



354

Corinna Liebl

Systematische Energiedatenerfassung in der Produktion

Corinna Liebl

**Systematische Energiedatenerfassung in der
Produktion**

utzverlag · München 2020

Forschungsberichte IWB
Band 354

Ebook (PDF)-Ausgabe:
ISBN 978-3-8316-7600-2 Version: 1 vom 02.07.2020
Copyright© utzverlag 2020

Alternative Ausgabe: Softcover
ISBN 978-3-8316-4853-5
Copyright© utzverlag 2020

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.

Corinna Liebl

**Systematische Energiedatenerfassung
in der Produktion**



Forschungsberichte IWB

Band 354

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2019

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

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Sämtliche, auch auszugsweise Verwertungen
bleiben vorbehalten.

Copyright © utzverlag GmbH · 2020

ISBN 978-3-8316-4853-5

Printed in Germany
utzverlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

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 Zusatzsensoren	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

