

Lehrstuhl für
Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik am
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)
der Technischen Universität München

Systematische Energiedatenerfassung in der Produktion

Corinna Beate Liebl

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. Eberhard Abele

Die Dissertation wurde am 24.06.2019 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 02.10.2019 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.

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Arbeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin 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 wertvolle Unterstützung und Förderung sowie das mir entgegengebrachte Vertrauen, insbesondere während meiner Zeit als Mitglied der Institutsleitung. 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. Weiterhin gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele, dem Leiter des Instituts für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen der Technischen Universität Darmstadt, für die Übernahme des Koreferats.

Ein für mich entscheidender Erfolgsfaktor bei der Erstellung meiner Dissertation waren die zahlreichen Diskussionen und Gespräche mit den Kolleginnen und Kollegen am *iwb*. Besonderer Dank gilt hierbei der Themengruppe Werkzeugmaschinen sowie dem Institutsleitungskreis für die vertrauensvolle Zusammenarbeit und den konstruktiven fachlichen und persönlichen Austausch. Auch allen von mir betreuten Studierenden danke ich für die wertvollen Beiträge zu meiner Forschung.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Sandra Grohmann, Richard Popp und meinem Vater für die gewissenhafte Durchsicht meiner Arbeit. Eure Hinweise hatten einen wesentlichen Beitrag für die erfolgreiche Finalisierung der Dissertation.

Mein bisheriger Weg und damit auch die Erstellung dieser Arbeit wären ohne die Unterstützung meiner Familie und Freunde nicht möglich gewesen. Ganz besonders möchte ich mich dabei bei meinen Eltern, Inge und Gerhard, für die immerwährende liebevolle Begleitung und bedingungslose Unterstützung von klein auf bedanken.

Lieber Stefan, ohne deine Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Für dein Verständnis für die viele zu investierende Zeit und Kraft in dieses Vorhaben und deinen immerwährenden Glauben an mich und meinen Weg danke ich dir ganz besonders. Dir widme ich diese Arbeit.

München, im Dezember 2019



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	V
Verzeichnis der Formelzeichen und Indizes	IX
Geschlechterspezifische Formulierung	XI
1 Einführung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Fokussierung auf elektrischen Strom	6
1.4 Aufbau der Arbeit	7
2 Grundlagen und Stand der Forschung	9
2.1 Kapitelüberblick	9
2.2 Normative Rahmenbedingungen des Energiemanagements	9
2.2.1 Energiemanagementsysteme nach DIN EN ISO 50001	10
2.2.2 Energieaudits nach DIN EN 16247	13
2.2.3 Energiemanagement nach VDI 4602	15
2.2.4 Bestimmung des Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen nach VDMA 34179	17
2.2.5 Definition und Abgrenzung des Begriffs <i>Energiedatenanalyse</i>	18
2.3 Zielstellungen von Energiedatenanalysen	19
2.3.1 Steigerung der Energieeffizienz	20
2.3.2 Bilanzierung von Energie- und Stoffflüssen	23
2.3.3 Energieflexibilität in der Produktion	25
2.4 Ansätze für Energiedatenanalysen in der Produktion	27
2.4.1 Übersicht über die Forschungslandschaft	28
2.4.2 Konzeptionelle Untersuchungen auf der Ebene von Betrieben und Standorten	30
2.4.3 Konzeptionelle Untersuchungen auf der Ebene von Maschinen und Zuständen	31

2.4.4	Konzeptionelle Untersuchungen auf der Ebene einzelner Komponenten	34
2.4.5	Softwarearchitektur beschreibende Arbeiten auf der Ebene von Betrieben und Standorten	36
2.4.6	Softwarearchitektur beschreibende Arbeiten auf der Ebene von Maschinen und Zuständen	37
2.4.7	Softwarearchitektur beschreibende Arbeiten auf der Ebene einzelner Komponenten	39
2.5	Zusammenfassung	41
3	Status quo, Handlungsbedarf und Betrachtungsraum	43
3.1	Kapitelüberblick	43
3.2	Hemmnisse und Herausforderungen beim Einsatz von Energiedatenanalysen	43
3.3	Handlungsbedarf	48
3.4	Definition des Betrachtungsraums	49
3.4.1	Definition der Produktionsebenen	49
3.4.2	Definition der elektrotechnischen Ebenen	50
3.4.3	Gegenüberstellung von Produktionsebenen und elektrotechnischen Ebenen	51
3.4.4	Definition des Betrachtungsraums	53
3.5	Zusammenfassung	54
4	Methode zur systematischen Energiedatenerfassung in der Produktion	55
4.1	Kapitelüberblick	55
4.2	Anforderungen	55
4.3	Übersicht über die Methode	56
4.4	Auswahl der angestrebten Analyse	57
4.5	Definition der notwendigen Datenarten	72
4.6	Bestimmung der notwendigen Messfrequenzen	75
4.7	Ansätze zur Reduzierung des Bedarfs an Zusatzsensorik	86
4.7.1	Näherung durch einmalige Messung bei konstantem energetischen Verhalten	89

4.7.2	Näherung durch einmalige Messung bei zyklischem energetischen Verhalten	89
4.7.3	Nutzung steuerungsinterner Variablen bei variablem energetischen Verhalten	89
4.7.4	Mustererkennung bei variablem energetischen Verhalten	90
4.8	Zusammenfassung	93
5	Beispielhafte Umsetzung einer automatisierten Energiedatenerfassung	95
5.1	Kapitelüberblick	95
5.2	Datenlogger-Applikation	98
5.2.1	Aufbau und Funktionsweise	98
5.2.2	Messtechnische Leistungsfähigkeit	105
5.3	Analysetool	107
5.3.1	Aufbau und Funktionsweise	107
5.3.2	Qualität der Näherung für die Komponenten mit konstantem oder zyklischem energetischen Verhalten	115
5.4	Zusammenfassung	117
6	Anwendung und Validierung der Methode	119
6.1	Kapitelüberblick	119
6.2	Betrachtung der Maschinenebene	119
6.3	Betrachtung der Aggregatsebene	127
6.4	Fazit	136
7	Bewertung der Ergebnisse	139
7.1	Kapitelüberblick	139
7.2	Überprüfung der Anforderungserfüllung	139
7.3	Wirtschaftliche Bewertung	141
7.4	Voraussetzungen und Einschränkungen für eine Erweiterung auf weitere Produktionsebenen	146
8	Zusammenfassung und Ausblick	149
8.1	Zusammenfassung	149
8.2	Ausblick	152

9	Literaturverzeichnis	155
10	Veröffentlichungen der Autorin	165
11	Verzeichnis der betreuten Studienarbeiten	167
12	Anhang	169
12.1	Einzelnachweis der Quellen aus Abbildung 2.6	169
12.2	Übersicht über elektrische Messgeräte	171

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AIM	Analysis-Input-Matrix
ARM	Analysis-Relevance-Matrix
AS-I	Actuator Sensor Interface
BDE	Betriebsdatenerfassung
BZ	Bearbeitungszeit
CEP	Complex Event Processing
CNC	Computerized Numerical Control
CPU	Central Processing Unit
CSV	comma-seperated values
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
EDMS	Energiedatenmanagementsystem
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EN	Europäische Norm
EnMS	Energiemanagementsystem
EnPI	Energy Performance Indicator
F-EIDL	Factory Energy Information Description Language
HMI	Human Machine Interface
ISO	International Organization for Standardization
iwb	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

KMU	kleines oder mittleres Unternehmen
KVP	kontinuierlicher Verbesserungsprozess
MES	Manufacturing Execution System
NCK	Numerical Control Kernel
NC	Numerical Control
NCU	Numerical Control Unit
NILM	Non Intrusive Load Monitoring
OEE	Overall Equipment Effectiveness (Gesamtanlageneffektivität)
PC	Personal Computer
PCU	PC Unit (Recheneinheit)
PDCA	Plan-Do-Check-Act
PDU	Protocol Data Unit
PLC	Programmable Logic Controller (synonym zu SPS = speicherprogrammierbare Steuerung)
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
RZ	Rüstzeit
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung (synonym zu PLC = Programmable Logic Controller)
SQL	Structured Query Language
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
TCU	Thin Client Unit
TGA	technische Gebäudeausrüstung

UHT	Ultrahocherhitzung (seltener: Ultra-Hoch-Temperatur-Verfahren)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
WZM	Werkzeugmaschine
ZZ	Zykluszeit

Verzeichnis der Formelzeichen und Indizes

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$\cos \varphi$	-	Leistungsfaktor
E_Q	kvarh (= kVAh)	Blindenergie
E_S	kVAh	Scheinenergie
E_W	kWh	Wirkenergie
f_a	Hz	Abtastfrequenz
f_{\max}	Hz	maximale im Messsignal enthaltene Frequenz
f_z	mm	Zustellung pro Zahn
k	-	zeitlicher Versatz zweier Signale
n	min^{-1}	mittlere Spindeldrehzahl
N	-	Signallänge
P	kW	Wirkleistung
P_\emptyset		durchschnittliche Leistungsaufnahme
P_{rel}		prozentualer Anteil an der Gesamtleistungsaufnahme eines Produktionssystems
pu	-	per unit (pro Einheit)
Q	kvar (= kVA)	Blindleistung
S	kVA	Scheinleistung
THD	-	Total Harmonic Distortion, auch Oberschwingungsgehalt
u_1	W	Amplitude der Grundschiwingung
u_h	W	Amplitude der Oberschwingungsspannung der Ordnungszahl h

Verzeichnis der Formelzeichen und Indizes

W	Ws	elektrische Arbeit
x, y	-	Signale x(n) und y(n) im Zeitbereich
ϕ_{xy}	-	Kreuzkorrelationsfunktion der Signale x(n) und y(n)

Index	Einheit	Bedeutung
a, b	-	Zustände einer Maschine
h	-	Ordnungszahl der Oberschwingung
max	-	Maximalwert
x, y	-	Signale x(n) und y(n) im Zeitbereich
z	-	Anzahl der Schneiden
φ	-	Phasenwinkel

Geschlechterspezifische Formulierung

In der vorliegenden Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit auf vollständig geschlechtsspezifische Formulierungen verzichtet. Personenbezogene Bezeichnungen, welche nur in der männlichen Form angeführt sind, beziehen sich stets auf Männer und Frauen in gleicher Weise.

1 Einführung

1.1 Ausgangssituation

Für produzierende Unternehmen in Deutschland nahmen Energiekosten bisher nur einen geringen Stellenwert ein. Innerhalb der letzten Jahre musste sich die Industrie jedoch mit signifikant steigenden Energiepreisen auseinandersetzen, wie in Abbildung 1.1 dargestellt [1]. Dabei stiegen die industriellen Energiekosten für elektrischen Strom (inkl. Steuern) von 6,05 Ct/kWh im Jahr 2000 auf 15,44 Ct/kWh im Jahr 2016. Mit Ausnahme eines Kosteneinbruchs durch die wirtschaftliche Rezession in den Jahren 2009 und 2010 ist hierbei ein stetiger Anstieg erkennbar. Durch die Energiewende in Deutschland, durch den damit verbundenen Ausbau erneuerbarer Energiequellen und den dafür erforderlichen Investitionsbedarf im gesamten Energieerzeugungssektor inklusive der Netzinfrastruktur ist auch zukünftig mit weiter steigenden Kosten zu rechnen. Dabei können die Energiekosten von Produktionsanlagen bereits heute bis zu 20 % der gesamten Produktionskosten ausmachen [2].

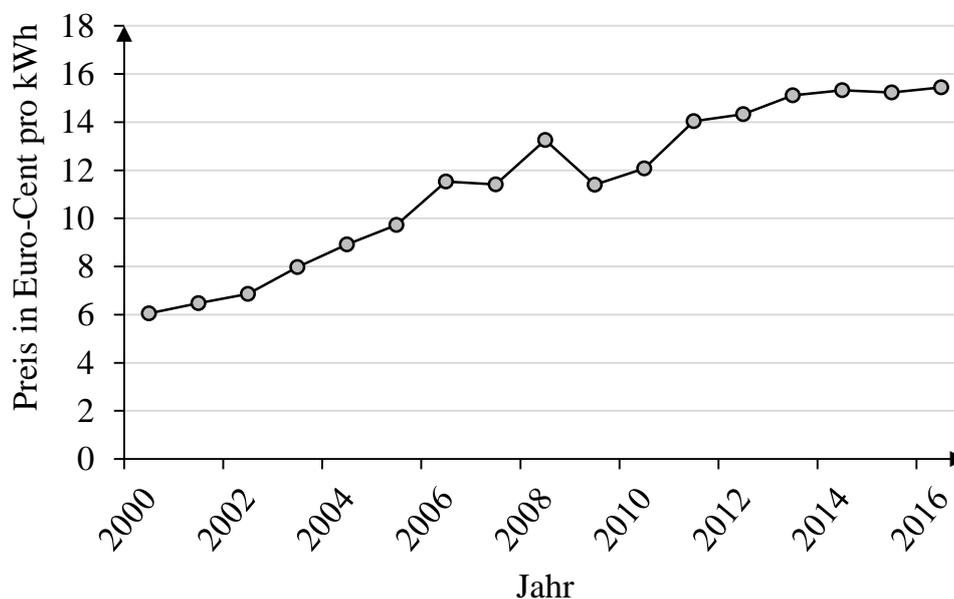


Abbildung 1.1: Industrielle Energiekosten inkl. Steuern in Deutschland zwischen den Jahren 2000 und 2016 (in Anlehnung an [1])

Die deutsche Energiewende mit dem geplanten Ausstieg aus der Kernenergie verleiht dem Ziel der weiterhin sicheren und bezahlbaren Energieversorgung und damit der gesamten Thematik des Energiebedarfs zudem öffentliche Aufmerksamkeit. Somit

kommen zu den rein monetären Argumenten für die Durchführung von Analysen hinsichtlich des aktuellen Energieverbrauchs auch öffentlicher Druck, politische Anforderungen und Ziele sowie Gedanken hinsichtlich der öffentlichen Außendarstellung hinzu. Erste Erfolge des Ausbaus regenerativer Energien sind bereits sichtbar und öffentlich bekannt. So konnte der prozentuale Anteil an erneuerbaren Energien an der Bruttostromerzeugung in Deutschland von 7 % im Jahr 2000 auf 33 % im Jahr 2017 gesteigert werden. Der Anteil der Kernenergie ging im selben Zeitraum von 30 % auf 12 % zurück (s. Abbildung 1.2). Eine wesentliche Änderung ist dabei, dass die regenerative Energieerzeugung nicht mehr an den Bedarf angepasst werden kann, sondern von Standort und Witterungsbedingungen abhängig und somit sehr volatil ist. Dies reduziert die bisherigen Freiheiten auch im Hinblick auf die Wahl des Ortes der Energieerzeugung und macht Investitionen u. a. in die Netzinfrastruktur notwendig, welche auf den Energiepreis umgelegt werden müssen. Die entstehenden Schwankungen im Stromnetz müssen ausgeglichen werden, um Stromausfälle zu vermeiden [3]. Die Synchronisation von Energieerzeugung und -bedarf kann und muss von Seiten der produzierenden Industrie durch gezielte Beeinflussung ihres Energiebedarfs mittels Energieflexibilitätsmaßnahmen, auch bekannt als Maßnahmen hinsichtlich Nachfrageflexibilität oder Demand Side Management, unterstützt werden [4].

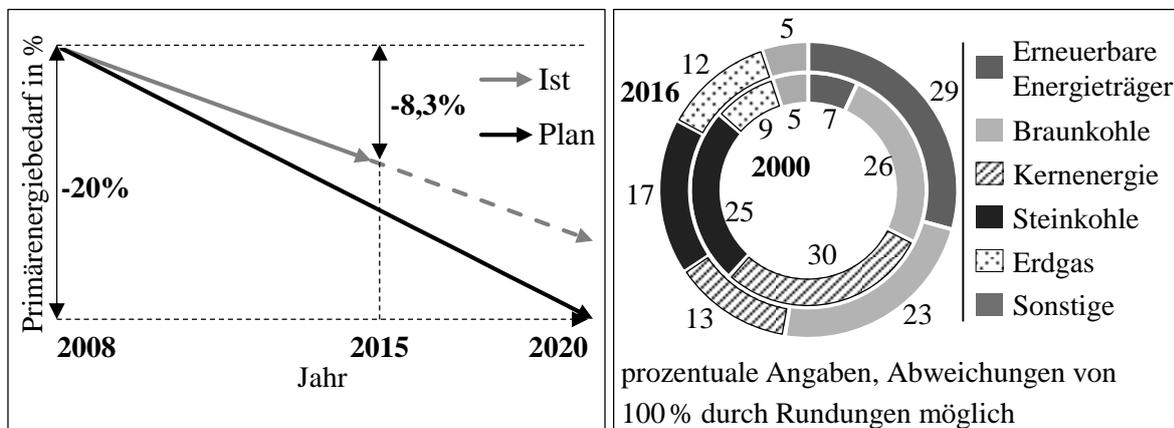


Abbildung 1.2: Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz (links, in Anlehnung an [5]); Anteil erneuerbarer Energien an der Bruttostromerzeugung in Deutschland (rechts, in Anlehnung an [6])

Eine weitere politische Rahmenbedingung im Umfeld des deutschen Energiesektors ist das europäisch eingebettete, politische Ziel, den Primärenergiebedarf in Deutschland im Vergleich zum Bezugsjahr 2008 bis 2020 um 20 % und um 50 % bis 2050 zu

senken [1]. Der Primärenergiebedarf beinhaltet dabei „alle[r] im Inland eingesetzte[n] Energieträger“ [1]. Bei einem Anteil am Endenergieverbrauch des Sektors Industrie von 29 % im Jahr 2015 [5] wird zur Erreichung solch ambitionierter politischer Ziele auch eine signifikante Beteiligung der Industrie vonnöten sein. Insbesondere im Hinblick auf die bisher sehr geringen Fortschritte (s. Abbildung 1.2) wird hieraus eine große Herausforderung für die Zukunft.

Die unterschiedlichen politischen und wirtschaftlichen Fragestellungen im Bezug auf den Energiebedarf in der produzierenden Industrie versetzen die Unternehmen in die Situation, eigene energiebezogene Ziele zu verfolgen. Dies kann aus monetären Gesichtspunkten, aber auch aus Imagegründen in Bezug auf Nachhaltigkeit geschehen. Auch die Erreichung von genormten Zertifizierungen nach DIN EN 50001 [7] ist heute gefordert, um sich z. B. von der Stromsteuer befreien lassen zu können. Um Ziele in diesem Umfeld zu erreichen, ist substantielles Wissen über den eigenen Energiebedarf notwendig. Die Grundlage für die Umsetzung aller energiebezogenen Fragestellungen ist somit eine anwendungsgerechte Erfassung und Analyse des Energiebedarfs, was mit erheblichem Aufwand an Messtechnik, Personal und Zeit verbunden ist. Zudem gibt es aktuell nur wenige Experten für die Schnittmenge der beiden Bereiche der Produktion sowie der energetischen Fragestellungen. Dies resultiert oftmals in ineffizienten Prozessen nach dem Prinzip „Versuch und Irrtum“ (engl. „trial and error“) bei der Neueinführung von Energiedatenanalysen. Somit besteht der Bedarf nach einem effizienten und wirtschaftlichen Weg hin zu anforderungsgerechter Energietransparenz [8].

1.2 Zielsetzung

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist das Zur-Verfügung-Stellen einer *Methode zur systematischen Energiedatenerfassung in der Produktion*. Die Methode soll produzierende Unternehmen dazu befähigen, ihre jeweils angestrebten Energiedatenanalysen effizient durchzuführen und dabei nur die Daten zu erfassen, die tatsächlich benötigt werden. Somit sollen die Effizienz von Energiedatenanalysen in der Produktion gesteigert und bestehende Hemmnisse aufgrund fehlenden Expertenwissens sowie eines hohen Umsetzungsaufwands überwunden werden.

Das Vorgehen lässt sich somit analog zum Ansatz des „Smart Data“ einordnen, welcher die gezielte Erfassung und Analyse der notwendigen Daten anstrebt. Im Gegensatz dazu werden im Zuge von „Big Data“ möglichst viele verfügbare Daten gesammelt, um anschließend möglichst viele Analysemöglichkeiten abzuleiten.

Im vorangegangenen Abschnitt wurde bereits dargelegt, dass Energiedatenanalysen stetig an Bedeutung gewinnen. Meist soll der Energiebedarf einerseits detailliert erfasst und visualisiert sowie andererseits dem jeweiligen Verbraucher zugeordnet werden [8]. Damit sehen sich insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMUs) der Herausforderung gegenüber, meist ohne übergreifendes Expertenwissen im Produktions- und Energiebereich zunächst die für sie richtigen Analyseziele definieren zu müssen. Ist diese erste Entscheidung getroffen, müssen zahlreiche Spezifikationen hinsichtlich der notwendigen Daten und deren Genauigkeit festgelegt werden. Insbesondere für Energiedatenanalysen, welche es ermöglichen sollen, den aufgezeichneten Energiebedarf in Relation zur Produktion zu setzen, ist es notwendig, auch Produktions- und Maschinendaten hoch aufgelöst aufzuzeichnen. Gerade die zeitsynchrone und möglichst automatische Erfassung von Energie- und Produktionsdaten ist auf Grundlage der verbreiteten technischen Systeme heute meist nicht möglich. Die Einführung entsprechender Systeme oder die manuelle Durchführung der erforderlichen Messungen ist mit erheblichen Kosten und hohem Personalaufwand verbunden. Mit dem Bedürfnis einer möglichst detaillierten Erfassung und Analyse von Energiedaten konkurriert der Anspruch, den Aufwand und die Kosten hierfür so gering wie möglich zu halten. Umso wichtiger ist eine begründete Aussage, welche Daten für die individuell angestrebte Analyse in welcher Auflösung erfasst werden müssen. Damit soll die Durchführbarkeit der Analyse sichergestellt und gleichzeitig eine Fehlinvestition durch Über- oder Unterdimensionierung des Messsystems vermieden werden. Die Hemmnisse für KMUs lassen sich durch folgende Punkte charakterisieren:

- fehlende Standards bzgl. Messtechnik und Datenverarbeitung
- Mangel an Wissen, welche Daten für welche Analysen benötigt werden
- hoher erforderlicher Personal- und Zeitaufwand für die Installation der Messtechnik sowie die manuelle Durchführung von Analysen und Visualisierungen

Die besondere Herausforderung für KMUs spiegelt sich auch in der aktuellen Verbreitung von Energiemanagementsystemen (EnMS) in der Industrie wider: Während 63 % der Großunternehmen ein solches System im Einsatz haben, trifft dies nur auf 17 % der kleinen und mittleren Unternehmen zu [9]. Darüber hinaus können die Kosten für eine Lösung zur energetischen Überwachung von Anlagen 10 % in Bezug auf die gesamten Anlagenkosten übersteigen [10]. Kaum ein Unternehmen ist bereit, eine solch signifikante Investitionssumme ohne ausreichende Wissensbasis hinsichtlich des wirklichen Bedarfs an Energiedatenerfassung zu tätigen.

Somit ergibt sich der Handlungsbedarf, ein systematisches Vorgehen für Industrieanwender zur effizienten Durchführung von Energiedatenanalysen bereitzustellen.

Hierzu gehören die korrekte Auswahl bzw. Festlegung einer geeigneten Energiedatenanalyse, der dafür notwendigen Datenarten sowie der erforderlichen Datengenauigkeiten. Ein weiteres Augenmerk liegt aufgrund teilweise sehr hoher Investitionskosten auf der Reduzierung des Bedarfs an Zusatzsensorik.

Um das Ziel der vorliegenden Arbeit (s. S. 3) zu erreichen, soll eine Methode beschrieben werden, welche im Anschluss hinsichtlich einer konkreten Umsetzung validiert und bezüglich ihrer Übertragbarkeit überprüft wird.

Damit ergeben sich folgende Teilziele (s. Abbildung 1.3):

- Definition des *Betrachtungsraums* sowie des anzustrebenden *Analyseziels*
- Definition der benötigten *Datenarten* und der an sie zu stellenden *Anforderungen* in Abhängigkeit des jeweils verfolgten Analyseziels
- *Validierung* der entwickelten Methode anhand eines Anwendungsbeispiels und Nachweis ihrer *Übertragbarkeit*

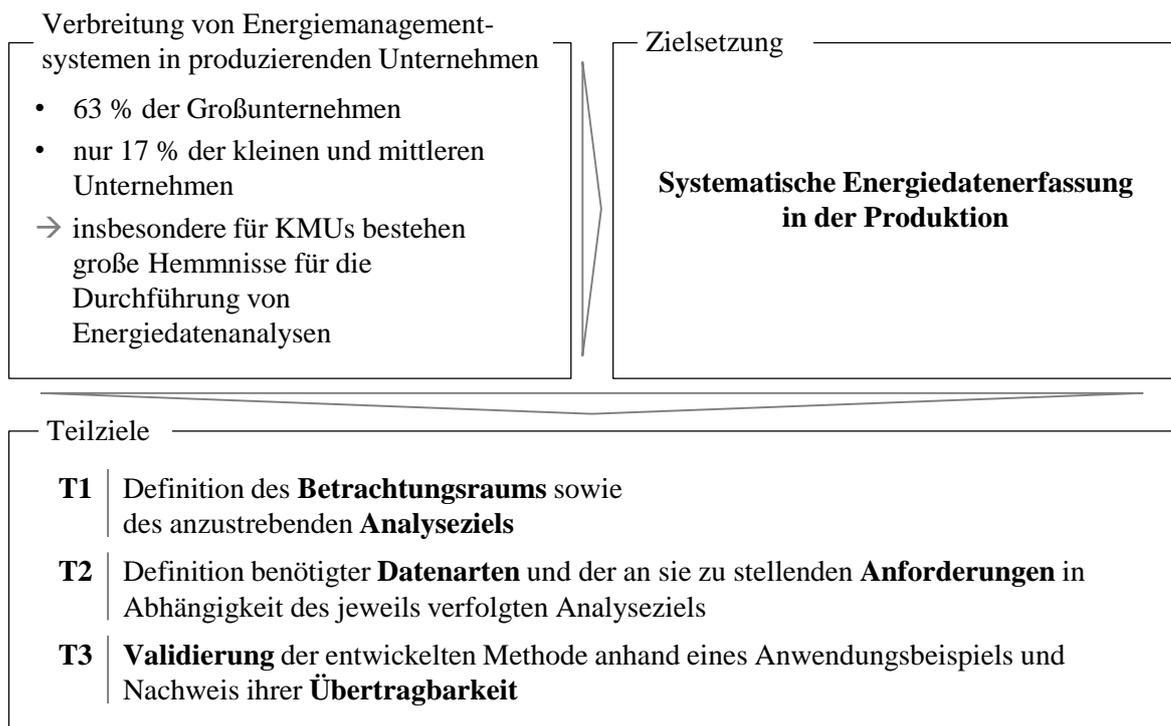


Abbildung 1.3: Verbreitung von Energiemanagementsystemen in produzierenden Unternehmen in Deutschland (in Anlehnung an [9]) als Ausgangsbasis für das Ziel sowie die Teilziele dieser Arbeit

1.3 Fokussierung auf elektrischen Strom

Energiedatenanalysen beschränken sich nicht nur auf den elektrischen Strom. Produzierende Unternehmen beziehen darüber hinaus auch weitere primäre Energieträger wie z. B. Öle, Gase etc. Um die wirtschaftliche Relevanz der unterschiedlichen Energieträger zu bewerten, ist deren Anteil an den gesamten Energiekosten zu betrachten. Dieser wiederum „ergibt sich aus der eingesetzten Menge sowie den spezifischen Kosten je Handelsmenge der jeweiligen Energieträger“ [3].

Für die Branche des Maschinenbaus setzen sich die Gesamtenergiekosten aus mehreren Energiekostenanteilen, unterschieden nach Energieträger, zusammen. Dabei entfällt der mit Abstand größte Kostenanteil auf den Bezug von elektrischem Strom (s. Abbildung 1.4). Während der elektrische Strom 67 % der Energiekosten ausmacht, liegen die weiteren Anteile nach Energieträgern bei 16 % für Naturgase, 8 % für Heizöl und 6 % für Fernwärme. Durch diese Dominanz der durch elektrischen Strom verursachten Energiekosten im Maschinenbau in Deutschland liegt der Fokus der vorliegenden Arbeit auf Energiedatenanalysen hinsichtlich des Bedarfs an elektrischer Energie. Die weiteren Energieträger werden im Folgenden nicht betrachtet.

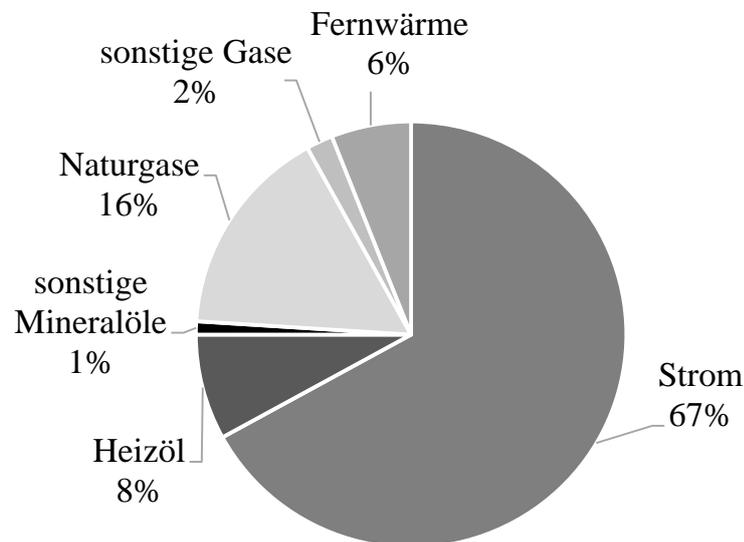


Abbildung 1.4: Aufteilung der Energiekosten nach Energieträgern für den Maschinenbau in Deutschland [3]

1.4 Aufbau der Arbeit

Wie in Abbildung 1.5 dargestellt, ist die vorliegende Arbeit in acht Kapitel gegliedert. In Kapitel 1 wurde die Ausgangssituation beschrieben, auf welcher die Zielsetzung aufbaut. Zudem wurde bereits das Ziel der Arbeit skizziert und die Fokussierung auf elektrischen Strom definiert. Anschließend werden in Kapitel 2 die Grundlagen und der Stand der Forschung vorgestellt. Hierbei ist zunächst die Einordnung der Arbeit in den Bereich des *Energiedatenmanagements*, insbesondere in Abgrenzung zum allgemeinen *Energiemanagement*, wesentlich. Des Weiteren stellt das Kapitel drei Beispiele sehr verbreiteter Zielstellungen von Energiedatenanalysen sowie Forschungsansätze für Energiedatenanalysen auf unterschiedlichen Produktionsebenen vor. Kapitel 3 schließt daran mit dem Status quo an, welcher insbesondere auf bestehende Hemmnissen und Herausforderungen beim Einsatz von Energiedatenanalysen in der Praxis eingeht. Daraus lässt sich der Handlungsbedarf ableiten. Die Betrachtung und Gegenüberstellung der existierenden Produktions- und elektrotechnischen Ebenen in Betrieben ermöglichen darüber hinaus die Festlegung des Betrachtungsraums für die gesamte weitere Arbeit. In Kapitel 4 wird schließlich die angestrebte Methode zur systematischen Energiedatenerfassung in der Produktion entwickelt. Darin enthalten sind vier wesentliche Schritte, von der Analysenauswahl, über die Definition der individuell notwendigen Datenarten, die Auswahl der erforderlichen Messfrequenzen bis hin zur Betrachtung von Möglichkeiten zur Reduzierung des Bedarfs an zusätzlicher Sensorik für die technische Umsetzung der Datenerfassung. In Kapitel 5 wird die beispielhafte Umsetzung einer automatisierten Erfassung von Energie-, Produktions- und Maschinendaten beschrieben. Hierzu sind bzw. waren v. a. ein entsprechender Versuchsaufbau sowie eine softwarebasierte Zuordnung der einzelnen Datenarten zueinander sowie deren Visualisierung und Auswertung notwendig. Mit dem zur Verfügung stehenden Versuchsaufbau war es möglich, die Methode beispielhaft anzuwenden und zu validieren (Kapitel 6). Die wirtschaftliche Bewertung in Kapitel 7 sowie eine Zusammenfassung und ein Ausblick in Kapitel 8 schließen die Arbeit ab.

Neben dem Aufbau der Arbeit mit den einzelnen Kapiteln sowie den wesentlichen Inhalten pro Kapitel stellt Abbildung 1.5 auch die inhaltliche Zuordnung der Teilziele dar. Die dabei markierten inhaltlichen Bereiche sind jeweils notwendig, um die Teilziele T1 bis T3 (s. Abschnitt 1.2) zu erreichen.



Abbildung 1.5: Aufbau der Arbeit sowie inhaltliche Zuordnung der Teilziele T1 bis T3

2 Grundlagen und Stand der Forschung

2.1 Kapitelüberblick

In diesem Kapitel soll näher auf die bestehenden Grundlagen sowie auf den Stand der Forschung im Themenfeld dieser Arbeit eingegangen werden. Hierzu sind zunächst die normativen Rahmenbedingungen zu nennen, da diese das energiebezogene Handeln vieler produzierender Unternehmen bestimmen. Eine wesentliche Erkenntnis aus diesem Abschnitt ist u. a. die Differenzierung der Begriffe des *Energiemanagementsystems* und des *Energiedatenmanagementsystems*. Ein kurzer Exkurs in die möglichen Zielstellungen von industriellen Energiedatenanalysen zeigt im Abschnitt 2.3 beispielhafte Beweggründe für produzierende Unternehmen auf, Energiedatenanalysen durchzuführen. Anschließend gibt Abschnitt 2.4 einen Überblick über die Forschungslandschaft im Bereich der Energiedatenanalysen in der Produktion. Ein besonderes Augenmerk liegt hierbei auf der Betrachtung der notwendigen Datengrundlage für die Durchführung der Analysen.

2.2 Normative Rahmenbedingungen des Energiemanagements

Im Umfeld des Energiemanagements für produzierende Unternehmen gibt es zahlreiche Anforderungen und Definitionen aus Normen und Richtlinien. Für viele Unternehmen ist es insbesondere attraktiv, ein nach DIN EN ISO 50001 zertifiziertes Energiemanagementsystem einzuführen und nachweisen zu können. Eine solche Zertifizierung ist zudem eine der Voraussetzungen für eine Befreiung von der Stromsteuer sowie für eine Reduktion der gesetzlichen EEG-Umlage (Erneuerbare-Energien-Gesetz-Umlage) für stromkostenintensive Unternehmen [11]. Häufig stellt die Einführung eines solchen Systems den Einstieg in das Thema des Energiemanagements dar. Über diese Norm hinaus existieren allerdings noch weitere Normen und Richtlinien, die einzelne Aspekte des Energiemanagements ergänzen, aufgreifen oder detaillieren. Auf eine Auswahl daraus, insbesondere aber auf die Anforderungen eines Energiemanagementsystems nach DIN EN ISO 50001, wird in den folgenden Abschnitten eingegangen. Um hierbei auch die unterschiedlichen Detaillierungsgrade zu berücksichtigen, handelt es sich bei den folgenden Beispielen um eine internationale und eine europäische Norm, eine VDI-Richtlinie sowie ein VDMA-Einheitsblatt.

2.2.1 Energiemanagementsysteme nach DIN EN ISO 50001

Die internationale Norm DIN EN ISO 50001 [7] verfolgt den Anspruch, unabhängig von der Unternehmensgröße oder der betroffenen Branche für alle Organisationen anwendbar zu sein. Aus diesem Grund sind die Anforderungen sehr übergreifend formuliert und detaillierte Spezifikationen, z. B. zum dezidierten Vorgehen, dem einzelnen Nutzer überlassen. Daher gibt die Norm lediglich die Anforderungen und Rahmenbedingungen vor, welche zu erfüllen sind.

Der explizite Zweck der Norm „ist es, Organisationen in die Lage zu versetzen, Systeme und Prozesse aufzubauen, welche zur Verbesserung der energiebezogenen Leistung, einschließlich Energieeffizienz, Energieeinsatz und Energieverbrauch erforderlich sind“ [7].

Dabei wird *Energie* als Fähigkeit verstanden, „eine externe Aktivität oder Arbeit zu verrichten“ [7]. Die Menge der für eine bestimmte Aktivität eingesetzten Energie wird als *Energieverbrauch*, das Verhältnis zwischen erzielter Leistung und dafür eingesetzter Energie als *Energieeffizienz* bezeichnet. Der *Energieeinsatz* beschreibt die „Art bzw. Methode der Anwendung von Energie“ [7], wie z. B. „Lüftung; Beleuchtung; [...] Prozesse [oder] Produktionslinien“ [7].

Um den oben genannten Zweck der Norm zu erfüllen, stellt sie ein EnMS vor, welches als die „Gesamtheit miteinander zusammenhängender oder interagierender Elemente zur Einführung einer Energiepolitik und strategischer Energieziele sowie Prozesse und Verfahren zur Erreichung dieser strategischen Ziele“ [7] definiert ist. Das übergeordnete Ziel dieses EnMS ist es, die energiebezogene Leistung stetig zu verbessern. Die energiebezogene Leistung stellt somit einen zentralen Begriff dar, welcher messbare Verbesserungen hinsichtlich „Energieeffizienz, Energieeinsatz und Energieverbrauch“ [7] beschreibt.

Für die fortlaufende Überwachung des erzielten Fortschritts im Vergleich zur Ausgangsbasis sieht die Norm spezifisch zu definierende Energieleistungskennzahlen (EnPIs, engl. Energy Performance Indicators) vor. Da diese sehr von der jeweiligen Organisation abhängen, ist jedes Unternehmen aufgefordert, eigene EnPIs zu entwickeln.

Die Grundlage für das in dieser Norm definierte EnMS bildet der kontinuierliche Verbesserungsprozess (KVP), hier beschrieben als PDCA-Zyklus (Plan-Do-Check-Act-Zyklus), wie in Abbildung 2.1 dargestellt. Die wesentlichen Inhalte der iterativ zu durchlaufenden einzelnen Schritte nach DIN EN ISO 50001 [7] sind im Folgenden kurz beschrieben.

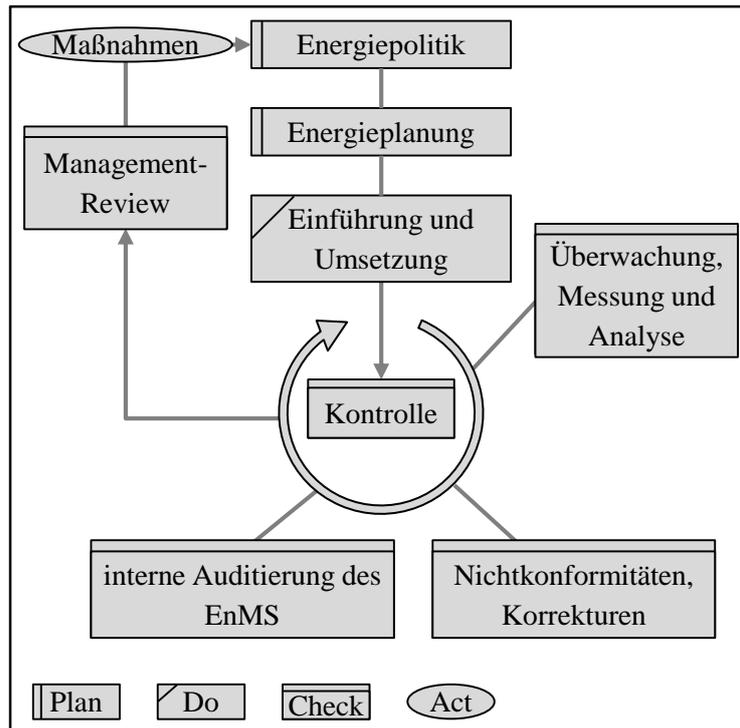


Abbildung 2.1: Energiemanagementsystem (EnMS) auf Grundlage eines PDCA-Zyklus (in Anlehnung an [7])

In der Planungsphase (Plan) werden die energetische Ausgangsbasis eines Unternehmens bestimmt und Energieleistungskennzahlen als Maß für Verbesserungen hinsichtlich der energiebezogenen Leistung festgelegt. Auf dieser Basis können Energieziele sowie für deren Erreichung erforderliche Aktionspläne abgeleitet werden. Die Ausführungsphase (Do) dient der Durchführung der in der Planungsphase entwickelten und ggf. in der Verbesserungsphase überarbeiteten Aktionspläne. Die die energiebezogene Leistung beeinflussenden Prozesse werden in der Überprüfungsphase (Check) u. a. anhand der EnPIs gemessen, analysiert und dokumentiert, bevor in der Verbesserungsphase (Act) Maßnahmen ergriffen werden, um eine weitere Steigerung der energiebezogenen Leistung und der festgelegten EnPIs zu erreichen [7].

Dieser Aufbau soll es ermöglichen, das Energiemanagement in bestehende Managementsysteme, z. B. Umwelt- oder Qualitätsmanagementsysteme, zu integrieren. Um tatsächlich eine stetige Verbesserung zu erzielen, ist es wesentlich, das System in das Tagesgeschäft einzubinden.

Da die Konformität eines unternehmenseigenen Energiemanagementsystems mit der Norm DIN EN ISO 50001 wie beschrieben u. a. als Voraussetzung für die Reduzierung der zu zahlenden EEG-Umlage gefordert ist, ist die einfache Einführbarkeit der

Systeme, welche eine kontinuierliche Verbesserung der energiebezogenen Leistung verfolgen, wesentlich.

Um die Ausgangsbasis zu bestimmen bzw. die Verbesserung nach Einführung fortlaufend zu quantifizieren, bildet die energetische Bewertung die Grundlage für eine Aussage hinsichtlich der energiebezogenen Leistung. Für die Entwicklung einer solchen energetischen Bewertung definiert die Norm DIN EN ISO 50001 mehrere aufeinander aufbauende Voraussetzungen:

1. Analyse des Energieeinsatzes und des Energieverbrauchs, u. a. auf Basis von Messungen
2. Identifikation der Bereiche, die einen wesentlichen Anteil am gesamten Energieverbrauch haben. Dazu gehören neben ganzen Standorten auch Anlagen und Prozesse sowie die Untersuchung der Variablen mit dem größten Einfluss auf den Energieeinsatz. Zudem soll die energiebezogene Leistung für den aktuellen Zustand und für die Zukunft bestimmt werden.
3. Definition und Dokumentation der Maßnahmen zur gezielten Steigerung der energiebezogenen Leistung. Wichtig ist hierbei auch die Definition des Zeitraums, in welchem die definierten Ziele erreicht werden sollen, und ein festgelegter Zeitabstand für regelmäßige Überprüfungen des erzielten Fortschritts.

Wie bereits erwähnt, müssen die Hauptmerkmale, welche einen wesentlichen Einfluss auf die energiebezogene Leistung haben, regelmäßig „überwacht, gemessen und analysiert werden“ [7]. Dieses Vorgehen hat mindestens folgende Inhalte:

1. Ergebnisse der energetischen Bewertung, u. a. die Identifikation der wesentlichen Energieeinsatzbereiche (Bereiche des größten Energiebedarfs)
2. Identifikation der Variablen, welche diese Energieeinsatzbereiche wesentlich beeinflussen
3. Definition individueller EnPIs
4. Bewertung der Wirksamkeit der definierten Aktionspläne und Maßnahmen zur Verbesserung der energiebezogenen Leistung sowie weiterer Ziele des Unternehmens (operativ, taktisch und strategisch)
5. Gegenüberstellung und Bewertung des aktuellen und des erwarteten Energieverbrauchs

Um diese und weitere Hauptmerkmale erfassen zu können, sind Messungen und Erhebungen notwendig. Diese können vom reinen Ablesen bereits vorhandener Stromzähler bis hin zu umfangreichen Systemen zur automatisierten Analyse und Überwachung des Energiebedarfs reichen. Welche Messungen, Analysen und Methoden geeignet und notwendig sind, liegt explizit im Ermessen des Anwenders [7].

Damit stellt die Norm zwar wesentliche Forderungen an die Aufzeichnung, Analyse und Steigerung der energiebezogenen Leistung eines Unternehmens bis hin zur Betrachtung einzelner Anlagen und Prozesse. Sie überlässt es allerdings aufgrund der vielen unternehmensspezifischen Faktoren dem einzelnen Anwender, festzulegen, wie die dafür notwendigen Daten erfasst und analysiert werden. Damit stellen sich auch bei der Umsetzung der Norm DIN EN ISO 50001 die Fragen, welche Daten für die unterschiedlichen Analysen wirklich benötigt werden und in welcher Genauigkeit diese erfasst werden müssen.

2.2.2 Energieaudits nach DIN EN 16247

Aufbauend auf der internationalen Norm DIN EN ISO 50001 befasst sich die europäische Norm DIN EN 16247 mit Anforderungen, Methoden und anzustrebenden Ergebnissen von Energieaudits [12]. Dabei ist das Energieaudit ein bereits in DIN EN ISO 50001 genanntes Mittel zur Kontrolle des aktuellen Energieeinsatzes und des erzielten Fortschrittes bei der Verbesserung der energiebezogenen Leistung (s. Abbildung 2.1). Explizit definiert ist das Energieaudit als „systematische Inspektion und Analyse des Energieeinsatzes und des Energieverbrauchs einer Anlage, eines Gebäudes, eines Systems oder einer Organisation mit dem Ziel, Energieflüsse und das Potenzial für Energieeffizienzverbesserungen zu identifizieren und über diese zu berichten“ [12]. Der Prozess der Auditierung muss dabei angemessen, vollständig, repräsentativ, rückverfolgbar, zweckdienlich und verifizierbar sein. Er besteht gemäß DIN EN 16247 [12] aus folgenden wesentlichen Schritten:

1. Einleitender Kontakt und Auftakt-Besprechung

Die initiale Besprechung der Ziele und Erwartungen sind der Ausgangspunkt für den Auditprozess. Besonders wichtig ist eine intensive Abstimmung bei der Zusammenarbeit einer Organisation mit einem externen Auditor. Hier ist festzulegen, welcher Bereich betrachtet werden soll. Auch sind die erforderliche Gründlichkeit sowie der zu betrachtende Zeitraum wesentlich. Dabei ist explizit darauf zu achten, dass es sich um einen möglichst repräsentativen Zeitraum, z. B. den Normalbetrieb einer Produktion ohne Instandhaltungsunterbrechungen, handelt. Die in der Auftakt-Besprechung festgelegten Kriterien

zur Evaluierung dienen bei den regelmäßigen Wiederholungen des Energieaudits der Bewertung der erreichten Erfolge, z. B. der erzielten Effizienzsteigerung. Auch sollte bereits zu Beginn des Audits festgelegt werden, welche Daten für die angestrebten Analysen erfasst werden müssen und wie dies technisch umgesetzt werden kann.

2. *Datenerfassung*

Der Schritt der Datenerfassung beinhaltet die messtechnische Umsetzung der im ersten Schritt definierten Maßnahmen. Die Norm enthält jedoch aufgrund der hohen unternehmensspezifischen Einflüsse keine Angaben zu den erforderlichen Datenarten und -genauigkeiten.

3. *Außeneinsatz*

Der Außeneinsatz beinhaltet vor allem die Anforderung, dass sich der Auditor vor Ort ein Bild über den betrachteten Bereich bzw. die Anlagen und Prozesse macht. Als Ergebnis lassen sich die erzielten Messdaten evaluieren und plausibilisieren sowie Bereiche erkennen, welche in den bisherigen Aufzeichnungen noch nicht betrachtet wurden.

4. *Analyse*

Der vierte Hauptschritt des Energieaudits, die Analyse, umfasst mehrere Energiedatenanalysen, welche im Hinblick auf die Bewertung der aktuellen energiebezogenen Leistung durchzuführen sind. Hierzu zählen u. a. die Zuordnung des Energieverbrauchs zu einzelnen Bereichen und die Aufzeichnung der Energieflüsse sowie der Energiebilanz des auditierten Bereichs. Auch der zeitliche Verlauf des Energiebedarfs sowie die Berechnung der gemäß DIN EN ISO 50001 festgelegten individuellen EnPIs sind erforderlich.

Aufbauend auf diesen Analysen sollen Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz abgeleitet werden. Die ganzheitliche Bewertung dieser Möglichkeiten berücksichtigt neben den erreichbaren finanziellen Einsparungen auch die dafür erforderlichen Investitionen und definiert gegebenenfalls zusätzliche Anforderungen an die messtechnische Erfassung und Überwachung des betrachteten Energieverbrauchs.

5. *Bericht und Abschlussbesprechung*

Das Energieaudit schließt mit einer ausführlichen Dokumentation aller Schritte, des Vorgehens, der individuellen Absprachen und Ziele sowie der erreichten Ergebnisse. Auch sollten hier Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz abgeleitet und festgelegt werden. Die Überprüfung der Zielerreichung ist Inhalt des nächsten Energieaudits.

Das Energieaudit nach DIN EN 16247 [12] ist somit ein Mittel, um die erreichten Fortschritte innerhalb des EnMS nach DIN EN ISO 50001 regelmäßig zu erfassen und zu bewerten. Wesentliche Bestandteile sind dabei die Erfassung der notwendigen Daten sowie die Durchführung darauf aufbauender Analysen. Die Spezifikation der notwendigen Datengrundlage ist jedoch individuell und daher vom Nutzer eigenständig durchzuführen. Eine Beschreibung, wie dies am besten zu bewerkstelligen ist, ist allerdings kein Bestandteil der Norm.

2.2.3 Energiemanagement nach VDI 4602

Eine VDI-Richtlinie soll grundsätzlich eine Arbeitsunterlage für den Industriebenanwender darstellen und somit den Experten Sicherheit im Bezug auf den aktuellen Stand der Technik geben [13]. Die Richtlinie VDI 4602 „Energiemanagement“ des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) detailliert die Definition des Energiemanagements und der damit verfolgten Ziele und soll damit den Missstand beheben, dass einige Begrifflichkeiten im Bereich des Energiemanagements unterschiedlich interpretiert werden [14]. Darüber hinaus geht die Richtlinie konkreter als andere Verlautbarungen auf mögliche Größen ein, welche einen Einfluss auf den Energiebedarf haben können. Auch nennt sie Beispiele für mögliche Ergebnisgrößen sowie für Methoden zur Analyse, Prognose und Überwachung von energetischen Zielgrößen. Die Richtlinie bezieht sich neben dem Sektor der Energieanwendung, zu welchem Verbraucher wie produzierende Unternehmen zählen, auch auf die Bereiche der Energiebereitstellung, der Energieverteilung und des Energiehandels, welche jedoch im weiteren Verlauf dieses Abschnitts nicht betrachtet werden.

Das Energiemanagement ist in diesem Zusammenhang als „vorausschauende, organisierte und systematisierte Koordinierung von Beschaffung, Wandlung, Verteilung und Nutzung von Energie zur Deckung der Anforderungen unter Berücksichtigung ökologischer und ökonomischer Zielsetzungen“ [14] definiert. Im Bereich der Energieanwendung ist Energiemanagement dabei als Methode zur Minimierung des Primärenergiebedarfs zu verstehen. Es hat sich vor allem zur „Reduzierung des Energieverbrauchs sowie [zur] Reduzierung der Verluste“ [14] etabliert.

Die mittels Energiemanagement verfolgten Ziele reichen von wirtschaftlichen Bestrebungen, wie der Senkung der Energie- und Anlagenkosten, über elementare Vorhaben, wie die Sicherstellung der Versorgungssicherheit insbesondere bei Eigenversorgungsanteilen, bis hin zu ideellen Zielstellungen, wie der Erreichung einer Vorbildfunktion hinsichtlich ökologischen und nachhaltigen Verhaltens [14]. Dafür werden mögliche Parameter definiert, welche die Ziele widerspiegeln und daher gezielt

beeinflusst werden sollen. Hierzu zählen u. a. spezifische Kosten, die Höhe der notwendigen Investitionen, die Effizienz sowie die Verfügbarkeit der Prozesse und Anlagen oder die ausgestoßenen Emissionen.

Um Wege der Zielerreichung aufzuzeigen, gibt die Richtlinie konkrete Hinweise, welche Rahmenbedingungen erfüllt und welche Methoden für die Analyse und Überwachung des Energiebedarfs eingesetzt werden sollen. Die grundlegende Voraussetzung ist dabei eine ausreichende Transparenz hinsichtlich des Energieverbrauchs und dessen Zuordnung zu einzelnen Verursachern. Zu betrachtende technische Anlagen im Bereich der Energieanwendung sind vor allem „elektrische Antriebe und elektrisch betriebene Maschinen“ [14]. Mithilfe geeigneter Messtechnik können nach der VDI-Richtlinie 4602 z. B. folgende Methoden zur Analyse, Prognose, Überwachung und Kontrolle des Energieverbrauchs im Bereich der Energieanwendung genutzt werden:

- Analyse des Ist-Zustands
- Erstellung eines Energieflussdiagramms
- Berechnung von Energiekennwerten
- Energiemonitoring
- kostenstellenspezifische Zuordnung der Energiekosten
- Zeitreihenanalysen
- Gegenüberstellung des erwarteten und des realen Energieverbrauchs mittels einer Gap-Analyse

Dabei beschreibt die genannte Gap-Analyse die Betrachtung der Unterschiede zwischen dem prognostizierten bzw. erwarteten Soll-Energiebedarf und den tatsächlich auftretenden Ist-Werten. Das Ziel ist es, Einflussfaktoren auf diesen Unterschied und Maßnahmen zur Minimierung dieser Lücke (engl. gap) zu identifizieren [14]. Eine entsprechende Datengrundlage ist wesentlich, um die unterschiedlichen Analysen korrekt und repräsentativ durchführen zu können. Hierfür soll auf „geeignete[r] Messinstrumente“ zurückgegriffen werden [14].

Zusammenfassend nennt die VDI-Richtlinie zwar konkrete Ziele und Energiedatenanalysen zur Umsetzung von Energiemanagement in produzierenden Unternehmen. Die Auswahl der dafür erforderlichen Datengrundlage sowie die richtige messtechnische Umsetzung werden jedoch auch hier dem Anwender überlassen.

2.2.4 Bestimmung des Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen nach VDMA 34179

Der Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) beschreibt in seiner Messvorschrift deutlich konkreter, wie Energiedatenanalysen durchgeführt werden sollen, schränkt den Betrachtungsraum dabei aber auf Werkzeugmaschinen in der Serienfertigung ein. Konkret soll durch die Messvorschrift VDMA 34179 ermöglicht werden, „den benötigten Energie- und Medienbedarf für die wichtigsten Energiezustände und -übergänge sowie pro Werkstück auf einheitliche Weise zu bestimmen“ [15]. In der Messvorschrift werden dabei sämtliche in Werkzeugmaschinen benötigten Medien und Energieformen betrachtet. Im Folgenden wird jedoch, wie in Abschnitt 1.3 dargelegt, nur auf den Aspekt der elektrischen Energie eingegangen.

Genutzt werden soll die Vorschrift, um beispielsweise die Angaben des Werkzeugmaschinenherstellers bzgl. des Energiebedarfs einer Anlage und ihrer Komponenten zu verifizieren oder um die Ausgangsbasis für Energieeffizienzmaßnahmen oder weitere energiebezogene Vorhaben zu bestimmen. Damit dient die Vorschrift auch als Hilfestellung bei der Einführung eines Energiemanagementsystems nach DIN EN ISO 50001.

Die Zielgrößen, welche ermittelt werden sollen, sind die mittleren Energiebedarfswerte für jeden Maschinenzustand, für jeden Übergang von einem zu einem anderen Zustand und für die Herstellung definierter Werkstücke. So wird beispielsweise für die Bestimmung des Energiebedarfs pro Werkstück folgende Formel festgelegt:

$$\text{Energiebedarf pro Werkstück} = \frac{\text{Gesamtenergiebedarf}}{\text{Anzahl gefertigter Werkstücke}} \quad (2.1)$$

Um eine einheitliche und somit reproduzierbare und verifizierbare messtechnische Erfassung zu erzielen, legt die Messvorschrift die für die Analyse des Bedarfs an elektrischer Energie notwendigen Messwerte fest:

- Wirkleistung P in kW
- Scheinleistung S in kVA
- Blindleistung Q in kvar
- gesamte Wirkenergie E_w in kWh
- Scheinenergie E_s in kVAh
- Blindenergie E_Q in kvarh

Für jeden Messwert ist die Erfassung des Mittelwertes pro Maschinenzustand vorgesehen. Eine Begründung der Auswahl dieser Messwerte sowie der recht ungenauen

vorgegebenen Granularität durch einen Mittelwert pro Zustand enthält die Messvorschrift nicht. Auch ist nicht angegeben, welche Messfrequenz erforderlich ist, um einen ausreichend kleinen Fehler bei der Bestimmung der angestrebten Mittelwerte zu erreichen. Die Dauer einer Messung ist individuell zu definieren. Für die Analyse von Nebenaggregaten ist es erforderlich, eine Messdauer festzulegen, in welcher alle betrachteten Nebenaggregate für mindestens zwei volle Zyklen aktiv betrieben werden [15]. Die technische Spezifikation bezüglich Systemtechnik und Messfrequenzen obliegt wie zuvor auch dem Anwender.

2.2.5 Definition und Abgrenzung des Begriffs *Energiedatenanalyse*

Wie in den vorangegangenen Abschnitten erläutert, stellt die Norm DIN EN ISO 50001 die Basisvorschrift im Bereich der Analyse von Energiedaten dar. Sie beschreibt den systematischen Aufbau und die Anforderungen an Energiemanagementsysteme in Unternehmen [7]. In ihrer Struktur werden EnMS dabei in Form eines Plan-Do-Check-Act-Zyklus dargestellt. Dieser im Abschnitt 2.2.1 beschriebene iterative Prozess enthält einen Teilaspekt, welcher sich mit der *Überwachung, Messung und Analyse* von Energiedaten beschäftigt (s. Abbildung 2.1). Diesem Teilbereich, welcher auch als *Energiedatenmanagementsystem* (EDMS) bezeichnet wird und der eine große Bedeutung für eine stetige und dauerhafte Steigerung der energiebezogenen Leistung hat [7; 16], ist die vorliegende Dissertation zuzuordnen.

Das EDMS stellt das zentrale Informationsinstrument im Energiemanagementsystem und damit die Grundlage zur Durchführung von Energieanalysen – unabhängig von den individuellen Zielgrößen – dar. Es umfasst dabei alle Vorgänge von der Datenerfassung auf der Feldebene über die Datenhaltung und die Visualisierung bis hin zur umfassenden Analyse und Auswertung der Energiedaten hinsichtlich der individuellen Zielsetzung. Das Energiedatenmanagement ermöglicht die Überprüfung der Zielerreichung und das darauf aufbauende Ableiten von weiteren Verbesserungsmaßnahmen im Rahmen des EnMS: Das EDMS ist somit ein zentrales Werkzeug des EnMS und darf daher nicht mit diesem gleichgesetzt werden [16]. Ein wesentliches Element des EDMS wiederum ist die Energiedatenanalyse als „Schritt vom reinen Zahlenmaterial hin zu verwertbaren Zahlen und Ergebnissen“ [16]. Die Aufgaben der *Datenanalyse und -auswertung* umfassen u. a. die Abschätzung und Berechnung des Energiebedarfs, die Durchführung von Zeitreihenanalysen, die Entwicklung von Kennzahlen sowie den Vergleich unterschiedlicher Datenreihen [16].

Der Begriff des *Monitorings* dagegen kann als „Auswertung der Energiedaten mit einer stetigen und regelmäßigen Überwachung“ [16] definiert werden. Reines Energie-Monitoring umfasst die kontinuierliche Überwachung von Kenngrößen sowie das Ableiten von Warnungen bei Abweichungen oder von Hinweisen auf Energieverschwendung. Energiedatenanalysen bilden somit die Basis für das Energie-Monitoring [16].

Die Zusammenhänge dieser wesentlichen Begriffe sind in Abbildung 2.2 dargestellt. Als Grundlage für Analysen, Auswertungen und Monitoring liegt der Fokus dieser Arbeit insbesondere auf dem Bereich der *Datenerfassung*. Die Dissertation soll die offene Frage nach der individuell notwendigen Datengrundlage beantworten, welche in keiner der vorgestellten Normen und Richtlinien zufriedenstellend adressiert wird.

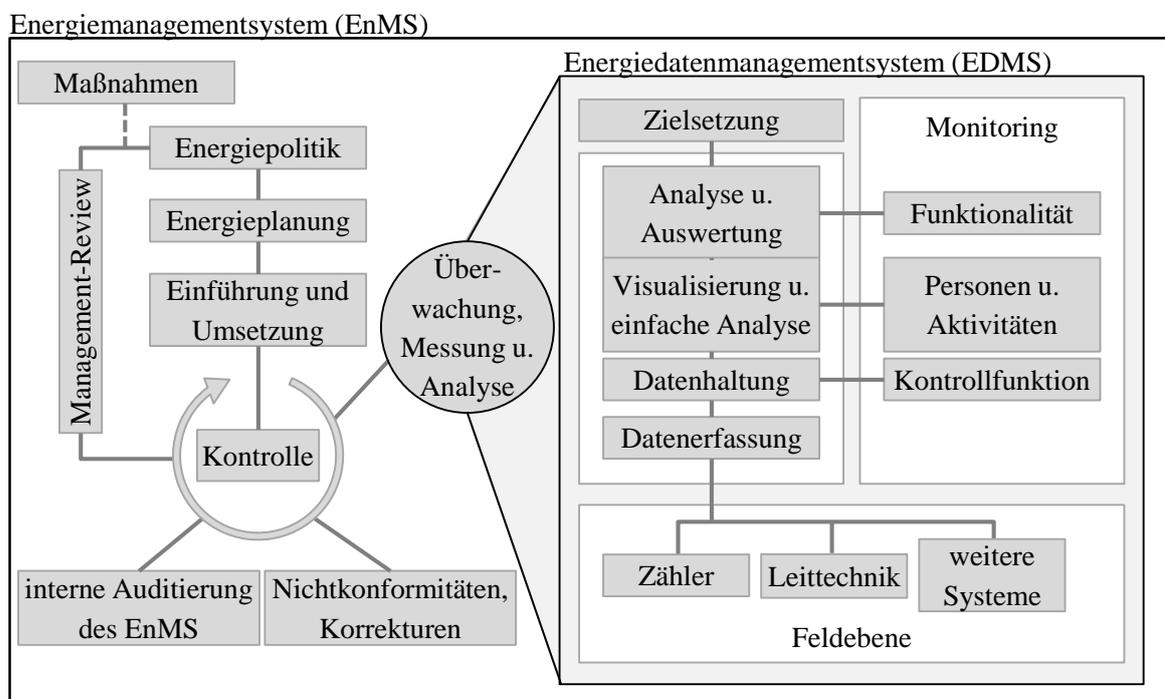


Abbildung 2.2: *Energiedatenmanagement als Teilbereich des Energiemanagements (in Anlehnung an [7; 16; 17])*

2.3 Zielstellungen von Energiedatenanalysen

Etablierte Themenschwerpunkte von Forschung und Entwicklung im Umfeld des Energiedatenmanagements sind u. a. die Energiedatenerfassung und -interpretation, die Energiebedarfsmodellierung und -optimierung sowie die aktive Beeinflussung des Energiebedarfs von Anlagen und Prozessen, um die angestrebten Ziele zu erreichen. Hierbei wird insbesondere in der Forschung auf, an den jeweiligen Anwen-

dungsfall angepasste, hoch aufgelöste Energiedaten zurückgegriffen. Die Verfügbarkeit der für die Analysen notwendigen Datenbasis wird dabei i. d. R. als wesentliche Notwendigkeit für die Forschungsarbeiten vorausgesetzt, jedoch nicht explizit betrachtet. Die im Folgenden vorgestellten Forschungsbereiche zeigen somit exemplarisch, für welche Anwendungsfälle eine effiziente und anwendungsgerechte Energiedatenerfassung und -analyse in der Produktion genutzt werden kann und zu welchen Ergebnissen die Daten weiterverarbeitet werden können.

2.3.1 Steigerung der Energieeffizienz

Durch den Anstieg der Energiepreise sowie die politisch geforderte Reduzierung des Energiebedarfs in Deutschland stellt die *Steigerung der Energieeffizienz* das am weitesten verbreitete energiebezogene Ziel dar. Dabei beschreibt der Begriff der *Effizienz* allgemein das „Verhältnis zwischen dem erreichten Ergebnis und den eingesetzten Ressourcen“ [18]. Um Effizienz bewerten zu können, müssen Nutzen sowie Ressourceneinsatz quantifiziert vorliegen.

Die sog. *Energieeffizienzrichtlinie* des Europäischen Parlaments und des Rates [19] definiert Energieeffizienz als

$$\text{Energieeffizienz} = \frac{\text{Ertrag an Leistung, Dienstleistung, Waren oder Energie}}{\text{Energieeinsatz}}. \quad (2.2)$$

Nach der Umsetzung von Maßnahmen zur Energieeffizienzverbesserung können die erzielten *Energieeinsparungen* als Bewertungsgröße erfasst werden. Diese umfassen „die eingesparte Energiemenge, die durch Messung und/oder Schätzung des Verbrauchs vor und nach der Umsetzung einer Maßnahme zur Energieeffizienzverbesserung [...] ermittelt wird“ [19]. Dabei ist selbstverständlich auf konstante Rahmenbedingungen zu achten, um vergleichbare Messwerte zu erzielen. Werden technische, verhaltensbezogene oder wirtschaftliche Änderungen umgesetzt, um die Energieeffizienz zu steigern, wird dies als *Energieeffizienzverbesserung* verstanden [19].

In der produzierenden Industrie stellen Werkzeugmaschinen (WZM) durch ihren vielfältigen Einsatz und ihre somit hohe Anzahl insbesondere bei KMUs signifikante Energieverbraucher dar. Im Bereich der Metallbearbeitung entfallen 70 % des Bedarfs an elektrischem Strom auf mittelständische Unternehmen, im Bereich des Maschinenbaus sind es 47 % [20]. Somit muss auch für KMUs ein großes wirtschaftliches Interesse bestehen, den Energiebedarf zu senken. Ein Teil der Effizienzmaßnahmen beginnt bereits bei der energieeffizienten Auslegung und Konstruktion von Produktionsanlagen. Dieser Bereich stellt im Kontext steigender Energiepreise und eines

allgemein wachsenden Bewusstseins für den Energieverbrauch eine große Herausforderung u. a. für die Hersteller von WZM dar, die Energieeffizienz ihrer Maschinen stetig zu steigern [21]. Die Angebote der Maschinenhersteller reichen dabei von Neuanlagen mit energieeffizienten Einzelkomponenten bis hin zu Umbauten an Bestandsanlagen, um deren Energieeffizienz zu erhöhen. Einige Forschungsarbeiten, welche sich mit energieeffizienten Werkzeugmaschinen befassen, verfolgen den Ansatz, Maschinenkomponenten lastgerecht zu konstruieren oder einzelne Nebenaggregate adaptiv in Abhängigkeit des Bearbeitungsauftrags zu steuern [22].

Ein weiterer Schritt, aufbauend auf einer energieeffizienten Anlagentechnik, ist der energieeffiziente Betrieb von Produktionsanlagen. Hierbei steht als erste Maßnahme meist der Energiebedarf in unproduktiven Maschinenzuständen (z. B. im Stand-by-Modus) im Fokus.

Insbesondere bei der Betrachtung von Energieeffizienzmaßnahmen auf Basis gezielter Zustandswechsel ist die sogenannte Grenzzeit zu beachten, welche als Schwellwert für eine effektive Energieeinsparung angesehen werden kann [23]. Wechselt eine Produktionsanlage im wartenden Zustand a (z. B. Rüstvorgang, Unterbrechungen mit bekannter Dauer) in einen energetisch günstigeren Zustand b, so ist nach Ablauf der Produktionsunterbrechung für das Umschalten zurück in Zustand a eine Umschaltarbeit zu verrichten. Die Grenzzeit ist diejenige minimale Verweildauer im Zustand b vor einer Rückkehr in Zustand a, ab der die Umschaltarbeit durch die reduzierte Leistungsaufnahme im Zustand b mindestens kompensiert ist [23]. Je größer die Verweildauer ist, umso höher fällt die Steigerung der Energieeffizienz in nicht wertschöpfenden Zeiten aus. Der Zusammenhang ist bildhaft in Abbildung 2.3 dargestellt.

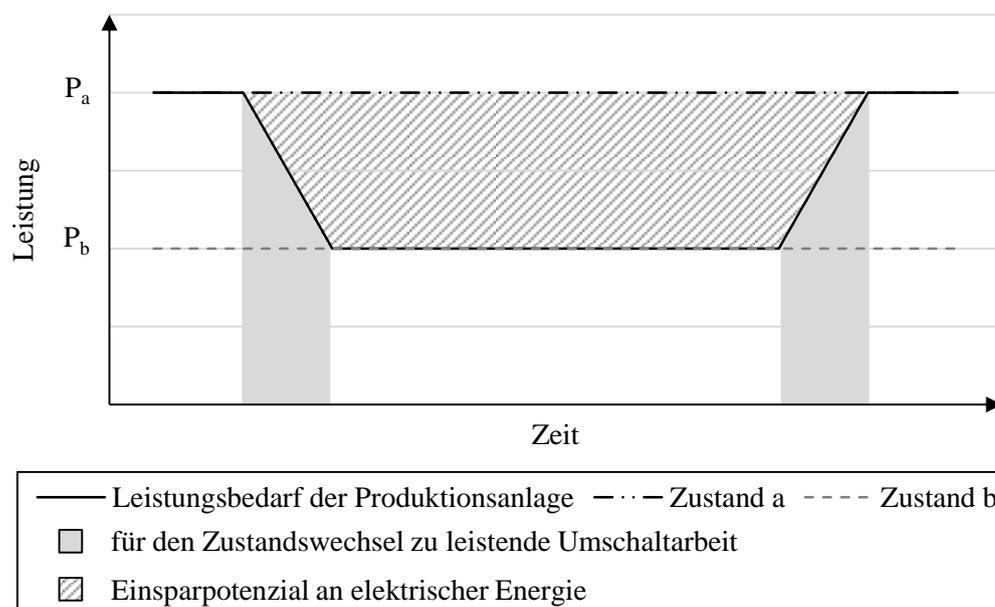


Abbildung 2.3: Zusammenhang zwischen elektrischem Einsparpotenzial durch Zustandswechsel und der dafür zu leistenden Umschaltarbeit bei Annahme eines linearen Verlaufs während der Änderung (in Anlehnung an [23])

Eine Rahmenbedingung, welche zusätzlich berücksichtigt werden muss, ist die thermische Stabilität von Produktionsanlagen. Daher erweisen sich Teilabschaltungen meist als besser umsetzbar als ein vollständiges Abschalten von Anlagen, weil die Anlage dabei weniger stark abkühlt. Auch muss ein rechtzeitiges Hochfahren der Anlagen zur Wiederaufnahme des Produktivbetriebs gewährleistet sein. Hierzu muss die Dauer der Produktionsunterbrechung vor dem Beginn der Maßnahme bekannt sein.

Haag [24] untersucht ergänzend dazu in der Arbeitsplanung die Potenziale einer Berücksichtigung der Energiebedarfe von Produktionsanlagen. In dieser Phase werden die Eckpunkte der zu realisierenden Produktionsprozesse und damit in der Folge auch das energetische Verhalten in wesentlichen Teilen festgelegt. So können beispielsweise verschiedene Alternativen zur Herstellung eines Produktes unter Berücksichtigung aller erforderlichen Ressourcen, u. a. auch des Energiebedarfs, miteinander verglichen und bewertet werden. Das Ziel ist eine ganzheitliche Steigerung der Ressourceneffizienz, was über die Betrachtung der reinen Energieeffizienz bereits hinausgeht [24].

Die grundlegende Analyse des spezifischen Handlungsbedarfs sowie die Bewertung der erreichten *Energieeinsparungen* erfordert stets differenzierte und quantifizierte

Aussagen auf der Grundlage von Energiedaten, bis hinunter zu einzelnen Maschinenkomponenten. Die Auswahl, Erfassung und Analyse anforderungsgerechter Energiedaten stellt somit eine Grundvoraussetzung für die Umsetzung von sinnvollen und zielgerichteten Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz dar.

2.3.2 Bilanzierung von Energie- und Stoffflüssen

Ganzheitliche Bilanzierungen stellen, ähnlich zu Effizienzbetrachtungen, Ressourceneinsätze einem Ergebnis gegenüber. Das Ergebnis umfasst im industriellen Umfeld i. d. R. das erzielte Erzeugnis inklusive aller anfallenden Emissionen und Abfälle. Für die Erstellung von Energiebilanzen müssen somit die energetischen Aufwendungen für alle eingesetzten Ressourcen sowie für Transport, Produktion und Entsorgung quantifizierbar vorliegen [25].

So können beispielsweise Energiewertströme erstellt werden, um Transparenz zu schaffen und Verschwendungen aufzudecken [26]. Dabei gliedert sich das Vorgehen in drei Schritte:

- Energiewertstromanalyse zur Identifikation des Ist-Zustands sowie möglicher Verschwendung
- Energiewertstromdesign zur Definition geeigneter Maßnahmen zur Reduzierung der identifizierten Verschwendung
- Umsetzung zur Realisierung der festgelegten Maßnahmen

Ein wesentliches Ergebnis der Energiewertstromanalyse ist die Visualisierung des betrachteten Produktionsbereichs oder -systems u. a. unter Berücksichtigung des Materialflusses, der Medien- und Informationsflüsse sowie der vorliegenden Bearbeitungszeiten. Zudem werden die Bedarfe an elektrischer Energie, wie auch an anderen Energieträgern, visualisiert, um im Schritt des Energiewertstromdesigns konkrete Hinweise auf mögliche Verschwendungen abzuleiten. Abbildung 2.4 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt eines Energiewertstroms, welcher drei verkettete Prozesse umfasst. Dabei werden für jeden Prozess mittels eines Bausteins alle wesentlichen Informationen, wie z. B. die elektrische Leistungsaufnahme, dargestellt. Neben den hier gezeigten Prozessbausteinen existieren auch weitere Bausteine zur Beschreibung von Medienversorgung, Leitungen, Logistikprozessen und Steuerungen [26].

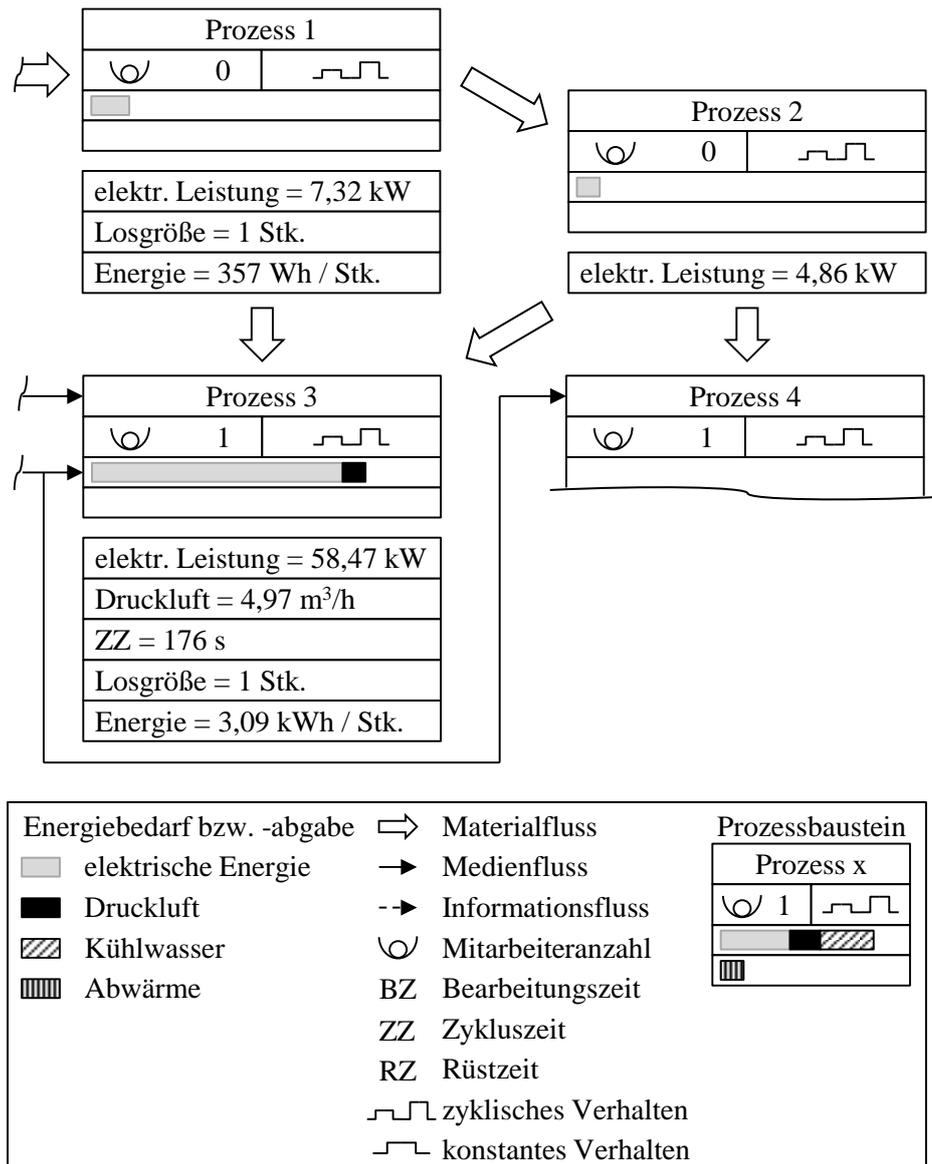


Abbildung 2.4: Beispielhafter Ausschnitt eines Energiewertstroms (in Anlehnung an [26])

Über den Ansatz der Energiewertstromanalyse hinaus existieren beispielsweise im Bereich der spanenden Fertigung zahlreiche weitere theoretische Berechnungsansätze [27; 28] sowie Kombinationen aus Empirik und Berechnungen [29], um Bilanzierungen vorzunehmen. Alle Bilanzierungen unter Berücksichtigung des Energiebedarfs des betrachteten Produktionssystems dienen u. a. der Identifikation von Energiedatenanalysen mit hoher Relevanz. So kann die Bilanzierung z. B. innerhalb eines Unternehmens auf Bereiche hohen Energiebedarfs und somit großen Einsparpotentials hinweisen.

2.3.3 Energieflexibilität in der Produktion

Im Rahmen der Energiewende und des damit verbundenen Ausbaus an regenerativen Energiequellen ist mit einer zunehmenden Volatilität des Energieangebots zu rechnen. Dies liegt vor allem an der Abhängigkeit der regenerativen Energieerzeugung von nicht steuerbaren Größen wie z. B. den Witterungsbedingungen. Die Energieerzeugung ist damit immer stärker von äußeren Einflüssen abhängig und kann zu immer kleineren Teilen bedarfsgerecht umgesetzt werden. Eine Weiterführung der bedarfsgerechten Energiebereitstellung mit einer gewohnt hohen Versorgungssicherheit wird somit in zunehmenden Kosten, z. B. für zusätzlich benötigte Netzinfrastruktur und Speichertechnologien, resultieren [3; 30]. Abbildung 2.5 zeigt beispielhaft für sieben Tage im Juni 2018 eine Gegenüberstellung von Stromerzeugung und -verbrauch in Deutschland. Hierbei ist die Stromerzeugung aus regenerativen Energien weiter aufgeschlüsselt in Solarenergie, Windkraft aus Onshore-Anlagen (an Land) und Offshore-Anlagen (in tieferen Gewässern), Wasserkraft sowie Bioenergie. Die konventionelle Energieerzeugung ist der Übersichtlichkeit halber kumuliert dargestellt und beinhaltet u. a. Kernenergie sowie die Stromerzeugung aus Kohle- und Gaskraftwerken.

Aktuell werden die auftretenden Unterschiede durch Handel mit den Nachbarländern Deutschlands, zu denen es sog. Grenzkuppelstellen gibt, ausgeglichen. Wird mehr Strom erzeugt als verbraucht, so exportiert Deutschland Strom. Dahingegen agiert Deutschland als Netto-Importeur, wenn die nationale Stromerzeugung hinter dem Strombedarf zurück bleibt [31]. Dieser Ausgleich über Importe und Exporte ist sinnvoll und wird auch in Zukunft auf europäischer Ebene fortbestehen. Allerdings ist ein solcher Ausgleich nur in begrenztem Maße möglich und erhöht die Abhängigkeiten der deutschen Energieversorgung vom europäischen Ausland. Der Ausgleich sehr großer Unterschiede ist zudem mit erheblichen Kosten verbunden.

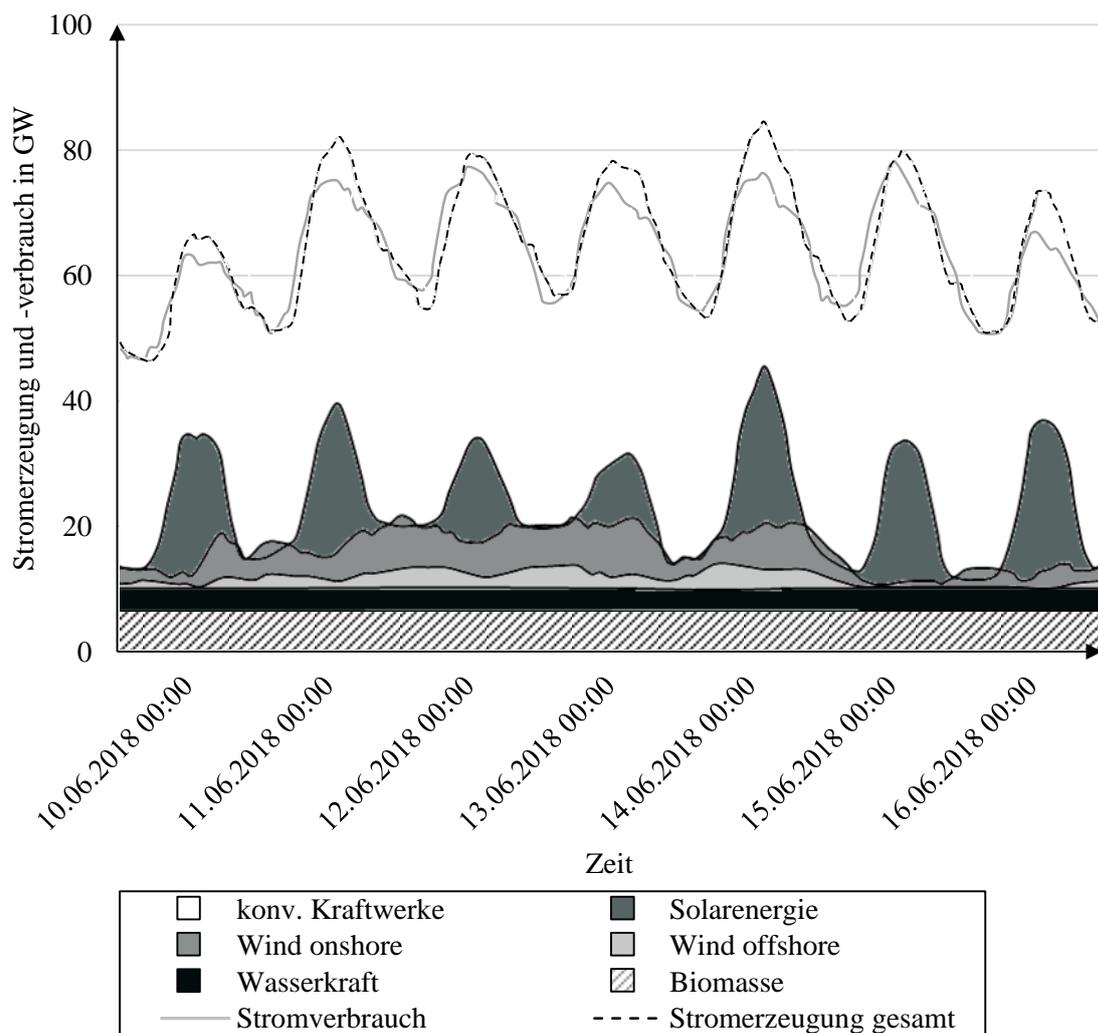


Abbildung 2.5: Kumulierte Gegenüberstellung von Stromerzeugung und -verbrauch in Deutschland für den Zeitraum vom 10.06.2018 bis zum 16.06.2018 [31]

Die Notwendigkeit dieses Energieausgleichs zeigt, dass sich bereits heute die Abweichungen zwischen Energieerzeugung und -bedarf durch den ergänzenden Einsatz von direkt steuerbarer Energieerzeugung, wie beispielsweise mit Gas- oder Pumpspeicherkraftwerken, nicht vollständig ausgleichen lassen. Dieses Phänomen wird sich durch den weiterhin geplanten Ausbau der regenerativen Energien verstärken. Daher wird es zur Aufrechterhaltung einer verlässlichen Energieversorgung in Deutschland notwendig sein, dass auch die Verbraucher einen deutlich größeren Beitrag zur Versorgungssicherheit leisten, als das heute bereits der Fall ist. Hierbei ist mit zunehmenden Anreizsystemen zu rechnen, welche entsprechende Maßnahmen von produzierenden Unternehmen vergüten.

Um produzierenden Unternehmen in diesem Umfeld einen Wettbewerbsvorteil zu ermöglichen, beschäftigen sich zahlreiche Forschungsarbeiten mit der Möglichkeit, den Energiebedarf produzierender Unternehmen aktiv zu steuern und somit dem Angebot anzupassen. Diese „Fähigkeit eines Produktionssystems [einer Anlage, oder eines Aggregats] [...], sich schnell und mit sehr geringem finanziellen Aufwand an Änderungen des Energiemarktes anzupassen“ [32], wird als *Energieflexibilität* bezeichnet. Sie kann auf der Ebene eines *Produktionssystems*, einer *Anlage* oder eines *Aggregats* umgesetzt werden [32]. So können beispielsweise Aufträge hohen Energiebedarfs in Zeiten hoher Energieverfügbarkeit und damit geringer Energiepreise verschoben werden [33]. Alternativ ist es möglich, durch die aktive Steuerung Einfluss auf den Zeitpunkt des Energiebedarfs einzelner Aggregate zu nehmen [34]. Hierzu ist jedoch eine Befähigung von Produktionsanlagen, wie beispielsweise Werkzeugmaschinen [35], ebenso erforderlich wie eine zentrale Ansteuerung der Anlagen, um die technischen Energieflexibilitätspotenziale automatisiert abrufen zu können [36].

Für alle Arten von Energieflexibilitätsmaßnahmen in der Produktion ist unterschiedlich detailliertes Wissen über den spezifischen Energiebedarf notwendig. Daher eignet sich die in dieser Arbeit zu entwickelnde *Methode zur systematischen Energiedatenerfassung in der Produktion* auch als Grundlage für die Definition der erforderlichen Datengrundlage und der elektrischen Messtechnik für Energieflexibilitätsmaßnahmen in produzierenden Unternehmen.

2.4 Ansätze für Energiedatenanalysen in der Produktion

Nach den im Abschnitt 2.2 vorgestellten Arbeiten, welche energiedatenbasierte Ansätze verfolgen und mögliche Maßnahmen aufzeigen, soll nun ein Überblick über die Forschungslandschaft im Bereich der Energiedatenerfassung und -analyse vermittelt werden. Die Forschungsarbeiten können inhaltlich vielseitig gelagert sein und sich primär z. B. mit der Akquisition, Interpretation, Modellierung oder Optimierung von Energiebedarfen befassen, wofür jedoch eine hochwertige Datenrundlage obligatorisch ist.

2.4.1 Übersicht über die Forschungslandschaft

Abbildung 2.6 zeigt in Anlehnung an Liebl et al. [17] einen Überblick über die Forschungslandschaft im Bereich der Energiedatenanalyse im produktionstechnischen Umfeld.

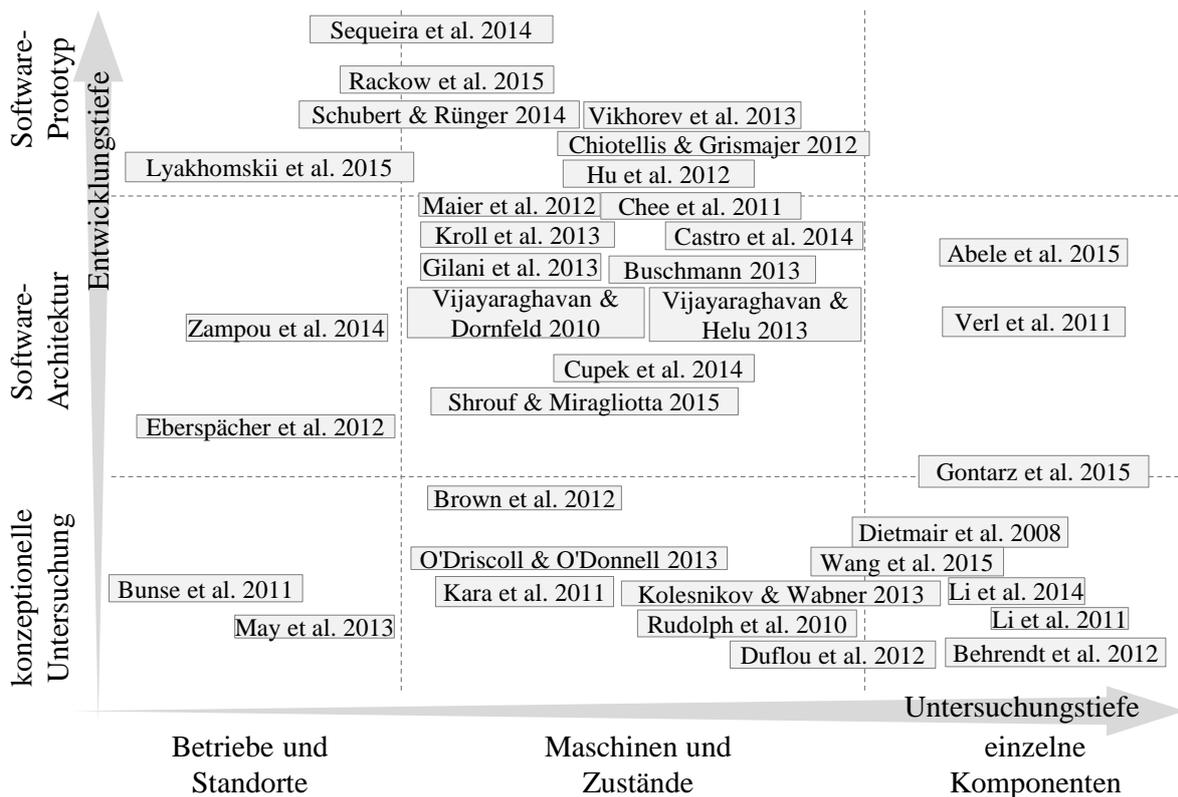


Abbildung 2.6: Überblick über die Forschungslandschaft im Bereich der Energiedatenanalyse, inhaltlich eingeteilt nach Entwicklungs- sowie Untersuchungstiefe (in Anlehnung an [17], einzelne Quellenachweise siehe Anhang 12.1)

Um die Arbeiten zu strukturieren, sind diese über den folgenden Dimensionen aufgetragen:

Die Ordinate stellt die *Entwicklungstiefe* dar. Diese zeigt an, auf welcher inhaltlichen Ebene sich eine Arbeit, von methodischen Konzepten bis hin zu prototypischen Umsetzungen, mit Energiedatenanalysen befasst. Die *Entwicklungstiefe* unterscheidet zwischen den drei Klassen *konzeptionelle Untersuchung*, *Software-Architektur* und *Software-Prototyp*.

Die *Untersuchungstiefe* (Abszisse) zeigt an, auf welcher Produktionsebene sich eine Arbeit mit Energiedatenanalysen befasst. Die Dimension der *Untersuchungstiefe* ist dabei in die Klassen *Betriebe und Standorte*, *Maschinen und Zustände* sowie *einzelne Komponenten* unterteilt. Der Fokus dieser Arbeit liegt in den beiden letztgenannten Bereichen.

Bei sich punktuell häufenden Publikationen können diese in der Abbildung geringfügig von ihrer eigentlichen Lage abweichend dargestellt sein. Die Aussagekraft der Abbildung bleibt jedoch trotzdem erhalten.

Im Folgenden werden für die Kombinationen aus Entwicklungs- und Untersuchungstiefe ausgewählte Arbeiten vorgestellt, deren Fokus auf der für ihre Analysen notwendigen Datenbasis liegt. Da sich die Ebene Software-Prototyp hauptsächlich mit der Umsetzung der IT-Implementierung beschäftigt, ist diese zwar in Abbildung 2.6 der Vollständigkeit halber aufgeführt. Im Folgenden wird sie jedoch nicht weiter vertieft, da die IT-Implementierung nicht zum Betrachtungsraum der vorliegenden Arbeit gehört. Abbildung 2.7 zeigt, in welcher Reihenfolge in den folgenden Abschnitten auf die einzelnen Bereiche der Forschungslandschaft eingegangen wird.

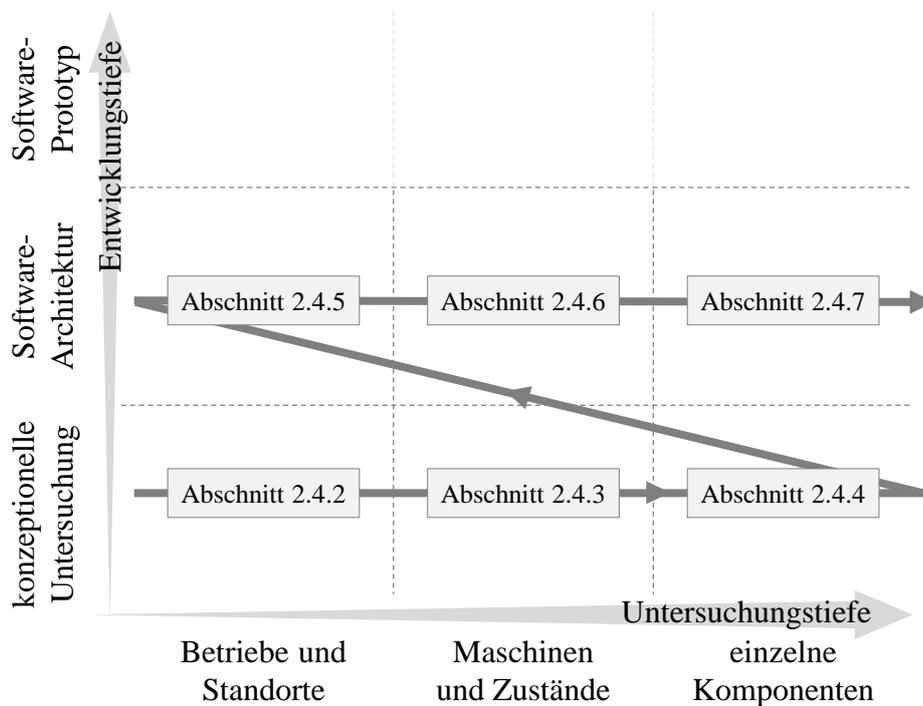


Abbildung 2.7: Zuordnung der folgenden Abschnitte zu den Bereichen der Forschungslandschaft aus Abbildung 2.6

2.4.2 Konzeptionelle Untersuchungen auf der Ebene von Betrieben und Standorten

Im Rahmen ihrer Arbeit untersuchten O'Driscoll und O'Donnell [8] den Stand der Technik im Hinblick auf Energiebedarfsmessungen in Produktionsumgebungen. Sie stellen die genaue Quantifizierung von Energiedaten als wesentliche Grundlage für ein effizientes Energiemanagement heraus. Dabei verfolgen sie den Ansatz, sinnvolle Messauflösungen in Abhängigkeit von dem Einsatzzweck und der Untersuchungstiefe zu bestimmen. Für das Untersuchungsziel der Spannungsqualität berufen sie sich auf Saxena et al. [37] und deren Übersicht über ausgewählte Störungen inkl. der jeweiligen Störungsdauer (siehe Tabelle 2.1). Diese kann als Bezugsgröße für die Festlegung der benötigten Messauflösung herangezogen werden.

Die Spannungsqualität beschreibt dabei die Übereinstimmung der nach europäischen und internationalen Normen festgelegten Anforderungen an die physikalischen Werte der Netzspannung und der Netzspannung, wie sie tatsächlich z. B. beim Kunden ankommt [38]. Sie ist nicht zu verwechseln mit der Versorgungszuverlässigkeit, welche reziprok „durch die Anzahl und Dauer von Versorgungsunterbrechungen gekennzeichnet [ist]“ [38].

Tabelle 2.1: Ausgewählte Störungen der Spannungsqualität mit Dauer des Auftretens (in Anlehnung an [37])

Nummer	Kategorie	Unterkategorie	Dauer
I	Variationen kurzer Dauer		
(a)	Spannungseinbruch	augenblicklich	0,5 bis 30 Zyklen
		kurzzeitig	30 Zyklen bis 3 s
		temporär	3 s bis 1 min
(b)	Spannungsanstieg	augenblicklich	0,5 bis 30 Zyklen
		kurzzeitig	30 Zyklen bis 3 s
		temporär	3 s bis 1 min
(c)	Unterbrechung der Versorgung	kurzzeitig	0,5 Zyklen bis 3 s
		temporär	3 s bis 1 min

II			
Variationen langer Dauer			
(a)	anhaltende Unterbrechung der Versorgung		>1 min
(b)	Unterspannung		>1 min
(c)	Überspannung		>1 min
III			
Störgrößen			
(a)	Impuls	Nanosekunde	<50 ns
		Mikrosekunde	1 bis 50 ms
		Millisekunde	>1 ms
(b)	oszillierend	niedrige Frequenz	0,3–50 ms
		mittlere Frequenz	20 μ s
		hohe Frequenz	5 μ s
IV			
Spannungsasymmetrie			
			stationär
V			
Wellenverzerrung			
(a)	Oberwellen ¹		stationär
(b)	Notching ²		stationär

¹Harmonische der Grundschiwingung

²wiederkehrende Netzqualitätsstörung, z. B. durch den Einsatz von Spannungswandlern

2.4.3 Konzeptionelle Untersuchungen auf der Ebene von Maschinen und Zuständen

Als wesentliche Faktoren zur Bestimmung der Anforderungen an die Datenaufzeichnung sowie die Häufigkeit der Analysendurchführung nennen Kara et al. [39] die Betrachtungsebene sowie die Dynamikstufen des Energiebedarfsverhaltens. Die Dy-

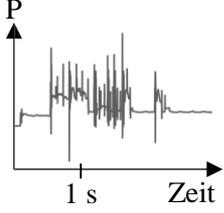
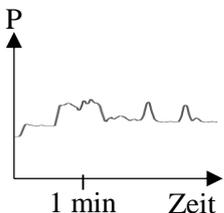
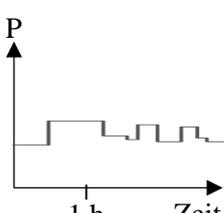
namikstufen reichen von hochdynamischem Verhalten von Montage- und Fertigungsbereichen über geringdynamisches Verhalten im Bereich der technischen Gebäudeausstattung bis hin zu quasistatischem Verhalten von Bürogebäuden.

Tabelle 2.2 zeigt entsprechend eingeteilte Messauflösungen inkl. der notwendigen Messgrößen. Die Auflösungen umspannen sehr große Bereiche.

Dabei sind folgende Messgrößen berücksichtigt:

- *Gesamtenergiebedarf E*
- *Scheinleistung S* : Die Scheinleistung ist die geometrische Summe von Blind- und Wirkleistung, wie in Abbildung 2.8 zu sehen ist. Die der Blindleistung zugrunde liegenden Blindströme sind dabei die „Stromkomponente senkrecht zur Spannungsrichtung“ [40]. Diese sind nicht effektiv nutzbar, belasten jedoch sowohl die Versorgungsnetze als auch die Maschineninfrastruktur und sollten daher vermieden werden [40].
- *Phasenwinkel φ* : Aus den Blindwiderständen innerhalb eines Wechselstromkreises resultiert eine Phasendifferenz zwischen Spannung und Stromstärke. Im Zeigerdiagramm schließen Strom I und Spannung U bzw. analog Schein- und Wirkleistung (s. Abbildung 2.8) den Phasenwinkel φ ein [40].
- *Leistungsfaktor $\cos \varphi$* : Der Ausdruck $\cos \varphi$ wird als Leistungsfaktor bezeichnet. Sein Maximum von 1 erreicht $\cos \varphi$ bei einer vollständigen Vermeidung von Blindleistung. Ist dagegen nur Blindstrom vorhanden, liegt keine nutzbare Wirkleistung vor, der Leistungsfaktor ist dann 0 [40].
- *Total Harmonic Distortion (THD, auch Klirrfaktor oder Oberschwingungsgehalt genannt)*: Der sog. Klirrfaktor gibt den Anteil an nichtlinearen Verzerrungen am Gesamtsignal an. Berechnet wird der Faktor als Verhältnis des „Effektivwert[s] der Verzerrungsgröße zum Effektivwert der Wechselgröße“ [41].

Tabelle 2.2: Messstrategien in Abhängigkeit der Betrachtungsebene und des Verhaltens der Messgröße (in Anlehnung an [39])

	Verhalten	Auflösung	Messgrößen
auf Ebene von z. B. einer Abteilung	hochdynamisch 	1 s bis 1 min	Energiebedarf E in Wh, Scheinleistung S in VAh, Leistungsfaktor $\cos \varphi$
	geringdynamisch 	30 s bis 5 min	Energiebedarf E in Wh, Scheinleistung S in VAh, Leistungsfaktor $\cos \varphi$
	quasistatisch 	1 min bis 30 min	Energiebedarf E in Wh, Leistungsfaktor $\cos \varphi$
auf Ebene eines Einzelprozesses	hochdynamisch	10 ms bis 1 min	Energiebedarf E in Wh, Scheinleistung S in VAh, Leistungsfaktor $\cos \varphi$, Total Harmonic Distortion (THD)
	geringdynamisch	1 s bis 5 min	Energiebedarf E in Wh, Scheinleistung S in VAh, Leistungsfaktor $\cos \varphi$, Total Harmonic Distortion (THD)

Wirk-, Schein- und Blindleistung können in Abhängigkeit von φ in mathematische Relation zueinander gesetzt werden. Diese verhält sich analog zur klassischen Trigonometrie und ist bildhaft in Abbildung 2.8 dargestellt.

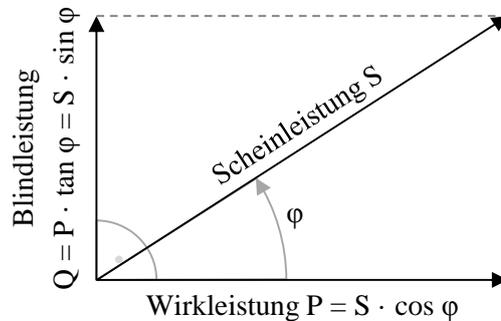


Abbildung 2.8: Zusammenhang von Wirk-, Blind- und Scheinleistung (in Anlehnung an [40])

2.4.4 Konzeptionelle Untersuchungen auf der Ebene einzelner Komponenten

Auf Ebene der Einzelkomponenten gibt es zahlreiche Forschungsarbeiten, welche sich mit der Analyse von Energiebedarfen von Werkzeugmaschinenkomponenten und deren Klassifizierung beschäftigen.

So schlagen Behrendt et al. [42] ein Standardvorgehen für die energetische Analyse von Werkzeugmaschinen mittels der Fertigung eines standardisierten Testwerkstücks vor. Durch das Vorgehen sollen einerseits Maschinenkomponenten und -zustände vergleichbar beschrieben sowie andererseits die Wirksamkeit von Verbesserungen der Betriebsstrategien und Komponentenoptimierungen beurteilt werden können.

Ebenfalls als Basis zur Bewertung von Betriebsstrategien, Energieeffizienzsteigerungen sowie Parameter- oder Komponentenoptimierungen propagieren Dietmair et al. [43] die Leistungsaufnahme von Maschinenkomponenten in Abhängigkeit des Fertigungsplans. Hierbei stützen sie sich auf vorher analysierte Betriebszustände der Komponenten und deren spezifische Energieverbrauchsprofile.

Dabei können nach Abele et al. [44] folgende Betriebszustände von Anlagen unterschieden werden, welche analog auch auf einzelne Komponenten übertragbar sind:

- *produktiv*: Die Produktionsanlage führt ein Bearbeitungsprogramm aus.
- *produktionsbereit*: Die Produktionsanlage ist betriebsbereit, d. h. eventuelle Warmlaufprogramme sind abgeschlossen, Hilfsantriebe sind aktiv und die Hauptantriebe befinden sich in Regelung.
- *Stand-by*: Der Hauptschalter der Produktionsanlage befindet sich auf „ein“ (z. B. unmittelbar nach dem Hochfahren der Anlage oder während Rüst- und Wartezeiten), evtl. ist der Not-Aus aktiv.
- *aus*: Der Hauptschalter der Produktionsanlage befindet sich auf „aus“.

Im Gegensatz zur Analyse der Energiebedarfe von WZM während des produzierenden Betriebs kann auch der stationäre Energiebedarf, die sog. Grundlast, im Zentrum der Betrachtungen stehen. Dazu wird die Leistungsaufnahme in mehrere Leistungsarten unterschieden. Die Leistungsarten in Abhängigkeit des Maschinenzustands können folgendermaßen unterteilt werden [45]:

- *stationäre Leistung*: Leistungsbedarf aller Maschinenkomponenten zur Aufrechterhaltung der Betriebsbereitschaft der WZM
- *Betriebsleistung*: Leistungsanteil zur Bewegung von Hauptkomponenten wie Spindeln und Achsen
- *Werkzeugleistung*: Leistungsanteil zur Realisierung des Spanabhubs am Werkstück
- *unproduktive Leistung*: Anteil der Gesamtleistung, welcher nicht genutzt werden kann (Verluste, z. B. durch Erzeugung von Wärme)

In Abhängigkeit ihres Anteils an der stationären Leistungsaufnahme können die einzelnen Komponenten klassifiziert und einander gegenübergestellt werden (siehe Abbildung 2.9). Dabei sind die Lüftung des Schaltschranks, die Beleuchtung des Arbeitsraums sowie die Bedieneinheit der Maschine unter dem Begriff der Hilfsaggregate zusammengefasst.

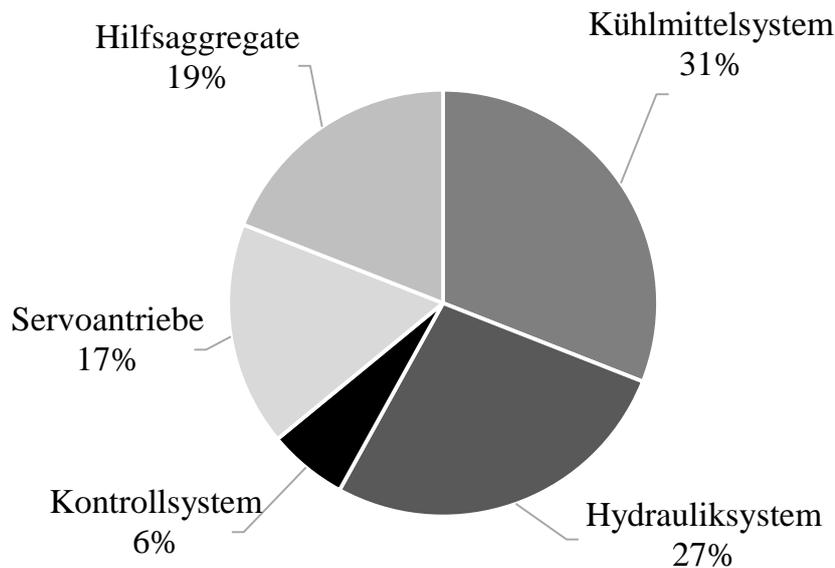


Abbildung 2.9: *Komponentenklassen in Abhängigkeit ihres Anteils am stationären Energiebedarf einer WZM [45]*

Eine weitere Möglichkeit der Komponentenklassifizierung besteht in der Berücksichtigung ihres jeweiligen energetischen Verhaltens [46]:

- *binär*: kein Energiebedarf im passiven, konstanter Energiebedarf im aktiven Zustand (z. B. Bedienpult, Beleuchtung)
- *diskret*: konstanter Energiebedarf je Betriebszustand (z. B. Kühlung, Kühlschmierstoff-Pumpe)
- *kontinuierlich*: zeitlich variabler Energiebedarf (z. B. Vorschubantriebe, Motorspindel)

2.4.5 Softwarearchitektur beschreibende Arbeiten auf der Ebene von Betrieben und Standorten

Auf Betriebs- und Standortebene stehen der Gesamtüberblick über den Energiebedarf und die damit verbundenen Kosten im Vordergrund. So präsentieren beispielsweise Zampou et al. [47] ein Konzept für ein Energieinformationssystem, welches von der Energiedatenerfassung über Monitoring- und Analysemodule bis hin zum Handel von CO₂-Zertifikaten alle energierelevanten Vorgänge abdecken soll. Insbesondere das Analysemodul stellt dabei Informationen bereit, welche die Informationsgrundlage für Maßnahmen zur Reduktion unproduktiver Maschinenzeiten sowie zur Minimierung der Gesamtproduktionszeit bieten.

Analog dazu widmen sich Eberspächer et al. [48] der Integration von Informationen aus unterschiedlichen Datenquellen, indem sie die „Factory Energy Information Description Language (F-EIDL)“ als Standardsprache vorschlagen. Ziel ist es, Informationen zentral und einheitlich bereit zu stellen, um z. B. Energiebedarfe als zusätzliche Entscheidungsvariable in die Produktionsplanung und -steuerung zu integrieren [49]. Zudem soll es ermöglicht werden, aktiv auf im Prozess vorhandenen Stellhebel zuzugreifen und so beispielsweise Ansätze der Energieflexibilität zu realisieren (s. Abschnitt 2.3.3). Die dafür notwendige IT-Infrastruktur fußt dabei auf einheitlichen Schnittstellen und Kommunikationsprotokollen.

2.4.6 Softwarearchitektur beschreibende Arbeiten auf der Ebene von Maschinen und Zuständen

Buschmann [50] befasst sich im Rahmen seiner Dissertation mit der Planung und dem Betrieb von Systemen zur Energiedatenerfassung. Der besondere Fokus liegt dabei auf der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes solcher Systeme. Zudem wurde untersucht, wie ein zu beplanendes System auch bei defizitärer Informationsgrundlage ökonomisch sinnvoll eingesetzt werden kann. Darüber hinaus betont Buschmann [50] die Relevanz der Überführung von unstrukturierten Energiedaten hin zu nachvollziehbaren und verständlichen Energieinformationen. Hierdurch wird es erst möglich, dass Mitarbeiter ohne Expertenwissen Analysen durchführen und Maßnahmen ableiten können. Auch Ansätze zur automatisierten Durchführung und Interpretation von Energiedatenanalysen bauen auf dieser Basis auf.

Wang et al. [51] und Chee et al. [52] analysieren auf ähnliche Art und Weise den Bearbeitungszustand einer WZM mittels hierfür neu entwickelter Algorithmen. Diese basieren auf dem Prinzip des *Non Intrusive Load Monitorings* (NILM), welches einzelne Verbraucher auf Grundlage von Stufensprüngen in den zeitlichen Verläufen des Leistungsbedarfs (auch Lastgänge oder Lastprofile genannt) identifiziert. Dieses Vorgehen soll insbesondere den häufig vorhandenen Mangel an notwendigen kontextuellen Informationen zu den Energiedaten selbst ausgleichen. Die vorgestellte Validierung stellt eine Trefferquote der Erkennung des aktuellen Bearbeitungszustands von 96 % fest. Auch Gebbe et. al. [53] untersuchen die Anwendbarkeit von NILM für Produktionsanlagen und deren Komponenten.

Vijayaraghavan und Dornfeld [54] stellen eine Softwarearchitektur als Grundlage für automatisierte Monitoring-Anwendungen vor. Die damit erzielbaren Ergebnisse setzen sie in Relation zu der jeweiligen Betrachtungsebene sowie zu dem betrachteten

Zeithorizont. Abbildung 2.10 zeigt die schrittweise Erhöhung der Analysegenauigkeit mit gleichzeitiger Verringerung des jeweils betrachteten Zeithorizonts.

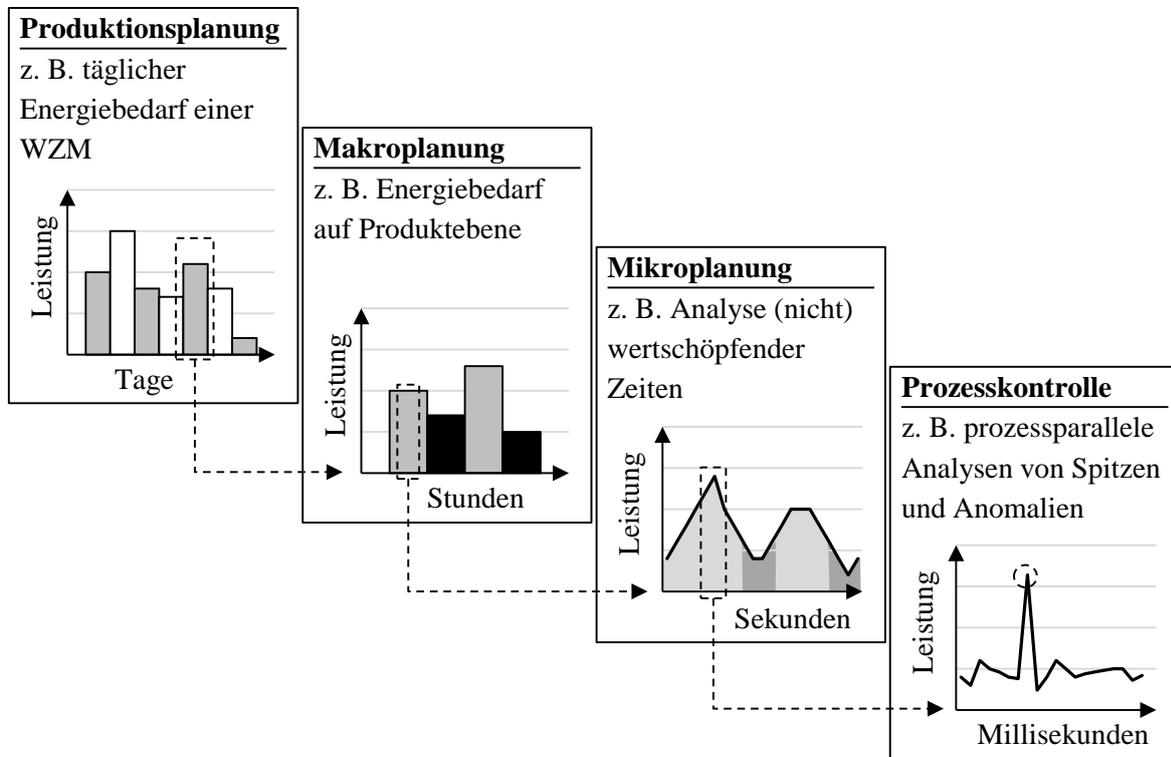


Abbildung 2.10: Energiedatenanalysen mit unterschiedlichem Zeithorizont (in Anlehnung an [17; 54])

Werden bei Analysen auf Ebene der Produktionsplanung Zeiträume von mehreren Tagen betrachtet, so verringert sich der relevante Zeithorizont auf Produktebene (Makroplanung) auf wenige Stunden. Die Mikroplanung geht dazu über, wertschöpfende und nicht wertschöpfende Prozesse zu analysieren und berücksichtigt einen Bereich von mehreren Sekunden, um die einzelnen Zustände unterscheiden zu können. Die detaillierteste der hier aufgeführten Ebenen von Energiedatenanalysen kann der Ebene der Prozesskontrolle zugeordnet werden. Dabei werden beispielsweise einzelne Lastspitzen erfasst und analysiert. Hierzu sind Betrachtungen und somit auch Daten mit Auflösungen im Bereich weniger Millisekunden notwendig [54].

Für die Umsetzung der angestrebten Energiedatenanalysen setzen die Autoren auf kontextuelle Informationen sowie auf *Complex Event Processing* (CEP). Diese regelbasierte Methodik dient der automatisierten Erkennung von erwartbaren und anomalen Ereignissen auf der Grundlage eines Abgleichs zwischen erkannten charakteristi-

schen Ereignissen im Lastgang und den zur Verfügung stehenden Zusatzinformationen. So kann beispielsweise die Drehzahl der Motorspindel einer WZM auftretenden Spitzen im Lastgang der Spindel gegenübergestellt werden. Ein weiteres Beispiel ist die Identifikation von stetig ansteigenden Energiebedarfen einzelner Zustände, die z. B. auf Verschleiß hinweisen können. Diese Analysebeispiele werden bei der beispielhaften Umsetzung einer automatisierten Energiedatenerfassung im Kapitel 5 aufgegriffen.

Eine weitere Möglichkeit zur Umsetzung einer automatischen Anomalieerkennung stellt der Einsatz von Methoden des maschinellen Lernens (englisch Machine Learning) dar, was z. B. in den Publikationen von Maier et al. [55], Kroll et al. [56] und Gilani et al. [57] Anwendung findet. Hierfür werden die vier Schritte *Erfassung des Energiebedarfs*, *Lernen des Normalverhaltens des betrachteten Systems*, *Anomalieerkennung* und *Visualisierung* sequenziell durchlaufen. Insbesondere der zweite Schritt (Lernen des Normalverhaltens) soll dabei mit so wenig Nutzerwissen und manueller Einrichtung wie möglich auskommen, um die Anwendbarkeit des Systems sicher zu stellen. In der Lernphase muss gewährleistet sein, dass sich die Maschine tatsächlich im Normalzustand befindet. In der Aktivphase des Systems wird der erwartete Energiebedarf auf Grundlage des erlernten Systemverhaltens simuliert und mit dem realen Energiebedarf der Maschine abgeglichen. Treten hierbei signifikante Abweichungen auf, so wird dies als Fehlerfall identifiziert. Für einfache Automatisierungssysteme zeigt diese Vorgehensweise eine Erkennungsrate von über 90 %. Ein zuverlässiger Einsatz für das stark variable Verhalten einer spanenden Werkzeugmaschine ist zum aktuellen Zeitpunkt jedoch sehr anspruchsvoll und aktuell noch nicht möglich.

2.4.7 Softwarearchitektur beschreibende Arbeiten auf der Ebene einzelner Komponenten

Eine detaillierte Analyse des energetischen Verhaltens von Produktionsanlagen auf Komponentenebene ist in der Regel mit hohen Kosten durch aufwendige Sensorik sowie Auswerte- und Monitoring-Software gekennzeichnet. Diese Kosten können mehr als 10 % der Systemkosten ausmachen [10] und stellen somit ein wesentliches Hemmnis für die Umsetzung von Energiedatenanalysen dar (s. Abschnitt 1.2). Gontarz et al. [10] adressieren diese Herausforderung mithilfe einer spezifischen Softwarearchitektur, welche kostengünstig zu implementieren ist. Dabei soll die Anzahl externer Sensoren minimiert werden, indem die Sensorsignale durch interne Steuerungsvariablen ersetzt werden. Dies ist insbesondere für die geregelten Haupt-

komponenten einer WZM mit sog. *variablem energetischen Verhalten* (z. B. Vorschubantriebe) möglich. *Geschaltet konstante Komponenten* (z. B. Pumpen) hingegen zeichnen sich in der Regel durch periodisches Verhalten aus, welches durch Steuerungssignale aktiviert wird. Um die Leistungsaufnahme dieser Komponenten auf Grundlage der Steuerungssignale annähern zu können, müssen sie zunächst einmalig energetisch vermessen werden. Dies wird meist manuell durchgeführt, womit ein initialer Personal- und Zeitaufwand einhergeht. Komponenten mit *konstantem energetischen Verhalten* (z. B. Beleuchtung, Bedieneinheit) behalten unabhängig vom Prozess ein konstantes Energiebedarfsniveau bei und können auf Grundlage ihrer vorher zu messenden durchschnittlichen Leistungsaufnahme in guter Näherung abgebildet werden. Auf diesen Ansatz der Reduzierung der erforderlichen externen Sensoren baut die beispielhafte Umsetzung in Kapitel 5 der vorliegenden Dissertation auf.

Verl et al. [58] setzen in ihrer Arbeit für einen energieflexiblen Betrieb von WZM (s. Abschnitt 2.3.3) auf lernfähige Modelle für das energetische Verhalten der betrachteten Maschine sowie der Einzelkomponenten. Die Modelle sollen fortlaufend produktionsparallel anhand realer Daten lernen und somit stetig verbessert werden. Die Messdaten werden hierbei analog zu Gontarz et al. [10] hinsichtlich des vorliegenden energetischen Verhaltens klassifiziert und wenn möglich aus der Maschinensteuerung ausgelesen. Verl et al. [58] bilden hiermit die Wissensgrundlage für den energieflexiblen Einsatz von WZM und kommunizieren diese an höhere Steuerungsinstanzen.

Den Ansatz des energieoptimierten Schaltens von Maschinenkomponenten durch die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) der Maschine verfolgen Abele et al. [59], um Ziele der Energieeffizienz sowie der Energieflexibilität zu erreichen. Analog zu Gontarz et al. [10] sowie Verl et al. [58] teilen die Autoren die Komponenten nach ihren spezifischen Eigenschaften in einzelne Klassen ein. Dabei orientieren sie sich im Wesentlichen an der IT-Infrastruktur und den entsprechend unterschiedlichen Möglichkeiten der Signalerfassung. Somit unterscheiden sie die Ebenen *Antriebe und Sensoren auf Feldebene*, *numerisch geregelte Systeme* und *allgemeine Maschinendaten*, die beispielsweise mithilfe eines *MES-Systems* erfasst werden können. In Abhängigkeit der jeweiligen Klasse werden interne Sensoren, Simulationen oder zusätzliche Sensoren eingesetzt, um die Lastprofile der Einzelaggregate zu erhalten. Abele et al. [59] stellen zwei Nutzungsszenarien mit einer Laufzeit von einem Jahr auf und prognostizieren auf dieser Grundlage ein Einsparpotenzial von 20 bis 35 % des Energiebedarfs, wenn Maschinen mithilfe der energieoptimierten Steuerung in unproduktiven Zeiten automatisiert abgeschaltet oder in einen energiesparenden Zustand versetzt werden können.

2.5 Zusammenfassung

Dieses Kapitel zeigt, dass sich in den Bereichen der Normen und Richtlinien, aber auch in der aktuellen Forschung auf allen Unternehmensebenen Arbeiten mit der Analyse und Optimierung des Energiebedarfs in der Produktion befassen.

Während internationale Normen hierbei vor allem einen übergeordneten Rahmen bieten, in welchen das Energiemanagement eingeordnet werden kann, geben beispielsweise Richtlinien und Messvorschriften nationaler Verbände konkrete Hinweise für Mess- und Analyseansätze.

Forschung und Industrie befassen sich mit unterschiedlichen Zielgrößen von Energiedatenanalysen wie der Steigerung der Energieeffizienz, der Bilanzierung von Energieströmen oder der aktiven Energiebedarfssteuerung (Energieflexibilität).

Die vorgestellten Forschungsarbeiten betrachten auf unterschiedlichen Unternehmensebenen wie auch Untersuchungstiefen den Energiebedarf von Unternehmen, Standorten, Produktionsbereichen sowie einzelnen Produktionsanlagen und Komponenten. Dabei gibt es bereits einige Ansätze der Dokumentation der notwendigen Datengrundlage, um diese für Anwender und aufbauende Forschungsaktivitäten zur Verfügung zu stellen. Die angegebenen Anforderungen an die Datenarten wie auch die anzustrebenden Messauflösungen unterliegen aktuell jedoch noch einigen Einschränkungen. Hierzu zählen u. a. die sehr großen Intervalle an angegebenen Messfrequenzen. Dies verhindert derzeit oft eine spezifische Auswahl der einzusetzenden Mess- und Systemtechnik und fordert eine spezifische Definition der richtigen Messfrequenz durch den Nutzer. Dafür fehlt es jedoch an einem methodischen Vorgehen mit dem Zweck, die notwendige Datengrundlage bereits vor der ersten Durchführung einer geplanten Energiedatenanalyse festzulegen. Dieses Defizit wird durch das Zur-Verfügung-Stellen einer *Methode zur systematischen Energiedatenerfassung in der Produktion* im Rahmen der vorliegenden Dissertation adressiert.

3 Status quo, Handlungsbedarf und Betrachtungsraum

3.1 Kapitelüberblick

Aufbauend auf den Grundlagen und dem Stand der Forschung zeigt das vorliegende Kapitel den aktuellen Status quo auf. Hierbei wird insbesondere darauf eingegangen, welche Hemmnisse aktuell in der industriellen Praxis gegenüber der Durchführung von Energiedatenanalysen bestehen (s. Abschnitt 3.2). Der Fokus liegt dabei in der Betrachtung von KMUs. Die für sie bestehenden Hemmnisse und Herausforderungen wurden hierbei im Rahmen mehrerer Energiedatenanalysen in Unternehmen unterschiedlicher Größe und Branchen erarbeitet. Aus den identifizierten Hemmnissen lässt sich im Abschnitt 3.3 der Handlungsbedarf ableiten, welcher durch die vorliegende Arbeit adressiert wird. Die Definition und Gegenüberstellung der Produktionsebenen und der elektrotechnischen Ebenen legen zudem den Grundstein für die Definition des Betrachtungsraums der vorliegenden Dissertation (s. Abschnitt 3.4).

3.2 Hemmnisse und Herausforderungen beim Einsatz von Energiedatenanalysen

Aktuell stehen der Durchführung von Energiedatenanalysen in der Industrie große Hemmnisse entgegen. Für die Durchführung von anspruchsvollen Analysen ist die zeitgleiche Aufzeichnung von Energie- und Produktionsdaten in jeweils hoher Qualität erforderlich. Um die Zusatzinformationen gezielt für die Auswertungen nutzen zu können, sollten diese mit derselben Genauigkeit erfasst werden wie die Energiedaten selbst.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden zahlreiche Energiebedarfsmessungen an Produktionsanlagen von Unternehmen unterschiedlicher Branchen und Größe durchgeführt. Hierbei wurde bewusst keine Neuinstallation getätigt, sondern zunächst der nach dem aktuellen Stand der Technik umsetzbare Stand erfasst. So wurden bestehende Einschränkungen durch die zur Verfügung stehende messtechnische Ausstattung in den jeweiligen Unternehmen deutlich. Hieraus können die bestehenden Hemmnisse und Defizite auf dem Weg zu systematischen und effizienten Energiedatenanalysen aufgezeigt werden.

Abbildung 3.1 zeigt die über je 15 min gemittelte Leistungsaufnahme einer Spritzgießanlage (auf Grundlage von Messungen mit einem mobilen Leistungsmessgerät; Messfrequenz = 1 Hz), die eine durchschnittliche Leistungsaufnahme von 17,7 kW

über alle erfassten Betriebszustände hinweg und Leistungsaufnahmen zwischen 30 und 37 kW im Produktivbetrieb aufweist. Die Anlage wird in klassischer Werkstattfertigung betrieben und manuell gerüstet. Die Maschinen- und Betriebsdaten der Spritzgießanlage werden nicht automatisiert erfasst, sodass ihre Erhebung durch ein vom Maschinenbediener manuell zu führendes Messprotokoll erfolgen musste. Die Zeitpunkte der dokumentierten Ereignisse im Produktionsablauf (z. B. Start eines Programms oder eines Rüstvorgangs) sind im Lastgang in Abbildung 3.1 verzeichnet.

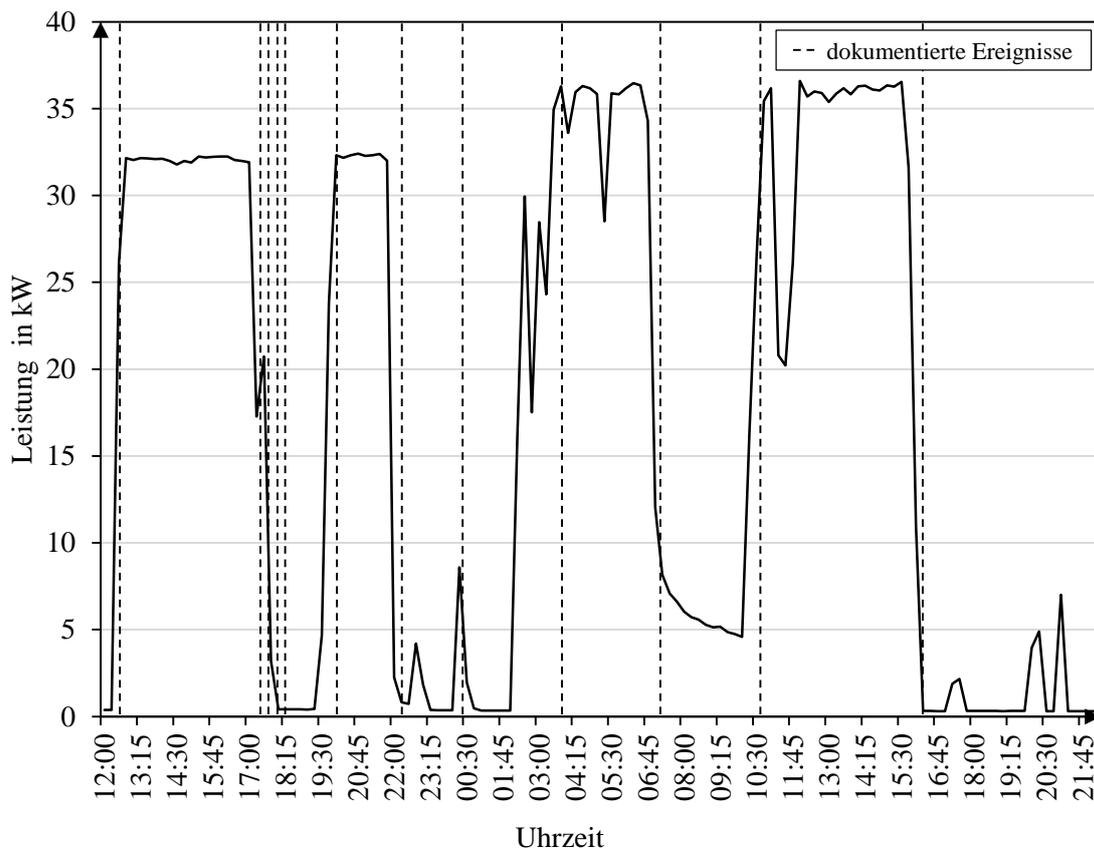


Abbildung 3.1: Leistungsaufnahme einer Kunststoffspritzgießanlage inkl. der Zeitpunkte der manuell dokumentierten Ereignisse im Produktionsablauf (in Anlehnung an [60])

Eine detaillierte und im besten Fall automatisierte Auswertung der erfassten Energie- und Produktionsdaten ist auf Basis dieser Datengrundlage nicht möglich. Die Zeitangaben im Messprotokoll sind auf 5 min, häufig sogar auf 15 min gerundet. Eine automatisierte Zuordnung des Produktionsablaufs zu einzelnen Ereignissen in den Energiedaten ist somit nicht realisierbar. Auch bei manueller Auswertung fällt auf, dass zahlreiche Ereignisse im Lastgang zu erkennen sind, welche jedoch nicht durch ein

dokumentiertes Ereignis erklärbar sind (z. B. Einbrüche der Leistungsaufnahme während des Produktionsbetriebs um ca. 05:30 Uhr und um ca. 11:00 Uhr in Abbildung 3.1). Da die vorgestellte Spritzgießanlage in einer für KMUs klassischen Werkstattfertigung eingesetzt wird, spiegelt diese Auswertung charakteristische Probleme bei der Durchführung von Energiedatenanalysen bei KMUs wider.

Als zweites Beispiel wurde ein automatisiert verkettetes Produktionssystem einer Molkerei vermessen, um die Potenziale und die bestehenden Einschränkungen einer automatisierten Betriebsdatenerfassung (BDE) aufzudecken. Tabelle 3.1 gibt hierzu einen Überblick über die enthaltenen und über ein Förderband automatisiert verketteten Einzelanlagen, deren durchschnittliche Leistungsaufnahme P_{\emptyset} sowie den prozentualen Anteil an der Gesamtleistungsaufnahme des Produktionssystems P_{rel} . Der Behältertransport ist hierbei eine übergreifende Logistikanlage zur Verkettung der Einzelanlagen.

Die betrachteten Anlagen wurden energetisch mithilfe von mobilen Leistungsmessgeräten und mit einer Messfrequenz von 1 Hz vermessen. Das Produktionssystem meldet zudem seinen aktuellen Betriebszustand, die Bezeichnung des sich aktuell in Produktion befindenden Produktes sowie Störungen mit mehr als drei Minuten Dauer an das zentrale BDE-System. Die Störungen werden automatisiert durch Überwachung des Produktstromes am Auslauf der letzten Maschine in Materialflussrichtung erfasst. Bei der Erfassung eines fehlenden Produktstroms während des Betriebszustands „produktiv“ wird eine Störung identifiziert und dokumentiert. Die gering erscheinende Genauigkeit der Erfassung von Störungen ab einer Dauer von drei Minuten ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Daten aktuell lediglich zur Alarmierung der Maschinenbediener sowie zur Berechnung und Verbesserung der Gesamtanlageneffektivität (engl. Overall Equipment Effectiveness, OEE) genutzt werden. Zudem sind Standard-MES-(engl. Manufacturing Execution System) und PPS-(Produktionsplanung und -steuerung) Systeme heute nicht in der Lage, höher aufgelöste Daten zu verarbeiten.

Tabelle 3.1: Überblick über die Einzelanlagen eines verketteten Produktionssystems der betrachteten Molkerei sowie deren Leistungsaufnahme

Nr.	Anlagenbezeichnung	P_Ø in kW	P_{rel} in %*
1	Sterilisator	8,0	7,1
2	Gebindetransport	7,0	6,2
3	Behältertransport (übergreifende Verkettung)	6,1	5,4
4	Blasmaschine	52,7	46,6
5	Lufttransport	5,5	4,9
6	Füller	4,4	3,9
7	Etikettiermaschine	3,7	3,3
8	Verpackungsanlage	3,3	2,9
9	Ultrahocherhitzung (UHT)	2,7	2,4
10	Kappensterilisation	2,2	1,9
11	Isolator	11,1	9,8
12	Stauturm nach Füller	1,9	1,7
13	Belader (Palettierer)	1,5	1,3
14	Flaschenvorwärmer	1,3	1,1
15	Stauturm nach Etikettiermaschine	1,2	1,1
16	Verschlussförderer	0,5	0,4
	Gesamtsumme	113,1	100,0

*Summe kann wegen Rundungen von 100 % abweichen

Die Genauigkeitssteigerung in der Erfassung der Produktionsereignisse im Vergleich zur manuellen Erfassung bei der Spritzgießanlage ist trotzdem erheblich, wie in Abbildung 3.2 zu sehen. Dabei unterscheidet die Darstellung zwischen dokumentierten Ereignissen und Störungen. Ereignisse sind geplante Änderungen im Produktionsablauf, wie beispielsweise die Änderung des Betriebszustands oder der Start- und Endzeitpunkt spezifischer Produktionsprozesse. Störungen dagegen sind unerwartete Ausfälle innerhalb des Produktionssystems. Einzelne Auffälligkeiten im Lastgang,

wie z. B. der plötzliche Anstieg um 01:23 Uhr, lassen sich jedoch trotz automatisierter Erfassung nicht durch die vorhandenen Produktionsdaten erklären. Auch ist eine detaillierte Auswertung einzelner Anlagen oder Komponenten innerhalb des verketteten Systems nicht möglich, da der Produktionsablauf nur zentral für das Gesamtsystem erfasst wird. Eine Betriebsdatenerfassung der Einzelanlagen oder gar einzelner Komponenten erfolgt in diesem Fallbeispiel nicht.

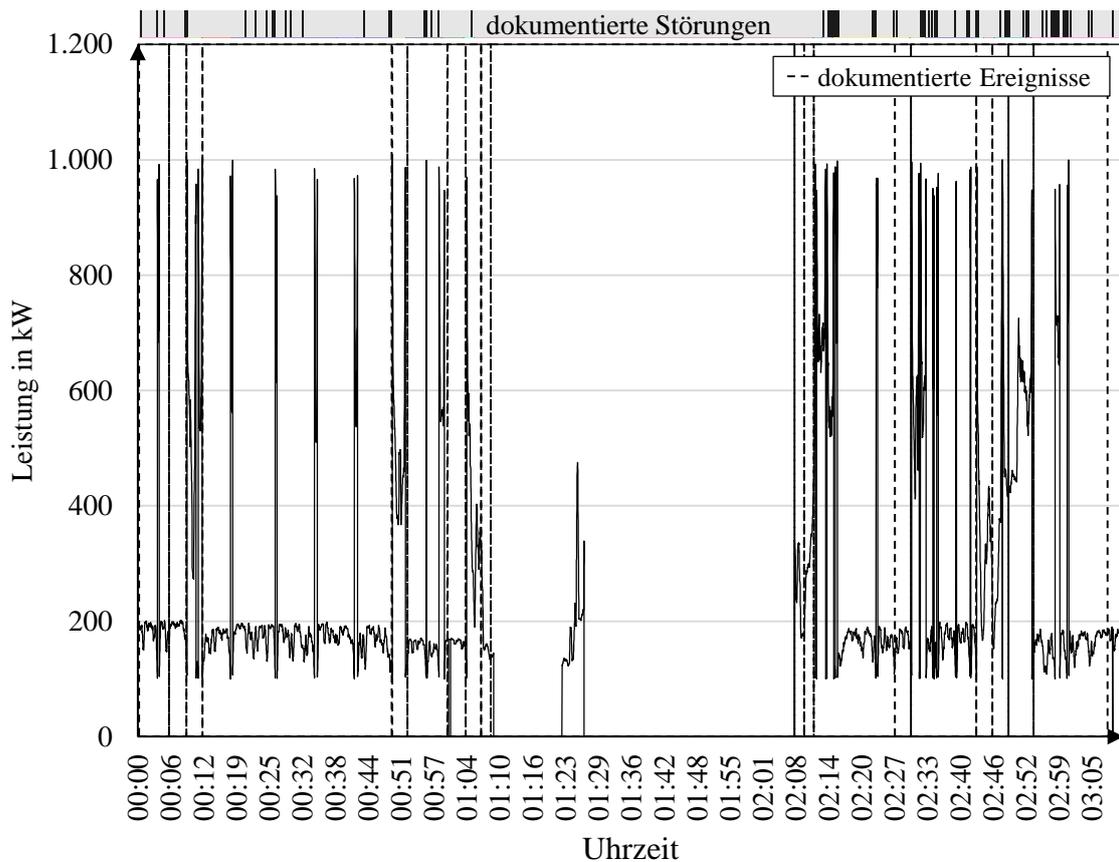


Abbildung 3.2: Leistungsaufnahme einer verketteten Anlage einer Molkerei inkl. automatisiert erfasster Ereignisse und Störungen im Produktionsablauf

3.3 Handlungsbedarf

Die beiden Beispiele aus Abschnitt 3.2 zeigen, dass eine automatisierte und zeitlich hoch aufgelöste Erfassung der Produktions- und Maschinendaten notwendig ist, um detaillierte Energiedatenanalysen in der Produktion zu ermöglichen. Dabei sollten die erfassten Daten möglichst spezifisch für die betrachteten Maschinen und Aggregate erfasst und in einer vergleichbaren Genauigkeit zur Energiedatenerfassung aufgezeichnet werden. Insbesondere die Analysen von Auffälligkeiten im Lastgang und deren Ursachen sowie produkt-, system- oder produktionsspezifische Auswertungen sind nur unter diesen Umständen denkbar.

Aus diesem Grund verfolgt die vorliegende Dissertation das Ziel einer *Methode zur systematischen Energiedatenerfassung in der Produktion*. Wie bereits bei den Teilzielen im Abschnitt 1.2 erläutert, liegt ein besonderes Augenmerk auf der individuellen Auswahl der notwendigen Datenarten sowie deren Genauigkeit. Hierbei muss der Zielkonflikt adressiert werden, der sich zwischen der Genauigkeit der Messungen und der Wirtschaftlichkeit aufspannt (bildhaft dargestellt in Abbildung 3.3).

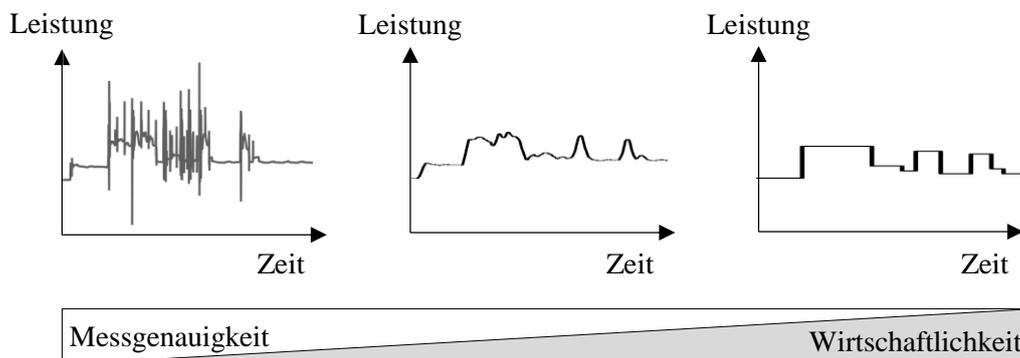


Abbildung 3.3: Zielkonflikt zwischen Messgenauigkeit und Wirtschaftlichkeit

Die Erfassung von Energie- und Produktionsdaten mit hoher Messfrequenz ermöglicht einerseits detaillierte Analysen, andererseits sind hierfür hohe Investitionen für entsprechend leistungsfähige Sensorik sowie große Speicherkapazitäten für die anfallende Datenmenge notwendig. Aus diesem Grund sollten alle für die individuell angestrebte Energiedatenanalyse notwendigen Datenarten *so genau wie nötig und so ungenau wie möglich* erfasst werden. Bei der effizienten Identifikation dieser Grenze soll die in dieser Arbeit zu entwickelnde Methode helfen.

3.4 Definition des Betrachtungsraums

Im bisherigen Verlauf dieses Kapitels wurde dargelegt, dass eine Zuordnung von Produktions- und Maschinendaten zu den jeweils betrachteten Maschinen und Aggregaten sowie den zugehörigen Leistungsmessungen möglich sein muss. Um diese zu erreichen, stellt sich zunächst die Frage nach den technischen und infrastrukturellen Rahmenbedingungen. Hierfür werden im Folgenden die *Produktionsebenen* eines Unternehmens sowie die vorliegenden *elektrotechnischen Ebenen* vorgestellt, welche insbesondere die gängige elektrotechnische Installation widerspiegeln. Im Anschluss werden die Produktionsebenen den elektrotechnischen Ebenen gegenübergestellt, um auf Grundlage der zentralen Anforderung der *Zuordenbarkeit der Energiedaten zur Produktion* den Betrachtungsraum der Arbeit festzulegen.

3.4.1 Definition der Produktionsebenen

In der Literatur werden produzierende Unternehmen häufig in mehrere *Produktionsebenen* unterteilt. Die im Folgenden angestrebte Gegenüberstellung von Produktion und elektrotechnischer Infrastruktur beschränkt sich dabei auf einen Unternehmensstandort. Die betrachteten Produktionsebenen beginnen somit auf der höchsten Ebene *Standort* und detaillieren sich bis hinunter zu einzelnen *Aggregaten* (in Anlehnung an [61] auf Basis von [62; 63]):

- *Standort*: höchste hier betrachtete Produktionsebene als kompletter Standort inklusive aller zugehörigen Gebäude
- *Halle*: komplettes Produktionsgebäude inklusive der Infrastruktureinrichtungen, wie z. B. die technische Gebäudeausrüstung (TGA), die Betriebsmittelbereitstellung sowie die zugehörigen Büroeinrichtungen
- *Produktionsbereich*: Einheit mehrerer Fertigungszellen inkl. notwendiger Logistiksysteme, meist eingeteilt nach erzeugtem Produkt oder nach eingesetzter Fertigungstechnologie
- *Fertigungszelle*: Einheit mehrerer Einzelmaschinen, welche meist mehrere Operationen an einem Bauteil oder einer Baugruppe vornehmen und mit Zwischenpuffern ausgestattet sein können. Eine Abwandlung einer Fertigungszelle ist die Fertigungslinie.
- *Maschine*: Einzelmaschine zur Durchführung definierter wertschöpfender Produktionsprozesse, z. B. ein Bearbeitungszentrum
- *Aggregat*: Einzelkomponente einer Maschine, unterteilt in Haupt- (unmittelbarer Einfluss auf den Prozess) und Nebenaggregate (mittelbarer Einfluss auf den Prozess)

Abbildung 3.4 zeigt die Produktionsebenen sowie je Ebene ein beispielhaftes Ziel, das mit einer Energiedatenanalyse auf dieser Ebene angestrebt werden könnte.

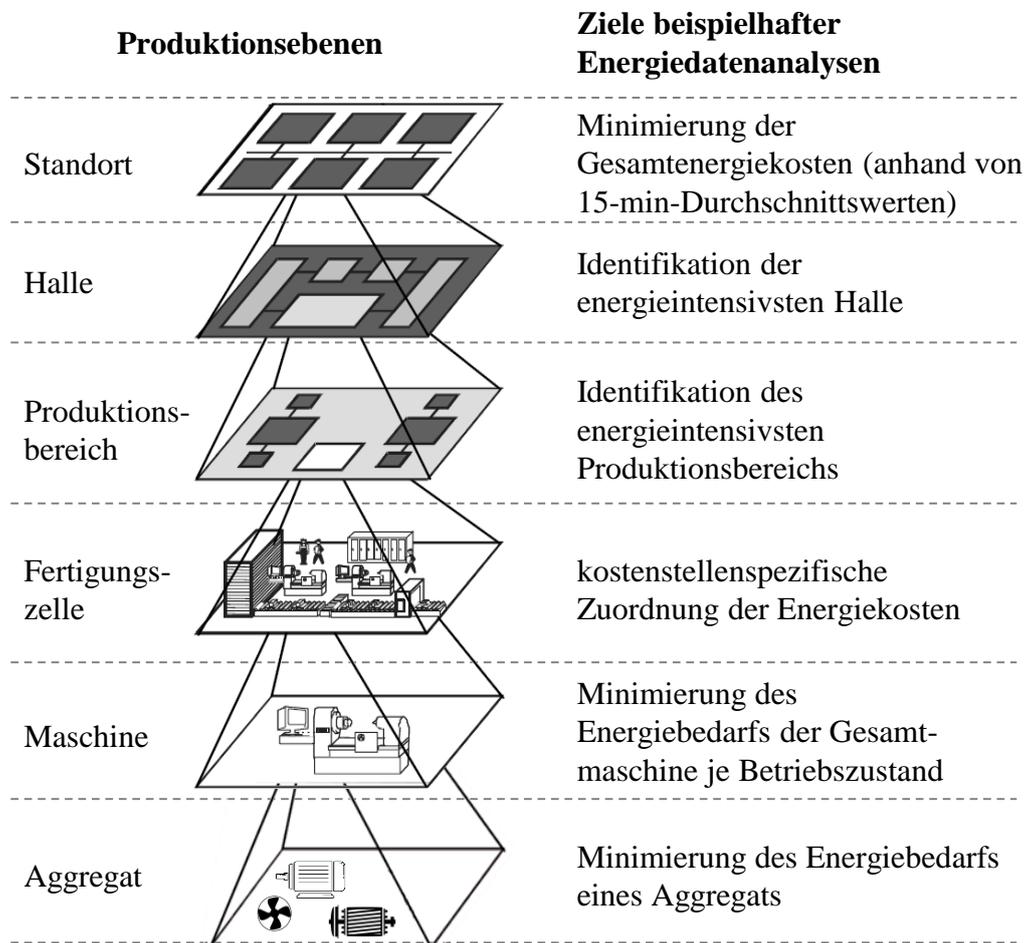


Abbildung 3.4: Produktionsebenen (in Anlehnung an [61]) sowie Ziele einer beispielhaften Energiedatenanalyse je Ebene (in Anlehnung an [64])

3.4.2 Definition der elektrotechnischen Ebenen

Auf Seiten der elektrotechnischen Ebenen existieren keine etablierten Einteilungen, welche hier aufgegriffen werden könnten. Die Betrachtung fokussiert sich ebenfalls auf einen Unternehmensstandort, welcher den erforderlichen elektrischen Strom zentral von einem Energieversorger erhält. Es werden folgende Ebenen definiert:

- *Hauptanschluss*: Punkt der zentralen Entnahme von elektrischer Leistung aus dem Versorgungsnetz sowie der Verbrauchsmessung (Messfrequenz = 1 Hz) der entnommenen Leistung über die Zeit durch den Energieversorger zur Ermittlung der entstehenden Kosten

- *Transformator (Trafostation, Umspannstation)*: System zur Umwandlung von der vorliegenden Mittelspannung des Verteilungsnetzes (mind. 10.000 V) in Niederspannung (400 V)
- *Versorgungsstationen (Verteiler)*: System zur Verteilung der Versorgungsleitungen auf einzelne sog. Stromschienen, welche durch die Hallen verlaufen und der direkten Versorgung von Anlagen, TGA usw. dienen

Abbildung 3.5 zeigt die elektrotechnischen Ebenen innerhalb eines Standorts im Überblick.

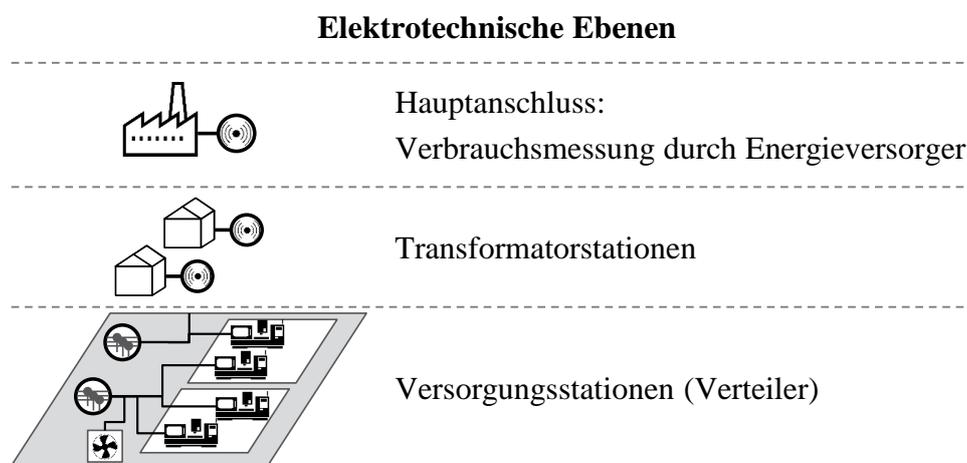


Abbildung 3.5: Elektrotechnische Ebenen innerhalb eines Unternehmensstandorts

3.4.3 Gegenüberstellung von Produktionsebenen und elektrotechnischen Ebenen

Die Gegenüberstellung der jeweiligen Anzahl an Ebenen spiegelt bereits wider, dass sich die Produktions- und die elektrotechnischen Ebenen nicht decken: Während sich innerhalb eines Standorts sechs Produktionsebenen definieren lassen, bestehen für denselben Betrachtungsraum lediglich drei elektrotechnische Ebenen.

Abbildung 3.6 stellt daher jeder Produktionsebene die entsprechende elektrotechnische Ebene gegenüber, sofern dies möglich ist: Dem *Standort* kann hierbei eindeutig der *elektrische Hauptanschluss*, häufig auch *Netzübergabepunkt* genannt, zugeordnet werden. Einer *Halle* entspricht meist die Ebene der *Transformatorstationen*. Innerhalb einer *Halle* existieren auf elektrotechnischer Seite nur noch *Versorgungsstationen*, welche übergreifend Produktionsbereiche, Fertigungszellen, TGA, angeschlossene Büro- und Sozialräume usw. versorgen. Die elektrischen Anschlüsse werden

dabei meist nach erwarteter Auslastung der einzelnen Stromschienen und nicht nach zugehörigem Produktionsbereich installiert. Zähler an den *Versorgungsstationen* sind daher nicht eindeutig einem *Produktionsbereich* oder gar detaillierteren Produktionsebenen zuordenbar. Auch existieren keine Messpunkte, an welchen eine *Fertigungszelle* oder ein *Produktionsbereich* gemessen werden könnte, ohne die komplette *Versorgungsstation* zu betrachten. Eine energetische Vermessung dieser Bereiche ist nur durch die Aufnahme der einzelnen Produktionsanlagen (Ebene *Maschine*) mit anschließender Aggregation der Daten auf höhere Produktionsebenen realisierbar. Die eindeutige Zuordenbarkeit der Energiedaten zur Produktion ist folglich nur auf den Ebenen *Maschine* und *Aggregat* umsetzbar, welche jedoch keine äquivalente elektrotechnische Ebene besitzen. Eine Nutzung der vorhandenen elektrotechnischen Installation als Informationsquelle für produktionsbezogene Energiedatenanalysen ist somit nach derzeitigem Stand der Technik nicht möglich.

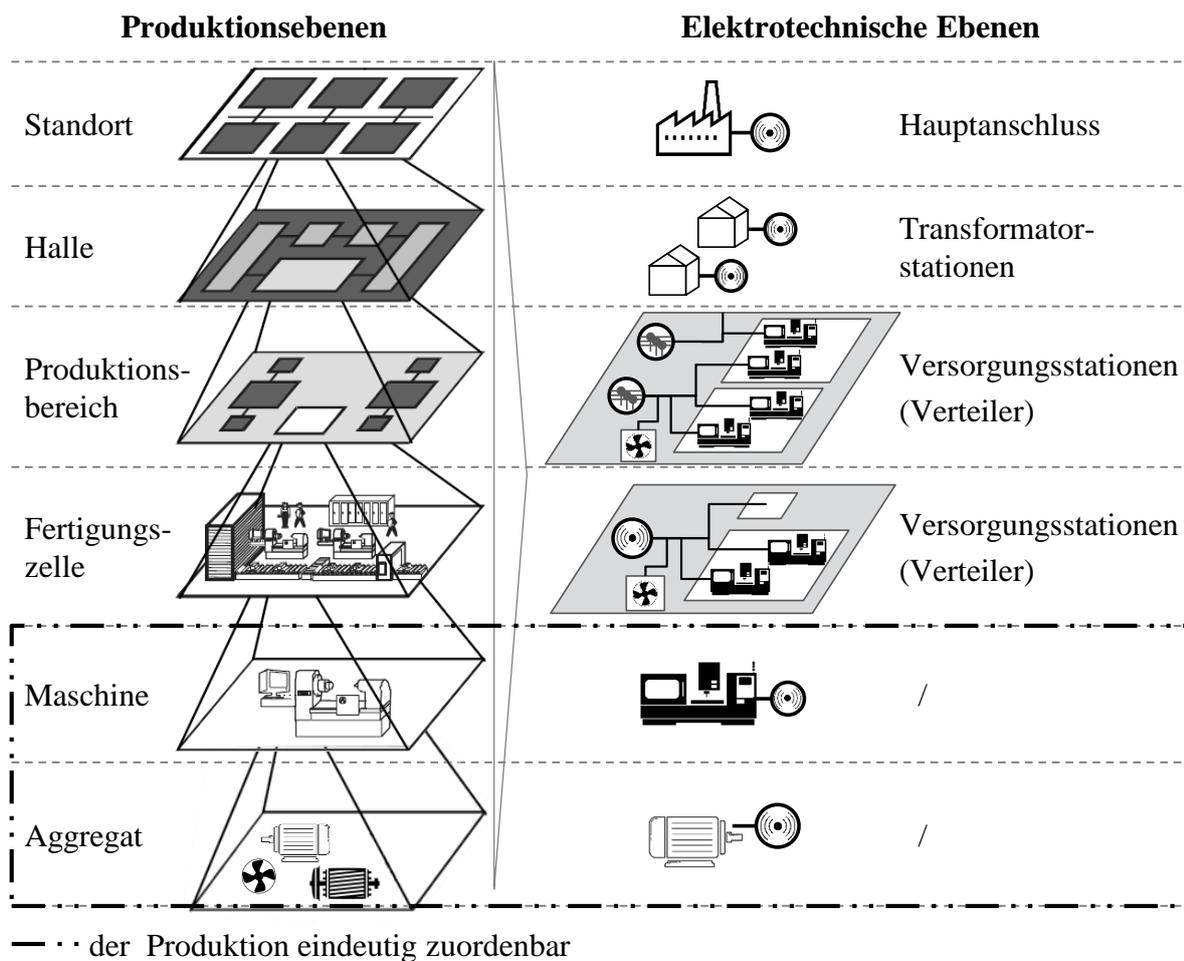


Abbildung 3.6: Gegenüberstellung der Produktionsebenen (in Anlehnung an [61]) und der elektrotechnischen Ebenen

3.4.4 Definition des Betrachtungsraums

Aus der Gegenüberstellung von Produktions- und elektrotechnischen Ebenen im vorangehenden Abschnitt wurde die Erkenntnis abgeleitet, dass die bestehende elektrotechnische Infrastruktur nicht ausreicht, um den Energiebedarf der unterschiedlichen Produktionsebenen zu erfassen. Eine eindeutige Zuordnung der erfassten Energiedaten zur Produktion ist somit insbesondere auf den detaillierten Produktionsebenen *Maschine* und *Aggregat* nur durch spezifische Energiemessungen realisierbar. Eine Nutzung der bestehenden elektrotechnischen Infrastruktur zur Erreichung der Zielsetzung dieser Arbeit ist somit nicht möglich. Im Abschnitt 3.3 wurde dargelegt, dass eine möglichst automatisierte Erfassung von Produktions- und Maschinendaten ergänzend zur Energiedatenerfassung notwendig ist, um produktionsspezifische Auswertungen zu erreichen. Eine Betrachtung von höheren Produktionsebenen ist somit nur durch Aggregation von mindestens auf Maschinenebene erfassten Daten möglich. Aus diesem Grund beschränkt sich der Betrachtungsraum der vorliegenden Dissertation auf die *der Produktion zuordenbaren Energiedatenanalysen* und somit die Produktionsebenen *Maschine* und *Aggregat* (siehe auch Abbildung 3.6).

Ergänzend zu diesen beiden Produktionsebenen soll innerhalb des Betrachtungsraums eine weitere Sichtweise auf die Maschinen- sowie die Aggregatsebene eingeführt werden: Die sog. *Zustandsebene* (s. Abbildung 3.7), welche sich auf Maschinen- und Aggregatsebene anwenden lässt.

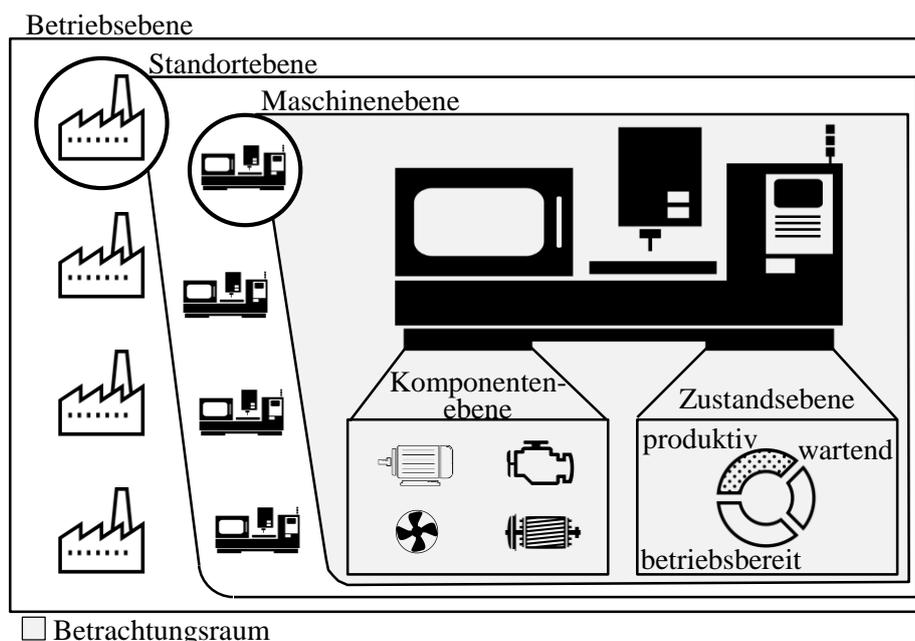


Abbildung 3.7: Alternative Betrachtung der Produktionsebenen unter Einbeziehung der Zustandsebene (in Anlehnung an [17])

Hierbei beziehen sich die Auswertungen der Energiedatenanalysen auf den Betriebszustand der Maschine oder einzelner Aggregate. Da diese Herangehensweise sehr gängig ist, wird die Zustandsebene explizit als zusätzliche Betrachtungsebene aufgenommen.

3.5 Zusammenfassung

Wie im Abschnitt 3.2 dargelegt, existieren in der Industrie aktuell noch zahlreiche Hemmnisse, welche insbesondere KMUs daran hindern, Energiedatenanalysen durchzuführen. Dies liegt einerseits an fehlenden technischen Systemen, welche dazu geeignet sind, Energie-, Betriebs- und Maschinendaten zeitsynchron aufzuzeichnen. Andererseits ist den Unternehmen häufig nicht bekannt, welche Daten für ihre individuellen Analyseziele wirklich notwendig sind. Insbesondere, weil in vielen Unternehmen noch keine Messtechnik vorhanden ist, hat die Entscheidung für die erforderlichen Datenarten und Messfrequenzen einen unmittelbaren Einfluss auf den Umfang der zu tätigen Investitionen.

Damit sich die Hemmnisse der hohen Personal- und Zeitaufwände sowie der fehlenden Systemtechnik reduzieren lassen, ist eine systematische Vorgehensweise zur Spezifikation der Anforderungen an die Energiedatenerfassung in der Produktion notwendig. Diese kann Investitionen im Vorfeld spezifizieren und begründen, was zu mehr Sicherheit bei der Einführung von energiebezogenen Analysen und Maßnahmen führt. Dies gilt insbesondere für KMUs, welche meist wenige oder keine übergreifenden Experten im Bereich der Schnittmenge von *Energiebedarf* und *Produktion* zur Verfügung haben. Diese wären jedoch erforderlich, um die notwendigen Entscheidungen auf der Grundlage von Erfahrung und Expertenwissen treffen zu können.

Die Gegenüberstellung der Produktionsebenen mit den elektrotechnischen Ebenen hat zudem ergeben, dass sich Energiedaten nur auf den Ebenen einzelner *Maschinen* und *Aggregate* direkt der Produktion zuordnen lassen. Daher konzentriert sich die im Folgenden vorgestellte *Methode zur systematischen Energiedatenerfassung in der Produktion* ausschließlich auf diesen Betrachtungsbereich.

4 Methode zur systematischen Energiedatenerfassung in der Produktion

4.1 Kapitelüberblick

Das vorliegende Kapitel beschreibt die einzelnen Schritte der *Methode zur systematischen Energiedatenerfassung in der Produktion*, welche den Kern der vorliegenden Arbeit bildet. Dabei ist die Methode im Sinne eines Handlungsleitfadens zu verstehen. In Abschnitt 4.2 werden allgemeine Anforderungen an die zu entwickelnde Methode formuliert, der darauffolgende Abschnitt 4.3 gibt eine Übersicht über die Einzelschritte der Methode, welche in den Abschnitten 4.4 bis 4.7 detailliert entwickelt und vorgestellt werden.

4.2 Anforderungen

Im Folgenden werden die Anforderungen an die Energiedatenerfassung formuliert, welche sich aus den aktuellen Hemmnissen zur Durchführung von Energiedatenanalysen (s. Abschnitte 1.2 und 2.5) sowie der möglichst allgemeinen Einsetzbarkeit der Methode ergeben:

- *Praxistauglichkeit für KMUs*: Um die aktuell bestehenden Hemmnisse gegenüber der Durchführung von Energiedatenanalysen, welche insbesondere KMUs betreffen, zu adressieren, muss eine einfache Nutzbarkeit der Methode ohne spezifisches Fachwissen sichergestellt werden. Allgemeines technisches Grundverständnis wird vorausgesetzt.
- *Betrachtung der industriell relevanten Energiedatenanalysen*: Die zu entwickelnde Methode soll innerhalb des definierten Betrachtungsraums auf einen möglichst großen Kreis industriell relevanter Energiedatenanalysen anwendbar sein. Hierzu ist vorgelagert zu identifizieren, welche Analysen aktuell Relevanz besitzen.
- *Quantitative Einordnung der benötigten Messfrequenzen*: Das Ziel und der Zweck der Methode ist die Definition von Datenarten sowie der notwendigen Messfrequenzen in Abhängigkeit des jeweils angestrebten Analyseziels. Aussagen hierzu sollten quantifiziert vorliegen, um eine direkte Anwendung zu unterstützen.

- *Übertragbarkeit:* Um eine möglichst breite Anwendbarkeit der Methode sicherzustellen, muss diese auf unterschiedliche Produktionsanlagen übertragbar sein. Der Fokus liegt hierbei auf typischen Produktionsanlagen, welche bei KMUs im Maschinenbau zum Einsatz kommen (z. B. spanende WZM).
- *Wirtschaftlichkeit:* Ein zentrales Ziel aller Unternehmen ist die Wirtschaftlichkeit. Dabei ist nicht nur die Methode selbst von Interesse. Vielmehr werden durch die Senkung der Hemmnisse gegenüber der Durchführung von Energiedatenanalysen neue wirtschaftliche Potenziale erschlossen, welche andernfalls insbesondere für KMUs nicht zugänglich wären.

4.3 Übersicht über die Methode

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgeschlagene *Methode zur systematischen Energiedatenerfassung in der Produktion* besteht aus vier wesentlichen Schritten, welche in Abbildung 4.1 dargestellt sind und in den nachfolgenden Abschnitten detailliert erläutert werden:

1. Auswahl der angestrebten Analyse (Abschnitt 4.4)
2. Definition der notwendigen Datenarten (Abschnitt 4.5)
3. Definition der notwendigen Messfrequenzen (Abschnitt 4.6)
4. Ansätze zur Reduzierung des Bedarfs an Zusatzsensorik (Abschnitt 4.7)

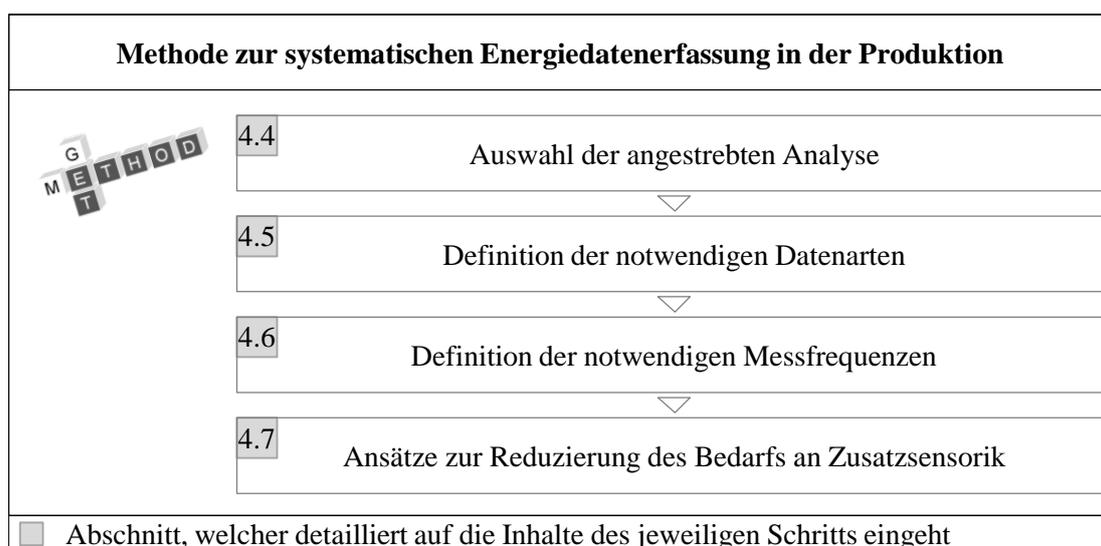


Abbildung 4.1: Wesentliche Schritte der Methode zur systematischen Energiedatenerfassung in der Produktion

Zunächst werden auf Grundlage von zahlreichen Expertengesprächen sowie einer umfangreichen Literaturrecherche die relevanten Energiedatenanalysen in Abhängigkeit der jeweiligen Betrachtungsebene identifiziert. Insbesondere auf diesen Analysen bauen die nächsten Schritte der Methode auf.

Der zweite Schritt leitet für die identifizierten Analysen die jeweils für deren Durchführung notwendigen Datenarten ab. Hierzu gehören neben den Energiedaten insbesondere Maschinen- und Produktionsdaten. Diese Auswahl erfolgt ebenfalls auf Grundlage zahlreicher Expertengespräche sowie der Erkenntnisse aus der praktischen Durchführung umfangreicher Fallstudien in der Industrie.

Aufbauend darauf leitet der dritte Schritt die notwendigen Messfrequenzen bezogen auf die jeweilige Analyse unter Berücksichtigung des energetischen Verhaltens der betrachteten Anlage oder Komponente ab. Bei der finalen Auswahl eines Frequenzbereichs (im Sinne eines Frequenzintervalls) zum Abschluss dieses Schrittes wird insbesondere auch die aktuell zur Verfügung stehende Messtechnik einbezogen. Eine Zuordnung der im ersten Schritt definierten Analysen und der im zweiten Schritt definierten notwendigen Datenarten zu den jeweils benötigten Messfrequenzen schließt diesen Baustein ab.

Der vierte und letzte Schritt der Gesamtmethode baut auf der festgelegten Datengrundlage für die jeweilige Analyse auf und beschäftigt sich mit der für die Durchführung notwendigen Messtechnik. Hierbei liegt ein besonderes Augenmerk auf der Reduzierung des Bedarfs an Zusatzsensorik, um eine Anwendbarkeit mit möglichst geringen Investitionskosten sowie minimalem Messaufwand zu erreichen. Damit werden vor allem die zu Beginn der Arbeit vorgestellten Hemmnisse für KMUs adressiert.

Auf die Inhalte und Erkenntnisse der vier wesentlichen Schritte der *Methode zur systematischen Energiedatenerfassung in der Produktion* wird in den folgenden Abschnitten detailliert eingegangen.

4.4 Auswahl der angestrebten Analyse

Zu Beginn der Nutzung der Methode muss identifiziert werden, welche Energiedatenanalysen industrielle Relevanz besitzen und daher explizit berücksichtigt werden müssen. Es werden nur Energiedatenanalysen innerhalb des im Abschnitt 3.4 definierten Betrachtungsraums dieser Arbeit berücksichtigt.

Auf Grundlage einer umfangreichen Literaturrecherche, im Wesentlichen unter Berücksichtigung der in Abbildung 2.6 dargestellten Quellen, sowie zahlreicher Expertengespräche ist es möglich, die relevanten Energiedatenanalysen in mehrere Cluster zu unterteilen. Die Analysis-Relevance-Matrix (ARM) stellt diese gemäß Abbildung 4.2 nach Betrachtungsebene (Produktions- bzw. Zustandsebene) sowie nach ihrer Relevanz dar. Dabei unterscheidet sie in *Standard-Analysen*, welche bereits zahlreich in Forschung und Industrie Anwendung finden, und in den sog. *erweiterten Bereich*. Dieser enthält Analysen, welche aktuell noch kaum Verbreitung finden, jedoch großes Potenzial für die Zukunft bieten.

	Gesamtmaschine	Komponenten	Zustände	Produkte
Standard	Verbrauchs- und Zeitanteile aufzeichnen und visualisieren			
	EnPIs berechnen und darstellen			
	Ranking			Ranking
			unproduktive Maschinenzeit	
	Maximallast			
Erweitert	Spannungsqualität			
		Anomalieerkennung		
		Verbrauch je Komponente und Zustand		

Abbildung 4.2: *Analysis Relevance Matrix (ARM): Cluster relevanter Energiedatenanalysen nach Betrachtungsebene (in Anlehnung an [17])*

Im Folgenden werden die einzelnen Cluster erläutert und jeweils anhand eines Beispiels veranschaulicht.

Cluster *Verbrauchs- und Zeitanteile aufzeichnen und visualisieren*

Das Cluster *Verbrauchs- und Zeitanteile aufzeichnen und visualisieren* umfasst einige der grundlegendsten Energiedatenanalysen. Um aus den aufgezeichneten Datensätzen auswertbare und erfassbare Informationen zu generieren, müssen diese geeignet aufbereitet und visualisiert werden. Dabei stellen Verbrauchs- und Zeitanteile häufige Auswertungen für breite Nutzerkreise, vom Maschinenbediener, über den Meister oder Schichtleiter bis hin zum Management, dar. Beispielsweise wird durch Balken- und Tortendiagramme als Grundlage für Pareto-Analysen ausgewertet, wie

sich der Gesamtenergiebedarf auf einzelne Anlagen, auf die unterschiedlichen Betriebszustände pro Anlage, auf einzelne Aggregate einer Anlage oder auf die Fertigung unterschiedlicher Produkte aufteilt. Dabei ist es zudem interessant, welchen Zeitanteil die betrachteten Systeme erreichen, also z. B. wie lange eine Komponente im betrachteten Zeitraum tatsächlich aktiv war. Auswertungen der Verbrauchs- und Zeitanteile haben eine hohe Relevanz über alle Betrachtungsebenen hinweg.

Anknüpfend an die bereits im Abschnitt 3.2 beispielhaft herangezogene verkettete Abfüllanlage einer Molkerei ist in Abbildung 4.3 die Analyse der sog. Verbrauchsanteile der Einzelanlagen mit Hilfe eines Tortendiagramms visualisiert. Diese Art der Auswertung dient meist zu Beginn von energiebezogenen Maßnahmen als Grundlage für die Identifikation und Auswahl besonders energieintensiver Bereiche und Anlagen.

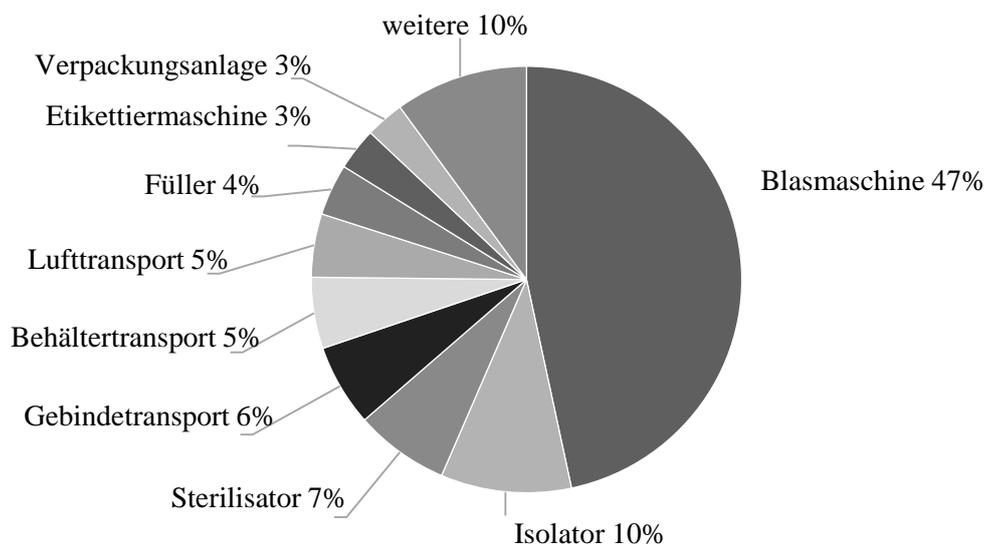


Abbildung 4.3: Anteile der Einzelanlagen an der Gesamtleistungsaufnahme einer verketteten Abfüllanlage einer Molkerei

Um die sog. Spitzenverbraucher zu identifizieren, ist nicht nur die Leistungsaufnahme interessant. Sollen neben den Netzlasten z. B. auch die Energiekosten als Zielgröße berücksichtigt werden, so ist die gemeinsame Betrachtung der durchschnittlichen Leistungsaufnahme und der Betriebsstunden notwendig. Dies ist beispielsweise möglich, indem der für einen durchschnittlichen Arbeitstag typische Energieverbrauch berechnet und bewertet wird. Visualisieren lässt sich diese Gegenüberstellung u. a. durch ein energetisches Portfolio, wie schematisch in Abbildung 4.4 visualisiert. Hierbei wird für jede betrachtete Einheit, z. B. jede Anlage oder jedes Aggregat, die

durchschnittliche Leistungsaufnahme sowie die durchschnittliche Anzahl an Betriebsstunden aufgetragen. Systeme im rechten oberen Quadranten, also mit hoher Leistungsaufnahme und hohem Zeitanteil, stellen potentielle Spitzenverbraucher dar und eignen sich besonders für Maßnahmen zur Steigerung der energiebezogenen Leistung.

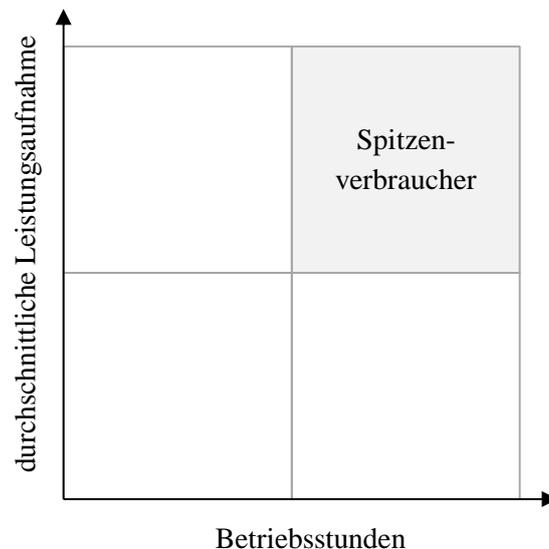


Abbildung 4.4: Energetisches Portfolio zur Identifikation von Spitzenverbrauchern unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Leistungsaufnahme sowie der Betriebsstunden innerhalb eines repräsentativen Zeitraums

Cluster EnPIs berechnen und darstellen

Gemäß DIN EN ISO 50001 sollen im Rahmen eines EnMS Kennzahlen zur Beurteilung der Verbesserung der energiebezogenen Leistung definiert und kontinuierlich überwacht werden. Die Erfassung und Analyse spezifischer EnPIs findet sich im Cluster *EnPIs berechnen und darstellen* wieder. Das Cluster ist, unabhängig von Unternehmensgröße und Betrachtungsebene, von sehr hoher industrieller Relevanz und, wie eingangs erwähnt, eine der Voraussetzungen für eine Zertifizierung eines EnMS nach DIN EN ISO 50001.

Neben EnPIs, welche die energiebezogene Leistung von Produktionsanlagen, Einzelaggregaten und Betriebszuständen beschreiben, können EnPIs auch bauteilbezogen definiert werden. Das nachfolgende Beispiel stellt solche bauteilbezogenen EnPIs dar. Sie spiegeln die energetischen Kennzahlen für unterschiedliche Bauteile für eine Fertigungslinie aus der Elektronikfertigung wider. Die Bauteile durchlaufen dabei

dieselben verketteten Anlagen. Grundsätzlich müssen EnPIs stets unternehmens- und anwendungsspezifisch definiert werden.

In diesem Fall entschied sich das Unternehmen für folgende Kennzahlen, die in Abbildung 4.5 für fünf Bauteile aufgetragen sind:

- *maximale Leistungsaufnahme* zur Überwachung der Netzbelastung sowie der Energiekosten
- *Leistungsaufnahme im Stand-by-Betrieb* zur Überwachung und Reduzierung der Verschwendung von elektrischer Energie in nicht wertschöpfenden Zeiten
- *durchschnittliche Leistungsaufnahme pro Bauteil* über alle auftretenden Betriebszustände hinweg
- *Energiebedarf pro Bauteil* bezogen auf die jeweilige durchschnittliche Durchlaufzeit, z. B. zur Bestimmung der Energiekosten pro Bauteil

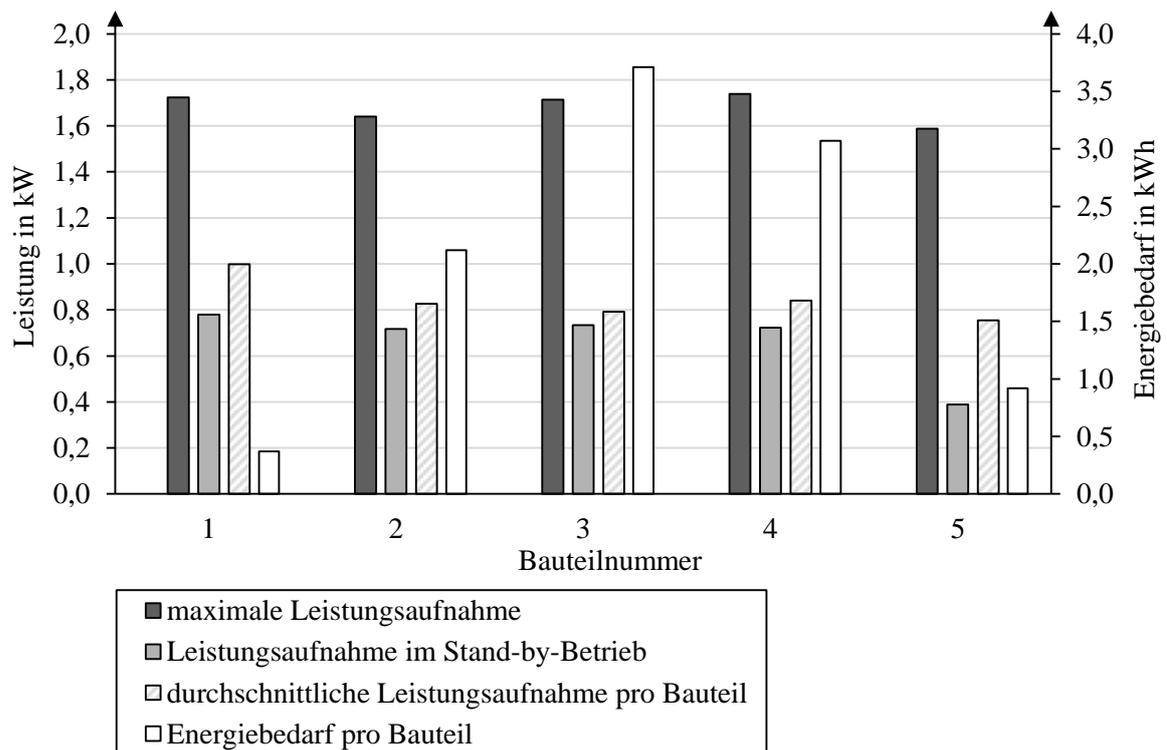


Abbildung 4.5: Bauteilbezogene EnPIs für eine Fertigungslinie der Elektronikfertigung

Cluster Ranking

Möchte ein Unternehmen beispielsweise gemäß der sehr gängigen Pareto-Analyse Energieeffizienz-Maßnahmen zunächst an den Spitzenverbrauchern mit großem energetischen Potenzial durchführen, muss zunächst identifiziert werden, bei welchen Anlagen es sich um diese sog. Hauptverbraucher handelt. Die Ergebnisse einer Energiemessung lassen sich dabei nicht durch subjektive Einschätzungen hinsichtlich des Energiebedarfs von unterschiedlichen Anlagen ersetzen. Zu berücksichtigen ist auch hier die Leistungsaufnahme über die Zeit. Diese und analoge Analysen sind im *Cluster Ranking* zusammengefasst und werden i. d. R. auf Maschinen-, Komponenten- und Produktebene angewandt.

Abbildung 4.6 zeigt eine signifikante Steigerung der Energietransparenz, welche bei der Betrachtung eines Produktionsbereichs eines süddeutschen Großkonzerns mit hauptsächlich spanender und umformender Bearbeitung erreicht werden konnte. Ziel war es hier, auf Grundlage von Messwerten ein Ranking zu erstellen, welches die Hauptverbraucher von elektrischem Strom aufführt. Diese Analyse diente als Grundlage für Energieeffizienzmaßnahmen, welche sich zunächst auf die zwölf größten Hauptverbraucher konzentrieren sollten. Zu Beginn der Untersuchungen war lediglich für 30 % des Gesamtbedarfs an elektrischem Strom eine eindeutige Zuordnung zu Einzelverbrauchern möglich. Durch die Installation von Stromzählern, ergänzt durch die Durchführung mobiler Leistungsmessungen, konnte die Energietransparenz von 30 auf 75 % gesteigert werden. Damit konnten alle großen Einzellasten identifiziert und in ihrem Verhalten über der Zeit charakterisiert werden. Die verbleibenden 25 % verteilen sich auf zahlreiche sehr kleine Verbraucher und Infrastruktursysteme, welche nur mit sehr hohem Aufwand eindeutig zugeordnet werden könnten. Aus diesem Grund wurde auf eine weitere Ausdehnung der Messungen verzichtet.

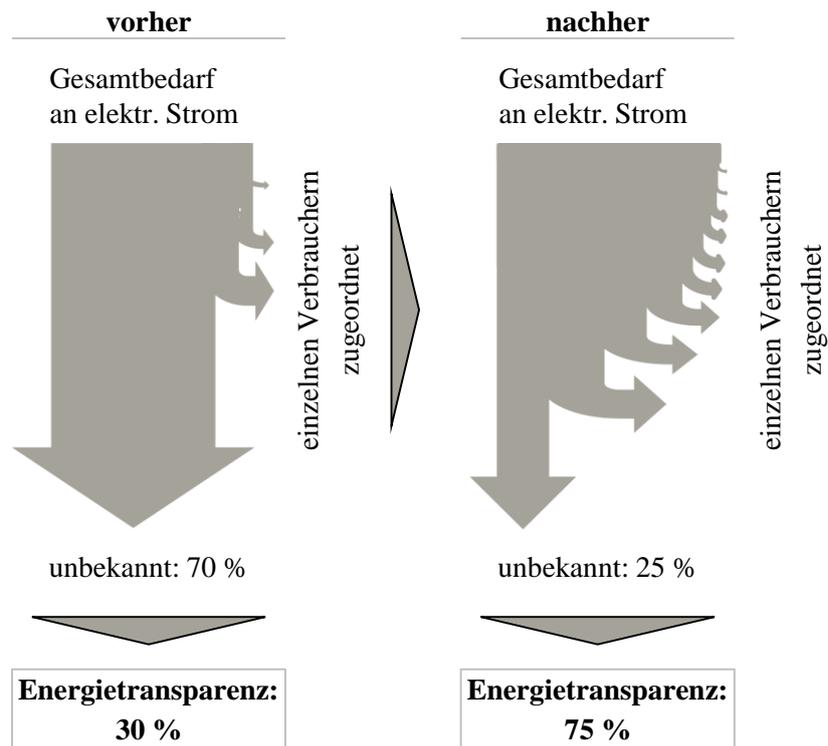


Abbildung 4.6: Steigerung der Energietransparenz für einen Produktionsbereich eines süddeutschen Großkonzerns durch die Installation zahlreicher Stromzähler und die Durchführung mobiler Leistungsmessungen

Das gezeigte Beispiel ist der Ebene *Gesamtmaschine* zuzuordnen, da hierbei einzelne Produktionsanlagen innerhalb eines Produktionsbereichs betrachtet wurden. Die Vorgehensweise findet jedoch analog auch auf den Ebenen *Komponenten* und *Produkte* Anwendung.

Cluster *unproduktive Maschinenzeit*

Bei der detaillierten Betrachtung von Lastgängen einer Maschine, welche den einzelnen Maschinenzuständen zugeordnet werden, fallen nicht nur unterschiedliche Energieverbrauchsniveaus der Betriebszustände, sondern auch unproduktive Maschinenzeiten auf. Dies wird durch die Analysen innerhalb des Clusters *unproduktive Maschinenzeit* betrachtet. In Abbildung 4.7 ist als Fallbeispiel der Leistungsverlauf einer Laserstrahlschneidanlage zu sehen.

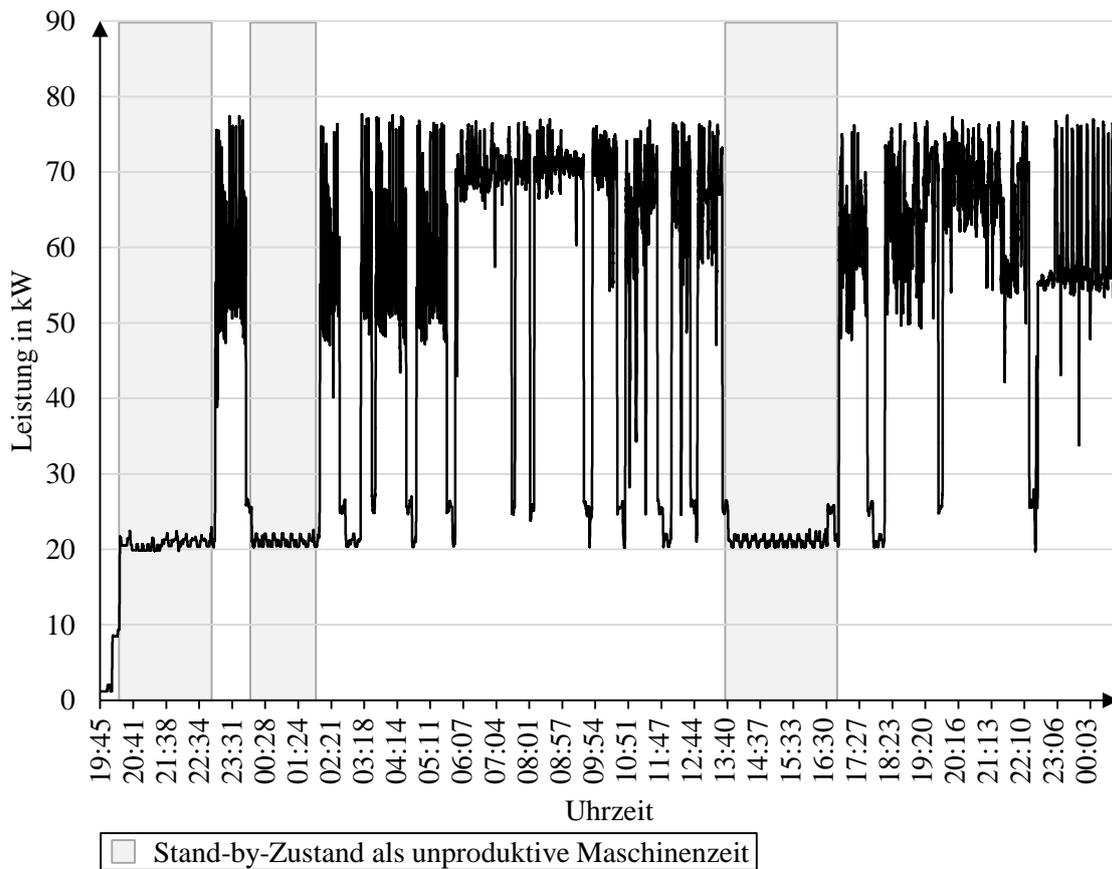


Abbildung 4.7: Identifikation von unproduktiven Maschinenzeiten am Beispiel einer Laserstrahlschneidanlage

Die grau hinterlegten Zeiträume sind außerplanmäßige Stand-by-Zeiten, welche bislang noch nicht erfasst und daher auch nicht im Hinblick auf energiebezogene Maßnahmen berücksichtigt wurden. Sollten diese Zeiten nicht vermeidbar sein, bietet sich der Einsatz zahlreicher Energieeffizienz- oder Energieflexibilitätsmaßnahmen an, um die Energiebilanz der Laserschneidanlage zu verbessern. So können beispielsweise Nebenaggregate für die Dauer der Produktionsunterbrechung abgeschaltet werden. Ein komplettes Abschalten einer Anlage ist meist z. B. aufgrund von hohen Anlaufzeiten, hohen Anlaufströmen sowie aus Gründen der thermischen Stabilität nicht möglich. Durch die Abschaltung oder Teilabschaltung von Werkzeugmaschinen können durch vergleichbare Maßnahmen 20 bis 35 % des Energiebedarfs eingespart werden [59].

Cluster *Maximallast*

Das Cluster *Maximallast* befasst sich mit der Identifikation und Reduzierung der maximalen Leistungsbedarfe von Produktionsanlagen und Komponenten. Die Kosten der elektrischen Energie, welche den Standardverträgen der Energieversorger zugrunde liegen, bestehen aus mehreren Komponenten. Der sog. *Arbeitspreis* beinhaltet dabei Kosten für den Betrag der benötigten Gesamtenergie, während der sog. *Leistungspreis* die benötigte Kapazität der Verteilungsnetze anhand der maximalen benötigten Leistung im betrachteten Zeitraum widerspiegelt [65]. Durch die Festlegung dieses Betrachtungszeitraums auf meist ein Jahr binden die Versorger die Kunden an sich und bieten im Gegenzug vergünstigte Preise an. Weitere Komponenten des resultierenden Strompreises sind vom Kunden nicht direkt beeinflussbar und beinhalten Steuern und Abgaben sowie die EEG-Umlage. Insbesondere im Bereich von KMUs ist dies die reguläre Preisstruktur des individuellen Stromvertrags. Durch den Betrachtungsraum von einem Jahr auf Basis von Mittelwerten über je 15 min des Gesamtleistungsbedarfs für die Festlegung des Leistungspreises ist es besonders relevant, diese Leistungsspitzen zu minimieren. Abbildung 4.8 zeigt beispielhaft für ein kunststoffverarbeitendes mittelständisches Unternehmen den Gesamtleistungsbedarf über zwei Tage sowie den Anteil des bereits in Abbildung 3.1 gezeigten Energiebedarfs der Kunststoffspritzgießanlage am Gesamtbedarf. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Referenzwert zur Berechnung des Leistungspreises deutlich über den im restlichen Zeitraum liegenden Lastspitzen liegt. Dies kann sehr schnell, wie im vorliegenden Fallbeispiel, zu Zusatzkosten von ca. 50.000 € für ein Geschäftsjahr führen. Zur Identifikation von Maximallasten gehört somit auch die Aufzeichnung der möglichen Gründe, um Vermeidungsstrategien entwickeln zu können.

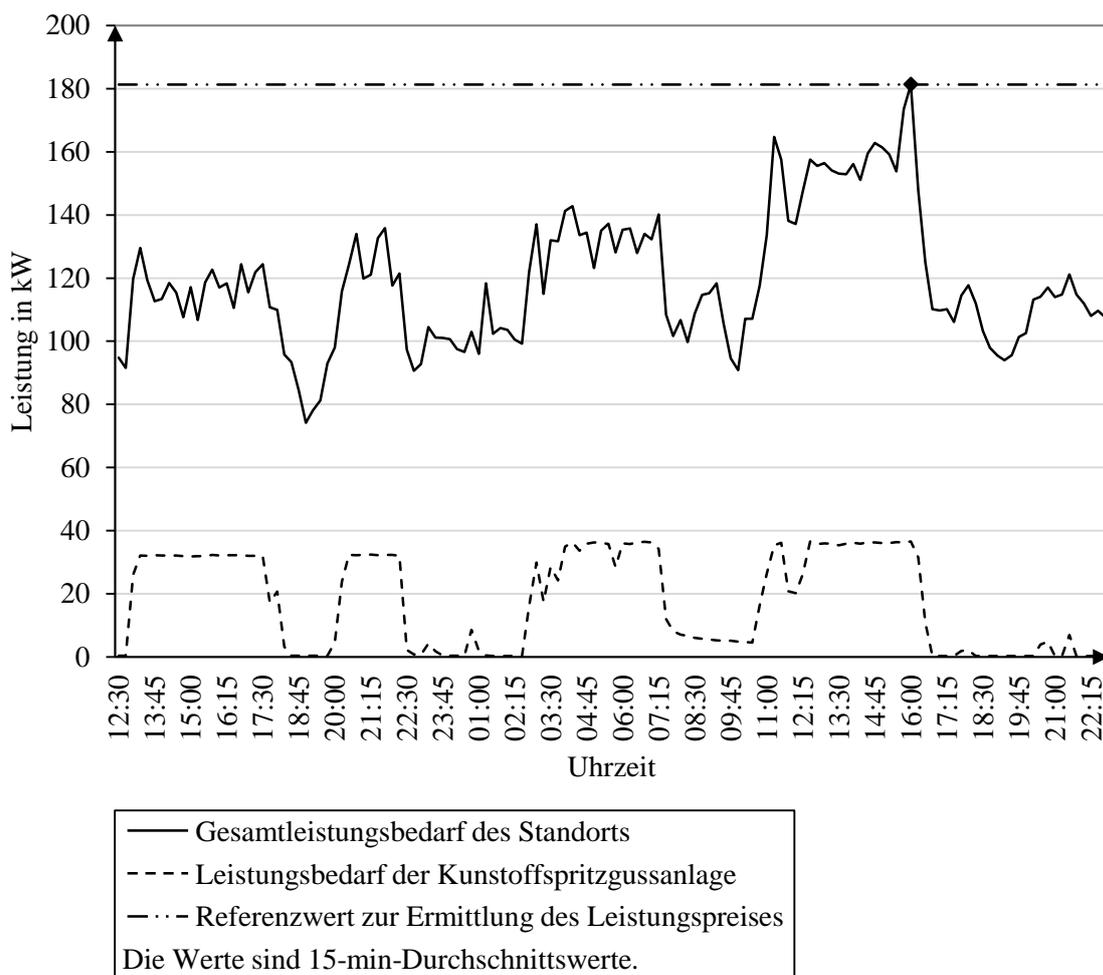


Abbildung 4.8: Maximalwert der Leistungsaufnahme als ein wesentlicher Referenzwert zur Kostenermittlung eines kunststoffverarbeitenden mittelständischen Unternehmens

Unternehmensintern kann es zudem bei Betreiben mehrerer energieintensiver Anlagen einen weiteren Beweggrund für die Überwachung und Vermeidung von *Maximallasten* geben. Hier sind die in den Produktionshallen verlegten Stromleitungen meist nicht für das gleichzeitige Anfahren mehrerer energieintensiver Anlagen ausgelegt. Um Überlasten und damit Stromausfälle zu vermeiden, sind ebenfalls Analysen von Ursachen sowie Möglichkeiten zur Vermeidung insbesondere mehrerer gleichzeitiger Leistungspeaks relevant. Im Bereich des oben genannten kunststoffverarbeitenden mittelständischen Unternehmens resultierten analoge Analysen in einer Regel, die das zeitgleiche Anfahren mehrerer Anlagen untersagt. Zudem wurde die Kunststoffspritzgießanlage mit einer automatisierten Anfahrstrategie ausgestattet, welche energieintensive Komponenten der Anlage mit zeitlichem Versatz hochfährt. Die Analyse von Leistungspeaks sowie insbesondere von deren Ursachen kann hierbei auf Maschinen- oder auf Komponentenebene durchgeführt werden.

Cluster *Spannungsqualität*

Das Cluster *Spannungsqualität* ist der Ebene eines Produktionsstandortes und dessen firmeninternen Stromnetzes zuzuordnen und erstreckt sich bis auf die Ebene einzelner Maschinen hinunter. Einzelne Komponenten werden in diesem Kontext meist nicht betrachtet. Das Cluster umfasst dabei alle Analysen, welche die Spannungsqualität sowohl im internen Firmennetz als auch nach außen hin zum Versorgungsnetzbetreiber untersuchen. Das darauf aufbauende Ziel ist es i. d. R., die nutzerseitigen Ursachen für Qualitätsprobleme in diesem Bereich zu identifizieren und zu beheben bzw. zukünftig zu vermeiden.

Eine ausreichende Spannungs- sowie Versorgungsqualität ist die Voraussetzung für eine Versorgungszuverlässigkeit für den Nutzer [66]. Es gibt zahlreiche Merkmale, welche die Qualität der Stromversorgung und somit die Nutzbarkeit des elektrischen Stroms beeinflussen. Das Ziel ist es dabei, „dass die Versorgungsspannung eine konstante Frequenz, eine perfekte Sinus-Kurvenform und eine konstante Höhe aufweist“ [67]. Ein wesentlicher Einflussfaktor auf Qualitätsprobleme im Bezug auf die Spannungsqualität ist dabei der Nutzer. Die neuesten Entwicklungen zeigen eine stetig wachsende Anzahl an Anlagen und Geräten, welche „direkt die Kurvenform der Spannung beeinflussen, die Höhe der Spannung nach einem bestimmten Muster ändern oder Signalspannungen der Spannung überlagern“ [67]. Gleichzeitig steigt die Anzahl der Anlagen und Geräte, welche empfindlich auf Störungen in der Spannungsqualität reagieren [67]. Aus Sicht von produzierenden Unternehmen ist es daher von besonderem Interesse, eine nutzerseitige negative Beeinflussung der zur Verfügung stehenden Spannungsqualität zu vermeiden. Bei auftretenden Problemen werden zeitlich sehr hoch aufgelöste Messungen notwendig, um die Störungen präzise aufzuzeichnen und den das Phänomen verursachenden Systemen zuordnen zu können. Im Folgenden werden zwei häufig vom Nutzer beeinflusste Arten von Qualitätsproblemen erläutert: Spannungseinbrüche sowie Oberschwingungsspannungen.

Spannungseinbrüche können beispielsweise durch sehr starke plötzliche Stromanstiege im Netz durch „Anlaufvorgänge von leistungsstarken Motoren und Antrieben oder fallweise [durch] das Einschalten leerlaufender Transformatoren“ [66] ausgelöst werden. Dabei sinkt der Effektivwert der Spannung unter einen definierten Schwellwert, welcher in der Norm DIN EN 50160 auf 90 % der Bezugsspannung festgelegt ist [67]. Ein Spannungseinbruch kann zu schlagartigen Ausfällen von Anlagen sowie zur Produktion von Ausschuss führen. Zudem entstehen dem Nutzer Kosten für die Stillstandszeiten sowie für den Wiederanlauf. Im Cluster der *Spannungsqualität*

kommt es zu einer wechselseitigen Beeinflussung mit der Analyse der Maximallast, insbesondere bei der Betrachtung energieintensiver Anlagen.

Ein weiteres Phänomen mangelnder Spannungsqualität ist das Auftreten von *Oberschwingungsspannungen*, häufig auch Oberwellen genannt. Hierbei handelt es sich, wie in Abbildung 4.9 schematisch dargestellt, um „sinusförmige Spannung[en] mit einer Frequenz, die ein ganzzahliges Vielfaches der Grundfrequenz der Versorgungsspannung“ [67] sind. Diese Oberwellen werden i. d. R. auf Seiten der Nutzer durch nichtlineare Lasten verursacht [67]. Oberschwingungsspannungen führen beispielsweise zu Problemen beim Hochlauf von Drehfeldmotoren. Diese können darüber hinaus überhitzen. Auch kann es zu Spannungsverzerrungen und Nulldurchgangsstörungen kommen. Letztere führen insbesondere zu Problemen bei Steuerungen, welche den Nulldurchgang als Orientierungsgröße verwenden [68].

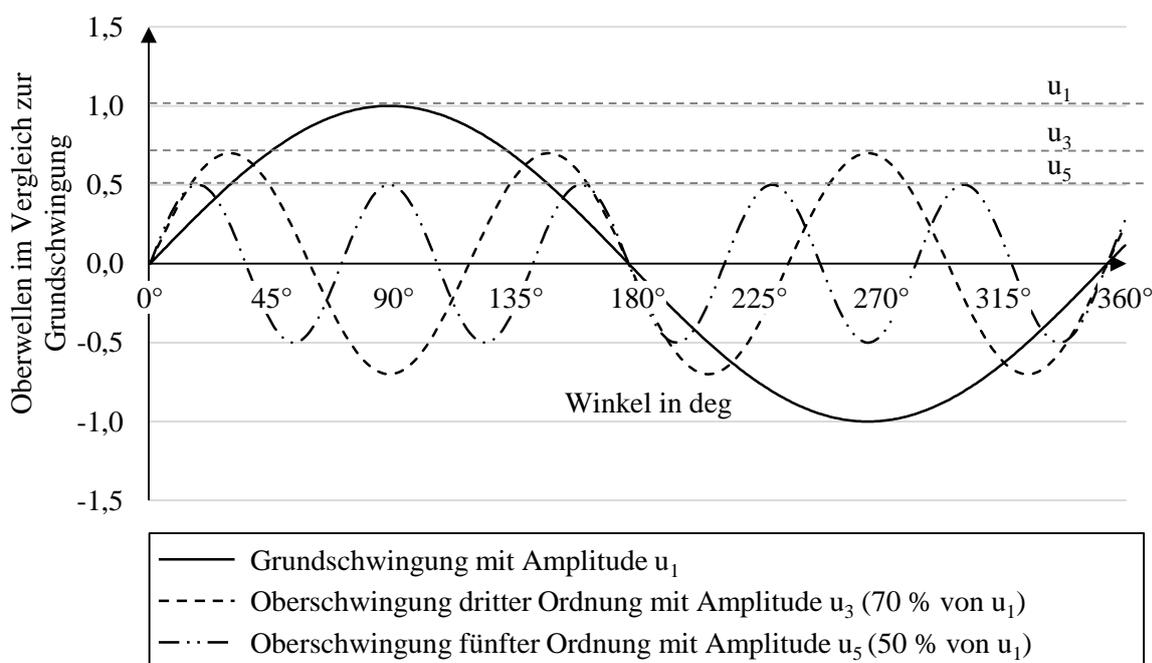


Abbildung 4.9: Grundschwingung mit überlagerten Oberwellen dritter und fünfter Ordnung (in Anlehnung an [68])

Bewertet werden Oberschwingungsspannungen entweder anhand der auftretenden Amplituden u_h (mit h als Ordnungszahl der Oberschwingungsspannung) im Vergleich zur Grundschwingungsamplitude u_1 oder in Summe durch den Gesamtoberschwingungsgehalt THD [67]. Dieser wird nach DIN EN 50160 [67] wie folgt berechnet:

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (u_h)^2} \quad (4.1)$$

Wie in Formel (4.1) zu sehen, werden bei der Bewertung von Oberschwingungsspannungen nach DIN EN 50160 nur die ersten 40 Oberschwingungen betrachtet. Analysen zum Themengebiet der Spannungsqualität sind sehr aufwendig und werden daher nur durchgeführt, wenn akute Probleme in diesem Bereich auftreten. Gleichzeitig nimmt die Bedeutung der Analysen in diesem Bereich angesichts zahlreicher nichtlinear wirkender Anlagen und Geräte zu. Aus diesem Grund ist das Cluster *Spannungsqualität* in Abbildung 4.2 zwar als industriell relevant, jedoch nicht als Standard-Analyse eingestuft.

Cluster *Anomalieerkennung*

Das Cluster der *Anomalieerkennung* enthält Analysen, welche im Rahmen einer kontinuierlichen Überwachung von energetischen Größen überprüfen, ob unerwartete Ereignisse auftreten. Dabei könnten beispielsweise schleichend ansteigende Energiebedarfe auf Verschleißzustände hinweisen [54]. Auch Lastspitzen, welche anhand des Maschinenprogramms nicht zu erwarten waren, können automatisiert identifiziert und beispielsweise an den Maschinenbediener oder die Instandhaltung gemeldet werden. Eine solche Erkennung von unerwarteten Lastspitzen zeigt beispielhaft Abbildung 4.10. Dabei wird analog zu Vijayaraghavan und Dornfeld [54] automatisch erkannt, ob eine auftretende Lastspitze durch Beschleunigungsvorgänge im NC-(Numerical Control)Code erklärbar und somit zu erwarten ist. Ist dies nicht oder nicht in dieser Höhe der Fall, so weist das System den Nutzer auf eine erkannte Anomalie hin. Eine Anomalieerkennung auf Maschinenebene erweist sich meist als schwierig, da ohne detaillierte Zuordnung der Leistungsanteile und -spitzen zu einzelnen Aggregaten eine Beurteilung der Anomalie kaum möglich ist. Besonders aufschlussreich ist eine Anomalieerkennung daher auf der Ebene einzelner Komponenten. Auf Zustandsebene können beispielsweise Phänomene wie ein schleichender Anstieg der mittleren Leistungsaufnahme überwacht werden (s. [54]). Wird auf einer Anlage im Rahmen einer Serien- oder Massenfertigung ein identisches Programm häufig wiederholend abgefahren, so können auf Ebene der Produkte z. B. Vergleiche zwischen den Wiederholvorgängen gezogen werden. Die Anomalieerkennung setzt ein hohes Maß an Datenaufzeichnung und Digitalisierung voraus. Diese noch recht junge Art der Energiedatenanalysen ist aktuell vor allem im Bereich der Forschung und in ersten industriellen Pilotanwendungen im Einsatz. Daher ist das zugehörige Cluster der Kategorie „erweitert“ zugeordnet.

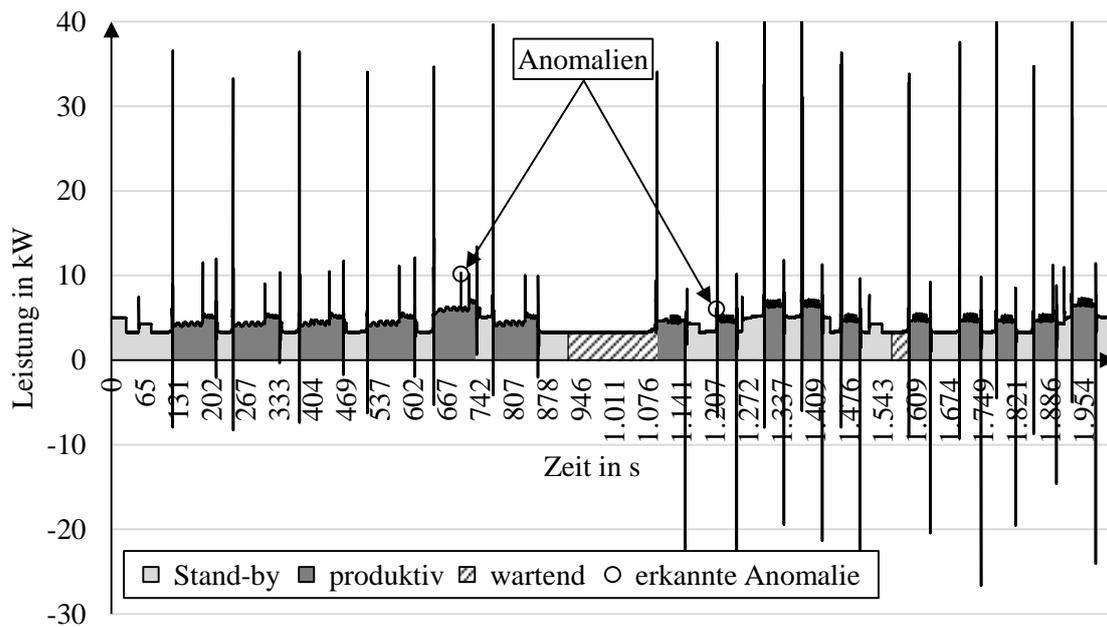


Abbildung 4.10: Beispielhafte Anomalieerkennung unerwarteter Leistungsspitzen der Motorspindel eines 5-Achs-Bearbeitungszentrums durch Korrelation von Stromsignal und NC-Code (in Anlehnung an [17])

Cluster Verbrauch je Komponente und Zustand

Das ebenfalls dem erweiterten Kreis der Energiedatenanalysen angehörende Cluster *Verbrauch je Komponente und Zustand* geht über die reine Berechnung von EnPIs hinaus und umfasst die zeitlich hoch aufgelöste und differenzierte Betrachtung der Anteile einzelner Komponenten je Maschinenzustand. So lassen sich beispielsweise Potenziale bewerten, die sich daraus ergeben, dass eine aktive Steuerung des Energiebedarfs einer Komponente zur Energieflexibilität der Anlage in den unterschiedlichen Betriebszuständen beitragen kann.

Abbildung 4.11 zeigt als Fallbeispiel die initiale Identifikation jener Lastanteile, die nicht direkt vom Produktionsprozess abhängig sind [69]. Popp und Zäh [69] führten hierzu denselben Produktionsprozess mehrmals an einer spanenden Werkzeugmaschine durch. Durch Überlagerung der jeweils leicht variierenden Lastgänge ist die Identifikation des direkt durch den Bearbeitungsablauf vorgegebenen Basislastgangs möglich, welcher für alle Wiederholungsmessungen identisch ist. Er stellt somit die Schnittmenge der Flächen unterhalb der Lastgänge dar. Darüber hinaus lassen sich die nur indirekt vom Produktionsbetrieb abhängigen flexiblen Einzellasten identifizieren, welche bei der wiederholten Fertigung desselben Werkstücks variieren. Diese

flexiblen Lastanteile eignen sich für den energieflexiblen Betrieb einer Werkzeugmaschine ohne Beeinflussung des Produktionsprozesses [69]. Beispielhafte Energieflexibilitätsmaßnahmen sind vorgezogene oder verzögerte Füllvorgänge für maschineninterne Medienspeicher [35]. Für die Identifikation der flexiblen Lastanteile sowie vor allem für die automatisierte Durchführung geeigneter Energieflexibilitätsmaßnahmen sind sehr detaillierte Energiedaten sowie Zeitverläufe der Steuerungsvariablen der einzelnen Komponenten (Maschinendaten) erforderlich.

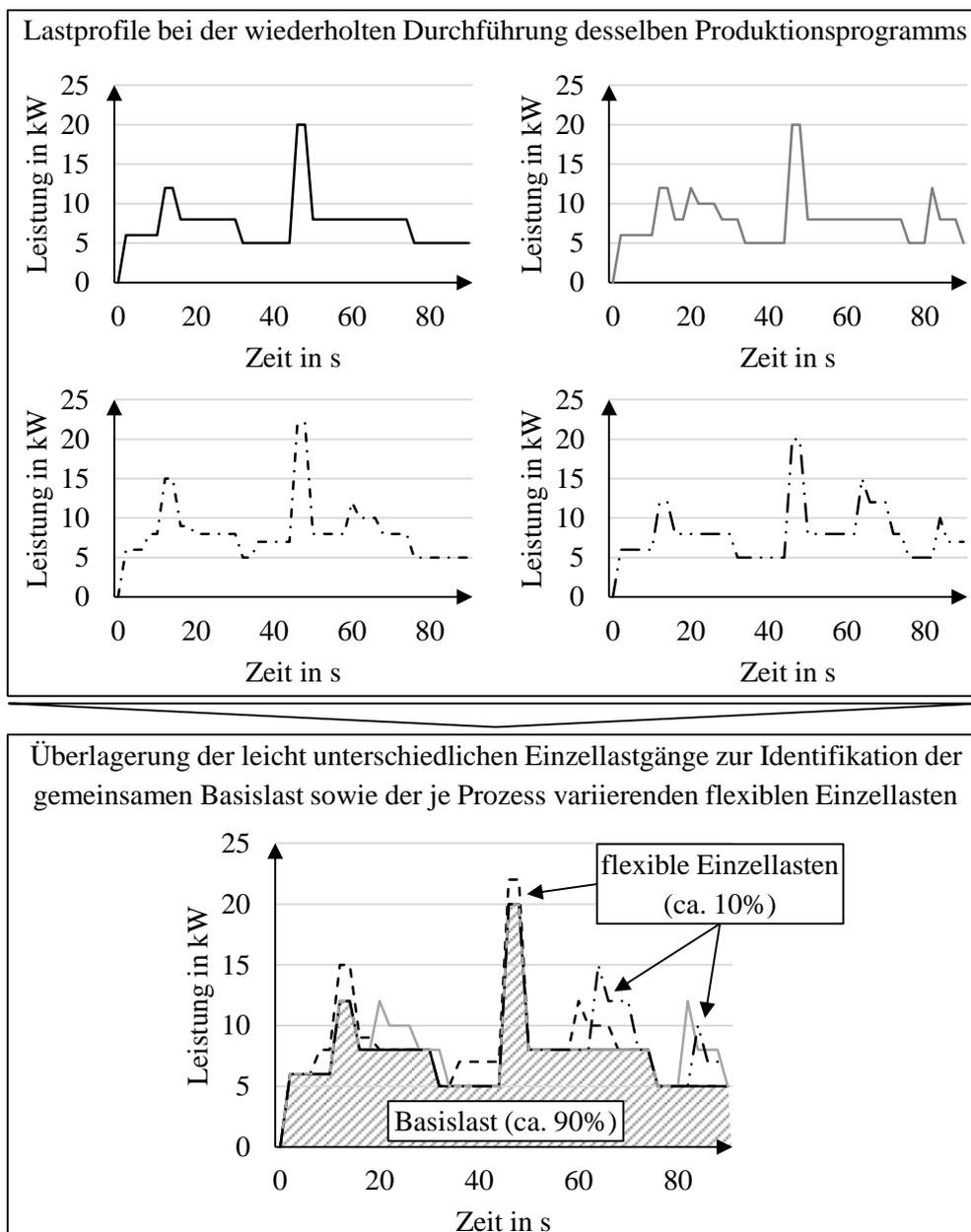


Abbildung 4.11: Identifikation flexibler Einzellasten durch Überlagerung einzelner Lastprofile (in Anlehnung an [69])

Die aktive Beeinflussung des Energiebedarfs von Produktionsanlagen ist heute bereits für sehr energieintensive Anlagen gängig. Eine Ausbreitung dieser Ansätze und Maßnahmen auch auf in KMUs verbreitete Produktionsanlagen wie spanende Werkzeugmaschinen wird vor allem für die Zukunft als aussichtsreiche Ergänzung angesehen [35].

4.5 Definition der notwendigen Datenarten

Aufbauend auf den im Abschnitt 4.4 definierten Clustern müssen die Datenarten definiert werden, welche für die jeweiligen Analysetypen notwendig sind. Dafür sind in Abbildung 4.12 links die Analysecluster aus der ARM dargestellt, welchen als Ergebnis zahlreicher Expertengespräche und Fallbeispiele die jeweils notwendigen Inputdaten zugeteilt sind.

Analysecluster	Benötigte Inputs	Konsolidierte Inputs ¹
Verbrauchs- und Zeitanteile aufzeichnen und visualisieren	1 2 3 4 5 6 7 8	1 Wirkleistung der Gesamtmaschine ²
EnPIs berechnen und darstellen	1 2 3 4 5 6 7 8	2 Wirkleistung je Komponente ²
Ranking	1 2 3 4 5 6 7 8	3 Wirkleistung historisch/Benchmark
unproduktive Maschinenzeit	1 2 3 4 5 6 7 8	4 Spannung am Maschineneingang
Maximallast	1 2 3 4 5 6 7 8	5 Blindleistung am Maschineneingang
Spannungsqualität	1 2 3 4 5 6 7 8	6 Produkt-/ Programmbezeichnungen
Anomalieerkennung	1 2 3 4 5 6 7 8	7 Betriebszustände
Verbrauch je Komponente und Zustand	1 2 3 4 5 6 7 8	8 Parameter einzelner Aggregate

Input wird nicht für Analyse benötigt Input wird für Analyse benötigt

¹Daten stets mit zeitlichem Bezug

²alternativ, entsprechend der betrachteten Produktionsebene

Abbildung 4.12: Definition der notwendigen Datenarten: Analysis-Input-Matrix (AIM) (in Anlehnung an [17])

Die rechte Seite der Abbildung 4.12 zeigt die konsolidierten Inputs, welche in Summe für die Gesamtheit der relevanten Energiedatenanalysen notwendig sind. Alle Inputs sind dabei als Daten mit zeitlichem Bezug zu verstehen, sodass beispielsweise stets aus Leistungswerten auf den Energiebedarf geschlossen werden kann. Zudem sind einzelne Inputs zum Teil als Alternativen zu verstehen, welche je nach Betrachtungsebene zu wählen sind: So unterscheidet die Übersicht beispielsweise zwischen der *Wirkleistung der Gesamtmaschine* sowie die *Wirkleistung je Komponente*, welche i. d. R. alternativ für die Produktionsebenen *Maschine* und *Aggregate* zur Anwendung kommen.

Die folgenden Ausführungen gehen für jedes Analysecluster auf die jeweils erforderlichen Datenarten ein.

Cluster *Verbrauchs- und Zeitanteile aufzeichnen und visualisieren*

Das Analysecluster *Verbrauchs- und Zeitanteile aufzeichnen und visualisieren* ermittelt die Leistungsaufnahme über die Zeit sowie den Energiebedarf mehrerer Verbraucher im Vergleich. Hierfür muss je nach betrachteter Produktionsebene auf Maschinen- und/oder Komponentenebene die Wirkleistung über die Zeit aufgezeichnet werden. Sollen die Energiedaten z. B. einzelnen Betriebszuständen oder Produktionsprogrammen zugeordnet werden können, so sind ergänzend die aktuellen *Produkt- und/oder Programmbezeichnungen* sowie die aktiven *Betriebszustände* über die Zeit aufzuzeichnen.

Cluster *EnPIs berechnen und darstellen*

Die Analysen zur *Berechnung und Darstellung von EnPIs* erfordern je nach betrachteter Produktionsebene ebenfalls die Aufzeichnung der benötigten Wirkleistung der Gesamtmaschine oder der betrachteten Komponenten. Auch können hierbei historische Daten, Daten von weiteren baugleichen Maschinen am selben Standort oder Daten aus anderen Werken als Benchmark interessant sein. Zwingend erforderlich sind diese Daten meist nicht. Ergänzt werden müssen die Energiedaten jedoch durch Betriebs- und Maschinendaten. Hierbei handelt es sich um die *Produkt- und/oder Programmbezeichnungen* und die aktiven *Betriebszustände* bei Betrachtung der Zustandsebene.

Cluster *Ranking*

Um *Rankings* auf unterschiedlichen Ebenen zu erstellen, ist dieselbe Datengrundlage vonnöten wie für die Aufzeichnung und Visualisierung von Verbrauchs- und Zeitannteilen. Diese umfasst die *Wirkleistung der betrachteten Gesamtmaschinen* bzw. *der Komponenten*, die *Produkt- und/oder Programmbezeichnungen* und die *aktiven Betriebszustände*.

Cluster *unproduktive Maschinenzeit*

Die Analyse *unproduktiver Maschinenzeiten* befasst sich beispielsweise mit der Identifikation langer Stand-by-Zeiten und dem damit verbundenen Energiebedarf. Für diese Art der Energiedatenanalysen auf Zustandsebene werden die *Wirkleistungsaufnahme der Gesamtmaschine* sowie die *Betriebszustände* als Datengrundlage benötigt. Können die Betriebszustände nicht direkt erfasst werden, so ist es häufig als Alternative möglich, aus dem aktuellen Produktionsprogramm sowie dem aktiven NC-Schritt auf den Betriebszustand zu schließen.

Cluster *Maximallast*

Die *Maximallasten* einer Produktionsanlage können prinzipiell rein auf der Grundlage der *Wirkleistung der Gesamtanlage* identifiziert werden. Soll zusätzlich die maschineninterne Ursache analysiert werden, so ist die Zuordnung der *Leistungsaufnahme zu den Einzelaggregaten* von Interesse. Zusätzlich müssen Daten zu den *Betriebszuständen* und den *einzelnen Parametern der Aggregate* (z. B. Spindeldrehzahl, Positionen und Beschleunigungen der Achsen) als Informationsgrundlage zur Verfügung stehen. Dies ist u. a. notwendig, um technische Maßnahmen zur Vermeidung von Lastspitzen definieren und ergreifen zu können. Die im Rahmen dieses Clusters erforderlichen Zusatzinformationen (z. B. Parameter einzelner Aggregate) sind im Wesentlichen maschineninterne Steuerungs- bzw. Regelungsparameter. Bei fehlender interner Sensorik müssen diese extern erfasst werden.

Cluster *Spannungsqualität*

Für die Analyse der *Spannungsqualität* auf Maschinenebene sind die zu betrachtenden Einflussfaktoren neben der *Wirkleistung der Gesamtmaschine* vor allem die *Spannung* und die *Blindleistung am Hauptanschluss der Maschine*. Die Analyse kann beispielsweise dazu dienen, eine Oberwellen verursachende Anlage zu identifizieren und Gegenmaßnahmen wie den Einsatz von Kondensatoren oder Filtern in ihrer Wirksamkeit zu verifizieren.

Cluster *Anomalieerkennung*

Für die automatisierte Durchführung von *Anomalieerkennungen* ist eine umfangreiche Datenbasis notwendig. Wie bereits im Abschnitt 4.4 erläutert, sind diese vor allem auf Komponentenebene sinnvoll. Folgende Datenarten werden gebraucht:

- Wirkleistung je Komponente
- Wirkleistung historisch / Benchmark (sofern vorhanden)
- Produkt-/ Programmbezeichnungen
- Betriebszustände
- Parameter einzelner Aggregate (z. B. Spindeldrehzahl)

Cluster *Verbrauch je Komponente und Zustand*

Auf Grundlage der Inputs *Wirkleistung je Komponente* und *Betriebszustände* kann der *Verbrauch einer Komponente in Abhängigkeit ihrer Betriebszustände* analysiert werden. Für die Betrachtung der detailliert vorliegenden Zustände und Parameter sind häufig auch Steuerungs- und Regelungsparameter wie beispielsweise die zugehörige Drehzahl der Motorspindel oder die aktuellen Füllzustände von Medienspeichern zu erfassen.

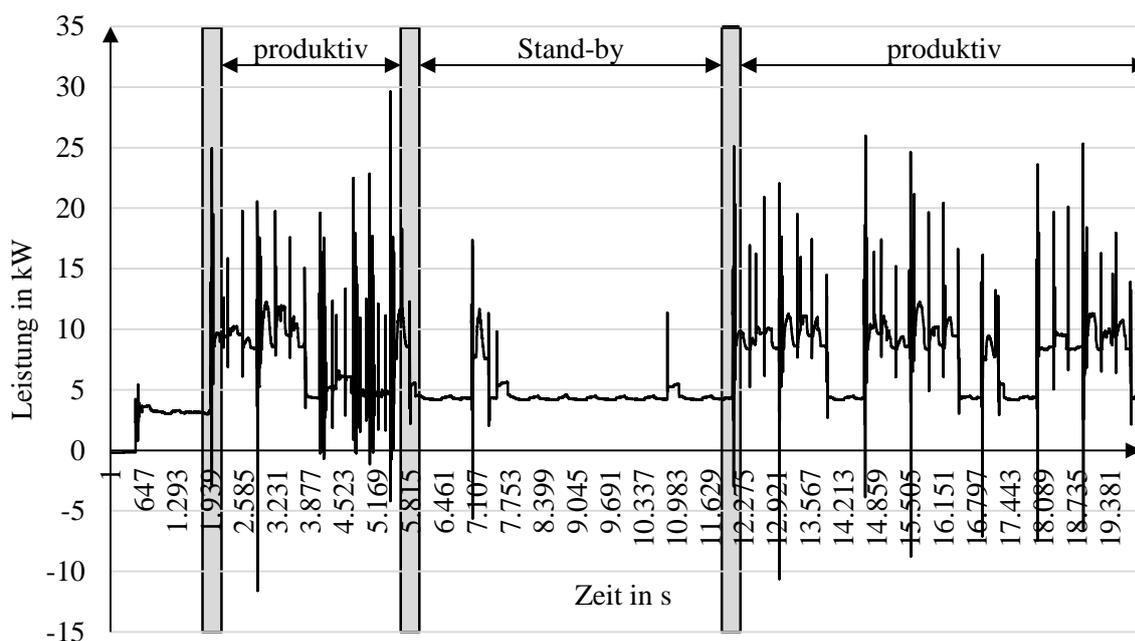
Für jedes Cluster von Energiedatenanalysen aus der ARM (s. Abbildung 4.2) wurden die für die Umsetzung notwendigen Datenarten identifiziert und in der AIM in Abbildung 4.12 dargestellt. Die geforderte Datenqualität der in der AIM rechts aufgeführten konsolidierten Inputs muss im nächsten Schritt anhand der notwendigen Messfrequenzen genauer spezifiziert werden.

4.6 Bestimmung der notwendigen Messfrequenzen

Die AIM (s. Abbildung 4.12) zeigt, dass keine der industriell relevanten *Standard-Energiedatenanalysen* mit reinen Energiedaten auskommt. Es ist stets notwendig, diese mit kontextuellen Informationen wie dem Produktionsablauf oder den aktuellen Steuerungsparametern zu kombinieren, um die angestrebten Erkenntnisse erreichen zu können. Grundsätzlich gilt dabei, dass für alle aufzuzeichnenden Datenarten dieselbe Messfrequenz anzustreben ist. Der Begriff der Messfrequenz ist industriell sehr verbreitet und wird daher in dieser Arbeit als Synonym für die Begriffe der Abtastrate sowie der Abtastfrequenz verwendet.

Das folgende Fallbeispiel zeigt die resultierenden Probleme und Einschränkungen, wenn die Randbedingung identischer Messfrequenzen für alle Datenarten nicht erfüllt

werden kann. Bei Unterschieden in den Frequenzen entstehen wesentliche Fehlerquellen in der Auswertung, da beispielsweise Leistungsdaten in Bereichen von Betriebszustandswechseln nicht mehr eindeutig einem der Zustände zugeordnet werden können, wie beispielhaft in Abbildung 4.13 zu sehen. Hierbei wurden die Leistungsaufnahme sowie Betriebsdaten wie das aktuelle NC-Programm für vier leicht unterschiedliche Fräsbearbeitungsprozesse mit unterschiedlicher Auflösung aufgezeichnet. Soll nun z. B. eine Auswertung des Energiebedarfs pro Betriebszustand oder Bauteil erfolgen, entstehen Unsicherheiten in den Bereichen der Änderungen in den Betriebsdaten. Die Energiedaten können in diesen Bereichen nicht eindeutig einem Zustand, einem Produkt oder Ähnlichem zugeordnet werden. Die hier gezeigten Bereiche fehlender Zuordnungsmöglichkeit sind jedoch im Vergleich zum Stand der Technik der erreichbaren Auflösungen automatischer Betriebsdatenerfassungen klein. Die Darstellung zeigt Leistungsmesswerte mit einer Auflösung von 1 Hz in Kombination mit einer Erfassung der Betriebszustände mit einer Genauigkeit von $\pm 2,5$ min.



- Bereich für den Zeitpunkt eines Betriebszustandswechsels bei einer Messfrequenz für die Energiedaten von 1 Hz und einer Erfassungsgenauigkeit der Betriebsdaten auf der Zeitskala von $\pm 2,5$ min

Abbildung 4.13: Beispielhafte Darstellung von Bereichen fehlender Zuordnungsmöglichkeit durch unterschiedliche Messfrequenzen für verschiedene Datenarten

Es wird deutlich, dass insbesondere die im Vergleich zu übergreifenden Betrachtungen sehr detaillierten Analysen auf Maschinen- und Aggregatsebene zeitlich synchron aufgezeichnete Energie-, Maschinen- und Betriebsdaten erfordern. Dies bestätigt die definierte Randbedingung, dass stets alle erforderlichen Datenarten mit derselben Messfrequenz aufgezeichnet werden sollten. Pro Energiedatenanalyse wird daher nur eine erforderliche Messfrequenz definiert.

Dazu wird im Folgenden zunächst die Bandbreite identifiziert, in welcher sich die erforderlichen Abtastfrequenzen im Rahmen dieser Arbeit bewegen. Aufbauend darauf können auf der Grundlage von Expertengesprächen sowie einer Literaturrecherche sinnvolle Messfrequenz-Bänder festgelegt werden. Dies geschieht in Abhängigkeit des energetischen Verhaltens der betrachteten Anlage oder Komponente. Konkretisieren lassen sich die identifizierten Messfrequenz-Bänder wiederum durch eine Gegenüberstellung mit den Kategorien aktuell zur Verfügung stehender elektrischer Messtechnik. Die in diesem Abschnitt getroffenen Annahmen werden durch eine spätere beispielhafte Anwendung und Validierung überprüft.

Am Hauptanschluss eines Unternehmensstandorts erfasst der Energieversorger die abgenommene Energiemenge sowie den zeitlichen Verlauf der bezogenen Leistung. Dafür werden, wie bereits im Abschnitt 4.4 erläutert, Durchschnittswerte über je 15 min berechnet und als Bemessungsgrundlage für den Leistungspreis herangezogen. Um die Messfehler möglichst gering zu halten, erfassen die Energieversorger die Leistungsaufnahme am Hauptanschluss i. d. R. mit einer Messfrequenz von 1 Hz. Die Daten werden nicht in dieser Genauigkeit gespeichert, sie dienen aber der möglichst präzisen Berechnung der erforderlichen 15-min-Durchschnittswerte.

Energiedatenanalysen auf Maschinen- und Aggregatsebene erfordern stets mindestens ebenso detaillierte Auswertungen wie die Bildung von 15-min-Durchschnittswerten auf Standortebene. Die Datenbasis muss daher in gleicher oder höher aufgelöster Abtastfrequenz erfasst werden. Die Energiedatenerfassung auf den detaillierten Produktionsebenen *Maschine* und *Aggregat* sollte somit, auch aus Gründen der Vergleichbarkeit sowie der Datenkonsistenz, auf Basis einer Abtastfrequenz f_a von mindestens 1 Hz durchgeführt werden. Folglich ist eine weitere allgemeine Randbedingung für die vorliegende Arbeit:

$$f_a \geq 1 \text{ Hz} \quad (4.2)$$

Aufbauend auf dieser allgemeinen Randbedingung für Energiedatenanalysen in der Produktion muss für die detaillierte Festlegung einer geeigneten Abtastfrequenz das Verhalten des jeweils betrachteten Systems berücksichtigt werden. Hierbei spielt vor allem die Dynamik der aufzuzeichnenden Phänomene eine wichtige Rolle. Anlagen und Komponenten lassen sich u. a. durch ihr typisches energetisches Verhalten charakterisieren und in folgende drei Klassen einteilen [10; 44]:

- *konstant*: Die Anlage oder Komponente weist im angeschalteten Zustand eine konstante Leistungsaufnahme auf (auf *Maschinenebene* z. B. eine Waschanlage, ein Durchlaufofen; auf *Aggregatsebene* z. B. ein Bedienpult, eine Schaltschrankkühlung)
- *zyklisch*: Die meist mittels eines Zwei-Punkt-Reglers an- und ausgeschaltete Anlage oder Komponente wiederholt einen charakteristischen Lastgang mit jeder aktiven Periode (auf *Maschinenebene* z. B. ein Trocknersystem, eine Mühle; auf *Aggregatsebene* z. B. eine Pumpe)
- *variabel*: Die Anlage oder Komponente zeigt eine direkt durch das Produktionsprogramm beeinflusste Leistungsaufnahme (auf *Maschinenebene* z. B. eine spanende WZM, ein automatisches Handhabungs- und Montagesystem; auf *Aggregatsebene* z. B. eine Motorspindel, ein Vorschubantrieb)

Als *zyklisch* oder *konstant* eingestufte Anlagen und Komponenten weisen ein *geringdynamisches* energetisches Verhalten auf. Systeme mit *variablem* energetischen Verhalten werden dagegen als *hochdynamisch* bezeichnet [39]. Für beide Typen gibt es in der Literatur Einstufungen, innerhalb welcher Bänder sich jeweils die Messfrequenzen für Energiedatenanalysen auf Maschinen- und Aggregatsebene bewegen sollten.

Für Anlagen und Komponenten mit *geringdynamischem energetischen Verhalten* fordern z. B. Kara et al. [39] Auflösungen zwischen 5 min und 1 s. Unter Berücksichtigung der in Formel (4.2) formulierten Randbedingung, wonach die Messfrequenz mindestens 1 Hz betragen sollte, gilt somit:

$$f_a = 1 \text{ Hz} \forall \text{ Systeme mit geringdynamischem energetischem Verhalten} \quad (4.3)$$

Für *hochdynamische Anlagen und Komponenten* beschreiben Kara et al. [39] dagegen ein extrem breites Band an Abtastfrequenzen, welches von 1/60 Hz bis zu 100 Hz reicht. Im Folgenden werden beide Grenzwerte hinterfragt und ggf. angepasst.

Die oben formulierte Randbedingung findet auch hier Anwendung, sodass der untere Grenzwert auf eine Frequenz von 1 Hz angepasst wird. Das Messfrequenz-Band für

Anlagen und Komponenten mit hochdynamischem energetischen Verhalten kann somit im ersten Schritt auf den Bereich von 1 Hz bis 100 Hz eingeschränkt werden.

Für die Überprüfung des oberen Grenzwertes von 100 Hz als ausreichend hohe Abtastfrequenz für die genauesten der angestrebten Analysen wird im Folgenden die Untersuchung von Oberwellen beispielhaft herangezogen. Diese Analyse eignet sich hierfür in besonderer Weise, da es sich um die genaueste der in dieser Arbeit betrachteten, industriell relevanten Energiedatenanalysen handelt.

Nach derzeitigem Stand der Technik wurden für die Analyse von Oberspannungen sowie Oberströmen die Ordnungen 2 bis 40 analysiert. Dies ist u. a. für die Berechnung des Gesamtüberschwingungsgehalts (Total Harmonic Distortion – THD) nach Formel (4.1) notwendig, welcher nach DIN EN 50160 einen Wert von 8 % nicht überschreiten darf [67]. Die 40. Oberwelle (Ordnungszahl $h = 40$) ist damit die 40. Harmonische der Grundschwingung von 50 Hz und weist folglich eine Frequenz f_{40} von

$$f_{40} = 40 \cdot 50 \text{ Hz} = 2.000 \text{ Hz} \quad (4.4)$$

auf. Um das allgemeine Abtasttheorem zu erfüllen, muss die Abtastfrequenz f_a „größer als das Doppelte der größten im Messsignal enthaltenen Frequenz f_{\max} sein“ [70]. Es gilt somit:

$$f_a > 2 f_{\max} \quad (4.5)$$

Die Erfüllung des Abtasttheorems ist notwendig, um von den erfassten Messwerten eindeutig auf die ursprüngliche Funktion zurückschließen zu können. Abbildung 4.14 zeigt das auf diese Weise zu vermeidende, auch als *Aliasing* bekannte, Phänomen beispielhaft: Bei der Verletzung des Abtasttheorems werden für mehrere Signale unterschiedlicher Frequenzen dieselben Messwerte erfasst [70]. Ein eindeutiger und somit verlässlicher Rückschluss von diesen Messwerten auf das korrekte Ausgangssignal ist somit nicht möglich.

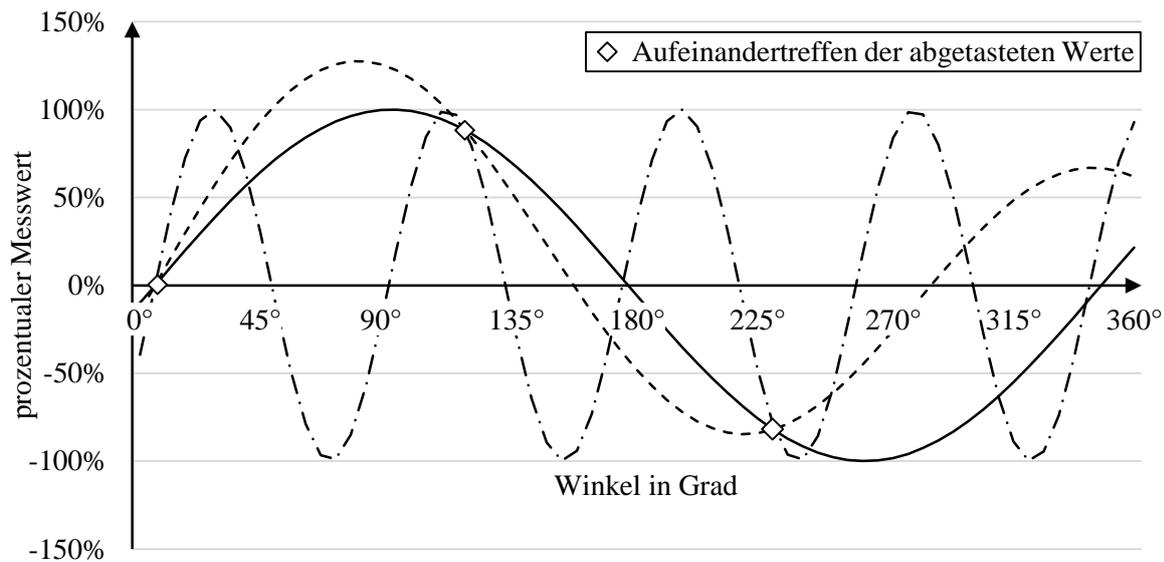


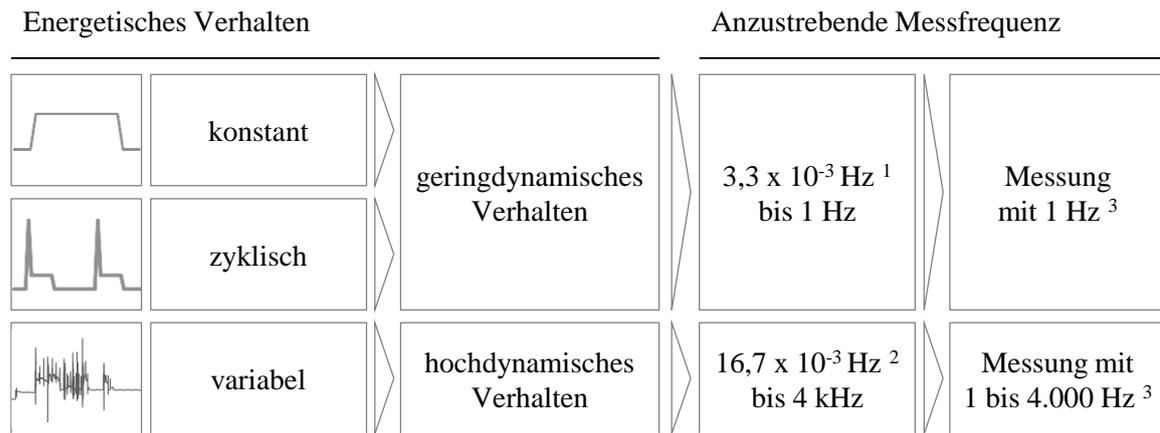
Abbildung 4.14: Aufzeichnung derselben Abtastwerte für Signale unterschiedlicher Frequenz bei ungenügender Abtastfrequenz (in Anlehnung an [70])

Somit muss für die Analyse der Oberschwingungen mindestens folgende Abtastfrequenz f_a erreicht werden:

$$f_a > 2 \cdot f_{40} = 4.000 \text{ Hz} \quad (4.6)$$

Häufig werden deutlich höhere Abtastfrequenzen umgesetzt, als durch das Abtasttheorem gefordert. Während das Abtasttheorem einen Faktor von 2 vorgibt, welcher zwischen maximaler Signal- und Abtastfrequenz liegen muss, ist es gemäß Stand der Technik gängig, eine Größenordnung (Faktor 10) zwischen die beiden Frequenzen zu legen. Dies setzt allerdings eine einfache Umsetzbarkeit und eine Verfügbarkeit von entsprechend leistungsfähiger und nicht zu teurer Messtechnik voraus.

Das Messfrequenz-Band für Anlagen und Komponenten mit hochdynamischem energetischen Verhalten muss somit erweitert werden. Für die in dieser Arbeit betrachteten Energiedatenanalysen erstreckt sich der Bereich daher von 1 Hz bis 4 kHz. Abbildung 4.15 zeigt die sich ergebenden Messfrequenz-Bänder für Anlagen und Komponenten mit *konstantem*, *zyklischem* und *variablem* energetischen Verhalten in der Übersicht.



¹entspricht einer Abtastperiode von 5 min

²entspricht einer Abtastperiode von 60 s

³unter Anwendung der Randbedingung $f_a \geq 1 \text{ Hz}$

Abbildung 4.15: Eingrenzung der anzustrebenden Messfrequenz-Bänder in Abhängigkeit des energetischen Verhaltens (in Anlehnung an [44]) der betrachteten Anlagen und Komponenten (anzustrebende Messfrequenzen in Anlehnung an [39])

Der Bereich der Anlagen und Komponenten mit hochdynamischem Verhalten deckt eine signifikant große Spanne ab. Hier ist eine Konkretisierung notwendig, da der industrielle Anwender in die Lage versetzt werden soll, präzise Entscheidungen hinsichtlich der erforderlichen Messfrequenz und Systemtechnik zu treffen. Dieses Ziel beinhaltet implizit auch die Anforderung, die festzulegenden Messfrequenzen derart zu definieren, dass sie auch messtechnisch umsetzbar sind. Hierfür zeigt Abbildung 4.16 beispielhaft eine Übersicht über die erreichbaren Messfrequenzen von 29 elektrischen Leistungsmessgeräten gemäß dem aktuellen Stand der Technik der folgenden anerkannten Hersteller:

- Chauvin Arnoux GmbH
- Fluke Deutschland GmbH
- GMC-I Messtechnik GmbH (Gossen Metrawatt)
- IME Messgeräte GmbH
- Janitza electronics GmbH
- PCE Deutschland GmbH (PCE Instruments)
- Schneider Electric GmbH
- Siemens AG

Die betrachteten Messgeräte sind dabei fortlaufend nummeriert und nach der erreichbaren Messfrequenz sortiert dargestellt. Die Details zu den einzelnen Messgeräten inkl. genauer Gerätebezeichnung finden sich im Anhang 12.2.

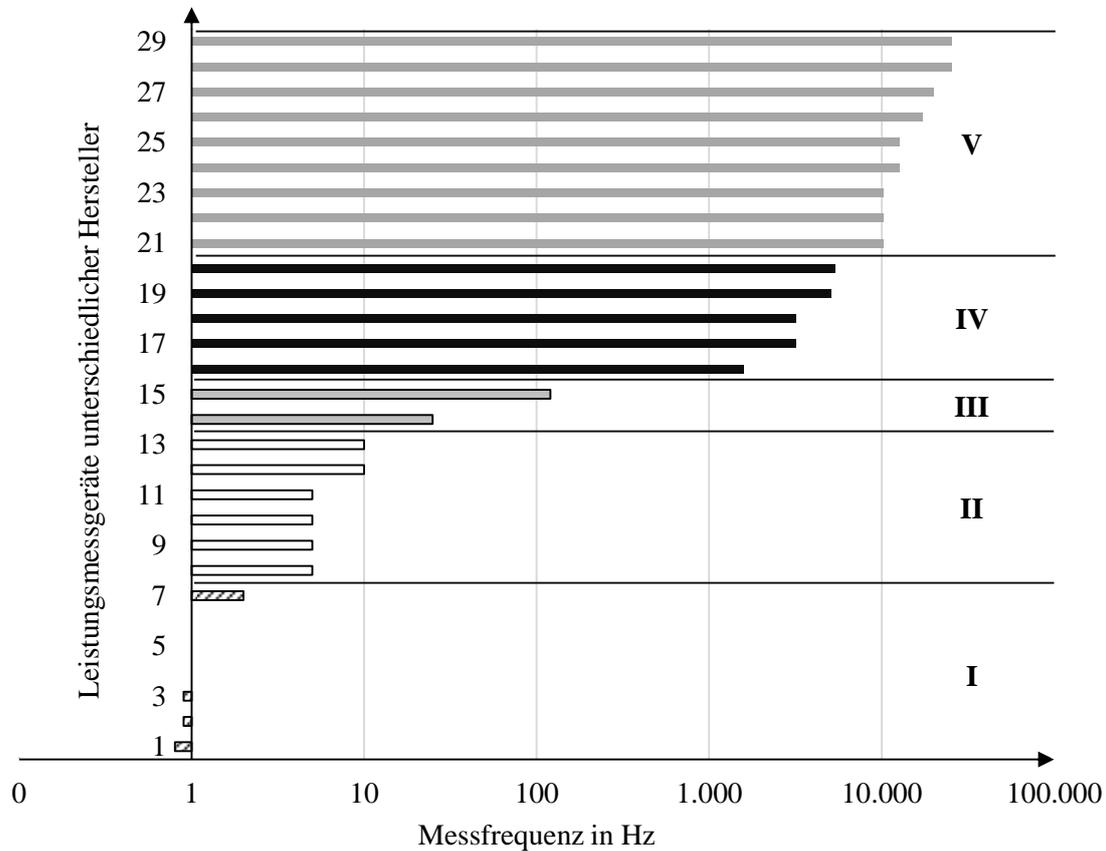


Abbildung 4.16: Erreichbare Messfrequenzen unterschiedlicher elektrischer Messtechnik (Gerätespezifikation und Hersteller siehe Anhang 12.2)

Die erreichbaren Messfrequenzen lassen sich in fünf Kategorien einteilen, welche in Abbildung 4.16 mit I bis V gekennzeichnet sind und im Folgenden erläutert werden.

Kategorie I umfasst industriell sehr verbreitete und gängige Geräte. Die Messgeräte, welche industriell eingesetzt werden, decken meist eine Messfrequenz bis ca. 1 Hz ab. Bei der Installation von je einem Sensor dieser Genauigkeit an den Hauptanschlüssen mehrerer Produktionsanlagen inkl. der jeweiligen Einbindung in die IT-Infrastruktur fielen im Jahr 2015 bei einem süddeutschen Großkonzern Investitionskosten in einer Größenordnung von 1.000 € pro Anlage an. Für KMUs ist mit etwas höheren Kosten zu rechnen, da sie keine vergleichbar hohen Rabatte erhalten und die

IT-Einbindung evtl. nicht vollständig durch eigenes Personal leisten können. In diesem Fall kommen noch Kosten für externe Dienstleister hinzu. Die Kosten für die Sensorik steigen mit höheren erreichbaren Messfrequenzen sehr stark an.

Kategorie II stellt die nächsthöhere Kategorie der Leistungsfähigkeit der Messtechnik mit einer erreichbaren Messfrequenz von 5 bis 10 Hz dar. Die hier einzuordnenden Messgeräte eignen sich für deutlich detailliertere Energiedatenanalysen. Gleichzeitig ist die Systemtechnik noch nicht dem Bereich der Labortechnik zuzuordnen und häufig in der industriellen Anwendung zu finden. Die aktuelle Verbreitung in der Produktion ist jedoch sehr gering.

Kategorie III deckt Messfrequenzen in einem relativ großen Spektrum von 25 bis 100 Hz ab. Sie stellt die genaueste Kategorie dar, welche sich nicht bereits in Größenordnungen von mehreren Tausend Hertz befindet. Diese Messgeräte sind jedoch sehr speziell und nicht breit am Markt vertreten. Das Hauptanwendungsgebiet neben industriellen Spezialanwendungen ist die Labortechnik.

Kategorie IV deckt mit einer Größenordnung an Messfrequenzen von ca. 1,5 bis 5 kHz die Bedürfnisse für Analysen von Oberschwingungen und somit die detaillierteste der in dieser Arbeit adressierten Energiedatenanalysen ab. Es handelt sich um vergleichsweise teure Systemtechnik, die i. d. R. nur zur Behebung akuter Probleme z. B. im Bereich der Spannungsqualität zum Einsatz kommt.

Sehr teure Labor- und Spezialgeräte erreichen in *Kategorie V* auch Größenordnungen der Abtastrate von 10 bis 25 kHz. Sie werden jedoch i. d. R. als Netzanalysatoren eingesetzt und nicht für die Analyse des Energiebedarfs einzelner Anlagen und Aggregate.

Die anzustrebenden Messfrequenzen für die in dieser Arbeit betrachteten Energiedatenanalysen liegen, wie in Abbildung 4.15 zu sehen, zwischen 1 Hz und 4 kHz. Diese lassen sich nun den eingeführten Kategorien I bis IV der erreichbaren Messfrequenzen elektrischer Messtechnik zuordnen. Damit ergibt sich eine Einteilung in die vier in die vier Bereiche von bis 1 Hz, 1 bis 10 Hz, 10 bis 100 Hz sowie 100 Hz bis 4 kHz einteilen. Dabei sind die jeweils angegebenen Messfrequenzen nicht als absolute Werte, sondern vielmehr als Größenordnungen zu verstehen, welche einen Anhaltspunkt für die Auswahl von für die jeweilige Analyse geeigneter Messtechnik bieten sollen.

Die Bereiche der relevanten Messfrequenzen sind in Abbildung 4.17 übersichtlich gezeigt. Dabei sind zunächst die Messfrequenzbänder aus der Literatur dargestellt und anschließend rechts die Messfrequenzen, welche im Rahmen dieser Arbeit als notwendig identifiziert werden konnten.

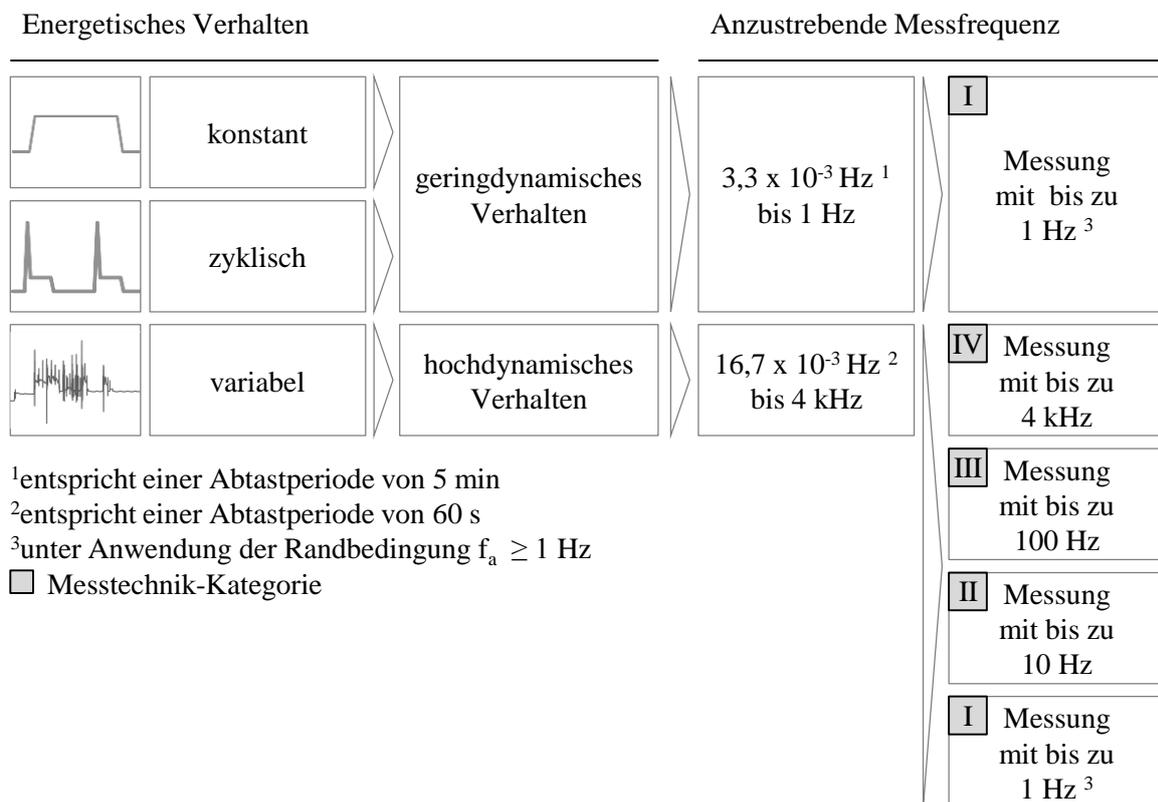


Abbildung 4.17: Definition der notwendigen Messfrequenz (in Anlehnung an [39]) in Abhängigkeit des energetischen Verhaltens (in Anlehnung an [44]) der betrachteten Anlagen oder Komponenten

Komponenten und Anlagen mit konstantem oder zyklischem und somit *geringdynamischem* energetischen Verhalten erfordern dabei eine Messfrequenz von 1 Hz und damit ein Messgerät aus Kategorie I. Energiedatenanalysen im Hinblick auf Anlagen und Komponenten mit *hochdynamischem* energetischen Verhalten sind differenzierter zu betrachten, da bei ihnen die vollständige Bandbreite an Messfrequenzen von 1 Hz bis zu 4 kHz zur Anwendung kommt. Damit folgt für diese Systeme eine weitere Unterscheidung in die vier Messtechnik-Kategorien I bis IV, wie in Abbildung 4.17 rechts zu sehen ist. Der Anwender muss folglich in die Lage versetzt werden, seine individuelle Analyseaufgabe einer dieser Kategorien zuzuordnen.

Die für die Anlagen und Komponenten mit hochdynamischem energetischen Verhalten identifizierten Bänder an Messfrequenzen müssen den in der ARM (s. Abbildung 4.2) dargestellten Analysecluster, welche die relevanten industriellen Energiedatenanalysen widerspiegeln, zugeordnet werden. Dies ist erforderlich, um es industriellen Anwendern zu ermöglichen, für eine individuell angestrebte Energiedatenanalyse eine konkrete Messfrequenz zielgerichtet auszuwählen. Abbildung 4.18 stellt die Zuordnung der einzelnen nach Betrachtungsebene eingeteilten Analysecluster zu den Messfrequenz-Bändern dar. Sie bezieht sich dabei auf die Betrachtung hochdynamischer Anlagen und Komponenten. Die Einordnung erfolgte auf Grundlage von Expertengesprächen sowie zahlreichen Fallbeispielen in der Praxis. Zudem ist durch die Einteilung gemäß der Messtechnik-Kategorien berücksichtigt, dass nur Messfrequenzen gefordert werden, welche einfach durch elektrische Messtechnik nach derzeitigem Stand der Technik realisiert werden können.

	Gesamtmaschine	Komponenten	Zustände	Produkte
100 Hz bis 4 kHz	Spannungsqualität			
10 bis 100 Hz	Spannungsqualität	Anomalieerkennung		
1 bis 10 Hz	Maximallast		Anomalieerkennung	
	Verbrauch je Komponente und Zustand			
bis 1 Hz	Verbrauchs- und Zeitanteile aufzeichnen und visualisieren			
	EnPIs berechnen und darstellen			
	Ranking	unprod. Maschinenzeit	Ranking	

Abbildung 4.18: Zuordnung der erforderlichen Messfrequenzen zu den relevanten industriellen Energiedatenanalysen für Anlagen und Komponenten mit hochdynamischem energetischen Verhalten

Für Energiedatenanalysen, welche auf Durchschnittswerten basieren, wie z. B. die Berechnung und Darstellung von EnPIs oder das Erstellen von Rankings über den durchschnittlichen Energiebedarf von Produktionsanlagen und Komponenten, ist es demnach ausreichend, die notwendigen Daten mit einer Messfrequenz von 1 Hz zu erfassen. Diese Messfrequenz ist über alle Betrachtungsebenen, also auch bei Analysen bezogen auf Zustände oder Produkte, ausreichend. Dasselbe gilt für die Analyse unproduktiver Maschinenzeiten.

Für die Identifikation der Maximallast, für Anomalieerkennungen hinsichtlich Zuständen und Produkten sowie für die Analyse des Energiebedarfs pro Komponente und Zustand reichen dagegen Daten mit 1 Hz Messfrequenz nicht aus. Dynamische Änderungen im Lastgang wie z. B. kurzzeitig auftretende Leistungspeaks sind in dieser Auflösung nicht messtechnisch erfassbar und fehlen daher als Informationsgrundlage. In diesem Fall sollte daher die nächsthöhere Kategorie verwendet werden, welche 10 Hz vorsieht. Auch das Messen und Visualisieren von detaillierten Verbrauchs- und Zeitanteilen in Abhängigkeit des Produktionsbetriebs oder einzelner Parameter findet sich über alle Produktionsebenen hinweg in dieser Genauigkeitsklasse wieder.

Für die Anomalieerkennung auf Komponentenebene sind Daten mit einer Frequenz von mindestens 100 Hz erforderlich. Dasselbe gilt für einige Auswertungen im Bereich der Analyse der Spannungsqualität. Diese finden hauptsächlich auf Maschinenebene statt und beginnen beispielsweise mit Analysen der Frequenzstabilität oder der Blindspannungsanteile. Für diese und vergleichbare Analysen ist eine Messfrequenz von ca. 100 Hz ausreichend.

Sollen hingegen weitere Merkmale der Spannungsqualität wie beispielsweise der Gesamtoberschwingungsgehalt untersucht werden, so sind Messfrequenzen in einer Größenordnung bis zu 4 kHz erforderlich.

Die hier definierten Zuordnungen von erforderlichen Messfrequenzen zu den einzelnen Analyseclustern werden im weiteren Verlauf der Arbeit beispielhaft umgesetzt und sie werden im Rahmen der Validierung kritisch hinterfragt.

4.7 Ansätze zur Reduzierung des Bedarfs an Zusatzsensorik

Die vorangegangenen Schritte haben gezeigt, dass für die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten, industriell relevanten Energiedatenanalysen Energie-, Betriebs- und Maschinendaten mit Messfrequenzen von 1 Hz bis zu 4 kHz aufgezeichnet werden müssen. Wie bereits im Abschnitt 4.6 erläutert, gelten die geforderten Qualitätsanforderungen stets für alle Datenarten, um diese auch in Relation zueinander setzen und entsprechend auswerten zu können. Mit dieser Spezifikation ist es dem Anwender möglich, geeignete Messtechnik auszuwählen und zu installieren.

Bereits zu Beginn dieser Arbeit (s. Abschnitt 1.2) wurde jedoch ersichtlich, dass hohe Investitionskosten insbesondere für KMUs ein wesentliches Hemmnis gegenüber der Durchführung von Energiedatenanalysen darstellen. Daher soll im Folgenden in Abhängigkeit des energetischen Verhaltens von Anlagen und Komponenten darauf eingegangen werden, wie der Bedarf an sog. Zusatzsensorik beispielsweise durch die

Nutzung interner Sensorik reduziert werden kann. Unter Zusatzsensorik ist dabei allgemein zusätzlich zu installierende Sensorik u. a. zur Erfassung von Energie-, Maschinen- oder Betriebsdaten zu verstehen. Es ist jedoch zu beachten, dass die Reduzierung des Bedarfs an Zusatzsensorik i. d. R. mit erhöhtem Personalaufwand sowie dem Bedarf an mobiler Messtechnik für die initiale Umsetzung verbunden ist. Häufig ist dies der Fall, um das charakteristische energetische Verhalten abzubilden und dieses in den weiteren Schritten nutzen zu können. Mit dieser initialen Untersuchung gehen i. d. R. Messungen der betrachteten Anlagen oder Komponenten über mehrere Zyklen (Durchlauf eines Standard-Produktionsprozesses oder Schaltzyklus einer Komponente) einher. Daher muss der individuelle Aufwand gegen den Nutzen dieses Vorgehens stets abgewogen werden. Bei der Anwendung an nur einer einzelnen Anlage steht die eingesparte Sensorik meist nicht in sinnvoller Relation zu den zusätzlich anfallenden Kosten. Das Ergebnis dieser Abwägung ändert sich allerdings, wenn beispielsweise eine größere Zahl an Produktionsanlagen betrachtet werden soll und somit auch eine Vielzahl an zusätzlichen Sensoren eingespart werden könnte. Da jedoch die Anzahl und die geforderte Leistungsfähigkeit der notwendigen Messpunkte mit den Produktionsebenen vom Standort hin zu einzelnen Aggregaten und damit auch das mögliche Einsparpotenzial steigt, lohnt sich die Betrachtung i. Allg. für die Maschinen- und Aggregatsebene. Der Zusammenhang zwischen Energietransparenz über die Produktionsebenen hinweg und der Anzahl der dafür erforderlichen Messpunkte ist schematisch in Abbildung 4.19 dargestellt.

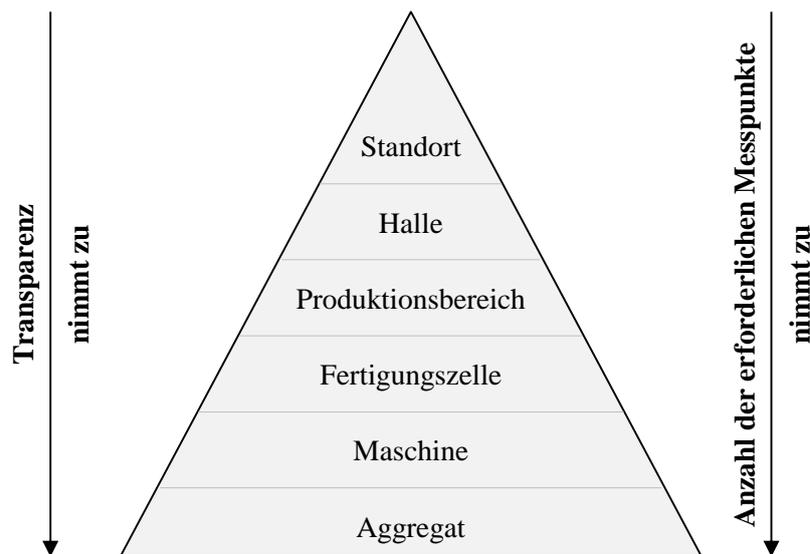


Abbildung 4.19: Anstieg der Zahl der erforderlichen Messpunkte mit steigender Energietransparenz

Abbildung 4.20 zeigt Optionen zur Reduzierung des Bedarfs an Zusatzsensorik in Abhängigkeit des energetischen Verhaltens der betrachteten Systeme auf. Jede Option kann dabei, falls sinnvoll, aus den beiden Bestandteilen der *mobilen Messung* sowie der *Nutzung von maschineninternen Steuerungsvariablen* bestehen. Die mobile Messung umfasst Informationen, die durch eine initiale Messung erfasst und anschließend auf Basis der einmalig erfassten Messdaten abgebildet werden können. Die Nutzung *maschineninterner Steuerungsvariablen* beinhaltet ergänzend dazu die Erfassung von Schaltinformationen sowie Steuerungsvariablen. Abbildung 4.20 ordnet den unterschiedlichen Alternativen rechts das jeweils erzielbare Ergebnis zu. Nachfolgend werden die einzelnen Optionen detailliert erläutert.

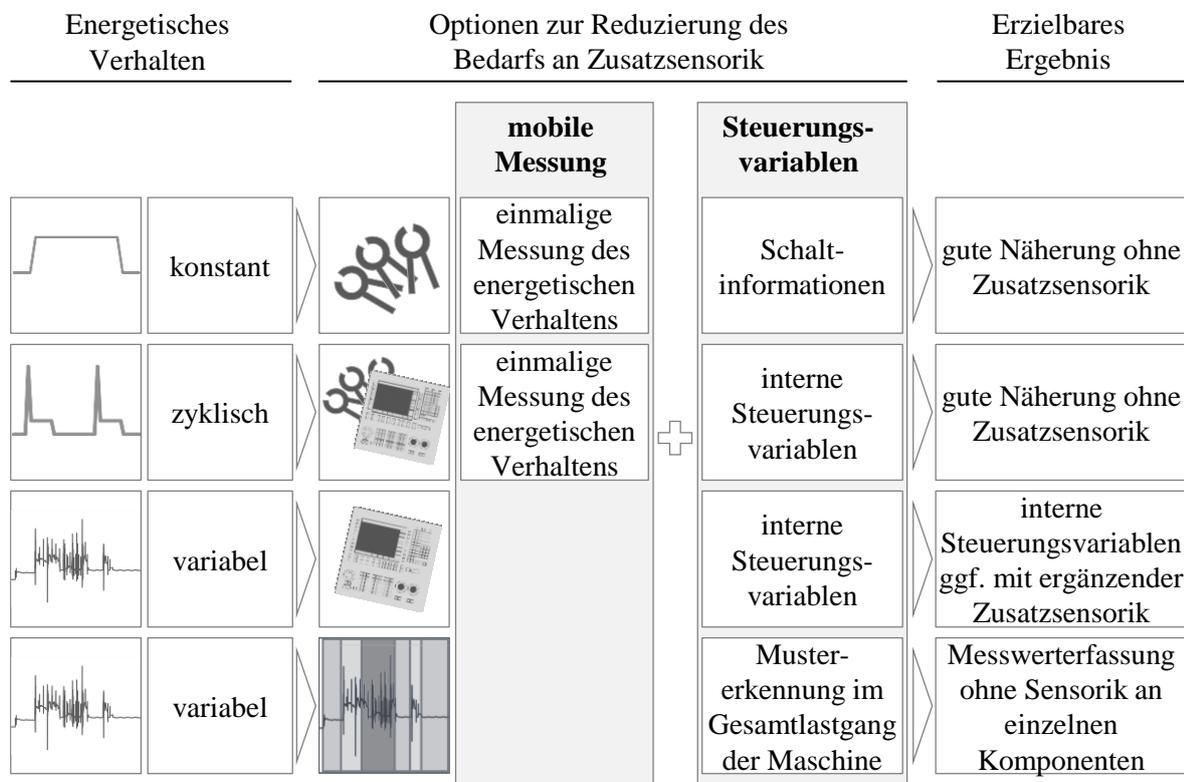


Abbildung 4.20: Ansätze zur Reduzierung des Bedarfs an Zusatzsensorik

4.7.1 Näherung durch einmalige Messung bei konstantem energetischen Verhalten

Bei konstantem energetischen Verhalten ist es alternativ zur laufenden messtechnischen Erfassung aller erforderlichen Datenarten auch möglich, das typische Lastprofil des aktiven Zustands der jeweiligen Komponente oder Anlage initial zu vermessen und mit den Schaltinformationen, welche das System aktivieren, zu verknüpfen. Nach der VDMA-Messvorschrift 34179 sollten hierfür mindestens zwei volle Zyklen des aktiven Zustands initial erfasst werden [15]. Durch das wiederkehrende Lastprofil kann die Leistungsaufnahme somit in guter Näherung und ohne Einsatz von zusätzlicher elektrotechnischer Sensorik simuliert werden, sofern die Schaltinformationen vorliegen und fortlaufend erfasst werden.

4.7.2 Näherung durch einmalige Messung bei zyklischem energetischen Verhalten

Zyklisches energetisches Verhalten von Systemen kann hier analog zum konstanten energetischen Verhalten betrachtet werden. Allerdings werden diese Systeme meist nicht durch eine Schaltinformation aktiviert. Sie melden ihren aktuellen Schaltzustand jedoch i. d. R. an die zentrale Steuerung. Während des Betriebs wird die Zielgröße (z. B. der Füllstand eines Hydraulikspeichers) durch eine Steuerung überwacht. Bei Über- oder Unterschreiten spezifizierter Grenzwerte wird das System aktiviert bzw. deaktiviert (sog. Zwei-Punkt-Regler). Da das System in der Zwischenzeit ein reproduzierbares energetisches Verhalten zeigt, kann dieses sehr gut durch eine initiale Messung erfasst und im weiteren Verlauf auf dieser Basis abgebildet werden. In Kombination mit den steuerungsintern erfassbaren Schaltzuständen lässt sich damit eine sehr gute Näherung der tatsächlichen Leistungsaufnahme ohne Einsatz von fest installierter Zusatzsensorik erreichen.

4.7.3 Nutzung steuerungsinterner Variablen bei variablem energetischen Verhalten

Bei der Betrachtung von Systemen mit variablem energetischen Verhalten gibt es unterschiedliche Ansätze, um den meist erheblichen Bedarf an hochwertiger und leistungsfähiger Zusatzsensorik zu reduzieren. Ein Ansatz verfolgt das Auslesen hoch aufgelöster interner Steuerungsvariablen. Maschinenintern werden bereits zahlreiche energiebezogene Größen, wie Motorströme und Leistungsaufnahmen, insbesondere

von Hauptkomponenten, als Regelgrößen erfasst. Diese können auch für die Auswertung für Energiedatenanalysen verwendet werden. Moderne Anlagen verfügen zudem meist über einen Sensor am Hauptanschluss, wodurch auch der Gesamtenergie- bzw. -leistungsbedarf einer Produktionsanlage ausgelesen werden kann. Bei zu wenig vorinstallierten internen Sensoren, insbesondere bei der Betrachtung von älteren Bestandsmaschinen, müssen die zur Verfügung stehenden steuerungsinternen Variablen daher ggf. durch den Einsatz von Zusatzsensorik ergänzt werden. Ein einschränkender Faktor hinsichtlich der erreichbaren Abtastfrequenzen kann dabei zudem die Leistungsfähigkeit der eingesetzten Steuerungstechnik sein. Dieser Ansatz bildet die Grundlage für die beispielhafte Umsetzung einer automatisierten Energiedatenerfassung gemäß Kapitel 5.

4.7.4 Mustererkennung bei variablem energetischen Verhalten

Der Ansatz der Mustererkennung verfolgt das Ziel, auf ergänzende Daten zu den Energiedaten, wie z. B. Maschinen- und Betriebsdaten, zu verzichten. Dabei handelt es sich um einen sog. *Supervised-Learning-Ansatz*, bei welchem aus Trainingsdaten mit Zuordnung der Daten zu den zu beschreibenden Phänomenen gelernt werden kann. Der Fokus liegt hierbei auf dem Erlernen und späteren Wiedererkennen von charakteristischem energetischen Verhalten. So könnte beispielsweise die Leistungsaufnahme eines Aggregats im Lastgang der Gesamtmaschine erkannt und somit automatisch dem richtigen Verbraucher zugeordnet werden, sofern detaillierte Trainingsdaten zur Verfügung stehen. Diese müssen i. d. R. initial manuell erfasst und eingelesen werden. Dieser Ansatz ist grundsätzlich jedoch nur anwendbar, wenn es sich um Vorgänge mit einer hohen Reproduzierbarkeit handelt. Denkbar wäre ein Einsatz daher insbesondere in der Massen- oder Großserienproduktion, welche bei KMUs selten anzutreffen ist. Zudem ist die Betriebs- und Maschinendatenerfassung insbesondere im Bereich der Massenfertigung meist bereits umfassend vorhanden, wodurch der Einsatz von Mustererkennung dort nur einen sehr begrenzten Mehrwert stiften kann.

Im Folgenden zeigt ein Fallbeispiel den Einsatz von Mustererkennung für die Analyse des produktspezifischen energetischen Verhaltens einer spanenden Werkzeugmaschine. Für drei verschiedene spanende Bearbeitungsprozesse gibt Abbildung 4.21 das Ergebnis der automatisierten Erkennung der jeweiligen Start- und Endzeitpunkte der Prozesse wieder. Umgesetzt wurde dieses Beispiel auf Grundlage der Kreuzkorrelationsfunktion, welche allgemein die Ähnlichkeit zweier Signale im Zeitbereich beschreibt.

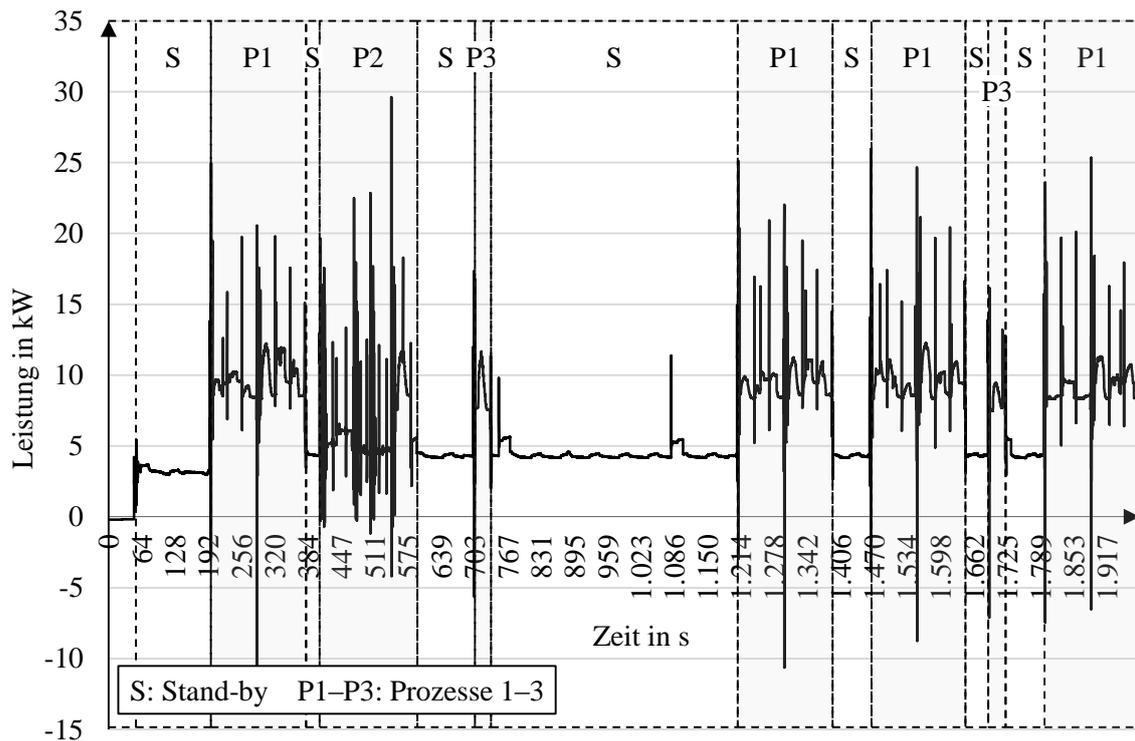


Abbildung 4.21: Automatische Erkennung von einzelnen Prozessen im Lastgang einer Werkzeugmaschine durch Mustererkennung (in Anlehnung an [64])

Die Kreuzkorrelationsfunktion ϕ_{xy} der Signale $x(n)$ und $y(n)$ lautet hierbei [71]:

$$\phi_{xy}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n+k) \cdot y(n) \quad (4.7)$$

Dabei beschreibt N die Signallänge und k den zeitlichen Versatz zwischen den beiden Signalen. Für zwei identische Signale $x(n)$ und $y(n)$ nimmt die Kreuzkorrelation ϕ_{xy} den Wert 1, für zwei gegenphasige Signale den Wert -1 an. Für zwei voneinander unabhängige Signale wird ϕ_{xy} zu 0.

Das Ergebnis zeigt grundsätzlich eine hohe Trefferquote. Allerdings ist in diesem Fall die reine Mustererkennung nicht ausreichend, um die Prozesse korrekt zuzuordnen. Bestandteile eines längeren Bearbeitungsprozesses (z. B. P1) werden teilweise als eigener Prozess fehlinterpretiert (z. B. P3), wenn einzelne enthaltene Bearbeitungsschritte sich gleichen. Die Beispiele zeigen einen sehr großen Unterschied in der Prozesslaufzeit und begünstigen damit das Auftreten dieser Problematik. Dieses Phänomen tritt jedoch auch bei geringeren Abweichungen auf und kann durch Zusatzinfor-

mationen wie die erwartete Prozessdauer vermieden werden. Zudem ist zu berücksichtigen, dass eine ausreichende Anzahl an Datensätzen für das Trainieren der Algorithmen verwendet werden muss, um statistische Schwankungen sowie das zufällige Zuschalten von Nebenaggregaten abzudecken. Zudem entsteht initial ein großer manueller Aufwand, um die Trainingsdaten für jeden einzelnen Prozess aufzuzeichnen und die Lernprozesse durchzuführen. Für das gezeigte Beispiel wurde zudem der Stand-by-Zustand hinterlegt, um das jeweilige Ende der Prozesse präziser zu erkennen. Auch muss die minimal erreichbare Fehlerquote manuell überprüft werden, um bei zu geringer Leistungsfähigkeit ggf. weitere Lernvorgänge mit zusätzlichen Trainingsdaten durchzuführen. Hierfür ist aktuell noch viel Zeit und Fachwissen sowohl im Bereich der Mustererkennung wie auch im Bezug auf die zu betrachtenden Produktionsanlagen und -prozesse erforderlich. Ist der Algorithmus lauffähig, kann die Mustererkennung automatisch erfolgen.

Das Verfahren der Mustererkennung bietet einige Vorteile gegenüber der messtechnischen Erfassung der Leistungsaufnahme jeder einzelnen Anlage oder Komponente. Im vorliegenden Beispiel gilt dies in erster Linie für die Reduzierung des Bedarfs an Sensorik für die Erfassung detaillierter Maschinendaten. Es ist jedoch heute noch mit erheblichem Aufwand verbunden, ein solches System zu implementieren. Dies liegt insbesondere daran, dass als Trainingsdaten mehrere Wiederholungen der zu erfassenden Prozesse inkl. der Maschinendaten zur Identifikation der Prozesse im Lastgang erforderlich sind. Dies ist i. d. R. manuell durchzuführen. Dieser Vorgang muss bei jeder Änderung, z. B. bei Einführung eines neuen Produktionsprozesses auf der betrachteten Anlage oder auch nur bei einer Änderung in einem der bestehenden Programme, neu durchgeführt werden. Der Einsatz der Mustererkennung erscheint daher nur für die Massenfertigung sinnvoll, welche bei KMUs jedoch nicht verbreitet ist.

Aus diesen Gründen wird der Einsatz der Mustererkennung zur Reduzierung des Bedarfs an Zusatzsensorik bei der Analyse von Anlagen und Komponenten mit variablem energetischen Verhalten in dieser Arbeit nicht weiterverfolgt. Der Fokus der beispielhaften Umsetzung liegt somit auf der Nutzung steuerungsinterner Variablen.

4.8 Zusammenfassung

Die in Kapitel 4 entwickelte und nun zur Verfügung stehende *Methode zur systematischen Energiedatenerfassung in der Produktion* kann der Anwender als Handlungsleitfaden verwenden, um die erforderliche Datengrundlage für seine individuell angestrebte Energiedatenanalyse zu definieren. Die ARM stellt dafür eine Einteilung der relevanten Analysen in Analysecluster zur Verfügung. Darauf aufbauend können mit Hilfe der AIM die erforderlichen Datenarten abgeleitet und in Abhängigkeit des energetischen Verhaltens des zu betrachteten Systems die erforderliche Messfrequenz ausgewählt werden. Damit ist es auch ohne spezifisches Fachwissen für die Schnittmenge der beiden Bereiche der Produktion sowie der energetischen Fragestellungen möglich, Energiedatenanalysen effizient und zielgerichtet durchzuführen.

Für die Umsetzung der entwickelten *Methode zur systematischen Energiedatenerfassung in der Produktion* wird im nachfolgenden Kapitel 5 beispielhaft der Aufbau eines Systems zur automatisierten Energiedatenerfassung auf Basis von internen Steuerungsvariablen beschrieben.

5 Beispielhafte Umsetzung einer automatisierten Energiedatenerfassung

5.1 Kapitelüberblick

Als Grundlage für eine Anwendung und Validierung der entwickelten Methode ist es zunächst erforderlich, eine automatisierte Energiedatenerfassung beispielhaft umzusetzen. Das vorliegende Kapitel zeigt dies beispielhaft für zwei spanende Werkzeugmaschinen sowie deren einzelne Komponenten. Wie bereits im Abschnitt 4.7 beschrieben, können allgemein folgende Ansätze zur Reduzierung des Bedarfs an Zusatzsensorik zur Anwendung kommen:

- Näherung durch einmalige Messung für Komponenten mit konstantem oder zyklischem energetischen Verhalten
- Nutzung steuerungsinterner Variablen für Komponenten mit variablem energetischen Verhalten

Die beispielhafte Umsetzung sollte möglichst ohne den Einsatz von Zusatzsensorik auskommen und stattdessen auf steuerungsinterne Größen zurückgreifen. Hierfür beschreibt der folgende Abschnitt 5.2 die Realisierung der automatisierten Zuordnung von Maschinen-, Produktions- und Energiedaten zueinander als Basis für die Durchführung von Energiedatenanalysen. Die Komponenten mit konstantem oder zyklischem energetischen Verhalten wurden initial manuell vermessen und anschließend auf Grundlage der Schaltsignale der Maschinensteuerung modelliert.

Um die Durchführung automatisierter Energiedatenerfassungen auf Basis steuerungsinterner Regelgrößen zu ermöglichen, ist ein zweiteiliger Versuchsaufbau notwendig, wie schematisch in Abbildung 5.1 dargestellt. Er besteht aus einem Datenlogger zur Erfassung der steuerungsinternen Variablen aus der PLC (engl. Programmable Logic Controller) und dem NCK (engl. Numerical Control Kernel) sowie einem Analysetool zur Datenverarbeitung und -visualisierung. Dabei handelt es sich bei der PLC um die SPS der Maschine sowie bei dem NCK um den Numerik-Kern u. a. zur Satzaufbereitung und zur Berechnung der Verfahrbewegungen.

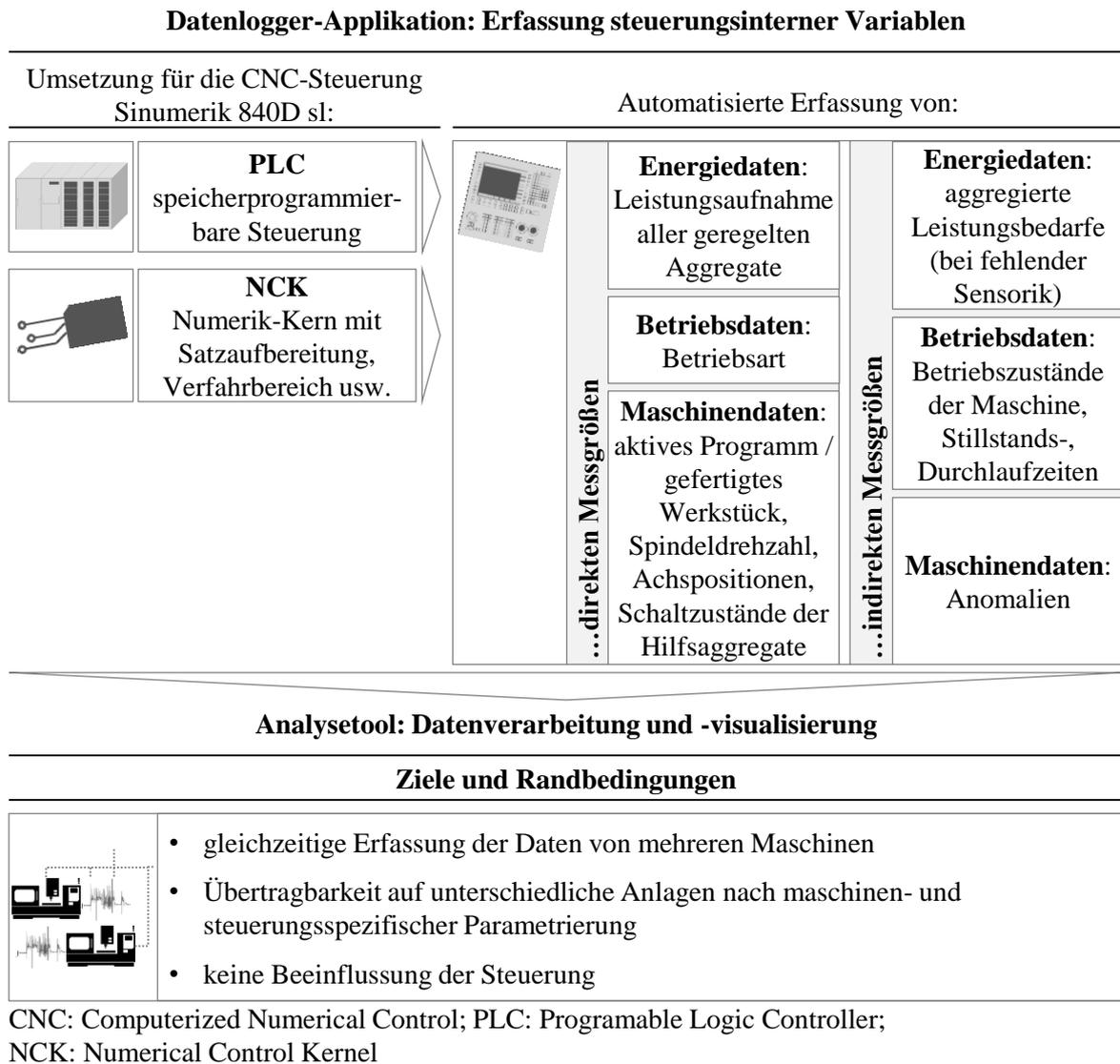


Abbildung 5.1: Konzept für die beispielhafte Umsetzung einer automatisierten Energiedatenerfassung auf Basis steuerungsinterner Variablen

Wie in Abbildung 5.1 zu sehen, werden dabei direkte und indirekte Messgrößen durch den Datenlogger erfasst. Zu den direkten Messgrößen zählen unter anderem die Leistungsaufnahme der geregelten Maschinenkomponenten (z. B. Vorschubantriebe, Motorspindel etc.), die Betriebsart sowie die durch steuerungsinterne Variablen erfassbaren Maschinendaten. Letztere beinhalten u. a. auf Maschinenebene das aktive NC-Programm und den aktiven NC-Schritt sowie auf Aggregateebene die Spindeldrehzahl, die Achspositionen und die Schaltzustände der Hilfsaggregate. Auf dieser Datengrundlage kann die Datenverarbeitung und -visualisierung mithilfe des Analysetools erfolgen. Innerhalb des Analysetools werden einige Energiedatenanalysen bei-

spielhaft umgesetzt und die Ergebnisse dargestellt. Wesentliche Anforderungen waren dabei die Übertragbarkeit des Versuchsaufbaus auf andere Anlagen sowie die Möglichkeit, die Daten mehrerer Maschinen gleichzeitig zu erfassen. Zudem war eine Beeinflussung der Maschinensteuerung auszuschließen, um den ungestörten Ablauf der Produktionsprogramme sicherzustellen.

Für den Aufbau der beispielhaften Umsetzung stand das horizontale 5-Achs-Fräsbearbeitungszentrum *Grob G350* der GROB-Werke GmbH & Co. KG (Baujahr 2013), ausgestattet mit einer 52-kW-Motorspindel (maximale Drehzahl: 12.000 min^{-1}) und einer Siemens-Maschinensteuerung Sinumerik 840D sl (engl. Solution Line, Softwarestand 2.06) zur Verfügung.

Um im Anschluss an die erste Umsetzung die Übertragbarkeit auf andere Anlagen zu überprüfen, wurde ein weiteres Bearbeitungszentrum genutzt. Dabei handelt es sich um das vertikale 5-Achs-Fräsbearbeitungszentrum *Spinner U5-620* der Spinner Werkzeugmaschinenfabrik GmbH (Baujahr 2014), ausgestattet mit einer Hochgeschwindigkeitsspindel (maximale Drehzahl: 20.000 min^{-1}) und ebenfalls einer Siemens-Maschinensteuerung Sinumerik 840D sl (engl. Solution Line, Softwarestand 2.06).

Der nachfolgende Abschnitt 5.2 beschreibt die praktische Umsetzung der Datenlogger-Applikation. Der resultierende Versuchsaufbau zur automatisierten Erfassung von Energie-, Betriebs- und Maschinendaten wird zudem hinsichtlich seiner messtechnischen Leistungsfähigkeit bewertet. Auf dieser Grundlage konnten gemäß Abschnitt 5.3 beispielhafte Energiedatenanalysen im Analysetool umgesetzt und visualisiert werden. Auch daran schließt sich eine Bewertung an, welche die Genauigkeit der Energiedatenerfassung mittels steuerungsinterner Sensorik betrachtet, da hierbei die Leistungsaufnahmen der Komponenten mit konstantem oder zyklischem energetischen Verhalten nicht gemessen, sondern mittels deterministischer Modelle abgebildet wurden.

5.2 Datenlogger-Applikation

Die Datenlogger-Applikation dient dazu, Energie-, Betriebs- und Maschinendaten automatisiert aus der Maschinensteuerung auszulesen. Das zu entwickelnde System auf Basis der Software ACCON-AGLink der Firma DELTALOGIC Automatisierungstechnik GmbH dient der beispielhaften Umsetzung und sollte dabei kostengünstig sowie flexibel programmierbar sein. Für die industrielle Umsetzung, wenn beispielsweise das Kriterium der freien Programmierbarkeit nicht angestrebt wird, können auch kommerzielle Systeme verwendet werden. Diese werden von Unternehmen aus den Bereichen der Steuerungs- und Automatisierungstechnik angeboten und bei Bedarf an die individuellen Kundenwünsche angepasst.

5.2.1 Aufbau und Funktionsweise

Um die Datenlogger-Applikation aufbauen zu können, musste zunächst das Steuerungssystem der CNC-Steuerung Sinumerik 840D sl analysiert werden. Die Systemanalyse und die konkrete Umsetzung der Datenlogger-Applikation sind steuerungs- sowie maschinenspezifisch. Das Vorgehen kann jedoch analog auch für andere Systeme durchgeführt werden. Abbildung 5.2 zeigt eine schematische Übersicht über die wesentlichen Bestandteile des Steuerungssystems der CNC-Maschinensteuerung Sinumerik 840D sl der Siemens AG.

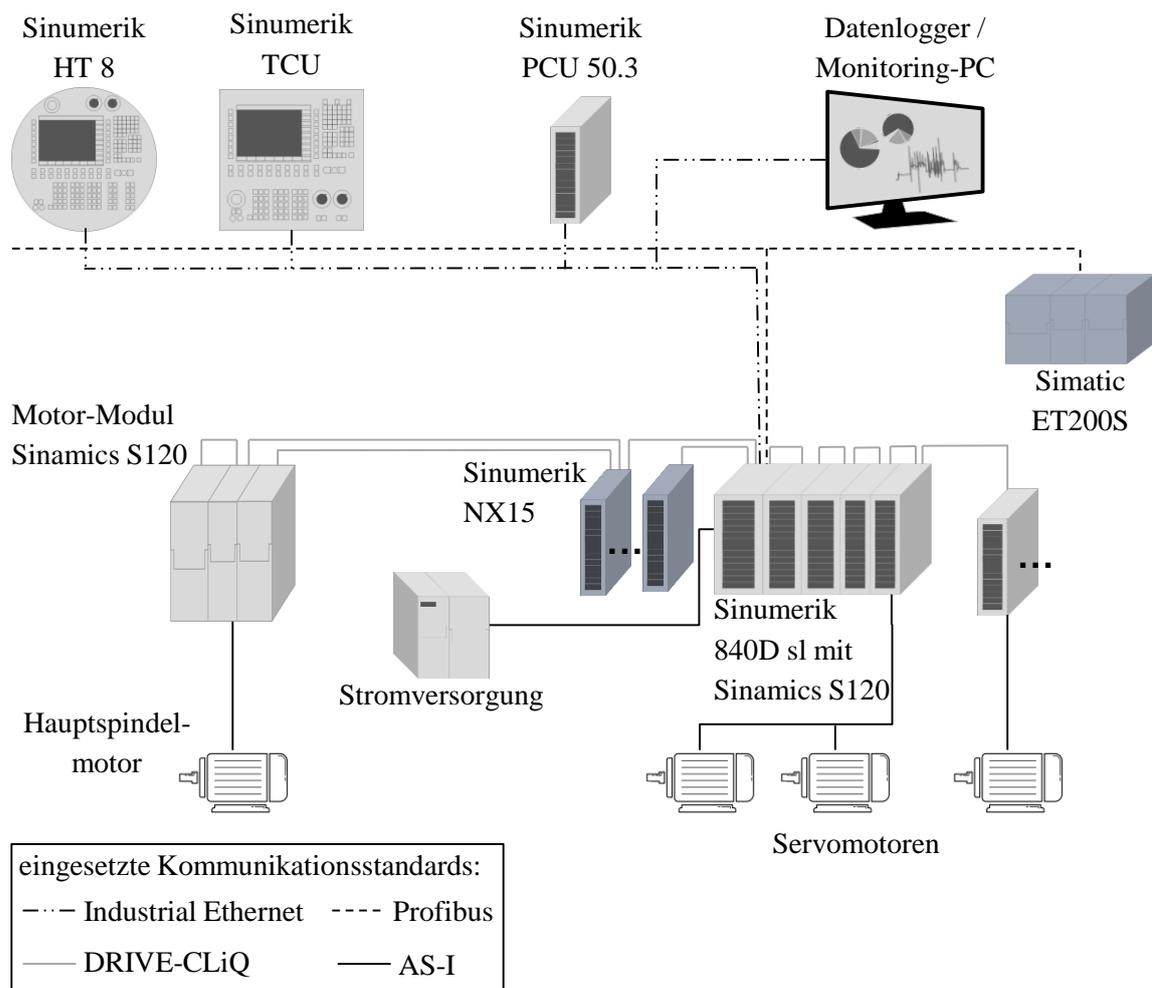


Abbildung 5.2: Übersicht über das Steuerungssystem der CNC-Maschinensteuerung Sinumerik 840D sl der Siemens AG (in Anlehnung an [72])

Tabelle 5.1 beschreibt die darin aufgeführten Kommunikationsstandards sowie die Bestandteile der jeweils in der Grob G350 sowie der Spinner U5-620 eingesetzten Maschinensteuerung. Unter dezentraler Peripherie ist dabei allgemein eine über ein Bussystem an eine zentrale CPU (engl. Central Processing Unit) angebundene, verteilte Steuerungselektronik zu verstehen.

Tabelle 5.1: Beschreibung der wesentlichen Bestandteile der CNC-Maschinensteuerung Sinumerik 840D sl der Siemens AG sowie der eingesetzten Kommunikationsstandards

Bezeichnung	Beschreibung
Kommunikationsstandards	
Industrial Ethernet	echtzeitfähiger Standard zur lokalen Vernetzung von Rechnersystemen [73]; Einsatzgebiet hier: Kommunikation der Bediengeräte
AS-I	Actuator Sensor Interface nach DIN EN 50295; serielles Übertragungssystem auf unterster Feldebene in der Automatisierungshierarchie zur binären Verbindung von Sensoren und Aktuatoren mit Steuerungen über ein sog. Sensor/Aktuator-Bussystem [74]; Einsatzgebiet hier: Kommunikation der dezentralen Peripherie
DRIVE-CLiQ	offene Geberschnittstelle, eingesetzt als Systemschnittstelle des Antriebssystems SINAMICS [75], Einsatzgebiet hier: Kommunikation innerhalb des Antriebssystems
Profibus	serielles, echtzeitfähiges Bussystem nach DIN 19245; stellt im Bereich der Feldbusse den leistungsfähigsten, aber auch aufwendigsten Standard dar [74]; Einsatzgebiet hier: Kommunikation der zentralen Steuerungskomponenten
Bestandteile der Maschinensteuerung SINUMERIK 840d SL	
Sinumerik HT8	tragbares Handbediengerät
Sinumerik TCU / PCU 50.3	feste Bedieneinheit (engl. Human Machine Interface HMI) bestehend aus Bedientafelfront und Thin Client Unit (TCU) bzw. Industrie-PC (PCU-Recheneinheit)
Sinumerik NX15	Erweiterungsmodul der Antriebsregelung auf eine größere Anzahl an Achsen
Sinumerik NCU 730.2	Numerical Control Unit (NCU): Hardware-Einheit des NCK (engl. Numerical Control Kernel: Numerik-Kern mit Satzaufbereitung, Verfahrbereich usw.)
SINUMERIK 840D sl mit Sinamics S120	zentrale Maschinensteuerung mit zusätzlicher dezentraler Peripherie zur Herstellung der Verbindung zwischen CPU und verteilter Steuerungselektronik
Simatic ET200S	dezentrales, feinmodulares Peripheriesystem mit lokaler Intelligenz; enthält drei Standard- und zwei fehlersichere CPUs
Sinamics S120 Motor-Modul	System zur Ansteuerung der Antriebe

Für die Durchführung von Energiedatenanalysen sind insbesondere die Informationen aus der NCU sowie der Simatic S7 von Interesse. Das Auslesen aus der NCU, insbesondere der NCK-Einheit, ist u. a. für folgende Informationen erforderlich:

- Positionsvariablen der Hauptantriebe, z. B. Achspositionen
- weitere Regelgrößen der Hauptantriebe, z. B. Spindeldrehzahl
- Wirkleistungsaufnahmen der geregelten Hauptantriebe
- Werkzeugdaten
- aktives Programm
- aktiver NC-Schritt

Aus der Simatic S7 (SPS) können ergänzend dazu u. a. folgende Informationen ausgelesen werden:

- Maschinenzustand
- Betriebsart
- Not-Halt aktiv / inaktiv
- Schaltzustände der Hilfsantriebe bzw. -aggregate
- Füllstände von Tanks, Zustände von Türen, Freigabe von Sicherheitsbereichen, Stellungen von Wahl- und Schlüsselschaltern etc.

Zu den Hilfsantrieben bzw. -aggregaten zählen dabei z. B. die Absaugung, das Hydrauliksystem, die Maschinenkühlung, die Kühlschmierstoffversorgung und der Späneförderer.

Um auf die gewünschten Informationen zugreifen zu können, wurde eine TCP/IP- (engl. Transmission Control Protocol/Internet Protocol)Schnittstelle zur Industrial Ethernet-Verbindung zwischen HMI und PCU verwendet, welche beispielsweise für die Anbindung an ein Firmennetzwerk bereits vorgesehen ist. Das Zugreifen auf das Industrial-Ethernet-Netz hat neben dieser Schnittstelle noch einen weiteren Vorteil, denn so werden hierüber nur weniger kritische Systeme wie Anzeige- und Bedienkomponenten direkt angesteuert. Grundsätzlich werden die Anfragen des Datenloggers mit niedriger Priorität an das Bussystem gestellt, um die Leistungsfähigkeit für die Kernaufgaben des Systems nicht einzuschränken. Sollte es im Fehlerfall doch zu einer Beeinflussung und somit zu einer verlangsamten Reaktionsfähigkeit kommen, hat dies keinen Einfluss auf den ablaufenden Prozess oder auf sicherheitsrelevante Funktionen. Eine weitere Sicherheitsmaßnahme ist die vollständige Vermeidung schreibender Funktionen.

Um das Auslesen der einzelnen Variablen zu ermöglichen, sind folgende steuerungsspezifische Limitierungen zu berücksichtigen:

- Für die beiden Systeme (PLC und NCU) ist jeweils eine eigene Verbindung erforderlich.
- Jeder Auftrag darf die maximale, steuerungsspezifisch definierte Größe (Größe einer sog. Protocol Data Unit – PDU) nicht überschreiten. Die Größe des Auftrags setzt sich dabei aus der Anzahl, den Datentypen der Variablen sowie der Größe des Headers zusammen, welcher für das jeweils verwendete Protokoll notwendig ist.
- Die Daten aus der NCU sind im Falle des vorliegenden Systems in die zwei Bereiche der Vorschub- und der Hauptantriebe (z. B. Motorspindel) eingeteilt. Für die beiden Bereiche müssen grundsätzlich getrennte Aufträge erstellt werden. Zudem können nur Aufträge von bis zu 19 Variablen (steuerungsspezifischer Grenzwert) verarbeitet werden. Außerdem muss bei der Datenverarbeitung berücksichtigt werden, dass die Werte in umgekehrter Byte-Reihenfolge zurückgegeben werden (systemseitige Festlegung).

Diese Limitierungen führen zwangsläufig zu einer Erhöhung der Anzahl an Einzelaufträgen, welche für die Erfassung von Variablen an das System gestellt werden müssen. Damit haben sie auch einen direkten negativen Einfluss auf die erreichbare Abtastfrequenz. Neben den Datentypen sowie der Anzahl der auszulesenden Variablen wirkt sich somit auch die jeweilige Kategorie und somit der steuerungssinterne Speicherort der Daten auf die erreichbare Abtastrate aus. Um diese negativen Einflüsse zu reduzieren, wurden daher Ansätze des sog. Multithreadings angewandt. Dabei werden auf Basis von Unterprogrammen mehrere Anfragen quasi-gleichzeitig bearbeitet. Dies ist erforderlich, um nicht nur mehrere Aufträge, sondern auch mehrere Maschinen gleichzeitig abfragen und deren Daten aufzeichnen zu können.

Die abgerufenen Daten sind gemäß S7-Standardprotokoll kodiert und müssen dekodiert werden. Hierzu steht unterschiedliche Software (z. B. ACCON-AGLink der Firma DELTALOGIC) zur Verfügung, u. a. auch als Open-Source-Software. Nach der Dekodierung liegen die Daten in Klartext und somit in lesbarer Form vor und können an das Analysetool zur Verarbeitung und Visualisierung übergeben werden.

Abbildung 5.3 zeigt eine Übersicht, aus welchen wesentlichen Modulen das Datenlogger-System besteht. Der Nutzer spezifiziert in maschinen- und steuerungsspezifischen Konfigurationsdateien, welche Variablen erfasst werden sollen. Diese in einer CSV-Datei abgelegten Informationen werden durch das CSV-Import-Modul eingelesen. Zusätzlich gibt der Nutzer über die Bedienoberfläche des HMI-Moduls (in der

Abbildung 5.3 rechts) weitere Aufzeichnungsparameter an, wie z. B. die angestrebte Abtastfrequenz und die Dauer der Aufzeichnung. Die Messung kann alternativ auch für einen unbestimmten Zeitraum gestartet und manuell beendet werden. Auf Grundlage dieser Informationen erstellt das Datenaufzeichnungs-Modul die auszulösenden Aufträge und sendet diese für die unterschiedlichen Threads quasi-parallel an die betreffenden Maschinensteuerungen. Die Threads sind im vorliegenden Anwendungsbeispiel je einem Maschinenmodul zugeordnet. Die erhaltenen Daten werden aufgezeichnet und entweder als CSV-Datei oder über eine SQL-Datenbank abgelegt. Parallel zur Aufzeichnung zeigt das HMI wesentliche Informationen für den Nutzer an.

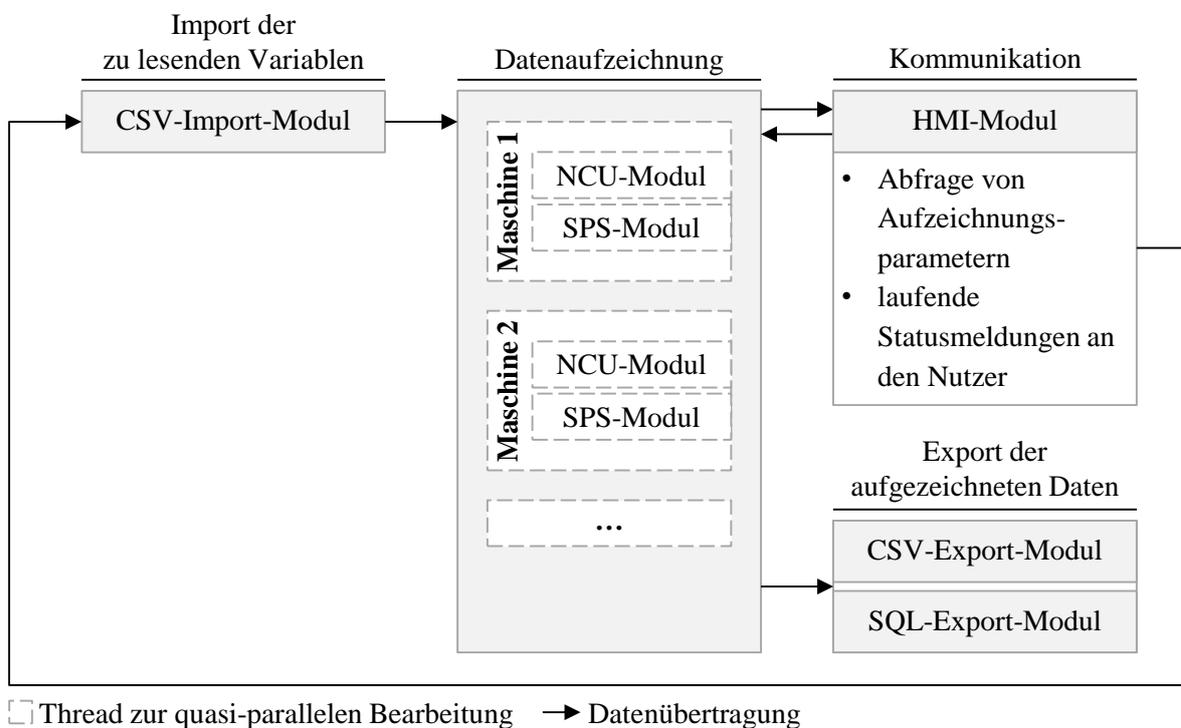


Abbildung 5.3: Wesentliche Module der Datenlogger-Applikation

Aufgrund der bereits aufgeführten Limitierungen kann es bei dem bestehenden System dazu kommen, dass die vom Nutzer vorgegebene Abtastfrequenz nicht erreicht wird. Die Datenlogger-Applikation zeichnet die Daten in diesem Fall mit der maximal erreichbaren Frequenz auf.

In der Analysis-Input-Matrix (s. Abbildung 4.12) wurden die für die industriell relevanten Energiedatenanalysen erforderlichen Inputs definiert und zusammengefasst. Im Rahmen der beschriebenen beispielhaften Umsetzung der Datenlogger-Applika-

tion können nahezu alle der geforderten Datenarten erfasst werden. Die einzige Ausnahme hiervon bildet die Blindleistung am Maschineneingang, welche für die Beurteilung der Spannungsqualität notwendig ist. Zu deren Erfassung fehlt an beiden zur Verfügung stehenden Beispielmachines entsprechende Sensorik. Eine Beurteilung der Spannungsqualität erfordert zudem auch sehr hohe Messfrequenzen (bis zu 4 kHz). Diese sind aufgrund der Einschränkungen hinsichtlich der Rechenkapazitäten der Maschinensteuerungen sowie der Leistungsfähigkeit der Kommunikationssysteme ebenfalls nicht umsetzbar.

Abbildung 5.4 zeigt anhand der AIM, welche Inputs durch die entstandene Datenlogger-Applikation erfasst werden können. Wie beschrieben, haben diese Angaben für beide Versuchsanlagen (Grob G350 sowie Spinner U5-620) Gültigkeit.

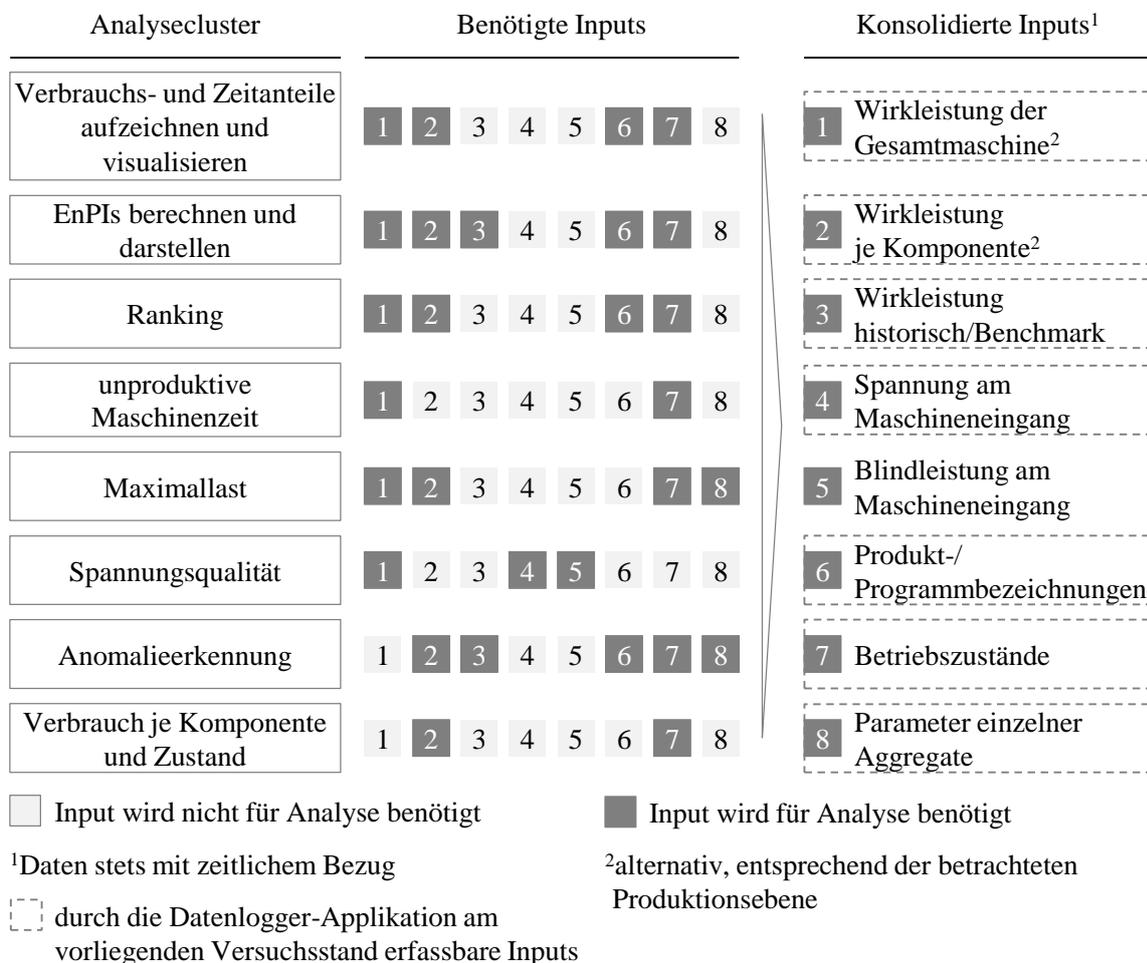


Abbildung 5.4: Beispielhafte Umsetzung im Versuchsaufbau: Durch den Datenlogger erfassbare Datenarten auf Grundlage der AIM (s. Abbildung 4.12; in Anlehnung an [17])

Die strukturiert abgelegten Daten stehen für die Weiterverarbeitung und Visualisierung durch das Analysetool zur Verfügung.

5.2.2 Messtechnische Leistungsfähigkeit

Eine hohe Qualität und Leistungsfähigkeit des Versuchsaufbaus zur automatisierten Erfassung von Energie-, Betriebs- und Maschinendaten ist eine wesentliche Voraussetzung für die Entwicklung und Umsetzung des Analysetools. Welche Energiedatenanalysen sich auf Maschinen- und Aggregatsebene auf Grundlage des bestehenden Versuchsaufbaus umsetzen lassen, hängt wesentlich von der messtechnischen Leistungsfähigkeit der Datenlogger-Applikation ab, welche im Folgenden kritisch beleuchtet wird.

Um die messtechnische Leistungsfähigkeit des Versuchsaufbaus beurteilen zu können, müssen die mit der Datenlogger-Applikation erreichbaren Messfrequenzen analysiert und quantifiziert werden. Wie bereits im Abschnitt 5.2 erläutert, bestehen einige steuerungsspezifische Einschränkungen, die für das Auslesen der Variablen einzuhalten sind. Hierdurch kommt es zu einer Reduzierung der erreichbaren Messfrequenzen insbesondere mit einer steigenden Anzahl an auszulesenden Steuerungsvariablen. Um diesen Zusammenhang zu quantifizieren, zeigt Abbildung 5.5 die Ergebnisse entsprechender Versuchsreihen.

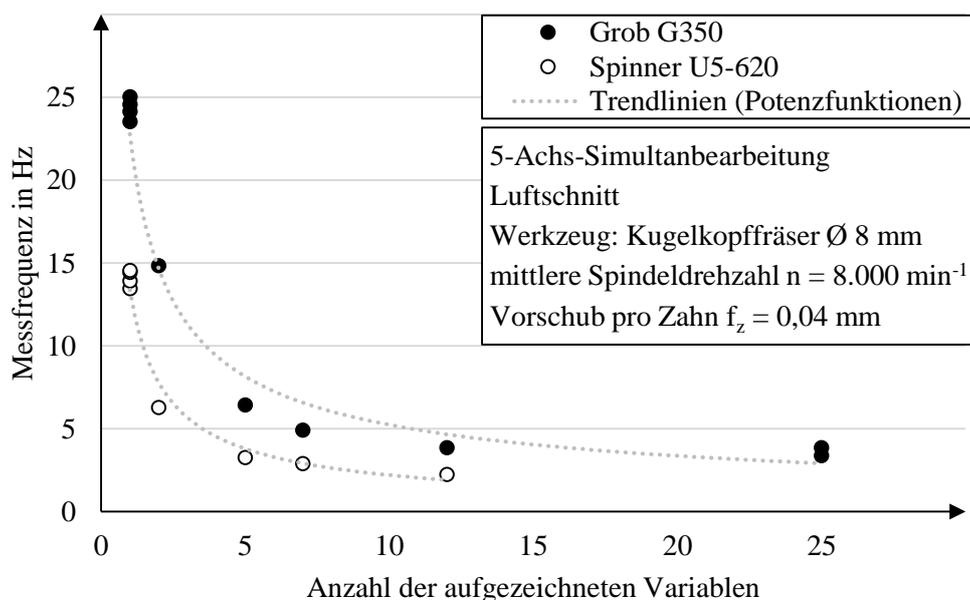


Abbildung 5.5: Abhängigkeit der im Rahmen der Datenlogger-Applikation erreichbaren Messfrequenzen von der Anzahl der aufgezeichneten Variablen

Hierfür wurde mehrmals eine identische 5-Achs-Simultanbearbeitung auf den beiden Bearbeitungszentren Grob G350 und Spinner U5-620 im Luftschnitt durchgeführt. Auf die Zerspanung selbst konnte hierbei verzichtet werden, da sie keinen Einfluss auf die Auslastung der Maschinensteuerung hat und auf diese Weise eine sehr hohe Versuchsanzahl ohne Verbrauchsmaterial möglich ist. Das Resultat zeigt eine stark abfallende erreichbare Messfrequenz in Abhängigkeit von der Variablenanzahl. Signifikant ist zudem eine Stabilisierung der Messfrequenz ab einer Anzahl von ca. 12 Variablen. Auch ist eine starke maschinenspezifische Abhängigkeit zu sehen: Die maximal erreichbare Messfrequenz bei der Aufzeichnung einer Steuerungsvariable liegt bei der Spinner U5-620 bei 14,56 Hz, wohingegen sich mit der Grob G350 Frequenzen von bis zu 25,04 Hz erzielen lassen. Beide Anlagen sind jedoch mit derselben Maschinensteuerung SINUMERIK 840D sl von Siemens ausgestattet sowie mit der Simatic ET 200S mit identischer CPU, welche als dezentrale Peripherieeinheit (SPS) ebenfalls einen wesentlichen Einfluss auf die Kommunikationsgeschwindigkeit hat. Es handelt sich somit um weitere maschinen- und herstellerspezifische Effekte. Diese müssen bei der Installation vergleichbarer Systeme auf unterschiedlichen Produktionsanlagen als Einschränkung berücksichtigt werden.

Die Messung von nur einer Variablen wurde zudem für beide Anlagen vier Mal für je eine unterschiedliche Variable wiederholt, um auch für diesen Fall die auftretenden Schwankungen zu zeigen. Die Frequenzen bewegen sich dabei bei der Spinner U5-620 zwischen 14,56 und 13,46 Hz und bei der Grob G350 zwischen 25,04 und 23,54 Hz.

Damit ist der zur Verfügung stehende Versuchsstand, bestehend aus den beiden Bearbeitungszentren Spinner U5-620 und Grob G350 sowie den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten und implementierten Systeme der Datenlogger-Applikation und des Analysetools, nur für eine Auswahl der relevanten Energiedatenanalysen geeignet.

In Anlehnung an Abbildung 4.18 können je nach erforderlicher Anzahl an Steuerungsvariablen nur die Energiedatenanalysen mit einer notwendigen Messfrequenz von bis zu 1 oder bis zu 10 Hz durchgeführt werden. Sind 10 Hz erforderlich, so ist hier eine erhebliche Einschränkung gegeben, da nur auf eine geringe Anzahl von bis zu drei Variablen zurückgegriffen werden kann. Dies schließt insbesondere auf Maschinenebene die Durchführung der meisten Energiedatenanalysen aus, da für diese meist auf alle wesentlichen Komponenten sowie die aktuellen Maschinendaten zurückgegriffen werden müsste.

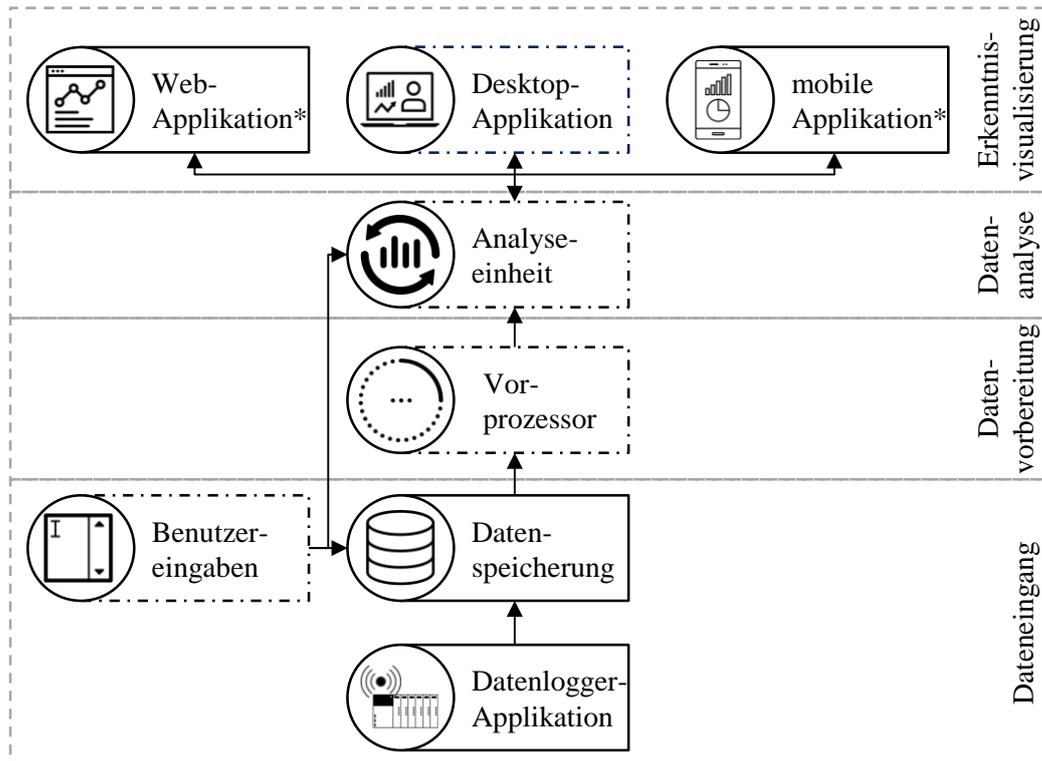
Das zur Verfügung stehende System stellt eine Lösung für die experimentelle Untersuchung im Forschungsumfeld dar. Aktuell arbeiten zahlreiche Hersteller von Steuerungen und Digitalisierungslösungen an Systemen, welche es zukünftig ermöglichen sollen, hochfrequent interne Variablen aus Maschinensteuerungen auszulesen. Diese zukünftigen Systeme werden nur für Maschinensteuerungen der neuesten Generation anwendbar sein. Die Entwicklung der Datenlogger-Applikation sowie des Analysetools repräsentiert daher das Vorgehen für die Systemanalyse bei Bestandsanlagen. Auch werden die erreichbaren Möglichkeiten sowie die damit verbundenen Einschränkungen sichtbar.

5.3 Analysetool

Das Analysetool baut auf den durch die Datenlogger-Applikation zur Verfügung gestellten Daten auf. Die wesentliche Aufgabe im Rahmen der vorliegenden Arbeit war es, beispielhafte Energiedatenanalysen umzusetzen. Dafür müssen die Daten verarbeitet und die Ergebnisse visualisiert werden. Das Analysetool dient einerseits der Veranschaulichung von Energiedatenanalysen anhand ausgewählter Beispiele. Zudem bildete es die Grundlage, um die in dieser Arbeit entwickelte *Methode zur systematischen Energiedatenerfassung in der Produktion* exemplarisch umsetzen und bewerten zu können. Die folgenden Abschnitte gehen einerseits auf den Aufbau und die Funktionsweise des Analysetools ein. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf den umgesetzten Energiedatenanalysen auf Grundlage der ARM. Andererseits schließt sich eine Bewertung an, welche die angewandte Näherung der Lastgänge der Komponenten mit konstantem und zyklischem energetischen Verhalten kritisch hinterfragt (s. Abschnitt 5.3.2).

5.3.1 Aufbau und Funktionsweise

Das Analysetool zur automatisierten Durchführung von Energiedatenanalysen auf den Ebenen *Gesamtmaschine*, *Komponenten*, *Zustände* und *Produkte* wurde beispielhaft in MATLAB R2015b umgesetzt. Abbildung 5.6 zeigt schematisch die zugrunde liegende Systemarchitektur.



☐ in MATLAB R2015b implementiert

* alternative Optionen zur Desktop-Applikation (nicht umgesetzt)

Abbildung 5.6: Dem Analysetool zugrunde liegende, auf die Datenlogger-Applikation aufbauende, Systemarchitektur (in Anlehnung an [17])

Das Tool baut dabei auf den Daten der Datenlogger-Applikation sowie auf ergänzenden Benutzereingaben auf. Die Lastgänge der Nebenaggregate mit konstantem oder zyklischem energetischen Verhalten werden auf der Grundlage einer initialen Messung sowie der aktuellen Schaltzustände simuliert. Hierfür werden die typischen Verläufe der Leistungsaufnahmen der einzelnen Komponenten erfasst und in Abhängigkeit der Schaltzustände nachgebildet. Im vorliegenden Fall wurden nur konstante Verläufe angenommen, auf eine Abbildung der Anfahrspitzen der Nebenaggregate wurde aufgrund der sehr geringen Energieinhalte verzichtet. Auch können nur Aggregate abgebildet werden, deren Schaltzustände innerhalb der Maschinensteuerung als Variable vorliegen. Eine Bewertung des mit diesem Vorgehen erzielbaren Ergebnisses erfolgt im Abschnitt 5.3.2. Die durchschnittlichen Leistungsaufnahmen der Nebenaggregate müssen durch eine manuelle Benutzereingabe hinterlegt werden, bevor sie anschließend durch das Analysetool automatisch für die Zeitabschnitte im aktiven Zustand mit konstanter Leistungsaufnahme abgebildet werden können. Die er-

forderlichen Benutzereingaben sind daher insbesondere bei der initialen maschinenspezifischen Parametrierung erforderlich. Bei sich wiederholenden Analysen desselben Systems können die Daten ohne weitere Angaben durch den Benutzer geladen und erneut genutzt werden. Die initial erforderlichen Informationen umfassen darüber hinaus die Zuordnung der im Tool zu verarbeitenden und einheitlich benannten Größen zu den einzulesenden Variablenbezeichnungen, die stets maschinen- und steuerungsspezifisch sind. Des Weiteren sollten Informationen wie z. B. der aktuelle Arbeitspreis pro kWh hinterlegt werden, um Analysen im Hinblick auf die entstehenden Energiekosten präzise und unternehmensspezifisch durchführen zu können. Der Leistungspreis wird hierbei nicht berücksichtigt, da in diesen noch zahlreiche übergreifende Effekte einfließen. Die eingelesenen Daten sowie die Benutzereingaben werden bei Start des Analysetools auf Konsistenz geprüft und bei positivem Ergebnis für verschiedene Analysen auf den unterschiedlichen Betrachtungsebenen weiterverarbeitet. Die umgesetzten Energiedatenanalysen werden im Folgenden ausführlicher beschrieben. Schließlich werden die Ergebnisse der Analysen leicht verständlich und übersichtlich visualisiert, um einen möglichst großen Nutzen für den Anwender zu stiften. Hierfür wurde eine Desktop-Applikation umgesetzt. Alternativ wären jedoch auch mobile oder webbasierte Applikationen denkbar.

Die Systemarchitektur des Analysetools (Abbildung 5.6) basiert auf der Datenerfassung auf Grundlage der Datenlogger-Applikation sowie der Benutzereingaben. Darauf aufbauend folgen die Schritte der Datenvorbereitung, der Datenanalyse sowie der Erkenntnisvisualisierung.

Die Energiedatenanalysen umfassen dabei die Datenverarbeitung und -visualisierung. Eine Interpretation der Ergebnisse sowie das Ableiten von Maßnahmen ist nicht Bestandteil der Analysen. Die Energiedatenanalysen stellen jedoch die für diese folgenden Schritte notwendige Wissensgrundlage zur Verfügung. Abbildung 5.7 zeigt anhand der ARM, welche Energiedatenanalysen beispielhaft im entstandenen Analysetool realisiert werden konnten.

	Gesamtmaschine	Komponenten	Zustände	Produkte
Standard	Verbrauchs- und Zeitanteile aufzeichnen und visualisieren			
	EnPIs berechnen und darstellen			
	Ranking			Ranking
	Maximallast		unproduktive Maschinenzeit	
Erweitert	Spannungsqualität			
		Anomalieerkennung		
		Verbrauch je Komponente und Zustand		

□ im Analysetool beispielhaft umgesetzt

Abbildung 5.7: Beispielhafte Umsetzung im Versuchsaufbau: Im Analysetool realisierte Energiedatenanalysen auf der Grundlage der ARM (s. Abbildung 4.2; in Anlehnung an [17])

Im weiteren Verlauf wird auf alle umgesetzten Analysen eingegangen.

Im Analysetool umgesetzte Energiedatenanalysen: Ebene *Gesamtmaschine*

Auf der Ebene der *Gesamtmaschine* wird nur eine Anlage gleichzeitig analysiert, weshalb es nicht möglich ist, mehrere Anlagen vergleichende Rankings zu erstellen oder Verbrauchs- und Zeitanteile aufzuzeichnen und zu visualisieren. Aufgrund der fehlenden Möglichkeit, Messfrequenzen von mehreren tausend Hertz zu realisieren, ist auch die Umsetzung von Analysen der Spannungsqualität nicht möglich. Als EnPIs werden im Analysetool automatisch folgende Größen berechnet und angezeigt:

- Laufzeit der Messung
- Gesamtenergiebedarf
- anfallende Energiekosten
- durchschnittliche Leistungsaufnahme
- Zeitpunkt und Höhe der maximalen Leistungsaufnahme (Maximallast)

Zudem wird der Lastgang visuell dargestellt, um dem Nutzer einen schnellen Einblick in das charakteristische energetische Verhalten der betrachteten Anlage zu geben. Hierin findet sich auch die Maximallast wieder.

Im Analysetool umgesetzte Energiedatenanalysen: Ebene *Komponenten*

Die Analysen hinsichtlich der einzelnen *Komponenten* sind jeweils getrennt für Haupt- und Nebenaggregate ausgeführt. Verbrauchsanteile werden in Form von Sankey- und Tortendiagrammen dargestellt. Zeitanteile sowie weitere EnPIs sind ohne Relation zu Zuständen oder Produkten meist nicht relevant. Daher werden diese nicht ausgewertet. Rankings stellen die Komponenten sortiert nach ihrer durchschnittlichen Leistungsaufnahme im betrachteten Zeitraum dar, wie beispielhaft in Abbildung 5.8 für einen spezifischen Zerspanungsprozess an der Maschine Grob G350 gezeigt. Hierfür wurde eine 5-Achs-Simultanbearbeitung durchgeführt, deren Parameter ebenfalls der Abbildung zu entnehmen sind. Darüber hinaus werden die maximale Leistungsaufnahme (Maximallast) und deren jeweiliger Zeitpunkt ausgewertet.

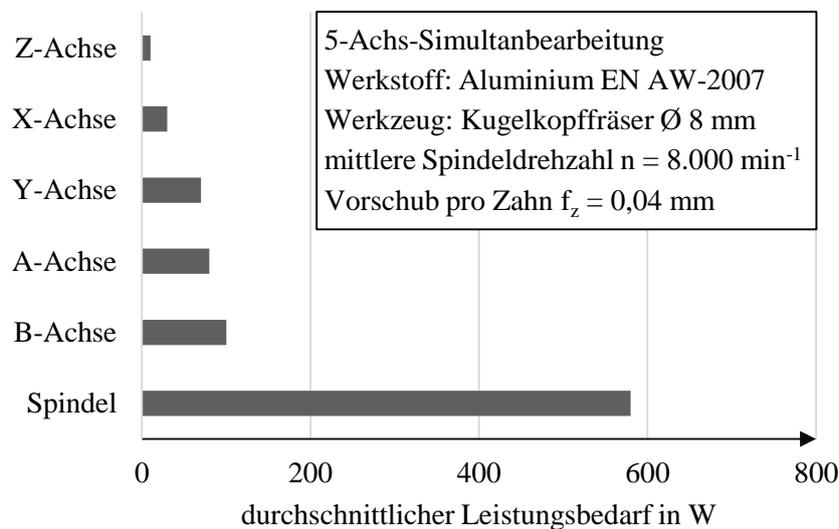


Abbildung 5.8: *Ranking der durchschnittlichen Leistungsaufnahme der Hauptaggregate für eine beispielhafte Fräsbearbeitung an der Grob G350*

Die im Analysetool umgesetzten Analysen zur Anomalieerkennung stellen nur Beispiele dafür dar, welche Auswertungen interessant sein könnten. Hierzu zählen die Überwachung von unerwarteten Lastspitzen von Motorspindel und Vorschubantrieben (s. Abbildung 4.10). Sie werden mit dem jeweils aktiven NC-Schritt korreliert und als Anomalie erkannt, wenn die Spitze entweder nicht durch den NC-Code plausibilisiert werden kann oder wenn die Spitze unerwartet hoch ausfällt. Die Grenzwerte werden in Form einer maximal zulässigen prozentualen Abweichung angegeben und können vom Nutzer individuell hinterlegt werden. Abschließend werden die

Lastgänge der Komponenten einzeln, wie auch in den Clustern der Haupt- und Nebenaggregate, dargestellt und hinsichtlich ihrer Leistungs- und Zeitanteile je Betriebszustand ausgewertet.

Im Analysetool umgesetzte Energiedatenanalysen: Ebene *Zustände*

Auf der Ebene der *Zustände* werden sowohl die Gesamtmaschine als auch die Komponenten im Bezug auf ihre unterschiedlichen Betriebszustände betrachtet. So wird berechnet und dargestellt, welchen Zeitanteil die einzelnen Betriebszustände einnehmen, welche Leistungsaufnahmen in dieser Zeit auftreten und somit auch, welchen Anteil die einzelnen Zustände am Gesamtenergiebedarf der Anlage oder der Komponente haben. Die Start- und Endzeitpunkte der Betriebszustände können dabei nicht direkt gemessen werden. Sie werden daher auf der Grundlage des NC-Programms ermittelt. Bei Nebenaggregaten mit prozessunabhängigem Verhalten, also Komponenten mit zyklischem oder konstantem energetischen Verhalten, stehen stattdessen Schaltzustände als Steuerungsvariablen zur Verfügung.

Lediglich eine Unterscheidung von nicht produktiven Zuständen wie Stand-by oder Rüsten kann nicht vorgenommen werden, da hierbei maschinenintern keine Änderung vonstatten geht. Im Analysetool ist daher eine vom Nutzer erwartete Dauer des Rüstvorgangs nach jedem Bearbeitungsprozess hinterlegt. Verharrt die Anlage darüber hinaus weiter im betriebsbereiten Zustand, wird dies als unproduktive Wartezeit deklariert. Abbildung 5.9 zeigt das für den Nutzer graphisch aufbereitete Ergebnis. Auf dieser Informationsgrundlage lassen sich darüber hinaus EnPIs, Verbrauchs- und Zeitanteile und unproduktive Maschinenzeiten quantifizieren. Anomalieerkennungen im Bezug auf die Betriebszustände der Gesamtmaschine oder einzelner Aggregate sind i. d. R. vergleichbar mit jenen im Bezug auf die Produktion spezifischer Produkte. Hierbei werden u. a. schleichende Anstiege des Leistungs- bzw. Energiebedarfs über mehrere Zyklen hinweg überwacht, da diese auf Verschleiß hinweisen könnten. Die genannten Analysen wurden im Analysetool umgesetzt.

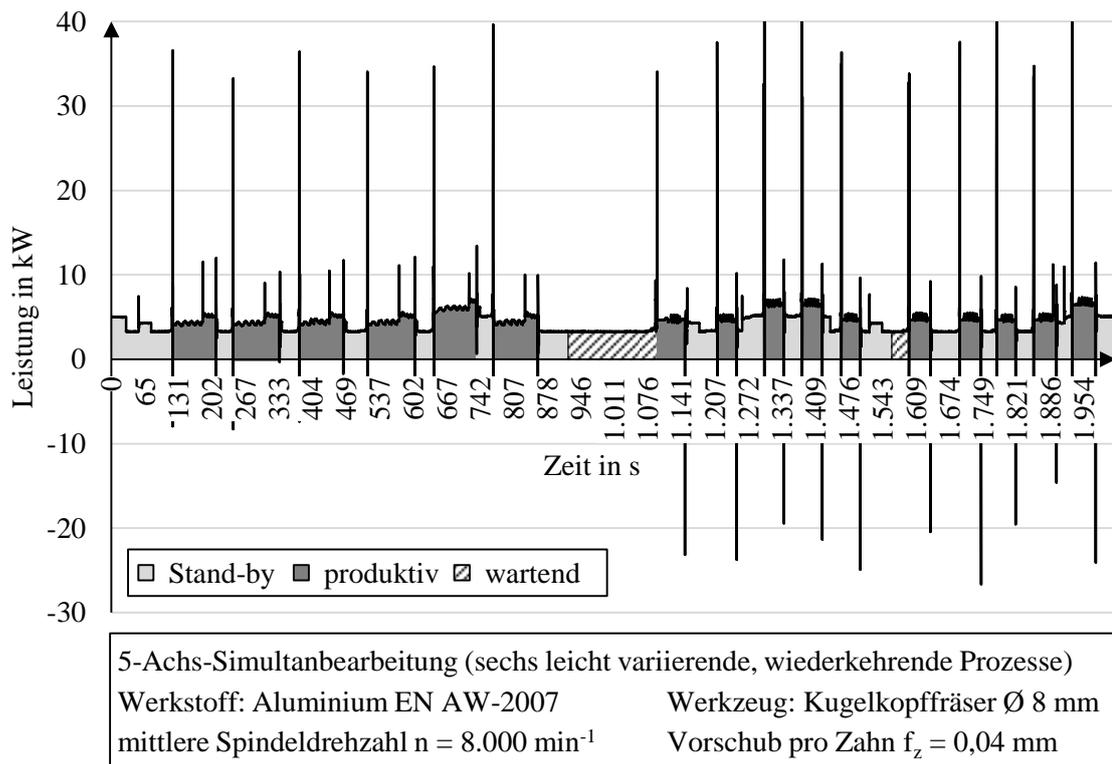


Abbildung 5.9: Analyse der Betriebszustände der Gesamtmaschine im Analysetool

Im Analysetool umgesetzte Energiedatenanalysen: Ebene *Produkte*

Bezugnehmend auf die *Produkte* wird davon ausgegangen, dass unterschiedliche, sich wiederholende Produktionsprozesse auftreten. Hierzu werden analog zu den zustandsbezogenen Analysen Verbrauchs- und Zeitanteile der einzelnen Werkstücke ausgewertet und in Rankings gegenübergestellt. Abbildung 5.10 zeigt den Niederschlag der einzelnen Werkstücke in einem beispielhaften Lastgang des Bearbeitungszentrums Grob G350 im Analysetool.

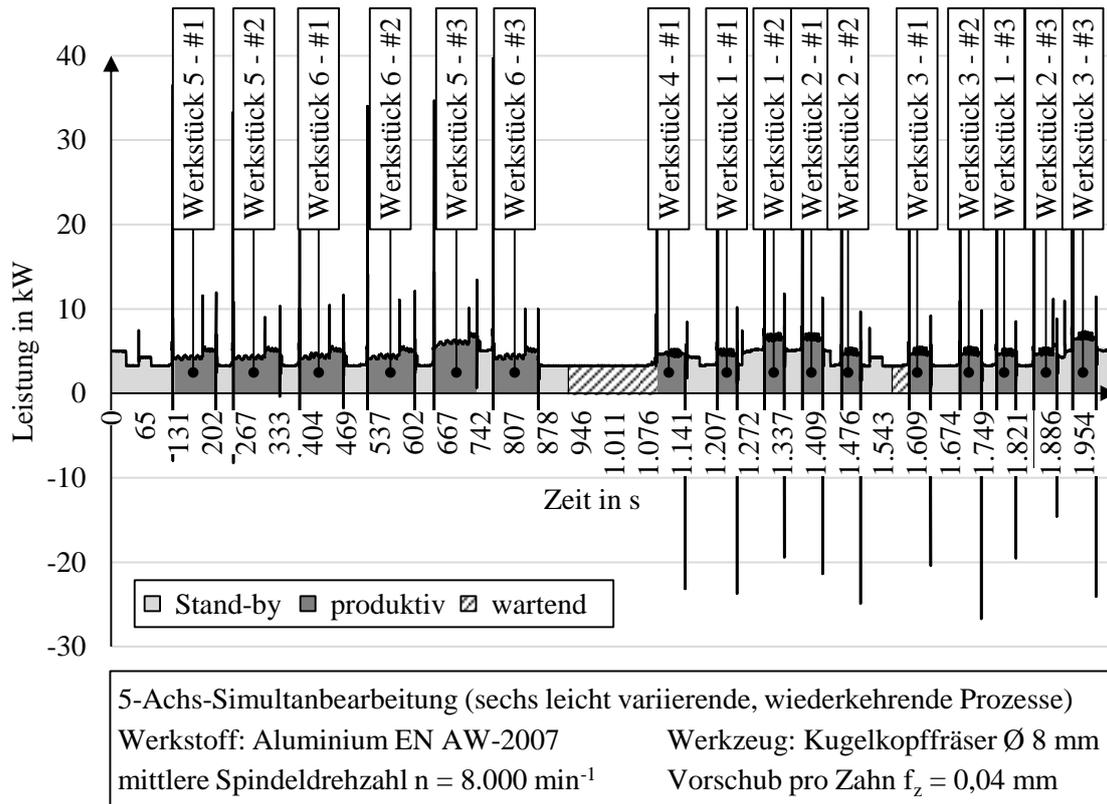


Abbildung 5.10: Analyse der gefertigten Werkstücke im Lastgang der Gesamtmaschine im Analysetool

Am selben Beispiel zeigt Abbildung 5.11 eine Auswertung der sog. Verbrauchsanteile: Aufgetragen ist der jeweilige Anteil der einzelnen Werkstücke am Energiebedarf des Produktivbetriebs der Gesamtanlage. Dieser korreliert mit dem Zeitanteil der einzelnen Werkstücke, der ebenso im Analysetool ausgewertet wird. Somit lassen sich auch weitere EnPIs wie beispielsweise die Energiekosten pro Werkstück berechnen.

Wie bereits erwähnt, sind auch auf Ebene der Werkstücke Anomalieerkennungen denkbar, um schleichende Anstiege zwischen sich wiederholenden Produktionsprozessen zu beobachten und bei Anhalten des Effekts den Nutzer auf einen möglichen Verschleiß aufmerksam machen zu können. Dies wurde im Analysetool beispielhaft umgesetzt. Um die erkannten Effekte zu visualisieren, kann sich der Nutzer im Analysetool beispielsweise die Lastgänge der Werkstückwiederholungen übereinander gelegt inkl. Kennzeichnung des erkannten Effekts anzeigen lassen.

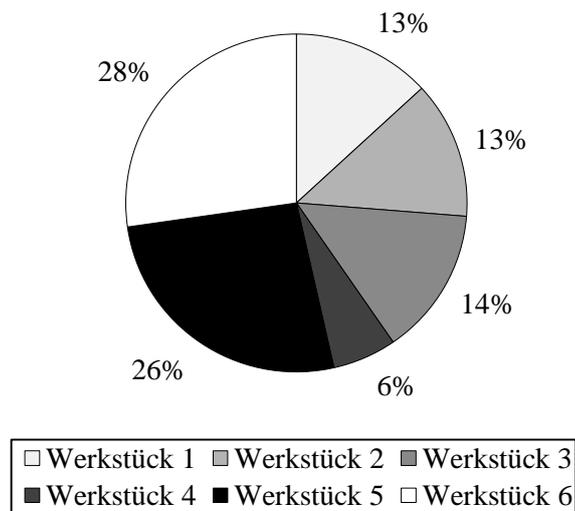


Abbildung 5.11: Prozentuale Anteile der Werkstücke am Gesamtenergiebedarf im Produktivbetrieb des Bearbeitungszentrums Grob G350

5.3.2 Qualität der Näherung für die Komponenten mit konstantem oder zyklischem energetischen Verhalten

Dieser Abschnitt betrachtet und bewertet die Qualität der Näherung des Lastgangs der Komponenten mit konstantem oder zyklischem energetischen Verhalten auf Basis initialer Leistungsmessungen sowie der laufenden Erfassung der jeweiligen Schaltzustände. Um zu überprüfen, ob diese zulässig ist, wurden an der Versuchsanlage Grob G350 vergleichende Messungen am Hauptanschluss durchgeführt (Leistungsmessgerät LMG450 der ZES ZIMMER Electronic Systems GmbH; Messfrequenz = 10 Hz). Abbildung 5.12 zeigt vergleichend das Ergebnis der manuellen Messung am Hauptanschluss der WZM sowie den Gesamtlastgang, welcher mittels Datenlogger-Applikation erfasst und durch Modelle der Nebenaggregate ergänzt wurde.

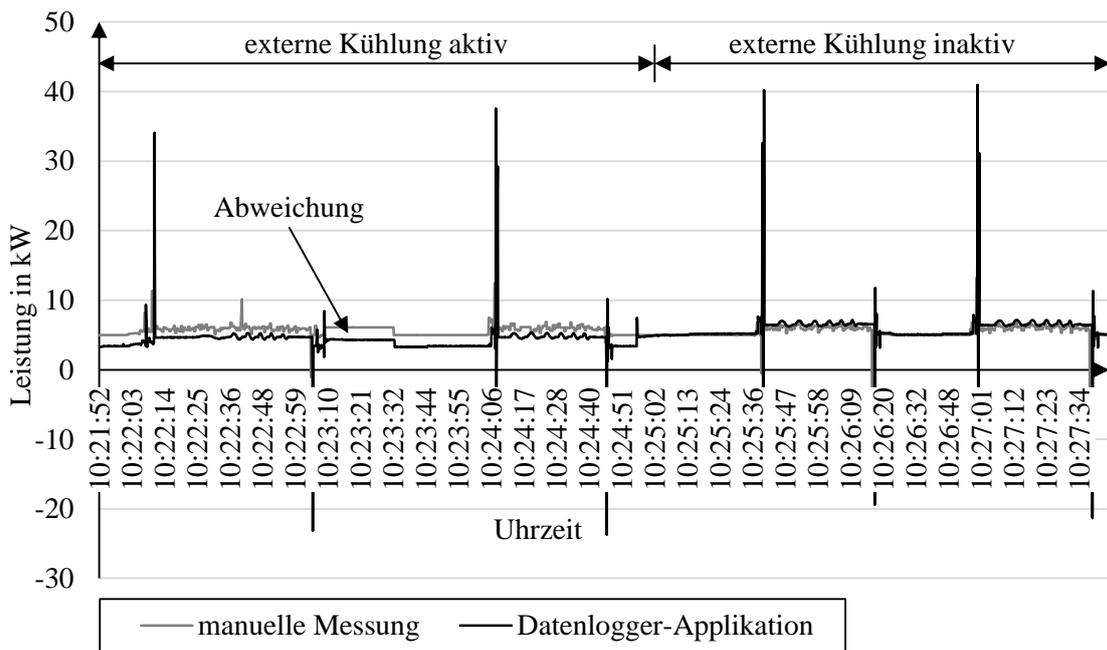


Abbildung 5.12: Gegenüberstellung der Messung am Hauptanschluss der G 350 mit der Erfassung und Näherung durch die Datenlogger-Applikation

Die Übereinstimmung beider Lastgänge ändert sich dabei mit der Zeit. Es existiert ein Bereich, in welchem die manuelle Messung konstant eine um ca. 2 kW höhere Leistungsaufnahme zeigt. Die Analyse dieses Effekts hat ergeben, dass es sich dabei um Zeiträume handelt, innerhalb derer ein nachgerüstetes externes Kühlungssystem aktiv ist. Dieses schaltet autark, weshalb die Schaltzustände nicht als Variable in der Maschinensteuerung verfügbar sind. Zeiträume mit inaktivem Kühlsystem zeigen hingegen eine sehr gute Übereinstimmung beider Lastgänge.

Die gewählte Kombination aus der Nutzung steuerungsinterner Variablen für Komponenten mit variablem energetischen Verhalten sowie der Modellierung der Leistungsaufnahme der Komponenten mit konstantem oder zyklischem energetischen Verhalten auf Grundlage von manuellen Leistungsmessungen bildet die Leistungsaufnahme der betrachteten WZM somit sehr gut ab. Der Ansatz kann daher als zulässig angesehen werden. Allerdings muss bei der Systemanalyse betrachtet werden, ob alle Komponenten mit wesentlichem Leistungsbedarf in die Maschinensteuerung eingebunden und somit durch die Datenlogger-Applikation erfassbar sind. Liegen keine Schaltzustände als steuerungsinterne Variablen vor, führt dies zur Vernachlässigung der betroffenen Komponente und zu Abweichungen von der tatsächlichen Leistungsaufnahme der Gesamtanlage.

5.4 Zusammenfassung

Dieses Kapitel zeigt die beispielhafte Umsetzung einer automatisierten Energiedatenerfassung als Voraussetzung für die Anwendung und Validierung der *Methode zur systematischen Energiedatenerfassung in der Produktion* in Kapitel 6. Um den Bedarf an Zusatzsensorik zu reduzieren, wurden dabei folgende Ansätze verfolgt:

- Näherung durch einmalige Messung für Komponenten mit konstantem oder zyklischem energetischen Verhalten
- Nutzung steuerungsinterner Variablen für Komponenten mit variablem energetischen Verhalten

Der entstandene Versuchsaufbau besteht dabei im Wesentlichen aus einer Datenlogger-Applikation sowie einem Analysetool.

Die Datenlogger-Applikation ist in der Lage, parallel steuerungsinterne Variablen mehrerer Anlagen zu erfassen, zu dekodieren und strukturiert abzulegen. In der vorliegenden Arbeit wurde dies an zwei verschiedenen spanenden Werkzeugmaschinen demonstriert. Dabei können je nach erforderlicher Anzahl an zu erfassenden Variablen Messfrequenzen von bis zu 10 Hz realisiert werden. Für Energiedatenanalysen, welche eine höhere Messfrequenz oder eine sehr hohe Anzahl an Variablen benötigen, ist der Versuchsaufbau somit nicht geeignet. Das Analysetool dient aufbauend auf der Datenerfassung der Durchführung von Energiedatenanalysen und der Visualisierung der Ergebnisse. Hierzu wurden bereits auf den unterschiedlichen Ebenen *Gesamtmaschine, Komponenten, Zustände* und *Produkte* beispielhafte Energiedatenanalysen umgesetzt.

Damit steht nun ein System zur automatisierten Energiedatenerfassung und -analyse zur Verfügung, welches gemäß dem folgenden Kapitel für die Anwendung und Validierung der *Methode zur systematischen Energiedatenerfassung in der Produktion* genutzt werden konnte.

6 Anwendung und Validierung der Methode

6.1 Kapitelüberblick

Um die im Kapitel 4 vorgestellte *Methode zur systematischen Energiedatenerfassung in der Produktion* zu validieren, wurde diese anhand je einer beispielhaften Energie-datenanalyse auf der Maschinen- (Abschnitt 6.2) sowie auf der Aggregats- bzw. Komponentenebene (Abschnitt 6.3) angewandt. Dafür wurde der in Kapitel 5 entwickelte Versuchsaufbau zur automatisierten Energiedatenerfassung genutzt. Als zu analysierende Systeme dienten somit die zur Verfügung stehenden spanenden Werkzeugmaschinen Grob G350 und Spinner U5-620, auf welchen jeweils in mehreren Wiederholungen derselbe Bearbeitungsprozess durchgeführt wurde. Bei diesem Prozess handelt es sich, analog zu den vorangegangenen Beispielen, um eine 5-Achs-Simultanbearbeitung im Luftschnitt (Werkzeug: Kugelkopffräser \varnothing 8 mm; mittlere Spindeldrehzahl $n = 8.000 \text{ min}^{-1}$; Vorschub pro Zahn $f_z = 0,04 \text{ mm}$). Die Durchführung der Methode ist maschinenunabhängig. Daher soll die Gegenüberstellung der beiden Anlagen die Übertragbarkeit der Methode anhand realer Messdaten bestätigen. Hierfür wurden die Analysen zunächst am Beispiel der Grob G350 und anschließend vergleichend an der Spinner U5-620 durchgeführt. Auch werden die ermittelten Ergebnisse auf der Grundlage der methodisch ausgewählten Messfrequenzen den Ergebnissen mit anderen Messfrequenzen gegenübergestellt. So kann bewertet werden, ob die methodisch ermittelte Messfrequenz für die jeweilige Zielsetzung geeignet bzw. notwendig ist. Diese Betrachtung erfolgt jedoch unter der Einschränkung der messtechnischen Leistungsfähigkeit des zur Verfügung stehenden Versuchsstands (s. Abschnitt 5.2.2).

6.2 Betrachtung der Maschinenebene

Auf Maschinenebene zeigt das folgende Beispiel den Anwendungsfall, dass der Nutzer einen Überblick über den charakteristischen Energiebedarf einer Produktionsanlage erhalten möchte. Hierfür mussten die durchschnittlichen Leistungsaufnahmen der Anlage pro Betriebszustand erfasst werden. Im Falle der vorliegenden Werkzeugmaschinen unterscheidet die Analyse zwischen den Zuständen *produktiv* und *Stand-by*. Im Folgenden wird beispielhaft die Durchführung der einzelnen Schritte der Methode beschrieben.

Auswahl der angestrebten Analyse

Als erster Schritt wurde zunächst eine Analyse aus der Übersicht industriell relevanter Energiedatenanalysen ausgewählt. Diese Auswahl ist abhängig von den individuellen Frage- und Zielstellungen des Nutzers. Ist, wie im vorliegenden Fall, die angestrebte Analyse bereits bekannt, ist dieser Schritt nicht notwendig.

Nach der Definition des Ziels kann die angestrebte Analyse in der ARM ausgewählt und korrekt eingeordnet werden. Abbildung 6.1 zeigt das Vorgehen bildhaft für das Anwendungsbeispiel: In der Analyse wurde die Leistungsaufnahme einer Produktionsanlage betrachtet. Somit ist die Analyse der Ebene *Gesamtmaschine* zuzuordnen. Alternativ hätte ebenso die Betrachtungsebene der Zustände gewählt werden können. Das Ergebnis hätte sich hierdurch nicht geändert. Die Berechnung der durchschnittlichen Leistungsaufnahme pro Betriebszustand stellt ein Beispiel eines gängigen *EnPIs* zur Beschreibung der energiebezogenen Leistung dar. Daher ist die hier ausgewählte Analyse als *Standard-Analyse* anzusehen.

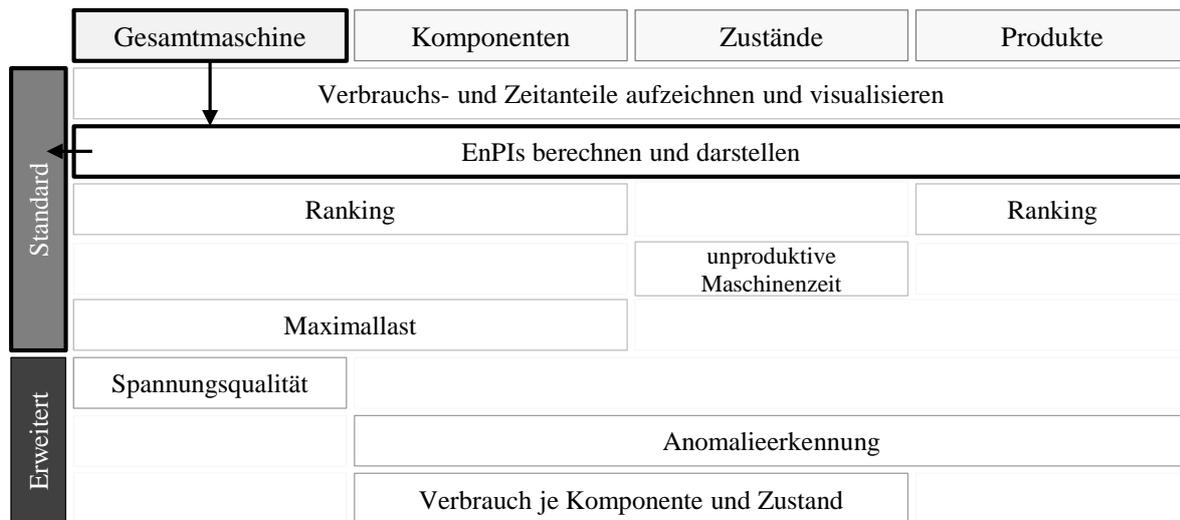
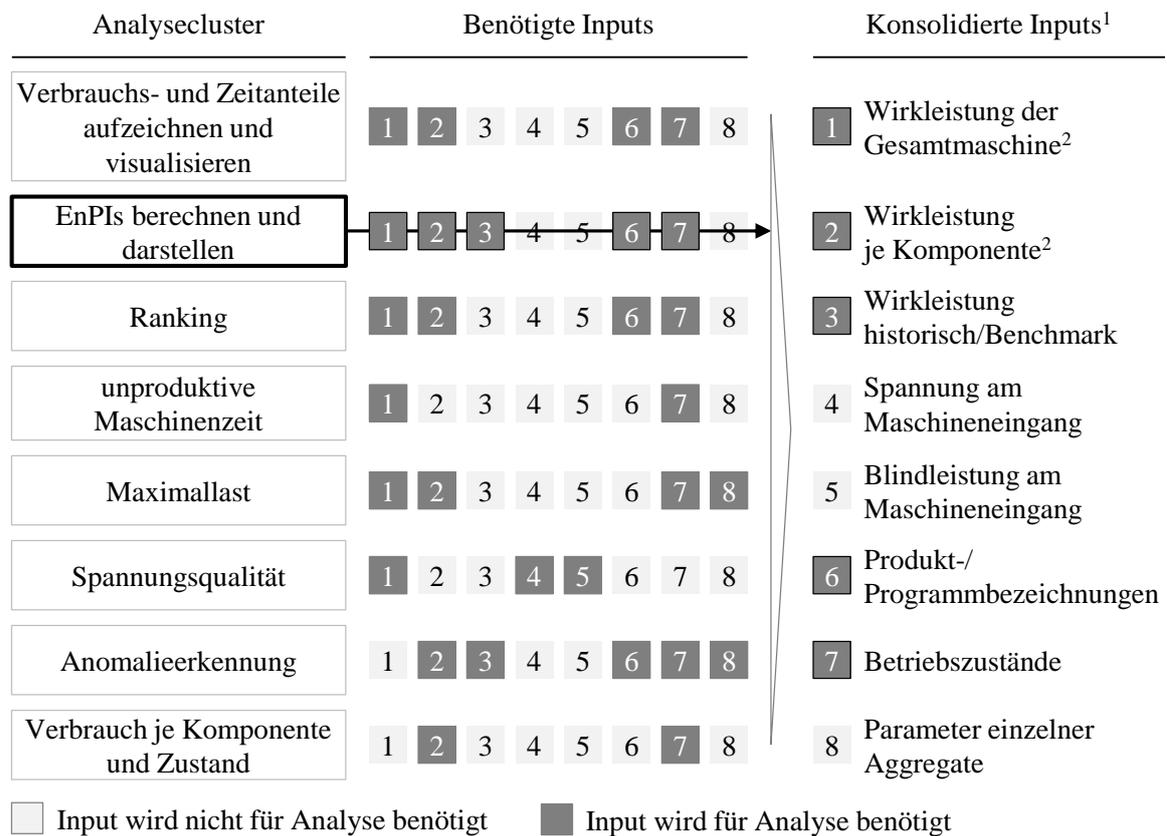


Abbildung 6.1: Auswahl und Einordnung der durchgeführten Analyse in der ARM für das Beispiel der Energiebedarfsanalyse der Betriebszustände einer WZM auf Maschinenebene

Definition der notwendigen Datenarten

Die Einordnung der Energiedatenanalyse in den Bereich *EnPIs berechnen und darstellen* auf *Maschinenebene* diene im nächsten Schritt der Identifikation der notwendigen Datenarten mithilfe der AIM (s. Abbildung 6.2).



¹Daten stets mit zeitlichem Bezug

²alternativ, entsprechend der betrachteten Produktionsebene

Abbildung 6.2: Identifikation der notwendigen Datenarten mithilfe der AIM für das Beispiel der Energiebedarfsanalyse der Betriebszustände einer WZM auf Maschinenebene

In Abbildung 6.2 ist dargestellt, dass folgende Inputs erforderlich waren:

- Wirkleistung der Gesamtmaschine
- Wirkleistung je Komponente
- Wirkleistung historisch / Benchmark
- Produkt- / Programmbezeichnungen
- Betriebszustände

Die ersten beiden Punkte sind dabei als Alternativen je nach Betrachtungsebene anzusehen. Daher ist im vorliegenden Fall nur die *Wirkleistung der Gesamtmaschine* erforderlich. Historische Daten verbessern grundsätzlich Auswertungen, die über die Zeit berechnet werden, und verringern statistische Fehler. Sie sind grundsätzlich als optional anzusehen und weisen zudem darauf hin, dass eine Speicherung der aufgezeichneten Daten sinnvoll ist. Produkt- und Programmbezeichnungen sind insbesondere für Analysen auf der Ebene *Produkte* erforderlich. U. a. im vorliegenden Fall können sie jedoch auch dazu dienen, auf die jeweiligen Betriebszustände zu schließen, da diese i. d. R. nicht direkt mittels Steuerungsvariablen erfasst werden können. Somit werden die Produkt- und Programmbezeichnungen nur indirekt genutzt. Sie sind aber trotzdem für die Durchführung der angestrebten Energiedatenanalyse erforderlich. Die Betriebszustände stellen in der vorliegenden Anwendung somit indirekte Messgrößen dar, die aber für die Ausführung der angestrebten Analyse notwendig sind.

Definition der notwendigen Messfrequenzen

Die Messfrequenz, mit welcher die erforderlichen Datenarten aufgezeichnet werden müssen, hängt in erster Linie vom energetischen Verhalten der betrachteten Produktionsanlage oder Komponente ab. Das energetische Verhalten einer spanenden Werkzeugmaschine wird allgemein sehr stark durch das Verhalten ihrer Hauptkomponenten geprägt. Diese zeigen ein variables, vom jeweiligen Bearbeitungsschritt abhängiges Verhalten. Sie und damit auch die Gesamtmaschine sind also als Systeme mit hochdynamischem energetischen Verhalten anzusehen. Abbildung 6.3 zeigt auf dieser Grundlage die Auswahl der notwendigen Messfrequenzen.

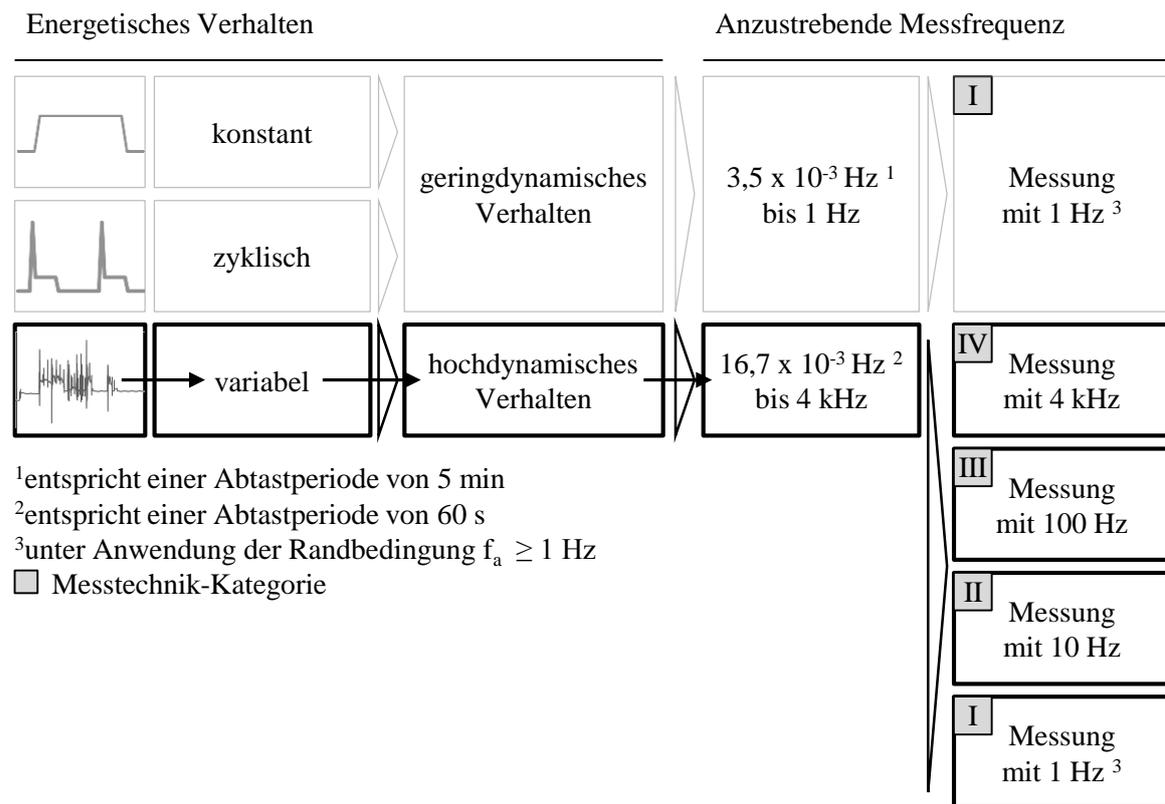


Abbildung 6.3: Definition der notwendigen Messfrequenzen auf Grundlage des energetischen Verhaltens der betrachteten Produktionsanlage oder Komponente für das Beispiel der Energiebedarfsanalyse der Betriebszustände einer WZM auf Maschinenebene

Während bei geringdynamischem Verhalten eine direkte Zuordnung zur anzustrebenden Messfrequenz möglich ist, wird bei hochdynamischem Verhalten nochmals in vier Kategorien unterschieden. Das Diagramm in Abbildung 6.4 zeigt bildhaft den Rückschluss von der Betrachtungsebene *Gesamtmaschine* und der angestrebten Energiedatenanalyse *EnPIs berechnen und darstellen* auf die hierfür erforderliche Messfrequenz von 1 Hz.

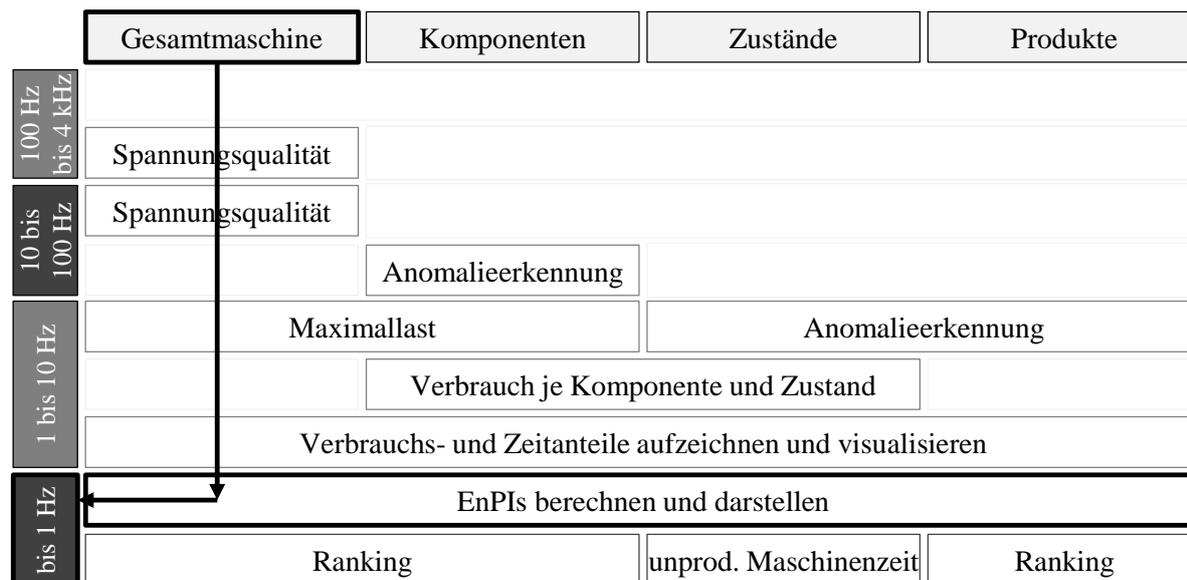


Abbildung 6.4: Detailbetrachtung der notwendigen Messfrequenz für Anlagen und Komponenten mit hochdynamischem energetischen Verhalten für das Beispiel der Energiebedarfsanalyse der Betriebszustände einer WZM auf Maschinenebene

Je nach bereits vorhandener Mess- und Systemtechnik kann der Anwender aufbauend auf diesen Ergebnissen prüfen, wie sich der Bedarf an Zusatzsensorik reduzieren lässt (s. Abschnitt 4.7). Dies ist jedoch kein fester Bestandteil der Methode, sondern vielmehr eine mögliche Ergänzung. Im Anwendungsbeispiel wurde, wie in Kapitel 5 vorgestellt, der Ansatz verfolgt, steuerungsinterne Variablen auszulesen und so den Bedarf an Zusatzsensorik möglichst gering zu halten.

Ergebnisse der Energiedatenanalyse

Abbildung 6.5 zeigt das Ergebnis der Energiedatenanalyse für drei Durchführungen des zu Beginn des Abschnitts beschriebenen 5-Achs-Simultanbearbeitungsprozesses der Grob G350. Dabei ist einerseits die mit einer Frequenz von 1 Hz aufgezeichnete Wirkleistungsaufnahme der Gesamtmaschine zu sehen. Andererseits ist der jeweilige Durchschnittswert der Leistungsaufnahmen für die Betriebszustände *produktiv* (2,34 kW) und *Stand-by* (0,50 kW) dargestellt. Die geringen absoluten Werte resultieren vor allem aus der Durchführung der Prozesse als Luftschritte und würden sich entsprechend mit zunehmenden aufzubringenden Zerspankräften erhöhen. Für die Durchführung der Energiedatenanalyse und die Beurteilung ihrer Qualität hat dies jedoch keine Relevanz, da die hochdynamischen Effekte vor allem auf Beschleunigungseffekten beruhen.

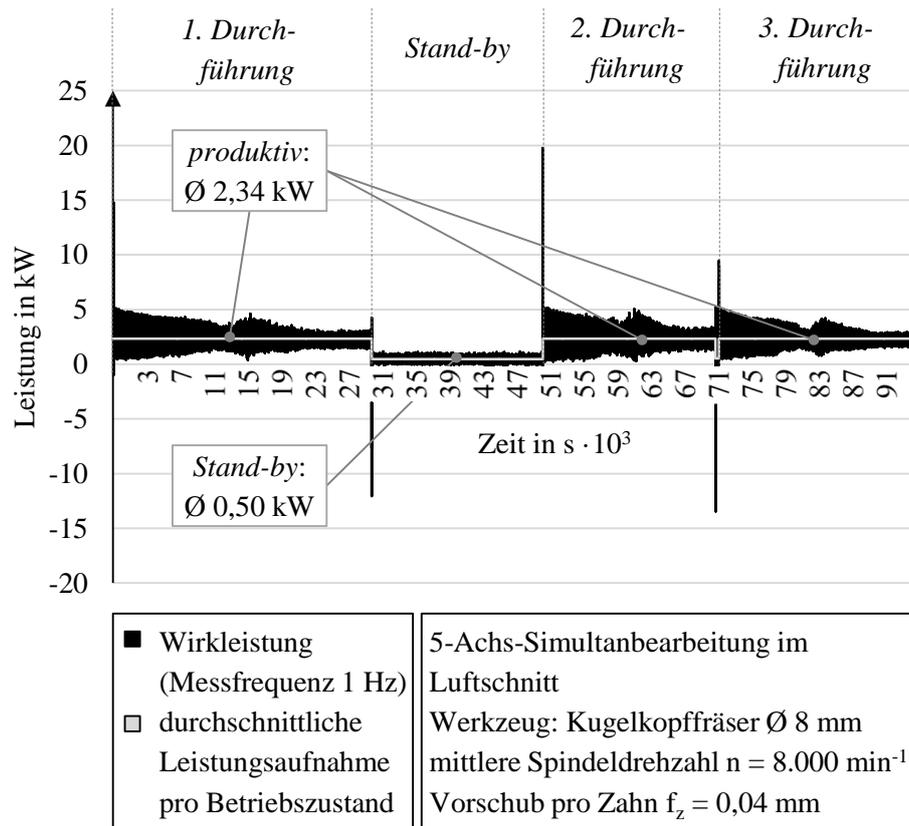


Abbildung 6.5: Analyse der durchschnittlichen Leistungsaufnahme pro Betriebszustand der Grob G350 für einen definierten Luftschnitt mit drei Durchführungen

Übertragbarkeit auf unterschiedliche Produktionsanlagen und Bewertung der Ergebnisse

Auf derselben methodischen Basis kann die Energiedatenanalyse bei unterschiedlichen Produktionsanlagen Anwendung finden. Abbildung 6.6 zeigt die Ergebnisse der Analyse der durchschnittlichen Leistungsaufnahme pro Betriebszustand für das Bearbeitungszentrum Spinner U5-620. Um die Ergebnisse vergleichen zu können, wurde derselbe 5-Achs-Simultanbearbeitungsprozess analog zur vorangegangenen Analyse drei Mal nacheinander durchgeführt. Lediglich die Dauer der unproduktiven Zeiträume zwischen den Bearbeitungszyklen ist demgegenüber verändert.

Die einzelnen Schritte der Methode sind, mit Ausnahme der Beurteilung des energetischen Verhaltens, jeweils anlagenunabhängig. Dieses ist jedoch nicht nur für zwei spanende Werkzeugmaschinen, sondern allgemein für Produktionsanlagen mit schnell beschleunigenden Antriebskomponenten vergleichbar und bei diesen in der Regel als hochdynamisch einzustufen. Die Methode musste somit zwangsläufig auch für die Anwendung auf die Spinner U5-620 auf dieselben erforderlichen Datenarten

sowie eine erforderliche Messfrequenz von 1 Hz führen. Es ergab sich eine durchschnittliche Leistungsaufnahme von 2,19 kW für den Produktivbetrieb sowie von 1,05 kW für den Stand-by-Betrieb.

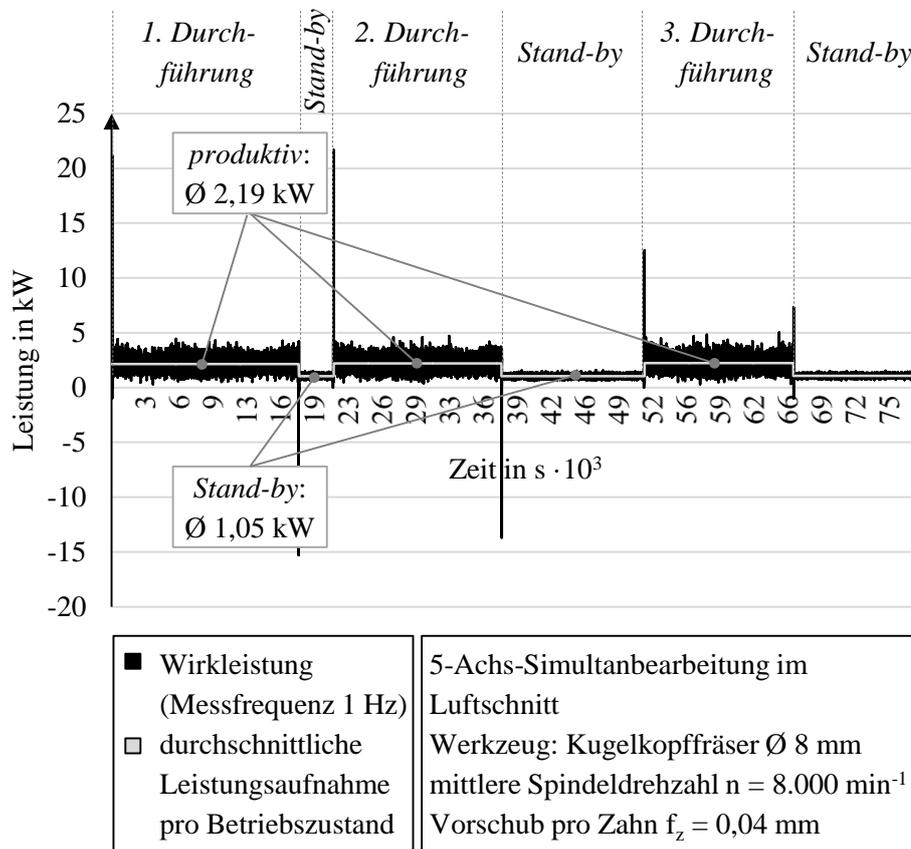


Abbildung 6.6: Analyse der durchschnittlichen Leistungsaufnahme pro Betriebszustand der Spinner U5-620 für einen definierten Luftschnitt mit drei Durchführungen

Die Methode ist somit übertragbar auf alle Produktionsanlagen und Komponenten, deren energetisches Verhalten analog in eine der genannten Kategorien eingeordnet werden kann. Dies gilt insbesondere für Produktionsanlagen der Stückgutfertigung im Maschinenbau.

Um darüber hinaus beurteilen zu können, ob die empfohlene Messfrequenz von 1 Hz ausreichend ist, wurde die Messung an der Grob G350 zeitgleich auch mit 5 Hz durchgeführt. Bei der erneuten Berechnung der Durchschnittswerte pro Betriebszustand ergaben sich dabei vernachlässigbare prozentuale Abweichungen von 0,06 % für den Stand-by-Betrieb und 0,001 % für den Produktivbetrieb. Eine Messwerterfas-

sung mit 1 Hz erwies sich somit als ausreichend. Dies ist als Bestätigung der Anwendbarkeit der Methode, ihrer Übertragbarkeit auf unterschiedliche Produktionsanlagen sowie der korrekten Auswahl der benötigten Messfrequenz auf Maschinenebene zu werten.

6.3 Betrachtung der Aggregatsebene

Als beispielhafte Energiedatenanalyse auf Aggregatsebene wurde die Analyse der maximalen Leistungsaufnahme der Motorspindel einer Werkzeugmaschine ausgewählt. Hierfür wurden auch wieder beispielhaft die einzelnen Schritte der Methode durchgeführt. Als Versuchsanlagen werden wiederum die beiden spanenden Werkzeugmaschinen *Grob G350* sowie *Spinner U5-620* herangezogen.

Auswahl der angestrebten Analyse

Zunächst ist die Energiedatenanalyse in der ARM der betrachteten Ebene *Komponenten* zuzuordnen (s. Abbildung 6.7). Sie gehört dem Cluster *Maximallast* an und zählt somit zu den *Standard-Analysen*, welche gemäß derzeitigem Stand der Technik bereits große Verbreitung finden.

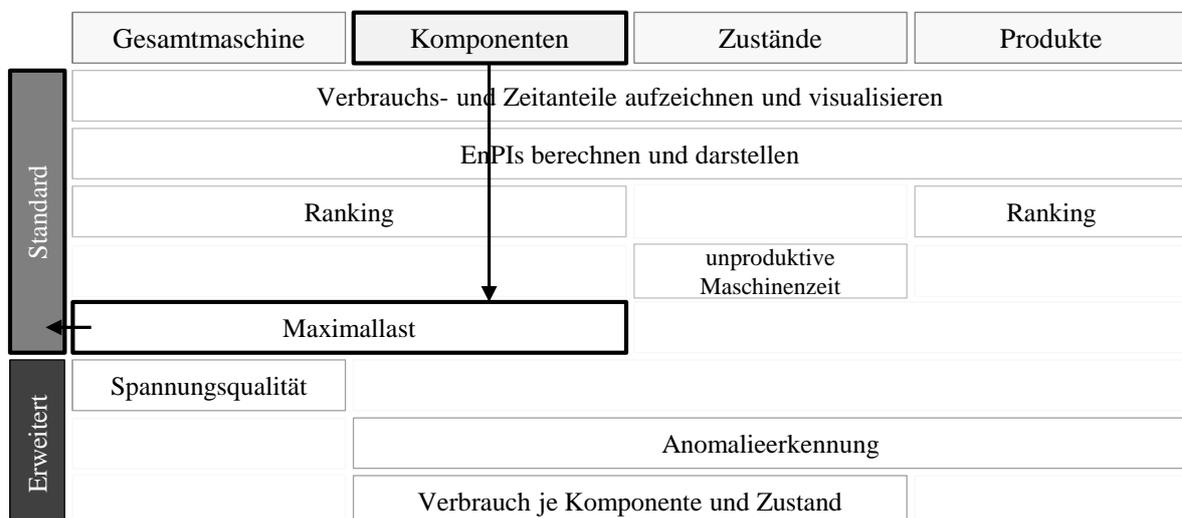
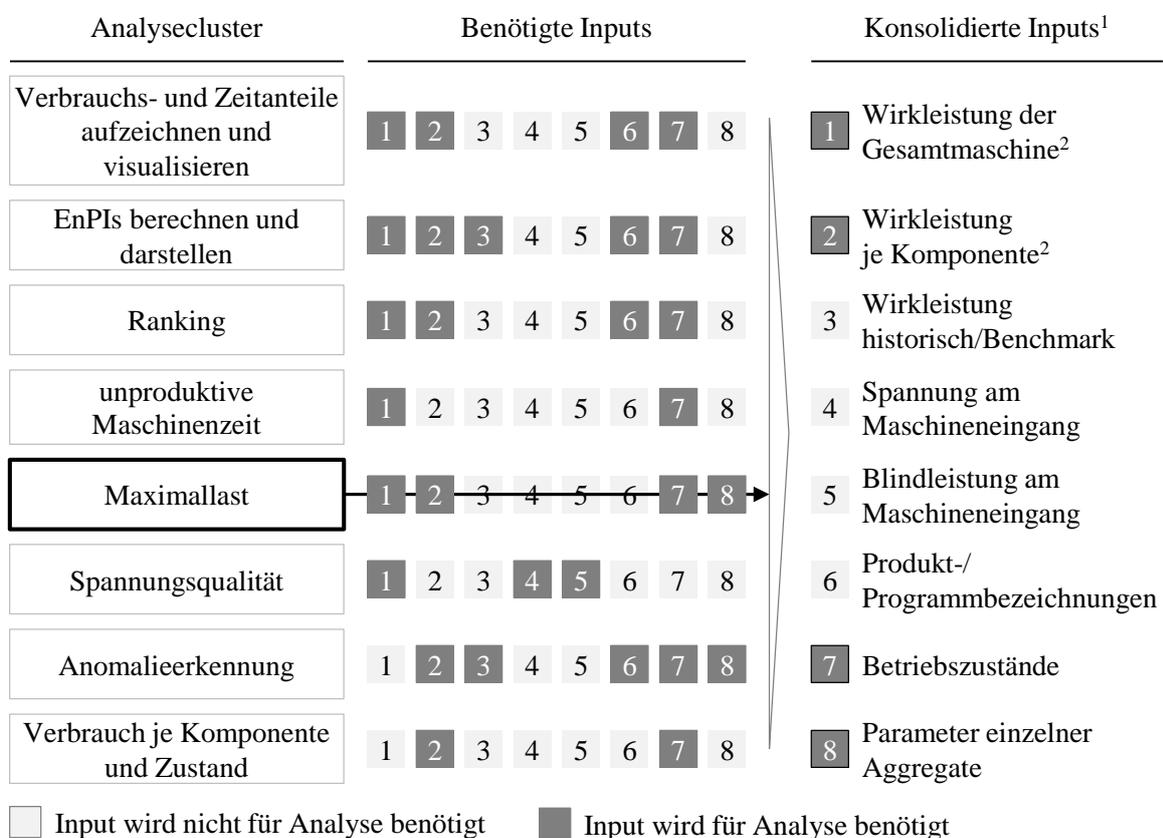


Abbildung 6.7: Auswahl und Einordnung der angestrebten Analyse in der ARM für das Beispiel der Analyse der maximalen Leistungsaufnahme der Motorspindel der betrachteten Werkzeugmaschinen auf Aggregatsebene

Definition der notwendigen Datenarten

Auf Grundlage der AIM kann im zweiten Schritt definiert werden, welche Datenarten als Input für die Energiedatenanalyse zur Verfügung stehen müssen (Abbildung 6.8). Als Ergebnis können folgende erforderliche Datenarten festgelegt werden:

- Wirkleistung der Gesamtmaschine
- Wirkleistung je Komponente
- Betriebszustände
- Parameter einzelner Aggregate



¹Daten stets mit zeitlichem Bezug

²alternativ, entsprechend der betrachteten Produktionsebene

Abbildung 6.8: Identifikation der notwendigen Datenarten mithilfe der AIM für das Beispiel der Analyse der maximalen Leistungsaufnahme der Motorspindeln der betrachteten Werkzeugmaschinen auf Aggregatsebene

Die ersten beiden Punkte sind wieder alternativ zu verstehen. Da das betrachtete Beispiel der Motorspindel der *Komponentenebene* zuzuordnen ist, ist hier nur die *Wirkleistung je Komponente* erforderlich. In der Regel sollten nicht nur die Lastspitzen selbst, sondern auch ihre Ursachen analysiert werden. Hierfür sind als Input die *Parameter der betrachteten Komponente* erforderlich, aus welchen auch auf die vorliegenden *Betriebszustände* geschlossen werden kann.

Definition der notwendigen Messfrequenzen

Der dritte Schritt der Methode hat zum Ziel, festzulegen, mit welcher Messfrequenz die im vorangegangenen Schritt definierte Datenbasis erfasst werden muss. Hierzu ist wieder zu ermitteln, welches energetische Verhalten die betrachtete Anlage oder Komponente zeigt. Bei der Motorspindel handelt es sich um variables und somit hochdynamisches Verhalten, welches keine unmittelbar eindeutige Zuordnung zu einer Messfrequenz ermöglicht, wie in Abbildung 6.9 dargestellt. Es stehen zunächst vier Kategorien bzw. Grenzfrequenzen zur Auswahl.

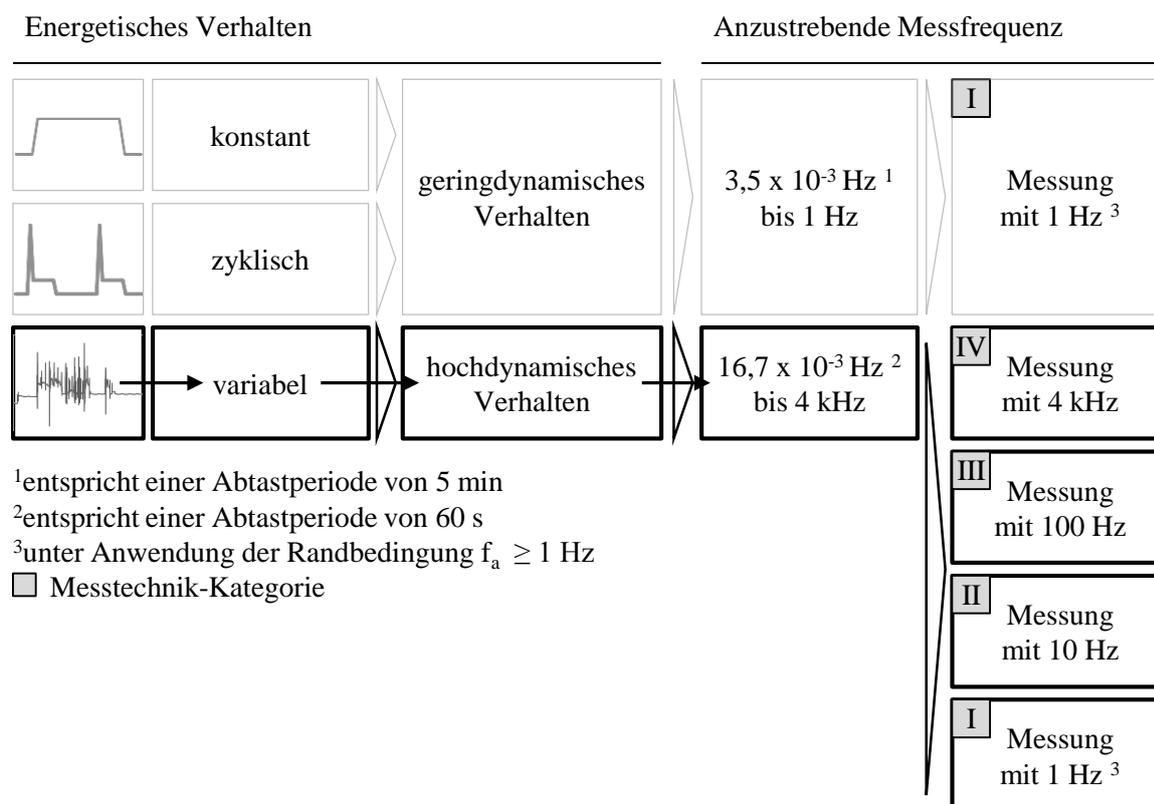


Abbildung 6.9: Definition der notwendigen Messfrequenzen auf Grundlage des energetischen Verhaltens der betrachteten Produktionsanlage oder Komponente für das Beispiel der Analyse der maximalen Leistungsaufnahme der Motorspindeln der betrachteten Werkzeugmaschinen auf Aggregatsebene

Da die notwendigen Messfrequenzen bei der Betrachtung hochdynamischer Systeme je nach angestrebter Analyse eine sehr weite Bandbreite zwischen 1 Hz und 4 kHz umfassen, ist eine Detailbetrachtung notwendig. Hierfür zeigt Abbildung 6.10 die Einordnung der angestrebten Analyse in die Ebene *Komponenten*, was in Kombination mit der Auswahl des Clusters *Maximallast* zur erforderlichen Messfrequenz von 10 Hz führt.

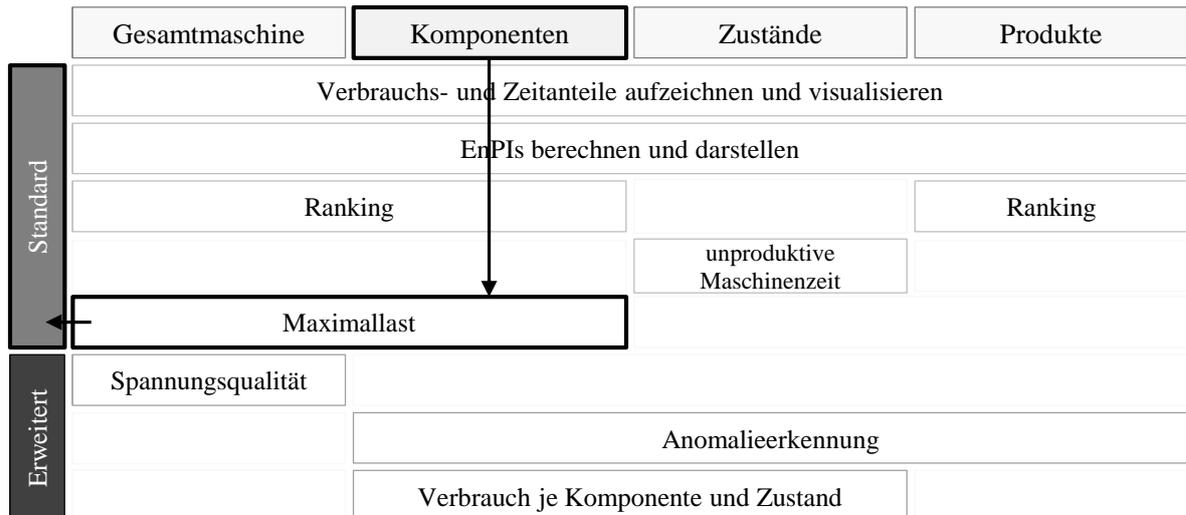


Abbildung 6.10: Detailbetrachtung der notwendigen Messfrequenz für Anlagen und Komponenten mit hochdynamischem energetischen Verhalten für das Beispiel der Analyse der maximalen Leistungsaufnahme der Motorspindeln der betrachteten Werkzeugmaschinen auf Aggregatsebene

Ergebnisse der Energiedatenanalyse

Als Ergebnis der beispielhaft durchgeführten Energiedatenanalyse auf Komponentenebene werden zwei Wiederholungen des bereits im vorangegangenen Beispiel verwendeten 5-Achs-Simultanbearbeitungsprozesses (Luftschnitt) betrachtet. In Abbildung 6.11 sind zwei gemessene Beschleunigungsspitzen in der Leistungsaufnahme der Motorspindel der Grob G350 zu sehen. Die Leistungsaufnahme wurde hierfür, wie durch das Ergebnis der Methode gefordert, mit 10 Hz aufgezeichnet und zeigt zwei ausgeprägte Spitzen mit 19,47 (Leistungsspitze G1; G = Grob) und 23,08 kW (Leistungsspitze G2). Anhand der zur Verfügung stehenden Datenbasis können den Spitzen die entsprechenden Parameter wie die Drehzahländerung, der NC-Schritt oder das NC-Programm zugeordnet werden. Damit lassen sich ihre Häufigkeit wie auch die charakteristischen Zeitpunkte ihres Auftretens im Produktionsablauf ableiten.

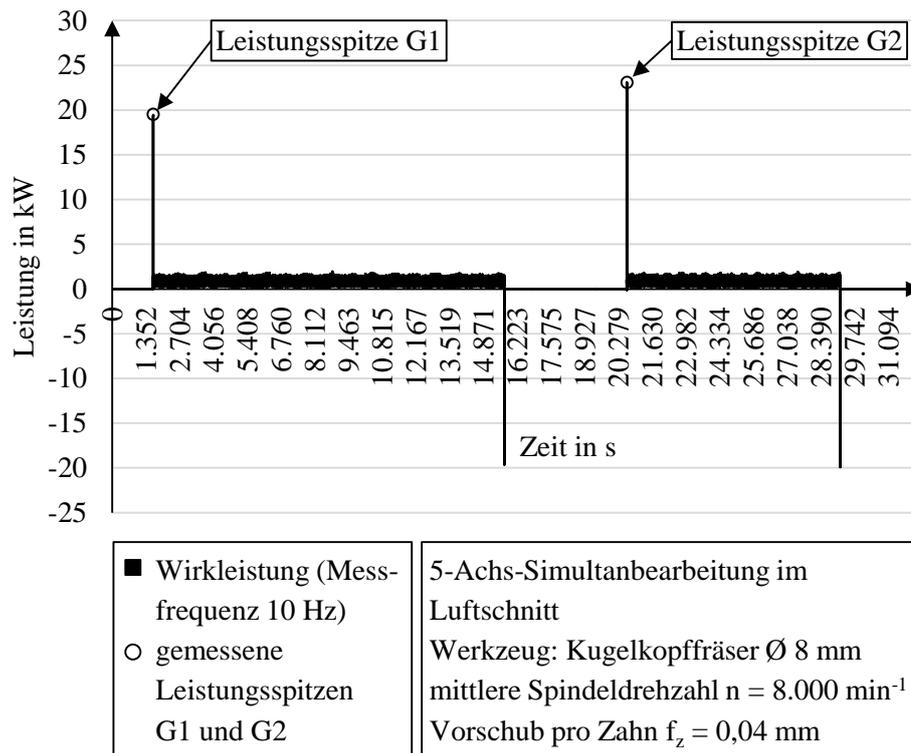


Abbildung 6.11: Analyse der maximalen Leistungsaufnahme der Motorspindel der Grob G350

Übertragbarkeit auf andere Produktionsanlagen und Bewertung der Ergebnisse

Für die Überprüfung der Übertragbarkeit auf weitere Produktionsanlagen zeigt Abbildung 6.12 das Ergebnis der Analyse der maximalen Leistungsaufnahme der Motorspindel der Spinner U5-620. Der für die Messung durchgeführte 5-Achs-Simultanbearbeitungsprozess war dabei unverändert gegenüber demjenigen für Abbildung 6.11.

Die Methode geht auch auf der Komponentenebene erst ab dem Schritt der *Definition der notwendigen Messfrequenzen* auf das spezifische energetische Verhalten der betrachteten Komponente ein. Hierbei würde beispielsweise die Analyse von zyklisch geschalteten Pumpen zu einem abweichenden Ergebnis von 1 Hz für die erforderliche Messfrequenz führen. Für hochdynamische Komponenten, zu welchen alle geregelten Antriebskomponenten zählen, ist ein alternativer Entscheidungsweg vorgesehen. Da es sich bei beiden Motorspindeln um hochdynamische Komponenten handelt, unterscheidet sich das Ergebnis der Methode für die Betrachtung der Spinner U5-620 nicht von dem Ergebnis hinsichtlich der Grob G350. Damit ergibt sich auch hier eine erforderliche Messfrequenz von 10 Hz.

Abbildung 6.12 zeigt die beiden gemessenen Beschleunigungsspitzen der Motorspindel von 29,13 (Leistungsspitze S1; S = Spinner) bzw. 29,01 kW (Leistungsspitze S2).

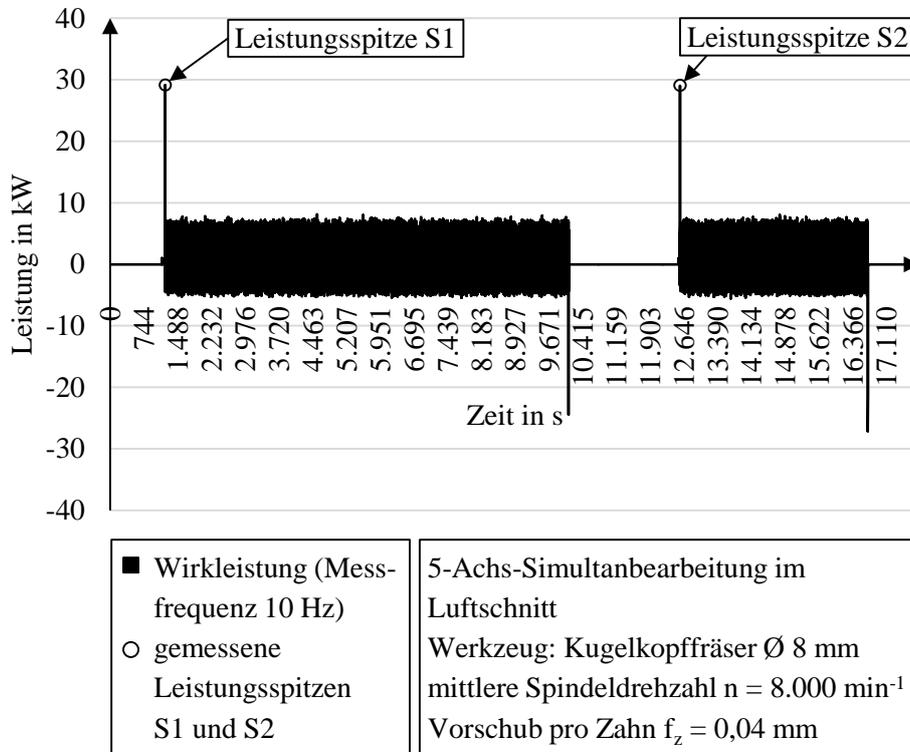


Abbildung 6.12: Analyse der maximalen Leistungsaufnahme der Motorspindel der Spinner U5-620

Die Durchführung der Analyse der maximalen Leistungsaufnahme der Motorspindel ergab die Notwendigkeit einer Messfrequenz von 10 Hz. Um diese Einordnung zu bewerten, ist der Einfluss der Messfrequenz auf die gemessenen Leistungsspitzen relevant. Wie bereits im Abschnitt 4.6 erläutert, reduziert eine sinkende Messfrequenz erheblich die Möglichkeit, hochdynamische Effekte messtechnisch korrekt zu erfassen. Abbildung 6.13 zeigt den Einfluss der Messfrequenz auf die Messbarkeit der Leistungsspitzen anhand der Grob G350 mittels einer Gegenüberstellung derselben Messdaten mit 10 und 1 Hz. Der Zeitpunkt des Auftretens der Leistungsspitzen kann stets mit der Genauigkeit der angewandten Messfrequenz angegeben werden und zeigt keine darüber hinausgehende Varianz. Die maximalen Leistungsaufnahmen sinken jedoch signifikant von 19,47 auf 13,61 kW (G1) bzw. von 23,08 auf 8,76 kW (G2). Die gemessenen Werte schwanken dabei, da sie sehr stark vom Zeitpunkt der maximalen Leistungsaufnahme im Vergleich zum Zeitpunkt des jeweiligen Messpunkts abhängen.

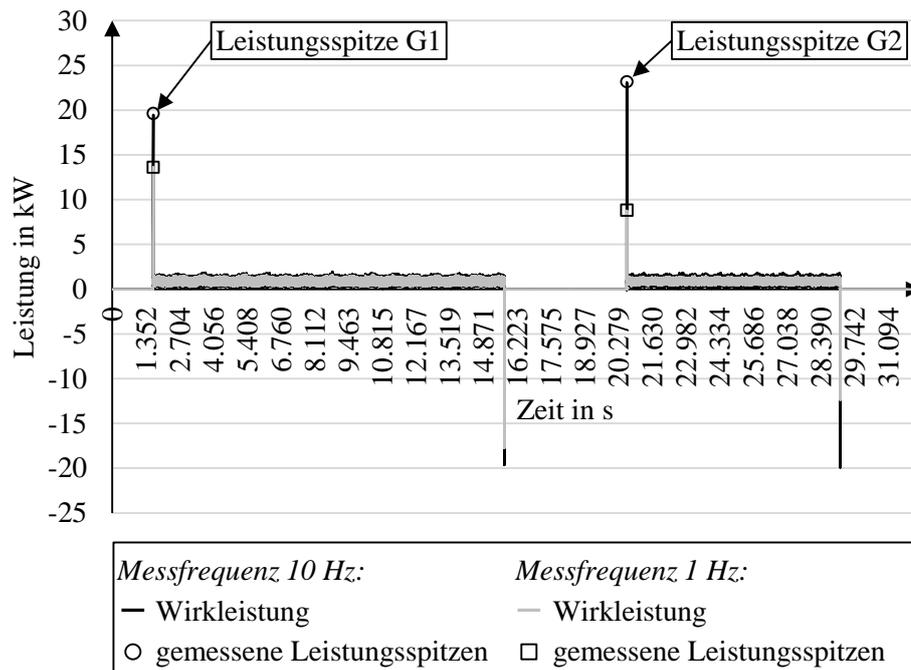


Abbildung 6.13: Einfluss der Messfrequenz auf die Messbarkeit von Leistungsspitzen am Beispiel der Grob G350

Dass eine Abtastfrequenz von 1 Hz nicht ausreichend ist, um Leistungsspitzen von energetisch hochdynamischen Komponenten und Anlagen zu erfassen, zeigt die vorangegangene Auswertung sehr deutlich. Ergänzend zu dieser ersten Erkenntnis ist in Abbildung 6.14 die Abhängigkeit der gemessenen Maximalwerte von der jeweils umgesetzten Abtastfrequenz für die im Rahmen der Analysen gemessenen Leistungsspitzen der Bearbeitungszentren Grob G350 und Spinner U5-620 zu sehen. Die Messfrequenz (Abtastfrequenz) war dabei nach oben hin auf die messtechnischen Möglichkeiten des Versuchsstands begrenzt. Es ist zu erkennen, dass sich die gemessenen Werte im Bereich von ca. 5 bis 15 Hz stabilisieren.

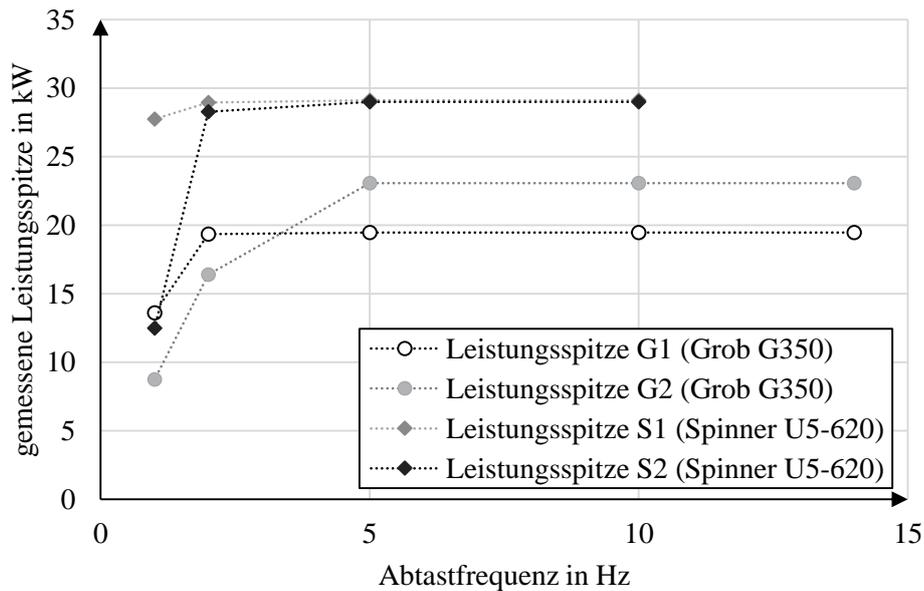


Abbildung 6.14: Abhängigkeit der gemessenen Leistungsspitzen von der Abtastfrequenz am Beispiel der Motorspindeln der spanenden Werkzeugmaschinen Grob G350 und Spinner U5-620

Gemäß derzeitigem Stand der Technik ist es allgemein gängig, bei der Wahl der geeigneten Abtastfrequenz nicht nur einen um Faktor 2 höheren Wert im Vergleich zur Signalfrequenz gemäß dem allgemeinen Abtasttheorem zu wählen. Weitgehend anerkannt ist, eine Größenordnung (Zehnerpotenz) zwischen die Frequenzen von Messsignal und Messung zu legen. Vor diesem Hintergrund sollte auch hier nicht die minimal möglich erscheinende Frequenz von 5 Hz Anwendung finden. Alternativ wird eine Messung mit 10 Hz als sinnvoll erachtet. Selbstverständlich würde eine weitere signifikante Steigerung der Abtastfrequenz zu einer Reduzierung des Messfehlers führen. Hierfür sind aktuell jedoch spezielle Messgeräte erforderlich, die nicht zum industriellen Standard zählen und daher sehr hohe Investitionskosten hervorrufen würden. Dies erscheint angesichts der sich bereits ab ca. 5 Hz stabilisierenden Messwerte für Anwendungen dieser Art nicht als sinnvoll.

6.4 Fazit

In den vorangegangenen Abschnitten 6.2 und 6.3 wurde die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte *Methode zur systematischen Energiedatenerfassung in der Produktion* in einer beispielhaften Anwendung auf Maschinen- und auf Aggregatsebene beschrieben.

Durch die Durchführung der exemplarischen Energiedatenanalysen konnte die Anwendbarkeit bestätigt werden. Die einzelnen Schritte sind bildhaft aufbereitet und daher leicht für Nutzer mit unterschiedlichen Vorkenntnissen anwendbar. Zudem belegt die Anwendung auf zwei Produktionsanlagen, welche zwar beide den spanenden Werkzeugmaschinen zuzuordnen sind, jedoch wesentliche herstellerepezifische und konstruktive Unterschiede aufweisen, die Übertragbarkeit zwischen unterschiedlichen Produktionsanlagen. Die Validierung konnte jedoch aufgrund messtechnischer Einschränkungen des zur Verfügung stehenden Versuchsstands nur für Energiedatenanalysen mit einer geforderten Messfrequenz von 1 bzw. 10 Hz durchgeführt werden. Die Sinnhaftigkeit und Qualität der erzielten Ergebnisse der Methode bestätigt insbesondere die Auswahl der jeweils zu fordernden Messfrequenz. Vor allem die Vergleiche zwischen Messdaten mit unterschiedlichen Messfrequenzen und die so mögliche Darstellung des Einflusses der Messfrequenz auf die Analyseergebnisse bestätigen die Ergebnisse der Methode. Hierbei sei nochmals darauf hingewiesen, dass es sich bei den definierten Messfrequenzen nicht um exakt einzuhaltende Werte, sondern um Richtwerte handelt.

Zusammenfassend ermöglicht die entwickelte *Methode zur systematischen Energiedatenerfassung in der Produktion* erstmals die gezielte und anforderungsgerechte Auswahl der erforderlichen Datengrundlage sowie einer geeigneten Messfrequenz für Energiedatenanalysen. Das Ergebnis einer Energiedatenanalyse hängt signifikant von der vorgelagerten Auswahl dieser Größen ab. Abbildung 6.15 zeigt dies nochmals beispielhaft anhand der Motorspindel des Bearbeitungszentrums Spinner U5-620. Den Daten zugrunde liegt der bereits verwendete 5-Achs-Bearbeitungsprozess.

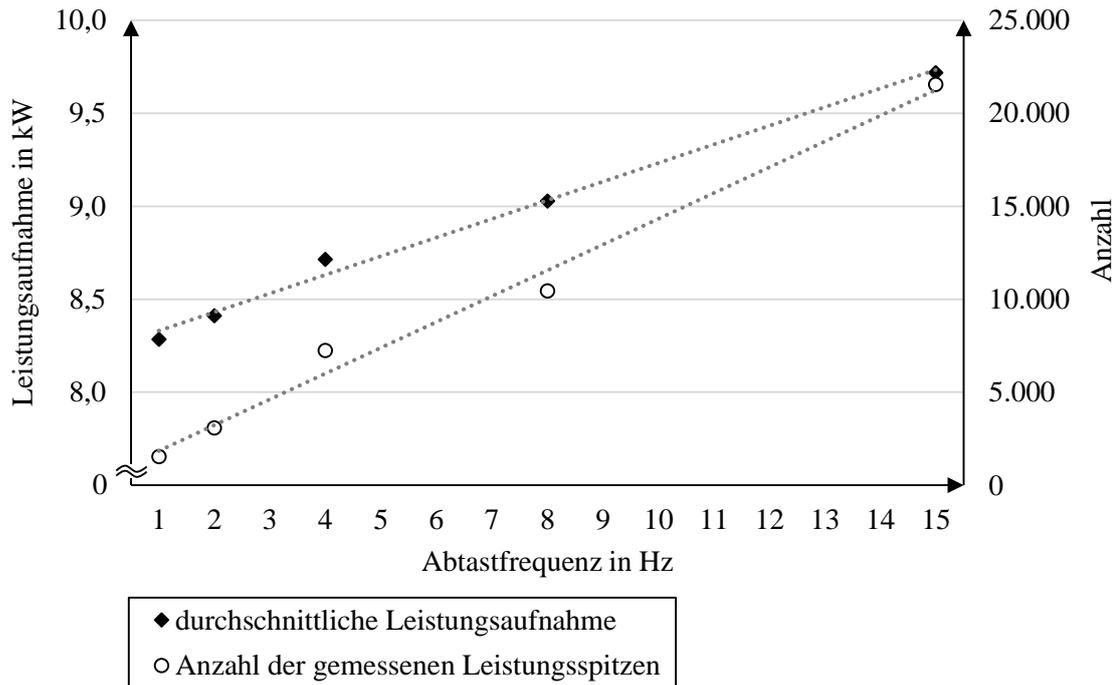


Abbildung 6.15: Abhängigkeit der Höhe und Anzahl der gemessenen Leistungsspitzen sowie der ermittelten durchschnittlichen Leistungsaufnahme von der Messfrequenz am Beispiel der Motorspindel der Spinner U5-620

In der Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass beispielsweise für die Auswertung der durchschnittlichen Leistungsaufnahme auch eine Abtastfrequenz von 1 Hz ausreichend ist. Eine höhere Wahl der Abtastfrequenz hat keinen signifikanten Einfluss auf die Berechnung des Durchschnittswertes. Soll hingegen die Anzahl der Leistungsspitzen einer Anlage oder einer Komponente analysiert werden, hat die Abtastfrequenz einen signifikanten Einfluss. Dies zeigt sich an diesem Beispiel einer Motorspindel besonders deutlich, da hier viele sehr kurze Beschleunigungsspitzen auftreten. Es ist zu beurteilen, ob die Anzahl der Leistungsspitzen Relevanz für die angestrebte Analyse hat oder ob beispielsweise nur Leistungsspitzen mit hohem Energieinhalt erfasst werden müssen. Hohe Abtastfrequenzen gehen zudem mit hohen Investitionskosten für die elektrische Messtechnik sowie die IT-Infrastruktur einher. Eine zu hohe Auflösung ist daher nicht anzustreben. Diesem Spannungsfeld steht jedes KMU bei der Durchführung einer Energiedatenanalyse gegenüber, unabhängig davon, ob Ziele der Energieeffizienz, der Energieflexibilität oder weitere Zielstellungen verfolgt werden sollen. Mithilfe der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methode lässt sich dieser Konflikt nun systematisch auflösen. Es bedarf abschließend noch einer wirtschaftlichen Bewertung der Methode, was im nächsten Kapitel beschrieben wird.

7 Bewertung der Ergebnisse

7.1 Kapitelüberblick

In diesem Kapitel soll eine kritische Würdigung der entwickelten Methode vorgenommen werden. Hierzu wird zunächst die Erfüllung der im Abschnitt 4.2 formulierten Anforderungen überprüft. Im Anschluss soll im Abschnitt 7.3 das wirtschaftliche Potenzial der Methode betrachtet werden, bevor im Abschnitt 7.4 darauf eingegangen wird, welche Voraussetzungen und Einschränkungen für eine Erweiterung der Methode auf weitere Produktionsebenen bestehen.

7.2 Überprüfung der Anforderungserfüllung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer *Methode zur systematischen Energiedatenerfassung in der Produktion*. Sie soll produzierende Unternehmen dazu befähigen, Energiedatenanalysen effizient durchzuführen und die nötigen Daten mit geeigneten Messfrequenzen zu erfassen. Weitere wesentliche Bestandteile der Methode sind die anwendungsgerechte Auswahl von Messpunkten, Messtechnik etc. Hierbei galt es, Anforderungen zu erfüllen, welche sich aus aktuell bestehenden Hemmnissen zur Durchführung von Energiedatenanalysen sowie aus dem Anspruch einer möglichst einfachen Durchführung der Methode ergeben. Im Folgenden wird die Methode hinsichtlich der Erfüllung der in Abschnitt 4.2 definierten Anforderungen bewertet:

- *Praxistauglichkeit für KMUs*: Die entwickelte Methode ist ohne spezifisches Expertenwissen nutzbar. Insbesondere durch die strukturierte und bildhafte Darstellung der einzelnen durch den Nutzer durchzuführenden Schritte, wird die Hemmschwelle gegenüber der Verwendung der vorliegenden Methode niedrig gehalten. Auch leistet die beispielhafte Umsetzung mittels einer Datenlogger-Applikation für Werkzeugmaschinen (s. Abschnitt 5.2) sowie eines Analysetools (s. Abschnitt 5.2) einen wesentlichen Beitrag zur Veranschaulichung der Praxistauglichkeit. Das entstandene Gesamtsystem führt bereits erste Energiedatenanalysen automatisiert durch und visualisiert die Ergebnisse. Hierdurch wird beispielsweise Produktionsspezialisten der Zugang zu Energiedatenanalysen erleichtert.
- *Betrachtung der industriell relevanten Energiedatenanalysen*: Die vorliegende Methode soll – innerhalb des im Abschnitt 3.4 definierten Betrachtungsraums – für möglichst alle aktuell industriell relevanten Energiedatenanalysen

in der Produktion anwendbar sein. Auf der Grundlage zahlreicher Expertengespräche sowie einer umfangreichen Literaturrecherche wurden die industriell relevanten Energiedatenanalysen identifiziert. Die Analysis-Relevance-Matrix (ARM, s. Abschnitt 4.4) stellt diese Analysen übersichtlich dar und teilt diese zudem in Cluster sowie nach Betrachtungsebene ein. Die Anforderung, die industriell relevanten Energiedatenanalysen zu betrachten, wurde somit erfüllt.

- *Quantitative Einordnung der benötigten Messfrequenzen:* Im Abschnitt 4.5 wurden, ebenfalls auf der Grundlage von Expertengesprächen, die für die Durchführung der relevanten Energiedatenanalysen notwendigen Datenarten identifiziert und in der Analysis-Input-Matrix (AIM) dargestellt. Auf Basis des energetischen Verhaltens der betrachteten Anlage oder Komponente sowie der Leistungsfähigkeit aktuell verfügbarer Leistungsmessgeräte konnten vier Kategorien erforderlicher Messfrequenzen definiert sowie den einzelnen Energiedatenanalysen zugeordnet werden (s. Abschnitt 4.6).
- *Übertragbarkeit:* Im Rahmen der beispielhaften Umsetzung sowie der Anwendung und Validierung wurde die Methode für eine spanende Werkzeugmaschine umgesetzt und anschließend auf eine zweite spanende Werkzeugmaschine übertragen. Dabei wurden stets auch die maschinen- und steuerungsspezifischen Einflüsse berücksichtigt. Die Übertragbarkeit ist damit nicht nur auf spanende Werkzeugmaschinen, sondern auch auf weitere Produktionsanlagen gegeben. Besonders einfach gestaltet sich die Anwendung der Methode an Produktionsanlagen, welche Komponenten mit ähnlichen energetischen Charakteristika enthalten, wie dies bei spanenden Werkzeugmaschinen der Fall ist.
- *Wirtschaftlichkeit:* Das wirtschaftliche Potenzial ist eine wesentliche Anforderung an die entwickelte Methode. Hierbei ist neben der Methode selbst vor allem das Potenzial zu betrachten, welches durch die Senkung der Hemmnisse gegenüber der Durchführung von Energiedatenanalysen entsteht. Zahlreiche wirtschaftliche Potenziale, welche mittels Energiedatenanalysen gehoben werden können, werden so erst für KMUs zugänglich gemacht. Die detaillierte Bewertung des wirtschaftlichen Potenzials ist Inhalt des folgenden Abschnitts 7.3.

7.3 Wirtschaftliche Bewertung

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte *Methode zur systematischen Energiedatenerfassung in der Produktion* kann in zweierlei Hinsicht wirtschaftlich bewertet werden.

Begründete Auswahl erforderlicher Systemtechnik und damit das Vermeiden von Fehlinvestitionen durch Über- bzw. Unterdimensionierung

Einerseits definiert die Methode eine hilfreiche Vorgehensweise für produzierende Unternehmen, von der Auswahl einer Energiedatenanalyse bis hin zur Definition der dafür erforderlichen Datengrundlage inkl. der benötigten Datenqualität. Dies gilt insbesondere für KMUs, welche oftmals keine Spezialisten für die Bereiche der Energiedatenanalysen sowie der Produktion zur Verfügung haben. Durch die vorgegebenen Schritte sowie die Definition der erforderlichen Datenarten und insbesondere der Messfrequenzen können begründete Investitionen in einem kurzen und gezielten Entscheidungsprozess geplant und getätigt werden. Zudem reduziert sich die Gefahr einer Fehlinvestition signifikant: Bis dato werden häufig Entscheidungen für Sensorik vor allem auf der Grundlage des Preises getroffen. Weitere Kriterien werden häufig aufgrund fehlender fachübergreifender Expertise und Erfahrung nicht, nicht präzise genug oder gar irrtümlich angewandt. Es entstehen Fehlinvestitionen durch Über- bzw. Unterdimensionierung von Messsystemen, welche dann für die jeweils angestrebten Energiedatenanalysen nicht geeignet sind. Solche Fälle schrecken Nutzer und Entscheider ab und hemmen die Durchführung von Energiedatenanalysen, insbesondere bei KMUs. In diesem Bereich kann die entwickelte Methode somit einen wertvollen Mehrwert stiften.

Ein geeignetes Fallbeispiel für den Bedarf einer Methode, um anwendungsspezifisch zu definieren, welche Datenarten in welcher Qualität benötigt werden, stellt ein süddeutscher Großkonzern dar. Sein Ziel ist die Optimierung eines Produktionsbereichs hinsichtlich seiner Energieeffizienz. Aufgrund fehlenden Fachwissens konnte bislang keine begründete Auswahl der notwendigen Messstellen sowie Messfrequenzen für die Leistungsmessungen getroffen werden. Da die Wahl einer höheren Messfrequenz nicht nur zu höheren Investitionskosten für die Sensorik selbst führt, sondern auch zu erheblichem Mehraufwand in den Bereichen der Leistungsfähigkeit der eingesetzten IT-Anbindung sowie des erforderlichen Speicherplatzes, ließen das Controlling sowie die IT-Abteilung in diesem Fall nur eine willkürlich festgelegte Messfrequenz von maximal 1 Hz sowie maximal einen Sensor pro Maschine zu. Hierfür wurden initiale Investitions- und Installationskosten von ca. 1.000 € pro Anlage getätigt, um

jede Maschine mit einem Sensor am Hauptanschluss zu versehen. Eine parallele Erfassung von Produktionsdaten wurde nicht realisiert. Mit dem umgesetzten System lassen sich nun lediglich Durchschnittswerte auf Maschinenebene mit rein zeitlichem Bezug berechnen und analysieren. Selbst eine einfach erscheinende Zuordnung zu Betriebszuständen war zwar geplant, konnte aber nur durch das manuelle Notieren der aktuellen Betriebszustände durch einen Praktikanten und aufwendiges manuelles Einpflegen dieser Daten in die Datenbank erfolgen. Eine dauerhafte und automatisierbare Lösung stellt dieses Vorgehen nicht dar, weshalb die Analyse aus Gründen der Wirtschaftlichkeit nur einmalig für einen Zeitraum einer achtstündigen Schicht pro Maschine durchgeführt werden konnte. Für alle weiteren Energiedatenanalysen wären entweder ergänzende Produktions- und Maschinendaten und/oder höher aufgelöste Messdaten erforderlich gewesen. Die getätigte Investition war somit zwar relativ gering, konnte aber kaum Nutzen stiften. Dieses Beispiel zeigt anschaulich, zu welcher Art von Fehlinvestitionen es heute selbst in Großkonzernen kommt, weil das Wissen über die individuell erforderlichen Datenarten sowie Messfrequenzen für die Durchführung von Energiedatenanalysen fehlt.

Senken von bestehenden Hemmnissen für KMUs gegenüber der Durchführung von Energiedatenanalysen

Der zweite Gesichtspunkt, unter welchem die *Methode zur systematischen Energiedatenerfassung in der Produktion* wirtschaftlich bewertet werden kann, ist die Erschließung neuer wirtschaftlicher Potenziale durch das Senken der bestehenden Hemmnisse gegenüber Energiedatenanalysen. Zahlreiche Potenziale im Bereich der energiebezogenen Leistung bleiben aktuell insbesondere bei KMUs ungenutzt. Dieses Phänomen ist beispielsweise durch die bereits im Abschnitt 1.2 angeführte, sehr geringe Verbreitung von Energiemanagementsystemen bei nur 17 % der KMUs sichtbar. Die entwickelte Methode soll die bestehenden Hemmnisse senken und die bisher ungenutzten Potenziale auch für KMUs zugänglich machen.

Im Folgenden ist dargestellt, inwieweit die Hemmnisse für KMUs (s. Abschnitt 1.2) durch den Einsatz der entwickelten Methode adressiert und verringert werden können:

- *Fehlende Standards bzgl. Messtechnik und Datenverarbeitung:* Die vorliegende Arbeit definiert keine neuen Standards in der Messtechnik oder Datenverarbeitung, sondern legt diese transparent dar. Zudem ordnet sich die Definition der erforderlichen Messfrequenzen in die Wertebereiche aktuell verfügbarer Messtechnik ein und ermöglicht es somit, gezielt Standard-Messtechnik auszuwählen und einzusetzen.

- *Mangel an Wissen, welche Daten für welche Analysen benötigt werden:* Ausgehend von der jeweils angestrebten Energiedatenanalyse definiert die entwickelte Methode die erforderlichen Datenarten sowie die notwendige Datenauflösung.
- *Hoher erforderlicher Personal- und Zeitaufwand für die Installation der Messtechnik sowie die manuelle Durchführung von Analysen und Visualisierungen:* Die entwickelte Methode enthält keinen neuen Standard zur Installation von Messtechnik oder zur Aufbereitung und Visualisierung von Energiedaten. Allerdings definiert die Methode die erforderliche Leistungsfähigkeit der einzusetzenden Messtechnik und ermöglicht so die gezielte Installation durch eine Elektrofachkraft oder die Beauftragung von externen Dienstleistern. Zudem zeigt die Arbeit Optionen auf, wie der Bedarf an Zusatzsensorik reduziert werden kann (s. Abschnitt 4.7). Die entwickelte Datenlogger-Applikation sowie das Analysetool erfassen, verarbeiten und visualisieren beispielhaft eine große Zahl der relevanten Energiedatenanalysen und können somit als „Richtschnur“ für die Umsetzung durch KMUs dienen.

Die bestehenden Hemmnisse für KMUs lassen sich somit nicht vollständig eliminieren, jedoch werden sie konsequent adressiert und reduziert.

Ein gut geeignetes Fallbeispiel stellt hierbei ein mittleres Unternehmen der Elektronikindustrie dar. Bei ihm wurden aufgrund fehlenden Wissens über die notwendigen Datenarten und Messfrequenzen über Jahre hinweg lediglich die Daten des Energieversorgers ausgewertet. Insbesondere die automatisierte Verkettung von Montageanlagen mit thermischen Prozessen bietet aufgrund der vorhandenen Produktionsdaten der Automatisierungstechnik eine gute Basis für die Erweiterung um elektrische Messtechnik. Auch handelt es sich zum Teil um sehr energieintensive Produktionsanlagen, welche ein hohes Optimierungspotenzial hinsichtlich ihrer energiebezogenen Leistung bieten. Die Experten im Bereich der Produktion trauten sich jedoch nicht zu, geeignete Messtechnik auszuwählen und somit erhebliche Investitionskosten zu vertreten. Durch die systematische Identifikation geeigneter Energiedatenanalysen sowie der dafür notwendigen Datengrundlage inkl. der erforderlichen Messfrequenzen konnte im ersten Schritt eine mittelfristige Installation (Messdauer ca. 2 Wochen) mobiler Messtechnik erreicht werden. Die ersten Energiedatenanalysen zeigten bereits erhebliche Verschwendungen insbesondere hinsichtlich der extrem hohen Leistungsaufnahmen der einzelnen Produktionsanlagen während des Stand-by-Betriebs auf. Am Beispiel eines Ofens konnte der hohe Energiebedarf während des Stand-by-Zustands auf eine zu geringe Außenisolierung zurückgeführt werden, wodurch das konstante Halten einer Mindesttemperatur einen hohen dauerhaften

Leistungsbedarf verursachte. Durch eine Verbesserung der Außenisolierung konnte die durchschnittliche Leistungsaufnahme über alle Betriebszustände hinweg erheblich reduziert werden. So wurden die Anfahrzeiten inkl. Aufheizvorgang um 30 % sowie die durchschnittliche Leistungsaufnahme um ca. 20 % gesenkt. Eine kontinuierliche Energiedatenerfassung und -analyse steht aktuell noch aus.

Wie in diesem Fallbeispiel gezeigt, senken der Einsatz der entwickelten *Methode zur systematischen Energiedatenerfassung in der Produktion* und die damit erreichbare Wissensgrundlage hinsichtlich der erforderlichen Datengrundlage für Energiedatenanalysen die Hemmnisse für KMUs, Energiedatenanalysen durchzuführen. Somit erhalten auch KMUs Zugang zu den wirtschaftlichen Potenzialen, welche sich durch Energiedatenanalysen bieten. Im Folgenden werden diese Potenziale beispielhaft auf Basis der beiden bereits für die Validierung herangezogenen Fallbeispiele (s. Kapitel 6) aufgezeigt und quantifiziert.

Analyse der durchschnittlichen Leistungsaufnahme pro Betriebszustand als Beispiel für das Einsparen von Energiekosten

Die durchschnittliche Leistungsaufnahme pro Betriebszustand lässt sich für mehrere unterschiedliche Zielsetzungen nutzen. Ein Beispiel ist die energiebezugsorientierte Auftragsplanung [76]. Insbesondere vor dem Hintergrund der Energiewende in Deutschland ist mit volatiler Energieverfügbarkeit und somit auch mit stärker schwankenden Energiepreisen zu rechnen (s. Abschnitt 2.3.3). Indem die durchschnittliche Leistungsaufnahme pro Betriebszustand und Produkt der Produktionsanlagen in der Produktionsplanung berücksichtigt wird, können im Vorfeld bekannte Schwankungen des Energiepreises in die Entscheidungen einbezogen werden. Durch eine Abwägung aller für die Produktion erforderlichen Ressourcen kann somit ein optimaler Produktionsablauf geplant werden. Für ein Beispielunternehmen mit 50 Produktionsanlagen und 100 darauf zu fertigenden Produkten ergibt sich damit ein jährliches Einsparpotenzial von 25.000 € [76]. Dabei sind jedoch als Aufwände die Planungs-, nicht aber die Investitions- und Wartungskosten einbezogen. Insbesondere für Unternehmen, welche einen wesentlichen Teil ihres Energiebedarfs durch Eigenherzeugung decken, ist dieses Vorgehen bereits heute wirtschaftlich [76].

Auch Graßl [3] baut auf durchschnittlichen Leistungsaufnahmen pro Betriebszustand einer Produktionsanlage auf und bewertet deren Eignung für einen energieflexiblen Einsatz. Der damit verbundene wirtschaftliche Nutzen ist insbesondere für energieintensive Produktionsanlagen relevant. Graßl [3] stellt hierbei initialen Aufwänden für die Analyse von zwei Produktionsstationen von ca. 30.000 € und jährlichen Auf-

wänden von ca. 2.000 € ein jährliches Einsparpotenzial von bis zu 75.000 € gegenüber. Bei dem dabei gewählten Anwendungsbeispiel mit einem Jahresenergiebedarf von 15 GWh und einem durchschnittlichen Strompreis von 0,10 €/kWh ergibt sich damit ein jährliches monetäres Einsparpotential von 5 % der jährlichen Energiekosten von 1,5 Mio. €. Dies zeigt insbesondere das grundsätzliche Potenzial auf. Die Zahlen sind jedoch stark vom jeweiligen Anwendungsfall abhängig. Hohes Potenzial ist insbesondere bei energieintensiven Anlagen zu erwarten.

Analyse der maximalen Leistungsaufnahme einer Komponente als Beispiel für die Vermeidung von zusätzlichen Energiekosten

Die Betrachtung von Leistungsspitzen von Komponenten einer Produktionsanlage hat ebenfalls mehrere mögliche Zielstellungen. Ein Beispiel ist die Identifikation der Ursachen von Problemen im Bereich der Spannungsqualität. Ein weiterer Anwendungsfall ist die Überwachung von Einflussgrößen auf den Leistungspreis als wesentliche Komponente bei der Berechnung der individuellen betrieblichen Energiekosten. Der Leistungspreis wird dabei auf Grundlage von Durchschnittswerten der Gesamtleistungsaufnahme des Standorts über je 15 min berechnet, beginnend stets um 0:00 Uhr. Um günstige Vertragskonditionen zu erhalten, legen KMUs hierbei i. d. R. einen maximalen Wert für ein Kalenderjahr fest, auf dessen Grundlage der kalkulierte Energiepreis berechnet wird. Treten doch höhere 15-min-Durchschnittswerte auf, so hat dies signifikante Zusatzkosten zur Folge. Der tatsächlich aufgetretene maximale 15-min-Durchschnittswert eines Kalenderjahres wird als Referenzwert für den Jahres-Leistungspreis herangezogen. Somit sind möglichst gleichmäßige Werte im Jahresverlauf anzustreben. Lastspitzen von Produktionsanlagen haben einen wesentlichen Einfluss auf diesen 15-min-Durchschnittswert. Dies ist insbesondere der Fall, wenn innerhalb eines 15-min-Fensters einzelne Lastspitzen mit großem Energieinhalt auftreten. Alternativ können auch viele Lastspitzen mit geringem Energieinhalt wie bei Werkzeugmaschinen z. B. durch zeitlich synchrone Anlauf- oder Produktionsprozesse den Gesamtlastgang negativ beeinflussen. Dieser Effekt ist jedoch i. d. R. sehr gering.

Ein Fallbeispiel in diesem Bereich stellt ein kunststoffverarbeitendes, mittelständisches Unternehmen dar. Durch das ungewollte und unbedachte gleichzeitige Anfahren mehrerer energieintensiver Komponenten beim Einschalten einer Produktionsanlage wurde eine außergewöhnlich hohe, kurzfristige Lastspitze erzeugt. Diese führte zu einer signifikanten Erhöhung des 15-min-Durchschnittswertes. Durch diese einmalige Lastspitze entstanden dem betroffenen Unternehmen durch einen höheren Leistungspreis Zusatzkosten in Höhe von ca. 50.000 €. Somit hat die Analyse und

Überwachung von Leistungsspitzen von Maschinenkomponenten sowie der Ursachen hierfür ein hohes wirtschaftliches Potenzial und bietet eine bessere Planungssicherheit im Bereich der Energiekosten. Dies gilt insbesondere für KMUs, da diese mit wenig Verhandlungsspielraum an die Standard-Verträge der Energieversorger gebunden sind. Auch bietet dies die Grundlage für die Ausarbeitung spezifischer Anfahr-Strategien für energieintensive Anlagen, welche im vorliegenden Fallbeispiel auch ausgearbeitet wurden. Die entsprechenden Anlagen wurden mit einem automatisierten Überwachungssystem versehen.

7.4 Voraussetzungen und Einschränkungen für eine Erweiterung auf weitere Produktionsebenen

Wie bereits im Abschnitt 3.4 erläutert, beschränkt sich der Betrachtungsraum dieser Arbeit und der darin entwickelten Methode auf die Produktionsebenen *Maschine* und *Aggregate*. Abbildung 3.6 (S. 52) zeigt dies auf der Grundlage der Zuordnung von elektrotechnischen Ebenen und Produktionsebenen. Diese ergibt, dass die in den Unternehmen heute bestehende elektrotechnische Infrastruktur nicht ausreicht, um den Energiebedarf der unterschiedlichen Produktionsebenen produktionsspezifisch zu erfassen. Auf den Produktionsebenen *Maschine* und *Aggregate* ist eine eindeutige Verknüpfung von Energie- und Produktionsdaten zwar vorhanden, jedoch im Regelfall nur durch zusätzliche Energiemessungen realisierbar. Eine Nutzung der bestehenden elektrotechnischen Infrastruktur ist nicht ausreichend. Sollen Energiedatenanalysen auf höheren Produktionsebenen durchgeführt werden, so ist dies auf der Grundlage dieser Arbeit durch Aggregation der Messdaten und Erkenntnisse auf Maschinenebene nach oben hin möglich. Diese Aggregation ist, verglichen mit einer Möglichkeit der direkten Messung der zu betrachtenden Produktionsebene, mit Mehraufwand verbunden.

Eine direkte Messung des Energiebedarfs einer Fertigungszelle, eines Produktionsbereichs oder gar aller Produktionsanlagen in einer Halle scheidet aktuell i.d.R. an der elektrotechnischen Infrastruktur. Hier kann z. B. keine Versorgungsstation dazu genutzt werden, den Energiebedarf einer Fertigungszelle zu erfassen, da die Zuordnung von Produktionsanlagen, Automatisierungstechnik, aber auch Lüftungstechnik und weiterer Peripherie, zur elektrotechnischen TGA nicht aus produktionstechnischer Sicht erfolgt. Vielmehr werden die Anlagen so auf die unterschiedlichen Stromschienen aufgeteilt, dass eine möglichst gleichmäßige Auslastung der elektrotechnischen Infrastruktur erfolgt. Bei dem Beispiel der eingangs erwähnten Fertigungszelle ist es also wahrscheinlich, dass bei der Messung an der Versorgungsstation weitere

Anlagen (wie z. B. Geräte der Klimatechnik) mit erfasst werden. Alternativ könnte es sein, dass einzelne Bestandteile der Fertigungszelle (z. B. Produktionsanlage und Kühlaggregat) auf unterschiedliche Versorgungsstationen aufgeteilt wurden und somit nur ein Teil des zu betrachtenden Produktionssystems erfasst wird.

Soll dieser Zwiespalt aufgelöst werden, müsste die elektrotechnische Installation bereits im Stadium der Fabrikplanung an die Produktion angepasst werden. Dies würde jedoch zu einer Erhöhung der installierten Kapazitäten und somit zu einer geringeren Auslastung führen. Bleibt die grundlegende Struktur der Produktion dabei planbar langfristig unverändert, stellt dies eine sinnvolle Möglichkeit dar, um auf eine große Zahl an Sensorik auf Maschinenebene zur Erfassung von produktionsbezogenen Energiedaten verzichten zu können. Hier lohnt sich also eine individuelle wirtschaftliche Betrachtung und Bewertung.

Bei einer Umstrukturierung der Produktion oder des Materialflusses kann die elektrotechnische Infrastruktur jedoch nur mit extrem hohem Aufwand angepasst werden. Geschieht dies nicht, so geht die Zuordnung zur Produktion verloren. Insbesondere bei flexiblen und wandlungsfähigen Produktionsumgebungen, die in Zukunft immer häufiger gefragt sein werden, wird sich eine produktionspezifische elektrotechnische Infrastruktur daher schwierig gestalten.

Somit ist auch für zukünftige Produktionsstandorte davon auszugehen, dass eine maschinen- oder aggregatsbezogene Energiedatenerfassung mit anschließender Aggregation auf höhere Produktionsebenen sinnvoll bleibt, auch wenn dies mit dem erwähnten Mehraufwand verbunden ist. Zudem wird dieser Ansatz zunehmend durch den Effekt unterstützt, dass moderne Produktionsanlagen i. d. R. bereits vom Hersteller mit maschinenspezifischer elektrischer Messtechnik ausgestattet werden. Damit wird zukünftig eine deutlich größere Zahl an steuerungsinterner Sensorik auf Anlagen- und Komponentenebene für die Durchführung von Energiedatenanalysen zur Verfügung stehen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Auch im produzierenden Gewerbe nehmen die Energiekosten einen immer größeren Stellenwert ein. Dies wird verstärkt durch politische Maßnahmen, wie den Ausstieg aus der Kernenergie und den Ausbau regenerativer Energien in Deutschland, oder die sehr ambitionierten Ziele der EU zur Steigerung der Energieeffizienz. Dies führt u. a. zu steigenden Kosten und sinkender Versorgungssicherheit und damit zu einem steigenden Handlungsbedarf für die Industrie, ihren Energiebedarf zu analysieren und zu reduzieren. Insbesondere für KMUs bestehen allerdings noch wesentliche Hemmnisse, welche einen breiteren Einsatz von Energiedatenanalysen bis heute verhindern. Dazu zählen z. B. fehlendes fachübergreifendes Expertenwissen für die beiden Bereiche der individuell relevanten Fertigungsdisziplinen sowie der Energiedatenanalysen. Auch fehlen Standards hinsichtlich der einzusetzenden Messtechnik und Systemen zur Verarbeitung energiebezogener Daten. Schließlich erfordern die Auswahl und Durchführung von Energiedatenanalysen einen erheblichen Personal- und Zeitaufwand. Es bestand somit der Handlungsbedarf, das Vorgehen zur Durchführung von Energiedatenanalysen zu systematisieren und somit effizient zu gestalten. Daraus leitete sich für die vorliegende Arbeit das Ziel einer *systematischen Energiedatenerfassung in der Produktion* auf Basis einer Methode ab.

Für die Definition des Betrachtungsraums wurden zunächst die Produktionsebenen den elektrotechnischen Ebenen im Produktionsbetrieb gegenübergestellt. Die vorliegende Arbeit betrachtet jene Ebenen, innerhalb derer die elektrotechnischen Ebenen Produktionsebenen zugeordnet werden können. Dies ist nur auf den Ebenen *Maschine* und *Aggregate* gegeben. Höhere Produktionsebenen müssen ggf. durch Aggregation der Messdaten abgedeckt werden.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte *Methode zur systematischen Energiedatenerfassung in der Produktion* besteht aus vier wesentlichen Schritten:

Zu Beginn muss die angestrebte Analyse ausgewählt werden. Hierzu wurde auf Basis einer umfangreichen Literaturrecherche sowie zahlreicher Expertengespräche identifiziert, welche Energiedatenanalysen aktuell Relevanz besitzen. Auch wurden die Analysen in einzelne Cluster eingeteilt. Das Ergebnis des ersten Schrittes ist geprägt durch die entwickelte Analysis-Relevance-Matrix (ARM), welche einerseits die industriell relevanten Energiedatenanalysen zusammenfasst. Andererseits dient sie dem Nutzer zur Auswahl und Einordnung seiner individuell angestrebten Analyse.

Aufbauend auf der Auswahl der Analyse müssen die für die Durchführung notwendigen Datenarten definiert werden. Hierzu wurde die Analysis-Input-Matrix (AIM) entwickelt, welche die Inputs konsolidiert. Dabei berücksichtigt sie unterschiedliche Typen von Energie-, Maschinen- und Betriebsdaten. Bei der Anwendung der Methode dient die AIM dem Nutzer dazu, die jeweils benötigten Datenarten auszuwählen.

Die Definition der erforderlichen Messfrequenzen basiert auf der Annahme, dass aus Gründen der Datenkonsistenz und der Auswertbarkeit alle Datenarten mit derselben Messfrequenz aufgezeichnet werden müssen. Hierzu konnte in Abhängigkeit des energetischen Verhaltens der betrachteten Anlage oder Komponente festgelegt werden, in welcher Größenordnung die Messfrequenz zu wählen ist. Diese Größenordnungen entsprechen dabei den Kategorien der am Markt zur Verfügung stehenden elektrischen Messtechnik. Die erforderlichen Messfrequenzen für die zu Beginn als industriell relevant identifizierten Energiedatenanalysen reichen von 1 Hz bis hin zu 4 kHz.

Um die bestehenden Hemmnisse der KMUs gegenüber der Durchführung von Energiedatenanalysen weiterhin gezielt zu adressieren, wurden aufbauend auf der reinen Auswahl der notwendigen Datengrundlage mehrere Optionen betrachtet, den Bedarf an Zusatzsensorik zu reduzieren. Zu den vielversprechendsten Möglichkeiten zählt die automatisierte Erfassung und Nutzung steuerungsinterner Variablen.

Die beispielhafte Umsetzung an einem Versuchsstand ermöglicht eine automatisierte Erfassung von Energie-, Maschinen- und Betriebsdaten gemäß diesem Ansatz. Die entwickelte Datenlogger-Applikation sowie das Analysetool zeigen zudem die wesentlichen Einflussfaktoren und Einschränkungen bei der Nutzung steuerungsinterner Variablen für Energiedatenanalysen auf. Darüber hinaus konnten erste Energiedatenanalysen beispielhaft durchgeführt und deren Ergebnisse visualisiert werden.

Der aufgebaute Versuchsstand ermöglichte die Anwendung und die Validierung der entwickelten *Methode zur systematischen Energiedatenerfassung in der Produktion* an je einem Beispiel auf Maschinen- und Aggregatsebene. Die Ergebnisse davon bestätigten die Sinnhaftigkeit der entwickelten Methode. Energiedatenanalysen, welche eine mit sehr hohen Frequenzen von über 25 Hz erfasste Datenbasis oder die parallele Erfassung sehr vieler Variablen erfordern, konnten daher nicht realisiert werden.

Das wirtschaftliche Potenzial der entwickelten Methode ließ sich abschließend unter mehreren Gesichtspunkten bewerten. Die Potenziale reichen dabei von der Vermeidung von Fehlinvestitionen durch Über- oder Unterdimensionierung des Messsystems bis hin zur signifikanten Reduzierung der Hemmnisse für KMUs gegenüber der Durchführung von Energiedatenanalysen. Hierdurch werden sich zukünftig weitere wirtschaftliche Potenziale durch den systematischen Einsatz von Energiedatenanalysen heben lassen. Diese Potenziale waren bisher vor allem Großunternehmen oder besonders energieintensiven Unternehmen vorbehalten und können nun auch durch KMUs adressiert werden.

Die Errungenschaften der vorliegenden Dissertation sind somit:

- Es liegt nun eine Methode vor, die produzierende Unternehmen dazu befähigt, ihre jeweils angestrebten Energiedatenanalysen effizient und zielgerichtet durchzuführen und dafür nur die erforderlichen Daten in der notwendigen Genauigkeit zu erfassen.
- Mit der ARM verfügt der Leser über ein Instrument zur Auswahl und Einordnung der von ihm angestrebten Analyse in ein Analysecluster sowie in die betrachtete Produktionsebene. Steht das konkrete Ziel noch nicht fest, kann die ARM zudem der Auswahl einer Energiedatenanalyse dienen.
- Durch die AIM wird der Leser in die Lage versetzt, die individuell notwendigen Datenarten zu identifizieren. Darauf aufbauend ermöglicht die Methode die Definition der erforderlichen Messfrequenz in Abhängigkeit des energetischen Verhaltens des betrachteten Systems.
- Eine Möglichkeit der automatisierten Energiedatenerfassung und -analyse wurde am Beispiel zweier handelsüblicher spanender WZM umgesetzt (s. Kapitel 5). Dadurch ist für den Leser in leicht nachvollziehbarer Form dargelegt, wie er die Datenerfassung und -analyse für bestehende Produktionssysteme mit möglichst wenig Aufwand umsetzen kann.
- Durch die Anwendung und Validierung des Systems mithilfe konkreter Analysebeispiele auf Maschinen- und Aggregatsebene und deren Durchführung an den zwei betrachteten WZM ist nun belegt, dass die Methode einfach anwendbar und auf verschiedene Produktionsanlagen übertragbar ist. Auch konnte die Ergebnisqualität insb. bzgl. der anzustrebenden Messfrequenzen bestätigt werden.
- Anhand der Ergebnisbewertung (Kapitel 7) wird für den Leser deutlich, welche wirtschaftlichen Potentiale er durch die Anwendung der entwickelten Methode heben kann.

- Die Dissertation adressiert in besonderer Weise die Belange von KMUs, indem sie u.a. gezielt auf die Möglichkeiten eingeht, wie sich Zusatzsensorik vermeiden lässt. So können Energiedatenanalysen mit möglichst geringem Investitionsaufwand umgesetzt werden. Auch die Zuordnung der angestrebten Messfrequenzen zu Kategorien handelsüblicher elektrischer Messtechnik erleichtert die Anwendung in der Praxis.

8.2 Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte *Methode zur systematischen Energiedatenerfassung in der Produktion* kann als Grundlage für eine Vielzahl an weiterführenden wissenschaftlichen Arbeiten dienen. Die Auswahl und die Akquisition zeitlich synchroner und mit der individuell erforderlichen Messfrequenz erfasster Energie-, Maschinen- und Betriebsdaten bieten großes und vielfältiges Potenzial.

Beispielsweise befassen sich im Bereich der *Energieflexibilität in der Produktion* aktuell zahlreiche wissenschaftliche Vorhaben mit der Frage, wie ein energieflexibler Betrieb von Produktionsanlagen realisiert werden könnte. Hierzu ist nach der Identifikation der bestehenden Möglichkeiten zur aktiven Beeinflussung und Steuerung des Energiebedarfs ein wesentlicher Aspekt, wie diese Steuerungsmöglichkeiten produktionsparallel identifiziert und umgesetzt werden können. Zahlreiche Energieflexibilitätspotenziale sind vom aktuellen Zustand der betrachteten Anlage oder Komponente abhängig und verändern sich somit über die Zeit. Eine reale Nutzbarmachung dieser Potenziale erfordert daher neben Strategien zur Entscheidungsfindung und zur IT-Kommunikation auch eine systematische Auswahl und die möglichst automatisierte laufende Erfassung der notwendigen Energie-, Maschinen- und Betriebsdaten.

Ein aufstrebendes Feld, welches die gezielte Auswahl und Erfassung von Energie-, Maschinen- und Betriebsdaten ebenfalls hervorragend nutzen könnte, ist das Gebiet von *Condition Monitoring* und *Predictive Maintenance* in der Produktion. Einige Forschungsarbeiten befassen sich u. a. mit der Zustandsüberwachung von Produktionsanlagen und ihren Komponenten. Hierzu sollen lernende Systeme zum Einsatz kommen, welche auch über einen längeren Zeitraum hinweg den Normalzustand einer Maschine erlernen und von einem kritischen Verschleißfall unterscheiden können. Die Leistungsfähigkeit der dafür eingesetzten Algorithmen ist im Wesentlichen von der Qualität und dem Umfang der zur Verfügung stehenden Datengrundlage abhängig. Reine Energiedaten sind hierbei nicht ausreichend, um einen Zustand nicht nur erfassen, sondern auch bewerten zu können. Einige wissenschaftliche Arbeiten

gehen zudem bereits einen Schritt weiter und streben an, auch die zukünftige Entwicklung des Verschleißzustandes einer Anlage oder Komponente vorherzusagen. Damit könnte der Ausfallzeitpunkt prognostiziert und ein wirtschaftlich idealer Zeitpunkt zwischen einem zu frühen Wechsel von Verschleißkomponenten und einem zu hohen Risiko eines Ausfalls berechnet werden. Je umfangreicher und spezifischer sich die Daten als Grundlage hierfür definieren und erheben lassen, desto vielversprechender gestalten sich die genannten Ansätze.

Darüber hinaus lässt sich der grundlegende Ansatz einer systematischen Auswahl und Erhebung der spezifisch für eine Zielsetzung erforderlichen Datengrundlage sehr gut auf weitere Gebiete im Umfeld der Digitalisierung übertragen. Insbesondere bei KMUs stellen sich die Fragen nach anwendungsspezifischer Datenerhebung und -auswertung somit auch jenseits energiebezogener Themen.

9 Literaturverzeichnis

- [1] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (Hrsg.): Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken (2016). <[https://www.bdew.de/inter-net.nsf/res/7BD63123F7C9A76BC1257F61005AA45F/\\$file/160218_Energie-Info_Erneuerbare%20Energien%20und%20das%20EEG_2016_final.pdf](https://www.bdew.de/inter-net.nsf/res/7BD63123F7C9A76BC1257F61005AA45F/$file/160218_Energie-Info_Erneuerbare%20Energien%20und%20das%20EEG_2016_final.pdf)> – 06.04.2017.
- [2] Abele, E.; Sielaff, T.; Schiffler, A.; Rothenbücher, S.: Analyzing Energy Consumption of Machine Tool Spindle Units and Identification of Potential for Improvements of Efficiency. In: Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing – Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering in Braunschweig. Berlin: Springer 2011, ISBN: 978-3-642-19692-8, S. 280–285.
- [3] Graßl, M.: Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion. Dissertation. Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb), Technische Universität München: München (2015).
- [4] Popp, R. S.-H.; Liebl, C.; Zaeh, M. F.: A multi-level procedure to evaluate the energy flexibility potential of production machines. *Procedia CIRP* 67 (2018), S. 75–80.
- [5] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.): Energieeffizienz in Zahlen. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen.pdf?__blob=publication-File&v=22 – 19.12.2018.
- [6] Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hrsg.): Bruttostromerzeugung in Deutschland. <<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/ImFokus/Energie/ErneuerbareEnergien2013.html>> – 07.06.2018.
- [7] DIN EN ISO 50001: Energiemanagementsysteme. Berlin: Beuth 2011.
- [8] O'Driscoll, E.; O'Donnell, G. E.: Industrial power and energy metering – a state-of-the-art review. *Journal of Cleaner Production* 41 (2013), S. 53–64.
- [9] Karcher, P.; Siemer, M. (Hrsg.): Betriebliches Energiemanagement in produzierenden Unternehmen Deutschlands 2013. 1 Aufl. Berlin: Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK 2013.

- [10] Gontarz, A. M.; Hampl, D.; Weiss, L.; Wegener, K.: Resource Consumption Monitoring in Manufacturing Environments. *Procedia CIRP* 26 (2015), S. 264–269.
- [11] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz) (EEG). 2017.
- [12] DIN EN 16247-1: Energieaudits (Teil 1: Allgemeine Anforderungen). Berlin: Beuth 2012.
- [13] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V. (Hrsg.): VDI-Richtlinien. <<https://www.vdi.de/technik/richtlinien/faq/>> – 26.06.2018.
- [14] VDI-Richtlinie 4602: Energiemanagement (Begriffe). Berlin: Beuth 2007.
- [15] VDMA-Einheitsblatt 34179: Messvorschrift zur Bestimmung des Energie- und Medienbedarfs von Werkzeugmaschinen in der Serienfertigung. Berlin: Beuth 2015.
- [16] Geilhausen, M.; Bränzel, J.; Engelmann, D.; Schulze, O. (Hrsg.): Energiemanagement. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015, ISBN: 978-3-658-02833-6.
- [17] Liebl, C.; Popp, R. S.-H.; Zaeh, M. F.: Approach for a systematic energy data generation and evaluation. *Procedia CIRP* 67 (2018), S. 63–68.
- [18] DIN EN ISO 9001: Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen. Berlin: Beuth 2015.
- [19] Amtsblatt der Europäischen Union: Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz, zur Änderung der Richtlinien 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG. 2012.
- [20] Herbst, A.; Jochem, E.; Idrissova, F.; John, F.; Lifschiz, I.; Lösch, O.; Mai, M.; Reitze, F.; Toro, F. (Hrsg.): Energiebedarf und wirtschaftliche Energieeffizienz-Potentiale in der mittelständischen Wirtschaft Deutschlands bis 2020 sowie ihre gesamtwirtschaftlichen Wirkungen. <http://www.effizienz-wende.de/download/documents/studie_energieeffizienzpotentiale_mittelstand_bf.pdf> – 19.12.2018.

-
- [21] Bunse, K.; Vodicka, M.; Schönsleben, P.; Brühlhart, M.; Ernst, F. O.: Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis between industrial needs and scientific literature. *Journal of Cleaner Production* 19 (2011) 6–7, S. 667–679.
- [22] Kübler, F.; Böhner, J.; Steinhilper, R.: Resource Efficiency Optimization of Manufacturing Processes Using Evolutionary Computation: A Turning Case. *Procedia CIRP* 29 (2015), S. 822–827.
- [23] Zäh, M. F.; Fischbach, C. W.; Kunkel, F.: Energieflexibilität in der Produktion identifizieren. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 108 (2013) 9, S. 639–642.
- [24] Haag, H. (Hrsg.): Eine Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2013, ISBN: 978-3-8396-0547-9.
- [25] Eyerer, P. (Hrsg.): Ganzheitliche Bilanzierung. Berlin, Heidelberg: Springer 1996, ISBN: 978-3-642-79807-8.
- [26] Reinhart, G.; Karl, F.; Krebs, P.; Reinhardt, S.: Energiewertstrom. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 105 (2010) 10, S. 870–875.
- [27] Branham, M.; Gutowski, T. G.; Jones, A.; Sekulic, D. P.: A Thermodynamic Framework for Analyzing and Improving Manufacturing Processes. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics and the Environment* (2008), San Francisco, 9.–21. Mai 2008, S. 1–6.
- [28] Gutowski, T.; Dahmus, J.; Thiriez, A.; Branham, M.: A Thermodynamic Characterization of Manufacturing Processes. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics and the Environment* (2007), Orlando, 7.–10. Mai 2007, S. 137–142.
- [29] Abele, E.; Schrems, S.: Ressourcenorientierte Bewertung alternativer Prozessketten. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 105 (2010) 6, S. 542–546.
- [30] Popp, R. S.-H.; Liebl, C.; Zaeh, M. F.: Energy flexible machine tool components – an investigation of capabilities. *Procedia CIRP* 57 (2016), S. 692–697.
- [31] Agora Energiewende (Hrsg.): Aktuelle Stromdaten / Agorameter. <https://www.agora-energiewende.de/service/aktuelle-stromdatenagorameter/chart/power_generation/10.06.2018/16.06.2018/> – 14.08.2018.

- [32] Reinhart, G.; Reinhardt, S.; Graßl, M.: Energieflexible Produktionssysteme. wt Werkstattstechnik online 102 (2012) 9, S. 622–628.
- [33] Liebl, C.; Popp, R. S.-H.; Zäh, M. F.: Energieflexibilität von Produktionsanlagen. wt Werkstattstechnik online 105 (2015) 3, S. 136–140.
- [34] Popp, R. S.-H.; Zäh, M. F.: Steuerung des Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen. wt Werkstattstechnik online 104 (2014) 6, S. 413–417.
- [35] Popp, R. S.-H.: Energieflexible, spanende Werkzeugmaschinen – Analyse, Befähigung und Erfolgsaussichten. Dissertation. Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb), Technische Universität München: München (in Erstellung).
- [36] 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 69 (2018), S. 650–655.
- [37] Saxena, D.; Verma, K. S.; Singh, S. N.: Power quality event classification: an overview and key issues. International Journal of Engineering, Science and Technology 2 (2010) 3, S. 186–199.
- [38] Forum Netztechnik / Netzbetrieb im VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (Hrsg.): Versorgungszuverlässigkeit und Spannungsqualität in Deutschland. <<https://www.vde.com/resource/blob/824912/2a9a511f3dd6da0e5c00dab2d4db4398/fnn-fakten-versorgungsqualitaet-2013-03-11--1--data.pdf>> – 18.12.2018.
- [39] Kara, S.; Bogdanski, G.; Li, W.: Electricity Metering and Monitoring in Manufacturing Systems. In: Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing – Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering in Braunschweig. Berlin: Springer 2011, ISBN: 978-3-642-19692-8, S. 1–10.
- [40] Kuchling, H. (Hrsg.): Taschenbuch der Physik. 19., aktualisierte Aufl. München: Fachbuchverl. Leipzig im C. Hanser Verl. 2007, ISBN: 978-3-446-41028-2.
- [41] DIN 40110-1: Wechselstromgrößen (Zweiteiler-Stromkreise). Berlin: Beuth 1994.

-
- [42] Behrendt, T.; Zein, A.; Min, S.: Development of an energy consumption monitoring procedure for machine tools. *Cirp Annals – Manufacturing Technology* 61 (2012) 1, S. 43–46.
- [43] Dietmair, A.; Verl, A.; Wosnik, M.: Zustandsbasierte Energiebedarfsprofile. *wt Werkstattstechnik online* 98 (2008) 7/8, S. 640–645.
- [44] Abele, E.; Dittrich, M.; Eisele, C.; Kessing, O.; Klöblen, W.; Rudolph, M.; Rummel, W. (Hrsg.): *Energieeffiziente Produktionsmaschinen durch Simulation in der Produktentwicklung*. <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&cad=rja&uact=8&ved=2ahU-KEWji8q6wpazfAhWKJ1AKHf4qBk0QFjADegQIB-BAC&url=https%3A%2F%2Fwww.effizienzfabrik.de%2FecomaXL%2Ffiles%2FPS_e-SimPro_Abschlussbericht.pdf%26download%3D1&usg=AOvVaw1uVUe-nEkaNvyVxFQT95Fc> – 19.12.2018.
- [45] Li, W.; Zein, A.; Kara, S.; Herrmann, C.: An Investigation into Fixed Energy Consumption of Machine Tools. In: *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing – Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering in Braunschweig*. Berlin: Springer 2011, ISBN: 978-3-642-19692-8, S. 268–273.
- [46] Li, Y.; Hea, Y.; Wang, Y.; Yan, P.; Liu, X.: A framework for characterising energy consumption of machining manufacturing systems. *International Journal of Production Research* 52 (2014) 2, S. 314–325.
- [47] Zampou, E.; Plitsos, S.; Karagiannaki, A.; Mourtos, I.: Towards a framework for energy-aware information systems in manufacturing. *Computers in Industry* 65 (2014) 3, S. 419–433.
- [48] Eberspächer, P.; Haag, H.; Rahäuser, R.; Schlechtendahl, J.; Verl, A.; Bauernhansl, T.; Westkämper, E.: Automated provision and exchange of energy information throughout the production process. *Proceedings of the 19th CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, (2012), Berkeley, 23.–25. Mai 2012, S. 381–386.
- [49] Schultz, C.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Method for an Energy-oriented Production Control. *Procedia CIRP* 48 (2016), S. 248–253.
- [50] Buschmann, M.: *Planung und Betrieb von Energiedatenerfassungssystemen*. Dissertation. Institut für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, Technische Universität Chemnitz: Chemnitz (2013).

- [51] Wang, Y.; He, Y.; Li, Y.; Yan, P.; Feng, L.: An analysis framework for characterization of electrical power data in machining. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 16 (2015) 13, S. 2.717–2.723.
- [52] Chee, X. M.; Le, C. V.; Zhang, D. H.; Luo, M.; Pang, C. K.: Intelligent Identification of Manufacturing Operations Using In-Situ Energy Measurement in Industrial Injection Moulding Machines. *37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society* (2011), Melbourne, 7.–10. November 2011, S. 4284–4289.
- [53] Gebbe, C.; Glasschröder, J.; Reinhart, G.: Kostengünstige Energiemessungen. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 111 (2016) 9, S. 496–499.
- [54] Vijayaraghavan, A.; Dornfeld, D.: Automated energy monitoring of machine tools. *Cirp Annals – Manufacturing Technology* 59 (2010) 1, S. 21–24.
- [55] Maier, A.; Schetinin, N.; Vodenčarević, A.; Kleine Büning, H.; Pethig, F.; Niggemann, O.: Analyse und Visualisierung des Energieverbrauchs in Produktionsanlagen. *13. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik*. (2012), Baden-Baden, 13.–14. Juni 2012, Düsseldorf: VDI-Verlag, VDI-Berichte 2171, S. 103–106, ISBN: 978-3-18-092171-6.
- [56] Kroll, B.; Schriegel, S.; Niggemann, O.; Schramm, S.: A Software Architecture for the Analysis of Energy- and Process-Data. In: *Institute of Electrical and Electronics Engineers et al. (Hrsg.): IEEE 18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), 2013*. Piscataway, NJ: IEEE 2013, ISBN: 978-1-4799-0864-6.
- [57] Gilani, S. S.; Windmann, S.; Pethig, F.; Kroll, B.; Niggemann, O.: The Importance of Model-Learning for the Analysis of the Energy Consumption of Production Plants. In: *Institute of Electrical and Electronics Engineers et al. (Hrsg.): IEEE 18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), 2013*. Piscataway, NJ: IEEE 2013, ISBN: 978-1-4799-0864-6.
- [58] Verl, A.; Westkämper, E.; Abele, E.; Dietmair, A.; Schlechtendahl, J.; Friedrich, J.; Haag, H.; Schrems, S.: Architecture for Multilevel Monitoring and Control of Energy Consumption. In: *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing – Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering in Braunschweig*. Berlin: Springer 2011, S. 347–352, ISBN: 978-3-642-19692-8.

-
- [59] Abele, E.; Panten, N.; Menz, B.: Data Collection for Energy Monitoring Purposes and Energy Control of Production Machines. *Procedia CIRP* 29 (2015), S. 299–304.
- [60] Liebl, C.; Zäh, M. F.: Energiebedarfssimulation von Produktionsanlagen. *wt Werkstattstechnik online* 104 (2014) 5, S. 325–329.
- [61] Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zäh, M. F.; Wiendahl, H.-H.; Duffie, N.; Brieke, M.: Changeable Manufacturing – Classification, Design and Operation. *Cirp Annals – Manufacturing Technology* 56 (2007) 2, S. 783–809.
- [62] Westkämper, E.: Digital Manufacturing In The Global Era. In: Cunha, P. F.; Maropoulos, P. G. (Hrsg.): *Digital Enterprise Technology*. Boston: Springer US 2007, S. 3–14, ISBN: 978-0-387-49863-8.
- [63] Wiendahl, H.-P.: Wandlungsfähigkeit. *wt Werkstattstechnik online* 92 (2002) 4, S. 122–127.
- [64] 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.
- [65] Siegel, G.; Nissel, H. (Hrsg.): *Die Elektrizitätstarife*. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Springer 1935. ISBN: 978-3-642-89411-4.
- [66] Fickert, L.; Renner, H.: Spannungsqualität und Versorgungsqualität – Berechnungsverfahren und Anwendung in der Planung elektrischer Energieversorgungssysteme. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 119 (2002) 5, S. 139–144.
- [67] DIN EN 50160: Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen. Berlin: Beuth 2011.
- [68] Chapman, D. (Hrsg.): Leitfaden Netzqualität. <https://www.kupferinstitut.de/fileadmin/user_upload/kupferinstitut.de/de/Documents/Shop/Verlag/Downloads/Anwendung/Elektrotechnik/Leonardo/3.1_Oberschwingungen.pdf> – 10.07.2018.

- [69] Popp, R. S.-H.; Zäh, M. F.: Determination of the Technical Energy Flexibility of Production Systems. *Advanced Materials Research* 1018 (2014), S. 365–372.
- [70] Schrüfer, E.; Reindl, L.; Zagar, B. (Hrsg.): *Elektrische Messtechnik*. 11. Aufl. München: Carl Hanser Verlag 2014. ISBN: 978-3-446-44208-5.
- [71] Angermann, A.; Beuschel, M.; Rau, M.; Wohlfarth, U. (Hrsg.): *MATLAB - Simulink - Stateflow*. 9. Auflage. Berlin, Boston: De Gruyter Oldenbourg 2017. ISBN: 978-3-110-48474-8.
- [72] Siemens AG – Industry Sector (Hrsg.): *SINUMERIK 840D sl/840Di sl SINUMERIK 840D sl/840Di sl: Bedienkomponenten und Vernetzung*. Gerätehandbuch 03/2010, Nürnberg: 2010.
- [73] Dürkop, L. (Hrsg.): *Automatische Konfiguration von Echtzeit-Ethernet*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2017. ISBN: 978-3-662-54124-1.
- [74] Gevatter, H.-J. (Hrsg.): *Automatisierungstechnik 2*. Berlin: Springer 2000. ISBN: 978-3-540-67085-8.
- [75] Siemens AG – Digital Factory Division (Hrsg.): *DRIVE-CLiQ*. <https://w3app.siemens.com/mcms/infocenter/dokumentencenter/mc/Documentsu20Brochures/6ZB5711-0AW30-0AA4.pdf> – 20.12.2018.
- [76] Keller, F. K.: *Methodik zur energiebezugsorientierten Auftragsplanung*. Dissertation. Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb), Technische Universität München: München (2018).
- [77] Brown, N.; Greenough, R.; Vikhorev, K.; Khattak, S.: Precursors to using Energy data as a Manufacturing Process Variable. In: IEEE (Hrsg.): *International Conference on Digital Ecosystems and Technologies*. Campione d'Italia, 18.–20. Juni 2012. New York: IEEE 2012, S. 1–6.
- [78] Castro, R. E.; Pereira, C. E.; Líbano, F. B.; Chaves, Luciano, F.; Hermes, J. G. jr.: Automation Project Framework for Energy Management ISO 50001 Compatible. In: Pereira, C. E. (Hrsg.): *12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. Piscataway: IEEE 2014, S. 483–488, ISBN: 978-1-4799-4905-2.

-
- [79] Chiotellis, S.; Grismajer, M.: Analysis of Electrical Power Data Streams in Manufacturing. In: Dornfeld D., Linke B. (eds) Leveraging Technology for a Sustainable World. Springer, Berlin, Heidelberg (2012), S. 533–538, ISBN: 978-3-642-29069-5.
- [80] Cupek, R.; Drewniak: Online energy efficiency assessment in serial production – statistical and data mining approaches. IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). New York: IEEE 2014, S. 189–194, ISBN: 978-1-4799-2399-1.
- [81] Duflou, J. R.; Sutherland, J. W.; Dornfeld, D.; Herrmann, C.; Jeswiet, J.; Kara, S.; Hauschild, M.; Kellens, K.: Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. *Cirp Annals – Manufacturing Technology* 61 (2012) 2, S. 587–609.
- [82] Hu, S.; Liu, F.; He, Y.; Hu, T.: An on-line approach for energy efficiency monitoring of machine tools. *Journal of Cleaner Production* 27 (2012), S. 133–140.
- [83] Kolesnikov, A.; Wabner, M.: Die Qualität elektrischer Energie und deren Auswirkungen auf Maschinen und Anlagen. In: Neugebauer, R. et al. (Hrsg.): Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung und Bewertung technischer Systeme – Erkenntnisse aus dem Spitzentechnologiecluster eniPROD. Auerbach: Wissenschaftliche Skripten, 2013, S. 55–67.
- [84] Kroll, A. (Hrsg.): Computational Intelligence. München: Oldenbourg 2013. ISBN: 978-3-486-70976-6.
- [85] Lyakhomskii, A. V.; Perfil’eva, E. N.; Kychkin, A. V.; Genrikh, N.: A Software-Hardware System of Remote Monitoring and Analysis of the Energy Data. *Russian Electrical Engineering* 86 (2015) 6, S. 314–319.
- [86] May, G.; Taisch, M.; Prabhu, V. V.; Barletta, I.: Energy Related Key Performance Indicators – State of the Art, Gaps and Industrial Needs. In: Prabhu, V. (Hrsg.): Advances in Production Management Systems. Sustainable Production and Service Supply Chains. Berlin/Heidelberg: Springer 2013, S. 257–267, ISBN: 978-3-642-41265-3.
- [87] Rackow, T.; Javied, T.; Donhauser, T.; Martin, C.; Schuderer, P.; Franke, J.: Green Cockpit: Transparency on Energy Consumption in Manufacturing Companies. 12th Global Conference on Sustainable Manufacturing, *Procedia CIRP* 26 (2015), S. 498–503.

- [88] Rudolph, M.; Abele, E.; Eisele, C.; Rummel, W.: Analyse von Leistungsmessungen. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 105 (2010) 10, S. 876–882.
- [89] Schubert, M.; Rüniger, G.: Smartphone-App-System zur mobilen Visualisierung von Energiemessdaten. In: Neugebauer, R. et al. (Hrsg.): Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung – Diskussion der Ergebnisse des Spitzentechnologieclusters eniPROD. Auerbach: Verlag Wissenschaftliche Skripten 2014, S. 79–84.
- [90] Sequeira, H.; Carreira, P.; Goldschmidt, T.; Vorst, P.: Energy Cloud: real-time cloud-native Energy Management System to monitor and analyze energy consumption in multiple industrial sites. IEEE/ACM 7th International Conference on Utility and Cloud Computing (2014). S. 529–534, ISBN: 978-1-4799-7881-6.
- [91] Shrouf, F.; Miragliotta, G.: Energy management based on Internet of Things: practices and framework for adoption in production management. Journal of Cleaner Production 100 (2015), S. 235–246.
- [92] Vijayaraghavan, A.; Helu, M.: Enabling Technologies for Assuring Green Manufacturing. In: Dornfeld, D. A. (Hrsg.): Green manufacturing. New York: Springer 2013, S. 255–267, ISBN: 978-1-4419-6016-0.
- [93] Vikhorev, K.; Greenough, R.; Brown, N.: An advanced energy management framework to promote energy awareness. Journal of Cleaner Production 43 (2013), S. 103–112.

10 Veröffentlichungen der Autorin

Im Rahmen der wissenschaftlichen Tätigkeit der Verfasserin sind verschiedene Veröffentlichungen im Bereich der Energiedatenerfassung in der Produktion unter maßgeblicher Beteiligung der Autorin der vorliegenden Dissertation entstanden. Die Autorin dankt allen Mitautorinnen und Mitautoren für den wissenschaftlichen Austausch und die gute Zusammenarbeit in verschiedenen Forschungsvorhaben. Nachfolgend sind alle relevanten Veröffentlichungen in chronologischer Reihenfolge aufgelistet:

- Liebl, C.; Zäh, M. F.: Energiebedarfssimulation von Produktionsanlagen. *wt Werkstattstechnik online* 104 (2014) 5, S. 325–329.
- 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 wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 110 (2015) 9, S. 505–509.
- Liebl, C.; Rupp, S.; Zäh, M. F.; Keller, F.; Klimm, B.: Energiedaten-Monitoring für KMU. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 110 (2015) 11, S. 681–685.
- Liebl, C.; Zäh, M. F.; Otrin, M.: Analyse der Rentabilität von Energiespeichern in der Industrie. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 110 (2015) 12, S. 767–770.
- Popp, R. S.-H.; Liebl, C.; Zaeh, M. F.: Energy Flexible Machine Tool Components – An Investigation of Capabilities. *Procedia CIRP* 57 (2016), 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* 63 (2017), S. 76–81.
- Liebl, C.; Popp, R.; Zaeh, M. F.: Approach for a systematic energy data generation and evaluation. *Procedia CIRP* 67 (2018), S. 63–68.
- Popp, R. S.-H.; Liebl, C.; Zaeh, M. F.: A Multi-level Procedure to Evaluate the Energy Flexibility Potential of Production Machines. *Procedia CIRP* 67 (2018), S. 75–80.

11 Verzeichnis der betreuten Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München in den Jahren 2013 bis 2018 unter wissenschaftlicher Anleitung der Autorin die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten, in welchen verschiedene Fragestellungen zur systematischen Energiedatenerfassung in der Produktion untersucht wurden und deren Ergebnisse in Teilen in die vorliegende Dissertation eingeflossen sind. Die Autorin dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Studierende/r	Titel der Studienarbeit
Blanco, Juan	Identifikation und Bewertung von Flexibilisierungs- und Effizienzpotentialen des Energiebedarfs eines Produktionsbetriebs (abgegeben im September 2014)
Bourscheid, Olivier	Analyse von Einflussfaktoren auf die Abweichungen zwischen der Nennleistung und der realen Leistungsaufnahme von Produktionsanlagen (abgegeben im Juni 2015)
Emrich, Niclas	Entwicklung von Kenngrößen der Energieflexibilität von Produktionsanlagen zur Weiterverarbeitung in PPS-Systemen (abgegeben im Oktober 2014)
Graf, Markus	Analyse der Rentabilität von Stromspeichern in der Industrie (abgegeben im April 2015)
Grußler, Felix	Entwicklung einer Methode zur automatischen Energiedatenanalyse (abgegeben im Mai 2016)
Krezdorn, Christina	Entwicklung und Implementierung einer Energiebedarfsprognose von Produktionsanlagen in Matlab (abgegeben im November 2014)
Lehrbaum, Sebastian	Entwicklung und Implementierung eines Systems zur automatisierten Analyse von Energiedaten (abgegeben im Oktober 2017)

Liehmann, Johannes	Entwicklung einer Vorgehensweise zur systematischen Aufarbeitung und Auswertung von Energiedaten bestehender Produktionsanlagen (abgegeben im Oktober 2014)
Müller, Andrea	Entwicklung und Implementierung einer Energiebedarfsprognose von Produktionsanlagen in Matlab (abgegeben im August 2015)
Oberbauer, Christoph	Klassifikation von Messtechnik für Energiedatenanalysen in der Produktion (abgegeben im November 2016)
Heidenreich, Paul	Entwickeln und Implementieren einer Energiebedarfsprognose von Produktionsanlagen (abgegeben im November 2014)
Rupp, Stephan	Entwicklung und Programmierung einer Applikation zur Energiedaten-Visualisierung (abgegeben im März 2015)
Rupp, Stephan	Entwicklung und Implementierung einer automatisierten Energiedatenanalyse (abgegeben im März 2016)
Schips, Adrian	Modellierung von Produktionsanlagen bzgl. ihrer Energieaufnahme unter Berücksichtigung unterschiedlicher Betriebszustände (abgegeben im Juni 2014)
Schlowak, Laura	Entwicklung einer Methode zur automatischen Energiedatenanalyse (abgegeben im April 2016)
Schöll, Martin	Entwicklung einer Methode zur automatisierten Energiedatenanalyse (abgegeben im April 2016)

12 Anhang

12.1 Einzelnachweis der Quellen aus Abbildung 2.6

Für die in Abbildung 2.6 genannten Quellenangaben sind nachfolgend die Einzelverweise auf das Literaturverzeichnis tabellarisch aufgeführt.

Tabelle 12.1: Einzelnachweise der Quellen aus Abbildung 2.6

Quellenangabe aus Abbildung 2.6	Literaturverweis
Abele et al. 2015	[59]
Behrendt et al. 2012	[42]
Brown et al. 2012	[77]
Bunse et al. 2011	[21]
Buschmann 2013	[50]
Castro et al. 2014	[78]
Chee et al. 2011	[52]
Chiotellis & Grismajer 2012	[79]
Cupek et al. 2014	[80]
Dietmair et al. 2008	[43]
Duflou et al. 2012	[81]
Eberspächer et al. 2012	[48]
Gilani et al. 2013	[57]
Gontarz et al. 2015	[10]
Hu et al. 2012	[82]
Kara et al. 2011	[39]
Kolesnikov & Wabner 2013	[83]

Kroll et al. 2013	[84]
Li et al. 2011	[45]
Li et al. 2014	[46]
Lyakhomskii et al. 2015	[85]
Maier et al. 2012	[55]
May et al. 2013	[86]
O'Driscoll & O'Donnell 2013	[8]
Rackow et al. 2015	[87]
Rudolph et al. 2010	[88]
Schubert & Runger 2014	[89]
Sequeira et al. 2014	[90]
Shrouf & Miragliotta 2015	[91]
Verl et al. 2011	[58]
Vijayaraghavan & Dornfeld 2010	[54]
Vijayaraghavan & Helu 2013	[92]
Vikhorev et al. 2013	[93]
Wang et al. 2015	[51]
Zampou et al. 2014	[47]

12.2 Übersicht über elektrische Messgeräte

Für die im Abschnitt 4.6 aufgeführten elektrischen Messgeräte zeigt Tabelle 12.2 detaillierte Informationen zu Hersteller, Gerätebezeichnung, Messfrequenz und Betriebsart. Die Nummer stellt die Zuordenbarkeit der einzelnen Messgeräte zur Darstellung in Abbildung 4.16 sicher.

Tabelle 12.2: Übersicht über die beispielhaft analysierte elektrische Messtechnik aus Abschnitt 4.6

Nr.	Hersteller	Gerätebezeichnung	Messfrequenz in Hz	Betriebsart
1	IME Messgeräte GmbH	NEMO 72-b	0,8	stationär
2	IME Messgeräte GmbH	NEMO 96 HD+	0,9	stationär
3	IME Messgeräte GmbH	NEMO 72 Le	0,9	stationär
4	Schneider Electric GmbH	PM 5500	1	mobil
5	Schneider Electric GmbH	OM 810	1	stationär
6	Chauvin Arnoux GmbH	PEL 103	1	stationär
7	GMC-I Messtechnik GmbH (Gossen Metrawatt)	Metrahit World	2	mobil
8	IME Messgeräte GmbH	NEMO 96 HDLe	5	mobil
9	IME Messgeräte GmbH	NEMO D4-Le	5	stationär
10	GMC-I Messtechnik GmbH (Gossen Metrawatt)	SINEAX AM3000	5	stationär

11	Chauvin Arnoux GmbH	PEL 105	5	stationär
12	GMC-I Messtechnik GmbH (Gossen Metrawatt)	Iso Aero	10	mobil
13	GMC-I Messtechnik GmbH (Gossen Metrawatt)	Extra	10	mobil
14	GMC-I Messtechnik GmbH (Gossen Metrawatt)	APLUS	25	stationär
15	Fluke Deutschland GmbH	Fluke Serie 434 II	120	mobil
16	GMC-I Messtechnik GmbH (Gossen Metrawatt)	SINEAX A 230	1.600	stationär
17	Siemens AG	SICAM P50	3.200	stationär
18	Siemens AG	SICAM MMU	3.200	stationär
19	Fluke Deutschland GmbH	Fluke 1730	5.120	mobil
20	Janitza electronics GmbH	UMG 104	5.400	stationär
21	Siemens AG	SICAM P850	10.240	mobil
22	Siemens AG	SICAM P855	10.240	stationär
23	Fluke Deutschland GmbH	Fluke 1738	10.240	stationär
24	Chauvin Arnoux GmbH	PX 120	12.800	mobil
25	Chauvin Arnoux GmbH	C_A 8220	12.800	mobil

26	PCE Deutschland GmbH (PCE Instruments)	PCE-830	17.470	mobil
27	Janitza electronics GmbH	UMG 509	20.000	stationär
28	Janitza electronics GmbH	UMG 96 RM P	25.600	stationär
29	Janitza electronics GmbH	UMG 512	25.600	stationär