steigende Relevanz ist aber, auch aufgrund der im vorangegangenen Abschnitt genannten Effekte, mit hoher Sicherheit vorherzusagen. Zusätzlich wird die Relevanz durch neue gesetzliche Rahmenbedingungen verstärkt. So rücken Energiemanagementsysteme (z. B. nach ISO 50001) weiter in den Fokus, welche die Grundlage sind, eine weitestgehende Befreiung von der Stromsteuer zu erhalten, sofern entsprechende Bedingungen erfüllt sind (§ 64 Abs. 1 Nr. 3 EEG, BMU 2012). Ferner sind seit Anfang 2015 unabhängige Energieaudits für Großunternehmen vorgeschrieben, welche die Kenntnis von mindestens 90% der Energieflüsse mit ihrer Zuordnung zu einzelnen Verbrauchern fordern (BAFA 2016).

Diese sogenannte *Transparenz* stellt auch einen wichtigen Ausgangspunkt für betriebliche Entscheidungen dar und gilt damit als Grundlage für sämtliche Energiebetrachtungen innerhalb von Unternehmen. Wie in Abbildung 1.1 gezeigt, können entsprechende energiebezogene Maßnahmen in verschiedene Themenbereiche unterteilt werden: *Energieeffizienz*, *Energieflexibilität* und auch weitere Bereiche, wie z. B. die *elektromagnetische Verträglichkeit*, die erst durch eine ausreichende Transparenz adäquat adressiert werden können.

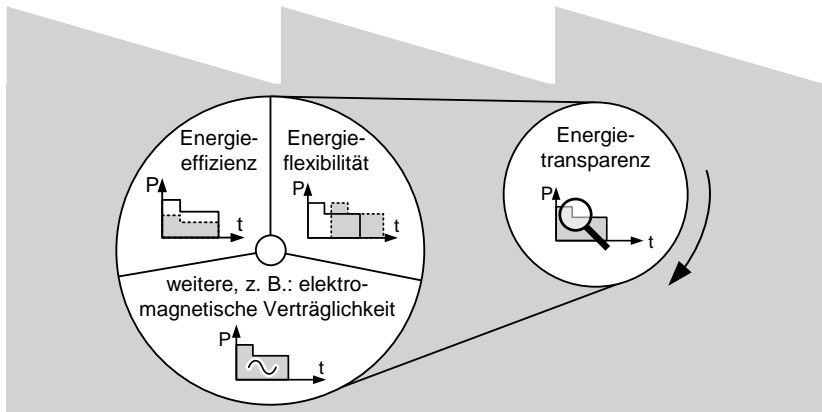


Abbildung 1.1: Energietransparenz als Treiber der Energiethemenbereiche in der Produktionstechnik

Während der Themenbereich der *Energieeffizienz* bereits viele Jahre Gegenstand der Forschung und Entwicklung ist und dazu bereits zahlreiche erfolgreiche Maßnahmen in die Praxis umgesetzt wurden (siehe FRAUNHOFER IWU 2008, HESSELBACH ET AL. 2009, MÜLLER 2009 u. v. m.), ist die *Energieflexibilität* erst kürzlich in den Fokus gerückt (z. B. REINHART & GRASSL 2013, POPP ET AL. 2013, SCHULTZ ET AL. 2015b). Weiterführende Ansätze wurden dabei verstärkt an energieintensiven Prozessen untersucht (z. B. GRASSL 2015), kleinere bis mittelgroße Verbraucher hingegen, wie die spanenden Werkzeugmaschinen, waren aufgrund fehlender Zielmärkte für deren Energieflexibilität kaum thematisiert. Die hohe Verbreitung der Werkzeugmaschinen quer über zahlreiche industrielle Branchen hinweg (VDW 2018) ist ein deutliches Indiz für die Relevanz, welche der *energieflexible Betrieb spanender Werkzeugmaschinen* in sich trägt. Die hohen Anforderungen an Produktivität und Produktqualität, die für diese Maschine gelten, bilden dabei einen Kern der Herausforderungen, welche sich im Zuge der Befähigung zur Energieflexibilität stellen.

Das wissenschaftliche Ziel der vorliegenden Dissertation ist es, zu klären, wie und in welchem Umfang spanende Werkzeugmaschinen durch eine energieflexible Betriebsweise an der Energiewende partizipieren können. Dabei stellt sich die Frage, in welcher Form sich wirtschaftliche Vorteile für den Betreiber zeigen. Den Kern der Untersuchungen bilden dabei kurzfristige Maßnahmen, welche in der Regel nach der Auftragsfreigabe durchgeführt werden können. Für die detaillierte Analyse wird ein *Bottom-up-Vorgehen* gewählt, das, ausgehend von der Identifikation der Maschinenpotenziale, in den technischen und wirtschaftlichen Erfolgsaussichten mündet.

2 Grundlagen

2.1 Kapitelüberblick

In diesem Kapitel werden die notwendigen Grundlagen zum energetischen Verhalten der spanenden Werkzeugmaschinen und relevante Aspekte der elektrischen Energieversorgung von industriellen Endkunden dargelegt.

2.2 Grundlagen spanender Werkzeugmaschinen

2.2.1 Anforderungen

Spanende Werkzeugmaschinen zeichnen sich durch eine hohe erreichbare Fertigungsgenauigkeit bei einer großen erzielbaren Formvielfalt aus. Im Kontext eines wirtschaftlich produzierenden Unternehmens sind Anforderungen an diese zu stellen, die sich zuweilen auch konkurrierend gegenüberstehen. Laut MILBERG (1995) sind dies:

- eine **hohe Arbeitsgenauigkeit** zur Herstellung qualitativ hochwertiger Produkte,
- eine **hohe Mengenleistung** zum Erreichen geringer Fertigungszeiten,
- eine **große Flexibilität**, d. h. Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Fertigungsaufgaben,
- bei **niedrigen Fertigungskosten** der Erzeugnisse und darüber hinaus
- die **gute Integrationsfähigkeit**.

Sämtliche Schritte, die im Zuge einer Erweiterung der Fähigkeiten von spanenden Werkzeugmaschinen ergriffen werden, dürfen nicht mit den genannten Anforderungen in Konkurrenz stehen, da dadurch deren praktische Umsetzung gefährdet wird. Der Erforschung neuer Technologien muss demzufolge stets eine genaue Abwägung der angestrebten Anforderungen vorhergehen.

Im Falle der allgemeinen *Verbesserung des energetischen Verhaltens* werden

2 Grundlagen

primär die Anforderungen der *niedrigen Fertigungskosten* und der *guten Integrationsfähigkeit* adressiert. Zum einen sind der Energieeinsatz und die damit verbundenen Energiekosten zu fokussieren, die nach Möglichkeit minimiert werden sollen. Zum anderen ist die Verbesserung der *elektromagnetischen Verträglichkeit* ein wichtiger Ansatzpunkt, um im Zusammenspiel einer Fabrik negative Auswirkungen auf weitere elektrische und elektronische Elemente zu verhindern. Die *Energieflexibilität* kommt als neue, dritte Säule hinzu und adressiert beide Anforderungen. So wird sowohl eine Reduktion der energiebezogenen Kosten als auch ein aktiver Beitrag zur Verbesserung der innerbetrieblichen Energieversorgung erwartet.

2.2.2 Elektrische Energieaufnahme

Der Gesamtleistungsbedarf einer spanenden Werkzeugmaschine ist durch die Summe der Einzelbedarfe aller Funktionsmodule¹ gegeben (siehe Abbildung 2.1). Diese wandeln die aufgenommene elektrische Energie in andere Energieformen um (mechanisch, hydraulisch, pneumatisch und thermisch).

Hauptantrieb	Vorschubantriebe	Hilfsantriebe	elektrisches Hilfssystem
<ul style="list-style-type: none"> • Spindelantrieb 	<ul style="list-style-type: none"> • translatorische Vorschubachsen • rotatorische Vorschubachsen 	<ul style="list-style-type: none"> • Hydraulik • Maschinenkühlung • Kühlschmierstoffversorgung • Absaugung • Späneförderer • Werkzeugmagazin • etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Maschinensteuerung • 24-V- / 230-V-Versorgung • etc.

Abbildung 2.1: Energiebedarfsrelevante Funktionsmodule spanender Werkzeugmaschinen

Die Funktionsmodule weisen über den Zeitverlauf verschiedene Lastprofile in Abhängigkeit ihres Betriebsverhaltens und des zugrunde liegenden Maschinenzustands auf. ABELE ET AL. (2012) haben drei verschiedene Arten der Leistungsaufnahme definiert (siehe Abbildung 2.2):

- **Konstant:** Die Leistungsaufnahme ist abhängig vom Betriebszustand der Maschine, nicht aber von der Zeit.

¹Weitere Informationen zu den Funktionsmodulen als solchen kann der Grundlagenliteratur (z. B. MILBERG 1995, WECK 2006 und HIRSCH 2012) entnommen werden.

- **Zyklisch:** Das Funktionsmodul wird (vollständig oder teilweise) periodisch ein- und ausgeschaltet.
- **Variabel:** Die Leistungsaufnahme ist direkt abhängig von veränderlichen Betriebszuständen und der Zeit.

Die Ermittlung der jeweiligen Einzelbedarfe der Funktionsmodule und des Zeitverlaufs kann z. B. durch die direkte Messung erfolgen (*Absolut-Messmethode*, siehe z. B. KARA ET AL. 2011, LI ET AL. 2011, KORDONOWY 2002). Dabei wird ein geeignetes Messgerät an den zugehörigen elektrischen Zuleitungen angelegt und eine gezielte Variation der Betriebsparameter durchgeführt, um ein aussagekräftiges Ergebnis über die Leistungsbedarfe zu erhalten.

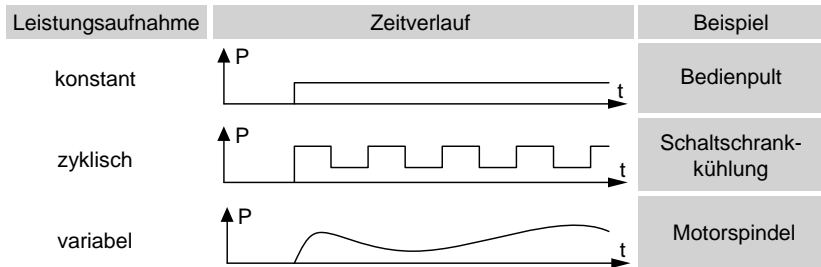


Abbildung 2.2: Arten der Leistungsaufnahme von Funktionsmodulen von Werkzeugmaschinen, in Anlehnung an ABELE ET AL. (2012)

Zur Reduzierung des Messaufwands kann Zusatzwissen genutzt und die Messung allein am Hauptanschluss durchgeführt werden. Sind die jeweiligen Leistungsaufnahmen einzelner Funktionsmodule im Vorfeld bekannt, so können den Verbrauchern charakteristische Leistungssprünge zugeordnet werden (HART 1992). Durch die gezielte Erfassung der Schaltzustände einzelner Module ist dies auch ohne Vorwissen möglich (*Relativ-Messmethode*, z. B. ZÄH & NIEHUES 2009, DIETMAIR ET AL. 2008, ZEIN 2012 und LIEBL ET AL. 2016). Kombinationen aus beiden genannten Ansätzen sind ebenfalls zielführend und erhöhen die Datenqualität (z. B. GEBBE ET AL. 2014 und PANTEN ET AL. 2016).

Neben der Erfassung und der verursachergerechten Zuordnung von Energiedaten ist eine geeignete Darstellung der Messdaten ein weiterer zentraler Punkt. Geläufige Darstellungsvarianten sind der *Lastgang* und die Anteile am Gesamtenergiebedarf (siehe Abbildung 2.3). Während für technische Analysen (z. B. für Energieeffizienzmaßnahmen, Zustandsüberwachung) ein höher aufgelöster Lastgang benötigt wird, sind für die betriebswirtschaftlichen Anwendungsfälle (z. B. für das Controlling und die Fabrikplanung) in der Regel kumulierte (und

2 Grundlagen

damit weniger detaillierte) Werte ausreichend. MÜLLER (2009) empfiehlt, durch die gezielte Auswahl von Messgerät und -strategie eine Messung nach dem Prinzip *so genau wie nötig* durchzuführen, um den Aufwand gering zu halten.

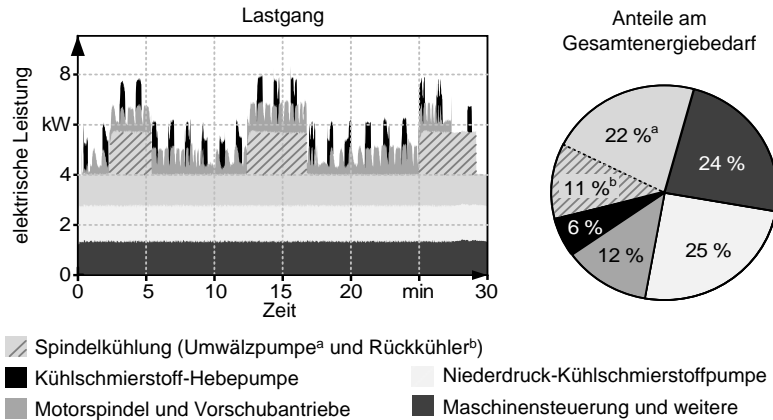


Abbildung 2.3: Lastgang (links) und Anteile am Gesamtenergiebedarf nach Funktionsmodulen (rechts, jeweils eigene Messungen)

2.3 Elektrische Energieversorgung industrieller Endkunden

2.3.1 Energiebedarf von Industrieunternehmen

Für industrielle Endkunden mit einem Jahresverbrauch von über 100 MWh ist eine Erfassung des Lastgangs in 15-Minuten-Schritten vorgeschrieben (sog. *registrierende Leistungsmessung*). Auf dieser Grundlage werden die anteiligen Bereitstellungskosten für die netzseitigen Transportkapazitäten berechnet, die als *Netzentgelte* in die Energiekosten eingehen. Ein typischer Lastgang aus einer registrierenden Leistungsmessung ist in Abbildung 2.4 (links) über zwei exemplarische Wochen (entspricht 336 Stunden) gezeigt. Ferner ist die zugehörige *Dauerlinie* (Abbildung 2.4, rechts) dargestellt.

Die Dauerlinie ermöglicht die Erkennung von Lastspitzen, die für höhere Netzentgelte ursächlich sind. Im Falle deutlicher Lastspitzen fällt die Dauerlinie stark ab. Treten lediglich geringfügige Lastspitzen im Betrachtungszeitraum auf, so hat sie einen nahezu konstanten Verlauf. Des Weiteren können durch

2.3 Elektrische Energieversorgung industrieller Endkunden

die Gegenüberstellung zweier Dauerlinien z. B. der Effekt von Effizienzmaßnahmen oder auch die Auswirkungen möglicher Maßnahmen zur Steigerung und Nutzung der Energieflexibilität auf den Fabriklastgang bewertet werden.

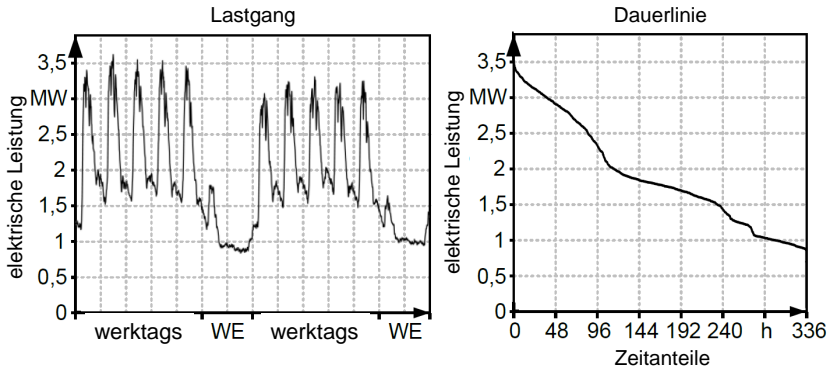


Abbildung 2.4: Lastgang und Dauerlinie eines exemplarischen Industrieetriebs über den Zeitraum von zwei Wochen (eigene Messung)

2.3.2 Rahmenbedingungen der Energieversorgung

Für den Endkunden (auch *Letztverbraucher* genannt) besteht der Bezugspreis für den elektrischen Strom aus zahlreichen Bestandteilen. Dominiert wird der letztliche Bezugspreis durch die administrativen Anteile (siehe Tabelle 2.1). Darunter fallen beispielsweise:

- **Netzentgelte:** Die Netzentgelte werden zur Refinanzierung der Kosten für Betrieb, Unterhalt und Ausbau der Versorgungsnetze erhoben.
- **EEG-Umlage:** Den größten Bestandteil des Bezugspreises stellt die Umlage nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) dar, welche den Ausbau der erneuerbaren Energien fördern soll (siehe Abschnitt 2.3.3).
- **Stromsteuer:** Die Höhe der Stromsteuer ist gesetzlich auf den Betrag von 2,05 ct/kWh festgeschrieben. Unter bestimmten Voraussetzungen können weitreichende Entlastungen erzielt werden.

Während der Preisbestandteil *Beschaffung und Vertrieb* vom jeweiligen Energieversorger festgesetzt wird, sind alle weiteren Anteile durch die Gesetzgebung vorgegeben. Es bestehen zahlreiche Entlastungsregelungen, die unter Umständen sehr weitreichend sein können (siehe BERTSCH ET AL. 2017). Die Vielzahl an Ausnahmen schafft gerade für kleinere Unternehmen ein sehr großes und

2 Grundlagen

undurchsichtiges Maß an Regularien. Um die Wirtschaftlichkeit von energieflexiblen Betriebsstrategien sicherzustellen, ist die Kenntnis der aktuellen Preisbildung und der Ermäßigungsmöglichkeiten unumgänglich.

Tabelle 2.1: Preisbestandteile (Referenzjahr 2015) bei einer jährlichen Abnahmemenge von etwa 24 GWh, nach BUNDESNETZAGENTUR (2017a)

Preisbestandteile² in ct/kWh	Preis- intervall	arithmetischer Mittelwert
Netzentgelt	1,32–2,81	2,03
Messung, Abrechnung und Messstellenbetrieb	0,00–0,02	0,03
Konzessionsabgabe ³	0,11	0,11
EEG-Umlage	6,35	6,35
weitere Umlagen	0,15	0,15
Stromsteuer	2,05	2,05
Beschaffung und Vertrieb	2,46–4,51	3,48
Gesamtpreis	12,91–15,69	14,21

Verbraucherseitige Lastanpassung – Demand Response

Diejenigen Maßnahmen seitens der Endkunden, die zu einem Ausgleich von Stromangebot und -nachfrage beitragen, werden unter dem englischen Begriff des *Demand Response (DR)* zusammengefasst. VON ROON & GOBMAIER (2011, S. 2) definieren diese in Anlehnung an das DEPARTMENT OF ENERGY (2006) wie folgt:

„Demand Response ist eine kurzfristige und planbare Veränderung der Verbraucherlast als Reaktion auf Preissignale im Markt oder auf eine Aktivierung im Rahmen einer vertraglichen Leistungsreserve. Diese Marktpreise oder Leistungsabrufe werden durch ungeplante, unregelmäßige oder extreme energiewirtschaftliche Ereignisse ausgelöst.“

²ohne Vergünstigungen und Umsatzsteuer; Differenzen in der Gesamtsumme aufgrund Rundung

³Entgelte der Gemeinden für die Nutzung öffentlicher Verkehrswege zur unmittelbaren Versorgung von Letztverbrauchern mit Strom und Gas (§ 1 Nr. 2 AbLaV).

2.3 Elektrische Energieversorgung industrieller Endkunden

Aus der Definition wird ersichtlich, dass von einer Lastanpassung ein wirtschaftlicher Nutzen für die Verbraucher ausgehen muss, damit diese gewillt sind, Eingriffe in ihre Prozesse vorzunehmen. Nach VON ROON & GOBMAIER (2010) werden auf Basis des DEPARTMENT OF ENERGY (2006) die möglichen DR-Instrumente in Abhängigkeit ihres grundsätzlichen Konzepts in zwei Gruppen unterteilt:

- **Preisbasiert:** Der Strompreis ist von der Zeit abhängig und im Vorhinein bekannt. Ein typisches Beispiel in Deutschland ist hierfür der *Hoch- und Niedrigtarif* (umgangssprachlich: *Nachtstrom*), der über den Tagesverlauf zwei verschiedene Arbeitspreise gewährt⁴. Hinzu kommen verschiedene Instrumente des *Spotmarkets*⁵, die sich auf kürzere Ankündigungszeiten beziehen (Vortag bzw. 30 Minuten vor der Lieferung). Ist die Preisdifferenz zwischen den Zeitperioden signifikant, so können die jeweiligen Endkunden ihren Verbrauch energiekostenoptimiert gestalten.
- **Anreizbasiert:** Weitere Instrumente stehen durch zusätzliche Vereinbarungen zwischen Endkunden und Netzbetreibern zur Verfügung. Die gezielte Änderung der abgenommenen Leistung wird dabei als *Netzdienstleistung* seitens der Endkunden angesehen. Es wird sowohl die reine Vorhaltung als auch der Abruf der Laständerung vergütet. Für die Nichterfüllung der Anforderungen werden Konventionalstrafen fällig. Typische Instrumente sind die *Regelleistung*, die *abschaltbaren Lasten* und die *direkte Lastkontrolle*.

Im Folgenden werden die genannten Instrumente in knapper Form vorgestellt und anhand ihrer Vorlaufzeit geordnet (Abbildung 2.5):

Unter der *Regelleistung* wird der Ausgleich zum Zeitpunkt der physikalischen Stromlieferung zur Aufrechterhaltung der Netzstabilität verstanden (BERTSCH ET AL. 2017). Durch die strengen Zugangsbarrieren ist der Markt auf wenige *präqualifizierte* Teilnehmer begrenzt. Es wird zwischen drei Arten der Regelleistung unterschieden (siehe Tabelle 2.2).

Als *abschaltbare Last* werden Verbraucher bezeichnet, die ihre Leistung auf Anforderung der Netzbetreiber reduzieren können (§ 2 AbLaV⁶). Dieses Verfahren ist äußerst reglementiert und bietet nur wenigen großen Sondervertragskunden die Möglichkeit der Teilnahme (VON ROON & GOBMAIER 2011). Zusätzlich

⁴vergleichbar mit dem US-amerikanischen *Time-of-use-Tarif*

⁵Kurzfristiger Markt zum Handel von Energiemengen für denselben oder darauffolgenden Tag; Instrumente sind das *real time pricing* und das *critical peak pricing*.

⁶Verordnung über Vereinbarungen zu abschaltbaren Lasten

2 Grundlagen

ist das Instrument zeitlich befristet⁷ und somit aufgrund fehlender Planungssicherheit für die Industrieunternehmen in der Regel keine relevante Option.

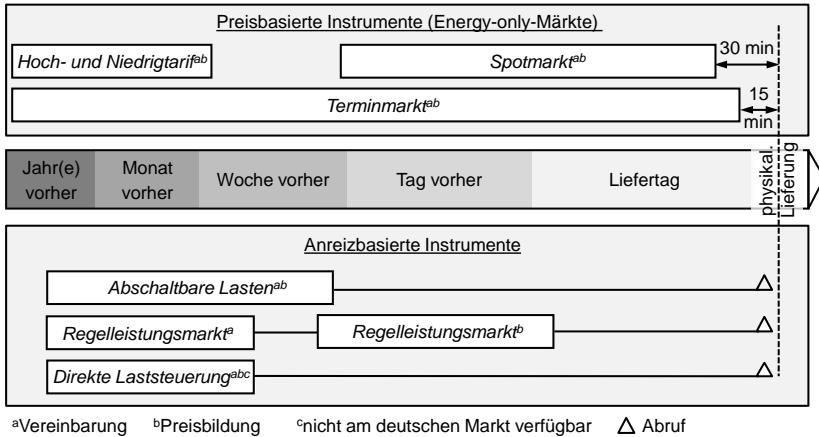


Abbildung 2.5: Demand-Response-Instrumente, in Anlehnung an DEPARTMENT OF ENERGY (2006) und BERTSCH ET AL. (2017)

Tabelle 2.2: Arten der Regelleistung (RL), nach BERTSCH ET AL. 2017

	Primär-RL	Sekundär-RL	Minutenreserve
Aktivierungszeit (maximal)	30 s	5 min	15 min
Dauer des Leistungsabrufs	15 min	30 s bis 15 min	15 min bis mehrere h
Mindestleistung	1 MW	5 MW	5 MW
Präqualifizierte Anbieter ⁸	23	37	52

Es ist festzuhalten, dass verschiedene Marktinstrumente für kurzfristige Reaktionen der Industrie auf Veränderungen der Energieverfügbarkeit vorhanden sind. Sie bieten allerdings aufgrund der hohen Einstiegsbarrieren lediglich

⁷bis 01.07.2022, siehe § 20 AbLaV

⁸in Deutschland, Stand 05.05.2017, Werte nach REGELLEISTUNG.NET (2017)

wenigen Unternehmen die Möglichkeit, aktiv und wirtschaftlich daran teilzunehmen.

2.3.3 Technische und rechtliche Aspekte der Eigenversorgung aus erneuerbaren Energiequellen

Zahlreiche Unternehmen haben bereits den Weg eingeschlagen, Anteile ihres Energiebedarfs durch die Eigenversorgung zu decken. Mit dem technischen Fortschritt wurden die Erzeugungsanlagen zunehmend rentabel, was auch auf umfangreiche Förderprogramme der deutschen Bundesregierung zurückzuführen ist. Die folgenden Abschnitte führen in die erneuerbaren Energiequellen, die Eigenversorgung und die diesbezüglichen rechtlichen Rahmenbedingungen ein.

Erneuerbare Energiequellen und die Auswirkungen auf das Energiesystem

Die *erneuerbare* oder *regenerative* Energie wird für Deutschland auf folgende nutzbare Arten begrenzt, die sinngemäß der Definition nach § 3 Nr. 21 EEG entsprechen:

- solare Strahlung
- Windenergie
- Wasserkraft
- photosynthetisch fixierte Energie (Biomasse)
- Erdwärme

Die Relevanz der erneuerbaren Energien für die Stromerzeugung in Deutschland ist in den vergangenen Jahren deutlich gewachsen. Während im Jahre 2007 14,3 % des Strombedarfs aus erneuerbaren Quellen gedeckt wurden, ist der Anteil bis zum Jahre 2017 auf 36 % angestiegen (BMWi 2018a). Dabei bilden die Windenergie und die Photovoltaik die wichtigsten Säulen der Energiewende (AGORA ENERGIEWENDE 2012, ACATECH 2015).

Der Zuwachs an installierter Kapazität nach Energieart der vergangenen Jahre hängt in erheblichem Ausmaß mit der Entwicklung der (*Strom-*)*Gestehungskosten* zusammen. Diese werden als „die Summe der Kosten [definiert], die für die Erzeugung von elektrischem Strom anfallen. Sie umfassen kapitalgebundene, betriebsgebundene, verbrauchsgebundene (u. a. Brennstoffkosten) und sonstige Kosten“ (BAYSTMWi 2014, S. 60 f.). Die Prognose der Gestehungskosten bis

2 Grundlagen

zum Jahr 2030 (Abbildung 2.6) verdeutlicht, dass die Kosten für Photovoltaik und Windenergie auf See über die nächsten Jahre fallen werden, während die Kosten für Biomasse und Windenergie an Land auf einem annähernd konstantem Wert bleiben werden.

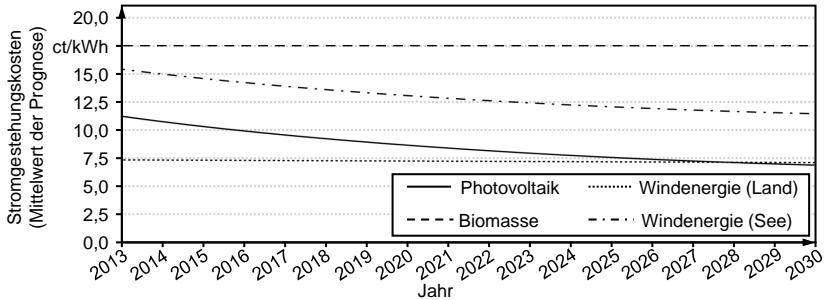


Abbildung 2.6: Prognose der Stromgestehungskosten erneuerbarer Energien, in Anlehnung an FRAUNHOFER ISE (2013)

Insbesondere der starke Ausbau im Bereich der Photovoltaik und der Windenergie stellt aufgrund der Volatilität dieser Primärenergieformen eine große Schwierigkeit für die Energieversorgung dar, da „die Stromerzeugung [...] witterungsbedingt sowie jahres- und tageszeitlich bedingt [starken] Schwankungen unterworfen ist“ (BAYSTMWI 2014, S. 65). In der Abbildung 2.7 wird diese Abhängigkeit sichtbar: Während die ersten dargestellten Tage sehr windarm waren, bestand an den weiteren Tagen ein deutlicher Anteil an bereitgestellter Leistung aus Windkraftanlagen.

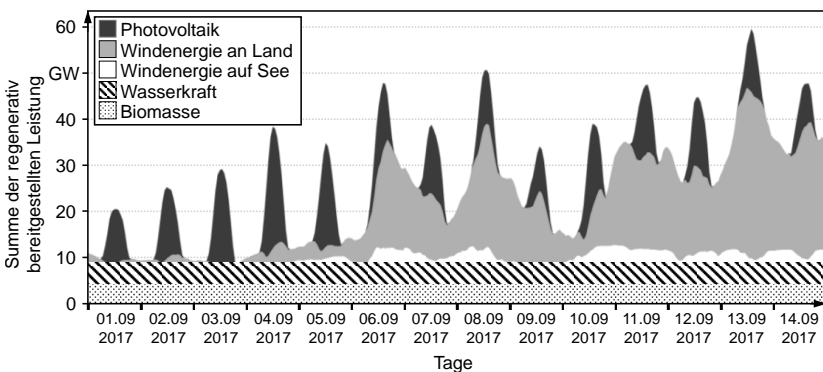


Abbildung 2.7: Gesamtsumme, Anteile und Volatilität der erneuerbaren Energiequellen, Datenquelle: AGORA ENERGIEWENDE (2017)

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)

Im Jahre 2000 wurde das *Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien* (kurz: Erneuerbare-Energien-Gesetz, EEG) mit dem Ziel verabschiedet, eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung mit regenerativen Energien zu ermöglichen (§ 1 Abs. 1 EEG). Die Kernaspekte zur Erreichung dieses Ziels sind der *Einspeisevorrang* (auch als *Einspeisepriorität* bezeichnet) und die feste Vergütung für Strom aus erneuerbaren Energiequellen:

- **Einspeisevorrang:** „Netzbetreiber müssen [...] den gesamten Strom aus erneuerbaren Energien [...] unverzüglich vorrangig physikalisch abnehmen, übertragen und verteilen“ (§ 11 Abs. 1 S. 1 EEG).
- **Vergütung:** Die Betreiber der Erzeugungsanlagen haben einen Anspruch auf eine *Einspeisevergütung*⁹ (§ 19 Abs. 1 Nr. 2 EEG). Die Höhe der Vergütung wird seit der Novelle des EEG im Jahre 2016 durch ein Ausschreibungsverfahren geregelt.

Während die mittleren Vergütungssätze z. B. für die *Windenergie auf See* weiterhin ansteigen werden, nahmen die der *Windenergie an Land* und der *Photovoltaik* seit Jahren ab (siehe Tabelle 2.3). Die Lerneffekte, die hohe Technologiereife und die damit verbundenen geringeren Technologiekosten sind ausschlaggebende Faktoren für die bisherige Entwicklung der Fördersätze. Dies ist ein Erfolg, der sich eindeutig der Förderung durch das EEG zuschreiben lässt (RAGWITZ ET AL. 2014, ÖKO-INSTITUT 2015).

Tabelle 2.3: Durchschnittliche Vergütung für den Strom aus Bestandsanlagen (Auszug)

Technologie	Jahr						
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Windenergie (Land)	10,2	9,9	9,8	9,7	9,4	9,2	9,0
Windenergie (See)	16,6	17,1	17,4	18,4	18,7	18,6	19,0
Photovoltaik	35,2	32,0	30,7	30,1	30,3	28,3	27,5

(Vergütung in ct/kWh, Datenquelle BMWi 2018b)

Die entstehenden Kosten für die Förderung der erneuerbaren Energien werden von den Letztverbrauchern durch die *EEG-Umlage* gegenfinanziert. Diese

⁹Auf weitere Vergütungsmodelle wird hier mangels Relevanz nicht eingegangen.

wurde in den Jahren 2011 bis 2017 stetig von 3,49 ct/kWh auf 6,88 ct/kWh angehoben, zuletzt aber leicht auf 6,79 ct/kWh gesenkt (BUNDESNETZAGENTUR 2017b).

Eigenversorgung mit elektrischer Energie

Der folgende Gedankenansatz klingt vielversprechend: Mit den günstigen Gestehungskosten für eigenerzeugten Strom können Unternehmen ihre Energiekosten senken und die überschüssige Energie zusätzlich gewinnbringend veräußern. Das Risiko aus der Volatilität der eingesetzten Energiequellen wird dem Netzbetreiber übertragen. Diesem entstehen dadurch höhere Kosten, die über die EEG-Umlage und somit durch die Allgemeinheit getragen werden. Das Unternehmen selbst, das keinen oder kaum Strom aus dem Netz bezieht, muss folglich auch keine EEG-Umlage zahlen und kann sich als Gewinner der Situation sehen.

Damit derartige Konstellationen nicht zum Nachteil der Allgemeinheit ausgenutzt werden, sieht das EEG strenge Leitlinien vor: So ist für „jede Kilowattstunde Strom, die an Letztverbraucher geliefert beziehungsweise von ihnen letztverbraucht wird, die volle EEG-Umlage zu zahlen“ (BUNDESNETZAGENTUR 2016, S. 9). Die aufgezeigte Form der Eigenversorgung wird somit umlagepflichtig. Die Sonderregelungen, die eine Befreiung zulassen, sind explizit im Gesetz genannt. In der folgenden Aufzählung wird eine Auswahl kurz vorgestellt:

- Der **Inselbetrieb**, welcher die komplett autarke Art der Eigenversorgung darstellt, benötigt keinen Netzanschluss und fällt daher nicht unter die Umlagepflicht (§ 61a Nr. 2 EEG).
- Wird der Netzanschluss verwendet, um ausschließlich **Überschussstrommengen ohne Gegenleistung** in das Netz einzuspeisen, wird keine Umlage fällig (§ 61a Nr. 3 EEG).
- **Kleinanlagen** bis zu einer installierten Leistung von 10 kW und einem Eigenverbrauch von höchstens 10 MWh pro Jahr sind im Allgemeinen von der Umlagepflicht befreit (§ 61a Nr. 4 EEG).
- Eine Reduzierung der Umlagepflicht auf 40 % ist möglich, sofern der **Strom aus erneuerbaren Energien** erzeugt wird. (§ 61b S. 1 EEG i. V. m. § 3 Nr. 1 EEG).

Inwiefern eine Eigenversorgung ungeachtet genereller EEG-Umlagepflicht gewinnbringend für produzierende Betriebe umgesetzt werden kann, bedarf weiterer Untersuchungen im Zuge der vorliegenden Dissertation.

Würdigung

Während sich durch die EEG-Umlage für Betreiber kleiner Erzeugungsanlagen ein gewinnträchtiges Geschäftsmodell etabliert hat, sind die nachteiligen Effekte nicht zu übersehen. Die marktverzerrende Wirkung der EEG-Umlage hat dazu geführt, dass speziell industrielle Letztverbraucher, die in der Vergangenheit fossile Energieträger für die Wärmeerzeugung durch elektrischen Strom substituiert haben, wieder zurückschwenken. Auch im größeren Kontext wird ein ähnlicher Effekt beobachtet. Durch die Einspeisepriorität und den wachsenden Anteil der erneuerbaren Energiequellen werden moderne Kraftwerksanlagen mit vergleichsweise hohen Grenzkosten aus dem Markt gedrängt. Alte Kraftwerksanlagen dominieren somit die konventionelle Energiebereitstellung¹⁰.

Dennoch darf nicht über das bisher Erreichte hinweggesehen werden. Neben dem rasanten Ausbau der Erzeugungskapazität „[...] sind die damals jungen Technologien längst ihren Kinderschuhen entwachsen und haben [...] sich als tragende Säulen der Stromversorgung etabliert“, so das BMWi (2015, S. 6). Auf internationaler Ebene wird die deutsche Energiewende als innovativ und wegweisend für das weltweite Ziel der regenerativen Energieversorgung bewertet (siehe REN21 2014, S. 6).

Doch wie ist es um die zukünftige Entwicklung des Gesetzes bestellt? Von vielen Seiten wird eine stärkere Beteiligung der Anlagenbetreiber an den Marktrisiken gefordert (z. B. AGFW 2014, IW 2016). Dies würde mit einem langsamen Auslaufen der Förderung einhergehen. Konkrete Aussagen über die zukünftige Entwicklung der Umlage seitens der Netzbetreiber werden aufgrund haftungsrechtlicher Aspekte nicht vorgenommen. Mit der steigenden Technologiereife werden die Gestehungskosten und damit die Fördersummen langfristig absinken. Hinzu kommt, dass teure Bestandsanlagen ausscheiden werden, was zu einer stetigen Modernisierung des geförderten Anlagenparks führen wird. Eine Studie des ÖKO-INSTITUTS gelangt zu dem Schluss, dass „die Umlage bis zum Jahre 2035 auf circa 4,4 ct pro Kilowattstunde [sinken wird]“ (ÖKO-INSTITUT 2015, S. 25). Eine weitere Reduzierung bis zum letzten Wegfall ist zu erwarten. Auch das INSTITUT DER DEUTSCHEN WIRTSCHAFT KÖLN identifiziert deutliche Argumente dafür, „die EEG-Umlage zu begrenzen und teilweise oder ganz anders zu finanzieren“ (IW 2016, S. 21). Dies wird letztlich zu einem „Auslaufen des EEGs“ (IW 2016, S. 21) führen.

¹⁰ sog. *Merit-Order-Effekt*, siehe entsprechende Fachliteratur, z. B. VON ROON & HUCK (2010)

2.4 Zusammenfassung

Zusätzlich zu den hohen Anforderungen aus produktionstechnischer Sicht stellen sich durch die Rahmenbedingungen des Energiemarkts weitere Herausforderungen an den energieflexiblen Betrieb von spanenden Werkzeugmaschinen. Aufgrund der deutlichen gesetzlichen Regulierung der Partizipationsmöglichkeiten ist die gezielte Wahl einer Vermarktungs- bzw. Einsatzstrategie der Energieflexibilität essentiell. Die wachsende Volatilität des Energieangebots und die zukünftige Entwicklung der Förderung durch das EEG sind zentral in die Betrachtungen zur Schaffung und Nutzung der Energieflexibilität einzubeziehen, da sich der Energiemarkt weiterhin im stetigen Wandel befindet.

3 Stand der Wissenschaft und Technik

3.1 Kapitelüberblick

Um den Themenbereich der Energieflexibilität zu erläutern, wird in diesem Kapitel die Abgrenzung der Energieeffizienz von der Energieflexibilität beschrieben. Im weiteren Verlauf werden bereits vorhandene Ansätze zur Bewertung und Umsetzung von Energieflexibilität in der Produktion erörtert.

3.2 Abgrenzung der Energieeffizienz von der -flexibilität

Mit der *Energieeffizienz* wird angestrebt, „einen gewünschten Nutzen mit möglichst wenig Energieeinsatz herzustellen oder aus einem bestimmten Energieeinsatz möglichst viel Nutzen zu ziehen“ (MÜLLER 2009):

$$\text{Energieeffizienz} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Energieeinsatz}} \quad (3.1)$$

Konkrete Maßnahmen hierzu wurden in der Vergangenheit in zahlreichen Vorhaben der Industrie und Forschung entwickelt und umgesetzt. Umfragen belegen, dass etwa 80 % der Unternehmen (PwC 2015, DIHK 2016) bereits in Energieeffizienzmaßnahmen investiert haben oder konkrete Maßnahmen planen. Während die Energieeffizienz die stetige Erhöhung des Verhältnisses von *Nutzen zu Energieeinsatz* anstrebt, bleibt bei den Maßnahmen der Energieflexibilität der Quotient beider Größen über einen längeren Bilanzzeitraum konstant. Vielmehr werden Energiebedarfe zeitlich verschoben, um auf aktuelle Einflüsse der Energieverfügbarkeit zu reagieren.

3.3 Energieflexibilität in der Produktion

Mit dem Begriff der *Flexibilität* wird die Fähigkeit eines Produktionssystems beschrieben, „effektiv auf wechselnde Rahmenbedingungen zu reagieren“ (MANDELBAUM 1978). Diese Definition wird in der moderneren Literatur noch

3 Stand der Wissenschaft und Technik

präziser gefasst, indem der Begriff *effektiv* durch „schnell und nur mit geringem finanziellen Aufwand“ (NYHUIS ET AL. 2008) konkretisiert wird. Der Handlungsspielraum der Flexibilität wird durch ein festgelegtes *Maßnahmenbündel* (auch als *Portfolio* bezeichnet) begrenzt, das innerhalb eines definierten Korridors wirken kann (ZAEH ET AL. 2005, NYHUIS ET AL. 2008).

Werden die Einflussgrößen auf die Energieverfügbarkeit beschränkt, so wird dies *Energieflexibilität* genannt. In Anlehnung an die allgemeine Flexibilitätsdefinition wird diese von REINHART ET AL. (2012, S. 623) wie folgt festgelegt:

„*Energieflexibilität [ist] die Fähigkeit eines Produktionssystems [...], sich schnell und mit sehr geringem finanziellen Aufwand an Änderungen des Energiemarktes anzupassen.*“

Die Definition steht im Einklang mit den zentralen Anforderungen der Produktion, hat aber die Grenze des Einflussfaktors der Energie sehr eng gezogen. Durch den Begriff des *Energiemarkts* werden fabrikinterne Einflussgrößen, wie z. B. ein internes Lastmanagement oder die Eigenversorgung mit elektrischer Energie, nicht berücksichtigt. Daher wird im Zuge der vorliegenden Arbeit die Energieflexibilität wie folgt definiert:

„*Die Energieflexibilität ist die Fähigkeit des Produktionsbereiches, sich schnell und mit sehr geringem finanziellen Aufwand an Änderungen der Energieverfügbarkeit anzupassen.*“

Diese weiter gefasste Formulierung der energetischen Einflussgrößen soll zudem die Anwendbarkeit der Definition über jegliche Fabrikebenen hinweg ermöglichen. Analog zur allgemeinen Flexibilität wird im Kontext der Energieflexibilität der Begriff (*Energieflexibilitäts-*)*Maßnahmen* genutzt. Diese werden nach REINHART & GRASSL (2013) als eine *bewusste Aktion zur Durchführung eines definierten Zustandswechsels* beschrieben. Auf diesem Wege wird die Anpassung des Energiebedarfs in der Regel indirekt durch eine Veränderung des Produktionsprozesses vorgenommen.

In den vergangenen Jahren wurde die energieflexible Produktion in erheblichem Ausmaß thematisiert, sei es als *Industrial Smart Grid*, *industrielles Lastmanagement* bzw. *Lastflexibilisierung* oder *Industrial Demand Response*. Der Grundgedanke, Erlöse durch die Anpassung des Lastgangs an die Energieverfügbarkeit zu erzielen, ist in allen Ansätzen identisch. Diese können nach den Fabrikebenen und dem wachsenden Zeithorizont bis zur Umsetzung der Maßnahme untergliedert werden (siehe Abbildung 3.1).

3.4 Potenzialabschätzung und Bewertung der Energieflexibilität

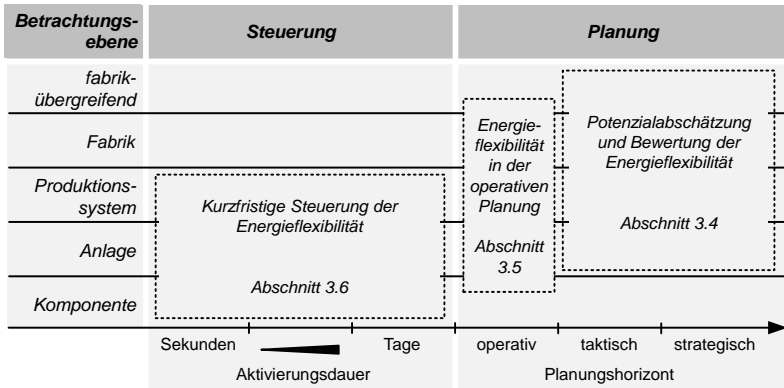


Abbildung 3.1: Einordnung des Stands der Wissenschaft und Technik zum Thema der Energieflexibilität

Die grundsätzliche Unterteilung der Zeithorizonte in die Bereiche *Planung* und *Steuerung* (siehe auch POPP ET AL. 2015, GHADIMI ET AL. 2015 und BEIER ET AL. 2016) wird im Folgenden konkretisiert:

- **Planung:** Dieser Bereich wird nach drei Planungsebenen untergliedert (*operativ*, *taktisch* und *strategisch*). Die *strategischen* Ansätze beziehen sich auf Potenzialstudien, die z. B. dazu dienen, die Energieflexibilität von Unternehmen oder Branchen einzuschätzen (Abschnitt 3.4.1). Unter *taktisch* fallen alle allgemeinen Bewertungsansätze für die Energieflexibilität von Produktionssystemen und -anlagen (Abschnitt 3.4.2), während im Zuge der *operativen* Planung Ansätze einer energieorientierten Produktionsplanung aufgeführt sind (Abschnitt 3.5).
- **Steuerung:** Werden Maßnahmen erst nach einer erfolgten Auftragsfreigabe ergriffen, können diese nicht über die Vorgänge der Ablaufplanung berücksichtigt werden. Vielmehr werden kurzfristige Eingriffe vorgenommen (Abschnitt 3.6).

3.4 Potenzialabschätzung und Bewertung der Energieflexibilität

Zur Erläuterung der Ansätze zur Bewertung der Energieflexibilität innerhalb der Produktion wird *top-down* von der fabrikübergreifenden Ebene ausgehend hin zur Komponentenebene vorgegangen. Im Allgemeinen zeigt sich, dass eine

3 Stand der Wissenschaft und Technik

tieferer Betrachtungsebene der Energieflexibilitätsansätze auch zu kürzeren Zeithorizonten führt (siehe Abbildungen 3.1 und 3.2).

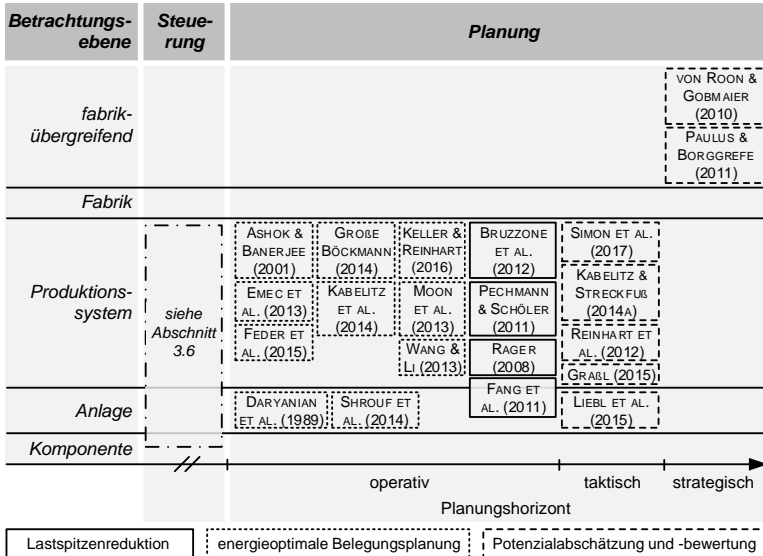


Abbildung 3.2: Einordnung der Bewertungsmodelle und der operativen Planungsansätze der Energieflexibilität

3.4.1 Strategische Potenzialabschätzung

Losgelöst vom Begriff der *Fabrik* stellten VON ROON & GOBMAIER (2010) eine Studie über die kurzfristigen *Demand-Response-Potenziale* für die Bundesrepublik Deutschland vor, gekennzeichnet durch den Schwerpunkt auf den volkswirtschaftlichen Gewinnaussichten und begleitet von den Hemmnissen in der Umsetzung. Dabei werden diejenigen Energieflexibilitätspotenziale der deutschen Industriebranchen adressiert, die im Minutenbereich abgerufen werden können. Für die Potenzialabschätzung wurde der Begriff der *technischen Potenziale* eingeführt, die im Verständnis der Autoren diejenige Last beschreiben, „welche ohne Beeinträchtigung des Produktionsprozesses oder ohne Komforteinbußen für eine gewisse Zeit abgeschaltet werden können“ (VON ROON & GOBMAIER 2010, S. 14). Das letztliche Vorgehen zur Abschätzung der branchenweiten Potenziale wurde nicht erläutert. Vielmehr wurde auf Basis der „Veröffentlichungen zum Lastmanagement und [der] langjährigen Erfahrungen“

3.4 Potenzialabschätzung und Bewertung der Energieflexibilität

(VON ROON & GOBMAIER 2010, S. 14) argumentiert, um das Teilergebnis der Studie zu rechtfertigen. Einen zentralen Punkt für die vorliegende Dissertation stellt die Erkenntnis dar, dass sich durch die Summe zahlreicher, auch kleinerer Verbraucher ein signifikanter Stellhebel für den Ausgleich kurzfristiger Über- bzw. Unterversorgung mit elektrischer Energie ergibt.

Eine spezifischere Betrachtung ausgewählter Branchen nahmen PAULUS & BORGGREFE (2011) vor. Diese verfolgten den Ansatz, gezielt diejenigen Prozesse zu flexibilisieren, die auf industrieller Seite den größten Energiebedarf aufweisen (z. B. Zementmühlen, Chloralkali- und Aluminium-Elektrolyse). Durch diese Fokussierung auf wenige Anwendungsfälle ist die konkrete Ableitung einzelner quantifizierter Potenziale auf Basis von Unternehmensbefragungen möglich. Das exakte Vorgehen wurde nicht erwähnt, die Angabe des Potenzials erfolgte als Leistungsdifferenz in Höhe von 2.660 MW. Dieser Wert rangiert in derselben Größenordnung, die auch in der Untersuchung von VON ROON & GOBMAIER (2010) genannt wurde.

3.4.2 Bewertungsansätze

Der Fokus der weiteren Ausführungen ist nun auf (sowohl allgemeine als auch spezifische) Bewertungsansätze für Produktionsanlagen und -systeme ausgerichtet. Produktionsferne Bereiche werden im Folgenden nicht betrachtet.

Einen ersten zustandsbezogenen Ansatz formulierten REINHART ET AL. (2012), die das Energieflexibilitätspotenzial eines Produktionssystems als die Gesamtheit jeglicher Energieflexibilitätspotenziale der zugehörigen Anlagen und Aggregate zusammenfassen. Jedes Subsystem kann dabei definierte Zustände einnehmen, deren Wechsel eine Veränderung der Leistungsaufnahme nach sich zieht. Wird ein Wechsel gezielt durchgeführt, um auf externe Signale, wie z. B. Energiepreise und deren Änderung, zu reagieren, wird von einer (Energieflexibilitäts-)Maßnahme gesprochen. Die Autoren differenzierten in zwei Arten der Energieflexibilität:

- Die **Basis-Energieflexibilität** stellt die auftragsunabhängige Flexibilität dar, die u. a. aus der Anzahl der energetischen Zustände, der Bandbreite jedes Zustands (Leistungskorridore), den Abhängigkeiten zwischen den Zuständen und den jeweiligen Nutzungs- oder Aktivierungszeiten berechnet werden kann.
- Die **spezifische Energieflexibilität** berücksichtigt zusätzliche Rahmenbedingungen der Produkte und der Produktionsplanung. Durch die „spezifische Energieflexibilität werden die Leistungskorridore diskret, [...]

3 Stand der Wissenschaft und Technik

da bestimmte Leistungen [...] nicht erreicht werden können“ (REINHART ET AL. 2012, S. 627). In Bezug auf einzelne Anlagen ist die spezifische Energieflexibilität somit eine Teilmenge der Basis-Energieflexibilität.

Zur Konkretisierung der Inhalte der bisherigen Ausführungen leiteten die Autoren Energieflexibilitätsmaßnahmen ab, die eine direkte oder indirekte Wirkung auf den Energiebedarf des Produktionssystems ausüben (Tabelle 3.1). Als *indirekt wirkende Maßnahmen* sind diejenigen Eingriffe auf den zeitaufgelösten Energiebedarf zu verstehen, die durch Veränderungen im Produktionsablauf hervorgerufen werden. *Direkte Maßnahmen* hingegen bezeichnen die unmittelbare Veränderung des Energiebedarfs, z. B. durch die Speicherung von Energie oder den Wechsel der Energiearten.

Tabelle 3.1: Maßnahmenkatalog zur Beeinflussung des Energiebedarfs nach REINHART & GRASSL (2013) und GRASSL (2015)

Maßnahmenbezeichnung ¹	Wirkungsweise
Anpassung der Hochfahrprozesse	indirekt
Anpassung des Auftragsstarts	indirekt
Anpassung der Maschinenbelegung	indirekt
Anpassung der Prozessparameter	indirekt
Unterbrechung der Bearbeitung eines Auftrags	indirekt
Anpassung der Auftragsreihenfolge	indirekt
Anpassung der Schichtzeiten	indirekt
Anpassung der Pausenzeiten	indirekt
Wechsel der Energiequelle	direkt
Speicherung von Energie	direkt

In der finalen Modellvorstellung von GRASSL (2015) wurde von der Unterscheidung der genannten Energieflexibilitätsarten aus REINHART ET AL. (2012) abgesehen. Vielmehr wurde der Umfang quantifizierbarer Größen der betrachteten Anlage erhöht, um auf deren Basis eine Bewertung vorzunehmen. GRASSL (2015) formulierte sechs *Energieflexibilitätsaxiome*, die jeweils Aussagen über die Höhe der Energieflexibilität zulassen:

¹In GRASSL (2015) werden die Maßnahmen teilweise abweichend bezeichnet, die zugrunde liegenden Ansätze zur Beeinflussung des Energiebedarfs bleiben identisch.

3.4 Potenzialabschätzung und Bewertung der Energieflexibilität

- „Je größer/geringer die Anzahl der Zielzustände eines Systems ist, desto flexibler/unflexibler ist es. [...]
- Je gleichmäßiger/ungleichmäßiger die Verteilung der Zielzustände eines Systems ist, desto flexibler/unflexibler ist es. [...]
- Je schneller/langsamer ein Wechsel zwischen den Zuständen eines Systems durchgeführt werden kann, desto flexibler/unflexibler ist es. [...]
- Je kürzer/länger die minimale Verweildauer der Zustände eines Systems ist, desto flexibler/unflexibler ist es. [...]
- Je länger/kürzer die maximale Verweildauer der Zustände eines Systems ist, desto flexibler/unflexibler ist es. [...]
- Je günstiger/teurer ein Wechsel zwischen den Zuständen eines Systems ist, desto flexibler/unflexibler ist es“ (GRASSL 2015, S. 64 ff.).

Zu den einzelnen Axiomen wurden spezifische Bewertungsvorschriften aufgeführt, die partiell eine analytische Betrachtung ermöglichen (siehe GRASSL & REINHART 2014). Mithilfe dieser Einzelergebnisse lässt sich die Energieflexibilität in Form einer eindimensionalen Kennzahl errechnen, was am Beispiel einer Längsgraphitierungsanlage praktisch durchgeführt wurde.

Ausgehend von den von REINHART & GRASSL (2013) definierten Maßnahmen zur Anpassung des Energiebedarfs führten ZÄH ET AL. (2013) Maßzahlen zur Identifikation von Energieflexibilität ein. Es wurden vier quantifizierbare Energieflexibilitätsmaße abgeleitet: die *Umschaltenergie*, die *Leistungsänderungsgeschwindigkeit*, die *Grenzzeit* (Verhältnis der Umschaltarbeit zur Leistungsdifferenz) und die *Steuerbarkeit des Energiebedarfs*. Je ausgeprägter ein Maß ist, desto größer bzw. geringer ist die Energieflexibilität. Zum Beispiel lässt eine geringe notwendige Umschaltenergie bei einem Zustandswechsel auf ein großes Energieflexibilitätspotenzial schließen, während eine geringe Steuerbarkeit des Energiebedarfs mit einem negativen Einfluss auf das Energieflexibilitätspotenzial einhergeht. Selbiges gilt für die Leistungsänderungsgeschwindigkeit eines Systems: Je schneller eine Leistungsanpassung erfolgen kann, desto größer ist die Energieflexibilität des betrachteten Systems.

LIEBL ET AL. (2015) zeigten eine Methode zur praxisnahen Abschätzung der Energieflexibilitätspotenziale auf Basis des durchschnittlichen Leistungsbedarfs und der Maßnahmen von REINHART & GRASSL (2013) auf. Anhand einer Checkliste wurde die Anzahl der möglichen Maßnahmen erfasst und das Ergebnis in Form von Energieflexibilitäts-Kennfeldern aufgetragen. Es wurde zwischen *kurzfristig steuerbarer* und *operativ planbarer* Energieflexibilität unterschieden.

KABELITZ & STRECKFUSS (2014a) legten ihren Untersuchungen einen ganzheitlichen Bewertungsansatz für das Reaktionsvermögen eines Produktionssystems auf kurzfristige, erhebliche Strompreisänderungen zugrunde. Dabei war die quantitative Korrelation zwischen dem stetigen Energiebedarf und der Leistungsintensität die zentrale Funktion. Durch die erste zeitliche Ableitung der Energieverbrauchsfunktion wurde die (elektrische) Leistungsfunktion beschrieben, durch die zweite Ableitung die „Energieflexibilität des gewählten Betrachtungsraums“ (KABELITZ & STRECKFUSS 2014a, S. 45). Das Ergebnis der Berechnung dient als ein Kriterium für kurzfristige Entscheidungen.

In der darauffolgenden Veröffentlichung gingen KABELITZ & STRECKFUSS (2014b) weiterhin von einer ganzheitlichen Betrachtung aus, nun aber auf Basis von vollständigen und allgemeingültigen Kennzahlen. In diesem Zusammenhang postulierten sie, dass die Flexibilitätsdimensionen der *Maschinen-, Prozess-, Volumen- und Routenflexibilität* relevante Einflussgrößen für die Energieflexibilität sind. Innerhalb der Dimensionen kann eine spezifische Bewertung des Produktionssystems vorgenommen werden, sodass letztlich ein Kennzahlensystem zur Bewertung vorliegt. Eine konkrete Anwendung wurde nicht aufgezeigt.

Ebenfalls für die Ebene der Produktionssysteme stellten SIMON ET AL. (2017) einen Bewertungsansatz für aggregierte Energieflexibilitätspotenziale vor. Die Grundlage des Vorgehens bilden, wie bereits bei GRASSL & REINHART (2014), verschiedene diskrete Betriebszustände, die bewusst durch Maßnahmen verändert werden. Da in einem Produktionssystem verschiedene Untersysteme auch zeitgleich Maßnahmen vollziehen können bzw. dafür zur Verfügung stehen, wurden zur Auswertung *Maßnahmenbündel* gebildet, welche die parallele oder serielle Wirkungszeit von Maßnahmen beschreiben (SIMON ET AL. 2017). Es wurde erkannt, dass die unvermeidbaren Wechselwirkungen zwischen den Einzelmaßnahmen die Aggregation erschweren, da einzelne Potenziale in der Regel abgeschwächt werden.

3.5 Energieflexibilität in der operativen Planung

Neben den bisher aufgeführten Bewertungsansätzen existieren zahlreiche Vorgehensweisen zur Umsetzung einer energieflexiblen Produktion. Im Folgenden werden diejenigen beschrieben, die der Produktionsplanung zugeordnet sind.

DARYANIAN ET AL. (1989) führten eine theoretische Fallstudie für ein Verflüssigerwerk für technische Gase durch. Hierzu nahmen sie an, dass eine stündlich wechselnde Energiepreiskurve für eine Woche im Voraus bekannt

3.5 Energieflexibilität in der operativen Planung

ist. Aufgrund zahlreicher Annahmen in der Betrachtung und einer deutlichen Abhängigkeit der Einsparpotenziale von den Leerlaufzeiten standen einer direkten Umsetzung in der Praxis jedoch noch signifikante Hürden gegenüber. Der erste Grundstein für eine operative Planung des Energiebedarfs wurde mit dieser Arbeit bereits früh gelegt. Erst Jahre später haben sich zahlreiche Autoren wieder dem Thema gewidmet, ein Effekt, der in deutlichem Maße auf die steigenden Energiepreise und die neuen politischen Rahmenbedingungen zurückzuführen ist.

RAGER (2008) zeigte einen allgemeingültigen Ansatz auf, um mithilfe von (meta-)heuristischen Verfahren innerhalb der Produktionsplanung die Lastkurve einzelner Produktionsanlagen zu glätten. Der Fokus wird, neben der elektrischen Energie, auch auf die Wärmeenergie ausgerichtet.

PECHMANN & SCHÖLER (2011) hinterlegten einer Produktionsaufgabe den jeweiligen zeitaufgelösten Energiebedarf, sodass das Auftreten einer Lastspitze bereits in der Planungsphase vermieden werden kann. Die Planung fand dabei immer einen Tag im Voraus statt. Einen ähnlichen Ansatz verfolgten FANG ET AL. (2011), die dabei auch eine Variation der Bearbeitungsgeschwindigkeit zuließen. BRUZZONE ET AL. (2012) gingen einen Schritt weiter und nahmen ebenfalls Verzögerungen im Produktionsablauf in Kauf, sofern ein Gesamtoptimum aus Einsparpotenzialen und Verspätungszuschlägen eine kostengünstigere Alternative darstellte.

Die zuletzt genannten Ansätze berücksichtigten lediglich die Reduzierung von Lastspitzen. Weitere Einflussgrößen, wie z. B. zeitabhängige Energiepreise, wurden dabei nicht betrachtet. Somit können mit den bisherigen Ansätzen (Ausnahme: DARYANIAN ET AL. 1989) keine Vorteile aus einem aktuell günstigen Energieangebot gezogen werden. Dieser Fokus wurde erst in den folgenden Veröffentlichungen adressiert:

FEDER ET AL. (2015) adaptierten die *Methode des Energiewertstroms* für eine energieoptimierte Belegungsplanung. Mithilfe zusätzlicher Energieflüsse (z. B. Wärme) wurde das Produktionssystem in einem energetisch vollständigen Abbild dargestellt. Die Autoren griffen den Bewertungsansatz von REINHART ET AL. (2012) auf und ergänzten diesen um eine „prozessspezifische Kennzahl [...], um die Gesamtflexibilität des Wertstroms wiederzugeben“ (FEDER ET AL. 2015, S. 315). Diese Kennzahl wurde als *Energieflexibilitätspotenzial* bezeichnet. Für die Quantifizierung des Einsparpotenzials wurden die Energiepreise des Folgetags herangezogen.

Daneben sind der Literatur zahlreiche Ansätze zu entnehmen, die ein Produktionssystem mit einer Kostenfunktion beschreiben und mithilfe gängiger

Optimierungsverfahren eine energiekostenreduzierte Belegungsplanung ableiten. Die Grundlage hierfür sind zeitvariante Tarife oder die Teilnahme am Spotmarkt. Einfache Formulierungen der Kostenfunktionen können analytisch (z. B. ASHOK & BANERJEE 2001) oder mit numerischen Verfahren (z. B. EMEC ET AL. 2013) gelöst werden. ASHOK & BANERJEE (2001) erzielten bei einer Preisvariation von 50 bis 100 % unter Berücksichtigung der Abhängigkeiten der betrachteten Produktionsschritte eine Reduktion der Energiekosten von bis zu 29 %. EMEC ET AL. (2013) erreichten Einsparpotenziale von bis zu 78 %, verrechneten dabei allerdings reguläre Preise mit den weit günstigeren Spotmarktpreisen derart, dass der tatsächliche Vorteil durch die Anpassung der Belegungsplanung nicht eindeutig zu erkennen ist. Aus produktionstechnischer Sicht wurde zudem ein Tag betrachtet, der durch einen geringen Auftragsbestand bei gleichzeitig hohen Instandhaltungstätigkeiten gekennzeichnet war. Die in Aussicht gestellte Ersparnis ist somit kritisch zu hinterfragen.

MOON ET AL. (2013) führten eine Gegenüberstellung verschiedener Optimierungsansätze auf Basis genetischer Algorithmen durch und erreichten Ersparnisse von bis zu 22 % bei täglichen Schwankungen der Strompreise von umgerechnet ca. 0,04 bis 0,12 €/kWh. Auch SHROUF ET AL. (2014) wählten einen ähnlichen Ansatz und erlangten eine Energiekostenreduktion von bis zu 32 %. Dabei wurden stark schwankende, a priori bekannte Energiepreise (*Day-Ahead-Markt*, Schwankung bis zum Vierfachen) angenommen.

KELLER & REINHART (2016) sahen die Energie, analog zur weiteren Materialbedarfsplanung, als Produktionsressource mit begrenzter Verfügbarkeit an. Somit konnte die Umsetzung der energieorientierten Maschinenbelegungsplanung innerhalb der bestehenden Planungssysteme integriert werden. Die Abweichungen vom ursprünglich geplanten Energie-Soll sollen über kurzzeitige Speichermöglichkeiten oder Veränderungen im Produktionsplan abgefangen werden.

Ein Konzept zur Integration eines Lastmanagements in den Produktionsregelkreis wurde durch GROSSE BÖCKMANN (2014) vorgestellt. Hierfür wurden kurzfristige Strategien genutzt, die auf Abweichungen zwischen dem geplanten und dem tatsächlichen Energiebedarf reagieren können. Die Maßnahmen zur reaktiven Anpassung des aktuellen Energiebedarfs bezogen sich dabei auf dieselben Maßnahmen, die für die Produktionsplanung genutzt werden – ergänzt um die Möglichkeit, Auftragsstarts zu verzögern.

Den zahlreichen Betrachtungen ist gemein, dass diese für die Kalkulation der Energiekostenreduktion zeitabhängige Preise des Spotmarkts nutzten. Die notwendigen Mengen an Energie und die hohen Eintrittsbarrieren verhindern

3.6 Umsetzung und Steuerung der kurzfristigen Energieflexibilität

jedoch den Zugang hierzu für die meisten Unternehmen. Die oftmals einzige Möglichkeit besteht über Zwischenhändler, die kleinere Unternehmen in einem *Pool* zusammenfassen. Die tatsächlichen Einsparpotenziale werden dabei, aufgrund der Marge der Zwischenhändler, in einem kleineren Bereich liegen.

Eine Ausnahme hiervon stellt der Ansatz von KABELITZ ET AL. (2014) dar. Diese betrachteten das Beispiel einer Stückgutfertigung. Für einen untypischen Tag mit maximaler Schwankung der Gebote am Regelle Energiemarkt² konnte eine Senkung der Energiekosten um 15 % erzielt werden. Im Gegenzug sind höhere Lagerkosten zu erwarten, die nicht näher quantifiziert wurden. Im Allgemeinen lässt sich für die Vielzahl der bisherigen Arbeiten feststellen, dass die zusätzlichen Kosten des energieflexiblen Betriebs zwar thematisiert, die Quantifizierung und die Gegenüberstellung mit den Erlösen indes nur sehr selten vorgenommen wurden (z. B. DATZMANN ET AL. 2016).

3.6 Umsetzung und Steuerung der kurzfristigen Energieflexibilität

Im Zuge dieses Abschnitts werden diejenigen Strategien aufgezeigt, die zeitlich zwischen der Auftragsfreigabe und einer Echtzeitsteuerung angesiedelt sind (Abbildung 3.3).

BEIER ET AL. (2015) präsentierten ein Konzept für eine Echtzeitsteuerung von Druckluftsystemen mit dem Ziel, den Anteil erneuerbarer Energiequellen zu erhöhen. In der darauffolgenden Publikation (BEIER ET AL. 2017) wurde das Konzept auf ein gesamtes Produktionssystem ausgedehnt. Hierfür wurden in einer simulationsbasierten Evaluation die Bearbeitungszeiträume der Maschinen durch die Erhöhung der Teilepuffer-Bestände teilweise entkoppelt. Zwar wurde auf diesem Wege eine höhere zeitliche Flexibilität erzielt, diese geht allerdings zu Lasten der Produktivität und der Bestände. Um das Potenzial der Steuerung zu bewerten, definierten die Autoren verschiedene Performance-Kennzahlen (siehe Abbildung 3.4). Wie bereits YUSTA ET AL. (2010) und LI ET AL. (2012) erkannten BEIER ET AL. (2017), dass eine signifikante Verbesserung der Energieflexibilität lediglich auf Kosten bisheriger Zielgrößen der schlanken Produktion erzielbar ist. In der Dissertation von BEIER (2017) wurde der Steuerungsansatz um zusätzliche Energiespeicher ergänzt.

²24.12.2013, negative Regellenergie wurde zwischen 12 und 15.000 €/MWh angeboten.

3 Stand der Wissenschaft und Technik

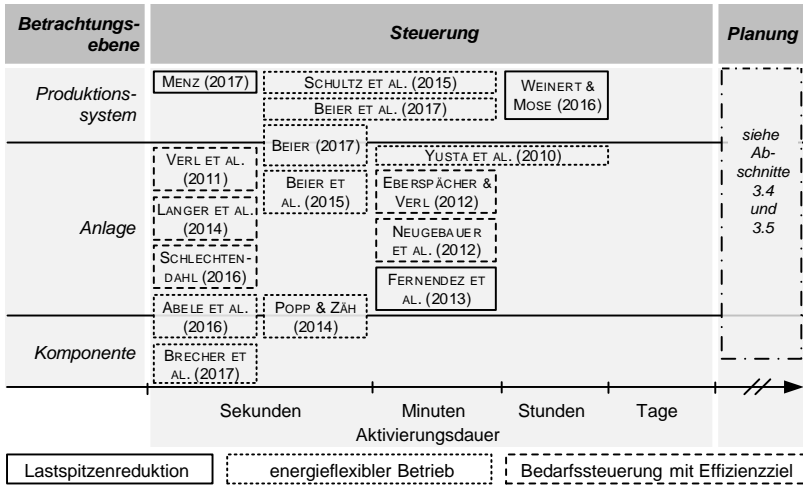


Abbildung 3.3: Einordnung der Ansätze zur Umsetzung und Steuerung kurzfristiger Energieflexibilität, ferner Steuerungsansätze mit dem Ziel der Energieeffizienz und der Lastspitzenreduktion

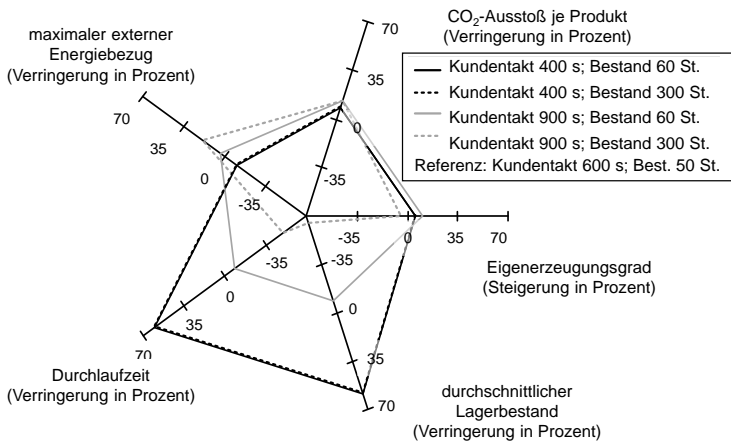


Abbildung 3.4: Veränderungen der Performance-Kennzahlen durch die energieflexible Steuerung eines Produktionssystems, in Anlehnung an BEIER ET AL. (2017)

3.6 Umsetzung und Steuerung der kurzfristigen Energieflexibilität

Einen ähnlichen Ansatz zur Bewertung einer Echtzeitsteuerung verfolgten SCHULTZ ET AL. (2015a) in ihrem Projekt. In dessen Rahmen wurden periphere Verbraucher der technischen Gebäudeausrüstung mit in die Produktionssteuerung eingebunden und mithilfe der energieflexiblen Energiewertstrommethode nach FEDER ET AL. (2015) modelliert. In weiteren Publikationen (u. a. SCHULTZ ET AL. 2016) wurde die Echtzeitsteuerung in ein übergreifendes Energiemanagementkonzept integriert, das die Planung der Energiebedarfe berücksichtigte.

Ein typischer Anwendungsfall der kurzfristigen Energieflexibilitätsmaßnahmen ist, wie auch bei den Planungsansätzen, die Reduktion von Lastspitzen bei energieintensiven Anlagen. Dieser wurde in der Vergangenheit oft als eigenständiger Themenkomplex angesehen, da sich durch diesen Ansatz bereits vielversprechende Potenziale zur Kostensenkung ergaben. Neben den im vorherigen Abschnitt aufgeführten planungsbasierten Strategien können die Lastspitzen durch intelligente Steuerung von Maschinen (z. B. WEINERT & MOSE 2016, MENZ 2017) und zusätzliche Pufferspeicher zwischen Maschinen (z. B. FERNANDEZ ET AL. 2013) ebenfalls reaktiv reduziert werden.

Während die Ansätze der Lastspitzenreduktion auf eine Umverteilung der Energiebedarfe abzielen, befassten sich zeitgleich zahlreiche Forschungsprojekte mit der Energieeffizienz von spanenden Werkzeugmaschinen. Beispielhaft sind u. a. *Ecomation* (z. B. EBERSPÄCHER & VERL 2013), *NCplus* (z. B. DENKENA 2013) und *eniPROD* (z. B. NEUGEBAUER ET AL. 2012) anzuführen, die mithilfe von Energieregeln unter der Nutzung zusätzlichen Prozesswissens einen effizienten Energieeinsatz verfolgten. Auch hier wurden, neben der Planung von Energiebedarfen, kurzfristige Steuerungsstrategien durch die Produktionssteuerung vorgeschlagen. Diese zielten lediglich auf Energieeffizienzaspekte ab, die Energieflexibilität bildete keinen Untersuchungsgegenstand.

Einen ersten Schritt im Bereich der energieflexiblen spanenden Werkzeugmaschinen unternahm YUSTA ET AL. (2010). Die Energieaufnahme wurde in diesem Kontext durch ein einfaches lineares Modell errechnet, in dem neben der Schnitt- die Vorschubgeschwindigkeit, die Schnitttiefe und ein empirischer Wert der spezifischen Energie in die lineare Berechnung einbezogen wurden. In verschiedenen Szenarien wurden die Auswirkungen einer Variation der Schnittgeschwindigkeit, die antizyklisch zu den stundenaktuellen Energiepreisen am Spotmarkt gewählt wurde, evaluiert. Die wichtigsten Erkenntnisse aus den Untersuchungen von YUSTA ET AL. (2010) lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Durch die energiekostenorientierte Wahl von Prozessparametern können bei heutigen Energieversorgungstarifen lediglich geringfügige Kosteneinsparungen erwirtschaftet werden.

3 Stand der Wissenschaft und Technik

- Durch die Verlangsamung der Produktion während Stunden hoher Energiekosten steigt der Gesamtbedarf an Energie für den Tag (Ursache: hoher Grundlastanteil).
- Mit einer steigenden Auslastung der Drehmaschine reduziert sich die Flexibilität des Fertigungsprozesses und damit konvergieren die erzielbaren Einsparpotenziale gegen null.

Bezüglich der Vorlaufzeit beriefen sich die Autoren noch auf Zeiträume von bis zu einem Tag im Voraus. Eine Echtzeitregelung wurde in dem gezeigten Ansatz zwar nicht aufgeführt, ist aber durchaus umsetzbar, wie es FANG & LIN (2013) in Form einer Optimierung einer gewichteten Kostenfunktion bewiesen. Der Steuerungsansatz von YUSTA ET AL. (2010) stellt somit die erste grundlegende Untersuchung in Richtung einer kurzfristigen Steuerung des Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen dar. POPP & ZÄH (2014) lieferten eine Lösungsstrategie für das Problemfeld von YUSTA ET AL. (2010). Durch die Nutzung *nicht-determinierter* Prozesse, deren Betriebszeitpunkte lediglich indirekt von den Maschinenbefehlen abhängen, ergibt sich ein zusätzlicher zeitlicher Freiheitsgrad. Infolgedessen können Anteile der benötigten Energie in vorgegebenen Zeitfenstern verschoben werden. Da bei dem gezeigten Ansatz keine „zeitlich und parametrisch abgestimmten Abläufe direkt beeinflusst [werden]“ (POPP & ZÄH 2014, S. 415), sind die Produktqualität und Produktivität nicht gefährdet. Damit wird die *Verlangsamung der Produktion*, die YUSTA ET AL. (2010) beschrieben, vermieden. Auch die weitere Behauptung der Autoren, dass die Energieflexibilität mit steigender Auslastung sinke, wurde mit der Möglichkeit der hauptzeitparallelen Durchführung entkräftet.

Die methodische Identifikation und die Potenzialbewertung der Energieflexibilität einzelner Maschinenkomponenten wurde daraufhin von POPP & ZAEH (2014) fokussiert. Folgende Grundanforderungen wurden an die Energieflexibilisierung der spanenden Werkzeugmaschinen gestellt:

- Der Leistungsbedarf der Maschine muss laufend, auch im produktiven Zustand der Maschine, steuerbar sein.
- Alle Effekte, welche die Qualität des Werkstücks beeinträchtigen, müssen vermieden werden.
- Die Bearbeitungszeiten dürfen nicht bzw. nur in vertretbarem Umfang beeinflusst werden.

Mit der stringenten Beachtung der Anforderungen soll die Akzeptanz der energieflexiblen Werkzeugmaschine in der Industrie gewährleistet werden (POPP & ZAEH 2014). Auf diese und weitere Veröffentlichungen wird in den folgenden Kapiteln noch verstärkt Bezug genommen.

ABELE ET AL. (2016) zeigten eine spezifische Methode zur Identifikation energieflexibler Module (Komponenten) und der Quantifizierung ihrer Potenziale an spanenden Werkzeugmaschinen auf. Dabei wurde die Grundanforderung von POPP & ZAEH (2014) aufgegriffen, die eine Durchführung von Maßnahmen während der Hauptzeit ohne Auswirkungen auf den Prozess voraussetzt. Nach der, zu POPP & ZAEH (2014) analogen, Identifikation geeigneter Komponenten wurde eine Quantifizierungsvorschrift für das Energieflexibilitätspotenzial³ abgeleitet. Diese sollte auch die Möglichkeit zur Bewertung weiterer Anwendungsfälle (Lastspitzenreduktion und Lastglättung) bieten.

BRECHER ET AL. (2017) verfolgten ebenfalls einen komponentenbasierten Ansatz am Beispiel spanender Werkzeugmaschinen. Der Fokus wurde auf den variablen Betrieb von elektrischen Antrieben ausgerichtet. Aufgrund der Charakteristika der angehängten Lasten prägten sich unterschiedliche Zusammenhänge zwischen Dauer und Energiebedarf des Bearbeitungsschritts aus. Dies ist in der Regel auf Verluste in ineffizienten Betriebspunkten, aber auch auf Grundlastanteile, zurückzuführen. Die Autoren gelangten zu dem Schluss, dass ein nahezu konstanter Zusammenhang zwischen Energiemenge und Bearbeitungsdauer ein hohes Energieflexibilitätspotenzial bietet.

3.7 Zusammenfassung und Handlungsbedarf

In den vorangegangenen Abschnitten wurden vielfältige Möglichkeiten aufgezeigt, wie eine Anpassung des Lastgangs an die Energieverfügbarkeit mit verschiedenen Zeithorizonten in produzierenden Unternehmen durchgeführt werden kann. Während für die Produktionsplanung bereits zahlreiche Werkzeuge existieren, liegen lediglich wenige Ansätze für die Anlagen- bzw. Prozessebene vor. Insbesondere Untersuchungen, in denen die konkrete Umsetzung aufgezeigt und das Energieflexibilitätspotenzial quantifiziert werden, sind selten.

Die Betrachtung der Energieflexibilität bei spanenden Werkzeugmaschinen ist ein aktuelles Thema, belegt durch die jüngste Häufung an relevanten Veröffentlichungen produktionstechnischer Forschungseinrichtungen in Deutschland. Im Vergleich zu den etablierten Themenkomplexen, wie z. B. der Energieeffizienz, ist die Erforschung der Energieflexibilität im Zusammenhang mit spanenden Werkzeugmaschinen noch auf wenige Vorhaben beschränkt. Die grundlegende

³Die Autoren bezeichnen die Energieflexibilität in diesem Kontext als *Lastflexibilisierung* bzw. die Möglichkeit dazu.

Betrachtung bis hin zur wirtschaftlichen Evaluation des Konzeptes bleibt bislang weitgehend aus. Lediglich BEIER (2017) hat bis dato umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, vernachlässigt jedoch sowohl Kernanforderungen an die Produktivität der Maschinen als auch nennenswerte Energieflexibilitätspotenziale der Maschinen auf der Komponentenebene.

Damit Industrieunternehmen das Konzept der energieflexiblen Werkzeugmaschine tatsächlich für die eigene Produktion in Erwägung ziehen können, müssen diese die bestehenden Potenziale identifizieren, hinreichend genau abschätzen und schließlich heben können. Hierfür bedarf es eines durchgängigen Vorgehens, das spanende Werkzeugmaschinen fokussierend alle notwendigen Teilschritte abdeckt. Dabei ist die isolierte technische Betrachtung einzelner Komponenten oder Ebenen, wie sie bisher weitestgehend in der Literatur zu finden ist, unzureichend. Um eine verlässliche Aussage über das Potenzial der spanenden Werkzeugmaschinen zu treffen, bedarf es:

- eines mit den Kernanforderungen der Maschinen verträglichen Konzepts zur Nutzung der Energieflexibilitätspotenziale,
- ebenenübergreifender Bewertungsansätze,
- aussagekräftiger Kennzahlen, die in übergeordnete Kennzahlensysteme überführbar sind und somit eine technologieübergreifende Vergleichbarkeit herstellen und
- einer Zielanwendung, die eine Erlössituation, auch bei aktuell oder in naher Zukunft realistischen Energieversorgungskonzepten, aufzeigt.

Diese Aspekte werden im Zuge der vorliegenden Dissertation in den nachfolgenden Kapiteln adressiert. Ein Überblick über die Struktur des Vorgehens wird im kommenden Kapitel 4 aufgezeigt.

4 Zielsetzung und Vorgehensweise

4.1 Ziel der Arbeit

Gesellschaftliche und politische Trends fordern deutliche Maßnahmen zur Steigerung der Nachhaltigkeit in der industriellen Produktion. Derzeitige Ansätze gehen dabei über die reine (Energie-)Effizienzsteigerung hinaus und zielen auf einen zeitlich flexiblen Energieeinsatz ab. In Abschnitt 3.7 wurde aufgezeigt, dass bisherige Forschungsvorhaben nur einzelne Teilaspekte der Energieflexibilität im Bereich der spanenden Werkzeugmaschinen betrachtet haben und somit nur spezifische Ansätze darstellen. Eine grundlegende und durchgängige Betrachtung des kurzfristigen energieflexiblen Einsatzes von spanenden Werkzeugmaschinen steht dabei noch aus. Hierbei bedarf es eines ganzheitlichen Konzepts, welches über die bestehenden Ansätze hinausgeht und mit den zentralen Kernanforderungen an die spanenden Werkzeugmaschinen verträglich ist. Eine technische Bewertung muss zudem die Vergleichbarkeit der neuen und der bestehenden Strategien zulassen, wodurch der Bewertungsansatz für die Anwendung auf verschiedenen Fabrikebenen geeignet sein muss.

Der Stand der Wissenschaft und Technik geht bisher von Vermarktungsmöglichkeiten am übergeordneten Strommarkt aus. Dieser bietet für den überwiegenden Teil der spanenden Fertigungsbetriebe keinen direkten Zugang, sondern ist der energieintensiven Industrie vorbehalten. Daher muss eine Zielanwendung der Energieflexibilität herausgearbeitet werden, die realistische, wirtschaftliche Vorteile auch für die breite Masse an Anwendern ermöglicht und nicht auf einen kleinen Anwenderkreis begrenzt ist.

Das Ziel der vorliegenden Dissertation besteht folglich darin zu ermitteln, wie und in welchem Umfang spanende Werkzeugmaschinen durch eine energieflexible Betriebsweise wirtschaftlich an der Energiewende partizipieren können. Die genannten Kernaspekte zur Untersuchung der kurzfristigen Energieflexibilität spanender Werkzeugmaschinen werden dabei wissenschaftlich aufgegriffen und praxisnah detailliert. Den Fokus der Untersuchungen bilden kurzfristige Maßnahmen, die in der Regel nach der Auftragsfreigabe durchgeführt werden können. Die zugrunde liegende Vorgehensweise der wissenschaftlichen Untersuchung wird im kommenden Abschnitt strukturiert erläutert und mit den folgenden Kapiteln in Bezug gebracht.

4.2 Vorgehensweise

Die vorliegende Dissertation sieht für die Erreichung der wissenschaftlichen Zielsetzung vier Teilbereiche vor, welche sich mit den übergeordneten Schritten der *Problemstrukturierung*, der Beschreibung des *Lösungsansatzes*, der *Probeabhandlung* und der *Überprüfung der Zielerreichung* umschreiben lassen. Die Abbildung 4.1 bringt diese mit den jeweiligen Kapiteln in Bezug und zeigt dabei die Gesamtstruktur der Dissertation im Überblick auf.

Im Zuge der *Problemstrukturierung* wurden bereits in den vergangenen Kapiteln 1 bis 3 die notwendigen Grundlagen und der Stand der Wissenschaft und Technik vermittelt. Auf dieser Basis werden in Kapitel 5 die *speziellen Anforderungen an den energieflexiblen Betrieb* herausgearbeitet, welche die relevanten Aspekte der spanenden Fertigung (z. B. Produktivität, Hemmnisse) berücksichtigen und entsprechende Leitplanken für die Energieflexibilitätsbefähigung darstellen.

Unter Berücksichtigung der speziellen Anforderungen wird im Kapitel 6 ein Lösungsansatz erbracht, anhand dessen die Identifikation und Bewertung der kurzfristigen Energieflexibilität spanender Werkzeugmaschinen ermöglicht wird. Hierfür wird auf Basis einer einzelnen Energieflexibilitätsstrategie eine Methodik vorgestellt, welche sich aus zwei Teilmethoden zur Identifikation bzw. Bewertung zusammensetzt. Diese wird im späteren Verlauf auf weitere Energieflexibilitätsstrategien übertragen (siehe Unterkapitel 7.4). Da verschiedenartige Energieflexibilitätsstrategien existieren, muss der Bewertungsansatz entweder eine globale Aussage unter Berücksichtigung sämtlicher Einzelstrategien oder eine Anwendbarkeit auf alle relevanten Strategien gewährleisten.

Vor der Übertragung auf die Alternativstrategien und deren Bewertung wird die Anwendung der Methodik am Beispiel zweier spanender Werkzeugmaschinen erläutert und deren Energieflexibilitätspotenzial quantifiziert (siehe Unterkapitel 7.2). Diese erste praktische Anwendung dient auch als Ausgangsbasis für die Validierung, die durch die detaillierte Ausweitung der zugrunde liegenden Versuchsreihen und der notwendigen Umrüstung einer Versuchsmaschine durchgeführt wurde (siehe Unterkapitel 7.3). Schließlich werden im letzten Unterkapitel 7.4 sämtliche Alternativstrategien hinsichtlich ihrer Relevanz überprüft und eine Bewertung der verbleibenden Auswahl vorgenommen. Hierfür muss das Bewertungsmodell aus dem Kapitel 6 entsprechend auf die Energieflexibilitätsstrategien übertragen werden. Eine Gegenüberstellung der Potenziale der bewerteten Strategien schließt das Kapitel ab.

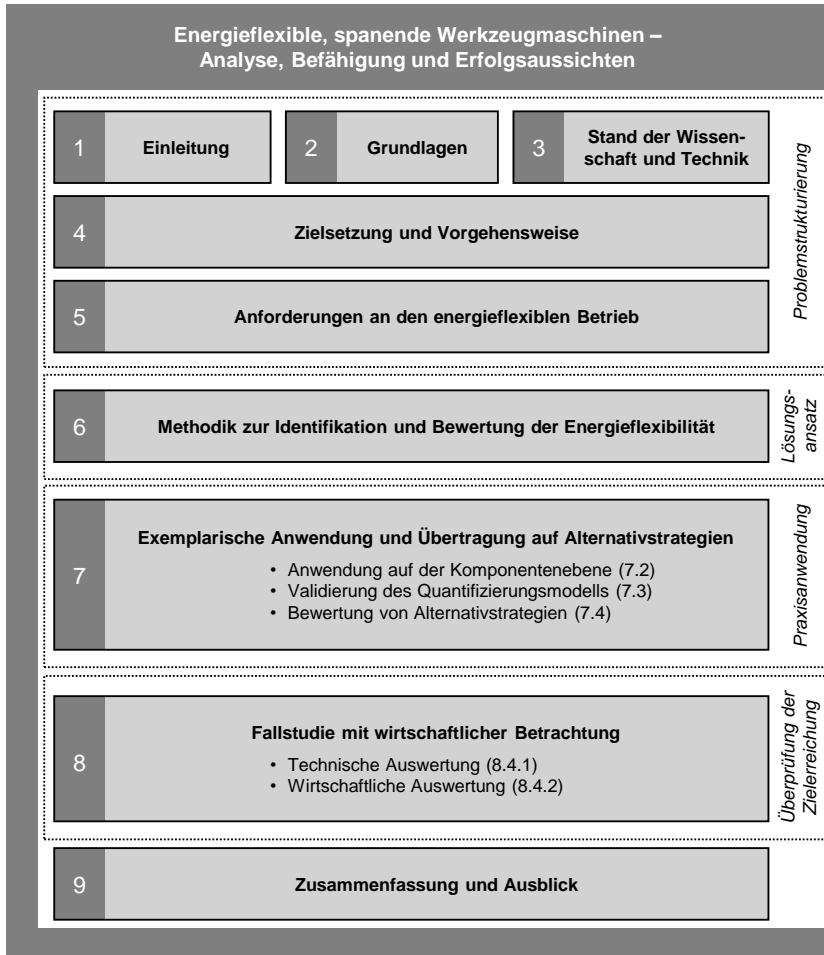


Abbildung 4.1: Struktur und Gesamtverfahren

Die vollständige Aussage über die kurzfristigen Energieflexibilitätspotenziale spanender Werkzeugmaschinen dient in Kapitel 8 als Basis zur *Überprüfung der Zielerreichung*. Einleitend wird hierzu eine geeignete Zielanwendung identifiziert, welche den höchsten Ertrag bei der Nutzung der Energieflexibilitätspotenziale erwarten lässt. Diese Zielanwendung wird im Zuge einer beispielhaften Fertigungsinsel abgebildet, die aufgrund von realen Messdaten des Energiebedarfs und der -verfügbarkeit durch eine hohe Praxisnähe gekenn-

4 Zielsetzung und Vorgehensweise

zeichnet ist. Die Fertigungsinsel und damit das Energieflexibilitätspotenzial der darin enthaltenen spanenden Werkzeugmaschinen wurde einer Langzeitstudie unterworfen, um neben täglichen Einflüssen auch saisonale Effekte auf die regenerative Energieversorgung zu berücksichtigen. Die Ergebnisse der Fallstudie über ein Jahr werden im Zuge von Abschnitt 8.4 sowohl von technischer als auch wirtschaftlicher Seite bewertet.

Zuletzt werden die Erkenntnisse der Dissertation im abschließenden Kapitel 9 zusammengefasst. Ein Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf, welcher sich im Zuge der Ausarbeitung offenbart hat, schließt die Abhandlungen ab.

5 Anforderungen an den energieflexiblen Betrieb

5.1 Kapitelüberblick

In diesem Kapitel werden zu Beginn die Zielkonflikte, welche sich im Zuge der Energieflexibilitätsbefähigung ergeben, erörtert und strukturiert. Durch die Erläuterung und die Gegenüberstellung der Zielgrößen der spanenden Fertigung mit denen des energieflexiblen Betriebs wird im ersten Abschnitt das entstehende Spannungsfeld aufgezeigt. Die darin bestehenden Wechselwirkungen werden identifiziert und klassifiziert. Mithilfe der Priorisierung der Ziele und der Formulierung von Bedingungen können die Konflikte aufgelöst und die Leitlinien für die Energieflexibilitätsbefähigung von spanenden Werkzeugmaschinen abgeleitet werden. Auf dieser Basis werden die speziellen Anforderungen definiert, welche die Grundlage für die Ausführungen der folgenden Kapitel darstellen.

5.2 Spannungsfeld der Zielgrößen

Die spanende Fertigung stellt einen wichtigen Bestandteil verschiedener Industriezweige dar, deren Unternehmen die Erreichung der klassischen betriebswirtschaftlichen Unternehmensziele verfolgen. Diese unterscheiden sich in *leistungsbezogene*, *monetäre* und *soziale Ziele* (u. a. ULRICH 1978, BLEICHER 1996). Das erste Ziel strebt die Steigerung der Ausbringung von Produkten bzw. Dienstleistungen und die Erschließung von weiteren Märkten an, während das Zweite das finanzielle Wachstum und die Liquidität des Unternehmens sicherstellen soll. Das dritte Ziel verfolgt die Erfüllung der Bedürfnisse der Belegschaft, der Gesellschaft und der Umwelt. Die genannten Ziele spannen ein Polylemma aus konfligierenden Richtungen auf, sodass die individuelle Erfüllung eines Ziels vereinzelt zulasten der Erreichung der Weiteren fällt. Da für die sozialen Aspekte oftmals nur Mindestanforderungen gelten (BLEICHER 1996), werden diese in vielen Entscheidungen als nachrangig angesehen. Gerade in Unternehmen, welche ein hohes finanzielles Ergebnis (z. B. Aktionärswert) anstreben, wird die Erfüllung über die Mindestanforderungen hinaus häufig als eine Verschwendung anstatt eines Erfolgs angesehen.

5 Anforderungen an den energieflexiblen Betrieb

Die höhere Priorisierung der leistungsbezogenen und monetären Ziele zeigt sich auch in zahlreichen Erhebungen, welche die Hemmnisse bei Energieeffizienzprojekten (z. B. SCHMID 2004, KARCHER & SIEMER 2013) oder die Gründe für Investitionsentscheidungen (siehe Abbildung 5.1) in Deutschland untersuchen (z. B. BDI 2011). Dabei wird deutlich, dass die *Energieeffizienz* und *Emissionsreduzierung* – im Vergleich zu Gründen, welche leistungsbezogene und monetäre Ziele verfolgen – als unwichtig angesehen werden. Die niedrige Priorität der Umwelt- und Energieaspekte im unternehmerischen Denken wird in einer Untersuchung zum Nutzen und den Hemmnissen von Energieeffizienzmaßnahmen im Mittelstand weiter bestätigt: „Neben der fehlenden Zeit, sich mit dem Thema auseinanderzusetzen, scheuen viele Unternehmen die Kosten solcher Investitionen.“ (PwC 2015, S. 4)

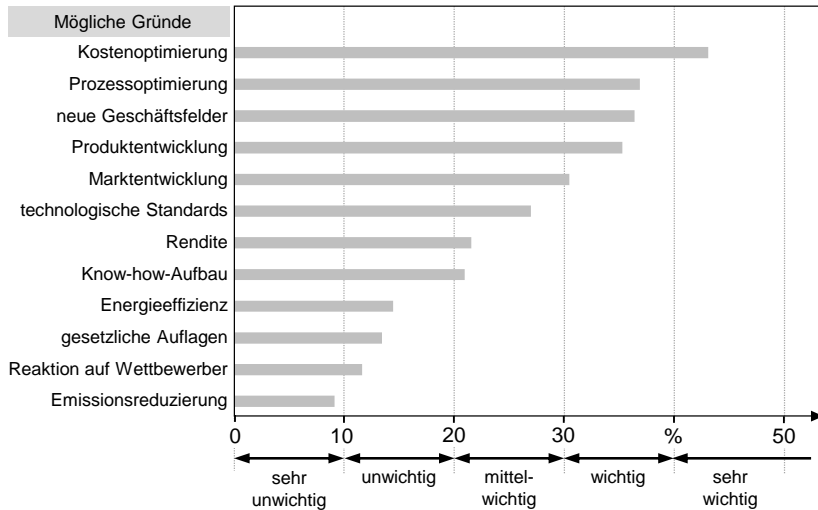


Abbildung 5.1: Gründe für Investitionsentscheidungen in deutschen Unternehmen, in Anlehnung an BDI (2011, S. 25)

Trotz der Ausführungen sind die Industrieunternehmen nicht allesamt als die schwarzen Schafe der Nachhaltigkeit zu sehen. Gerade deutsche Unternehmen fühlen sich im internationalen Vergleich dem nachhaltigen Management „seit langem stärker verpflichtet als der angelsächsischen Shareholder Value-Philosophie“ (SERVATIUS 2012, S. 17). Studien bestätigen diese Haltung: Während im Inland 14,4% der Unternehmensvertreter im Jahre 2011 die Energieeffizienz als wichtiges Investitionskriterium bewerten, beläuft sich dieser Wert im Ausland auf nur auf 7,7% (BDI 2011, S. 27). Trotz der geringen

Relevanz bei Investitionen haben viele deutsche Unternehmen das Thema somit dennoch zu einem wichtigen Bestandteil ihrer Unternehmensstrategie erhoben (SERVATIUS 2012).

Das Spannungsfeld, welches sich somit auf der Unternehmensebene ergibt, stellt sich in gleicher Weise in der spanenden Fertigung dar. Werden die allgemeinen Anforderungen an spanende Werkzeugmaschinen (z. B. nach MILBERG 1995, siehe Abschnitt 2.2.1) betrachtet, so wird neben technischen und betriebswirtschaftlichen Aspekten auch eine *gute Integrationsfähigkeit* gefordert (MILBERG 1995). Die Nachhaltigkeit wird jedoch, wie auch in aktuelleren Standardwerken, nicht oder nur indirekt thematisiert. So werden lediglich Auswirkungen auf das direkte Umfeld durch „Geräusche, Staub [und] aggressive Medien“ (WECK & BRECHER 2013, S. 11) unter der konstruktiven Anforderung des *Umweltverhaltens* subsumiert. Im Allgemeinen wird allerdings eine zunehmende Relevanz der ökologischen Aspekte konstatiert, Bemühungen in diese Zielrichtung aber „beeinträchtigen z. T. die Produktivität und die Wirtschaftlichkeit der Maschinen, sodass hier Kompromisse zu schließen sind bzw. besondere Weiterentwicklungen notwendig werden“ (WECK & BRECHER 2013, S. 11). Die Autoren beschreiben somit auch hier den drohenden Konflikt der Anforderungen. KIEF ET AL. (2015) drücken in ihrem praxisnahen Nachschlagewerk diesen Zusammenhang noch deutlicher aus, indem sie fordern, dass die Produktivität durch die Energieeffizienz „auf keinen Fall [...] in Frage gestellt werden darf“ (KIEF ET AL. 2015, S. 425).

Eine Ursache dieser allgemeinen Haltung liegt in den geringen Energiekosten im Vergleich zu den weiteren Kostenbestandteilen im Lebenszyklus von spanenden Werkzeugmaschinen. Hier spielen beispielsweise die *geplante* und *ungeplante Instandhaltung/-setzung*, die *Anschaffungs-* oder die *Werkzeugkosten* eine bedeutendere Rolle (siehe Abbildung 5.2). Die Erhöhung der Auslastung und der Bearbeitungsgeschwindigkeit üben somit einen weit höheren Einfluss im Hinblick auf die Fertigungskosten aus als die energiebezogenen Ansätze.

Für den energieflexiblen Betrieb spanender Werkzeugmaschinen lässt sich aus dem beschriebenen Zielkonflikt folgern, dass bei sämtlichen Vorhaben die Erfüllung technischer und wirtschaftlicher Ziele priorisiert werden muss. Die vorgegebenen Nachhaltigkeitsziele müssen zwar erreicht, dürfen aber analog zu den vorhergehenden Ausführungen nicht zulasten der dominanten Ziele übererfüllt werden. Die Nachhaltigkeitsziele können in Bezug auf die Energieflexibilität u. a. durch zukünftige gesetzliche Regelungen oder unternehmensinterne Selbstverpflichtungen gegeben sein. Als mögliches Beispiel sei hier ein fester Anteil des Endenergiebedarfs genannt, welcher stets zur flexiblen Nutzung für Netzbetreiber oder Energieversorger vorgehalten werden muss.

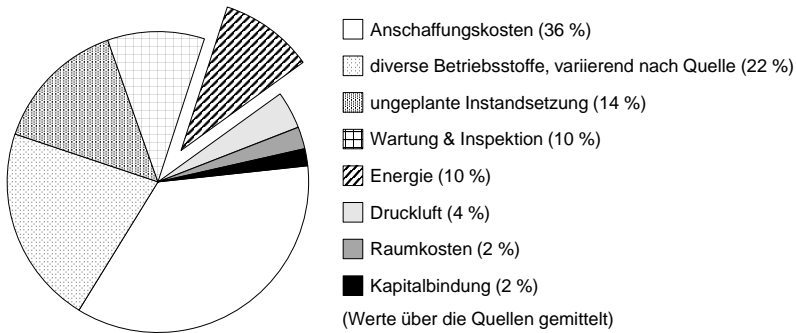


Abbildung 5.2: Anteile der lebenszyklusbezogenen Kosten spanender Werkzeugmaschinen (auf Basis von ABELE ET AL. 2009, S. 61; DERVISOPOULOS 2011, S. 157; ENPARANTZA ET AL. 2006, S. 720)

5.3 Gegenüberstellung der Zielsysteme

Für die Anforderungen an die Energieflexibilitätsbefähigung von spanenden Werkzeugmaschinen zeigt sich, dass entweder eine technologische Verbesserung oder eine verbesserte Erlössituation angestrebt werden muss, um das Potenzial für ein tragbares Geschäftsmodell zu schaffen. In Anbetracht des geringen Stellhebels der Energie bezüglich der Betriebskosten spanender Werkzeugmaschinen (siehe Abbildung 5.2) wird die Energieflexibilität zwangsläufig nur eine untergeordnete Rolle gegenüber der Produktivität einnehmen können. Es bedarf somit einer gründlichen Untersuchung, wie ein energieflexibler Betrieb spanender Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung dieses Spannungsfelds durchzuführen ist. Im Folgenden wird daher eine detaillierte Abwägung der relevanten Faktoren vorgenommen. Hierfür werden im Abschnitt 5.3.1 die Flexibilitätsdimensionen nach SLACK (1983) erläutert und auf die Energieflexibilität bezogen. Im Anschluss werden diese den allgemeinen Anforderungen an spanende Werkzeugmaschinen in Form einer Wechselwirkungsmatrix gegenübergestellt (Abschnitt 5.3.2) und es werden letztendlich die speziellen Anforderungen an die Energieflexibilitätsbefähigung abgeleitet (Abschnitt 5.3.3).

5.3.1 Dimensionen der Energieflexibilität

Die Energieflexibilität stellt einen Teilbereich der allgemeinen Flexibilitätstheorie dar (siehe hierzu u. a. GRASSL 2015, UNTERBERGER ET AL. 2017). Die Ausführungen zur Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion von GRASSL (2015) führen dabei auf die drei allgemeinen Flexibilitätsdimensionen zurück, welche bereits von SLACK (1983, S. 7 f.) definiert wurden:

- **Zustandsdimension:** Die Bandbreite (Anzahl und Verteilung) an Betriebszuständen, welche ein System einnehmen kann. Diese können beispielsweise durch das Spektrum an Produkten, verschiedene Ausbringungsmengen oder Qualitätsstufen gegeben sein.
- **Zeitdimension:** Die Zeit, welche nötig ist, um von einem Zustand in einen anderen zu wechseln. Dabei wird in die Zeit bis zur Entscheidung für eine Maßnahme und die Zeit für den Wechsel an sich unterschieden.
- **Kostendimension:** Die Kosten, welche durch einen Zustandswechsel entstehen. Es sind die Kosten der Umsetzung der Maßnahme und für deren Vorhaltung zu unterscheiden; Letztere sind nicht immer ausschlaggebend für die Bewertung der Flexibilität.

Für den Teilbereich der Energieflexibilität lassen sich die Dimensionen folgendermaßen präzisieren:

Die Zustandsdimension wird durch einen elektrischen Leistungskorridor gegeben, welcher durch Abstufungen der Leistungsaufnahme unterteilt wird. Die Abstufungen kommen durch verschiedene Betriebszustände, Produkte etc. zustande, welche jeweils einen spezifischen Leistungsbedarf aufweisen. Je weiter die Grenzen des Korridors voneinander entfernt sind und je mehr Abstufungen zwischen den Grenzen möglich sind, desto höher kann die Energieflexibilität hinsichtlich der Zustandsdimension bewertet werden.

Die Konkretisierung der beiden verbleibenden Dimensionen ergibt sich durch die Beschränkung der zugrundeliegenden Betrachtungsmenge an verfügbaren Betriebszuständen auf die Teilmenge der elektrischen (Leistungs-)Zustände. Speziell für die Zeitdimension gilt, dass ein Wechsel zwischen den Leistungsstufen zügig erfolgen muss. Dabei wird in der Regel die Zeit zwischen dem Auftreten der Veränderung der Energieverfügbarkeit und dem Eintreten der bewussten Leistungsänderung durch die Energieflexibilitätsmaßnahme zugrunde gelegt. Durch die Kostendimension werden alle Mehraufwände, welche aufgrund des Zustandswechsels entstehen, berücksichtigt. Dabei ist insbesondere auf mögliche Wechselenergien und Mehrbedarfe infolge ineffizienter Leistungsstufen Rücksicht zu nehmen.

5 Anforderungen an den energieflexiblen Betrieb

Auch in der im Abschnitt 3.3 neu gefassten Definition der Energieflexibilität spiegeln sich die Dimensionen wider (analog der Darstellung nach GRASSL 2015):

Die Energieflexibilität ist die Fähigkeit der Produktion (Zustandsdimension), sich schnell (Zeitdimension) und mit sehr geringem finanziellen Aufwand (Kostendimension) an Änderungen der Energieverfügbarkeit anzupassen.

5.3.2 Identifikation der Wechselwirkungen

Aus der direkten Gegenüberstellung der allgemeinen Anforderungen an spannde Werkzeugmaschinen nach MILBERG (1995) und den Dimensionen der (Energie-)Flexibilität in Form einer Matrixanordnung in Abbildung 5.3 können die jeweiligen Wechselwirkungen identifiziert werden. Dabei wird eine Kategorisierung in drei Klassen vorgenommen:

- **Positive Wechselwirkung (+):** Die allgemeine Anforderung und die Forderung aus der Flexibilitätsdimension verfolgen komplementäre Zielsetzungen. Teilweise sind hierzu Bedingungen zu formulieren, um eventuelle negative Einflüsse auszuschließen.
- **Keine Wechselwirkung (o):** Sind die Zielsetzungen voneinander unabhängig oder treten keine nennenswerten gegenseitigen Einflüsse auf, so werden für die Anforderungen keine Aspekte aus dieser Gegenüberstellung berücksichtigt.
- **Negative Wechselwirkung (-):** Negative Auswirkungen sind auf konfligierende Zielsetzungen zurückzuführen. Aus diesen Wechselwirkungen sind die einflussreichsten speziellen Anforderungen an die Energieflexibilitätsbefähigung zu erwarten.

Beginnend mit der Zustandsdimension werden die Wechselwirkungen zwischen den Dimensionen der Energieflexibilität und den allgemeinen Anforderungen innerhalb der einzelnen Matrixfelder beschrieben. Die Kategorisierung nach den genannten Klassen wird in Abbildung 5.3 gezeigt.

- **Felder A-I/B-I:** Eine Veränderung der technologischen Zerspanungsparameter zur Beeinflussung der Leistungsaufnahme nimmt unmittelbaren Einfluss auf den Zerspanvorgang als solchen. Es besteht das Risiko, dass eine Veränderung, beispielsweise eine Verlängerung der Bearbeitungszeit durch geringere Schnitt- oder Vorschubgeschwindigkeiten, eine Verringerung der Oberflächenqualität oder der Werkzeugstandzeit z. B. durch einen instabilen Prozess mit sich führt. Da die Prozessparameter im Vorfeld in der Regel auf ein ideales Setup bezüglich einer oder mehrerer

dieser Größen ausgelegt sind, ist im Allgemeinen nicht mit einer Verbesserung des Bearbeitungsvorgangs zu rechnen. Eine Beeinflussung der Leistungsaufnahme darf somit nur an denjenigen Stellhebeln und in dem Maße erfolgen, dass dies unkritisch für den Bearbeitungsvorgang ist.

- **Feld C-I:** Die Leistungsstufen und damit die möglichen Energieflexibilitätsmaßnahmen müssen transparent sein, damit den Verantwortlichen und dem Bedienpersonal der Maschinen, aber auch den zentralen Steuerungssystemen die erforderlichen Informationen vollumfänglich bereitstehen. Dies ist eine wichtige Voraussetzung, damit das Energieflexibilitätspotenzial ohne Einschränkungen genutzt werden kann.
- **Feld D-I:** Analog zur Ausführung zum Feld A-I/B-I kann eine Veränderung der Leistungsaufnahme durch eine Energieflexibilitätsmaßnahme zu einer ineffizienten Nutzung der Betriebsmittel führen. Die Energieflexibilitätsbefähigung und schließlich die Wahl geeigneter Energieflexibilitätsmaßnahmen muss somit stets unter der Prämisse erfolgen, dass die Gesamtwirtschaftlichkeit des energieflexiblen Betriebs (an sich) gewährleistet ist.
- **Felder E-I/E-II/E-III:** Da die Energieflexibilität einen Teilaspekt der allgemeinen Flexibilität darstellt, kann unter Vernachlässigung etwaiger Wechselwirkungen zwischen den Dimensionen von einer komplementären Zielsetzung in den drei Feldern ausgegangen werden.
- **Feld A-II:** Die Unterbrechung der Bearbeitung oder der Wechsel der Bearbeitungsparameter innerhalb einzelner Prozessschritte ist aufgrund der Qualitätsanforderungen kritisch. In Expertengesprächen wurde vor schwankenden Oberflächengüten durch die spontane Zustandsänderung oder abweichende Längenausdehnungen aufgrund der wechselnden thermischen Zustände gewarnt. Eine Unterbrechung innerhalb einzelner Werkstücke kann daher nur dann erfolgen, wenn negative Effekte auf die Bearbeitung vermieden werden können. Eine Unterbrechung nach Beendigung der Bearbeitung eines Werkstücks hingegen wird als weniger kritisch gesehen.
- **Feld B-II:** Eine Maschine, welche sich durch eine hohe Zerspanleistung auszeichnet, ist prinzipiell ebenfalls geeignet, zügige Zustandswechsel durchzuführen. Es kann daher von positiven wechselseitigen Einflüssen ausgegangen werden.
- **Feld C-II:** Eine zügige Entscheidung für eine Maßnahme und deren Umsetzung wird durch eine direkte informationstechnische Anbindung

5 Anforderungen an den energieflexiblen Betrieb

der Maschine an Entscheidungsinstanzen, wie z. B. ein Energiemanagementsystem, begünstigt.

- **Felder D-II/A-III/B-III:** Für diese Matrixfelder sind im Speziellen keine (weiteren) relevanten Wechselwirkungen festzustellen, welche nicht bereits durch ähnliche Fälle in weiteren Feldern abgedeckt sind.
- **Feld C-III:** Je höher eine Maschine in Bezug auf Mensch, betriebliche Organisation und Technik integriert ist, desto geringer sind im Regelfall die Kosten, welche durch die Ausführung einer Maßnahme entstehen. Die einmaligen Kosten der Energieflexibilitätsbefähigung dürfen in der Betrachtung nicht vernachlässigt werden.
- **Feld D-III:** Sofern die Wirtschaftlichkeit des energieflexiblen Betriebs unter der Berücksichtigung aller zugehörigen Aufwände gegeben ist, ist keine Einschränkung bezüglich niedriger Fertigungskosten gegeben.

		Flexibilitätsdimensionen nach SLACK (1983) übertragen auf die Energieflexibilität		
		Zustand I	Zeit II	Kosten III
Schritt 1: Identifikation von Wechselwirkungen		Forderungen: • große Breite des Leistungskorridors • hohe Anzahl an Leistungsstufen	Forderungen: • kurze Entscheidungszeit • schneller Wechsel der Leistungsstufe	Forderungen: • geringer Mehraufwand der Leistungsstufe • geringe Wechselenergie und Vorhaltungskosten
Allgemeine Anforderungen an spanende Werkzeugmaschinen nach MILBERG (1995)	A hohe Arbeitsgenauigkeit	⊖ hohe Abhängigkeit der Arbeitsgenauigkeit von den Leistungsstufen	⊖ diskrete Bearbeitungsschritte	⊙ keine Auswirkung
	B hohe Mengenleistung	⊖ hohe Abhängigkeit der Mengenleistung von den Leistungsstufen	⊕ hohe Dynamik der Maschine	⊙ keine Auswirkung
	C gute Integrationsfähigkeit	⊕ Integration erhöht die Transparenz, dadurch mehr Leistungsstufen sichtbar	⊕ schnellere Entscheidung für alternative Leistungsstufen	⊕ höhere Integration reduziert laufenden Aufwand der Flexibilität
	D niedrige Fertigungskosten	⊖ viele Leistungsstufen ineffizient	⊙ keine Auswirkung	⊕ komplementär, sofern im Gesamtkontext die Erlöse überwiegen
	E große Flexibilität	⊕ komplementäre Zielsetzung	⊕ komplementäre Zielsetzung	⊕ komplementäre Zielsetzung
Schritt 2: Ableitung der Anforderungen		Anforderungen aus der Zustandsdimension	Anforderungen aus der Zeitdimension	Anforderungen aus der Kostendimension

Abbildung 5.3: Wechselwirkungsmatrix zur Ableitung der Anforderungen an die Energieflexibilitätsbefähigung

Mithilfe der durch die Gegenüberstellung identifizierten Wechselwirkungen können durch den nächsten Schritt die speziellen Anforderungen für die Energieflexibilitätsbefähigung abgeleitet werden.

5.3.3 Ableitung der speziellen Anforderungen

Die speziellen Anforderungen stellen die Leitlinien für die Befähigung spanender Werkzeugmaschinen zur energieflexiblen Produktion dar und sind damit eine notwendige Grundlage für die Ausführungen in den folgenden Kapiteln. Sie werden aus der Beschreibung der Wechselwirkungen im vorangegangenen Abschnitt 5.3.2 abgeleitet und in Form einer Anforderungsliste (Abbildung 5.4) zusammengefasst.

Lfd.- Nr.	Bezug auf Wechsel- wirkung(en)	Abgeleitete spezielle Anforderungen
<i>abgeleitet aus der Zustandsdimension</i>		
1	A-I, B-I	Die Beeinflussung von technologischen Parametern durch Energieflexibilitätsmaßnahmen muss vermieden werden, sofern diese die Arbeitsgenauigkeit und die Mengenleistung negativ beeinflussen können.
2	C-I	Die verfügbaren Zustände (Leistungsstufen) müssen für zentrale Steuerungssysteme der Energieflexibilität automatisiert einsehbar sein.
3	D-I	Ineffiziente Leistungsstufen dürfen, sofern kein expliziter (wirtschaftlicher) Vorteil im Gesamtkontext vorhanden ist, nicht gewählt werden.
<i>abgeleitet aus der Zeitdimension</i>		
4	A-II	Die laufende Bearbeitung eines Werkstücks darf durch eine Energieflexibilitätsmaßnahme nicht unterbrochen werden.
5	C-II	Die Zustände müssen automatisiert wählbar sein, um zeitliche Verzögerungen zu reduzieren.
<i>abgeleitet aus der Kostendimension</i>		
6	D-III	Zur Sicherstellung möglichst niedriger Fertigungskosten müssen die Erlöse durch den energieflexiblen Betrieb langfristig die Kosten überwiegen.
A-III, B-II, B-III, C-III, D-II, E-I, E-II, E-III		<i>keine speziellen Anforderungen aus diesen Wechselwirkungen</i>

Abbildung 5.4: Liste der speziellen Anforderungen an die Energieflexibilitätsbefähigung von spanenden Werkzeugmaschinen

5 Anforderungen an den energieflexiblen Betrieb

Zwar ist der reine energieflexible Betrieb technisch möglich, selbst wenn einer oder mehrere Punkte der speziellen Anforderungen nicht oder nur teilweise erfüllt werden, jedoch ist in diesem Fall eine Sicherstellung des wirtschaftlichen Vorteils und der Akzeptanz der Technologie unter den Entscheidern und Anwendern nicht in vollem Umfang gegeben. Die strikte Einhaltung der speziellen Anforderungen ist infolgedessen eine essenzielle Prämisse für die weiteren Ausführungen der folgenden Kapitel.

5.4 Zusammenfassung

In Kapitel 5 wurden die Anforderungen an die Energieflexibilitätsbefähigung von spanenden Werkzeugmaschinen herausgearbeitet. Dabei wurde deutlich, dass grundsätzlich ein Zielkonflikt des energieflexiblen Betriebs mit den leistungsbezogenen und monetären Zielen der spanenden Fertigung vorherrscht oder mindestens zu befürchten ist. Energiebezogene Ziele sind aufgrund ihres vergleichsweise geringen wirtschaftlichen Stellhebels von niedriger Priorität, sofern die bestehenden gesetzlichen Regelungen oder die übergeordneten Nachhaltigkeitsziele erfüllt werden. Die Energieflexibilitätsbefähigung muss daher in der Art durchgeführt werden, dass die bestehende Produktivität und die erzielte Produktqualität der betrachteten Systeme nicht negativ beeinflusst werden. Zur Sicherstellung der Vorgaben wurden die allgemeinen Anforderungen an spanende Werkzeugmaschinen mit den Dimensionen der Energieflexibilität mithilfe einer Wechselwirkungsmatrix direkt einander gegenübergestellt. Dadurch konnten mögliche Konflikte identifiziert und Abhilfemaßnahmen erörtert werden, die als Basis für die Definition der *speziellen Anforderungen* dienen. Innerhalb der somit gesetzten Leitplanken kann eine Anpassung des Energiebedarfs an die Energieverfügbarkeit durchgeführt werden, ohne die Ziele höherer Priorität zu gefährden.

6 Methodik zur Identifikation und Bewertung der Energieflexibilität

6.1 Kapitelüberblick

In diesem Kapitel wird auf Grundlage der speziellen Anforderungen an den energieflexiblen Betrieb spanender Werkzeugmaschinen eine Methodik entwickelt, welche sowohl die Identifikation als auch die Bewertung der energieflexiblen Subsysteme ermöglicht. Wie in der Kapitelstruktur (Abbildung 6.1) gezeigt, wird anfangs eine Voruntersuchung durchgeführt, welche zu einer neuartigen Energieflexibilitätsstrategie führt. Diese wird den bestehenden, alternativen Strategien gegenübergestellt. Anschließend wird die Erfüllung der speziellen Anforderungen durch die einzelnen Strategien abgeschätzt.

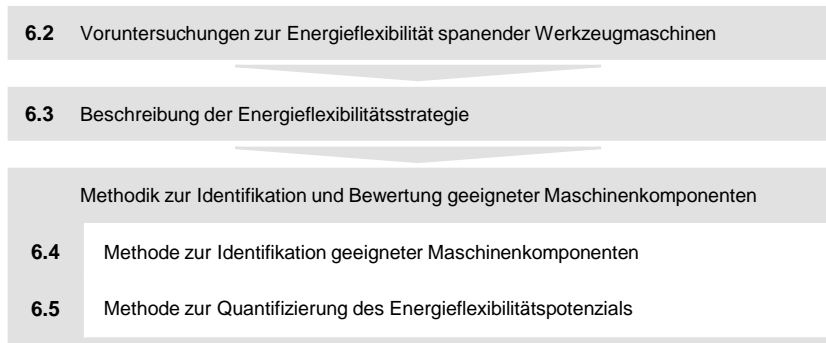


Abbildung 6.1: Kapitelstruktur und Aufbau der Methodik

Die Methodik selbst ist unterteilt in die zwei Einzelmethoden zur *Identifikation geeigneter Maschinenkomponenten* und zur *Quantifizierung des Potenzials*. Zum Abschluss des Kapitels wird ein Kennzahlensystem vorgestellt, welches den direkten Vergleich zwischen Subsystemen verschiedener Werkzeugmaschinen ermöglicht. Die vorgestellte Methodik wird im späteren Kapitel 7 anhand der Anwendung an zwei spanenden Werkzeugmaschinen näher erläutert und mithilfe diverser Szenarien validiert.

6.2 Voruntersuchung zur Energieflexibilität spanender Werkzeugmaschinen

Der Fertigungsprozess auf automatischen spanenden Werkzeugmaschinen ist durch ein strukturiertes Bearbeitungsprogramm (*NC-Code*¹) vorgegeben. Dadurch ist der Ablauf der einzelnen Prozessschritte in der Zeit- und den Wertdimensionen determiniert. Demzufolge ergibt sich für den Energiebedarf bei der Abarbeitung des NC-Codes eines bestimmten Werkstücks ein spezifischer Leistungsbedarf über die Zeit (Lastprofil). Dieser ist zudem von den energetischen Leistungscharakteristika der Subsysteme abhängig, sodass jede Kombination aus Maschine und darauf gefertigtem Werkstück ein festgelegtes Lastprofil besitzt.

Neben den bisher genannten *determinierten Prozessen* existieren weitere Maschinenprozesse, die nicht direkt durch den NC-Code festgelegt sind. Diese sind für den allgemeinen Maschinenbetrieb notwendig, wie z. B. die Maschinenkühlung. Die tatsächliche Betriebsweise dieser sogenannten *nicht-determinierten* Prozesse wird autark oder als zusätzliche integrierte Funktion der Maschinensteuerung bestimmt. Der Einfluss der nicht-determinierten Prozesse kann durch eine Messreihe von wenigen identischen Werkstücken auf derselben Maschine ermittelt werden, indem die Lastprofile grafisch überlagert werden (Abbildung 6.2).

Durch die Voruntersuchung zeigt sich, dass das Lastprofil der Werkzeugmaschine bei der NC-gesteuerten Fertigung eines Werkstücks grundsätzlich einer Basiskurve folgt, die durch die Leistungsaufnahme der determinierten Prozesse hervorgerufen wird. Diese wird regelmäßig durch zusätzliche Einzellasten, die durch die nicht-determinierten Prozesse verursacht werden, hin zu positiven Werten gesteigert. Während der Basislastgang bei identischer Maschinen-Werkstück-Kombination reproduzierbar ist und durch den jeweiligen Minimalwert bei der Überlagerung der Lastprofile ermittelt wird (graue Fläche in Abbildung 6.2), zeigen die *flexiblen Einzellasten* einen gewissen zeitlichen Freiheitsgrad. Mit der Nutzung dieses Freiheitsgrades lassen sich operative Maßnahmen der Energieflexibilität durchführen, indem die Einsatzzeiträume der nicht-determinierten Prozesse unter Berücksichtigung der jeweiligen Rahmenbedingungen verschoben werden.

¹NC: numerical control – Numerische Steuerung

6.2 Voruntersuchung zur Energieflexibilität spanender Werkzeugmaschinen

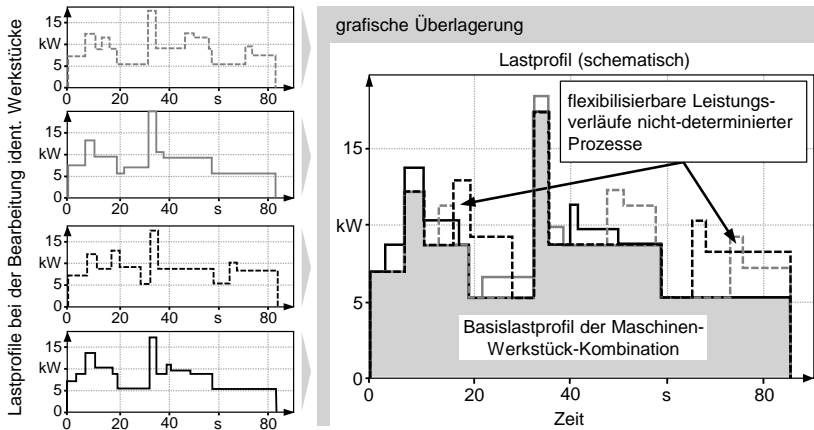


Abbildung 6.2: Identifikation des Basislastprofils durch Überlagerung einzelner Lastprofile, in Anlehnung an POPP & ZÄH (2014)

Eine erste Einschätzung des resultierenden Energieflexibilitätspotenzials der Maschine kann durch die Bestimmung des flächenmäßigen Anteils (Energieanteil) der flexiblen Einzellasten am Integral des Gesamtlastprofils in Form eines eindimensionalen Kennwertes getroffen werden. Dies ist in Tabelle 6.1 in Form des Energieanteils gezeigt.

Tabelle 6.1: Unterscheidung der Lastprofilanteile am Beispiel eines 5-Achs-Fräsbearbeitungszentrums

	Basislastgang	Flexible Einzellasten
Ursache	determinierte Prozesse	nicht-determinierte Prozesse
Abhängigkeit vom NC-Code	direkt	indirekt
Energieanteil am Gesamtbedarf	ca. 80 %	ca. 20 %
Beispielhafte Komponenten	Motorspindel, Vorschubantriebe	Kühlssysteme, Spänentransport

Zusammenfassend lässt sich als Ergebnis der Voruntersuchung festhalten, dass der Bearbeitungsvorgang innerhalb spanender Werkzeugmaschinen zwar durch

6 Methodik zur Identifikation und Bewertung der Energieflexibilität

den NC-Code und damit durch das jeweilige Werkstück festgelegt ist, auf Basis der nicht-determinierten Prozesse aber Möglichkeiten bestehen, den Lastgang im Sinne der Energieflexibilität zu beeinflussen. Dies stellt eine wichtige Grundlage zur Erfüllung der speziellen Anforderungen an die Energieflexibilitätsbefähigung (v. a. Anforderung 1 und 4, siehe Abschnitt 5.3.3) dar. Welche Subsysteme der Maschinen besonders energieflexibel sind, welche Rahmenbedingungen hierfür gelten und welches konkrete Energieflexibilitätspotenzial resultiert, kann mithilfe der Energieflexibilitätsstrategie sowie der zugehörigen Methodik ermittelt werden. Diese werden im weiteren Verlauf dieses Kapitels im Detail erläutert.

6.3 Energieflexibilitätsstrategie für spanende Werkzeugmaschinen

Die Voruntersuchung gemäß dem vorangegangenen Abschnitt 6.2 hat gezeigt, dass die Möglichkeit zur Durchführung energieflexibler Maßnahmen auf Komponentenebene unter Beibehaltung des Bearbeitungsprogrammes der Werkzeugmaschine besteht. Die ausschließliche Nutzung von nicht-determinierten Prozessen auf Komponentenebene stellt eine neuartige Energieflexibilitätsstrategie dar. Diese ergänzt bestehende Strategien des aktuellen Stands der Forschung, die im Folgenden als *Alternativstrategien* bezeichnet werden.

6.3.1 Energieflexibler Betrieb auf Komponentenebene

In diesem Abschnitt werden die Effekte, welche der neuartigen Energieflexibilitätsstrategie zugrunde liegen, näher erläutert und es wird aufgezeigt, inwiefern eine Veränderung des Lastprofils ohne negative Auswirkungen auf den Fertigungsvorgang durchgeführt werden kann. Für das Unterbrechen oder Vorziehen eines nicht-determinierten Prozesses bedarf es einer Speichereigenschaft, welche zur Versorgung des Prozesses vorliegen muss. Dies trifft in der Regel bei denjenigen Systemen zu, welche einen getakteten Betrieb aufweisen, der nicht explizit durch die Steuerung vorgegeben ist. Diese Eigenschaft kann durch einen realen Speicher gegeben sein (z. B. Druckspeicher bei Hydraulikaggregaten, Zwischentank bei Transferpumpen oder Speicher im weiteren Sinne, z. B. Wärmekapazitäten). Gewöhnlich werden die Zustandsgrößen der Speicher (z. B. Füllstand, Druck, Temperatur) durch Zweipunktregler gesteuert. Wird am Beispiel des Druckspeichers durch die Entnahme von Ölvolumen eine Druckuntergrenze erreicht, so schaltet sich die Hydraulikpumpe ein und erhöht den Druck im Speicher so lange, bis die obere Grenze erreicht ist und die Pumpe wieder abgeschaltet wird. Wie in Abbildung 6.3 gezeigt, kann durch eine bewusste Unterbrechung einer Betriebsphase (A) eine Verzögerung der

6.3 Energieflexibilitätsstrategie für spanende Werkzeugmaschinen

Leistungsaufnahme erzielt werden. Das Ende des effektiven Zeitraums der Maßnahme (B) liegt vor, sobald keine Leistungsdifferenz mehr vorhanden ist. Durch die Beibehaltung der bisherigen Speichergrenzen (min. / max.) wird sichergestellt, dass nachfolgende Prozesse stets adäquat versorgt sind.

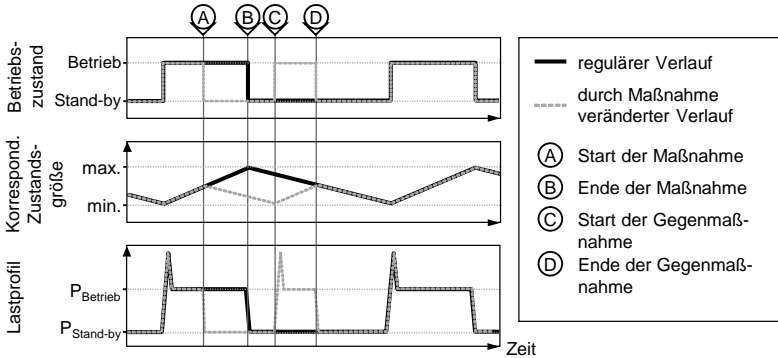


Abbildung 6.3: Änderung der Leistungsaufnahme durch Verschiebung der Betriebszeiträume, in Anlehnung an POPP ET AL. (2016)

Ferner wird in Abbildung 6.3 gezeigt, dass nach jeder Maßnahmedurchführung eine *Gegenmaßnahme* notwendig ist, welche die Energiebilanz ausgangsseitig wieder ausgleicht. Diese wird im Regelfall bei Erreichen eines Grenzwerts der Zustandsgröße eigenständig durch das System initiiert (C). Die Gegenmaßnahme endet mit dem vollständigen Nachholen der verschobenen Betriebsphase und somit dem Erreichen einer ausgeglichenen Energiebilanz (D).

Durch die Nutzung des Speichers für den energieflexiblen Betrieb wird eine höhere Schalthäufigkeit des Systems herbeigeführt, da nicht mehr nur zu den jeweiligen Grenzen geschaltet wird, sondern auch dazwischen, sofern die energiebezogenen Rahmenbedingungen dies erfordern. Um eventuelle nachteilige Effekte auf die Lebensdauer aufgrund der erhöhten Schalthäufigkeit zu vermeiden bzw. in vertretbarem Ausmaß zu halten, können die Schaltbereiche, in denen zusätzliche Eingriffe vorgenommen werden, durch Vorwarnstufen begrenzt oder Mindestzeiten für Betrieb und Stand-by eingeführt werden. In der Abbildung 6.4 ist gezeigt, wie durch die Einführung von Schutzbereichen die zusätzliche Anzahl an Schaltungen auf geringem Niveau gehalten werden kann. Es wird dabei in einen oberen und einen unteren Schutzbereich unterschieden. Der obere Schutzbereich verhindert, dass im Beispiel des Hydraulikaggregats

6 Methodik zur Identifikation und Bewertung der Energieflexibilität

die Pumpe frühzeitig eingeschaltet wird, wenn die Untergrenze des Schutzbereichs nicht unterschritten wird. Somit ist gewährleistet, dass stets eine Mindestlaufzeit der Hydraulikpumpe vorgegeben wird. Da höhere Druckniveaus zudem ineffizienter gegenüber geringen Niveaus sind, kann (auch im regulären Betrieb) zusätzlich eine Abfrage hinterlegt werden, ob die Nutzung des Bereichs im individuellen Falle sinnvoll ist.

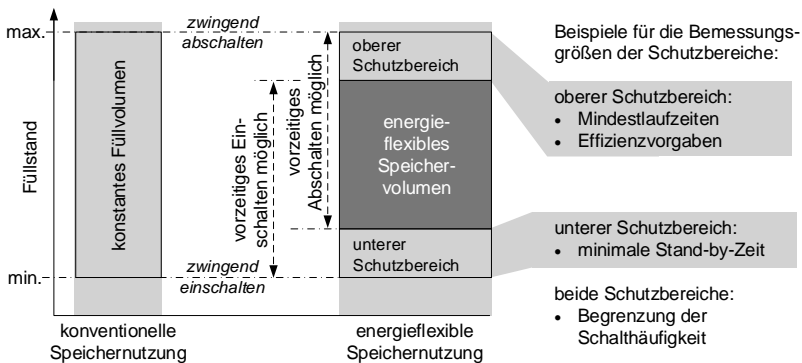


Abbildung 6.4: Beschränkung des flexiblen Einsatzbereichs des Speichers durch Schutzbereiche, in Anlehnung an POPP & ZÄH (2014)

6.3.2 Gegenüberstellung mit Alternativstrategien für spanende Werkzeugmaschinen

Im Kapitel 3 wurden diverse Ansätze verschiedener Autoren zur Bewertung, Steuerung und Umsetzung der Energieflexibilität von Produktionsanlagen dargestellt. Die Einordnung in verschiedene Betrachtungsebenen (siehe Abbildung 3.3) ließ erkennen, dass die Mehrzahl der Ansätze die Energieflexibilität auf der Anlagenebene fokussierten. Diese Ansätze können in vier Alternativstrategien überführt werden, welche im Folgenden, neben der bisher genannten Strategie auf Basis nicht-determinierter Prozesse (Energieflexibilitätsstrategie 5, kurz: EFS-5), erläutert werden. Die Abbildung 6.5 veranschaulicht zudem den Effekt der Strategien mithilfe einer Lastgangskizze.

Strategien auf der Anlagen-/Maschinenebene:

- **Zeitliche Verschiebung eines (unveränderten) Lastprofils (EFS-1):** Der Bearbeitungszeitraum eines Werkstücks wird im Rahmen von geplanten Leerlaufzeiten (Brachzeiten) der Maschine vorgezogen oder verzögert. Als Folge wird das korrespondierende Lastprofil im Ganzen

6.3 Energieflexibilitätsstrategie für spanende Werkzeugmaschinen

zu einem veränderten Zeitpunkt gestartet. Diese Strategie wird u. a. angewendet durch BEIER ET AL. (2017) und WEINERT & MOSE (2016).

- **Austausch von Lastprofilen (EFS-2):** Ein kurzfristiger Austausch der Reihenfolge der Bearbeitung von Werkstücken kann eine Veränderung des resultierenden Maschinenlastgangs erwirken. Dies ist nur dann möglich, wenn durch vor- und nachgelagerte Puffer ausreichend Teile vorhanden sind und die zusätzlichen Rüstzeiten vertretbar bzw. vernachlässigbar sind. Anwender dieser Strategie sind u. a. KELLER & REINHART (2015), SCHULTZ ET AL. (2014) und WILLEKE ET AL. (2017).
- **Veränderung des Lastprofils durch Unterbrechen (EFS-3):** Der Produktionsvorgang an einer Anlage wird durch energieflexible Maßnahmen innerhalb eines Produkts vollständig unterbrochen und zu einem späteren Zeitpunkt fortgesetzt (angewendet durch: z. B. GRASSL 2015).

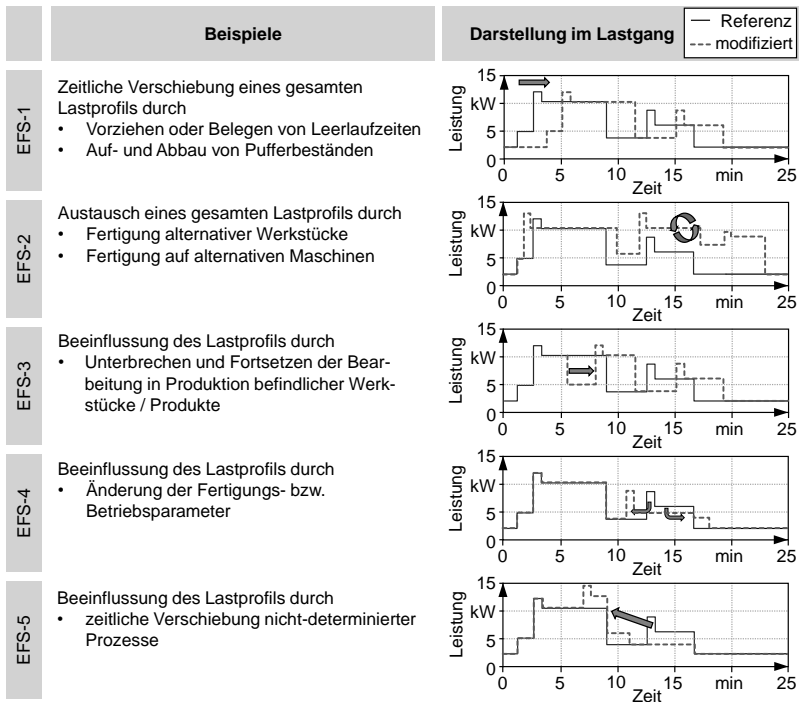


Abbildung 6.5: Übersicht der Energieflexibilitätsstrategien für Produktionsanlagen

Strategien auf der Komponentenebene:

- **Veränderung des Lastprofils durch Änderung der Betriebsart von Komponenten (EFS-4):** Die gezielte Beeinflussung des Betriebs (z. B. Drehzahl) einzelner Komponenten resultiert in abweichenden Leistungsbedarfen. Diese Strategie setzt drehzahlvariable Antriebe und die Kenntnis der spezifischen Leistungsbedarfe voraus (angewendet durch: z. B. BRECHER ET AL. 2017).
- **Veränderung des Lastprofils durch die zeitliche Steuerung nicht-determinierter Prozesse (EFS-5):** Zur Beeinflussung der nicht-determinierten Prozesse auf der Komponentenebene, siehe Abschnitt 6.3.1 oder auch POPP & ZAEH (2014) und ABELE ET AL. (2016).

Die Entscheidung für eine Strategie schließt dabei keinesfalls die Maßnahmen weiterer Strategien aus. Die parallele Verwendung mehrerer Strategien sollte – gerade auf der Maschinenebene – die Regel sein (u. a. durch SCHULTZ ET AL. 2014, GRASSL 2015 oder WEINERT & MOSE 2016).

6.3.3 Betrachtung der Anforderungserfüllung

Eine neue Möglichkeit, spanende Werkzeugmaschinen energieflexibel zu betreiben, ist die in Abschnitt 6.3.1 vorgestellte Energieflexibilitätsstrategie (EFS-5) auf Komponentenebene. Wie gezeigt, ergänzt diese Strategie bereits bestehende Ansätze für Produktionsanlagen. Daher werden im Folgenden sämtliche, im vorangegangenen Abschnitt aufgeführte Energieflexibilitätsstrategien den speziellen Anforderungen gegenübergestellt. Aus Basis relevanter Vorarbeiten wird verifiziert, ob eine Erfüllung der Anforderungen zu erwarten ist. Die folgenden Ausführungen sind in Abbildung 6.6 übersichtlich zusammengefasst.

Die Erfüllung der ersten speziellen Anforderung (keine negative Beeinflussung von Arbeitsgenauigkeit und Mengenleistung) ist im Falle der ersten beiden Strategien auf Maschinenebene zu erwarten, da hier keine Eingriffe in die Fertigung eines Werkstücks an sich vorgenommen werden. Da im Falle der EFS-3 eine Unterbrechung der Fertigung Auswirkungen auf die Bauteilqualität ausübt (z. B. durch thermische Effekte), ist die Anforderungserfüllung hier fraglich, ebenso bei der EFS-4, welche eine direkte Alternierung von Prozessparametern vorsieht. Da in EFS-5 lediglich nicht-determinierte Prozesse im Fokus stehen, werden hier keine negativen Auswirkungen erwartet.

6.3 Energieflexibilitätsstrategie für spanende Werkzeugmaschinen

Energieflexibilitätsstrategie	Spezielle Anforderungen (nach Abb. 5.4)					
	Zustandsdimension			Zeitdimension		Kostendim.
	1	2	3	4	5	6
EFS-1	●	●	●	●	◐	*)
EFS-2	●	●	●	●	◐	
EFS-3	◐	●	●	○	◐	
EFS-4	◐	●	◐	●	●	
EFS-5	●	●	●	●	●	

Anforderungserfüllung

- zu erwarten
- ◐ bedingt zu erwarten
- nicht zu erwarten
- *) Gegenstand weiterer Untersuchungen (Kap. 8)

Abbildung 6.6: Potenzielle Erfüllung der speziellen Anforderungen durch die Energieflexibilitätsstrategien

Der reine automatisierte (Lese-)Zugriff auf die aktuellen Daten der einzelnen Leistungsstufen (spezielle Anforderung 2, kurz: sp. Anf. 2) ist in allen Strategien uneingeschränkt möglich, sofern dies infrastrukturell umgesetzt ist. Daher ist eine Erfüllung der zweiten speziellen Anforderung zu erwarten. Der direkte Eingriff mit der Möglichkeit der Steuerung (sp. Anf. 5) ist auf der Maschinenebene nur eingeschränkt möglich, da individuelle Zielkonflikte mit der Produktionsplanung und -steuerung und den hierfür notwendigen Instanzen abzusehen sind. Da diese Instanzen in der Regel keinen direkten Einfluss auf der Komponentenebene besitzen, wird hier eine Erfüllung als realistisch angesehen.

Eine Leistungsstufe wird als ineffizient im Sinne der speziellen Anforderung 3 betrachtet, wenn diese Leistungsstufe im regulären Betrieb aus wirtschaftlichen Gründen gewöhnlich nicht gewählt wird. Mit Ausnahme der EFS-4 werden durch Energieflexibilitätsmaßnahmen keine derartigen Leistungsstufen gefordert. Daher ist die Erfüllung lediglich bei der EFS-4 fraglich. Die Strategie EFS-3 sieht als Maßnahme das direkte Unterbrechen der laufenden Bearbeitung eines Werkstücks vor. Da diese Maßnahme in direktem Widerspruch zur vierten speziellen Anforderung steht, ist die Anforderungserfüllung in diesem Fall ausgeschlossen. Die sechste spezielle Anforderung kann zum derzeitigen Erkenntnisstand noch nicht bewertet werden. Weitere Untersuchungen hierzu sind in Kapitel 8 aufgeführt.

Es zeigt sich, dass die EFS-1, EFS-2 und EFS-5 eine weitgehende Erfüllung der speziellen Anforderungen erwarten lassen. Daher wird der Fokus der weiteren Ausführungen auf diese Strategien gelegt, während die Strategien EFS-3 und EFS-4 nicht mehr weiterverfolgt werden. Die Strategien auf Maschinenebene

6 Methodik zur Identifikation und Bewertung der Energieflexibilität

(EFS-1, EFS-2) sind bereits literaturseitig sehr gründlich behandelt, weshalb diese im Zuge der Anwendung in Kapitel 7 wieder aufgegriffen werden.

6.4 Methode zur Identifikation geeigneter Maschinenkomponenten

Das Vorgehen zur Identifikation flexibler Einzellasten lässt eine erste Einschätzung der Energieflexibilität einer Maschine zu, ohne die flexiblen Subsysteme (Komponenten) der Maschine zu benennen und deren individuelles Potenzial zu quantifizieren. Daher wird eine Methode aufgezeigt, welche es ermöglicht, einzelne Subsysteme einer Werkzeugmaschine anhand zweier Eigenschaften hinsichtlich ihrer Eignung für einen energieflexiblen Betrieb zu untersuchen. Dies stellt den ersten Teil der *Methodik zur Identifikation und Bewertung der Energieflexibilität* dar.

6.4.1 Eingrenzung des Suchraums

Als erster Schritt wird der Suchraum auf diejenigen Subsysteme eingegrenzt, die zu einem großen Teil zum Gesamtenergiebedarf der Maschine beitragen. Hier bieten sich sowohl die Absolut- als auch die Relativ-Messmethode (siehe Abschnitt 2.2.2) an, um die jeweiligen Energieanteile während des Produktivbetriebs zu bestimmen. Der resultierende Messaufwand direkt zu Beginn der Untersuchung wäre aufgrund der Vielzahl an Subsystemen bzw. Einzelkomponenten noch verhältnismäßig groß. Als Abhilfe ist die Recherche der (Nenn-)Leistungsbedarfe der Subsysteme aus der technischen Dokumentation der Maschine oder aus Datenblättern ein sinnvollerer Initialschritt. Zwar bedeutet dies eine gewisse Unschärfe für die Eingrenzung des Suchraums, doch da die ausgewählten Systeme im weiteren Verlauf ohnehin im Detail energetisch vermessen werden, wird keine Abweichung im letztlichen Resultat der Energieflexibilitätsbewertung erwartet. Als zusätzliche Hilfestellung zur vollständigen Erfassung bieten sich der Schaltplan oder die Stückliste der Maschine an. Die Tabelle 6.2 zeigt eine beispielhafte Auflistung der Leistungsangaben der Subsysteme eines fiktiven Bearbeitungszentrums.

Die Datenblattangaben beziehen sich auf den Bedarf der Systeme unter Nennlast. Die Summe sämtlicher Leistungsangaben entspräche damit dem unwahrscheinlichen Fall, dass alle Systeme gleichzeitig unter voller Auslastung in Betrieb wären. Die Fachliteratur sieht für die Umrechnung von Einzellasten zu einer Gesamtlast sogenannte *Gleichzeitigkeitsfaktoren* vor (siehe hierzu auch MÜLLER 2009, HELBING 2010). Diese dienen zur Auslegung einer Elektroinstallation in Gebäuden und basieren in der Regel auf Erfahrungswerten. Dadurch

6.4 Methode zur Identifikation geeigneter Maschinenkomponenten

können das fabrikinterne Netz, Maschinenanschlüsse, Leitungsquerschnitte etc. kleiner dimensioniert werden, was zu günstigeren Anschaffungskosten und damit zu einer deutlich höheren Wirtschaftlichkeit führen kann.

Tabelle 6.2: Relevante Datenblattangaben über die Nennleistungsaufnahme der Subsysteme eines beispielhaften Bearbeitungszentrums

Bearbeitungszentrum	
Nennleistung in kW	
Haupt-/Vorschubantriebe	55,0
Kühlschmierstoffversorgung	7,2
Spindelkühlung	4,0
Schaltschrankkühlung	1,7
Hydraulik Wzg.-klemmung	1,1
Arbeitsraumabsaugung	1,7
Späneförderer	0,6
24-Volt-Versorgung	0,2
Sonstige	0,9

Für die Auslegung der Installation innerhalb von Maschinen und Anlagen sind laut MÜLLER (2009) hingegen kaum Anhaltspunkte verfügbar. Für die Eingrenzung des Suchraums der Maschine spielt eine auslastungsbezogene Bewertungskomponente, wie sie der Gleichzeitigkeitsfaktor darstellt, eine wichtige Rolle. Ein Subsystem, welches zwar eine hohe Leistungsaufnahme besitzt, aber kaum zum Einsatz kommt, wäre durch eine rein leistungsmäßige Betrachtung überbewertet, da es in Wahrheit nur geringfügig zum resultierenden Energiebedarf der Maschine beiträgt. Daher werden im kommenden Abschnitt entsprechende Faktoren vorgestellt.

Gleichzeitigkeitsfaktoren für spanende Werkzeugmaschinen

Abweichend von der Aussage von MÜLLER (2009) verfügen Werkzeugmaschinenhersteller über interne Berechnungsvorschriften zur Dimensionierung der Leistungselektronik und der Anschlussleistung ihrer Maschinen, welche diese aber aus nachvollziehbaren Gründen nicht offenlegen. Sie beinhalten in der Regel langjähriges Erfahrungswissen und stellen eine wichtige Grundlage für die Auslegung im Zuge von Neuentwicklungen dar. Da diese Werte somit für die folgenden Ausführungen nicht verfügbar sind, werden im Folgenden

6 Methodik zur Identifikation und Bewertung der Energieflexibilität

Gleichzeitigkeitsfaktoren² für spanende Werkzeugmaschinen hergeleitet, welche das unternehmensinterne Wissen substituieren sollen. Analog zur Berechnung einer realistischen Maximalleistung (z. B. durch MÜLLER 2009) werden die Nennleistungsangaben P_i der Subsysteme i mit spezifischen Gleichzeitigkeitsfaktoren g_i multipliziert. Die jeweiligen Einzelprodukte je Subsystem werden dann gemäß

$$P_{max} = \sum_i P_i \cdot g_i \quad (6.1)$$

zur *realistischen Maximalleistung* P_{max} der Maschine aufsummiert. Die Bestimmung von g_i anhand von Erfahrungswerten, wie es bisher Stand der Technik ist, wird hier durch das Produkt der Werte zweier Kategorien ersetzt. Diese Kategorien beschreiben die *Wert-* und die *Zeitdimension* des betrachteten Systems i und werden im Folgenden erläutert. Das Berechnungsschema ist in Abbildung 6.7 gezeigt.

		Ist der Antrieb des Subsystems drehzahl geregelt? (Wertdimension)	
		nein (1,00)	ja (0,50)
Laufzeitanteil (Zeitdimension)	Das Subsystem ist ständig in Betrieb, sofern die Maschine eingeschaltet ist. (1,00)	$g_i = 1,00$	$g_i = 0,50$
	Das Subsystem ist ständig in Betrieb, sofern die Maschine produziert. (0,66)	$g_i = 0,66$	$g_i = 0,33$
	Das Subsystem ist teilweise in Betrieb, sofern die Maschine produziert. (0,33)	$g_i = 0,33$	$g_i = 0,17$

Abbildung 6.7: Schema zur Ermittlung der Gleichzeitigkeitsfaktoren für Subsysteme von Werkzeugmaschinen

- Die **Wertdimension** wird dabei durch die Charakteristik der Leistungsaufnahme gegeben. Während ein unregelmäßiger Antrieb im Regelfall der Leistungsaufnahme laut Datenblatt folgt, bezieht sich die Angabe bei einem drehzahlgeregelten Antrieb auf einen Maximalwert. Die tatsächliche Leistungsaufnahme liegt darunter, weshalb der Gleichzeitigkeitsfaktor entsprechend niedriger gewählt wird.

²Für den hier angedachten Anwendungsfall der Energieflexibilität ist der Begriff des *Gleichzeitigkeitsfaktors* nicht zwingend treffend. Vielmehr wäre eine Bezeichnung z. B. als *Einsatzfaktor* besser gewählt. Da aber die Herleitung und die Verrechnung für beide Faktoren identisch sind, wird hier der etablierte Begriff verwendet.

6.4 Methode zur Identifikation geeigneter Maschinenkomponenten

- Die **Zeitdimension** wird durch drei Abstufungen des Laufzeitanteils repräsentiert, welche sich auf die einzelnen Betriebsphasen der Maschine beziehen. Ist ein System in Betrieb, sobald die Maschine eingeschaltet ist, so hat es einen höheren Wert als ein System, welches lediglich während des Produktivbetriebs aktiv ist.

Nach der Ermittlung der Gleichzeitigkeitsfaktoren für die Subsysteme der Tabelle 6.2 werden diese gemäß der Gleichung 6.1 mit den Nennleistungswerten P_i multipliziert und auf prozentuale Anteile an der *realistischen Maximalleistung* P_{max} umgerechnet. Das Ergebnis ist in der Tabelle 6.3 dargestellt.

Tabelle 6.3: Leistungsanteile der Subsysteme nach Verrechnung mit den Gleichzeitigkeitsfaktoren des beispielhaften Bearbeitungszentrums

	Bearbeitungszentrum		
	g_i	$g_i \cdot P_i$	Anteil an P_{max} in %
Haupt-/Vorschubantriebe	0,33	18,2	64,3
Kühlschmierstoffversorgung	0,33	2,4	8,5
Spindelkühlung	1,00	4,0	14,1
Schalterschrankkühlung	1,00	1,7	6,0
Hydraulik Wzg.-klemmung	0,33	0,4	1,4
Arbeitsraumabsaugung	0,33	0,6	2,1
Späneförderer	0,33	0,2	0,7
24-Volt-Versorgung	1,00	0,2	0,7
Sonstige ³	0,66	0,6	2,2

Identifikation der relevanten Subsysteme

Nach der Recherche der Datenblattangaben und der Verrechnung mit den jeweiligen Gleichzeitigkeitsfaktoren werden die Subsysteme nach ihrem Anteil an der Gesamtleistung gestaffelt und analog einer ABC-Analyse (nach DICKIE 1951) kategorisiert. Dabei werden die Grenzen der Kategorien auf die dazu üblichen Werte von 80 % für A, 15 % für B und 5 % für C festgelegt. Abbildung

³Für alle *sonstigen* Subsysteme wird pauschal ein g_i von 0,66 angenommen.

6 Methodik zur Identifikation und Bewertung der Energieflexibilität

6.8 zeigt die jeweilige Zuordnung der Subsysteme zu den Kategorien. Die Berechnung führt zu dem Ergebnis, dass neben den dominierenden Haupt- und Vorschubantrieben auch die Spindelkühlung eine hohe Priorität hinsichtlich des abgeschätzten Energieanteils aufweist und daher in der A-Kategorie aufgeführt wird. Die Subsysteme in der B-Kategorie haben überwiegend einen hohen einstelligen Prozentanteil, weshalb sie im weiteren Verlauf mitberücksichtigt werden. Bevor diese zum energieflexiblen Betrieb befähigt werden, muss zwingend deren eindeutige Eignung durch weitere Untersuchungen bestätigt werden. Innerhalb der C-Kategorie finden sich zahlreiche kleinere Verbraucher wieder, die für die weitere Betrachtung keinen ausreichenden Einfluss auf den Energiebedarf ausüben und daher für die Folgeschritte ausscheiden.

Kategorie	Subsysteme	Anteil	Betrachtungsfokus
A (80 %)	Haupt-/Vorschubantriebe	64,3 %	
	Spindelkühlung	14,1 %	
B (15 %)	Kühlschmierstoffversorgung	8,5 %	
	Schalterschrankkühlung	6,0 %	
	Arbeitsraumabsaugung	2,1 %	
C (5 %)	Hydraulik der Werkzeugklemmung	1,4 %	
	Späneförderer	0,7 %	
	24-Volt-Versorgung	0,7 %	
	Sonstige	2,2 %	

Abbildung 6.8: ABC-Klassifizierung der Subsysteme, gezeigt an den Beispielen aus Tabelle 6.3

Somit verbleiben fünf Subsysteme, die einer detaillierten Analyse hinsichtlich der Energieflexibilität unterworfen werden. Eine Anwendung der Bewertung anhand der Eigenschaften realer Maschinen erfolgt in Kapitel 7. Das Zahlenbeispiel aus den Tabellen 6.2 / 6.3 muss nicht mehr weiter in die Betrachtung einbezogen werden.

6.4.2 Definition der Bewertungsparameter

Im vorangegangenen Abschnitt wurde der Einfluss der Subsysteme auf den Energiebedarf von Werkzeugmaschinen quantifiziert, ohne dabei auf die Energieflexibilität an sich einzugehen. Die Abhandlungen im Folgenden zeigen nun ein Vorgehen auf, wie auch die Eignung der Subsysteme für den energieflexiblen Betrieb als solche bewertet werden kann. Somit kann der Betrachtungsraum, der zuletzt auf energieintensivere Subsysteme reduziert wurde, hinsichtlich der Energieflexibilität weiter eingeschränkt werden.

6.4 Methode zur Identifikation geeigneter Maschinenkomponenten

Die zu definierenden Bewertungsparameter beziehen sich auf den Energieflexibilitätsansatz aus Abschnitt 6.3 (EFS-5, *Veränderung des Lastprofils durch die zeitliche Verschiebung nicht-determinierter Prozesse*), welcher bewusst den zeitlichen Freiheitsgrad eines Subsystems zur Veränderung des Leistungsbedarfs über die Zeit nutzt. Dabei stellen die Abhängigkeiten im Betrieb eines Subsystems die Randbedingungen dar, die zwingend zu berücksichtigen sind. Diese Abhängigkeiten können zum einen direkt auf das Lastprofil einwirken, indem z. B. die Maschinensteuerung den zeitlichen Ablauf der Betriebszeiten vorgibt, zum anderen aber auch indirekt über einen Prozess, wenn z. B. ein Bearbeitungsschritt zu einer hohen Wärmeentwicklung führt, die wiederum aktiv gekühlt werden muss.

Sofern eine Anforderung seitens des übergeordneten Bearbeitungsprozesses der Maschine besteht, wird die Maschinensteuerung ein entsprechendes Stell-signal an ein Subsystem ausgeben, welches dieses umsetzt und die notwendige elektrische Leistung aufnimmt. Die Bewertung wird auf Basis dieser beiden Ablaufschritte vorgenommen. Hierzu dienen zwei Fragestellungen, welche in der Abbildung 6.9 gezeigt sind und für deren Beantwortung in den folgenden Abschnitten entsprechende Taxonomien erarbeitet werden.

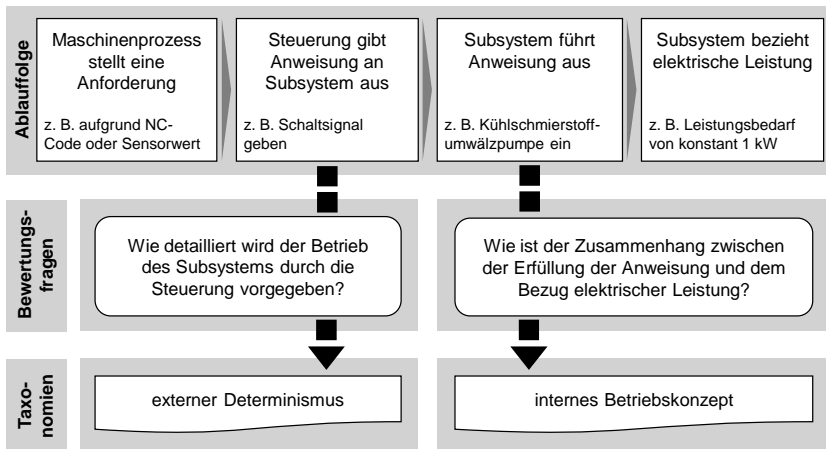


Abbildung 6.9: Ablauffolge und Bewertungsfragen

Taxonomie des externen Determinismus

Die erste Bewertungsfrage bezieht sich auf den Aspekt, wie *detailliert der Betrieb des Subsystems durch die Steuerung vorgegeben wird*. Die Granula-

6 Methodik zur Identifikation und Bewertung der Energieflexibilität

rität der Steuersignale erstreckt sich von einfachen, in zeitlicher Dimension übergeordneten Ein-/Aus-Signalen bis hin zu zeitaufgelösten Vorgaben von Prozessparametern. Diese Bandbreite wird anhand des Bewertungsparameters *externer Determinismus* in vier Klassen unterteilt (siehe Abbildung 6.10):

- **E.1** (Steuersignal langfristig ein/aus): Ein Subsystem ist über einen Zeitraum eingeschaltet, der länger als die typische Bearbeitungszeit eines Werkstücks, z. B. Maschinensteuerung, Maschinenkühlung ist.
- **E.2** (ein/aus in festen Zeitintervallen): Ein Subsystem wird seitens der Steuerung in regelmäßigen, konstanten Abständen ein- und ausgeschaltet, z. B. Späneförderer (sofern nicht durch ein NC-Programm vorgegeben).
- **E.3** (ein/aus in zeitgesteuerten Intervallen): Das Subsystem wird programm- oder sensorgesteuert im Ganzen ein- und ausgeschaltet, z. B. die Hochdruck-KSS-Pumpe, deren Intervall über das NC-Programm vorgegeben wird.
- **E.4** (parametergesteuert): Das Subsystem wird in der Zeit- und Wertdimension gesteuert, z. B. Motorspindel, Vorschubantrieb.

Wie detailliert wird der Betrieb des Subsystems durch die Steuerung vorgegeben?

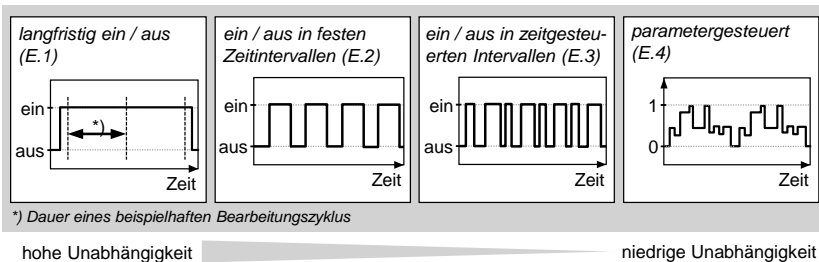


Abbildung 6.10: Taxonomie des externen Determinismus, in Anlehnung an POPP & ZAETH (2014)

Taxonomie des internen Betriebskonzepts

Neben dem externen Faktor spielt der Vorgang, welcher nach Eingang des Steuersignals innerhalb des Subsystems abläuft, die zweite zentrale Rolle. Auch hierzu wird eine Bewertungsfrage formuliert, welche die *Abfolge zwischen dem Eingang des Signals und der Energiewandlung* abfragt. Die Einstufung erfolgt ebenfalls in vier Klassen (siehe Abbildung 6.11):

6.4 Methode zur Identifikation geeigneter Maschinenkomponenten

- **I.1:** Die eingehende elektrische Energie wird in die (vom Subsystem abgehende) Nutzenergie gewandelt und vor der Abgabe in einem Speicher auf Vorrat gehalten. Der nachgelagerte Prozess wird im Normalfall direkt aus dem Speicher versorgt.
- **I.2:** Ein Pufferspeicher ist vorhanden, dessen Kapazität geringer ist als die einmalige Nutzenergieabgabe. Der mit Nutzenergie versorgte Prozess ist robust gegenüber kurzzeitigen Abweichungen der Versorgung (z. B. kurze Überschreitung der Füllgrenzen des KSS-Reintanks).
- **I.3:** Wie I.2, der nachgelagerte Prozess ist in dieser Klasse aber empfindlich gegenüber Abweichungen in der Nutzenergieversorgung (z. B. Unterschreiten von Druckgrenzen der Spannhydraulik).
- **I.4:** Die Energiewandlung findet kontinuierlich oder bedarfsgeregelt statt, z. B. mit einem drehzahlgeregelten Antrieb an einer Pumpe. Sehr kleine Speicher können zur Glättung der Nutzenergie vorgehalten sein.

Wie ist der Zusammenhang zwischen der Erfüllung der Anweisung und dem Bezug elektrischer Leistung?

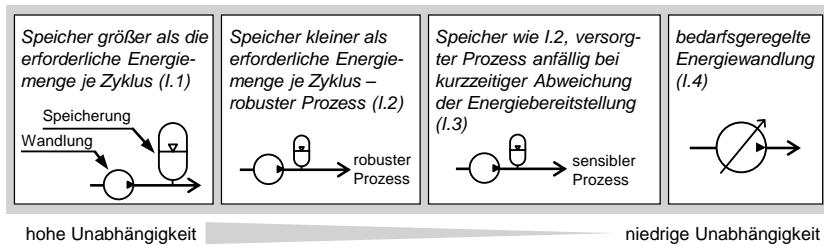


Abbildung 6.11: Taxonomie des internen Betriebskonzepts, in Anlehnung an POPP & ZAEH (2014)

Die Versorgung aus Speichern entkoppelt die Energiebereitstellung vom tatsächlichen Energieverbrauch und führt dadurch zu einem zeitunabhängigen Charakter, was eine wichtige Eigenschaft für die Energieflexibilität darstellt. Der Begriff des *Speichers* ist dabei, wie bereits in Abschnitt 6.3.1 erläutert, nicht auf die klassische Bedeutung zur Bevorratung von Mengen oder Volumina, z. B. als Tank, beschränkt. Vielmehr sind auch physikalische Größen, wie die Temperatur in einem Kältemittelkreis oder Partikelkonzentrationen in einem Luftvolumen, ebenfalls als Speichermöglichkeit anzusehen.

Auf Basis der eingeführten Bewertungsparameter des *externen Determinismus* und des *internen Betriebskonzepts* wird die komponentenbezogene Bewertung

6 Methodik zur Identifikation und Bewertung der Energieflexibilität

von spanenden Werkzeugmaschinen im nächsten Abschnitt 6.4.3 fortgeführt. Hierfür werden die beiden Parameter in einen Energieflexibilitätsindex überführt, wodurch eine eindimensionale Bewertung ermöglicht wird.

6.4.3 Ableitung der Energie-Prozess-Unabhängigkeit

Nach der Einordnung der Eigenschaften der Subsysteme mithilfe der Taxonomien wird im Folgenden die letztliche Ermittlung eines individuellen Energieflexibilitätsindex beschrieben. Dieser ermöglicht es, die Menge an energieintensiven Subsystemen auf diejenigen zu begrenzen, die einen energieflexiblen Betrieb im Kontext der gestellten Anforderungen zulassen. Abbildung 6.12 zeigt die Energie-Prozess-Unabhängigkeits-Matrix (EPU-Matrix) nach POPP & ZAEH (2014), anhand derer aus der Verschränkung der zwei bisherigen Bewertungsgrößen der *Energy Independence Indicator (EII)* ermittelt werden kann. Der EII stellt einen Index für Energieflexibilität dar und bewertet nach POPP & ZAEH (2014) den Unabhängigkeitsgrad zwischen den Vorgaben der Maschinensteuerung und dem resultierenden Energiebedarf eines Subsystems. Es können vier Eignungsstufen von Doppel-Plus „++“ bis Minus „-“ erreicht werden. Während die Systeme mit einer Bewertung von „++“ direkt für die weitere Untersuchung in Betracht kommen, bedarf es bereits bei einer Bewertung von „+“ zusätzlicher Entscheidungsgrundlagen. An dieser Stelle wird ein deutlicher Leistungsanteil (A-Klassifizierung des Subsystems, siehe Abschnitt 6.8) als ausschlaggebendes Argument angesehen. Somit wird folgende Vorschrift festgelegt:

Ein Subsystem ist genau dann für den energieflexiblen Einsatz geeignet, wenn entweder:

- ein EII von „++“ bei gleichzeitiger Klassifizierung in A bzw. B,
- oder ein EII von „+“ bei gleichzeitiger Klassifizierung in A vorliegt.

Abschließend lässt sich für diesen Abschnitt zusammenfassen, dass sich durch die eingeführte Methode jene Subsysteme einer spanenden Werkzeugmaschine identifizieren lassen, die zum einen mit einem nennenswerten Anteil zum Gesamtenergiebedarf der Maschine beitragen und zum anderen über eine hohe Eignung für den energieflexiblen Einsatz verfügen.

6.5 Methode zur Quantifizierung des Energieflexibilitätspotenzials

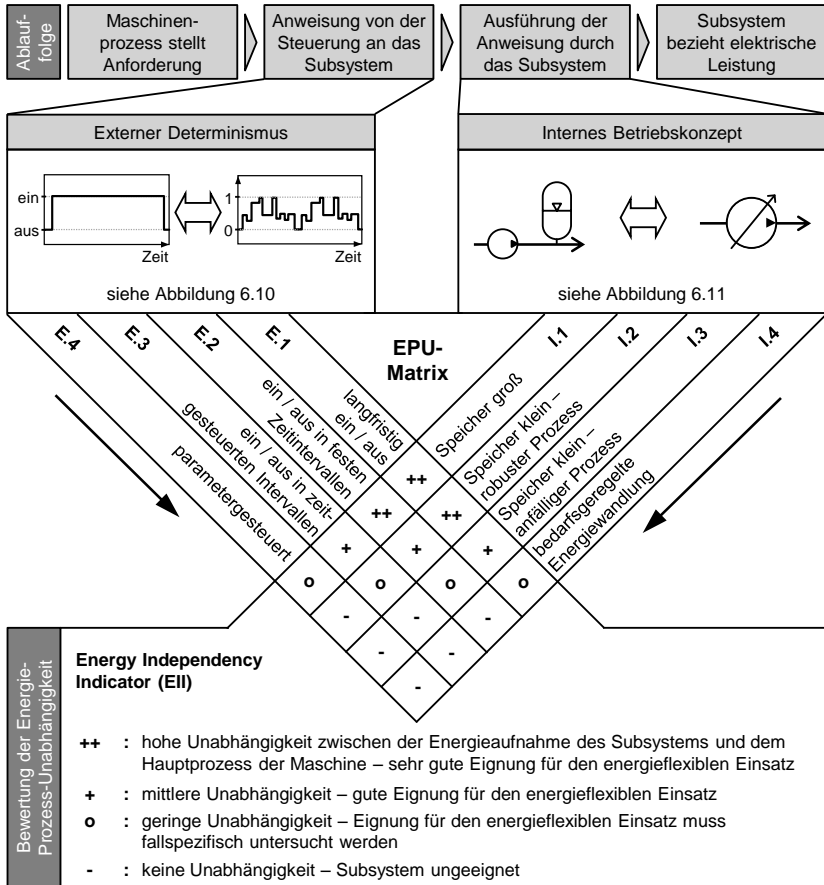


Abbildung 6.12: Energie-Prozess-Unabhängigkeits-Matrix (EPU-Matrix) in Anlehnung an POPP & ZAEH (2014)

6.5 Methode zur Quantifizierung des Energieflexibilitätspotenzials

Mit der Kenntnis derjenigen Subsysteme, welche sowohl einen deutlichen Energiebedarf besitzen als auch energieflexibel einsetzbar sind, ist als nächstes das zahlenmäßige Energieflexibilitätspotenzial von Interesse. Daher werden in den folgenden Abschnitten ein Quantifizierungsmodell und ein aussagekräftiges Kennzahlensystem vorgestellt, welche eine Bezifferung des Energieflexibilitätspotenzials ermöglichen.

6.5.1 Modellvorstellung

Sowohl die Ausführungen von POPP & ZAEH (2014) und ABELE ET AL. (2016) als auch die des Abschnitts 6.3.1 haben gezeigt, dass Systeme, die über eine Leistungsaufnahme mit einem diskreten Hoch- und einem ebensolchen Tief-Niveau im zyklischen Wechsel verfügen (siehe Abbildung 6.3), das höchste Energieflexibilitätpotenzial im Zuge der gewählten Strategie aufweisen. Der Grund hierfür ist, dass in der Regel eine Speichermöglichkeit vorhanden ist. Somit können diese Subsysteme kurzfristig zu- oder abgeschaltet werden, ohne dass negative Auswirkungen auf die Produktivität und Produktqualität des Fertigungsprozesses ausgeübt werden. Für die jeweils auftretenden Betriebszustände (Hoch-/Tief-Niveaus) und die jeweiligen Leistungsbedarfe und Verweildauern wurden in der Vergangenheit bereits folgende Definitionen erbracht (siehe POPP ET AL. 2016):

- **Aktivzustand:** Die produktive Phase eines Systems wird als Aktivzustand mit einer durchschnittlichen Leistungsaufnahme \bar{P}_A und einer mittleren aktiven Periodenverweildauer (*Aktivzeit*) \bar{t}_A bezeichnet.
- **Passivzustand:** Alle nicht-produktiven Phasen (Stand-by-Phasen, Aus, etc.) einer Komponente im regulären (geplanten) Betriebsablauf bilden die Passivzustände mit jeweils einer durchschnittlichen passiven Leistungsaufnahme \bar{P}_P und einer mittleren passiven Periodenverweildauer (*Passivzeit*) \bar{t}_P .

Da die zugrunde liegenden Speicherkapazitäten unverändert sind, bleiben die maximalen Verweildauern der Zustände gleich. Die Zeitspannen, innerhalb derer die Möglichkeit zur Verschiebung einzelner Energiebedarfe besteht, können dabei nicht länger sein als die maximalen Verweildauern. Wird ein Aktivzustand nach der halben Laufzeit unterbrochen, so ist – unter der Annahme einer konstanten Füllrate – der Speicher zur Hälfte gefüllt und folglich steht ein Passivzustand mit hälftiger Laufzeit zur Verfügung. Auf diesem linearen Zusammenhang zwischen Zeit und Speicherfüllgrad basiert das Modell, sodass auch für weitere Unterbrechungszeitpunkte während des Aktivzustands die anteilige *korrespondierende* Passivzeit errechnet werden kann. Dasselbe gilt analog für die Unterbrechung der Passivzeit und die zugehörige Aktivzeit. Durch POPP ET AL. (2018) werden der anteilige korrespondierende Zeitraum und die resultierende Energiemenge folgendermaßen definiert:

*Die Menge an elektrischer Energie, welche zeitlich vor- oder nachgelagert werden kann, ohne die Produktivität und Qualität nachfolgender Prozesse negativ zu beeinflussen, wird als **flexible Energie** bezeichnet.*

6.5 Methode zur Quantifizierung des Energieflexibilitätspotenzials

Der zugehörige Zeitraum, um welche die flexible Energie verschoben werden kann, wird als *energetische Nutzungszeit* bezeichnet.

Die Abbildung 6.13 gibt die Kennzahlen zu verschiedenen Zeitpunkten des Maßnahmenstarts wieder. Eine Maßnahme stellt dabei eine bewusste, operative Aktion zum Abruf eines Energieflexibilitätspotenzials dar. Die energetische Nutzungszeit beginnt mit dem Start der Maßnahme (A) und endet mit dem Start einer kompensierenden Maßnahme (C, im Folgenden als „Gegenmaßnahme“ bezeichnet). Die grau hinterlegten Flächen zeigen die Energiemengen, wobei die jeweils linke Fläche die *flexible Energie* und die zweite Fläche die *Nachholenergie* beschreibt. Beide Flächen sind in der Regel gleich groß. Durch eventuelle (*Zustands-*) *Wechselenergien* können Abweichungen hiervon entstehen.

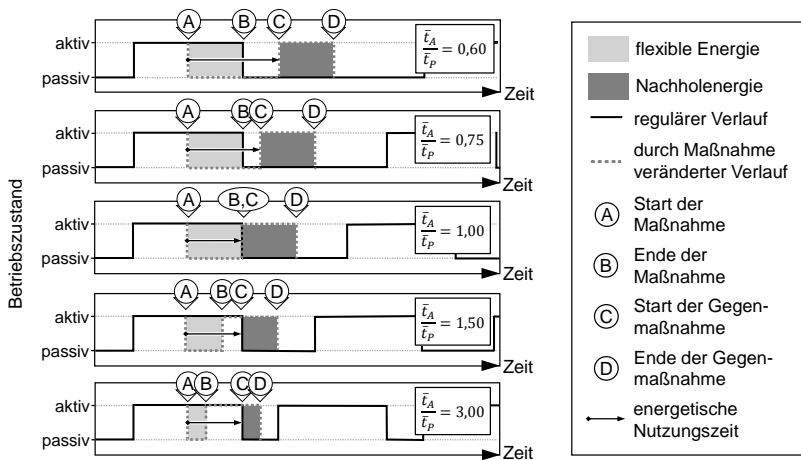


Abbildung 6.13: Flexible Energie und energetische Nutzungszeit bei verschiedenen Verhältnissen von Aktiv- zu Passivzeiten

Die lineare Grundvorschrift für die Berechnung der *energetischen Nutzungszeit* t_D lautet:

$$t_D = \tau \cdot t_{\text{targ}}, \text{ mit } \tau = \frac{t^*}{t_{\text{curr}}}, t^* \in [0; t_{\text{curr}}] \quad (6.2)$$

Dabei stellt t^* die *Laufzeit des aktuellen Betriebszustands zum Zeitpunkt des Maßnahmenstarts* dar, aus welchem sich der Zustandsanteil τ errechnen lässt. Im Beispiel der Abbildung 6.13 wird der Fall des *Unterbrechens des Aktivzustands* gezeigt. Um die Berechnung auf den allgemeinen Fall

6 Methodik zur Identifikation und Bewertung der Energieflexibilität

auszuweiten und damit auch einen vorzeitigen Start des Aktivzustands⁴ abbilden zu können, werden im Folgenden der *aktuellen Betriebszustand* (gekennzeichnet mit dem Index *curr*) und der *Ziel-Betriebszustand* (Index: *targ*) angeführt, welche beide zyklisch die durchschnittlichen Zeiten \bar{t}_A bzw. \bar{t}_P der Aktiv- und Passivzustände annehmen. Aus Abbildung 6.13 geht hervor, dass im gezeigten Fall bei einem Aktiv-Passivzeitverhältnis von $\frac{\bar{t}_A}{\bar{t}_P} > 1,00$ die energetische Nutzungszeit eine konstante untere Grenze besitzt. Dies ist daran zu erkennen, dass der Zeitraum zwischen A und C für Verhältnisse von $\frac{\bar{t}_A}{\bar{t}_P} > 1$ identisch bleibt. Dieser Umstand, der durch die Gleichung 6.2 bislang nicht berücksichtigt wird, ist auf die Annahme zurückzuführen, dass die Gegenmaßnahme erst genau dann einsetzt, wenn eine effektive Abweichung des veränderten zum regulären Leistungsbedarf auftritt. Daher wird die Gleichung 6.2 um eine Fallunterscheidung ergänzt:

$$t_D = \begin{cases} \tau \cdot t_{targ}, & \text{für } \tau > \frac{t_{curr}}{t_{curr} + t_{targ}} \\ (1 - \tau) \cdot t_{curr}, & \text{für } \tau \leq \frac{t_{curr}}{t_{curr} + t_{targ}} \end{cases} \quad (6.3)$$

Die zweite Kennzahl, die *flexible Energie* E_F , wird durch den Flächeninhalt beschrieben, der sich aus dem Zeitraum zwischen A und B (siehe Abbildung 6.13) und der zugehörigen Leistungsdifferenz ergibt. Auch ihr Verlauf ist bei einem kleiner werdenden Verhältnis $\frac{\bar{t}_A}{\bar{t}_P}$ nicht linear. Wie der Abbildung 6.13 zu entnehmen ist, bleibt E_F ab einem bestimmten Verhältnis (im Beispiel $\frac{\bar{t}_A}{\bar{t}_P} \leq 1$) konstant, da die Zeitspanne zwischen Zeitpunkt A und B per Definition nicht über die halbe Aktivzeit hinausgehen kann. Die *flexible Energie* E_F errechnet sich somit ebenfalls per Fallunterscheidung:

$$E_F = \begin{cases} (\bar{P}_{targ} - \bar{P}_{curr}) \cdot (1 - \tau) \cdot t_{curr}, & \text{für } \tau > \frac{t_{curr}}{t_{curr} + t_{targ}} \\ (\bar{P}_{targ} - \bar{P}_{curr}) \cdot \tau \cdot t_{targ}, & \text{für } \tau \leq \frac{t_{curr}}{t_{curr} + t_{targ}} \end{cases} \quad (6.4)$$

Wird bei der Berechnung der *flexiblen Energie* und der *energetischen Nutzungszeit* angenommen, dass die Startzeitpunkte t^* der Maßnahmen über den Zeitraum t_{curr} gleichverteilt sind, so kann für eine statistische Erhebung der beiden Kennzahlen (z. B. für Potenzialstudien) von einem Maßnahmenstart zur halben Laufzeit des aktuellen Betriebszustands ausgegangen werden, was einem Zustandsanteil $\tau = 0,5$ entspricht. Die Fallunterscheidungen innerhalb der Gleichungen 6.3 und 6.4 können somit gemäß Gleichungen 6.5 und 6.6 vereinfacht ausgedrückt werden (mathematische Herleitung, siehe Anhang A.1):

⁴Die Maßnahme *vorzeitiger Start eines Aktivzustands* ist identisch mit dem *Unterbrechen des Passivzustands*.

6.5 Methode zur Quantifizierung des Energieflexibilitätspotenzials

$$t_{D_{0,5}} = 0,5 \cdot \max(t_{curr}, t_{targ}) \quad (6.5)$$

$$E_{F_{0,5}} = 0,5 \cdot (\bar{P}_{targ} - \bar{P}_{curr}) \cdot \min(t_{curr}, t_{targ}) \quad (6.6)$$

Beide Kennzahlen werden im folgenden Abschnitt zu einem Kennzahlensystem ergänzt, bevor eine konkrete Berechnung in Kapitel 7 am Beispiel zweier Maschinen erläutert wird.

6.5.2 Kennzahlensystem zur Quantifizierung des Energieflexibilitätspotenzials

Die Kennzahlen der *flexiblen Energie* und der *energetischen Nutzungszeit* werden im Folgenden um drei weitere Kennzahlen ergänzt. Diese stellen weitere wichtige Eigenschaften zur Bewertung und Charakterisierung der Energieflexibilität dar und beschreiben das Potenzial anhand zweier zeitlicher Aspekte sowie eines Leistungsaspekts. In der folgenden Übersicht wird das gesamte Kennzahlensystem aufgeführt:

- **Leistungsdifferenz:** Mithilfe der Leistungsdifferenz wird die direkte Wirkung einer Maßnahme auf den Leistungsbedarf angegeben. Sie wird durch die Subtraktion der gemittelten Leistungswerte zweier Betriebszustände errechnet: $P_{\Delta} = \bar{P}_{targ} - \bar{P}_{curr}$
- **Maximale Reaktionszeit:** Einzelne Maßnahmen setzen Vorlaufzeiten voraus, welche von verschiedener Natur sein können und in der maximalen Reaktionszeit t_{resp} berücksichtigt sind. Dies sind Zeiten, welche technisch erforderlich sind, um ab dem Zeitpunkt der Entscheidung die angestrebte Leistungsdifferenz zu erzielen (siehe Abbildung 6.14).
- **Zykluszeit:** Die Summe aus der Aktiv- und der Passivzeit ($\bar{t}_A + \bar{t}_P$) im regulären Fall ist die Zykluszeit t_{cycle} . Da je Zyklus nur eine Maßnahme durchgeführt werden kann, wird durch diese Kennzahl ein Anhaltspunkt für die Dauer bis zu einer erneuten Maßnahmendurchführung gegeben. Die Invertierung dieser Kennzahl ergibt die *Maßnahmenhäufigkeit*.
- **Flexible Energie:** Die Menge an elektrischer Energie, welche zeitlich vor- oder nachgelagert werden kann, ohne die Produktivität und Qualität nachfolgender Prozesse negativ zu beeinflussen (gemäß der Definition aus Abschnitt 6.5.1).
- **Energetische Nutzungszeit:** Der zugehörige Zeitraum, um welchen die flexible Energie verschoben werden kann (gemäß Abschnitt 6.5.1).

6 Methodik zur Identifikation und Bewertung der Energieflexibilität

Da mit der Reaktions-, der Zyklus- und der energetischen Nutzungszeit vermehrt Zeitparameter genannt werden, wird in Abbildung 6.14 eine Übersicht der verschiedenen Elemente der Zeitdimension aufgelistet. Diese soll die Vergleichbarkeit mit weiteren Kennzahlensystemen, die z. B. für Alternativstrategien entwickelt (siehe GRASSL 2015) oder als projektbezogene Standards definiert wurden (siehe MOOG ET AL. 2017), ermöglichen.

Autor(en) bezogene Fähigkeit	Zeiten vor der Maßnahmen- auswahl	Ereignisse Maßnahme ausgewählt Start der Maßnahmen- umsetzung Anlauf der Maßnahme Wirkeintritt der Maßnahme Ende der Maßnahmen- wirkung Ende der Maßnahme Maßnahme erneut verfügbar
DORMAYER (1986, S. 150) <i>allgemeine Flexi- bilität der Produktion</i>	<ul style="list-style-type: none"> Wahrnehmung Erkenntnis Entscheidung 	
SCHELLMANN (2012, S. 92) <i>Mengenflexibilität</i>		
GRAßL (2015, S. 21) <i>Energieflexibilität</i>	<ul style="list-style-type: none"> Wahrnehmung Entscheidung 	
WECKMANN & EISEN- HAUER (2017, S. 6) <i>Energieflexibilität</i>	<ul style="list-style-type: none"> Wahrnehmung Entscheidung 	
MOOG ET. AL. (2017, S. 855) <i>Energieflexibilität</i>		
eingeführtes Kenn- zahlensystem der vorliegenden Arbeit <i>Energieflexibilität</i>		

Falls nicht anderweitig benannt, wird den Zeitbezeichnungen seitens der Autoren stets ein -zeit, ein -dauer oder ein gleichbedeutender Begriff nachgestellt. Darauf wurde hier zugunsten der Übersichtlichkeit verzichtet.

Abbildung 6.14: Elemente der Zeitdimension innerhalb der Flexibilitätstheorie ausgewählter Autoren

Die bisherigen Ansätze beschreiben die Zeitdimension in sequenziellen Elementen (z. B. WECKMANN & EISENHAUER 2017). Das im vorangegangenen Abschnitt vorgestellte Kennzahlensystem bezieht sich hingegen auf den Referenzzeitpunkt des *Wirkeintritts der Maßnahme*. Dies hat für die weitere Verwendung diverse Vorteile, z. B. dass keine Aufsummierung der einzelnen Zeiten durchgeführt werden muss. Zudem ist das vorgestellte Kennzahlensystem weit schlanker als die bisherigen, da auf die Beschreibung von Zeitanteilen,

6.5 Methode zur Quantifizierung des Energieflexibilitätspotenzials

die für die spanenden Werkzeugmaschinen nicht von Relevanz sind, verzichtet wird.

Anhand des Kennzahlensystems kann nun das Energieflexibilitätspotenzial spanender Werkzeugmaschinen auf Basis der gewählten Energieflexibilitätsstrategie beschrieben werden. Es ermöglicht eine, im Vergleich zu weiteren Bewertungsmodellen, einfachere Durchführung der Quantifizierung des Potenzials und ist eine essenzielle Grundlage für Potenzialstudien innerhalb der spanenden Fertigung. Durch eine geeinigte Visualisierung der Kennzahlen wird der direkte Vergleich verschiedener Potenziale ermöglicht. Dabei bietet sich der Leistungsverlauf über die Zeit an, welcher in Abbildung 6.15 in Form eines Differenzlastprofils dargestellt ist. Die einzelnen Koordinaten zur Beschreibung des Differenzlastprofils werden auf Basis der Kennzahlen abgeleitet. Diese errechnen sich, wie in Tabelle 6.4 gezeigt.

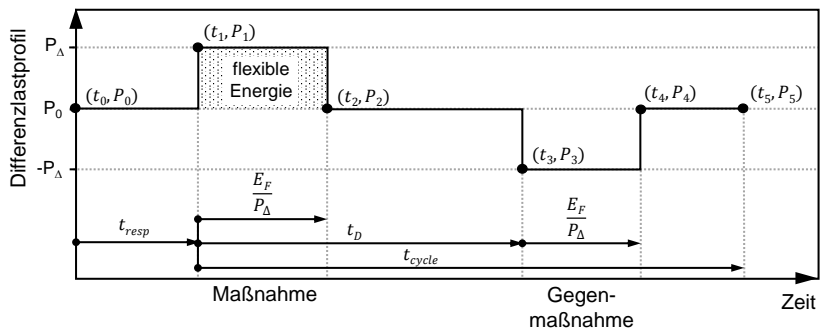


Abbildung 6.15: Differenzlastprofil einer Energieflexibilitätsmaßnahme

Tabelle 6.4: Berechnung der Profilkordinaten

	Zeitpunkt t_n	Leistung P_n
$n = 0$	0	0
$n = 1$	t_{resp}	P_Δ
$n = 2$	$t_{resp} + \frac{E_F}{P_\Delta}$	0
$n = 3$	$t_{resp} + t_D$	$-P_\Delta$
$n = 4$	$t_{resp} + t_D + \frac{E_F}{P_\Delta}$	0
$n = 5$	$t_{resp} + t_{cycle}$	0

6.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde eine Methodik vorgestellt, die auf Basis einer neuartigen Energieflexibilitätsstrategie die Identifikation und Bewertung der energieflexiblen Subsysteme ermöglicht. Zu Beginn wurde die Strategie auf Komponentenebene in Form einer Voruntersuchung und einer detaillierten Beschreibung eingeführt. Die Gegenüberstellung mit den Alternativstrategien hat gezeigt, dass die gewählte Strategie beste Voraussetzungen liefert, die speziellen Anforderungen an den energieflexiblen Betrieb zu erfüllen. Anhand zweier Einzelmethoden wird die gezielte Untersuchung einer spanenden Werkzeugmaschine hinsichtlich der Energieflexibilitätsstrategie ermöglicht. Die erste reduziert den entsprechenden Suchraum mithilfe von Gleichzeitigkeitsfaktoren für spanende Werkzeugmaschinen und kategorisiert die verbleibenden Subsysteme anhand ihres Leistungsanteils. Neben dieser einflussbezogenen Dimension wird im Zuge der zweiten Einzelmethode die Energieflexibilität an sich bewertet. Hierfür dienen zwei Bewertungsparameter zur Ableitung des *Energy Independence Indicators*, der eine gezielte Aussage über die Energieflexibilität des Subsystems ermöglicht.

Die Methodik wurde im Verlauf des aktuellen Kapitels anhand eines einfachen Beispiels erläutert. Eine ausführliche Anwendung am Beispiel zweier spanender Werkzeugmaschinen wird im nächsten Kapitel geliefert. Ferner wird das zugrunde liegende Quantifizierungsmodell für die Energieflexibilität durch umfangreiche Untersuchungen an entsprechenden Subsystemen validiert und eine Übertragbarkeit auf die Alternativstrategien nachgewiesen.

7 Anwendung und Übertragung auf Alternativstrategien

7.1 Kapitelüberblick

In Kapitel 7 werden sowohl die Anwendung der Methodik zur Identifikation und Bewertung der Energieflexibilität (Abschnitt 7.2) als auch die Validierung des Quantifizierungsmodells (Abschnitt 7.3) beschrieben. Die anschließend erläuterte Übertragung des Vorgehens auf die Maschinenebene ermöglicht die Gegenüberstellung der Potenziale verschiedener Fabrikebenen (Abschnitt 7.4).

7.2 Anwendung der Methodik

Die einzelnen Schritte der folgenden Beschreibung werden detailliert dargelegt, sodass das Vorgehen für eine Anwendung an weiteren Anlagen leicht nachvollzogen werden kann.

7.2.1 Maschinenauswahl und Szenarienbeschreibung

Folgende Fräsbearbeitungszentren¹ des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München kamen zur Verwendung:

- **Bearbeitungszentrum BAZ 1:** Horizontales 5-Achs-Fräsbearbeitungszentrum „GROB G350“ der GROB-Werke GmbH & Co. KG, Baujahr 2013, ausgestattet mit einer 52-kW-Motorspindel (Maximaldrehzahl 12.000 min^{-1}) und einem gesonderten, nachträglich ergänzten Kühlaggregat für die Maschinenkühlung.

¹Im Zuge der vorliegenden Dissertation wurden die genannten Bearbeitungszentren hinsichtlich ihrer Energieflexibilitätpotenziale bewertet und verglichen. Durch Umbauten entsprachen die Maschinen nicht mehr dem Serienzustand. Aus den Ergebnissen entstehen somit keine wettbewerblichen Vor- bzw. Nachteile und solche können auch nicht daraus erhoben werden.

7 Anwendung und Übertragung auf Alternativstrategien

- **Bearbeitungszentrum BAZ 2:** Vertikales 5-Achs-Fräsbearbeitungszentrum „SPINNER U5-620“ der Spinner Werkzeugmaschinenfabrik GmbH, Bauj. 2014, ausgestattet mit einer Hochgeschwindigkeitsspindel (Max.-Drehzahl 20.000 min^{-1}) und einem serienmäßigen Beistellkühler.

Zur realitätsgetreuen Abbildung der Energieflexibilität werden neben dem Stand-by-Betrieb drei Bearbeitungsszenarien definiert, die jeweils die Fertigung eines exemplarischen Werkstücks repräsentieren (Abbildung 7.1). Während Szenario 4 hohe Spindeldrehzahlen bei geringem Zeitspanvolumen vorsieht, sind durch die beiden 3-Achs-Bearbeitungsvorgänge mittlere und niedrige Drehzahlen bei höheren Zerspankräften berücksichtigt.

Szenario	1	2	3	4
Bearbeitungsvorgang bzw. Maschinenzustand	Stand-by	3-Achs-Bearbeitung	3-Achs-Bearbeitung	5-Achs-Simultanbearbeitung
mittlere Spindeldrehzahl	ohne	8.000 min^{-1}	1.000 min^{-1}	10.000 min^{-1}
Werkstoff	ohne	Aluminium EN AW2007	Vergütungsstahl 42CrMo4 weichgeglüht	Titanlegierung TiAl6V4 Grade 5
Werkzeug	ohne	Schaftfräser, 3-schneidig, $\varnothing 16 \text{ mm}$	Messerkopf, 7-schneidig, $\varnothing 50 \text{ mm}$	wechselnde Schaft- und Kugelkopfräser, bis $\varnothing 8 \text{ mm}$
Prozesskühlung (*sofern vorhanden)	KSS-Umwälzung* aktiv	KSS-Umwälzung* und ND-KSS aktiv	KSS-Umwälzung* und ND-KSS aktiv	KSS-Umwälzung* und ND-KSS aktiv, teilw. HD-KSS

Abbildung 7.1: Beschreibung der definierten Szenarien zum Zwecke einer repräsentativen und typischen Abbildung der spanenden Fertigung

7.2.2 Eingrenzung des Suchraums an geeigneten Subsystemen

Aus den Angaben der Schaltpläne der untersuchten Maschinen können die einzelnen Nennleistungsaufnahmen der Subsysteme identifiziert werden (Tabelle 7.1). Die Motorspindel und die Vorschubantriebe, die unter dem Punkt *Haupt-/Vorschubantriebe* zusammengefasst sind, dominieren gegenüber den anderen Verbrauchern. Gemäß den Ausführungen im Abschnitt 6.4.1 müssen die Datenblattangaben mit den *Gleichzeitigkeitsfaktoren für spanende Werkzeugmaschinen* multipliziert werden. Die Gleichzeitigkeitsfaktoren g_i sind in der Regel zwischen den betrachteten Maschinen identisch, da gleiche Betriebskonzepte zugrunde liegen. Lediglich im Falle des Späneförderers ergibt sich eine

7.2 Anwendung der Methodik

Abweichung, da dieser beim BAZ 1 intermittierend, beim BAZ 2 kontinuierlich in Betrieb ist. Die jeweiligen Gleichzeitigkeitsfaktoren und die resultierenden Anteile am Gesamtleistungsanteil sind in Tabelle 7.2 gelistet.

Tabelle 7.1: Datenblattangaben über die Nennleistung der Subsysteme

Subsystem	Nennleistung (in kW)	
	BAZ 1	BAZ 2
Haupt-/Vorschubantriebe (gesamt)	55,0	36,0
Hochdruck-Kühlschmierstoff(KSS)-Aggregat	3,0	4,0
Niederdruck-KSS-Aggregat	1,7	3,5
KSS-Hebe- bzw. -Transferpumpe	1,5	0,2
Spindelkühlung	2,9	4,0
Schaltschrankkühlung	-	0,9
Hydraulik der Werkstückklemmung	2,4	-
Hydraulik der Werkzeugklemmung	1,1	0,8
Arbeitsraumabsaugung	1,4	0,3
Späneförderer	0,2	0,6
24-Volt-Verbraucher	0,5	0,2
sonstige	0,3	0,9

Tabelle 7.2: Prozentuale Leistungsanteile der Subsysteme nach Verrechnung mit den Gleichzeitigkeitsfaktoren

Subsystem	BAZ 1		BAZ 2	
	g_i	%	g_i	%
Haupt-/Vorschubantriebe (gesamt)	0,33	69,7	0,33	54,8
Hochdruck-KSS-Aggregat	0,33	3,8	0,33	6,1
Niederdruck-KSS-Aggregat	0,66	4,3	0,66	10,7
KSS-Hebe- bzw. -Transferpumpe	0,33	1,8	0,33	0,3
Spindelkühlung	1,00	11,1	1,00	18,5
Schaltschrankkühlung	-	-	1,00	4,4
Hydraulik der Wst.-Klemmung	0,33	3,0	-	-
Hydraulik der Wzg.-Klemmung	0,33	1,4	0,33	1,1
Arbeitsraumabsaugung	0,33	1,8	0,33	0,5
Späneförderer	0,33	0,5	0,66	1,7
24-Volt-Verbraucher	1,00	1,7	1,00	1,1
sonstige (analog Tabelle 6.3)	0,66	0,9	0,66	0,8

7 Anwendung und Übertragung auf Alternativstrategien

Das Ergebnis der Berechnungen zeigt, dass neben den dominierenden Haupt- und Vorschubantrieben auch die Kühlsysteme und die Kühlschmierstoff-Versorgung über einen hohen Anteil am abgeschätzten Leistungsbedarf verfügen und demzufolge in der A-Kategorie aufzuführen sind (siehe Abbildung 7.2). Die Subsysteme in der B-Kategorie haben teilweise einen hohen einstelligen prozentualen Leistungsanteil, weshalb sie im weiteren Verlauf auch berücksichtigt werden. Bevor diese aber final zum energieflexiblen Betrieb ausgewählt werden, muss eine erneute Abwägung ihrer Eignung hierfür auf Basis des EII erfolgen. Innerhalb der C-Kategorie finden sich zahlreiche kleinere Verbraucher wieder, die mangels Relevanz ausscheiden.

Maschine	A-Subsysteme (80 %)	B-Subsysteme (15 %)	C-Subsysteme (5 %)			
<i>Eigene Berechnung aus Datenblattangaben und Gleichzeitigkeitsfaktoren</i>						
BAZ 1 GROB G350	Haupt-/Vors.-antriebe (ges.)	69,7 %	Niederdruck-KSS-Aggregat	4,3 %	24-Volt-Verbraucher	1,7 %
	Spindelkühlung	11,1 %	Hochdruck-KSS-Aggregat	3,8 %	hydraulische WZK	1,4 %
			hydraulische WSK	3,0 %	Späneförderer	0,5 %
			KSS-Hebepumpe	1,8 %	sonstige	0,9 %
		Arbeitsraumabsaugung	1,8 %			
BAZ 2 SPINNER U5-620	Haupt-/Vors.-antriebe (ges.)	54,8 %	Hochdruck-KSS-Aggregat	6,1 %	Späneförderer	1,7 %
	Spindelkühlung	18,5 %	Schaltschrankkühlung	4,4 %	hydraulische WZK	1,1 %
	Niederdruck-KSS-Aggregat	10,7 %			24-Volt-Verbraucher	1,1 %
					Arb.-raumabsaugung	0,5 %
				KSS-Transferpumpe	0,3 %	
				sonstige	0,8 %	

engere Auswahl für die weitere Betrachtung

Abkürzungen: KKL: Kühlkreislauf KSS: Kühlschmierstoff WSK: Werkstückklemmung WZK: Werkzeugklemmung

Abbildung 7.2: Klassifizierung der Subsysteme anhand ihrer Leistungsanteile zur weiteren Betrachtung des Energieflexibilitätpotenzials nach dem Prinzip der ABC-Analyse (DICKIE 1951)

Für die weitere Betrachtung wurden die A- und B-kategorisierten Subsysteme der zwei untersuchten Maschinen ausgewählt. Somit verbleiben für das BAZ 1 sieben, für das BAZ 2 fünf Systeme in der engeren Auswahl, die in den folgenden Abschnitten hinsichtlich ihrer Eignung für den energieflexiblen Betrieb eingehender betrachtet werden.

7.2.3 Ermittlung der Energie-Prozess-Unabhängigkeit

Das Ziel der Ausführungen dieses Abschnittes ist die Bewertung der individuellen Eignung der identifizierten Subsysteme beider Versuchsmaschinen. Hierfür werden jeweils der *externe Determinismus* und das *interne Betriebskonzept* durch Taxonomien klassifiziert und daraus der EII abgeleitet (gemäß Abschnitt 6.4). Die vorgenommenen Einstufungen werden im Folgenden kurz aufgeführt:

- **Haupt- und Vorschubantriebe:** Die Schnitt- und Vorschubbewegungen sind durch das NC-Programm vollständig beschrieben und werden von der Steuerung in dieser Granularität weitergegeben (folglich E.4). Im Falle des internen Betriebskonzepts existiert zwar ein Zwischenkreiskondensator, der elektrische Energie puffern kann, doch dessen Kapazität reicht lediglich für eine Glättung sehr kleiner, kurzzeitiger Lastschwankungen aus. Eine Über- oder Unterschreitung der elektrischen Spannungsgrenzen im Zwischenkreis versetzt die Maschine in den Fehlermodus und somit in einen ungeplanten Stillstand. Die Einstufung wird daher in E.4/I.4 vorgenommen.
- **Spindelkühlung:** Bei beiden betrachteten Maschinen ist die Spindelkühlung in Betrieb, sobald die Maschine eingeschaltet ist. Bei geringen Wärmemengen bzw. -leistungen, die von der Motorspindel ausgehen, wird das Kältemittel lediglich umgewälzt. Die Kältemaschine, welche das Kältemittel aktiv abkühlt, wird erst bei höheren Kältebedarfen zugeschaltet. Da die Vorlauftemperatur im Maschinenkreislauf separat geregelt wird, sind kleinere Abweichungen der Kühlmitteltemperatur in der Kältemaschine unerheblich. Wird zudem die Umwälzpumpe des Maschinenkreislaufs aus dem Betrachtungsraum herausgenommen, kann eine Einstufung in E.1/I.2 vorgenommen werden. In späteren quantifizierten Betrachtungen darf somit der Energiebedarf der Umwälzpumpe nicht mitberücksichtigt werden.
- **Niederdruck-KSS-Aggregat:** Die Einsatzzeiträume der Niederdruckkühlschmierung sind durch den NC-Code vorgegeben und können folglich nicht kurzfristig verändert werden. Zudem ist eine Speicherwirkung des Systems bei der isolierten Betrachtung der Pumpe nicht zu erkennen. Die Einstufung muss daher in E.3/I.4 erfolgen.
- **Hochdruck-KSS-Aggregat:** Das funktionale Konzept der Hochdruckkühlschmierstoffpumpe ist analog zur ND-Kühlschmierung. Die Einstufung muss daher in E.3/I.4 erfolgen.
- **Hydraulik (Werkstückklemmung):** Das Hydrauliksystem zur Werkstückklemmung ist als leckagefreie Speicherladeschaltung ausgelegt. Daher kann im Druckspeicher der Energiebedarf für mehrere Spannzyklen (im Regelfall vier) vorgehalten werden, ohne dass zwischenzeitlich die Hydraulikpumpe aktiviert werden muss. Dabei ist das System robust hinsichtlich höherer Druckniveaus im Druckspeicher. Seitens der Maschinensteuerung geht ein zeitlich getakteter Schaltbefehl zum Betätigen der Klemmung aus. Die Einstufung muss daher in E.3/I.1 vorgenommen werden.

7 Anwendung und Übertragung auf Alternativstrategien

- **KSS-Hebepumpe (BAZ 1):** Die Pumpe dient der Rückförderung von Kühlschmierstoff aus dem Sumpf des Späneförderers über den Vliesfilter in den Reintank. Der Füllstand des Sumpfes fungiert als Speicher, der über einen Zweipunktregler reguliert wird, welcher die Aktivzeiträume der Pumpe vorgibt. Aufgrund des vorgeschalteten Speichers und der Möglichkeit, die Füllgrenzen kurzzeitig zu überschreiten, wird eine Einstufung in E.1/I.2 gewählt.
- **Arbeitsraumabsaugung:** Die Partikelkonzentration im Luftvolumen des Arbeitsraums kann prinzipiell als Speicher im Sinne der Energieflexibilität angesehen werden. Die Absaugung wird entweder während der gesamten Bearbeitung oder zu deren Ende betrieben, wodurch eine zeitliche Festlegung vonseiten der NC-Codes bzw. der Maschinensteuerung vorliegt. Bei der Einstufung (E.3/I.3) wird berücksichtigt, dass auch kurzzeitige Überschreitungen der Partikelkonzentration aufgrund von Gesundheitsschutzaspekten kritisch sein können.
- **Schaltschrankkühlung (BAZ 2):** Die Schaltschrankkühlung besteht an der betrachteten Maschine aus einem Luft-Luft-Wärmetauscher. Dieser strebt ein Angleichen der Lufttemperatur innerhalb des Schaltschranks an die Umgebungstemperatur an. Das System ist als Dauerläufer ausgelegt und hat an sich keine Speicherwirkung. Die Temperatur des Luftvolumens im Schaltschrank kann indes als Speicher angesehen werden. Da der Schaltschrankkühler permanent in Betrieb ist und der Schaltschrank in gewissen Grenzen unempfindlich gegenüber Schwankungen der Innentemperatur ist, wird eine Einstufung in E.1/I.3 vorgenommen.

Die Kombinationen der einzelnen Einstufungen resultieren in der Energie-Prozess-Unabhängigkeit, die mithilfe des EII beschrieben wird (siehe Abbildung 7.3). Gemeinsam mit der Klassifizierung der Leistungsanteile wurde gemäß der Methodenbeschreibung (Abschnitt 6.4.3) ein Fazit für die technische Eignung des jeweiligen Subsystems abgeleitet.

Der EII und die Gegenüberstellung mit der Klassifizierung des Leistungsanteils ermöglichen somit eine Auswahl an Subsystemen für einen energieflexiblen Einsatz, die sowohl die Aspekte der Energieflexibilität als auch des individuellen Einflusspotenzials einbezieht. Gemäß der Definition aus Abschnitt 6.4.3 resultieren an beiden Maschinen zusammen in Summe drei Subsysteme, die technisch für den energieflexiblen Betrieb geeignet sind und somit für eine quantifizierende Betrachtung infrage kommen (BAZ 1: Spindelkühlung, KSS-Hebepumpe; BAZ 2: Spindelkühlung).

		Klassifizierung Leistungsanteil	Taxonomien		Energy Independence Indicator (EII)	Subsystem technisch geeignet?
			Externer Determinismus	Internes Betriebskonzept		
BAZ 1	Haupt-/Vorschubantriebe (ges.)	A	E.4	I.4	▶ -	▶ nein
	Spindelkühlung	A	E.1	I.2	▶ ++	▶ ja
	Niederdruck-KSS-Aggregat	B	E.3	I.4	▶ -	▶ nein
	Hochdruck-KSS-Aggregat	B	E.3	I.4	▶ -	▶ nein
	hydraulische Wkst.-Klemmung	B	E.3	I.1	▶ +	▶ nein
	KSS-Hebepumpe	B	E.1	I.2	▶ ++	▶ ja
	Arbeitsraumabsaugung	B	E.3	I.3	▶ -	▶ nein
BAZ 2	Haupt-/Vorschubantriebe (ges.)	A	E.4	I.4	▶ -	▶ nein
	Spindelkühlung	A	E.1	I.2	▶ ++	▶ ja
	Niederdruck-KSS-Aggregat	A	E.3	I.4	▶ -	▶ nein
	Hochdruck-KSS-Aggregat	B	E.3	I.4	▶ -	▶ nein
	Schaltstrangkühlung	B	E.1	I.3	▶ +	▶ nein

Abbildung 7.3: Zusammenfassung der Eingruppierungen, Ableitung des EII und Überprüfung der technischen Eignung von Subsystemen für den energieflexiblen Betrieb

7.2.4 Quantifizierung des Energieflexibilitätspotenzials

In diesem Abschnitt wird die praktische Erfassung der Energieflexibilitätskennzahlen an den verbleibenden Subsystemen beschrieben. Da eine große Abhängigkeit der Werte von der jeweiligen Bearbeitungsstrategie und dem Werkstück vorliegt, wurden die Szenarien aus Abschnitt 7.2.1 als repräsentativ und typisch zugrunde gelegt.

Im ersten Schritt wurden je Bearbeitungsszenario die regulären Aktiv- und Passivzeiten durch das Messen eines zeitaufgelösten Leistungsbedarfs der Subsysteme ermittelt. In Abbildung 7.4 ist beispielhaft ein Auszug der Lastprofile (Szenario 4) gezeigt, wofür parallel die Leistungsaufnahmen der gesamten Maschine (BAZ 1) und ihrer beiden relevanten Subsysteme vermessen wurden. Sehr deutlich ist der taktende Betrieb der Spindelkühlung und der Hebepumpe zu erkennen. In der Abbildung sind die Einzelwerte der Aktiv- (t_A) und der Passivzeit (t_P) der Spindelkühlung gesondert gekennzeichnet.

7 Anwendung und Übertragung auf Alternativstrategien

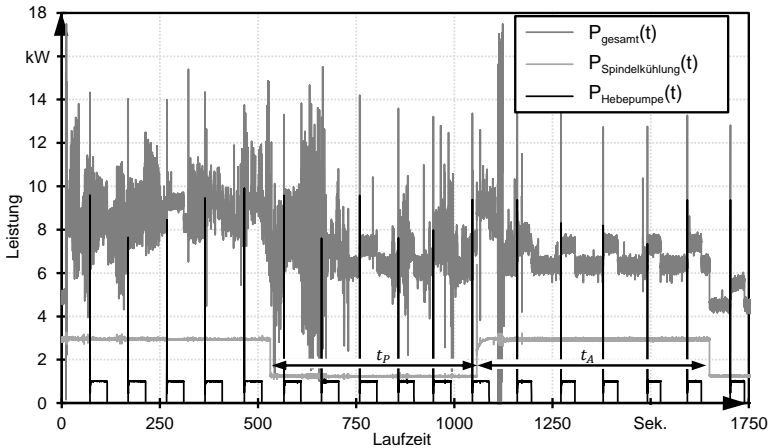


Abbildung 7.4: Lastprofile des BAZ 1 und relevanter Subsysteme (Szenario 4)

Die Mittelwerte der gemessenen Aktiv- bzw. Passivzeiten und die zugehörige Standardabweichung sind in Abbildung 7.5 dargestellt. Während die Schwankung der Werte im Stand-by-Szenario (1) verhältnismäßig gering ist, fällt diese bei den Szenarien mit zerspanender Bearbeitung deutlich größer aus. Dies resultiert daraus, dass in den Bearbeitungsszenarien (2 bis 4) kein homogenes Prozessgeschehen vorliegt. Vielmehr wechseln sich hier verschiedene Bearbeitungsgeschwindigkeiten und Kühlstrategien mit Werkstück- und Werkzeugwechsellvorgängen ab.

		Szenario	Aktivzeiten (in Sekunden)				Passivzeiten (in Sekunden)			
			1	2	3	4	1	2	3	4
BAZ 1	KSS-Hebepumpe	\bar{x}	27,0	34,7	32,0	39,1	395	99,3	63,8	66,8
		$\sigma_{\%}$	3,7	9,8	4,2	12,2	3,7	40,8	4,4	21,7
	Spindelkühlung	\bar{x}	328	485	490	539	939	947	1011	530
		$\sigma_{\%}$	2,2	7,8	15,5	12,3	7,2	1,9	10,0	7,4
BAZ 2	Spindelkühlung	\bar{x}	171	166	*)	165	3816	4175	*)	2010
		$\sigma_{\%}$	4,4	3,5	*)	6,8	4,7	13,7	*)	16,9

\bar{x} : Mittelwert $\sigma_{\%}$: Standardabweichung in Prozent *) kein Schaltzyklus messbar

Abbildung 7.5: Aktiv- und Passivzeiten der energieflexiblen Subsysteme bei den Szenarien 1 bis 4 gemäß Abschnitt 7.2.1

Für die Spindelkühlung (BAZ 2, Szenario 3) konnte kein Schaltzyklus erfasst werden. Dies liegt darin begründet, dass über einen Zeitraum von vier Stunden keine Aktivphase vorgelegen und die Tanktemperatur keine nennenswerte Erhöhung gezeigt hat. Daher war auch langfristig kein Zuschalten der Kältemaschine zu erwarten. Trotz großer Zerspankräfte wurde die Wärme in ausreichendem Maße anderweitig abgeführt (z. B. durch freie Konvektion und den KSS) und der Einsatz der Spindelkühlung somit obsolet.

Die Mittelwerte der Aktiv- und Passivzeiten dienen für die Ermittlung der Energieflexibilitätskennzahlen. Dabei finden die Gleichungen und die Ausführungen aus Abschnitt 6.5 Anwendung. Der Rechenweg der einzelnen Kennzahlen ist im Folgenden beispielhaft an der Spindelkühlung (BAZ 1, Szenario 1) auf Basis der Maßnahme *Vorziehen des Aktivzustands* dargelegt. Für die weiteren Subsysteme und Szenarien sowie für die Maßnahme *Unterbrechen des Aktivzustands* gelten die Ausführungen analog.

- **Leistungsdifferenz:** Durch die Gleichung $P_{\Delta} = \bar{P}_{\text{targ}} - \bar{P}_{\text{curr}}$ wird der Leistungssprung zwischen den korrespondierenden Zuständen beschrieben. Die Mittelwerte der Leistungsaufnahmen werden aus den Messdaten ermittelt. Für die gewählte Maßnahme des *Vorziehens des Aktivzustands* ergibt sich für die Leistungsdifferenz P_{Δ} :

$$P_{\Delta} = \bar{P}_{\text{targ}} - \bar{P}_{\text{curr}} = \bar{P}_A - \bar{P}_P = 2,9 \text{ kW} - 1,2 \text{ kW} = 1,7 \text{ kW} \quad (7.1)$$

- **Zykluszeit:** Die Dauer eines regulären Zyklus wird durch die Summe der Aktiv- und Passivzeit eines Subsystems gebildet. Für den konkreten Fall beläuft sich diese auf:

$$t_{\text{cycle}} = \bar{t}_A + \bar{t}_P = (328 \text{ s} + 939 \text{ s}) = 1.267 \text{ s} \quad (7.2)$$

Die *Maßnahmenhäufigkeit* H folgt aus der Invertierung:

$$H = \frac{1}{t_{\text{cycle}}} = 2,84 \frac{1}{\text{h}} \quad (7.3)$$

- **Maximale Reaktionszeit:** Die Summe der Zeiträume, die zwischen dem Umsetzungsbeginn einer Maßnahme und dem Wirkeintritt vorliegen, wird als Reaktionszeit bezeichnet. Bezogen auf die Maßnahme *Vorziehen des Aktivzustands* können zwei Situationen zum Umsetzungsbeginn auftreten, abhängig davon, ob sich das Subsystem gerade im Aktiv- oder im Passivzustand befindet. Im Falle des Passivzustands kann der Aktivzustand jederzeit initiiert werden. Dabei sind eventuelle Schutzbereiche zu beachten, die eine Mindestlaufzeit vorgeben können (siehe

7 Anwendung und Übertragung auf Alternativstrategien

Abbildung 6.4). Falls sich das Subsystem im Aktivzustand befindet, so muss erst die darauffolgende Passivphase abgewartet werden, in der dann die Maßnahme gestartet werden kann. Nach dem vereinfachten Modell wird von einem Wirkeintritt zur halben Laufzeit des Betriebszustands ausgegangen. Im ungünstigsten Fall muss daher bis zum Wirkeintritt eine volle Aktivzeit vor der halben Passivzeit verstreichen. Die maximale Reaktionszeit t_{resp} ergibt sich somit für das *Vorziehen des Aktivzustands* durch:

$$\begin{aligned} t_{resp} &= t_{curr} + 0,5 \cdot t_{targ} = \bar{t}_A + 0,5 \cdot \bar{t}_P = \\ &= 328 \text{ s} + 469,5 \text{ s} = 797,5 \text{ s} \end{aligned} \quad (7.4)$$

- Die **flexible Energie** beträgt (gemäß Gleichung 6.6):

$$\begin{aligned} E_{F0,5} &= 0,5 \cdot (\bar{P}_{targ} - \bar{P}_{curr}) \cdot \min(t_{curr}, t_{targ}) = \\ &= 0,5 \cdot (2,9 \text{ kW} - 1,2 \text{ kW}) \cdot \min(939 \text{ s}; 328 \text{ s}) = 77,4 \text{ Wh} \end{aligned} \quad (7.5)$$

- Die **energetische Nutzungszeit** errechnet sich gemäß Gleichung 6.5:

$$\begin{aligned} t_{D0,5} &= 0,5 \cdot \max(t_{curr}, t_{targ}) = \\ &= 0,5 \cdot \max(939 \text{ s}; 328 \text{ s}) = 469,5 \text{ s} \end{aligned} \quad (7.6)$$

Die weiteren Ergebnisse der Berechnungen sowohl für die Maßnahme *Unterbrechen des Aktivzustands* als auch für die weiteren Subsysteme und Szenarien sind in der Abbildung 7.6 aufgeführt. Der Unterschied der Kennzahlen zwischen den beiden Maßnahmen ist durch das Vorzeichen in der Leistungsdifferenz P_Δ und der flexiblen Energie E_F gegeben. Die Werte der Zeitkennzahlen bleiben auch bei der Maßnahme *Unterbrechen des Aktivzustands* positiv. Lediglich die Reaktionszeit ist im Wert verändert. Somit sind die Werte des definierten Kennzahlensystems vollständig für die Subsysteme unter der Annahme der Szenarien beschrieben.

Auf der Basis des nun vorliegenden Ergebnisses können weitere Schritte folgen: Beispielsweise kann ein direkter Vergleich der quantifizierten Energieflexibilitätspotenziale verschiedener Subsysteme durchgeführt (analog Abbildung 7.6) und sein Resultat den Anforderungen möglicher Zielanwendungen gegenübergestellt werden. Zudem lässt das Kennzahlensystem die Darstellung der Energieflexibilität im Zeitverlauf zu. Somit können Fallstudien für die spanende Fertigung durchgeführt werden, die den Effekt in einem größeren Kontext darstellen und wirtschaftlichkeitsbezogene Auswertungen ermöglichen (siehe Kapitel 8).

7.3 Validierung des Quantifizierungsmodells

		Szenario	1	2	3	4
BAZ 1	Hebe- pumpe	P_{Δ}	$\pm 1,0$ kW	$\pm 1,0$ kW	$\pm 1,0$ kW	$\pm 1,0$ kW
		t_{cycle}	422 s	134 s	96 s	106 s
		t_{resp}	225 / 408 s	84 / 117 s	64 / 80 s	73 / 86 s
		E_F	$\pm 3,8$ Wh	$\pm 4,8$ Wh	$\pm 4,4$ Wh	$\pm 5,4$ Wh
		t_D	198 s	50 s	32 s	33 s
	Spindel- kühlung	P_{Δ}	$\pm 1,7$ kW	$\pm 1,7$ kW	$\pm 1,7$ kW	$\pm 1,7$ kW
		t_{cycle}	1267 s	1432 s	1501 s	1069 s
		t_{resp}	798 / 1103 s	959 / 1190 s	996 / 1256 s	804 / 800 s
		E_F	$\pm 77,4$ Wh	± 115 Wh	± 116 Wh	± 125 Wh
		t_D	470 s	474 s	506 s	269,5 s
BAZ 2	Spindel- kühlung	P_{Δ}	$\pm 1,0$ kW	$\pm 1,0$ kW	keine Messwerte verfügbar	$\pm 1,0$ kW
		t_{cycle}	3987 s	4341 s		2175 s
		t_{resp}	2079 / 3902 s	2254 / 4258 s	(keine Spindelkühlung notwendig)	1170 / 2093 s
		E_F	± 24 Wh	± 23 Wh		± 23 Wh
		t_D	1908 s	2088 s		1005 s

Für die Maßnahme *Vorziehen des Aktivzustands* sind P_{Δ} und E_F positiv, für das *Unterbrechen des Aktivzustands* negativ. Die weiteren Kennzahlen sind stets positiv. Der erste Wert von t_{resp} bezieht sich auf das *Vorziehen des Aktivzustands*, der zweite auf das *Unterbrechen des Aktivzustands*.

Abbildung 7.6: Kennzahlen der Energieflexibilität der relevanten Subsysteme für die beiden BAZ

7.3 Validierung des Quantifizierungsmodells

In den folgenden Abschnitten werden die Durchführung detaillierter Messreihen und die Validierung des Modells beschrieben. Der hierfür notwendige Umbau der Subsysteme, der im Rahmen der vorliegenden Dissertation durchgeführt wurde, wird detailliert dargelegt.

7.3.1 Umbaumaßnahmen an den Subsystemen

Die Umbaumaßnahmen an der KSS-Hebepumpe und der Spindelkühlung des BAZ 1 ermöglichen einen steuerungstechnischen Eingriff, um während des

7 Anwendung und Übertragung auf Alternativstrategien

Betriebs entsprechende Energieflexibilitätsmaßnahmen abrufen zu können. Die Eingriffsmöglichkeit muss dabei derart beschaffen sein, dass keine negativen Einflüsse auf die Arbeitsgenauigkeit und die Mengenleistung der Maschine ausgeübt werden (siehe Abschnitt 5.3.3).

Energieflexible Umrüstung der Kühlschmierstoff-Hebepumpe (BAZ 1)

Der durch den Bearbeitungsprozess angefallene Kühlschmierstoff im *Sumpf* des Späneförderers wird mittels der KSS-Hebepumpe in den Vorratsbehälter zurückbefördert (siehe Abbildung 7.7). Ein Sensor misst den aktuellen Füllstand im Sumpf. Beim Erreichen einer vordefinierten Obergrenze wird die KSS-Hebepumpe eingeschaltet. Analog wird diese bei Erreichen der Untergrenze deaktiviert. Der sich so einstellende Arbeitstakt wird zwar in signifikantem Ausmaß vom Durchsatz an Kühlschmierstoff im Bearbeitungsprozess beeinflusst, doch ist die KSS-Hebepumpe trotzdem nur indirekt am Fertigungsprozess beteiligt bzw. von diesem betroffen. Durch eine gezielte Steuerung und Beeinflussung der Aktivzeiten kann die notwendige elektrische Energie flexibel eingesetzt werden, ohne den Zerspanprozess negativ zu beeinflussen. Die Speicherkapazität des KSS-Vorratsbehälters und des Sumpfes sind die dominierenden und limitierenden Faktoren des Energieflexibilitätspotenzials.

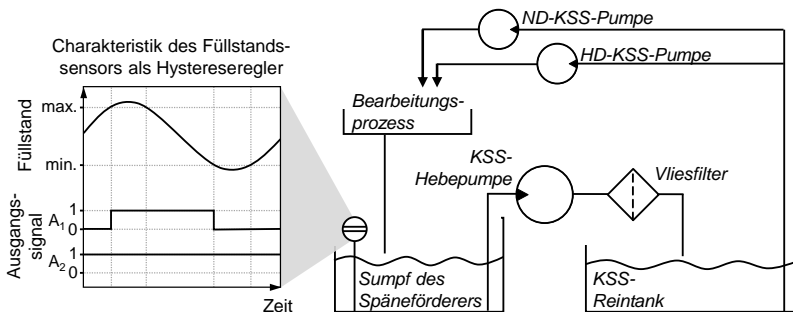


Abbildung 7.7: Darstellung des Kühlschmierstoff-Kreislaufs der untersuchten Maschine (BAZ 1)

Die experimentelle Umrüstung fand sowohl steuerungstechnisch als auch hardwaretechnisch statt. Der bisherige Füllstandssensor, der bislang das Überschreiten programmierter Grenzen mitteilte (Hystereseregler, siehe Abbildung 7.7 links), wurde durch eine Variante ersetzt, die den aktuellen Füllstand als analogen Spannungswert ausgibt. Das Signal wurde anschließend durch einen Mikrocontroller verarbeitet, der einer energieflexiblen Logik folgte (siehe Abbildung

7.8). Ausgangsseitig wurde das bisherige Signalschema imitiert, sodass sich gegenüber der Maschinensteuerung keine Veränderungen ergaben.

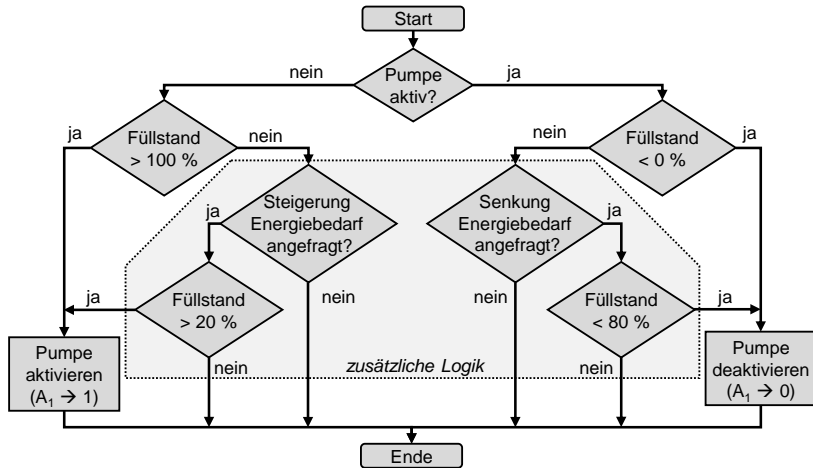


Abbildung 7.8: Zusätzliche Logik durch den Mikrocontroller zur energieflexiblen Steuerung der KSS-Hebepumpe von BAZ 1

Über den Mikrocontroller konnten energieflexible Maßnahmen abgerufen werden. Da darin systemspezifische Rahmenbedingungen der KSS-Hebepumpe hinterlegt sind, wurden negative Effekte auf die Prozesssicherheit vermieden. Die Schutzbereiche wurden mit 20 bzw. 80 % des nutzbaren Füllstands vorgesehen.

Energieflexible Umrüstung der Spindelkühlung (BAZ 1)

Im Zuge der Forschungsarbeiten wurde ein neuartiger Beistellkühler entwickelt, der den standardmäßig integrierten Rückkühler des BAZ 1 ersetzt. Sein Funktionsprinzip ist im Fluidplan in Abbildung 7.9 erläutert. Über den Öffnungsgrad des Mischerventils V1 wird die Vorlauftemperatur per Festwertregelung konstant auf 22 °C gehalten (Messwert T1). Dies ist möglich, sofern die Temperatur T2 im Kühlmitteltank deutlich unterhalb von 22 °C liegt. Die Regelung überwacht die Temperatur T2 und schaltet bei Bedarf die Kältemaschine ein, die über einen Wärmetauscher den Tankvorlauf abkühlt und damit eine Tank-Solltemperatur unterhalb von 20,3 °C sicherstellt. Die Pumpe P1 sorgt für die kontinuierliche Umwälzung des Kühlmittels in der Versuchsmaschine.

7 Anwendung und Übertragung auf Alternativstrategien

Der Betrieb der Kältemaschine sieht somit ebenfalls aktive und passive Betriebsphasen und eine Entkopplung vom Bearbeitungsprozess vor, welche die Grundlage zur Energieflexibilitätsbefähigung bilden. Die Tanktemperatur T_2 kann zwischen den Grenzen von $19,8\text{ °C}$ und $20,3\text{ °C}$ variieren, während durch die Regelung des Mischerventils V_1 eine Vorlauftemperatur T_1 von konstant 22 °C sichergestellt ist. Die Logik der Kältemaschinensteuerung gibt die Aktivzyklen vor (siehe Tabelle in Abbildung 7.9). Zur Umrüstung wurden parallel zu den Messwiderständen T_1 und T_2 zusätzliche Widerstände eingebracht, die sich fallspezifisch zu- und abschalten lassen (Abbildung 7.10). Hierfür dienten die beiden Taster und der Wechselschalter, wodurch kurzzeitig abweichende Temperaturen simuliert werden konnten. Die Steuerung wechselte daraufhin jeweils den Betriebsmodus. Durch den Abruf einer EF-Maßnahme wurden lediglich kurzzeitige Impulse mit veränderten Größen vorgegeben, bevor wieder in den Realzustand zurückgeschaltet wurde. Die herstellereitigen Temperaturgrenzen wurden damit nicht beeinflusst und folglich auch nicht unter-/überschritten. Eine Gefährdung durch eine unzureichende Kühlung war daher nicht zu befürchten.

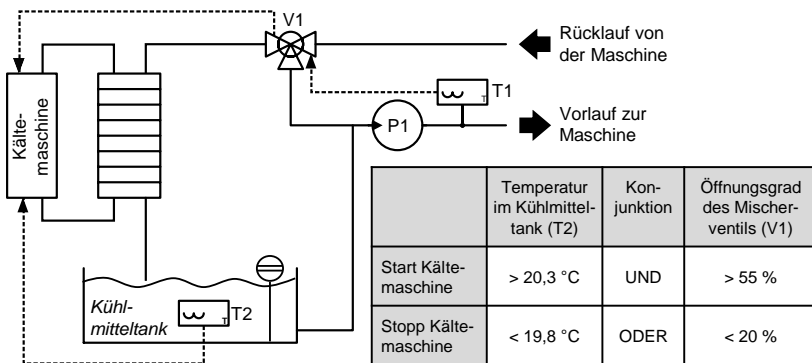


Abbildung 7.9: Fluidplan und Schaltlogik der Maschinenkühlung

Zur Wahl der Maßnahme *Vorziehen des Aktivzustands* wurden der Steuerung während des Passivzustands fiktive Temperaturen für den Vorlauf T_1 und den Tank T_2 von 25 °C (entspricht einem Widerstand von $10\text{ k}\Omega$) vorgegeben. Durch die vermeintlich hohe Vorlauftemperatur wurde das Mischerventil V_1 maximal geöffnet und der gesamte Kältemittelstrom durch den Tank geleitet. Da dieser eine fiktive Temperatur von 25 °C aufwies, wurde daraufhin nach der Schaltlogik (siehe Abbildung 7.9) die Kältemaschine aktiviert. Kurz darauf wurden wieder die realen Werte für T_1 und T_2 eingespielt. Um den Aktivzustand zu unterbrechen, genügte es, eine Tanktemperatur T_2 unter

7.3 Validierung des Quantifizierungsmodells

19,8 °C vorzutauschen. Dies erfolgte durch die kurzzeitige Zuschaltung eines Widerstands von 14 kΩ (entspricht einer Temperatur von ca. 16 °C).

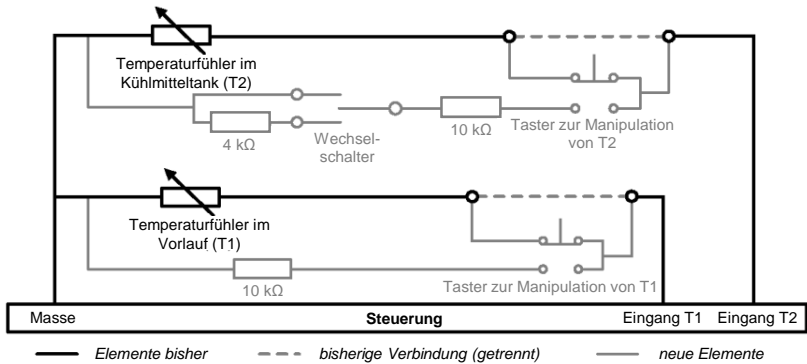


Abbildung 7.10: Schaltplan der Umrüstungen für den energieflexiblen Betrieb der Spindelkühlung

7.3.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

Auf Basis der erfolgten Umrüstungen konnte die Validierung des Quantifizierungsmodells durchgeführt werden. Hierzu wurden die tatsächlich auftretende *flexible Energie* und die *energetische Nutzungszeit* anhand der Szenarien 1 (Stand-by) und 4 (5-Achs-Simultanbearbeitung) erfasst. Die regulären Laufzeiten (siehe Abbildung 7.5), die als Eingabewerte für das allgemeine Energieflexibilitätsmodell dienen, wurden aus der Datenbasis aus Abschnitt 7.2.4 ermittelt. Aufgrund der Vollständigkeit der Validierung wurde auf die Vereinfachung, dass die Maßnahmen stets zur halben Laufzeit des aktuellen Zustands ($0,5 \cdot t_{curr}$) abgerufen werden, verzichtet. Daher fanden hier direkt die Gleichungen 6.3 und 6.4 Anwendung, deren Fallunterscheidungen für die Unsteigkeiten ursächlich sind (siehe Abbildung 7.11 am Beispiel der Spindelkühlung für das Unterbrechen des Aktivzustands im Szenario 1). Zur Veranschaulichung sind die Werte für $\tau = 0,5$ durch ein „+“ gekennzeichnet.

Anschließend wurden durch Praxisversuche die tatsächlich auftretenden Energieflexibilitätsparameter erfasst und dem Quantifizierungsmodell gegenübergestellt. Zur Messung der flexiblen Energie und der energetischen Nutzungszeit wurden gezielt Energieflexibilitätsmaßnahmen nach definierten Zeiträumen eingeleitet und damit die Aktiv-/Passivphasen der Subsysteme unterbrochen. Durch eine gute Übereinstimmung der Messwerte mit den modellierten Werten

7 Anwendung und Übertragung auf Alternativstrategien

sollte deren Gültigkeit auch unter prozessbedingten Abweichungen nachgewiesen werden.

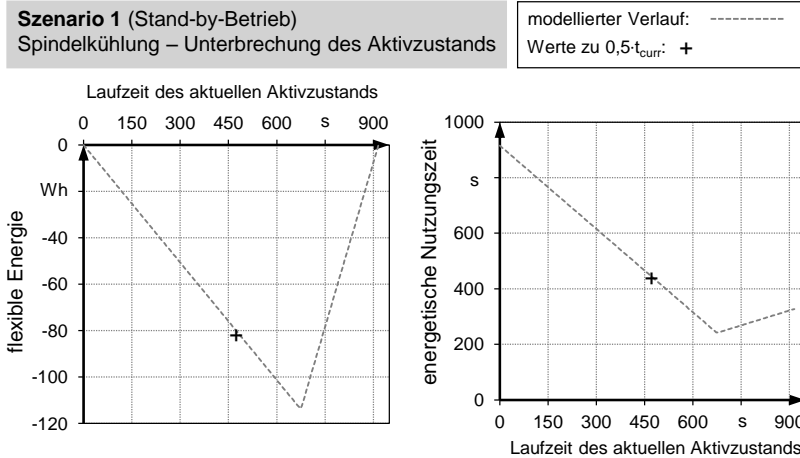


Abbildung 7.11: Verlauf der flexiblen Energie und der energetischen Nutzungszeit über die Laufzeit t_{curr} des aktuellen Betriebszustands (BAZ 1)


In Abbildung 7.12 sind die Werte von Modell und Realität am Beispiel der KSS-Hebepumpe auf Grundlage von Szenario 1 einander gegenübergestellt. Im oberen Teil ist die Maßnahme *Unterbrechen des Aktivzustands* gezeigt. Die jeweiligen aktiven Phasen wurden bei 25 %, 50 % und 75 % (ca. 7 s, 14 s, 21 s) der durchschnittlichen regulären Laufzeit ($t_{curr} = 27$ s) unterbrochen. Die resultierenden Werte für die flexible Energie und die energetische Nutzungszeit sind als Boxplot-Diagramme in den jeweiligen Diagrammen dargestellt. Im unteren Teil der Abbildung 7.12 wird das analoge Vorgehen für das *Vorziehen des Aktivzustands* aufgezeigt: Die reguläre Passivzeit von 395 s wurde bei 50 % (197 s)², 75 % (296 s) und 93 % (368 s)³ unterbrochen. Die modellierten Werte weichen in einem niedrigen einstelligen Prozentbereich vom Median der Messwerte ab, was auf eine hohe Abbildungsgüte des Quantifizierungsmodells schließen lässt.

²Eine frühere Unterbrechung (vor $0,5 \cdot t_{curr}$) war aufgrund der sehr geringen Füllstände und einer entsprechenden Sicherheitsroutine nicht erreichbar.

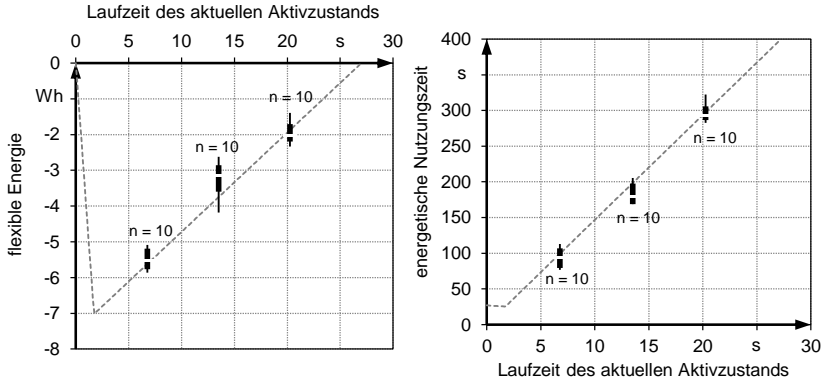
³Zur gezielten Abbildung der Unstetigkeit wurde teilweise auf ein gleichverteiltes Intervall der Messzeitpunkte verzichtet.

7.3 Validierung des Quantifizierungsmodells

Szenario 1 (Stand-by-Betrieb)
KSS-Hebepumpe

modellierter Verlauf: - - - - -
 gemessene Werte:  95%-Perzentil
 oberes Quartil
 Median
 5%-Perzentil
 n: Anzahl Werte

Unterbrechen des Aktivzustands



Vorziehen des Aktivzustands

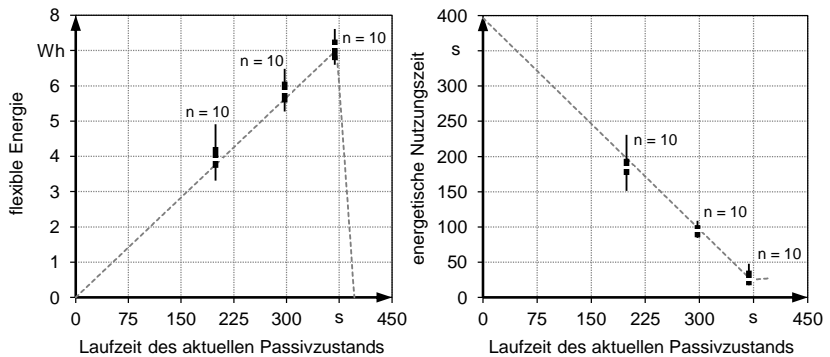


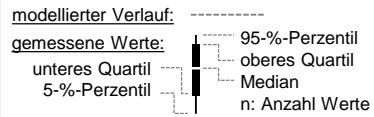
Abbildung 7.12: Validierung an der KSS-Hebepumpe (Szenario 1, BAZ 1)

Eine vergleichbar hohe Güte zeigt sich bei der Auswertung der Messungen an der Spindelkühlung (Szenario 1, BAZ 1, siehe Abbildung 7.13). Hier wurden jeweils vier Messreihen zu zehn Werten aufgenommen (Unterbrechung des Aktivzustands bei 20 %, 40 %, 60 % und 80 % der regulären Laufzeit; Vorziehen des Aktivzustands bei 15 %, 30 %, 50 % und 80 % der regulären Laufzeit). Bei kürzeren Laufzeiten des aktuellen Betriebszustands t_{curr} treten größere Schwankungen auf, die in herstellerseitig programmierten Mindestlauf- und

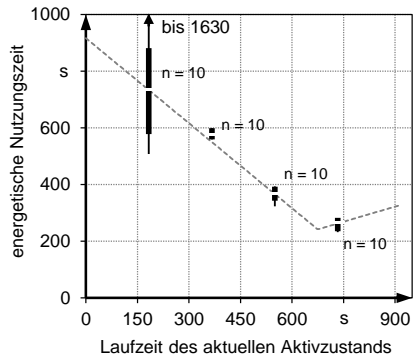
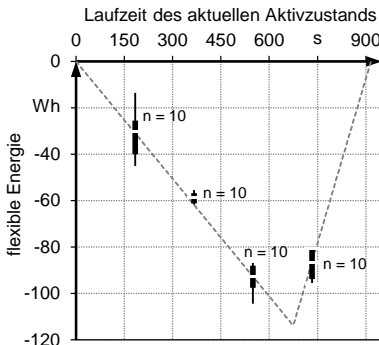
7 Anwendung und Übertragung auf Alternativstrategien

Pausenzeiten der Kältemaschine begründet sind. Die Abweichungen zwischen Modell und Messungen liegen hier im Regelfall im Bereich bis zu 9,8%, vereinzelt auch bis zu 14,5%.

Szenario 1 (Stand-by-Betrieb) Spindelkühlung



Unterbrechen des Aktivzustands



Vorziehen des Aktivzustands

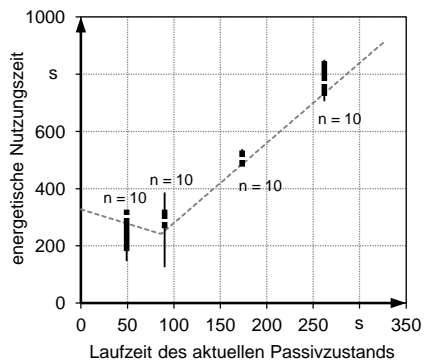
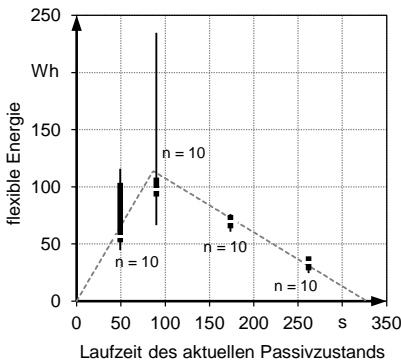



Abbildung 7.13: Validierung an der Spindelkühlung (Szenario 1, BAZ 1)

Eine größere Streuung der Messwerte ist bei den Untersuchungen auf Basis des Szenarios 4 zu beobachten (siehe Abbildungen 7.14 und 7.15). Während in Szenario 1 ein homogener Prozessablauf vorliegt, ist das Szenario 4

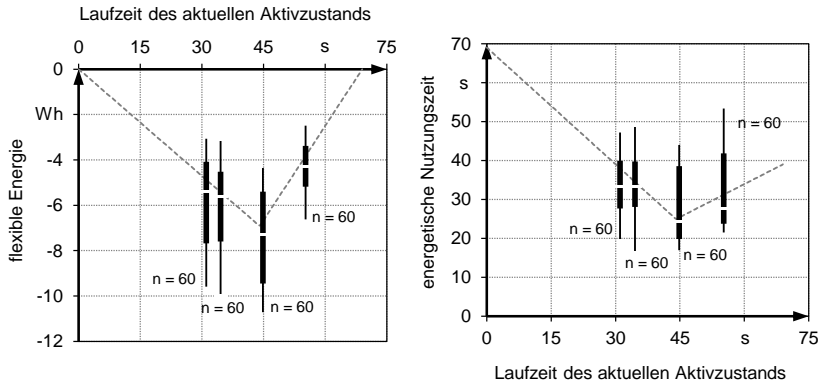
7.3 Validierung des Quantifizierungsmodells

durch verschiedene Eingriffsverhältnisse, wechselnde Spindeldrehzahlen und unterschiedliche KSS-Strategien gekennzeichnet. Die Streuung fällt bei der KSS-Hebepumpe deutlicher aus, da durch die kürzeren Zyklen der Einfluss aus wechselnden Bearbeitungsprozessen nicht über längere Zeiträume relativiert werden konnte, wie es bei der Spindelkühlung der Fall war. Zudem ist das thermische System der Spindelkühlung weit träger, was ebenfalls eine Ursache für die verschiedenen Streuraten darstellt.

Szenario 4 (5-Achs-Simultanbearbeitung) KSS-Hebepumpe

modellierter Verlauf: -----
gemessene Werte:  95%-Perzentil
 oberes Quartil
 Median
 unteres Quartil
 5%-Perzentil
 n: Anzahl Werte

Unterbrechen des Aktivzustands



Vorziehen des Aktivzustands

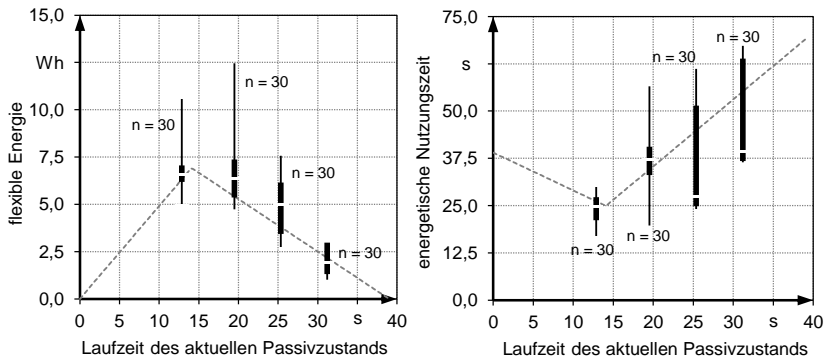


Abbildung 7.14: Validierung an der KSS-Hebepumpe (Szenario 4, BAZ 1)

7 Anwendung und Übertragung auf Alternativstrategien

Die Messungen an der KSS-Hebepumpe (Szenario 4) wurden zu je vier Zeitpunkten vorgenommen (siehe Abbildung 7.14, frühester Maßnahmenstart jeweils von den Grenzzeiten abhängig). Das zugrunde liegende Bearbeitungsprogramm des BAZ sah Unterprogramme mit und ohne Einsatz von HD-KSS vor. Da während der HD-KSS-Einsatzphasen ein weit größeres KSS-Volumen umgewälzt werden muss, kann von zwei diskreten Fällen im Zeitverlauf (*mit* und *ohne* HD-KSS) ausgegangen werden. Diese folgen jeweils einem eigenen Takt aus Aktiv- und Passivzeiten und unterscheiden sich deutlich, was zu der entsprechenden Streuung führt. Die Abweichung zwischen Modell und Realität beläuft sich daher für die Maßnahme *Vorziehen des Aktivzustands* auf durchschnittlich 19 %. Die größte Einzelabweichung beträgt 39 % (Vorziehen des Aktivzustands, Messreihe zum Zeitpunkt 25 s).

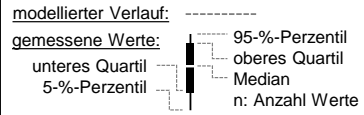
Eine höhere Güte ungeachtet einer geringeren Anzahl an Stichproben liefert die Auswertung der Spindelkühlung im Szenario 4 (siehe Abbildung 7.15). Wie bereits erwähnt, ist der thermische Prozess deutlich träger, was neben der weit längeren Zykluszeit zu einer sichtlich höheren Wiederholgenauigkeit der Messwerte geführt hat. Die Werte, die in beiden Maßnahmen jeweils zu den Zeitpunkten zu 25 %, 50 % und 75 % der Laufzeit t_{curr} ermittelt wurden, zeigen verbleibende Abweichungen von durchschnittlich 5,5 % (Unterbrechen) bzw. 2,2 % (Vorziehen).

Anhand der Versuche wird deutlich, dass das Quantifizierungsmodell eine sehr gute Abbildungsgüte für das energieflexible Verhalten der Subsysteme besitzt. Bei Subsystemen mit sehr kurzen Zykluszeiten können im realen Prozess zwar deutliche Schwankungen der tatsächlichen Potenziale um den modellierten Wert auftreten, die allerdings technisch begründbar und damit verstanden sind. Zudem wird der Mittelwert durch das Modell mit hoher Genauigkeit präzisiert. Eine hochgenaue Messung der Eingangsparameter des Modells (z. B. reguläre Aktiv- und Passivzeit) über die gesamte Bearbeitungsfolge hinweg ist eine wichtige Voraussetzung für eine akkurate Beschreibung der *energetischen Nutzungszeit* und der *flexiblen Energie*.

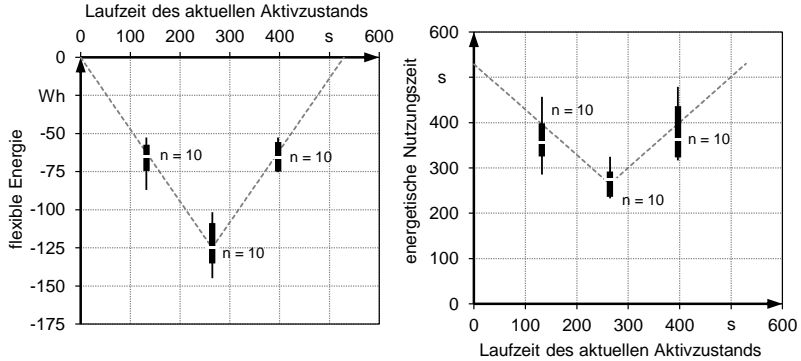
Somit wurde der experimentelle Nachweis geliefert, dass das Quantifizierungsmodell für die Abbildung der tatsächlichen Energieflexibilität geeignet ist. Da den weiteren Kennzahlen (P_{Δ} , t_{cycle} und t_{resp}) triviale Berechnungsvorschriften zugrunde liegen, wird an dieser Stelle auf eine gesonderte Validierung zu diesen verzichtet.

7.4 Bewertung alternativer Energieflexibilitätsstrategien

Szenario 4 (5-Achs-Simultanbearbeitung) Spindelkühlung



Unterbrechen des Aktivzustands



Vorziehen des Aktivzustands

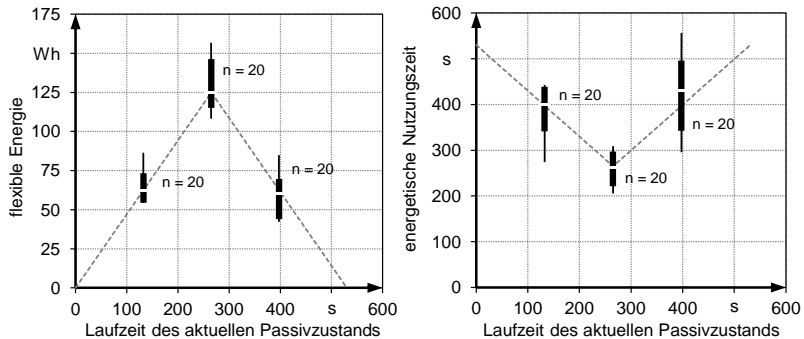


Abbildung 7.15: Validierung an der Spindelkühlung (Szenario 4, BAZ 1)

7.4 Bewertung alternativer Energieflexibilitätsstrategien

In diesem Abschnitt wird die Anwendung des Energieflexibilitätsmodells auf der Maschinenebene beschrieben (Abschnitt 7.4.1). Bislang wurde dieses nur auf der Komponentenebene eingesetzt bzw. validiert (siehe Abschnitte 7.2 und 7.3). Für den anschließenden Vergleich mit den Alternativstrategien (aus Abschnitt 6.3.2) ist die Anpassung des Quantifizierungsmodells notwendig (Abschnitt 7.4.2).

7.4.1 Auswahl der Alternativstrategien und Beschreibung der beispielhaften Fertigungsinsel

In Abschnitt 6.3.3 wurde festgehalten, dass neben der Energieflexibilitätsstrategie EFS-5 zwei weitere Strategien (EFS-1 und EFS-2) für eine tiefergehende Betrachtung infrage kommen. Die einzelnen Strategien sind hier nochmals kurz zusammengefasst:

- **EFS-1:** Zeitliche Verschiebung eines gesamten Maschinenlastprofils durch das Vorziehen oder das Belegen von Leerlaufzeiten in Verbindung mit dem Auf- und Abbau von (Teile-)Pufferbeständen.
- **EFS-2:** Austausch eines gesamten Lastprofils durch die Fertigung alternativer Werkstücke bzw. die Belegung alternativer Maschinen durch dasselbe Werkstück.
- **EFS-5:** Zeitliche Verschiebung nicht-determinierter Prozesse.

Im Folgenden wird auf eine Erläuterung der beiden ersten Strategien im Detail verzichtet, da diese bereits ausführlich thematisiert wurden (siehe Abschnitt 6.3.2 und die dort genannten Literaturquellen). Vielmehr wird hier die direkte Anwendung mithilfe einer beispielhaften Fertigungsinsel aufgezeigt und deren Energieflexibilitätspotenzial bewertet. Die Fertigungsinsel besteht aus den beiden realen Bearbeitungszentren 1 und 2 aus Abschnitt 7.2.1 mit einem gemeinsamen Eingangs- bzw. Ausgangsteilepuffer (siehe Abbildung 7.16). Die beiden BAZ konnten sich bei den durchgeführten Fertigungsvorgangfolgen wechselseitig ersetzen (Werkstücktausch zwischen den BAZ). Dabei wurden über einen Zeitraum von ca. 4,5 h (entspricht der dreifachen Bearbeitungszeit von Produkt 2) Werkstücke gefertigt und die erhobenen Messwerte (siehe Abbildung 7.16) für eine Schicht von acht Stunden hochgerechnet. Die für die betrachtete Schicht zu produzierende Teileanzahl war für die weiteren Analysen unveränderlich, die Puffer vor und nach den Bearbeitungszentren konnten nicht voll- bzw. leerlaufen.

Die Produkte der Fertigungsinsel entsprechen einer Auswahl aus denjenigen, die bereits für die Szenarien in Abschnitt 7.2.1 betrachtet wurden. Dasselbe gilt für den Stand-by-Betrieb:

- Die Fertigung von Produkt 1 entspricht dem Szenario 2,
- von Produkt 2 dem Szenario 4 und
- der Stand-by-Zustand dem Szenario 1.

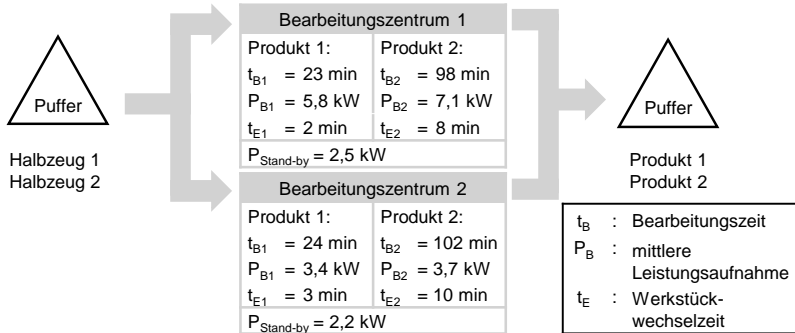


Abbildung 7.16: Schematische Darstellung der Fertigungsinsel mit Messwerten der Fertigungsvorgangfolgen

Im regulären Fall wurde auf dem BAZ 1 ausschließlich das Produkt 1 und auf dem BAZ 2 das Produkt 2 gefertigt. Da die Bearbeitungszeit t_{B2} des Produkts 2 – unabhängig von der Maschine – etwa dem Vierfachen derjenigen des Produkts 1 entsprach, war eine Alternativbearbeitung auf der jeweils anderen Maschine im 1:4-Tausch ohne eine nennenswerte Zeitdifferenz gewährleistet. Bei der durchgeführten Fertigungsvorgangfolge wurde eine Zeitauslastung der Maschinen von bis zu 85 % erreicht. Zusätzliche Rüstzeiten im Falle der Alternativbearbeitung hatten einen geringfügigen Einfluss und wurden daher innerhalb der Werkstückwechselzeit t_E erfasst. Die Detaillierung der Maßnahmendurchführung anhand der EFS-1 und der EFS-2 wird in den folgenden Abschnitten beschrieben. Es handelt sich bei der Durchführung um theoretische Annahmen auf Basis der Messwerte.

Maßnahmendurchführung in EFS-1

Für die EFS-1 ist die Dauer und der jeweilige Zeitpunkt der Leerlaufzeiten der Maschine (Stand-by-Phasen) von großer Bedeutung, da diese die Grundlage zur Verschiebung einzelner Bearbeitungszeiten und damit der Lastprofile darstellen. Für die Verteilung der Leerlaufzeiten über den Schichtverlauf wurden zwei Fälle (A bzw. B) angenommen (Abbildung 7.17). Der jeweils durch eine Maßnahme veränderte Fall ist zusätzlich durch ein nachgestelltes Sternsymbol gekennzeichnet (*).

Der Fall A stellt die direkte, unterbrechungsfreie Aneinanderreihung der Fertigung einzelner Werkstücke ab Schichtbeginn dar (Wechsel zwischen den Zuständen E und P, siehe Abbildung 7.17 oben). Somit ergibt sich eine kumulierte Leerlaufzeit (Zustand S) zum Schichtende, sobald das Teilesoll der

7 Anwendung und Übertragung auf Alternativstrategien

Schicht erreicht ist. Der Fall B ist durch regelmäßige Unterbrechungen nach jedem Werkstück gekennzeichnet (Zustandsabfolge E-P-S). Zwar wird in einem wirtschaftlichen Serienbetrieb der Fall A angestrebt, doch kommt es durch ablaufbedingte Einflüsse in der Fertigung zwangsläufig zu Unterbrechungen, weshalb sich in der Praxis gewöhnlich ein Ablauf zwischen den Fällen A und B einstellt.

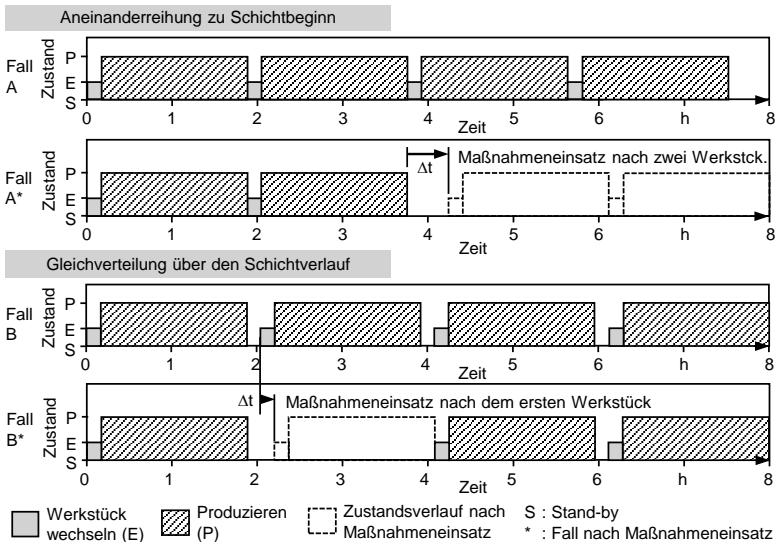


Abbildung 7.17: Fälle der Maschinenbelegung und Auswirkung auf die Verschiebezeiträume

Im Fall A kann die Fertigung gleich zu Schichtbeginn oder nach Fertigstellung eines jeden einzelnen Werkstücks unterbrochen werden (im Beispiel A* gemäß Abbildung 7.17 nach zwei Werkstücken). Dieses Vorgehen entspricht der Maßnahme *Unterbrechen des Aktivzustands*, die bisher für die Komponentenebene definiert wurde. Aufgrund der speziellen Anforderung 4 (siehe Abschnitt 5.3.3) kann eine Unterbrechung nicht während der Bearbeitung eines Werkstücks und damit nur zu diskreten Zeitpunkten erfolgen (nach jedem einzelnen Werkstück). Als weitere Rahmenbedingung dient das Teilesoll: Die Unterbrechung durch die Maßnahme (Verschiebezeitraum Δt) darf nur so lange anhalten, dass die verbleibende Schichtzeit für die Produktion der weiteren Teile ausreicht.

Sofern die Fertigungszeiträume wie in Fall B gleichmäßig über die Schicht verteilt sind, kann der Ablauf nur über die Dauer eines einzelnen Leerlaufzeitraums unterbrochen werden. Es resultiert ein kleinerer Verschiebezeitraum Δt

7.4 Bewertung alternativer Energieflexibilitätsstrategien

(Fall B*, siehe Abbildung 7.17 unten). Prinzipiell kann eine identische Maßnahme nach jedem darauffolgenden Werkstück (nach jeder E-P-Folge) erneut abgerufen und damit der Verschiebezeitraum sukzessive verlängert werden. Das maximale Potenzial einer solchen Verkettung entspricht dem gezeigten Fall A bei der Aneinanderreihung zu Schichtbeginn.

Maßnahmendurchführung in EFS-2

Die EFS-2 sieht die Änderung des Lastprofils durch die alternative Belegung von Maschinen vor. Wie bereits einleitend erwähnt, kann ein 1:4-Tausch der Werkstücke ohne nennenswerte Zeitdifferenz durchgeführt werden (Abbildung 7.18). Zusätzliche Leerlaufzeiten werden damit vermieden. Im Falle einer sehr geringen Auslastung der Fertigungsinsel ist überdies ein kurzfristiger Wechsel der Maschinenbelegung ohne zwangsläufigen Gegentausch möglich (die Fertigung findet z. B. komplett auf einer einzigen Maschine statt). Die notwendige Voraussetzung der geringen Auslastung ist unter den Bedingungen einer spanenden Serienfertigung jedoch selten gegeben.

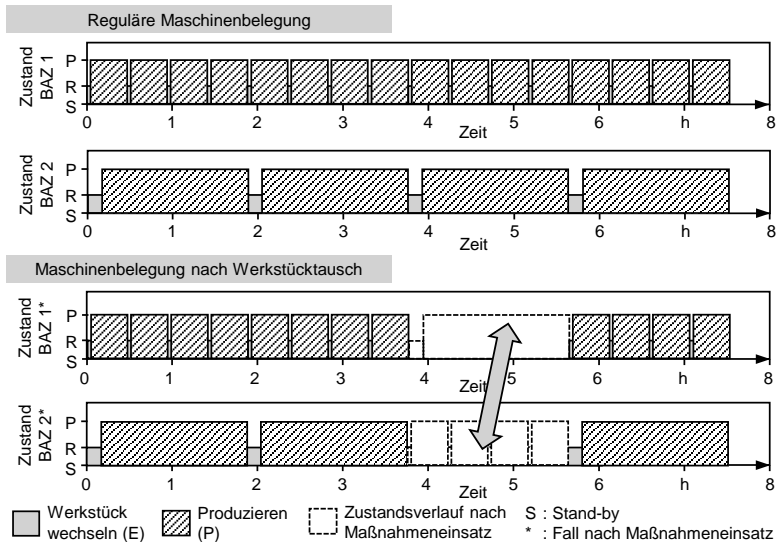


Abbildung 7.18: Kurzfristiger Tausch der Maschinenbelegung

In beiden Fällen der EFS-2 werden Eingriffe in eine festgelegte Maschinenbelegungsplanung vorgenommen. Die Berücksichtigung sämtlicher Rahmenbedin-

7 Anwendung und Übertragung auf Alternativstrategien

gungen im Zuge einer Neuplanung ist kurzfristig nicht oder nur mit hohem Aufwand möglich. Somit besteht ein hohes Risiko, den Prozess im Ganzen ineffizienter zu betreiben. Dies betrifft nicht nur die elektrische Energie, sondern auch den Einsatz aller weiterer Ressourcen. Ein weiterer Punkt ist bei der Durchführung einer EFS-2-Maßnahme relevant: Da jede Maschine einen spezifischen Energiebedarf je Werkstück aufweist, verändert sich der absolute Energiebedarf, sobald eine von der ursprünglichen Planung abweichende Maschinenbelegung vorliegt. Im Beispiel der Fertigungsinsel ist der absolute Energiebedarf durch den Werkstücktausch um 2,7 % angestiegen (siehe Tabelle 7.3). Es wird somit eine Energiemenge im Sinne der Energieflexibilität eingesetzt, auf welche im Anschluss nicht mehr zugegriffen werden kann und die damit als verbraucht gilt. Konkret, auf das Quantifizierungsmodell bezogen, werden im Zuge der EFS-2 Energieflexibilitätsmaßnahmen durchgeführt, die keiner Gegenmaßnahme (Rückführung der flexiblen Energie zur Wiederherstellung des Ausgangszustands) bedürfen. Die flexible Energie entspricht somit einem direkten Mehrverbrauch, was einer vollständigen Verschwendung gleichkommt. Damit sich hier eine positive Erlössituation einstellt, müssten negative Energiepreise⁴ für den Endkunden vorliegen, was aber auf Dauer kein realistisches Szenario darstellt. Die Durchführung von Maßnahmen der EFS-2 ist folglich für die kurzfristige Nutzung der Energieflexibilität keine sinnvolle Alternative, weshalb auf deren weitere Betrachtung verzichtet wird.

Tabelle 7.3: Veränderung der absoluten Energiebedarfe beim Wechsel der Maschinenbelegung

	BAZ 1	BAZ 2	Summe
<i>Regulärer Energiebedarf</i>			
während der Hauptzeit	35,57 kWh	25,16 kWh	
während der sonstigen Zeitanteile	4,67 kWh	2,64 kWh	
			68,04 kWh
<i>Energiebedarf nach dem Werkstücktausch</i>			
während der Hauptzeit	38,28 kWh	24,31 kWh	
während der sonstigen Zeitanteile	4,42 kWh	2,86 kWh	
			69,86 kWh

⁴In der Literatur werden häufig *negative Strompreise* erwähnt. Entsprechende Berichte beziehen sich auf Kurse an Strombörsen, auf die Endkunden keinen Zugriff haben. Zudem tritt dieses Phänomen nur in Ausnahmesituationen (z. B. Weihnachtszeit) auf.

Zusammenfassend verbleiben somit, neben der EFS-5, lediglich die Maßnahmen der Alternativstrategie EFS-1 für die quantifizierende Bewertung des jeweiligen Energieflexibilitätspotenzials in den folgenden Abschnitten.

7.4.2 Übertragung des Quantifizierungsmodells

Die Methode zur Quantifizierung des Energieflexibilitätspotenzials (aus Abschnitt 6.5) ist gezielt für die Anwendung von taktenden Verbrauchern gemäß der EFS-5 konzipiert. Um eine einheitliche Bewertung der Maschinenebene (EFS-1) mit demselben Modell zu ermöglichen, müssen die Kennzahlen aus Abschnitt 6.5.2 für den Gültigkeitsraum der Maschinenebene erweitert werden. Die Definition der Aktiv- und Passivzeiten lautet somit folgendermaßen:

- **Aktivzustand:** Zusätzlich zu allen produktiven Phasen der betrachteten Maschine zählen Werkstückwechsel- und Rüstzeiten ebenfalls zum Aktivzustand. Diese sind der Aktivzeit \bar{t}_A zuzurechnen und in der durchschnittlichen Leistungsaufnahme \bar{P}_A zu berücksichtigen.
- **Passivzustand:** Reine Pausenzeiträume, in denen weder Teile eingelegt, gerüstet noch produziert wird, sind der Passivzeit \bar{t}_P mit der durchschnittlichen Leistungsaufnahme \bar{P}_P zuzurechnen. Werden in direkter Abfolge mehrere Werkstücke hintereinander bearbeitet (evtl. Werkstückwechsel oder Rüsten inbegriffen), so tritt kein Passivzustand zwischen den Werkstücken auf.

Geplante und ungeplante Stillstände der Maschine, z. B. aufgrund von Teilemangel, Wartung oder Reparaturen, werden dabei nicht einbezogen. Für die weiteren Kennzahlen ergeben sich folgende Definitionen:

- **Maximale Reaktionszeit:** Grundsätzlich gilt die Definition aus der Komponentenebene analog, sodass die maximale Reaktionszeit der Summe aus der aktuellen Zykluszeit und der hälftigen Zielzykluszeit entspricht ($t_{resp} = t_{curr} + 0,5 \cdot t_{targ}$). Eine weitere Randbedingung zeigt sich für den Aktivzustand aus der vierten speziellen Anforderung: Die Maßnahme *Unterbrechen des Aktivzustands* kann nur zu diskreten Zeitpunkten gestartet werden. Es wird somit für t_{resp} definiert, dass im Falle einer ungeraden Anzahl an Werkstücken die Bearbeitung des (zeitlich) mittleren Werkstücks beendet sein muss. Für die Maßnahme *Vorziehen des Aktivzustands* ergibt sich keine Änderung, da der Passivzustand jederzeit unterbrochen werden kann.

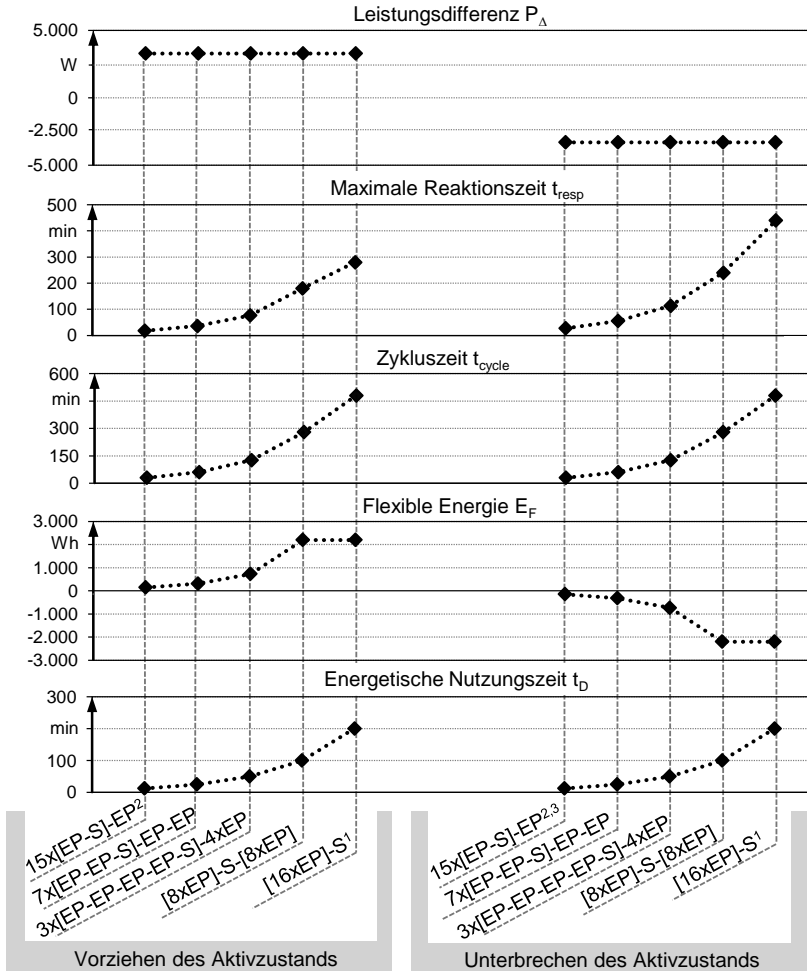
- **Leistungsdifferenz:** Auf der Maschinenebene wird die Leistungsdifferenz analog zur Komponentenebene durch die Subtraktion der gemittelten Leistungsaufnahmen der Betriebszustände ermittelt. Als Minuend tritt nach wie vor die Leistungsaufnahme des Zielzustands \bar{P}_{targ} auf: $P_{\Delta} = \bar{P}_{targ} - \bar{P}_{curr}$.
- **Zykluszeit:** Die Summe aus der Aktiv- und der Passivzeit ($\bar{t}_A + \bar{t}_P$) resultiert auch auf Maschinenebene in der Zykluszeit. Gemäß der genannten Definition der Aktivzeit sind Werkstückwechsel- und Rüstzeiten ebenfalls Bestandteil der Zykluszeit.
- **Flexible Energie und energetische Nutzungszeit:** Durch die diskreten Zeitpunkte während der Aktivphase (nach jedem Werkstück) ergeben sich für τ (siehe Gleichung 6.2) ebenfalls diskrete Werte. Sofern eine gerade Anzahl an Werkstücken je Aktivzeit vorliegt, resultieren für die Berechnungen der *flexiblen Energie* und auch der *energetischen Nutzungszeit* keine Änderungen an den Gleichungen 6.5 und 6.6, da ein $\tau = 0,5$ möglich ist. Für eine ungerade Anzahl ergibt sich ein τ aus dem kleinsten Wert größer 0,5 (z. B. bei 25 Werkstücken: $\tau = 1/25 \cdot 13 = 0,52$). Folglich ist die Vereinfachung nach den Gleichungen 6.5 und 6.6 in diesem Fall nicht mehr möglich und die allgemeinen Gleichungen 6.3 und 6.4 müssen für die Berechnung herangezogen werden.

Aus den Erläuterungen zeigt sich, dass eine Unterbrechung des Aktivzustands, sofern dieser aus der Bearbeitung eines einzelnen Werkstücks besteht, aufgrund der vierten speziellen Anforderung nicht durchgeführt werden kann. Dies ist erst mit einer Mindestanzahl von zwei Werkstücken je Aktivzustand möglich. Eine theoretische Bewertung im Fall eines einzelnen Werkstücks wurde dennoch der Vollständigkeit halber durchgeführt. Dieser Fall ist in den folgenden Abbildungen gesondert gekennzeichnet.

7.4.3 Ergebnisdarstellung

Die im Zuge der Erläuterung von EFS-1 genannten Fälle (A: Aneinanderreihung zu Schichtbeginn; B: regelmäßige Unterbrechung nach jedem Werkstück) stecken das Spektrum der zeitlichen Abarbeitung des Tagessolls ab. Die tatsächlich eintretende Abfolge hängt von weiteren Einflussfaktoren ab und liegt innerhalb der beiden Fälle. In den Abbildungen 7.19 und 7.20 ist die Abhängigkeit der Energieflexibilitätskennzahlen vom Zeitpunkt und der Verteilung der Stillstandszeiten der Bearbeitungszentren 1 und 2 gezeigt. Die Abkürzungen E (Werkstück wechseln), P (Produzieren) und S (Stand-by) entsprechen den Zuständen aus der Abbildung 7.17.

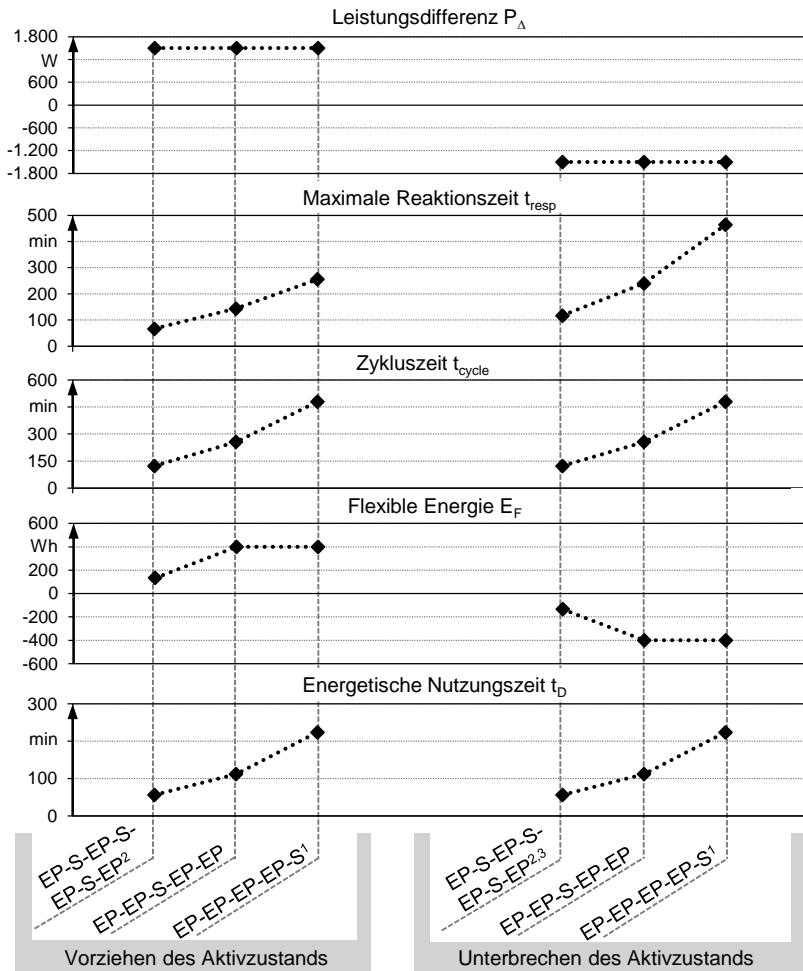
7.4 Bewertung alternativer Energieflexibilitätsstrategien



EP: Werkstück wechseln und produzieren; S: Stand-by; die Kombinationen aus EP und S beschreiben die Bearbeitungs- und Pausenabfolge; ¹Fall A, ²Fall B, ³rein theoretische Betrachtung des Falls, da keine Unterbrechung während der Bearbeitung eines Werkstücks vorgesehen ist;

Abbildung 7.19: Energieflexibilitätspotenziale in EFS-1 in Abhängigkeit der Bearbeitungs- und Pausenfolge am BAZ 1

7 Anwendung und Übertragung auf Alternativstrategien



EP: Werkstück wechseln und produzieren; S: Stand-by; die Kombinationen aus EP und S beschreiben die Bearbeitungs- und Pausenabfolge; ¹Fall A, ²Fall B, ³rein theoretische Betrachtung des Falls, da keine Unterbrechung während der Bearbeitung eines Werkstücks vorgesehen ist;

Abbildung 7.20: Energieflexibilitätspotenziale in EFS-1 in Abhängigkeit der Bearbeitungs- und Pausenfolge am BAZ 2

In beiden Fällen ist eine deutliche Abhängigkeit der Kennzahlen von der Bearbeitungsfolge zu erkennen. Während sich im Fall A (BAZ 1: 15 x [EP-S]-EP, bzw. BAZ 2: EP-S-EP-S-EP-S-EP) geringere Beträge für E_F und t_D abzeich-

7.4 Bewertung alternativer Energieflexibilitätsstrategien

nen, sind diese aufgrund der kürzeren Reaktions- und Zykluszeit deutlich höher verfügbar. Die Potenziale aus dem Fall B (BAZ 1: [16 x EP]-S, bzw. BAZ 2: EP-EP-EP-EP-S) sind größer, folglich aber träger. Für die weitere Betrachtung wurden die jeweils mittleren Fälle (BAZ 1: 3x[EP-EP-EP-EP-S]-4xEP, bzw. BAZ 2: EP-EP-S-EP-EP) herangezogen, die eine gute Annäherung an die produktionstechnische Realität darstellen. Auf der Grundlage des Quantifizierungsmodells kann sowohl für die Maschinenebene (EFS-1, Abbildung 7.21) als auch für die Komponentenebene (EFS-5, Abbildung 7.6) das Energieflexibilitätspotenzial bestimmt werden. Die Visualisierungen als zeitaufgelöste Differenzlastprofile sind für die Maßnahme *Vorziehen des Aktivzustands* in den Abbildungen 7.22 und 7.23 gezeigt.

		Maßnahme	Vorziehen des Aktivzustands	Unterbrechen des Aktivzustands
BAZ 1	EFS-1, Produkt 1 (Szenario 2)	P_{Δ}	3,3 kW	-3,3 kW
		t_{cycle}	127 min	127 min
		t_{resp}	77 min	113 min
		E_F	733 Wh	-733 Wh
		t_D	50 min	50 min
BAZ 2	EFS-1, Produkt 2 (Szenario 4)	P_{Δ}	1,5 kW	-1,5 kW
		t_{cycle}	265 min	265 min
		t_{resp}	144 min	240 min
		E_F	400 Wh	-400 Wh
		t_D	112 min	112 min

Abbildung 7.21: Kennzahlen der Energieflexibilitätspotenziale in EFS-1 für die Fertigungsinsel mit den BAZ 1 und 2

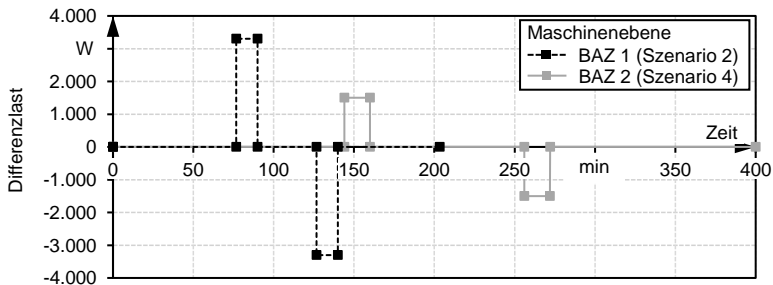


Abbildung 7.22: Zeitverlauf der Energieflexibilitätspotenziale der Maschinenebene für die Fertigungsinsel (EFS-1, Vorziehen des Aktivzustands)

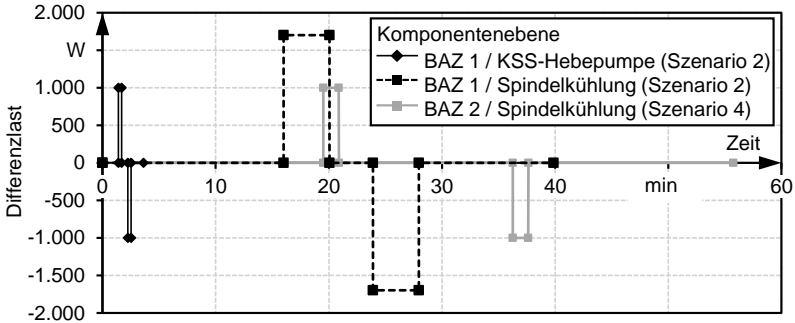


Abbildung 7.23: Zeitverlauf der Energieflexibilitätspotenziale der Komponentenebene für die Fertigungsinsel (EFS-5, Vorziehen des Aktivzustands)

Während die Leistungssprünge dieselbe Größenordnung aufweisen, ist zwischen der EFS-1 und der EFS-5 ein deutlicher Unterschied in der Zeitdimension ersichtlich. Dies bedeutet, dass die Maßnahmen der Maschinenebene über eine weit größere energetische Nutzungszeit verfügen, gleichzeitig aber auch die maximale Reaktionszeit entsprechend höher ausfällt. Analog ist auch von einer längeren Zykluszeit auszugehen, durch die der früheste Zeitpunkt einer erneuten Maßnahmendurchführung festgelegt wird.

Die Darstellung der Differenzlastprofile für die Maßnahme *Unterbrechen des Aktivzustands* kann analog vorgenommen werden (Abbildungen 7.24 und 7.25). Die Potenziale unterscheiden sich aufgrund verschiedener Reaktionszeiten und der Vorzeichen von P_{Δ} und E_F von den Differenzlastprofilen der Maßnahme *Vorziehen des Aktivzustands*.

Die Analyse der Alternativstrategien führt zu dem Ergebnis, dass für die Anwendung kurzfristiger Energieflexibilitätsstrategien – neben der EFS-5 – lediglich die EFS-1 infrage kommt. Die EFS-1 besitzt grundsätzlich ein höheres Energieflexibilitätspotenzial im Vergleich zur EFS-5. Im Gegenzug sinkt mit ihr die Verfügbarkeit, da die Reaktionszeit in gleichem Maße ansteigt. Die beiden EFS ergänzen sich sinnvoll: Während sich die Maßnahmen auf der Komponentenebene (EFS-5) durch einen sehr kurzfristigen Wirkeintritt auszeichnen, können schnell erschöpfte Kapazitäten durch die Maßnahmen auf der Maschinenebene (EFS-1) abgelöst bzw. erweitert werden, die bis dahin vollumfänglich zur Verfügung stehen. Nach der Ablösung können sich die Potenziale der Komponentenebene mithilfe von Gegenmaßnahmen regenerieren und bei Bedarf erneut abgerufen werden.

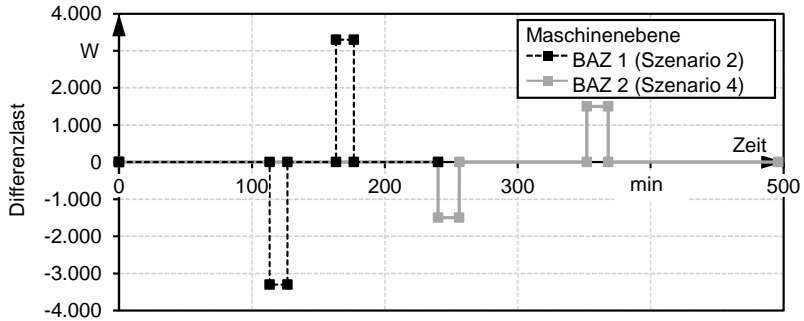


Abbildung 7.24: Zeitverlauf der Energieflexibilitätspotenziale der Maschinenebene für die Fertigungsinsel (EFS-1, Unterbrechen des Aktivzustands)

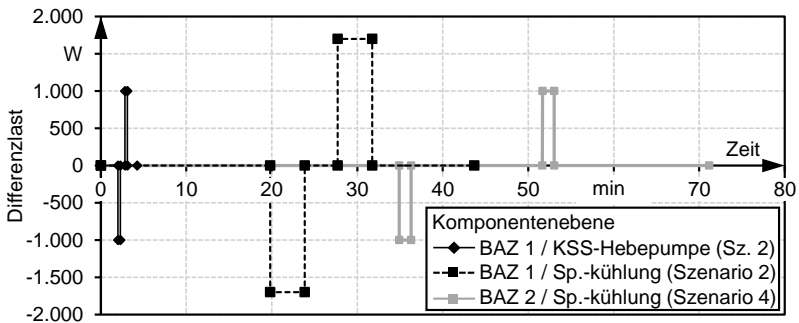


Abbildung 7.25: Zeitverlauf der Energieflexibilitätspotenziale der Komponentenebene für die Fertigungsinsel (EFS-5, Unterbrechen des Aktivzustands)

7.5 Zusammenfassung

In Abschnitt 7.2 wurde die erstmalige Anwendung der Methodik zur Identifikation und Bewertung der Energieflexibilität anhand zweier Werkzeugmaschinen beschrieben. Dabei wurden unter der Annahme von drei Bearbeitungs- und eines Stand-by-Szenarios die zwei typischen Bearbeitungszentren auf der Komponentenebene analysiert, sodass zuletzt drei Subsysteme als *technisch für den energieflexiblen Einsatz geeignet* klassifiziert werden konnten. Anhand eines detailliert beschriebenen Vorgehens wurde das Energieflexibilitätspotenzial ihrer Subsysteme ermittelt und mithilfe eines Kennzahlensystems quantifiziert.

7 Anwendung und Übertragung auf Alternativstrategien

Das Kennzahlensystem selbst beinhaltet u. a. die zwei zentralen Kennzahlen der *flexiblen Energie* und der *energetischen Nutzungszeit*. Deren Ermittlung lag das Quantifizierungsmodell zugrunde, dessen Validierung im Abschnitt 7.3 anhand ausführlicher Versuchsreihen beschrieben wurde. Durch die Umrüstung zweier Subsysteme für den energieflexiblen Einsatz konnten die identifizierten Energieflexibilitätsmaßnahmen in der Praxis durchgeführt und die tatsächlich auftretenden Energieflexibilitätspotenziale durch umfangreiche Messreihen ermittelt werden. Die sehr geringen verbleibenden Abweichungen zwischen Modell und Messung haben gezeigt, dass das Quantifizierungsmodell eine hohe Abbildungsgüte besitzt und somit geeignet ist, das Energieflexibilitätspotenzial realitätsgetreu abzubilden.

Die Analyse der Alternativstrategien EFS-1 und EFS-2 wurde in Abschnitt 7.4 detailliert dargelegt. Dabei wurde konstatiert, dass die Strategie EFS-2 nicht für die kurzfristige Maßnahmendurchführung geeignet ist, sondern vielmehr eine mögliche Maßnahme im Zuge der Produktionsplanung und -steuerung darstellt. Daher wurde der Fokus ausschließlich auf die EFS-1 ausgerichtet, für die das Kennzahlensystem entsprechend adaptiert und die Übertragbarkeit des Quantifizierungsmodells aufgezeigt wurde. Am Beispiel der Fertigungsinsel wurden die Energieflexibilitätspotenziale auf Grundlage der EFS-1 auf der Maschinenebene identifiziert und durch das Kennzahlensystem quantifiziert. Ein Vergleich mit den Potenzialen der Komponentenebene (EFS-5) hat gezeigt, dass sich die Maßnahmenportfolios beider Ebenen aufgrund ihrer zeitlichen Rahmenbedingungen positiv ergänzen können.

Die Untersuchung des energieflexiblen Betriebs von spanenden Werkzeugmaschinen wird im folgenden Kapitel 8 durch eine Fallstudie mit einer Erweiterung der Fertigungsinsel ergänzt. Dabei werden sowohl die Energieflexibilitätspotenziale der Komponenten- als auch der Maschinenebene hinsichtlich ihrer technischen und wirtschaftlichen Eignung bewertet.

8 Fallstudie mit wirtschaftlicher Betrachtung

8.1 Kapitelüberblick

In diesem Kapitel steht die Beschreibung einer Fallstudie im Mittelpunkt, welche die technischen und wirtschaftlichen Erfolgsaussichten des energieflexiblen Betriebs von spanenden Werkzeugmaschinen aufzeigen soll. Es schließt mit der Präsentation und Diskussion der Ergebnisse der Studie sowohl auf technischer als auch auf wirtschaftlicher Ebene.

8.2 Ableitung einer geeigneten Zielanwendung

Das Ziel der im Rahmen dieses Abschnitts beschriebenen Untersuchungen besteht in der Identifikation einer technisch sinnvollen Anwendung der Energieflexibilität von spanenden Werkzeugmaschinen, um diese als Grundlage für eine wirtschaftliche Betrachtung heranzuziehen. Als Zielanwendung kommen verschiedene Möglichkeiten in Betracht: Neben den preis- und anreizbasierten Demand-Response-Instrumenten (siehe Abschnitt 2.3.2), die eine Vermarktung des Potenzials nach außen darstellen, ergibt sich noch ein unternehmensinterner Ansatz, nämlich die (partielle) Eigenversorgung mit erneuerbaren Energien. Der Vergleich der verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten anhand technischer Kenngrößen wird im Folgenden beschrieben. Hierfür dient die Gegenüberstellung mit dem EF-Potenzial der spanenden Werkzeugmaschinen.

8.2.1 Bewertung möglicher Zielanwendungen

Als Grundlage für die Bewertung dient das Kennzahlensystem nach Abschnitt 6.5.2, wodurch eine direkte Gegenüberstellung mit dem Energieflexibilitätspotenzial aus Kapitel 7 möglich ist. In Tabelle 8.1 sind die leistungsmäßigen und zeitlichen Größenordnungen der jeweiligen Anwendungen dargestellt. Sofern die Größenordnungen mit denen der Werkzeugmaschine übereinstimmen, sind diese im Fettdruck dargestellt. Im Falle der Reaktionszeit t_{resp} gilt jede Zeit dann als übereinstimmend, wenn die Werkzeugmaschine innerhalb der geforderten Zeit reagieren kann.

8 Fallstudie mit wirtschaftlicher Betrachtung

Tabelle 8.1: Gegenüberstellung der möglichen Zielanwendungen mit dem Energieflexibilitätspotenzial einer spanenden Werkzeugmaschine

	P_{Δ}	t_{cycle}	t_{resp}	E_F	t_D	Eignung
EF-Potenzial einer Werkzeugmaschine	kW	Min.– Std.	Min.– Std.	Wh– kWh	Min.– Std.	
Terminmärkte	MW	Std.	Min.– Std.	MWh	Std.	nein
Abschaltbare Lasten	MW	Std.– Tage	Min.	MWh	Std.	nein
Regelenergiemarkt	MW	Std.	Min.– Std.	MWh	Min.– Std.	nein
Eigenversorgung	kW	Std.	Min.	kWh	Min.– Std.	ja

Obwohl das Energieflexibilitätspotenzial typischer Werkzeugmaschinen (bezogen auf die Zeitbereiche) durchaus für die Vermarktung am Regelenergiemarkt geeignet ist, zeigt die Auswertung, dass sämtliche Anwendungen an externen Märkten dafür zu große Energiemengen und Leistungsdifferenzen erfordern. Auch unter der Annahme mehrerer hundert Maschinen wären die geforderten Werte lediglich schwer erreichbar. Somit verbleibt die Eigenversorgung als einzige Option, um die Energieflexibilität der spanenden Werkzeugmaschinen technisch sinnvoll einzusetzen, weshalb diese als Zielanwendung für die Fallstudie herangezogen wird.

8.2.2 Detaillierung der Zielanwendung

Die bestehenden Tarif- und sonstigen Anreizmodelle stellen allesamt zu große Eintrittshürden für produzierende Unternehmen dar. Entgegen den bisherigen Ansätzen, die eine aktive Interaktion an aktuellen Energiemärkten über Netzdienstleistungen oder den Handel von Energiemengen fordern, steht im Folgenden ein Konzept im Mittelpunkt, das auf fixen Ein- und Verkaufspreisen (Strompreis bzw. Einspeisevergütung) basiert – ein Ansatz, der für die meisten Letztverbraucher mit einer oder mehreren Eigenerzeugungsanlagen die Regel ist. Der Markt und dessen Preisdynamik an sich wird somit nicht mehr direkt einbezogen, der Netzanschluss des Betriebs stellt die Schnittstelle zum Strommarkt mit gewöhnlichen Tarifsystemen dar.

8.2 Ableitung einer geeigneten Zielanwendung

Der Kernaspekt und eine wesentliche Annahme der Zielanwendung besteht darin, dass in Zukunft die Gesteungskosten für eigenerzeugte (erneuerbare) Energien fallen werden und die Eigenerzeugung somit eine kostengünstige Alternative für den Netzbezug darstellt. Es wird dabei keine Insellösung mit voller Autarkie angestrebt. Vielmehr werden beide Versorgungswege (siehe Abbildung 8.1 rechts) genutzt und der Nutzungsgrad der elektrischen Energie aus eigenen Erzeugungsanlagen unter dem Einsatz der Energieflexibilität maximiert. Der eigengenutzte Anteil ist dabei umlagepflichtig nach EEG (gemäß Abschnitt 2.3.3).

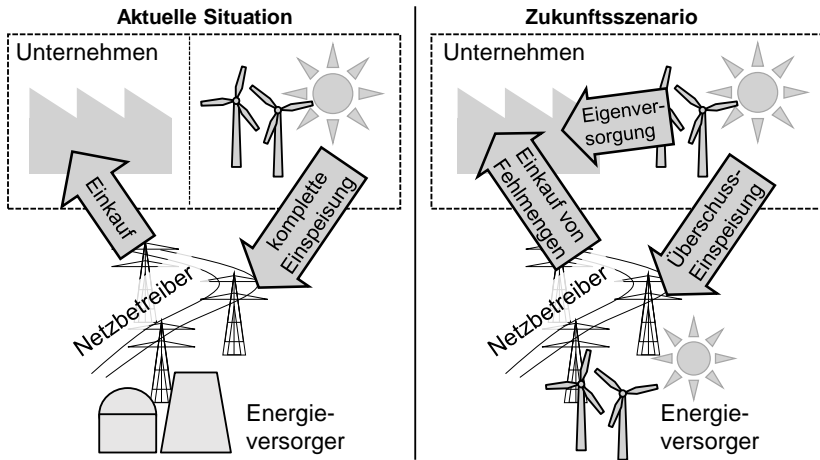


Abbildung 8.1: (Abrechnungstechnische) Flussrichtungen elektrischer Energie (aktuelle Situation und Zukunftsszenario)

Ein hoher Nutzungsgrad ist insofern relevant, als dass damit geringere Mengen an überschüssiger Energie veräußert werden müssen, was unter der Annahme eines weitgehenden Wegfalls der Förderung nach EEG kaum mehr positive Anreize bieten wird. Die bisherige scharfe Trennung beider Bereiche (Abbildung 8.1 links) wird durch die Konstellation auf der rechten Seite abgelöst werden. Die ein- und ausgehenden Energieflüsse dürfen dabei nicht zusammengefasst werden, da für Ein- und Verkauf nach wie vor verschiedene Preise gelten¹. Für die aktuelle und zukünftige Situation werden die Bestandteile (Kosten,

¹Die aktuelle Gesetzeslage schreibt vor, dass jede „Einspeise- oder Entnahmestelle [...] einem Bilanzkreis zuzuordnen [ist]“ (§ 3 Abs. 3 S. 1 StromNZV). Sogenannte *rückwärtsdrehende Stromzähler* sind ausgeschlossen.

8 Fallstudie mit wirtschaftlicher Betrachtung

Erlöse etc.) nach Tabelle 8.2 zugrunde gelegt. Folgende Annahmen wurden getroffen:

- Für die **Stromgestehungskosten** werden Sätze am oberen Rand der lernkurvenbasierten Prognose nach FRAUNHOFER ISE (2013) gewählt, da hier von Kleinanlagen ausgegangen wird, die verglichen zu Großanlagen höhere Kostensätze je kWh haben.
- Die **Einspeisevergütung** (Förderung nach EEG) wird im Zukunftsszenario auf ca. 20 % der aktuellen Sätze reduziert, was ein allmähliches Ausschleichen der Förderung darstellen soll. Für die aktuellen Sätze werden die Werte für Neuanlagen² im Jahre 2017 aus FRAUNHOFER ISE (2018, S. 10) und BUNDESNETZAGENTUR (2018, S. 1) herangezogen, um eine Verzerrung des Ergebnisses durch hochvergütete Bestandsanlagen zu vermeiden (vgl. Vergütungssätze von Bestandsanlagen in Tabelle 2.3).
- Die **Stromkosten bei Netzbezug** (ohne EEG-Umlage und Netzentgelte) werden um 50 % angehoben, da kostengünstige, konventionelle Bestandsanlagen (z. B. Kohle- oder Kernkraftwerke) zunehmend vom Netz gehen werden und daher eine Steigerung des Preisniveaus von Energie als Folge davon zu erwarten ist.
- Da auch in 20 Jahren noch zahlreiche Bestandsanlagen der erneuerbaren Energieerzeugung umfangreiche Fördermittel genießen werden, kann die **EEG-Umlage** nicht im gleichen Maße wie die Förderung gesenkt werden. Hier wird von einer Reduktion auf 50 % des aktuellen Wertes (auf Basis von NETZTRANSPARENZ 2018) ausgegangen.
- Für die **Netzentgelte** wird aufgrund des starken Netzausbaus und der zunehmenden Kosten für das Einspeisemanagement ein weiterer Anstieg um 50 % erwartet.

In Abbildung 8.2 sind die möglichen Versorgungspfade skizziert, die für den Fall der partiellen Eigenerzeugung resultieren können. Die spezifischen Energiekosten je kWh lassen sich auf Basis der Werte aus der Tabelle 8.2 errechnen, wie in der Tabelle 8.3 am Beispiel der Photovoltaik dargestellt ist. Für den Fall der Windenergie erfolgte die Berechnung analog (Tabelle 8.4).

²Festvergütung, ohne Berücksichtigung des Ausschreibungsverfahrens

8.2 Ableitung einer geeigneten Zielanwendung

Tabelle 8.2: Monetäre Bestandteile des Strompreises in der aktuellen Situation und im Zukunftsszenario

	aktuell (Jahr 2017)	zukünftig (in ca. 20 Jahren)
Stromgestehungskosten (PV)	13,00	8,50
Stromgestehungskosten (Wind, an Land)	10,00	9,50
Einspeisevergütung (PV)	12,20	2,45
Einspeisevergütung (Wind, an Land)	7,70	1,55
Stromkosten bei Netzbezug ³	5,75	8,60
EEG-Umlage	6,90	3,45
Netzentgelt	2,00	3,00

(Angaben in ct/kWh, teilweise gerundet)

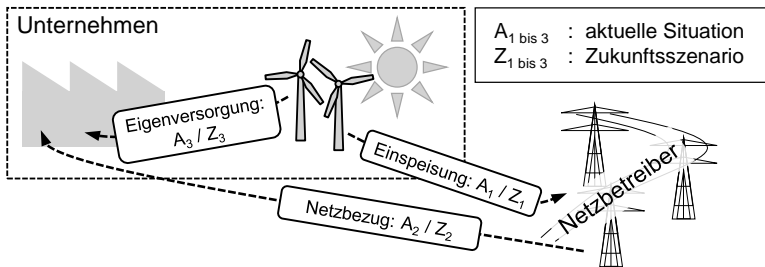


Abbildung 8.2: Versorgungspfade bei partieller Eigenerzeugung

Wird die aktuelle Situation der Photovoltaik betrachtet (siehe Tabelle 8.3), so sind die Kosten bei Eigenversorgung (Pfad $A_{3,PV}$) nach wie vor höher als bei einem reinen Netzbezug (Pfad $A_{2,PV}$). Während es in der Vergangenheit deutliche Erlöse mit sich gebracht hat, den kompletten Strom der eigenen PV-Anlagen zu veräußern und die gleiche Menge wieder einzukaufen (Kombination aus Pfad A_1 und A_2), so ist inzwischen auch diese Option aufgrund des starken Verfalls der Einspeisevergütungen nur noch bedingt wirtschaftlich. Vor wenigen Jahren sind Erlöse aus der Netzeinspeisung (z. B. $A_{1,PV} = -5$ ct/kWh) auch bei kleineren Anlagen möglich gewesen. Bei Betrachtung des Zukunftsszenarios

³ohne Netzentgelte, EEG-Umlage

8 Fallstudie mit wirtschaftlicher Betrachtung

zeigt sich, dass die Letztverbraucher umdenken müssen: Durch die unmittelbare Eigennutzung (Pfad A_3 bzw. Z_3) wird sich, verglichen zur Einspeisung, eine profitablere Erlössituation ergeben.

Tabelle 8.3: Berechnung der aktuellen und zukünftigen Kosten der Versorgungspfade am Beispiel der Photovoltaik

	aktuell	zukünftig
<i>Pfadindex 1: Direkte Netzeinspeisung</i>		
Stromgestehungskosten (PV)	13,00	8,50
Einspeisevergütung (PV)	-12,20	-2,45
Summe Pfade 1_{PV}	$A_{1,PV} = 0,80$	$Z_{1,PV} = 6,05$
<i>Pfadindex 2: Bezug aus dem Versorgungsnetz</i>		
Stromkosten bei Netzbezug	5,75	8,60
EEG-Umlage	6,90	3,45
Netzentgelt	2,00	3,00
Summe Pfade 2_{PV}	$A_{2,PV} = 14,65$	$Z_{2,PV} = 15,05$
<i>Pfadindex 3: Eigenversorgung durch erneuerbare Energien</i>		
Stromgestehungskosten (PV)	13,00	8,50
EEG-Umlage (40% ⁴)	2,76	1,40
Summe Pfade 3_{PV}	$A_{3,PV} = 15,76$	$Z_{3,PV} = 9,90$

(Angaben in ct/kWh, negative Werte stellen Erlöse dar)

Vergleichbare Ergebnisse zeigte die Berechnung der Kosten für alle Versorgungspfade der Windenergie (Tabelle 8.4). Hier wird deutlich, dass es bereits im aktuellen Fall wirtschaftlich ist, Strom aus eigenen Windkraftanlagen zu nutzen, was von zahlreichen Unternehmen bereits praktiziert wird ($A_{3,W} < A_{2,W}$). Einem unüberlegten Zubau von Erzeugungskapazität ist dennoch mit Vorsicht zu begegnen. Überschussstrommengen müssen in das Versorgungsnetz eingespeist werden, was in Zukunft bekanntlich für Kleinanlagen nicht mehr wirtschaftlich sein wird, da von einem Sinken der Einspeisevergütung ausgegangen wird ($Z_{1,W} > A_{1,W}$: die zukünftigen Gestehungskosten werden nur noch in geringem Umfang durch die Einspeisevergütung kompensiert).

Im Rahmen des Zukunftsszenarios bringt es somit Vorteile, den elektrischen

⁴reduzierter Satz nach § 61b Abs. 2 EEG

Energiebedarf mit erneuerbaren Energien aus eigener Erzeugung zu decken, anstatt diesen aus dem Netz zu beziehen. Durch die Energieflexibilität können die Überschussmengen aktiv reduziert werden.

Tabelle 8.4: Aktuelle und zukünftige Kosten der Versorgungspfade im Falle der Windenergie (Land)

	aktuell	zukünftig
Summe Pfade 1 _w	$A_{1,w} = 2,30$	$Z_{1,w} = 7,95$
Summe Pfade 2 _w	$A_{2,w} = 14,65$	$Z_{2,w} = 15,05$
Summe Pfade 3 _w	$A_{3,w} = 12,76$	$Z_{3,w} = 10,90$

(Angaben in ct/kWh)

8.3 Durchführung der Fallstudie

Der im vorangegangenen Abschnitt erläuterte Ansatz wird im Folgenden anhand einer Fallstudie unter praxisnahen Randbedingungen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit untersucht. Die Ausführungen sind in die Bereiche *Erfassung der Datenbasis*, *Erweiterung der Fertigungsinsel*, *Erläuterung des Simulationsmodells* und *Diskussion der Ergebnisse* untergliedert.

8.3.1 Erfassung der Datenbasis

Im Rahmen der Fallstudie müssen sowohl Tages- als auch Jahreszyklen der erneuerbaren Energiebereitstellung berücksichtigt werden. Daher wurde ein Gesamtbetrachtungszeitraum von einem Jahr bei einer Zeitauflösung der Messdaten von mindestens 15 Minuten (bzw. genauer) gewählt. Um die Datenbasis dennoch schlank zu halten, wurde je Kalenderwoche nur ein Tag berücksichtigt, sodass letztlich 52 Tagesdatensätze eingeflossen sind. Durch Rollieren der Wochentage wurden auch die Wochenenden in entsprechendem Anteil einbezogen (relevant bei den Verbrauchsdaten).

Da für die solare Bestrahlungsstärke (in diesem Kontext auch *Globalstrahlung* genannt), die für die Bestimmung des photovoltaisch bereitgestellten Stroms relevant ist, keine entsprechenden Daten in der nötigen Auflösung frei verfügbar waren, wurden diese messtechnisch anhand einer festinstallierten

8 Fallstudie mit wirtschaftlicher Betrachtung

Messzelle⁵ erfasst. In Bezug auf die Windgeschwindigkeit, die zur Bestimmung des Energieangebots aus der Windkraftanlage notwendig ist, wurde für dieselben Messtage auf Daten des LFU BAYERN (2018) zurückgegriffen. In Abbildung 8.3 ist ein Auszug der Messdaten gezeigt (vollständige Darstellung in Anhang A.2).

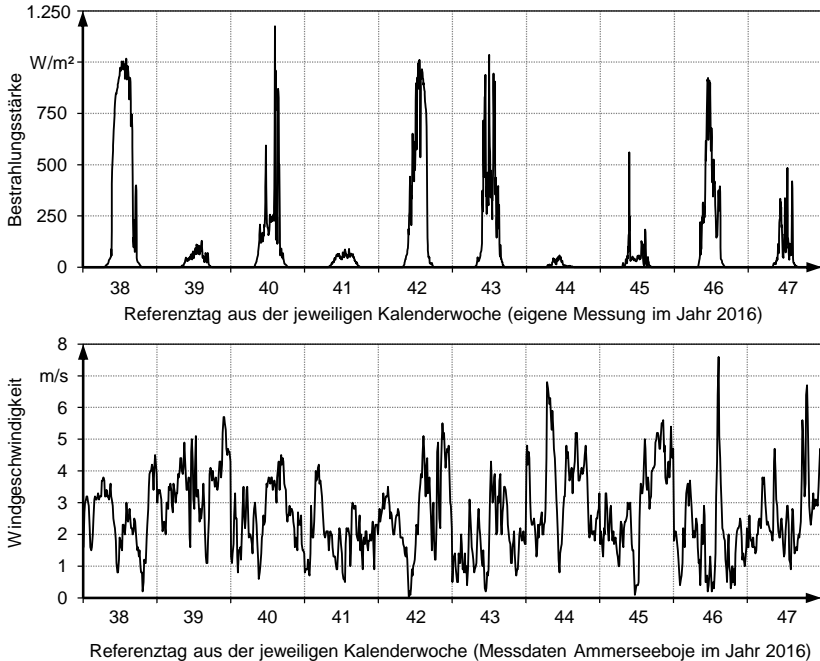


Abbildung 8.3: Ausschnitt aus den Rohdaten der Bestrahlungsstärke und der Windgeschwindigkeit (Werte der Windgeschwindigkeit nach LFU BAYERN 2018)

Um die selbst erfassten Werte der Bestrahlungsstärke und die Reduktion der Tage von 365 auf 52 auf Plausibilität zu überprüfen, wurden je Monat die mittleren Bestrahlungssummen gebildet, um diese mit den Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD 2018) zu vergleichen. Die Gegenüberstellung hat gezeigt, dass die Messwerte dem saisonalen Trend grundsätzlich folgen

⁵eigene Messung im Zeitraum Oktober 2016 bis Oktober 2017, aufgestellt auf freier Fläche im Landkreis Mühldorf am Inn / Oberbayern

(siehe Abbildung 8.4). Systematische Abweichungen z. B. in Form eines Drifts sind nicht zu erkennen, zudem weicht die Jahressumme lediglich um ca. 2% ab, was darauf schließen lässt, dass der Jahresverlauf adäquat erfasst wurde. Da für die Winddaten auf Messungen des Landesamtes für Umweltschutz zurückgegriffen wurde, ist von der Plausibilität der Werte auszugehen.

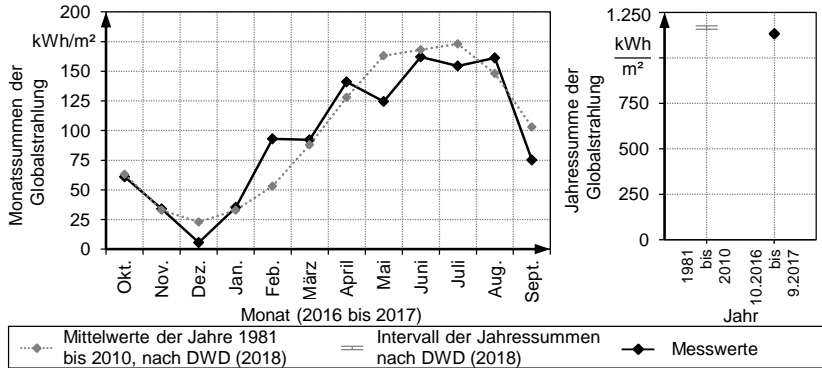


Abbildung 8.4: Gegenüberstellung der mittleren Bestrahlungsstärke je Monat und des Gesamtjahres mit den Daten des DWD (2018)

Aus den jeweiligen Rohdaten der Bestrahlungsstärke und der Windgeschwindigkeit kann das Angebot an elektrischer Energie aus den Erzeugungsanlagen errechnet werden⁶ Hierzu sind noch weitere Angaben notwendig, um eine quantitative Auswertung zu erlangen. Für den vorliegenden Anwendungsfall wurden die Momentanwerte der elektrischen Energie anhand einfacherer Umrechnungen ermittelt:

- **Photovoltaik:** Bei Vernachlässigung einer leichten Wirkungsgradverringerung durch einen steigenden Innenwiderstand bei höherer Bestrahlungsstärke kann von einem linearen Zusammenhang der (momentanen) Globalstrahlung mit der elektrischen Leistung ausgegangen werden (siehe Diagramm in KALTSCHMITT ET AL. 2013a, S. 429). Daher wurde vereinfachend die Bestrahlungsstärke auf ihren Maximalwert normiert und mit dem Nennleistungswert der angenommenen PV-Anlage multipliziert.
- **Windkraft:** Die Windgeschwindigkeit geht mit der dritten Potenz in die Leistungsberechnung ein (siehe KALTSCHMITT ET AL. 2013b, S. 455 f.).

⁶Die hierfür gültigen Umrechnungsformeln können der einschlägigen Literatur entnommen werden (z. B. KALTSCHMITT ET AL. 2013c, SCHAFFARCZYK 2016).

8 Fallstudie mit wirtschaftlicher Betrachtung

Zudem werden Windkraftanlagen ab einer Grenzwindgeschwindigkeit abgeregelt, um die mechanische Belastung bei hohen Windgeschwindigkeiten zu begrenzen. Für die Berechnung der resultierenden elektrischen Leistung wurde die dritte Potenz der Grenzgeschwindigkeit als Normierungswert für die momentanen Windgeschwindigkeitswerte genutzt und mit der Nennleistung der Windkraftanlage multipliziert.

Neben der Bereitstellung des Stroms aus erneuerbaren Quellen ist die Verbraucherseite ebenfalls zu berücksichtigen. Hierfür wurden reale Verbrauchsdaten eines spannenden Fertigungsbetriebs mittlerer Größe im Zweischichtbetrieb herangezogen. Um auch hier nur 52 Tage betrachten zu müssen, wurde der vollständige Datensatz entsprechend reduziert und Wochenenden bzw. Feiertage wurden mit entsprechenden Anteilen einbezogen (Auszug siehe Abbildung 8.5).

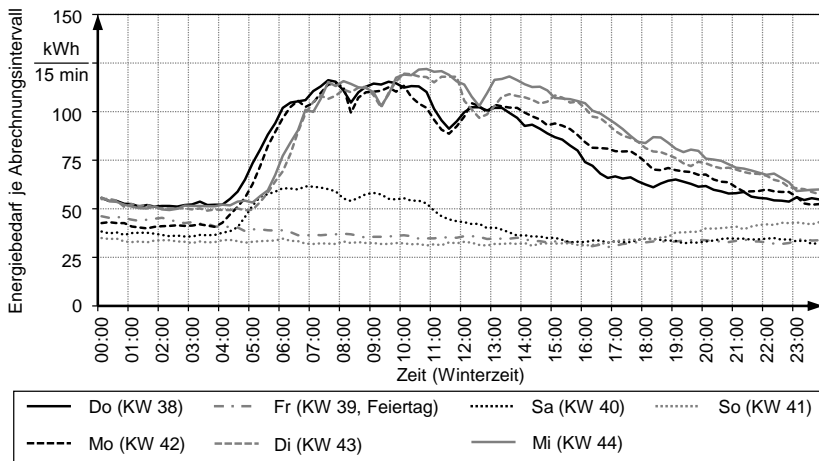


Abbildung 8.5: Auszug aus den Energiebedarfsdaten der spannenden Fertigung

In den gezeigten Zeitraum (Abbildung 8.5) fiel zum einen ein Feiertag, weshalb der Lastgang des Freitags dem des Sonntags ähnelt. Zum anderen fand die Umstellung von Sommer- auf Winterzeit statt, was dazu führte, dass sich der Schichtbeginn und die Mittagspause um eine Stunde verschoben haben.

8.3.2 Erweiterung der Fertigungsinsel

Die Fertigungsinsel aus Abschnitt 7.4.1 wurde erweitert, sodass diese sowohl aus einem umfangreichen Maschinenpark (*verbrauchender Teil*) als auch aus Erzeugungsanlagen für Strom aus Windkraft und Photovoltaik (*erzeugender Teil*) bestand. Aufgrund des Themenfokus auf den spanenden Werkzeugmaschinen wurde diesbezüglich auf die Betrachtung weiterer Anlagen verzichtet (wie z. B. die technische Gebäudeausrüstung und zusätzliche Produktionsmaschinen).

Mithilfe der Szenarien (siehe Abbildung 7.21) wurde die Größe des Maschinenparks definiert, welcher den verbrauchenden Teil der erweiterten Fertigungsinsel darstellt. Unter der Annahme einer Auslastung von ca. 85% beträgt der durchschnittliche Leistungsbedarf bei der Maschine 2 ca. 5,3 kW bzw. ca. 3,5 kW bei der Maschine 1. Die Auswertung der Tageslastgänge der spanenden Fertigung (siehe Abbildung 8.5) führt zu einem mittleren Leistungsbedarf von 363,7 kW (werktags im Zeitraum von 6 bis 22 Uhr). Für den Fall, dass die im vorangegangenen Abschnitt vermessene spanende Fertigung ausschließlich aus den Maschinen A und B besteht, kann angenommen werden, dass sich jeweils 42 Maschinen beider Typen in der erweiterten Fertigungsinsel befinden ($42 \cdot (5,3 \text{ kW} + 3,5 \text{ kW}) = 369,6 \text{ kW}$).

Der energieerzeugende Teil der erweiterten Fertigungsinsel beinhaltet zudem Windkraft- und Photovoltaikanlagen, die zur teilweisen Eigenversorgung genutzt werden. Für die Betrachtung wird von einer jeweiligen Erzeugungskapazität von 600 kW Nenn- bzw. Maximalleistung ausgegangen. Unter der Annahme der Rohdaten der solaren Einstrahlung und der Windgeschwindigkeit ergeben sich somit Jahreserträge von 1.148 MWh für die Windkraft- und 450 MWh für die Photovoltaikanlage. Diese Energie dient primär der Deckung des Leistungsbedarfes des verbrauchenden Teils der Fertigungsinsel. Etwaige Überschuss- bzw. Fehlmengen werden über das Versorgungsnetz ausgeglichen und getrennt bilanziert.

8.3.3 Erläuterung des Simulationsmodells

Das Simulationsmodell wurde in MATLAB R2013b implementiert und besteht aus globalen Variablen und zwei Funktionen. Die Funktionen bilden die vereinfachten Abläufe innerhalb eines Energieflexibilitätsmanagementsystems (EFM-System) und der energieflexiblen Systeme an sich ab (siehe Abbildung 8.6). Es wird für jeden Zeitschritt (30 Sekunden) die Residuallast bestimmt, die sich aus dem aktuellen Leistungsbedarf der Werkzeugmaschinen abzüglich der Momentanleistung der Erzeugungsanlagen errechnet. Zentral für das EFM-System ist ein zyklischer Algorithmus, der eine Residuallast in Form einer

8 Fallstudie mit wirtschaftlicher Betrachtung

Nulllinie anstrebt. Dieser prüft je Zeitschritt sämtliche vorhandenen Energieflexibilitätspotenziale iterativ und ruft diese bei Bedarf ab. Dies erfolgt genau dann, wenn die aktuelle Residuallast größer als $2/3$ der Leistungsdifferenz P_{Δ} des EF-Potenzials ist. Bevor eine Wirkung eintreten kann, wird die Durchführung erneut durch die energieflexible Komponente (EFK) selbst geprüft. Dabei werden spezifische Parameter (aktueller Betriebszustand, Mindestlaufzeiten, Reaktionszeiten etc.) berücksichtigt, bevor ein Zustandswechsel durchgeführt und damit eine Änderung der Residuallast bewirkt werden kann. Unabhängig davon, ob die EFK die Maßnahme ausführen kann, wird der EFM-Algorithmus fortgeführt, der die nächstkleineren Potenziale überprüft.

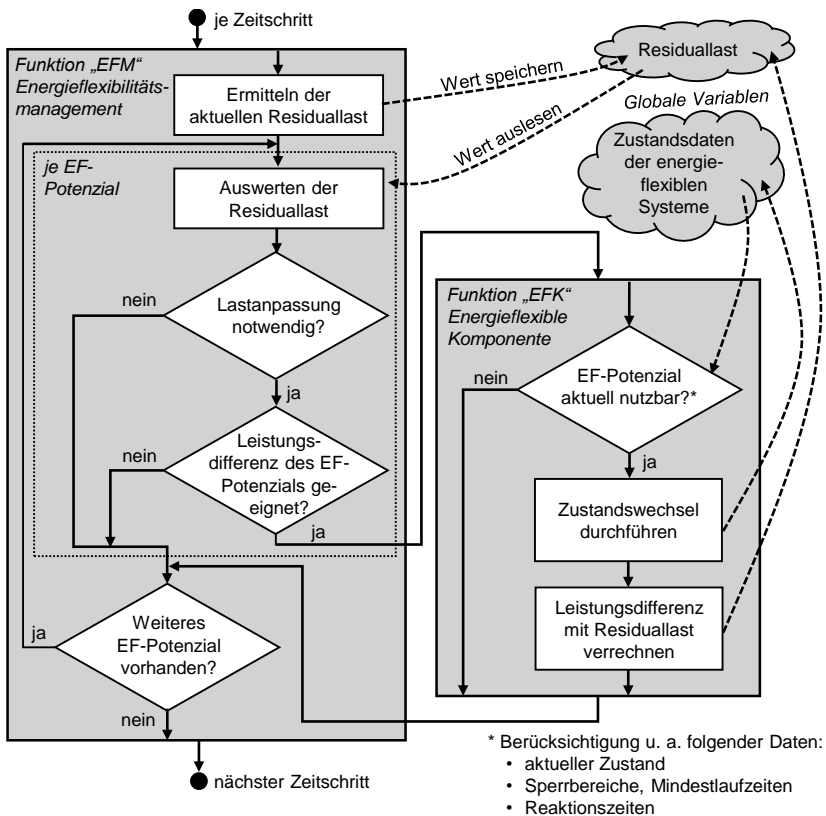


Abbildung 8.6: Ablaufdiagramm des Simulationsmodells

Durch das zweistufige Verfahren beider Funktionen (EFM und EFK) wird ein übermäßiger Datenaustausch zwischen den Komponenten und dem EFM-System verhindert, da umfangreiche Zustandsdaten nicht an das EFM-System kommuniziert werden müssen. Das EFM-System kann aufgrund von statischen Daten den Abruf einzelner EF-Potenziale abwägen. Die einzelnen EFK mit ihren lokalen Steuerungen können dabei dem Abruf widersprechen, falls die technische Durchführbarkeit nicht gegeben ist.

Die resultierenden Energiemengen je Versorgungspfad werden jeweils für den konventionellen (ohne Nutzung der Energieflexibilität) und den energieflexiblen Fall ermittelt und zu 15-Minuten-Intervallen aufsummiert. Aufgrund dieser eindeutigen Zuordnung zu den jeweiligen Bilanzkreisen ist eine monetäre Betrachtung möglich (siehe Abschnitt 8.4.2).

8.4 Ergebnisse der Fallstudie

Die Beschreibung der technischen und wirtschaftlichen Ergebnisse der Fallstudie ist Kern des Abschnitts 8.4. Dabei wird das wirtschaftliche Ergebnis im Zuge einer kritischen *Würdigung* diskutiert und ein Ausblick auf weitere Anwendungsgebiete formuliert.

8.4.1 Technische Betrachtung

Die Wirksamkeit der Energieflexibilitätspotenziale zur Reduktion der Residuallasten ist in hohem Maß vom Angebot der eigenerzeugten Energie abhängig. An Tagen mit einem durchgängigen Überschuss oder Mangel (z. B. Referenztag aus KW 3, siehe Abbildung 8.7 links) wurden keine Vorteile aus dem energieflexiblen Betrieb gezogen. Da die Potenziale nicht ausgereicht haben, das Nullniveau der Residuallast zu erreichen, ist es zu einem *Pendeln* der Residuallasten um das Ausgangsniveau gekommen. Dies wurde durch die periodische Abfolge von Energieflexibilitätsmaßnahmen und der zugehörigen Gegenmaßnahmen ausgelöst. Ist das Niveau der Residuallasten nahe der Nulllinie (siehe Referenztag der KW 49, Abbildung 8.7 rechts), so können diese effektiv durch die EF-Potenziale reduziert werden. Je häufiger Nulldurchgänge auftreten, desto vorteilhafter ist dies für die Energiekostenreduktion, da auch die Gegenmaßnahmen zur Senkung der Residuallasten eingesetzt werden können. Es liegt somit nahe, die Erzeugungskapazität derart auszulegen, dass eine häufige Anzahl an Nulldurchgängen auftritt. Aufgrund der hohen Abhängigkeit der

8 Fallstudie mit wirtschaftlicher Betrachtung

Erzeugungssituation von saisonalen Einflüssen wäre eine Optimierung hinsichtlich ausgewählter Tage oder auch Wochen möglich. Erweitert auf das volle Jahr würde dies aber stets einen Kompromiss darstellen.

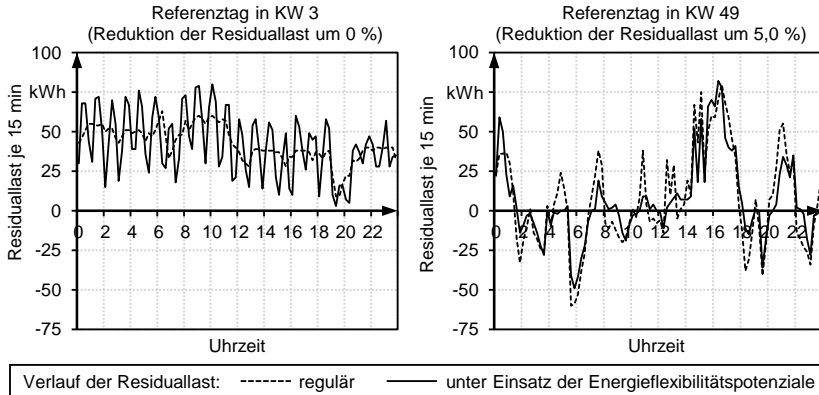


Abbildung 8.7: Residuallastverläufe zu verschiedenen Erzeugungssituationen

An Tagen mit einem kontinuierlichen Überschuss oder Mangel an eigenerzeugter Energie ist es empfehlenswert, auf einen energieflexiblen Betrieb zu verzichten, um nachteilige Effekte aufgrund des Pendelns zu vermeiden. Denn dies kann zu höheren Netzentgelten führen, die in erster Linie an der höchsten Lastspitze bemessen werden (siehe Abschnitt 2.3.1). Durch entsprechende zusätzliche Algorithmen innerhalb der EFM-Systems kann hier Abhilfe geschaffen werden. Die EF-Potenziale können in Überschuss- oder Mangelsituationen im gleichen Maße zur Reduktion der Lastspitzen verwendet werden (siehe z. B. MOOG ET AL. 2017). Zur Vermeidung der negativen Effekte ist infolgedessen zur Kombination des energieflexiblen Betriebs mit der Lastspitzenreduktion auf spanenden Werkzeugmaschinen zu raten.

Anhand der *Dauerlinie* (siehe Abbildung 8.8) ist deutlich zu erkennen, dass eine Reduzierung der Residuallasten auftritt, was die Funktionsfähigkeit des Gesamtansatzes unterstreicht. Gerade geringe Residuallasten unterhalb von ± 50 kWh haben deutlich abgenommen. Hieran zeigt sich, dass mithilfe der Energieflexibilität negative und positive Energiemengen gegenseitig kompensiert werden. Die absolute Veränderung der Energiemengen (siehe Tabelle 8.5) durch den energieflexiblen Betrieb zeigt, dass etwa 50 MWh an elektrischer Energie aus den Erzeugungsanlagen direkt fabrikintern verwendet werden können. Dies entspricht einer Reduktion der Energie aus Netzbezug von mehr als 4 %.

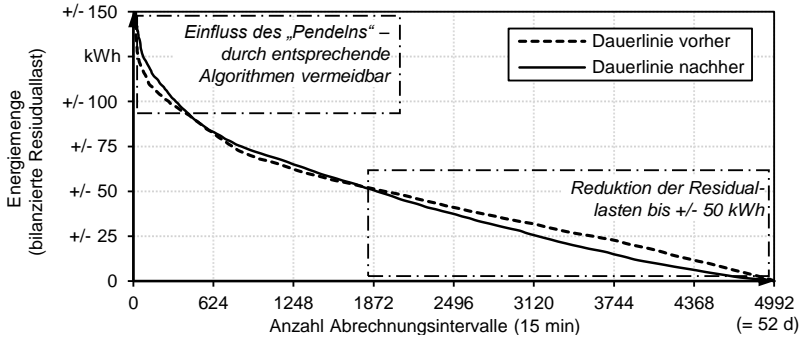


Abbildung 8.8: Dauerlinie der betragsmäßigen Energiemengen

Tabelle 8.5: Veränderung der Energiemengen je Versorgungspfad (EFS-1 und EFS-5)

Pfad-index	Beschreibung	konventionell	energieflexibel	Veränderung (abs. / rel.)
1	Direkte Netzeinspeisung	424,56	374,70	-49,86 -11,74 %
2	Bezug aus dem Versorgungsnetz	1.151,41	1.101,55	-49,86 -4,33 %
3	Eigenversorgung durch ern. Energien	1.169,79	1.219,66	49,87 4,26 %

(Angaben in MWh, geringfügige Abweichungen aufgrund Rundung)

Von großem Interesse ist zudem der individuelle Beitrag der Energieflexibilitätsstrategien (EFS-1 und EFS-5) zum Gesamtergebnis. Das Simulationsmodell ermöglicht eine entsprechende Auswertung, indem die Potenziale der einzelnen Strategien kombiniert, jedoch auch isoliert vorgegeben werden. Im Zuge der Simulationsdurchführung fiel auf, dass die Summe der Ergebnisse der isolierten Auswertungen geringer ausfällt als das Ergebnis des kombinierten Falls (siehe Abbildung 8.9). Dies ist auf Synergieeffekte zurückzuführen, die z. B. durch eine feingranularere Abstufung oder durch die höhere Vielfalt an verschiedenen Potenzialen entstehen. Dadurch besteht die Möglichkeit, eine höhere Güte bei der Reduktion der Residuallasten zu erzielen, was durch die Nutzung einzelner Potenziale nur eingeschränkt möglich ist.

8 Fallstudie mit wirtschaftlicher Betrachtung

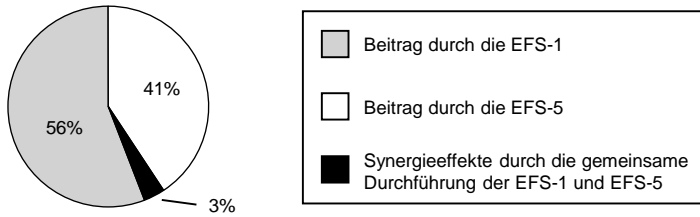


Abbildung 8.9: Beitrag der Energieflexibilitätsstrategien zum Gesamtergebnis

Für den Vergleich der beiden Strategien lässt sich resümieren, dass der individuelle Einfluss beider EFS auf das Gesamtergebnis vergleichbar ist, obwohl die Energieflexibilitätspotenziale der Komponentenebene (EFS-5) über geringere Nutzungszeiten und flexible Energiemengen verfügen. Dies ist mit geringeren Restriktionen und kürzeren Reaktionszeiten der Potenziale der EFS-5 zu begründen, die zu einer höheren Verfügbarkeit führen.

8.4.2 Monetäre Betrachtung

Durch die Verrechnung der (täglichen) Energiemengen mit den Kostenansätzen des Zukunftsszenarios (Tabellen 8.3 und 8.4) kann auf eine mittlere Kostenreduktion von 1,8 % geschlossen werden. Dabei streut das Ergebnis der Einsparungen an verschiedenen Tagen zwischen 0 und 7,1 % (siehe Abbildung 8.10). Dies entspricht einer absoluten jährlichen Ersparnis von ca. 5.900 € (Tabelle 8.6) über den gesamten Maschinenpark.

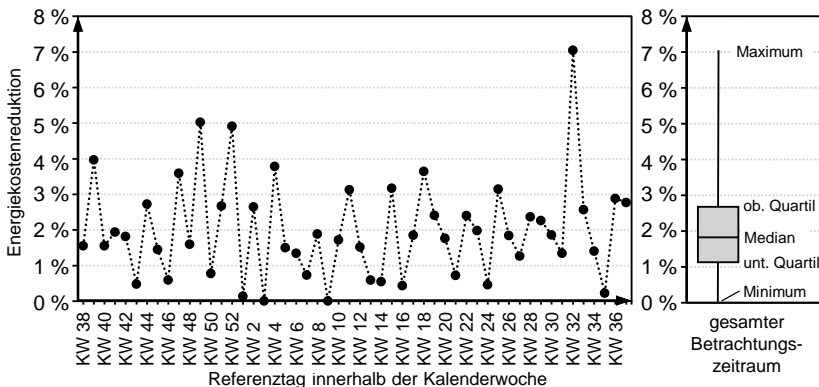


Abbildung 8.10: Reduktion der Gesamtkosten für die elektrische Energie

Hochgerechnet auf eine anzustrebende Amortisationsdauer von 8,5 Jahren für energiebezogene Investitionen (nach PwC 2015, S. 11) stehen somit 50.000 € für den Maschinenpark (bzw. 600 € je Maschine) zur Verfügung. Da der Energieflexibilitätsansatz vollständig automatisiert abläuft und als Zusatzfunktion innerhalb bestehender Energiemanagementsysteme implementiert werden kann, ist neben den Anschaffungskosten lediglich mit geringen bis keinen laufzeitbezogenen Kosten des energieflexiblen Betriebs zu rechnen. Die Marge fällt dennoch, aufgrund der im Allgemeinen günstigen Kosten für elektrischen Strom und der marktverzerrenden Wirkung der EEG-Umlage, sehr gering aus.

Tabelle 8.6: Kosten auf Basis des Zukunftsszenarios

Pfad- index	konventionell	energieflexibel	Differenz
1	31.494 €	27.795 €	-3.699 €
2	173.287 €	165.783 €	-7.504 €
3	124.232 €	129.528 €	5.296 €
Summe	329.013 €	323.106 €	-5.907 €

(Jahreswerte, negative Werte stellen Erlöse dar)

8.4.3 Wirtschaftliche Würdigung

Im Zuge der Fallstudie wurde aufgezeigt, dass die wirtschaftlichen Vorteile durch den energieflexiblen Betrieb von spanenden Werkzeugmaschinen sehr gering ausfallen. Eine essenzielle Voraussetzung für einen wirtschaftlichen Einsatz stellt die vollständige Automatisierung des energieflexiblen Betriebs dar. Mit der zunehmenden Digitalisierung der Fertigungseinrichtungen besteht zukünftig die Möglichkeit, kostengünstig entsprechende Funktionen zu implementieren und die Werkzeugmaschinen an ein zentrales EF-Managementsystem anzubinden. Dennoch sind die Energieflexibilitätspotenziale – gerade auf der Komponentenebene – aufgrund ihrer hohen Verfügbarkeit, der spontanen Einsatzfähigkeit und der verhältnismäßig feingranularen Abstufung eine wertvolle Ergänzung für den energieflexiblen Betrieb einer Fabrik, die zusätzlich auf z. B. zentrale Speicher oder langfristige Potenziale mithilfe der Produktionsplanung setzt.

Für die Studie wurde als Referenzstandort eine Region höchster Versorgungssicherheit (z. B. Ballungsregionen in Mitteleuropa) angenommen. Hier kann

die Wirtschaftlichkeit eines energieflexiblen Maschinenparks allein durch stark steigende Preise für elektrische Energie oder steuerliche Anreize bzw. Fördermittel weiter zum Positiven beeinflusst werden. Spielen zusätzliche Aspekte eine Rolle, wie z. B. die Erhöhung der Versorgungssicherheit von Fabriken in strukturschwachen Ländern, dann können weitere Kostenvorteile durch eine geringere Anzahl an Produktionsausfällen in die Rechnung einbezogen werden. Hier besteht die Möglichkeit, im Falle einer drohenden Netzüberlastung den Leistungsbedarf kurzfristig zu reduzieren. Strategisch kann die externe Energieversorgung durch eine partielle oder vollständige Eigenerzeugung (Autarkie) substituiert werden. Die kurz- und langfristigen Instrumente der Energieflexibilität sind hier von hoher Bedeutung, sodass sich auch dabei ein weiterer Ansatzpunkt zur Nutzung der EF-Potenziale ergibt.

8.5 Zusammenfassung und Fazit

Der Vorteil der Energieflexibilität in der gewählten Zielanwendung besteht darin, den Nutzungsgrad des Stroms aus eigenen Erzeugungsanlagen zu maximieren. Um die zukünftige Entwicklung der Energieversorgung entsprechend zu berücksichtigen, wurde ein Zukunftsszenario vorgestellt, das die möglichen Energiepreise in ca. 20 Jahren abbildet. Mithilfe selbst gemessener bzw. frei verfügbarer Datensätze für die solare Bestrahlungsstärke und die Windgeschwindigkeit wurde ein zeitaufgelöstes Angebotsprofil an elektrischem Strom errechnet. In Kombination mit dem Bedarfsprofil eines typischen produzierenden Betriebs konnte auf die Residuallast geschlossen werden. Auf Basis einer erweiterten Fertigungsinsel wurde der Einsatz der Energieflexibilitätpotenziale simuliert, um die Residuallast entsprechend zu minimieren und somit den Anteil des direkt verwendeten eigenerzeugten Stroms zu maximieren.

Durch die Fallstudie wurde aufgezeigt, dass der eigengenutzte Anteil über das Jahresmittel um 4,3 % gesteigert werden kann. Unter Berücksichtigung des Zukunftsszenarios resultiert dies in einer leider nur geringen Energiekostensparnis von 1,8 % im Jahresmittel. Ein wirtschaftlicher Betrieb in Regionen günstiger Energiepreise und hoher Versorgungssicherheit kann somit nur bei gleichzeitiger Automatisierung der Nutzung der energieflexiblen Potenziale erreicht werden. Unter der Annahme verschiedener Rahmenbedingungen (geringe Versorgungssicherheit, Regionen mit hohen Strompreisniveau) sind deutlichere Ergebnisse zugunsten des energieflexiblen Betriebs zu erwarten, die durch weitergehende Detailuntersuchungen noch näher betrachtet werden müssen.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Im Zuge der beschriebenen Forschungstätigkeiten wurde eine umfassende Analyse des energieflexiblen Betriebs spanender Werkzeugmaschinen durchgeführt. Dabei wurden, ausgehend von den Restriktionen, die sich aus dem operativen Betrieb spanender Werkzeugmaschinen ergeben, die verfügbaren Energieflexibilitätspotenziale grundlegend identifiziert und strukturiert erfasst. Sämtliche Energieflexibilitätspotenziale, die technisch relevant sind und sich kurzfristig abrufen lassen, wurden in der Analyse berücksichtigt und durch ein einheitliches Kennzahlensystem beschrieben. Durch eine ausführliche Fallstudie, die auf Basis einer geeigneten Zielanwendung durchgeführt wurde, konnten die technischen und wirtschaftlichen Erfolgsaussichten ermittelt werden. Die wesentlichen Neuheitsaspekte der Untersuchungen sind die *Analyse der Komponentenebene*, der Grundsatz der *produktivitätserhaltenden Energieflexibilität*, der *ebenen- und technologieübergreifende Bewertungsansatz*, die *Zielanwendung*, die auch für kurzzeitige Potenziale geeignet ist, und schließlich eine *Langzeitstudie über ein Jahr*, welche die adäquate Abbildung saisonaler Effekte in der Energiebereitstellung ermöglicht hat.

Auf der Komponentenebene wurden Energieflexibilitätspotenziale identifiziert, die auch während des Bearbeitungsprozesses nutzbar sind und sich daher durch eine hohe Verfügbarkeit auszeichnen. Aufgrund der Kernanforderung an eine hohe Produktivität der spanenden Werkzeugmaschinen ergaben sich für bisherige Potenziale aus der Literatur deutliche Einschränkungen, aber auch ein neuartiges Handlungsfeld. Der daraus abgeleitete Grundsatz, dass die Energieflexibilität auch während der Hauptzeit nutzbar sein muss, verhindert Einbußen in der Produktivität. Da trotz der Einschränkungen dennoch zahlreiche Subsysteme der Maschinen für einen energieflexiblen Betrieb infrage kommen, wurde eine Methode entwickelt, die eine Auswahl auf Basis des Energiebedarfs und des *Energy Independency Indicators* ermöglicht. Letzterer bewertet die zeitliche Korrelation der Leistungsaufnahme und -abgabe eines Subsystems.

Durch einen übergreifenden Bewertungsansatz konnten die Energieflexibilitätspotenziale sowohl der Komponentenebene als auch der Maschinenebene

quantifiziert werden. Ein einheitliches Kennzahlensystem ermöglichte dabei die direkte Gegenüberstellung in zeitlichen und energie-/leistungsbezogenen Kennwerten. Dabei wurde festgestellt, dass die Potenziale der Maschinenebene im Vergleich zur Komponentenebene zwar über eine höhere *flexible Energie* und eine längere *energetische Nutzungszeit* verfügen, im Falle der Reaktions- und Zykluszeit jedoch deutlich schlechter abschneiden. Die Fallstudie ergab schließlich, dass sich der individuelle Beitrag der Komponentenebene im gezeigten Beispiel auf 73 % der Potenziale der Maschinenebene beläuft.

Als Defizit vieler bisheriger Untersuchungen aus dem Stand der Wissenschaft sind fehlende oder unrealistische Zielanwendungen der Energieflexibilität spanender Werkzeugmaschinen zu nennen. In zahlreichen Fällen wurden Energiemarktpreise herangezogen, zu denen der gewöhnliche Fertigungsbetrieb keinen Zugang erhält. Durch eine partielle Eigenversorgung mit Netzausgleich wurde demgegenüber im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Zielanwendung der Energieflexibilität aufgezeigt, die sämtlichen Betrieben zur Verfügung steht. Da unter der heutigen Situation durch die EEG-Umlage und umfangreiche Förderprogramme starke marktverzerrende Wirkungen ausgeübt werden, können durch die Zielanwendung unter aktuellen Gegebenheiten nur geringe Erlöse erwirtschaftet werden. Eine Prognose für ein Zukunftsszenario, das in ca. 20 Jahren realistisch sein wird, zeigt aber bereits mögliche Reduktionen der Energiekosten im Bereich von bis zu 7,1 % für einzelne Tage unter Beibehaltung der vollen Produktivität. Im Jahresmittel belaufen sich diese auf 1,8 %. Dabei wurden sämtliche täglichen und saisonalen Einflüsse durch einen Betrachtungsraum von einem Jahr vollumfänglich berücksichtigt.

Das Einsparpotenzial durch den energieflexiblen Betrieb spanender Werkzeugmaschinen fällt somit sehr gering aus. An Standorten hoher Versorgungssicherheit kann der Ertrag lediglich durch den überdurchschnittlichen Anstieg der Energiepreise oder durch staatliche Förderprogramme gesteigert werden. Für Produktionsstandorte, die über eine geringere Versorgungssicherheit verfügen (z. B. Indien), kann die Energieflexibilität in großem Maße zur Erhaltung der Produktivität beitragen, indem Netzüberlastungen reduziert oder komplette energetische Inselösungen ermöglicht werden. Dadurch können sich weit lukrativere Erlössituationen ergeben.

Die wissenschaftliche Untersuchung der kurzfristigen Energieflexibilität spanender Werkzeugmaschinen ist mit den Ausführungen der vorliegenden Dissertation grundsätzlich vollzogen. Ein breiter Praxiseinsatz ist möglich, sofern sich im angestrebten Anwendungsfall eine wirtschaftliche Eignung aufzeigt. Um die Investitionskosten entsprechend gering zu halten, müssen umfangreiche Anschaffungen vermieden und die Verwaltung der Energieflexibilität durch

zusätzliche Funktionalitäten in geeigneten Steuerungssystemen vorgesehen werden. Hier bedarf es noch eines entsprechenden Entwicklungsaufwands, insbesondere in der Implementierung der Routinen in Maschinensteuerungen und Energiemanagementsystemen. Die speziellen Anforderungen, die im Zuge dieser Arbeit abgeleitet wurden, begründen wichtige Leitlinien für die Entwicklung entsprechender energieflexibler Systeme.

Die Anwendung und die Übertragung der Methodik auf weitere technische Systeme ist prinzipiell möglich. Sinnvollerweise eignen sich sämtliche Produktionsanlagen, die durch hohe Anforderungen an Produktivität und Produktqualität gekennzeichnet sind. Hier seien beispielsweise sämtliche weitere Arten an Werkzeugmaschinen, aber auch andere Verarbeitungsmaschinen wie Verpackungs- oder Papiermaschinen genannt.

9.2 Ausblick

Während der Ausarbeitung der vorliegenden Dissertation haben sich zudem verschiedene wissenschaftliche Handlungsfelder erschlossen, die auf Basis der Erkenntnisse fortgeführt werden können. Darunter fällt beispielsweise die wirtschaftliche Betrachtung unter dem Einbezug strukturschwacher Regionen, um die erwähnten Möglichkeiten zur Sicherstellung der laufenden Produktion durch die Energieflexibilität oder des Betriebs einer energieautarken Fabrik näher zu quantifizieren. Um eine repräsentative Aussage zu erhalten, müssen – neben den spanenden Werkzeugmaschinen – sämtliche energierelevanten Systeme der Fabrik, wie weitere Produktionsanlagen und die technische Gebäudeausrüstung (Versorgungssysteme, z. B. Klimatisierung, Druckluft) einbezogen werden. Eine wichtige Grundlage hierfür stellt die Übertragung der Methoden dieser Dissertation auf die weitere Fabrikeinrichtung dar. Somit kann auch deren Bewertung anhand eines einheitlichen Kennzahlensystems erfolgen und eine direkte Vergleichbarkeit sichergestellt werden.

Die rein reaktive Nutzung der Energieflexibilitätspotenziale zur Anpassung des Energiebedarfes kann durch zusätzliche prognosebasierte Verbrauchs- und Erzeugungsdaten mit Vorabwissen versehen und damit effektiver gestaltet werden. Da der Tageslastgang regelmäßige charakteristische Eigenschaften (z. B. durch Schicht- und Pausenzeiten) enthält und Wetterdaten für die kommenden Stunden nahezu exakt prädizierbar sind, ist eine gute Vorausschau auf die Residuallasten der bevorstehenden Stunden möglich. Somit können Energieflexibilitätsmaßnahmen, die eine längere Reaktionszeit besitzen, bereits im Vorfeld vorgemerkt werden, sodass der Wirkeintritt mit dem entsprechenden Zielzeitraum synchronisiert werden kann.

Ferner bedürfen die Synergieeffekte durch die gemeinsame Nutzung verschiedenartiger Energieflexibilitätspotenziale, die nachweislich zu einer Verbesserung des Ergebnisses führen, noch weiterer Untersuchungen. Dieser Aspekt ist für die Energieflexibilität spanender Werkzeugmaschinen dahingehend von hoher Bedeutung, da auf diesem Wege die verhältnismäßig kleinen Potenziale eine wichtige Rolle spielen können, auch in einem Umfeld weit größerer Verbraucher. Neben der grundsätzlichen Analyse der zugrunde liegenden Effekte kann der Vorteil gezielt durch entsprechende Steuerungsalgorithmen maximiert werden, die z. B. innerhalb von ME-Systemen integriert werden. Die informationstechnische Integration der Energieflexibilität in die Fabrik offenbart dabei ein zukünftiges Handlungsfeld hoher Relevanz.

Literaturverzeichnis

ABELE ET AL. 2009

Abele, E.; Dervisopoulos, M.; Kuhrke, B.: Bedeutung und Herausforderungen der Lebenszyklusanalyse am Beispiel Werkzeugmaschine. In: Schweiger, S. (Hrsg.): Lebenszykluskosten optimieren. Wiesbaden: Gabler 2009, S. 60–78.

ABELE ET AL. 2012

Abele, E.; Rummel, W.; Eisele, C.: Energieeffiziente Produktionsmaschinen durch Simulation in der Produktentwicklung: Ergebnisbericht des BMBF Verbundprojektes eSimPro. Darmstadt 2012.

ABELE ET AL. 2016

Abele, E.; Schraml, P.; Moog, D.: Electric Load Management on Machine Tools. Procedia CIRP o. Jhg. (2016) 55, S. 164–169.

ACATECH 2015

Acatech: Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050: Stabilität im Zeitalter der erneuerbaren Energien. Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung. München 2015.

ACATECH 2016

Acatech: Vortrag Reinhard F. Hüttl: 5. Clusterkonferenz Energietechnik Berlin Brandenburg 2016. Berlin 2016.

AGFW 2014

AGFW: AGFW-Stellungnahme: Zum Entwurf eines Gesetzes zur grundlegenden Reform des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und zur Änderung weiterer Vorschriften des Energiewirtschaftsrechts. Frankfurt am Main 2014.

AGORA ENERGIEWENDE 2012

Agora Energiewende: 12 Thesen zur Energiewende: Ein Diskussionsbeitrag zu den wichtigsten Herausforderungen im Strommarkt (Kurzfassung). Berlin 2012.

AGORA ENERGIEWENDE 2017

Agora Energiewende: Agorameter – Stromerzeugung und Stromverbrauch, 2017, <https://www.agora-energiewende.de/de/themen/-agothem-/Produkt/produkt/76/Agorameter/>.

ASHOK & BANERJEE 2001

Ashok, S.; Banerjee, R.: An optimization mode for industrial load management. IEEE Transactions on Power Systems 16 (2001) 4, S. 879–884.

A.T. KEARNEY 2011

A.T. Kearney: Weiterentwicklung der Energiestrategie 2020 des Landes Brandenburg: Bericht zur Phase 1 – Bestandsaufnahme und Zustandsbeschreibung, Entwicklung / Weiterentwicklung von Lösungsansätzen. Berlin 2011.

BAFA 2016

BAFA: Merkblatt für Energieaudits: Nach den gesetzlichen Bestimmungen der §§ 8 ff. EDL-G. Eschborn 2016.

BAYSTMWi 2014

BayStMWi: Energiewende A–Z. München 2014.

BDI 2011

BDI: Investieren in Deutschland – Die Sicht des Investors: Studie. Berlin 2011.

BEIER 2017

Beier, J.: Simulation Approach Towards Energy Flexible Manufacturing Systems. Cham, Schweiz: Springer International Publishing 2017.

BEIER ET AL. 2015

Beier, J.; Thiede, S.; Herrmann, C.: Increasing Energy Flexibility of Manufacturing Systems through Flexible Compressed Air Generation. Procedia CIRP o. Jhg. (2015) 37, S. 18–23.

BEIER ET AL. 2016

Beier, J.; Neef, B.; Thiede, S.; Herrmann, C.: Integrating on-site Renewable Electricity Generation into a Manufacturing System with Intermittent Battery Storage from Electric Vehicles. Procedia CIRP o. Jhg. (2016) 48, S. 483–488.

BEIER ET AL. 2017

Beier, J.; Thiede, S.; Herrmann, C.: Energy flexibility of manufacturing systems for variable renewable energy supply integration: Real-time control method and simulation. *Journal of Cleaner Production* o. Jhg. (2017) 141, S. 648–661.

BERTSCH ET AL. 2017

Bertsch, J.; Schweter, H.; Sitzmann, A.; Fridgen, G.; Sachs, T.; Schöpf, M.: Ausgangsbedingungen für die Vermarktung von Nachfrageflexibilität: Status-Quo-Analyse und Metastudie. 2017.

BLEICHER 1996

Bleicher, K.: Normatives Management. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): *Betriebshütte: Teil 2*. Berlin, Heidelberg: Springer 1996.

BMBF 2016

BMBF: Sicher, bezahlbar und sauber: Pressemitteilung 033/2016 des Bundesministeriums für Bildung und Forschung vom 05.04.2016, 2016, <https://www.bmbf.de/de/sicher-bezahlbar-und-sauber-2624.html>.

BMU 2012

BMU: Energiemanagementsysteme in der Praxis: ISO 50001: Leitfaden für Unternehmen und Organisationen. Berlin 2012.

BMWi 2015

BMWi: Energiewende direkt – Newsletter vom 21.04.2015, 2015, http://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2015/7/newsletter_2015-07.html.

BMWi 2018a

BMWi: Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. Berlin 2018.

BMWi 2018b

BMWi: EEG in Zahlen: Vergütungen, Differenzkosten und EEG-Umlage 2000 bis 2019. Berlin 2018.

BRECHER ET AL. 2017

Brecher, C.; Kehne, S.; Epple, A.: Energieflexible Fertigung mit Werkzeugmaschinen. *ZWF Zeitschrift für den wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 112 (2017) 1–2, S. 25–28.

Literaturverzeichnis

BRÜGGEMANN 2005

Brüggemann, A.: KfW-Befragung zu den Hemmnissen und Erfolgsfaktoren von Energieeffizienz in Unternehmen. Frankfurt am Main 2005.

BRUZZONE ET AL. 2012

Bruzzone, A.; Anghinolfi, D.; Paolucci, M.; Tonelli, F.: Energy-aware scheduling for improving manufacturing process sustainability: A mathematical model for flexible flow shops. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 61 (2012) 1, S. 459–462.

BUNDESNETZAGENTUR 2016

Bundesnetzagentur: Leitfaden zur Eigenversorgung. Bonn 2016.

BUNDESNETZAGENTUR 2017a

Bundesnetzagentur: Monitoringbericht 2016. Bonn 2017.

BUNDESNETZAGENTUR 2017b

Bundesnetzagentur: EEG-Umlage 2018 beträgt 6,79 ct/kWh – Pressemitteilung vom 16. Oktober 2017. Bonn 2017.

BUNDESNETZAGENTUR 2018

Bundesnetzagentur: EEG-Fördersätze für Windenergie an Land: Tabelle der Bundesnetzagentur, Referat 605, 2018, https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/VOeFF_Registerdaten/EE_Foerderung_Wind_04_2018.xlsx?__blob=publicationFile&v=2.

BUNDESREGIERUNG 2010

Bundesregierung: Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin 2010.

DARYANIAN ET AL. 1989

Daryanian, B.; Bohn, R. E.; Tabors, R. D.: Optimal demand-side response to electricity spot prices for storage-type customers. *IEEE Transactions on Power Systems* 4 (1989) 3, S. 897–903.

DATZMANN ET AL. 2016

Datzmann, S.; Tomescheit, M.; Simon, P.; Reinhart, G.: Saisonale Verschiebung von Last in energieintensiven Unternehmen. *Energy 2.0* (2016) 2, S. 41–43.

DENKENA 2013

Denkena, B. (Hrsg.): NC Plus: Prozess- und wertschöpfungsorientiert gesteuerte Werkzeugmaschine, Abschlussbericht. Berichte aus dem IFW. Garbsen: PZH-Verlag 2013.

DEPARTMENT OF ENERGY 2006

Department of Energy: Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for achieving them. Washington, DC 2006.

DERVISOPOULOS 2011

Dervisopoulos, M.: Methode zur lebenszyklusbezogenen Optimierung von Werkzeugmaschinen. Schriftenreihe des PTW: Innovation Fertigungstechnik, 1. Auflage. Aachen: Shaker 2011.

DICKIE 1951

Dickie, H. F.: ABC inventory analysis shoots for dollars, not pennies. *Factory Management and Maintenance* 109 (1951) 7, S. 92–94.

DIETMAIR ET AL. 2008

Dietmair, A.; Verl, A.; Wosnik, M.: Zustandsbasierte Energieverbrauchsprofile: Eine Methode zur effizienten Erfassung des Energieverbrauchs von Produktionsmaschinen. *wt Werkstattstechnik online* 98 (2008) 7/8, S. 640–645.

DIHK 2016

DIHK: Weiter auf steinigem Weg: IHK-Energiewende-Barometer 2016. Berlin: Eigenverlag 2016.

DORMAYER 1986

Dormayer, H.-J.: Konjunkturelle Früherkennung und Flexibilität im Produktionsbereich, Ifo-Beiträge zur quantitativen Wirtschaftsforschung, Band 3. München 1986.

DWD 2018

DWD: Globalstrahlungskarten, mittlere Monats- und Jahressummen, Zeitraum 1981–2010, 2018, https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/lstrahlungskarten_mi.html.

EBERSPÄCHER & VERL 2013

Eberspächer, P.; Verl, A.: Realizing Energy Reduction of Machine Tools Through a Control-integrated Consumption Graph-based Optimization Method. *Procedia CIRP* o. Jhg. (2013) 7, S. 640–645.

EMEC ET AL. 2013

Emec, S.; Kuschke, M.; Huber, F. W.; Stephan, R.; Strunz, K.; Seliger, G.: Stochastic optimization method to schedule production steps according to volatile energy price. In: Seliger, G. (Hrsg.): Proceedings of the 11th Global Conference on Sustainable Manufacturing. Berlin: Verlag der TU 2013. S. 637–642.

ENPARANTZA ET AL. 2006

Enparantza, R.; Revilla, O.; Azkarate, A.: A life cycle cost calculation and management system for machine tools. In: Dufflou, J.; Dewulf, W. (Hrsg.): Proceedings of the 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering. Leuven 2006, S. 717–722.

FANG ET AL. 2011

Fang, K.; Uhan, N.; Zhao, F.; Sutherland, J. W.: A new approach to scheduling in manufacturing for power consumption and carbon footprint reduction. Journal of Manufacturing Systems 30 (2011) 4, S. 234–240.

FANG & LIN 2013

Fang, K.-T.; Lin, B. M.: Parallel-machine scheduling to minimize tardiness penalty and power cost. Computers & Industrial Engineering 64 (2013) 1, S. 224–234.

FEDER ET AL. 2015

Feder, F.; Erlach, K.; Hosak, F.; Lepple, H.: Der energieflexible und effiziente Energiewertstrom: Direkte, indirekte und periphere Energieverbräuche reduzieren sowie flexibel an das Angebot anpassen. wt Werkstattstechnik online 105 (2015) 5, S. 313–318.

FERNANDEZ ET AL. 2013

Fernandez, M.; Li, L.; Sun, Z.: “Just-for-Peak” buffer inventory for peak electricity demand reduction of manufacturing systems. International Journal of Production Economics 146 (2013) 1, S. 178–184.

FRAUNHOFER ISE 2013

Fraunhofer ISE: Stromgestehungskosten erneuerbare Energien: Studie. Freiburg: Eigenverlag 2013.

FRAUNHOFER ISE 2018

Fraunhofer ISE: Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland: Fassung vom 21.2.2018. Freiburg: Eigenverlag 2018.

FRAUNHOFER IWU 2008

Fraunhofer IWU: Energieeffizienz in der Produktion: Untersuchung zum Handlungs- und Forschungsbedarf. Chemnitz: Eigenverlag 2008.

GEBBE ET AL. 2014

Gebbe, C.; Klemm, F.; Zhai, S.; Reinhart, G.: Estimating Machine Power Consumptions through Aggregated Measurements and Machine Data Acquisition. Applied Mechanics and Materials o. Jhg. (2014) 655, S. 61–66.

GHADIMI ET AL. 2015

Ghadimi, P.; Kara, S.; Kornfeld, B.: Renewable energy integration into factories: Real-time control of on-site energy systems. CIRP Annals – Manufacturing Technology 64 (2015) 1, S. 443–446.

GRASSL 2015

Graßl, M.: Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion, Forschungsberichte iwv, Band 300. München: Utz 2015.

GRASSL & REINHART 2014

Graßl, M.; Reinhart, G.: Evaluating Measures for Adapting the Energy Demand of a Production System to Volatile Energy Prices. Procedia CIRP o. Jhg. (2014) 15, S. 129–134.

GROSSE BÖCKMANN 2014

Große Böckmann, M.: Senkung der Produktionskosten durch Gestaltung eines Energieregler-Konzeptes: Ergebnisse aus der Produktionstechnik, Produktionsqualität und Messtechnik, Band 35. 1. Auflage. Aachen: WZL RWTH Aachen 2014.

HART 1992

Hart, G. W.: Nonintrusive appliance load monitoring. Proceedings of the IEEE 80 (1992) 12, S. 1870–1891.

HELBING 2010

Helbing, K. W.: Gleichzeitigkeit. In: Helbing, K. W. (Hrsg.): Handbuch Fabrikprojektierung. Berlin, Heidelberg: Springer 2010, S. 975–982.

HERNÁNDEZ MORALES 2003

Hernández Morales, R.: Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16, Technik und Wirtschaft, Band 149. Düsseldorf: VDI-Verl. 2003.

HESSELBACH ET AL. 2009

Hesselbach, J.; Junge, M.; Lang, B.; Mirciov, S.; Mostert, C.; Schlüter, A.; Weishaar, H.-G.: Praxisleitfaden Energieeffizienz in der Produktion. Wiesbaden 2009.

HIRSCH 2012

Hirsch, A.: Werkzeugmaschinen: Grundlagen, Auslegung, Ausführungsbeispiele. Studium, 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg 2012.

IW 2016

Institut der deutschen Wirtschaft: EEG 2017: Eine Kostenabschätzung: Mögliche Entwicklungen der Förderkosten bis 2020 und 2025. Köln: Eigenverlag 2016.

KABELITZ & STRECKFUSS 2014a

Kabelitz, S.; Streckfuß, U.: Energieflexibilität in der Produktionstheorie. ZWF Zeitschrift für den wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 109 (2014) 1–2, S. 43–45.

KABELITZ & STRECKFUSS 2014b

Kabelitz, S.; Streckfuß, U.: Identifikation energierelevanter Flexibilitätsdimensionen von Fertigungssystemen. ZWF Zeitschrift für den wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 109 (2014) 12, S. 900–903.

KABELITZ ET AL. 2014

Kabelitz, S.; Streckfuß, U.; Gujjula, R.: Einsatz von mathematischen Optimierungsverfahren zur energieorientierten Produktionsplanung. In: Müller, E. (Hrsg.): Produktion und Arbeitswelt 4.0 – Tagungsband TBI'14, 2014. S. 269–278.

KALTSCHMITT ET AL. 2013a

Kaltschmitt, M.; Lippitsch, K.; Müller, J.; Reichert, S.; Schulz, D.; Schwunk, S.: Photovoltaische Stromerzeugung. In: Kaltschmitt, M.; Streicher, W.; Wiese, A. (Hrsg.): Erneuerbare Energien. Berlin, Heidelberg: Springer 2013, S. 353–452.

KALTSCHMITT ET AL. 2013b

Kaltschmitt, M.; Schlüter, M.; Schulz, D.; Skiba, M.; Özdirik, B.: Stromerzeugung aus Windenergie. In: Kaltschmitt, M.; Streicher, W.; Wiese, A. (Hrsg.): Erneuerbare Energien. Berlin, Heidelberg: Springer 2013, S. 453–553.

KALTSCHMITT ET AL. 2013c

Kaltschmitt, M.; Streicher, W.; Wiese, A. (Hrsg.): Erneuerbare Energien. Berlin, Heidelberg: Springer 2013.

KARA ET AL. 2011

Kara, S.; Bogdanski, G.; Li, W.: Electricity Metering and Monitoring in Manufacturing Systems. In: Hesselbach, J.; Herrmann, C. (Hrsg.): Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing. Berlin, Heidelberg: Springer 2011, S. 1–10.

KARCHER & SIEMER 2013

Karcher, P.; Siemer, M.: Betriebliches Energiemanagement in produzierenden Unternehmen Deutschlands 2013: Studie. 1. Auflage. Berlin: Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK) 2013.

KELLER & REINHART 2015

Keller, F.; Reinhart, G.: Produktionsplanung unter Berücksichtigung des Energiebezugs. wt Werkstattstechnik online 105 (2015) 3, S. 141–147.

KELLER & REINHART 2016

Keller, F.; Reinhart, G.: Energy Supply Orientation in Production Planning Systems. Procedia CIRP o. Jhg. (2016) 40, S. 244–249.

KIEF ET AL. 2015

Kief, H. B.; Roschiwal, H. A.; Schwarz, K.: CNC-Handbuch 2015/2016. München: Carl Hanser 2015.

KORDONOWY 2002

Kordonowy, D. N.: A Power Assessment of Machining Tools: Bachelor of Science Thesis in Mechanical Engineering. Cambridge 2002.

LFU BAYERN 2018

LfU Bayern: Winddaten Ammerseeboje des Gewässerkundlichen Dienstes Bayern: Daten unter CC BY 4.0 lizenziert, 2018, <http://www.gkd.bayern.de/meteo/stationen/stammdaten/index.php?gknr=0&thema=gkd&rubrik=meteo&produkt=wind&msnr=16601050>.

LI ET AL. 2012

Li, L.; Sun, Z.; Tang, Z.: Real time electricity demand response for sustainable manufacturing systems: Challenges and a case study. In: IEEE (Hrsg.): IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE 2012), 2012. S. 353–357.

LI ET AL. 2011

Li, W.; Zein, A.; Kara, S.; Herrmann, C.: An Investigation into Fixed Energy Consumption of Machine Tools. In: Hesselbach, J.; Herrmann, C. (Hrsg.): *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*. Berlin, Heidelberg: Springer 2011, S. 268–273.

LIEBL ET AL. 2015

Liebl, C.; Popp, R.; Zäh, M. F.: Energieflexibilität von Produktionsanlagen. *wt Werkstattstechnik online* 105 (2015) 3, S. 136–140.

LIEBL ET AL. 2016

Liebl, C.; Popp, R.; Zaeh, M. F.: Systematic Generation and Evaluation of Energy Data in Manufacturing. In: Dimitrov, D.; Oosthuizen, T. (Hrsg.): *Proceedings of the International Conference on Competitive Manufacturing (COMA'16)*, 2016. S. 517–521.

MANDELBAUM 1978

Mandelbaum, M.: *Flexibility in Decision Making: An Exploration and Unification*. PhD thesis, Department of Industrial Engineering. Toronto: Universität Toronto 1978.

MENZ 2017

Menz, B.: *Methode zur digitalen Vernetzung von Produktionsmaschinen zur Lastgangglättung im Betrieb*. Schriftenreihe des PTW: Innovation Fertigungstechnik. Herzogenrath: Shaker 2017.

MILBERG 1995

Milberg, J.: *Werkzeugmaschinen-Grundlagen: Zerspantechnik, Dynamik, Baugruppen und Steuerungen*. Springer-Lehrbuch, 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 1995.

MOOG ET AL. 2017

Moog, D.; Flum, D.; Schraml, P.; Strobel, N.; Abele, E.; Scharmer, V. M.; Popp, R. S.-H.; Schulz, J.; Zäh, M. F.: Energieflexibilitätspotenziale in der Produktionsinfrastruktur. *ZWF Zeitschrift für den wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 112 (2017) 12, S. 852–856.

MOON ET AL. 2013

Moon, J.-Y.; Shin, K.; Park, J.: Optimization of production scheduling with time-dependent and machine-dependent electricity cost for industrial energy efficiency. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 68 (2013) 1–4, S. 523–535.

MÜLLER 2009

Müller, E.: Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. Berlin: Springer 2009.

NETZTRANSPARENZ 2018

Netztransparenz: EEG-Umlagen-Übersicht. 2018,
<https://www.netztransparenz.de/EEG/EEG-Umlage>.

NEUGEBAUER ET AL. 2012

Neugebauer, R.; Putz, M.; Schleger, A.; Langer, Tino, Franz; Enrico; Lorenz, S.: Energy-Sensitive Production Control in Mixed Model Manufacturing Processes. In: Dornfeld, D. A.; Linke, B. S. (Hrsg.): Leveraging Technology for a Sustainable World. Berlin, Heidelberg: Springer 2012, S. 399–404.

NYHUIS ET AL. 2008

Nyhuis, P.; Reinhart, G.; Abele, E. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme: Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen: PZH, Produktionstechn. Zentrum 2008.

ÖKO-INSTITUT 2015

Öko-Institut: Die Entwicklung der EEG-Kosten bis 2035: Studie im Auftrag von Agora Energiewende. Berlin 2015.

PANTEN ET AL. 2016

Panten, N.; Abele, E.; Schweig, S.: A Power Disaggregation Approach for Fine-grained Machine Energy Monitoring by System Identification. *Procedia CIRP* o. Jhg. (2016) 48, S. 325–330.

PAULUS & BORGGREFE 2011

Paulus, M.; Borggreffe, F.: The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany. *Applied Energy* 88 (2011) 2, S. 432–441.

PECHMANN & SCHÖLER 2011

Pechmann, A.; Schöler, I.: Optimizing Energy Costs by Intelligent Production Scheduling. In: Hesselbach, J.; Herrmann, C. (Hrsg.): Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing. Berlin, Heidelberg: Springer 2011, S. 293–298.

POPP & ZÄH 2014

Popp, R.; Zäh, M. F.: Steuerung des Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen. *wt Werkstattstechnik online* 104 (2014) 6, S. 413–417.

POPP ET AL. 2013

Popp, R.; Keller, F.; Atabay, D.; Dornmair, R.; Buderus, J.; Kohl, J.: Technische Innovationen für die Energieflexible Fabrik. *ZWF Zeitschrift für den wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 108 (2013) 7–8, S. 556–560.

POPP ET AL. 2015

Popp, R.; Liebl, C.; Zäh, M. F.; Atabay, D.; Wagner, U.; Buderus, J.; Kohl, J.; Franke, J.: Technische Erfassung der Energieflexibilität und deren Umsetzung in der Produktion. *ZWF Zeitschrift für den wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 110 (2015) 9, S. 505–509.

POPP & ZAEH 2014

Popp, R. S.-H.; Zaeh, M. F.: Determination of the Technical Energy Flexibility of Production Systems. *Advanced Materials Research* o. Jhg. (2014) 1018, S. 365–372.

POPP ET AL. 2016

Popp, R. S.-H.; Liebl, C.; Zaeh, M. F.: Energy Flexible Machine Tool Components – An Investigation of Capabilities. *Procedia CIRP* o. Jhg. (2016) 57, S. 692–697.

POPP ET AL. 2018

Popp, R. S.-H.; Liebl, C.; Zaeh, M. F.: A Multi-level Procedure to Evaluate the Energy Flexibility Potential of Production Machines. *Procedia CIRP* o. Jhg. (2018) 67, S. 75–80.

PwC 2015

PwC: *Energiewende im Mittelstand*. 2015.

RAGER 2008

Rager, M.: *Energieorientierte Produktionsplanung: Analyse, Konzeption und Umsetzung*. 1. Auflage. Wiesbaden: Gabler/GWV 2008.

RAGWITZ ET AL. 2014

Ragwitz, M.; Walz, R.; Hoffmann, V.; Schmidt, T.; Neuhoﬀ, K.; Cantner, U.; Graf, H.; Wüstenhagen, R.; Jacob, K.; Truffer, B.; Schleich, J.;

Haas, R.; Hekkert, R.; Negro, S.; Jacobsson, S.; Kern, F.; Rogge, K.: Wirkung des EEG – was ist die empirische Evidenz? Expertenstatement, 2014, <http://www.isi.fraunhofer.de/isi-de/service/presseinfos/2014/pri-04-2014-EFI-Expertenstatement.php>.

REGELLEISTUNG.NET 2017

Regelleistung.net: Liste der präqualifizierten Anbieter, 2017, <https://www.regelleistung.net/ext/download/anbieterliste>.

REINHART & GRASSL 2013

Reinhart, G.; Graßl, M.: Energieflexible Fabriken – Maßnahmen zur Steuerung des Energiebedarfs von Fabriken. In: VDI (Hrsg.): Tagungsband des VDI-Expertenforums: Energiemanagement – Wie "smart" managen wir Energie wirklich?, 2013.

REINHART ET AL. 2012

Reinhart, G.; Reinhardt, S.; Graßl, M.: Energieflexible Produktionssysteme. wt Werkstattstechnik online 102 (2012) 9, S. 622–628.

REN21 2014

REN21: The first decade: 2004–2014: 10 Years of Renewable Energy Progress. Paris 2014.

SCHAFFARCZYK 2016

Schaffarczyk, A.: Einführung in die Windenergietechnik. München: Hanser 2016.

SHELLMANN 2012

Schellmann, H.: Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz, Forschungsberichte iwB, Band 260. München: Utz 2012.

SCHMID 2004

Schmid, C.: Energieeffizienz in Unternehmen: Eine handlungstheoretische und wissensbasierte Analyse von Einflussfaktoren und Instrumenten. 1. Auflage. Zürich: vdf Hochschulverlag 2004.

SCHULTZ ET AL. 2014

Schultz, C.; Keller, F.; Reinhart, G.: Modellierung einer energieorientierten PPS. wt Werkstattstechnik online 104 (2014) 11–12, S. 771–775.

SCHULTZ ET AL. 2015a

Schultz, C.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Integration von Lastmanagementstrategien in die Produktionssteuerung. ZWF Zeitschrift für den wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 110 (2015) 11, S. 675–680.

SCHULTZ ET AL. 2015b

Schultz, C.; Keller, F.; Simon, P.; Reinhart, G.; Dornmair, R.; Wagner, U.: Wirtschaftlicher Einsatz von Energieflexibilität als Lösungsbaustein der Energiewende. ZWF Zeitschrift für den wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 110 (2015) 7–8, S. 416–420.

SCHULTZ ET AL. 2016

Schultz, C.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Method for an Energy-oriented Production Control. Procedia CIRP o. Jhg. (2016) 48, S. 248–253.

SERVATIUS 2012

Servatius, H.-G.: Wandel zu einem nachhaltigen Energiesystem mit neuen Geschäftsmodellen. In: Servatius, H.-G.; Schneidewind, U.; Rohlfig, D. (Hrsg.): Smart Energy. Berlin, Heidelberg: Springer 2012.

SHROUF ET AL. 2014

Shrouf, F.; Ordieres-Meré, J.; García-Sánchez, A.; Ortega-Mier, M.: Optimizing the production scheduling of a single machine to minimize total energy consumption costs. Journal of Cleaner Production 67 (2014), S. 197–207.

SIMON ET AL. 2017

Simon, P.; Roltsch, F.; Glasschröder, J.; Reinhart, G.: Approach for a potential analysis of energy flexible production systems. Procedia CIRP o. Jhg. (2017) 63, S. 580–585.

SLACK 1983

Slack, N.: Flexibility as a Manufacturing Objective. International Journal of Operations & Production Management 3 (1983) 3, S. 4–13.

SYNWOLDT 2016

Synwoldt, C.: Dezentrale Energieversorgung mit regenerativen Energien: Technik, Märkte, kommunale Perspektiven. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2016.

ULRICH 1978

Ulrich, H.: Unternehmungspolitik, Schriftenreihe Unternehmung und Unternehmungsführung, Band Bd. 6. Bern and Stuttgart: Haupt 1978.

UNTERBERGER ET AL. 2017

Unterberger, E.; Glasschröder, J.; Reinhart, G.: A systems engineering based method to increase energy flexibility. *Procedia CIRP* o. Jhg. (2017) 63, S. 254-259.

VDW 2018

VDW: Marktbericht 2017. Frankfurt am Main 2018.

VON ROON & HUCK 2010

von Roon, S.; Huck, M.: Merit Order des Kraftwerkparcs. 2010.

VON ROON & GOBMAIER 2010

von Roon, S.; Gobmaier, T.: Demand Response in der Industrie – Status und Potenziale in Deutschland. 2010.

VON ROON & GOBMAIER 2011

von Roon, S.; Gobmaier, T.: Demand Response, 2011,
<https://www.ffe.de/publikationen/veroeffentlichungen/344-demand-response>.

WECK 2006

Weck, M.: Werkzeugmaschinen, Fertigungssysteme. VDI-Buch, 8. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2006.

WECK & BRECHER 2013

Weck, M.; Brecher, C.: Werkzeugmaschinen 1: Maschinenarten und Anwendungsbereiche. 6. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2013.

WECKMANN & EISENHAEUER 2017

Weckmann, S.; Eisenhauer, S.: SynErgie-Glossar: Einheitliche und clusterübergreifende Definition von Begrifflichkeiten im Kontext der Energieflexibilität. Publikation des Instituts für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) der Universität Stuttgart. Stuttgart: Eigenverlag 2017.

WEINERT & MOSE 2016

Weinert, N.; Mose, C.: Electrical Load Management for Production Equipment Applying a Decentralized Optimization Approach. *Procedia CIRP* o. Jhg. (2016) 48, S. 259-264.

WILLEKE ET AL. 2017

Willeke, S.; Prinzhorn, H.; Stonis, M.; Nyhuis, P.: Preconditions for applying an energy price-oriented sequencing rule. *Production Engineering Research and Development* 61 (2017) 9, S. 428–437.

YUSTA ET AL. 2010

Yusta, J. M.; Torres, F.; Khodr, H. M.: Optimal methodology for a machining process scheduling in spot electricity markets. *Energy Conversion and Management* 51 (2010) 12, S. 2647–2654.

ZAEH ET AL. 2005

Zaeh, M. F.; Moeller, N.; Vogl, W.: Symbiosis of Changeable and Virtual Production – The Emperor’s New Clothes or Key Factor for Future Success? In: Zaeh, M. F. (Hrsg.): *Proceedings of the 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005)*. München: Utz 2005.

ZÄH & NIEHUES 2009

Zäh, M. F.; Niehues, K.: Wie viel Energie verbraucht eine Werkzeugmaschine? *Fertigung o. Jhg.* (2009) 9, S. 30–32.

ZÄH ET AL. 2013

Zäh, M. F.; Fischbach, C. W. P.; Kunkel, F.: Energieflexibilität in der Produktion identifizieren. *ZWF Zeitschrift für den wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 108 (2013) 9, S. 639–642.

ZEIN 2012

Zein, A.: *Transition towards energy efficient machine tools. Sustainable production, Life cycle engineering and management*. Heidelberg, New York: Springer 2012.

A Anhang

A.1 Nachweis der Vereinfachung

Im Folgenden wird der Nachweis erbracht, dass die Gleichung 6.5 als Vereinfachung der Fallunterscheidung 6.3 für $\tau = 0,5$ gilt:

Betrachtung der Bedingung des ersten Falls $\tau > \frac{t_{curr}}{t_{curr} + t_{targ}}$:

$$\begin{aligned} 0,5 &> \frac{t_{curr}}{t_{curr} + t_{targ}} \\ 0,5 \cdot (t_{curr} + t_{targ}) &> t_{curr} \\ t_{targ} &> t_{curr} \\ 0,5 \cdot t_{targ} &> 0,5 \cdot t_{curr} \\ t_{targ} &> t_{curr} \end{aligned} \tag{A.1}$$

Die Bedingung des ersten Falls vereinfacht sich somit auf $t_{targ} > t_{curr}$. Die Ausführung gilt für den zweiten Fall analog, sodass hier die Bedingung gilt: $t_{targ} \leq t_{curr}$. Die Fallunterscheidung 6.3 für $\tau = 0,5$ lautet nun:

$$t_D = \begin{cases} 0,5 \cdot t_{targ}, & \text{für } t_{targ} > t_{curr} \\ (1 - 0,5) \cdot t_{curr}, & \text{für } t_{targ} \leq t_{curr} \end{cases} \tag{A.2}$$

Abschließend lässt sich die Fallunterscheidung durch den Maximalwert umschreiben, wie es in Gleichung 6.5 gezeigt wurde:

$$t_{D_{0,5}} = 0,5 \cdot \max(t_{curr}, t_{targ}) \tag{A.3}$$

Für die flexible Energie (Gleichung 6.6) gilt der Nachweis analog.

A.2 Messdaten zur Fallstudie in Kapitel 8

Die Messdaten, welche der Fallstudie zugrunde liegen, sind in den Abbildungen A.1 und A.2 gezeigt.

A Anhang

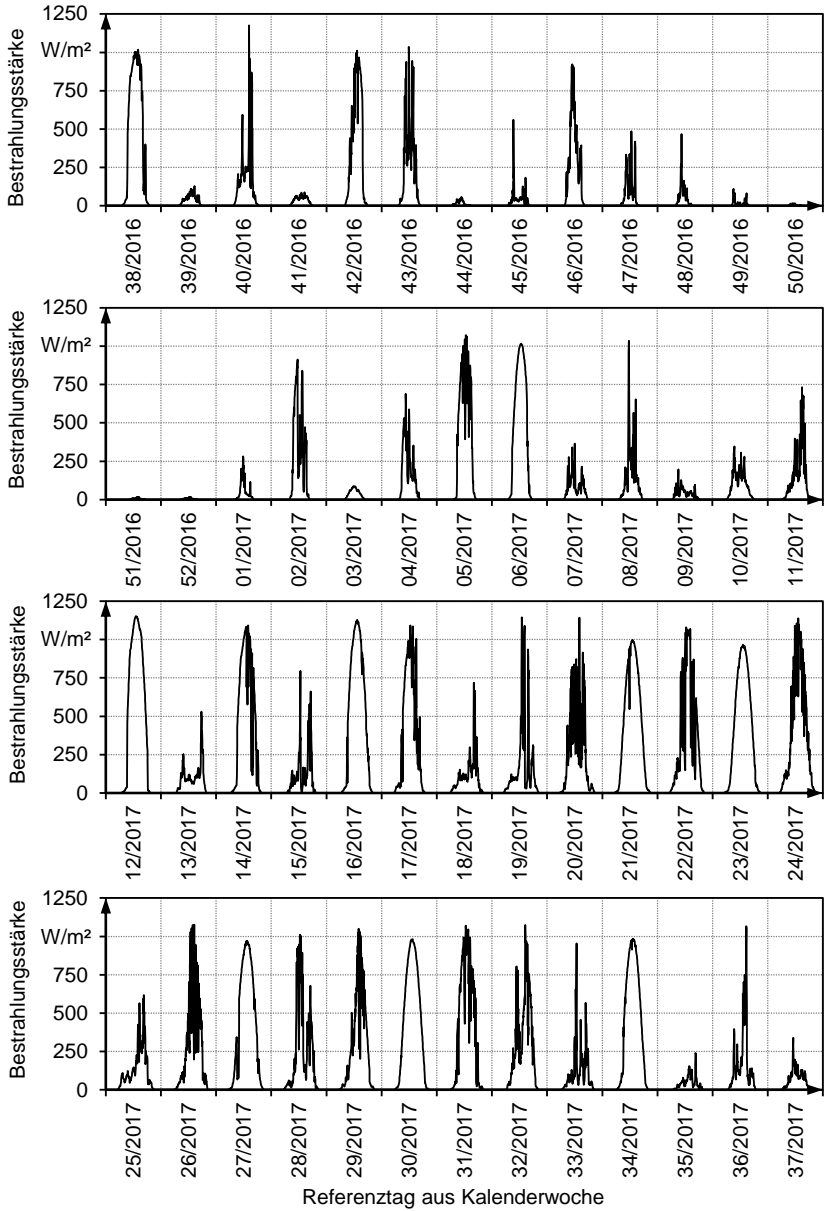


Abbildung A.1: Tagesverläufe der gemessenen Solarstrahlungsleistung

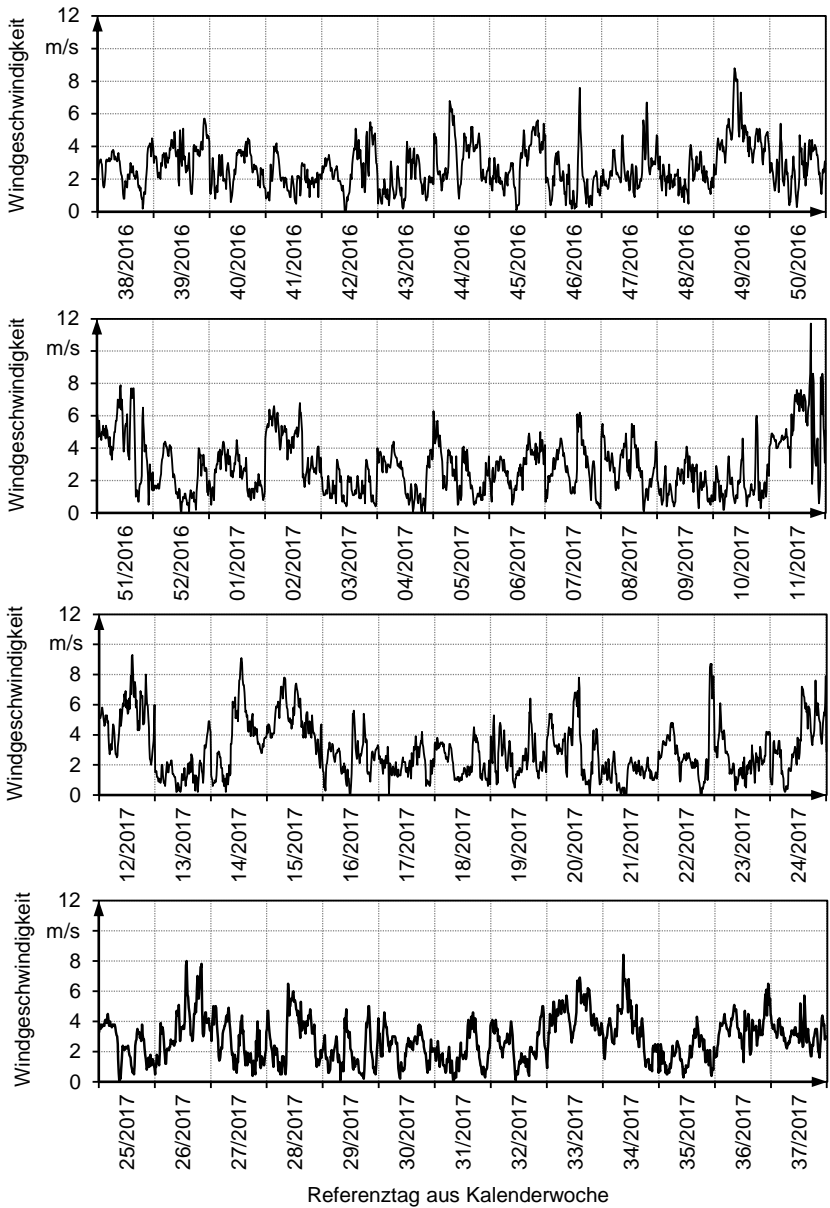


Abbildung A.2: Tagesverläufe der Windgeschwindigkeit aus LFU BAYERN (2018)

A.3 Veröffentlichungen des Autors

Im Rahmen der wissenschaftlichen Tätigkeit des Verfassers sind verschiedene Veröffentlichungen im Bereich der Energieflexibilität in der Produktion unter der Beteiligung des Autors der vorliegenden Dissertation entstanden. Der Autor dankt allen Mitautorinnen und Mitautoren für den wissenschaftlichen Austausch und die gute Zusammenarbeit in verschiedenen Forschungsvorhaben. Nachfolgend sind alle relevanten Veröffentlichungen in der Reihenfolge der Erscheinung aufgelistet:

- Popp, R.; Zäh, M. F.: Steuerung des Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen. *wt Werkstattstechnik online* 104 (2014) H. 6, S. 413–417.
- Popp, R. S.-H.; Zaeh, M. F.: Determination of the Technical Energy Flexibility of Production Systems. *Advanced Materials Research* o. Jhg. (2014) 1018, S. 365–372.
- Kleinwort, R.; Popp, R. S.-H.; Cavalié, B.; Zaeh M.F.: Energy Demand Simulation of Machine Tools with Improved Chatter Stability Achieved by Active Damping. In: Franke, J. and Kreitlein, S. (Hrsg.): *Energy Efficiency in Strategy of Sustainable Production*. Applied Mechanics and Materials 805, S. 187–195. Durnten-Zurich: TTP, 2015. ISBN: 978-3-03835-646-2.
- Liebl, C.; Popp, R.; Zäh, M. F.: Energieflexibilität von Produktionsanlagen. *wt Werkstattstechnik online* 105 (2015) 3, S. 136–140.
- Popp, R.; Liebl, C.; Zäh, M. F.; Atabay, D.; Wagner, U.; Buderus, J.; Kohl, J.; Franke, J.: Technische Erfassung der Energieflexibilität und deren Umsetzung in der Produktion. *ZWF Zeitschrift für den wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 110 (2015) 9, S. 505–509.
- Popp, R. S.-H.; Liebl, C.; Zaeh, M. F.: Energy Flexible Machine Tool Components – An Investigation of Capabilities. *Procedia CIRP* o. Jhg. (2016) 57, S. 692–697.
- Liebl, C.; Popp, R.; Zaeh, M. F.: Systematic Generation and Evaluation of Energy Data in Manufacturing. In: Dimitrov, D.; Oosthuizen, T. (Hrsg.): *Proceedings of the International Conference on Competitive Manufacturing (COMA 16)*. Stellenbosch / Südafrika: 2016, S. 517–521.
- Popp, R. S.-H.; Liebl, C.; Zaeh, M. F.: Evaluation of the Energy Flexible Operation of Machine Tool Components. *Procedia CIRP* o. Jhg. (2017) 63, S. 76–81.

-
- Moog, D.; Weber, T.; Flum, D.; Strobel, N.; Schraml, P.; Abele, E.; Scharmer, V.M.; Popp, R.S.-H.; Schulz, J.; Zäh, M.F.: Energieflexibilitätspotenziale in der Produktionsinfrastruktur. ZWF Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 112 (2017) 12, S. 852–856.
 - Popp, R.S.-H.; Liebl, C.; Zaeh, M.F.: A multi-level procedure to evaluate the energy flexibility potential of production machines. Procedia CIRP o. Jhg. (2018) 67, S. 75–80.
 - Liebl, C.; Popp, R.; Zaeh, M. F.: Approach for a systematic energy data generation and evaluation. Procedia CIRP o. Jhg. (2018) 67, S. 63–68.
 - Schulz, J.; Popp, R.S.-H.; Scharmer, V.M.; Zaeh, M.F.: An IoT based approach for energy flexible control of production systems. Procedia CIRP o. Jhg. (2018) 69, S. 650–655.

A.4 Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) in den Jahren 2012 bis 2017 unter wissenschaftlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten, in welchen verschiedene Fragestellungen zur Energieflexibilität spanender Werkzeugmaschinen untersucht wurden und deren Ergebnisse in Teilen in die vorliegende Dissertation eingeflossen sind. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Studentin / Student	Titel der Studienarbeit
Dolde, Fabian	Analyse der Einflussgrößen auf die Energieflexibilität von Werkzeugmaschinen (abgegeben im September 2016)
Dunker, Philip	Evaluation von Energieflexibilitätsstrategien am Beispiel der spanenden Fertigung (abgegeben im Februar 2017)
Kadelbach, Daniel	Analyse und Reduktion von kurzzeitigen Lastspitzen frequenzgesteuerter Antriebe in Werkzeugmaschinen (abgegeben im März 2014)
Klaiber, Helmut	Entwurf und Demonstration von Lastmanagementstrategien für Werkzeugmaschinen (in Kooperation mit der HSWT, abgegeben im Mai 2014)
von Lösecke, Johannes	Implementierung eines virtuellen NC-Moduls für die Fräsbearbeitung (abgegeben im April 2014)
Petrov, Petar	Entwicklung einer Strategie zur Bestimmung von Prozessparametern einer Fräsbearbeitung als Ergänzung der CAD-CAM-Werkzeugkette (abgegeben im März 2014)
Pirke, Sascha	Methodische Ermittlung und Analyse von energetischen Bedarfswerten anhand von Produktionsanlagen eines Triebwerkherstellers (abgegeben im März 2016)
Rill, Raffaella	Kennzahlenbasierte Bewertung der Energieflexibilität innerhalb der spanenden Fertigung (abgegeben im Juli 2017)

Schöberl, Christina	Entwicklung einer Methode zur Prognose des elektrischen Leistungsbedarfes eines Fräsbearbeitungszentrums (abgegeben im Dezember 2013)
Schöffel, Veronika	Vernetzungsplattform zur bidirektionalen Kommunikation mit Produktionsanlagen zum Austausch von Energiedaten (abgegeben im August 2017)
Schulz, Julia	Energieflexible Steuerung von Produktionsanlagen mithilfe eines cloudbasierten Regelkreises (abgegeben im Oktober 2017)
Sertbulut, Polat	Analyse und Modellierung von produktionsbedingten Unsicherheiten der elektrischen Leistungsprognose bei der Fertigung mit spanenden Werkzeugmaschinen (abgegeben im August 2014)
Wagner, Martin	Implementierung eines Auswertetools für energieflexible Produktionsanlagen (abgegeben im September 2015)
Weber, Hendrik	Steuerungstechnische Optimierung des Energiebedarfes von Werkzeugmaschinen bezüglich externer Zielgrößen (abgegeben im Dezember 2015)
Zhao, Yue	Ermittlung des technischen Energieflexibilitätsgrades eines Fräsbearbeitungszentrums (abgegeben im Februar 2015)
Zipse, Adrian Kenzo	Untersuchung von Abhängigkeiten der technischen Energieflexibilität eines Bearbeitungszentrums (abgegeben im August 2016)
