



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Johannes Sossenheimer

**Hybrides Energiemessstellenkonzept  
zum ganzheitlichen Energiemonitoring  
von Fertigungsmaschinen und Komponenten**

**Schriftenreihe des PTW  
„Innovation Fertigungstechnik“**

Herausgeber  
Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele  
Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich  
Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold



Institut für  
Produktionsmanagement,  
Technologie und  
Werkzeugmaschinen

# Hybrides Energiemessstellenkonzept zum ganzheitlichen Energiemonitoring von Fertigungsmaschinen und Komponenten

Vom Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt  
zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von  
**Johannes Sossenheimer, M. Sc.**  
aus Frankfurt am Main

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer
Tag der Einreichung:	01. November 2022
Tag der mündlichen Prüfung:	21. Dezember 2022

Darmstadt 2023  
D17



Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik"

**Johannes Sossenheimer**

**Hybrides Energiemesstellenkonzept  
zum ganzheitlichen Energiemonitoring von  
Fertigungsmaschinen und Komponenten**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag  
Düren 2023

**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.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2023

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8972-1

ISSN 1864-2179

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## VORWORT DES HERAUSGEBERS

Um den fortschreitenden Klimawandel abzumildern, hat die Europäische Kommission im Europäischen Green Deal angekündigt, die Treibhausgasemissionen bis 2030 um 55% gegenüber dem Referenzjahr 1990 zu reduzieren und bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen. In diesem Zusammenhang steht vor allem die Industrie aufgrund ihres hohen Energiebedarfs vor ökologischen Herausforderungen. Um das Ziel der Klimaneutralität zu erreichen, ist die Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz in der Industrie von entscheidender Bedeutung, denn ein großer Teil der freigesetzten Treibhausgase wird bei der Energiebereitstellung emittiert. Mit dem Anstieg der Energiekosten hat ebenfalls die ökonomische Bedeutung von Energieeffizienzmaßnahmen einen großen Stellenwert in der Industrie eingenommen. Bevor Betriebe Effizienzmaßnahmen umsetzen können, ist die Transparenz über die benötigte Energie eine Grundvoraussetzung. In vielen Produktionsumgebungen existieren heute jedoch eine unzureichenden Informations- und Datengrundlage hinsichtlich der Energieflüsse und somit ein Mangel an Energietransparenz.

An diesem Punkt setzt die vorliegende Dissertation von Herr Dr.-Ing. Johannes Sossenheimer auf. Das übergeordnete Ziel seiner Dissertation besteht darin, ein durchgängiges hybrides Energiemessstellenkonzept unter Berücksichtigung aller Produktionssystemebenen zu konzipieren. Im Gegensatz zu vorherigen Arbeiten, die primär auf physische Sensorik zur Überwachung der Energieflüsse in der Produktion setzen, kommt in dieser Arbeit ein datenbasierter echtzeitnah anwendbarer Modellierungsansatz zum Einsatz, der Energieflüsse über virtuelle Energiemessstellen auf Maschinen- und Komponentenebene modelliert und diese in das betriebliche Energieinformationsmanagement einbezieht. Durch die geschickte Kombination von physischen und virtuellen Messstellen wird ein innovatives Energiemessstellenkonzept vorgestellt, welches auch bei Maschinen ohne Danteschnittstelle angewandt werden kann und von sehr hoher Relevanz für das betriebliche Energiemanagement ist.

Darmstadt, im Dezember 2022

Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold



## VORWORT DES AUTORS

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Forschungsgruppe ETA (Energietechnologien und Anwendungen in der Produktion) am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt. Ich durfte in dieser Zeit viel dazulernen und konnte mich persönlich enorm weiterentwickeln.

Daher gilt mein Dank dem Institutsleiter und Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold für die fachliche Betreuung, die enge und vertrauensvolle Zusammenarbeit und für die Bereitstellung der ausgezeichneten Rahmenbedingungen, unter denen diese Arbeit entstanden ist. Zudem möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer für die Übernahme des Koreferats bedanken.

Darüber hinaus gilt mein Dank meinen Kollegen und Kolleginnen der ETA-Forschungsgruppe, für die konstruktive und freundschaftliche Zusammenarbeit der letzten Jahre. Insbesondere möchte ich mich für den fachlichen Austausch und die Unterstützung bei Bastian Dietrich, Dr.-Ing. Jessica Jürgensen, Dr.-Ing. Philipp Schraml und Thomas Weber bedanken.

Durch die kritische Begutachtung haben Borys Ioshchikhes, Heiko Ranzau, Dr.-Ing. Jessica Jürgensen, Karlheinz Sossenheimer und Oliver Vetter einen nennenswerten Beitrag zur Steigerung der Qualität dieser Dissertation geleistet.

Des Weiteren möchte ich den Personen danken, die mich im Rahmen ihrer studentischen Abschlussarbeit sowie Ihrer Tätigkeit am PTW bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben: Jan Fleddermann, Tobias Kapser, Thomas Stahl und Oliver Vetter.

Mein tiefster Dank gebührt meiner Familie, meinen Eltern, auf deren Rückhalt ich in jeder Lebenslage vertrauen durfte und die mir unzählige wertvolle Erfahrungen ermöglicht haben und dir, Manuela, für deine verständnisvolle Unterstützung und die Motivation, die du mir immerzu zugesprochen hast, sowie für die zahlreichen Abenteuer, die wir in den letzten Jahren erleben durften und Jene, die uns erwarten.

Darmstadt, im September 2022

Johannes Sossenheimer

---

**INHALTSVERZEICHNIS**


---

<b>INHALTSVERZEICHNIS</b> .....	<b>VI</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>VIII</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>XII</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>XIV</b>
<b>FORMELVERZEICHNIS</b> .....	<b>XVI</b>
<b>KAPITEL 1 EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
1.1 ENERGIEWENDE UND DIE ROLLE DER INDUSTRIE .....	1
1.2 PROBLEMSTELLUNG UND FORSCHUNGSLEITENDE FRAGESTELLUNGEN .....	3
1.3 AUFBAU DER ARBEIT .....	5
<b>KAPITEL 2 GRUNDLAGEN</b> .....	<b>6</b>
2.1 ENERGIEEINSATZ IN PRODUKTIONSSYSTEMEN .....	6
2.1.1 Hierarchische Gliederung von Produktionssystemen .....	7
2.1.2 Energiewandlungsketten in der Produktion .....	10
2.1.3 Einteilung und Aufbau von Fertigungsmaschinen und -Anlagen .....	13
2.2 STELLEHEBEL DES BETRIEBLICHEN ENERGIEINFORMATIONSMANAGEMENTS .....	16
2.2.1 Informationsmanagement im energetischen Kontext .....	17
2.2.2 Relevanz von Energiedaten im betrieblichen Energiemanagement .....	19
2.2.3 Anforderungen des Energiemanagements an Energiemessstellen .....	21
2.3 TRANSPARENTE ENERGIEFLÜSSE IN DER FERTIGUNG .....	23
2.3.1 Arten der Energiedatenerfassung .....	24
2.3.2 Methodisches Vorgehen bei der energetischen Transparenzschaffung .....	26
2.3.3 Stufen der energetischen Transparenzschaffung .....	28
2.3.4 Physische Energiemessstellen .....	30
2.4 MODELLIERUNG VON ENERGIEFLÜSSEN .....	33
2.4.1 Modellbildung im energetischen Kontext .....	34
2.4.2 Virtuelle Energiemessstellen .....	36
2.4.3 Grundlagen KI-basierter Modellbildung und Evaluierung .....	40
2.5 ZWISCHENFAZIT .....	45
<b>KAPITEL 3 STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK</b> .....	<b>46</b>
3.1 SYSTEMATISCHE LITERATURPRÜFUNG UND EINGRENZUNG .....	46
3.2 STAND DER WISSENSCHAFT BEI VIRTUELLEN ENERGIEMESSSTELLEN .....	48
3.2.1 Ansätze von Energiedisaggregation .....	48
3.2.2 Ansätze hybrider virtueller Energiemessstellen .....	51
3.3 STAND DER TECHNIK BEI ENERGIEMESSSTELLENKONZEPTEN .....	60
3.3.1 Wissenschaftliche Vorarbeiten .....	60
3.3.2 Steuerrechtliche Vorgaben .....	62
3.4 FAZIT UND HERLEITUNG DES FORSCHUNGSDEFIZITS .....	63
<b>KAPITEL 4 ZIELSETZUNG UND VORGEHENSWEISE</b> .....	<b>68</b>
4.1 DEFINITION DER FORSCHUNGSZIELE .....	68
4.2 ANFORDERUNGEN AN DIE LÖSUNG .....	70
4.3 VORGEHENSWEISE ZUR ERREICHUNG DES FORSCHUNGSZIELS .....	74

<b>KAPITEL 5</b>	<b>KONZEPTION UND UMSETZUNG</b>	<b>77</b>
5.1	GESCHÄFTS- UND DATENVERSTÄNDNIS	79
5.2	TEMPORÄRE ERFASSUNG MASCHINENINTERNER DATEN UND ENERGIEDATEN	79
5.2.1	Messkoffer	81
5.2.2	ETA-Edge-Lense	81
5.2.3	Netzwerkaufbau der temporären Datenerfassung	84
5.3	DATENAUFBEREITUNG, MODELLIERUNG UND EVALUATION	85
5.3.1	Datenaufbereitung	86
5.3.2	Modellierung und -Evaluierung	88
5.4	ECHTZEITNAHE ANWENDUNG DER VIRTUELLEN ENERGIEMESSSTELLEN	89
5.5	SICHERSTELLUNG DER LANGZEITVALIDITÄT	90
5.6	ZWISCHENFAZIT DER KONZEPTION UND UMSETZUNG	94
<b>KAPITEL 6</b>	<b>EVALUIERUNG</b>	<b>96</b>
6.1	DEFINITION DES VALIDIERUNGSSZENARIOS	96
6.2	OPTISCHE ZUSTANDSDATENERFASSUNG	98
6.2.1	Verbreitung von Status-LEDs	98
6.2.2	Anwendung und Datenqualität des ETA-Edge-Lense	99
6.2.3	Binäre Klassifizierungsgüte	100
6.3	DATENAUFBEREITUNG	101
6.3.1	Einfluss Daten- und Merkmalsauswahl	101
6.3.2	Einfluss der Trainingsdatensatzgröße	105
6.4	MODELLBILDUNG AUF MASCHINENEbene	111
6.4.1	Einfluss der Datengrundlage	113
6.4.2	Einfluss der Betriebsmodi	117
6.5	MODELLBILDUNG AUF KOMPONENTENEbene	119
6.6	ANWENDUNG UND SICHERSTELLUNG DER LANGZEITVALIDITÄT	125
6.6.1	Modellübertragbarkeit auf ungeschene Produktionsprozesse	125
6.6.2	Validierung der Sicherstellung der Langzeitvalidität	126
6.7	KOSTENREDUKTIONSPOTENZIAL	130
6.7.1	Ermittlung fixer Kostenbestandteile	131
6.7.2	Ermittlung variabler Kostenbestandteile	132
6.7.3	Ermittlung weiterer kalkulatorischer Kostenbestandteile	135
6.7.4	Evaluierung für die ETA-Prozesskette	135
6.8	ZWISCHENFAZIT DER EVALUIERUNG	139
<b>KAPITEL 7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b>	<b>143</b>
7.1	ZUSAMMENFASSUNG	143
7.2	GRENZEN DES VIRTUELLEN ENERGIEMESSSTELLENANSATZES	146
7.3	AUSBLICK	147
<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>		<b>149</b>
<b>ANHANG</b>		<b>158</b>
A.1	MESSFEHLER BEI STROMWANDLERN	158
A.2	MARKTRECHERCHER ZU STATUS-LEDs BEI STEUERUNGSMODULEN	159
A.3	INFORMATIONEN ZU DEN FERTIGUNGSMASCHINEN DER ETA-FABRIK	162
A.4	ZUORDNUNG UND BEDEUTUNG DER MODELLEINGANGSGRÖßEN	164
A.5	GENAUIGKEIT DER BETRIEBSMODI STAND-BY UND DISABLED	166
A.6	HYPERPARAMETER DER VIRTUELLEN MESSSTELLENMODELLE	167
A.7	FEHLERVERTEILUNG DER VIRTUELLEN MESSSTELLEN AUF KOMPONENTENEbene	168
A.8	EVALUATION DER LANGZEITVALIDITÄTSÜBERWACHUNG	170

---

**ABBILDUNGSVERZEICHNIS**


---

Abbildung 1-1: Analysen zur deutschen Industrie im Kontext der Energiewende. Darstellung der Verteilung des Stromverbrauchs in Deutschland nach Sektoren in 2020 (BDEW 2021, S. 1; oben links), der Entwicklung des Anteils erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch mit gleitendem Mittelwert (siehe grau gepunktete Linie) (BMWK 2022, S. 12; oben rechts), der Entwicklung des Industriestrompreises inklusive Stromsteuer mit gleitendem Mittelwert (siehe grau gepunktete Linie) (BDEW 2022, S. 28; unten links) und der Entwicklung der industriellen Treibhausgas-Emissionen vor bzw. ab 2021 mit jeweils linearer Werteinterpolation (siehe grau gepunktete Linien) (nach BMWK 2022, S. 4; unten rechts) .....	2
Abbildung 1-2: Umfrageergebnisse zu Hemmnissen beim Einsatz von KI-Anwendungen in produzierenden Unternehmen (VDI ZRE 2021, S. 137) .....	4
Abbildung 2-1: Fabrik- und Produktlebenszyklus mit Fokus auf den Fabrikbetrieb und der Fertigung (angelehnt an Panten 2019, S. 20; Westkämper et al. 2013, S. 16) .....	6
Abbildung 2-2: Ebenen eines Produktionssystems (nach Westkämper et al. 2006, S. 55–58) .....	8
Abbildung 2-3: Informationsflüsse in der Automatisierungspyramide (nach Posselt 2016, S. 56; Panten 2019, S. 31).....	10
Abbildung 2-4: Schema und Begriffe einer Energiewandlungskette mit elektrischer (schwarz), fossiler (orange), pneumatischer (lila), und thermischer (blau) Energiebereitstellung (angelehnt Rudolph und Wagner 2008, S. 13; Panten 2019, S. 20) .....	12
Abbildung 2-5: Einteilung von Maschinen nach den Fertigungsverfahren (DIN 8580) .....	14
Abbildung 2-6: Einteilung der Aggregate von Fertigungsmaschinen nach Ansteuerbarkeit und Energieversorgung (nach Schmitt et al. 2011, S. 254) .....	16
Abbildung 2-7: Ebenen des Informationsbegriffes (links) im Kontext des energetischen kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (rechts) (Buschmann 2014, 2013, S. 21; Krcmar 2015, S. 4) .....	17
Abbildung 2-8: Energiewirtschaftliche Zielpyramide (in Anlehnung an Posch 2011, S. 209) .....	20
Abbildung 2-9: Einteilung von Datenqualitätsmerkmalen (nach Wang und Strong 1996, S. 103–110; Buschmann 2013, S. 25).....	23
Abbildung 2-10: Abbildung einer Anlagen-Verbrauchsmatrix (nach Thiede et al. 2013, S. 137).....	27
Abbildung 2-11: Stufen der energetischen Transparenzschaffung (basierend auf Posselt 2016, S. 114) ..	29
Abbildung 2-12: Abbildung von nicht-teilbaren Durchführungswandlern für Kabel (links) und Stromschienen (mittig links) sowie Stromwandler mit geteiltem Kern für Kabel (mittig rechts) und Stromschienen (rechts) (Bildquelle: Janitza electronics GmbH).....	31
Abbildung 2-13: Maximaler Stromstärkenmessfehler, in Abhängigkeit vom Verhältnis des anliegenden Primärstroms zum Bemessungsstrom, für Stromwandler unterschiedlicher Genauigkeitsklassen (nach DIN EN 62053).....	32
Abbildung 2-14: Verteilung der Anschaffungskosten von 175 Kabelumbauwandlern (links), 59 Energiezählern (Mitte) und 37 Leistungsmessgeräten (rechts) nach einer Marktrecherche im Jahr 2021 dargestellt als Box-Plot.....	33
Abbildung 2-15: Darstellung eines theoretischen White-Box Modells am Beispiel des Energieerhaltungssatzes (rechts) und eines experimentellen Black-Box Modells einer hybriden virtuellen Energiemessstelle (links) (nach Ament 2017, S. 2-1; 4-1).....	35

Abbildung 2-16: Schematische Darstellung eines Energiedisaggregationsmodells auf Maschinenebene. 37

Abbildung 2-17: Schematische Darstellung der hybriden virtuellen Energiemessstelle einer Produktionsmaschine (in Anlehnung an Sossenheimer et al. 2020, S. 1272)..... 38

Abbildung 3-1: Vorgehen bei der systematischen Literaturprüfung (in Anlehnung an Vom Brocke et al. 2009; Panten 2019, S. 62) ..... 46

Abbildung 3-2: Suchtreffer der strukturierten Literatursuche von Januar 2011 bis Dezember 2021 (Darstellung in Anlehnung an Panten 2019, S. 65) ..... 48

Abbildung 3-3: Schematische Darstellung einer Zustandsmaschine (nach Schmitt et al. 2011, S. 256)... 55

Abbildung 3-4: Gegenüberstellung der gemessenen Wirkleistung (grün) mit einer einfachen (schwarz gestrichelt), zustandsbasierten (rot) und prozess- und zustandsbasierten (blau) virtuellen Energiemessstelle eines EMAG VLC 100 Y Dreh-Fräszentrums..... 65

Abbildung 4-1: Verknüpfung des Forschungsziels mit der Ausgangssituation sowie den einwirkenden Chancen und Defiziten (Darstellung nach Panten 2019, S. 77)..... 69

Abbildung 4-2: Darstellung der Erweiterung der Schritte des CRISP-DM in Grau (nach Shearer 2000) zum CRISP-ML(Q) Prozessmodell in Grün (nach Studer et al. 2021) mit regulärem Prozessablauf (durchgezogener Pfeile) und korrektivem Prozessablauf (gestrichelter Pfeil). (Darstellung nach Walther 2022, S. 92; Shearer 2000, S. 14)..... 75

Abbildung 5-1: Programmablaufplan des hybriden Messstellenkonzepts mit den dazugehörigen Phasen des CRISP-ML(Q) in grün mit regulärem und korrektivem Prozessablauf, dargestellt als durchgezogener bzw. gestrichelter Pfeil (angelehnt an Sossenheimer et al. 2021, S. 454). ..... 78

Abbildung 5-2: CAD-Darstellung ETA-Edge-Lense (links) und Aufbau im Schaltschrank (rechts) ..... 82

Abbildung 5-3: Programmablaufplan der mobilen Zustandsdatenerfassung mit dem ETA-Edge-Lense.. 83

Abbildung 5-4: Detailansicht auf die LEDs eines Steuerungsmoduls einer Bosch Rexroth SPS mit leuchtenden Status-LEDs (links), nach der Otsu-Filterung als Binärbild (Mitte) und erkannten LED-Zuständen (rechts). Die Positionsmarkierungen des Initialisierungsschrittes sind mit einem Punkt in der Mitte der Status-LEDs hervorgehoben. (Quelle: Sossenheimer et al. 2021, S. 455) ... 83

Abbildung 5-5: Aufbau der temporären Energie- und Zustandsdatenerfassung bei Fertigungsmaschinen, ETA-Edge-Lense und mobilem Energiemessgerät mit jeweiliger Netzwerkanbindung (gestrichelte Linie) und elektrischen Energieflüssen (schwarze Linie)..... 84

Abbildung 5-6: Schematische Darstellung des Ablaufs der Hyperparameteroptimierung bei der Modellerstellung mit dem Systemidentifikationstool (nach Weber et al. 2019b, S. 685; Sossenheimer et al. 2020, S. 1271) ..... 85

Abbildung 5-7: Schematische Darstellung des Datenverarbeitungsflusses bei der Anwendung von hybriden virtuellen Energiemessstellenmodellen (in Anlehnung an Sossenheimer et al. 2021, S. 455) ..... 89

Abbildung 5-8: Schematische Darstellung der Anwendung virtueller Energiemessstellen ..... 90

Abbildung 5-9: Langzeitvaliditätsüberwachung der virtuellen Energiemessstellenmodelle am Beispiel eines simulierten Concept Drifts bei Maschine M1, welcher eine Verdreifachung des erwarteten MAE bewirkt. Dargestellt im oberen Bereich sind die Differenz zwischen dem erwarteten und dem aktuellen Prognosefehler auf Linienebene ( $\Delta Err$  Linie, grüne Linie) sowie den erwarteten Modellierungsfehler je Maschine (vertikales Balkendiagramm). Im unteren Bereich ist für die vier Fertigungsmaschinen der Produktionslinie (M1 bis M4) der zeitliche Verlauf der Betriebsmodi als horizontales Balkendiagramm aufgetragen. .... 92

Abbildung 6-1: Darstellung der Prozesskette und des Materialflusses der ETA-Prozesskette ..... 96

Abbildung 6-2: Visualisierung der stündlich produzierten Bauteile je Fertigungsmaschine ..... 97

Abbildung 6-3: Darstellung des Korrelationskoeffizienten (Korr) und der relativen Permutation Feature Importance (PFIrel) der sieben relevantesten Merkmale der Werkzeugmaschine EMAG VLY 100Y (oben) und EMAG VLC 100GT (unten). Diese werden für jede Maschine unterteilt nach optisch erfassten LED-Zustandsvariablen (jeweils erste und zweite Zeile von oben) und Steuerungssignalen (jeweils dritte und vierte Zeile von oben). (Darstellung nach Stahl 2021) .....	102
Abbildung 6-4: Darstellung des Korrelationskoeffizienten (Korr) und der relativen Permutation Feature Importance (PFIrel) der sieben relevantesten Merkmale der Reinigungsmaschine Mafac KEA (oben), Mafac JAVA (mitte) und des IVA-Ofens (unten). Diese werden für jede Maschine unterteilt nach optisch erfassten LED-Zustandsvariablen (jeweils erste und zweite Zeile von oben) und Steuerungssignalen (jeweils dritte und vierte Zeile von oben). (Darstellung nach Stahl 2021) .....	104
Abbildung 6-5: Lernkurve der Wirkleistungsprognose von Mafac KEA, Mafac JAVA, IVA-Härteofen, EMAG VLC 100GT und dem KSS-Aufbereitungsbecken (von oben nach unten) für einen LED-zustandsbasierten Trainingsdatensatz, aufgetragen über der Datenerfassungsdauer.....	107
Abbildung 6-6: Lernkurve der Wirkleistungsprognose der Mafac KEA Reinigungsmaschine auf Maschinen- und Komponentenebene aufgetragen über der Datenerfassungsdauer für einen Trainingsdatensatz, welcher ausschließlich auf LED-Zustandssignalen basiert.....	109
Abbildung 6-7: Lernkurve der Wirkleistungsprognose des EMAG VLC 100Y Dreh-Fräszentrums auf Maschinen- und Komponentenebene aufgetragen über der Datenerfassungsdauer für einen Trainingsdatensatz, welcher ausschließlich auf LED-Zustandssignalen basiert (Darstellung nach Sossenheimer et al. 2021).....	110
Abbildung 6-8: Zeitverläufe der gemessenen und modellierten Wirkleistung der Fertigungsmaschinen der ETA-Prozesskette. Hierbei wird zwischen Modellen unterschieden, die mit SPS-Daten und mit LED-Zustandsdaten trainiert wurden. Des Weiteren wird jeweils darunter der Betriebsmodus in Form eines Balkendiagramms ausgewiesen. ....	112
Abbildung 6-9: Verteilung des Prognosefehlers der virtuellen Energiemessstellen der fünf Maschinen jeweils dargestellt als Punktwolke für den Trainingsdatensatz (links), den Testdatensatz (mitte) mit gestrichelter Grade des idealen Modellverlaufs und dargestellt als Dichtefunktion für den Testdatensatz (rechts).....	115
Abbildung 6-10: Zeitverläufe der gemessenen und modellierten Wirkleistung für einen Fertigungszyklus der Mafac KEA Reinigungsmaschine und ihrer Nebenaggregate. Hierbei wird zwischen Modellen unterschieden, die mit SPS-Daten und mit LED-Zustandsdaten trainiert wurden. Des Weiteren wird jeweils darunter der Betriebsmodus in Form eines Balkendiagramms ausgewiesen. ....	121
Abbildung 6-11: Zeitverläufe der gemessenen und modellierten Wirkleistung für einen Fertigungszyklus des EMAG VLC 100Y Dreh-Fräszentrums mit Nebenaggregaten. Hierbei wird zwischen Modellen unterschieden, die mit SPS-Daten und mit LED-Zustandsdaten trainiert wurden. Des Weiteren wird jeweils darunter der Betriebsmodus in Form eines Balkendiagramms ausgewiesen.....	124
Abbildung 6-12: Auswertungdiagramm der Langzeitvaliditätsüberwachung am Beispiel eines simulierten Concept Drifts bei der Mafac KEA, welcher eine Verdreifachung des aktuell eingestellten Prognosefehler bewirkt. Dargestellt sind im unteren Bereich der zeitliche Verlauf der die Betriebsmodi der fünf Fertigungsmaschinen sowie im oberen Diagramm die Differenz zwischen dem erwarteten und aktuellen Prognosefehler auf Linien- (ΔErrLinie, grüne Linie) und der rechnerische Modellierungsfehler je Maschine (Balkendiagramm). ....	129

---

Abbildung 6-13: Gegenüberstellung der Implementierungskosten eines virtuellen bzw. physischen Energiemessstellensystems auf Maschinenebene (links) sowie auf Maschinen- und Komponentenebene (rechts) über der Anzahl jährlich vermessener Maschinen.....	137
Abbildung 6-14: Gegenüberstellung der nutzungsdauerbezogenen Kosten von virtuellen und physischen Energiemessstellen auf Maschinenebene (links) sowie auf Maschinen- und Komponentenebene (rechts) über der Anzahl jährlich vermessener Maschinen.....	138

---

**TABELLENVERZEICHNIS**


---

Tabelle 2-1: Übersicht von Fertigungsarten und -Prinzipen (nach Westkämper et al. 2006, S. 198) .....	14
Tabelle 2-2: Qualitative Zuordnung von Energiedaten, aus unterschiedlichen organisatorisch strukturierten Produktionssystemebenen, zu den hiermit adressierbaren Strategiefeldern der betrieblichen Energiewirtschaft. ....	21
Tabelle 2-3: Gegenüberstellung von unterschiedlichen Arten der Energiedatenerfassung mit Kosten und relevanten Datenqualitätsmerkmalen (nach Helfert und Schraml 2022, S. 15) .....	24
Tabelle 3-1: Auflistung der herangezogenen Suchbegriffe und deren logische Verknüpfung (Darstellung in Anlehnung an Panten 2019, S. 65) .....	47
Tabelle 3-2: Gegenüberstellung identifizierter energetischer Messstellenkonzepte mit der Art der Energiedatenerfassung. Die Füllung der Harvey Balls entspricht dem subjektiven Übereinstimmungsgrad mit der Art der Energiedatenerfassung. ....	63
Tabelle 3-3: Gegenüberstellung der Vorarbeiten zu empirischen Energiebedarfsmodellierungsansätzen (sortiert nach der Energiebedarfsmodellierungsart). Die Füllung der Harvey Balls entspricht dem Grad der Übereinstimmung. ....	66
Tabelle 4-1: Übersicht der Anforderungskriterien und Voraussetzungen .....	74
Tabelle 5-1: Übersicht der Hyperparameter des Neuronale Netzwerks. Bei Mehrfachnennung in eckigen Klammern erfolgt die Auswahl im Rahmen der Hyperparameteroptimierung. ....	88
Tabelle 6-1: Informationen zum Datensatz der ETA-Prozesskette .....	97
Tabelle 6-2: Ergebnisse einer Marktstudie zur Verfügbarkeit von Status-LEDs an insgesamt 140 digitalen und analogen SPS-Modulfamilien unterschiedlicher Hersteller aus dem Jahr 2020. ....	98
Tabelle 6-3: Konfusionsmatrix der Klassifizierung von LED-Zustandssignalen.....	101
Tabelle 6-4: Durchschnittliche Prognosegüte auf Maschinenebene für alle im Datensatz enthaltenen Betriebsmodi. Bei den absoluten Fehlerwerten wird zusätzlich die Standardabweichung für die untersuchten Modelle ausgewiesen. ....	114
Tabelle 6-5: Durchschnittliche Prognosegüte auf Maschinenebene im Betriebsmodus working. Bei den absoluten Fehlerwerten wird zusätzlich die Standardabweichung für die untersuchten Modelle ausgewiesen.....	118
Tabelle 6-6: Durchschnittliche Prognosegüte auf Maschinenebene im Betriebsmodus operational. Bei den absoluten Fehlerwerten wird zusätzlich die Standardabweichung für die untersuchten Modelle ausgewiesen.....	119
Tabelle 6-7: Durchschnittliche Prognosegüte des Wirkleistungsbedarfs auf Maschinen- und Komponentenebene für die Reinigungsmaschine Mafac KEA (nach Sossenheimer et al. 2021). .	120
Tabelle 6-8: Durchschnittliche Prognosegüte des elektrischen Energiebedarfs auf Maschinen- und Komponentenebene für die Werkzeugmaschine EMAG VLC 100Y (nach Sossenheimer et al. 2021).....	122
Tabelle 6-9: Ergebnisse der Übertragbarkeit von virtuellen Messstellenmodellen der EMAG VLC 100Y, deren Trainingsdatensatz lediglich einen Produktionsprozess beinhalten und die auf verschiedene Produktionsprozesse im Testdatensatz angewandt werden. Die grau hinterlegten Felder zeigen die Referenz des Modells auf, welches auf dem Testdatensatz desselben Prozesses evaluiert wird. ....	126

---

Tabelle 6-10: Evaluation der Langzeitvaliditätsüberwachung bei simuliertem Concept Drift an der Mafac KEA und JAVA sowie dessen Auswirkung auf die Änderung des geschätzten Prognosefehlers $\Delta Err_m$ , $b_m$ der virtuellen Energiemessstellen der Maschinen $m$ der ETA-Prozesskette, wobei die manipulierte Messstelle grau hinterlegt ist. ....	128
Tabelle 6-11: Arbeitsschritte zur Implementierung einer physischen bzw. virtuellen Energiemessstelle mit approximierten Dauern. Lediglich die grau gefärbten Zeitbedarfe zählen zu den personellen Fixkosten. ....	134
Tabelle 6-12: Gegenüberstellung der Kostenbestandteile des Energiemonitorings auf Maschinen- und Komponentenebene für verschiedene Arten der Energiedatenerfassung. Die Einkaufskosten von Messgeräten, die in der Marktstudie zur Energiemesstechnik erhoben wurden, sind mit einem * markiert. ....	136
Tabelle 6-13: Subjektiven Einschätzung zum qualitativen Erfüllungsgrad der Anforderungen dieser Arbeit. ....	141

---

**ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS**


---

AfA-Tabelle	Tabellen für die Absetzung für Abnutzung
AutoML	automatisiertes Maschinelles Lernen
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
BMF	Bundesministerium der Finanzen
BMJ	Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
CAD	rechnerunterstütztes Konstruieren (engl.: computer-aided design)
CNC	rechnergestützte numerische Steuerung (engl.: computerized numerical control)
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CPU	zentrale Verarbeitungseinheit (engl.: central processing unit)
CRISP-ML(Q)	branchenübergreifendes Standardprozessmodell für die Entwicklung von Anwendungen des Maschinellen Lernens mit Qualitätssicherungsmethodik (engl.: cross-industry standard process model for the development of machine learning applications with quality assurance methodology)
CSV	kommagetrennte Werte (engl.: comma-separated values)
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EIM	Energieinformationsmanagement
EMI	elektromagnetische Interferenz
EnMS	Energie Management System
Err <sub>m,bm</sub>	approximierter Prognosefehler je Maschine und Betriebsmodus
ERP	Einsatzplanung der in einem Unternehmen vorhandenen Ressourcen (engl.: enterprise resource planning)
ETA	Energietechnologien und Anwendungen in der Produktion
GPU	Grafikprozessor (engl.: graphics processing unit)
IM	Informationsmanagement
IP	Internetprotokoll (engl.: internet protocol)
I/O-Modul	Eingangs- / Ausgangsmodul (engl.: input / output module)
KSS	Kühlschmierstoff
LED	Leuchtdiode (engl.: light-emitting diode)
LoRaWan	Long Range Wide Area Network
MES	Produktionsleitsystem (engl.: manufacturing execution system)
ML	Maschinelles Lernen (engl.: Machine Learning)
MRR	Materialabtragrate (engl.: material removal rate)
NaN	fehlende Werte (engl.: not a number)
NILM	nicht-intrusive Lastüberwachung (engl.: non-intrusive load monitoring)
NRMSE	normierte Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (engl.: normalized root-mean-square error)
NRMSE <sub>99-1%</sub>	normierte Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (engl.: normalized root-mean-square error) bezogen auf den Wertebereich des 1 bis 99 % Perzentils
NRMSE <sub>R</sub>	normierte Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (engl.: normalized root-mean-square error) bezogen auf die Spannweite des Wertebereichs
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture

---

PFI <sub>j</sub>	Permutation Feature Importance
PFI <sub>rel j</sub>	relative Permutation Feature Importance des Merkmals j
PMP	physische Energiemessstelle (engl.: physical energy metering point)
PTW	Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen
RMSE	Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (engl.: root-mean-square error)
SCADA	Überwachung, Steuerung und Datenerfassung (engl.: supervisory control and data acquisition)
SEC	spezifische Energiebedarf (engl.: specific energy consumption)
SPS	speicherprogrammierbaren Steuerungen
TCP	Übertragungssteuerungsprotokoll (engl.: transmission control protocol)
TGA	technische Gebäudeausrüstung
THD	Oberschwingungsgesamtverzerrung (engl.: total harmonic distortion)
TPR	Richtig-positiv-Rate (engl.: true positive ratio)
TNR	Falsch-negativ-Rate (engl.: false negative ratio)
VMP	virtuelle Energiemessstelle (engl.: virtual energy metering point)

---

**FORMELVERZEICHNIS**


---

$BK$	Betriebskosten in €
$bm$	Betriebsmodus einer Fertigungsmaschine
$x$	Beschäftigung
$C_0$	prozessspezifischer Nutzungsfaktor in $\frac{J}{\text{cm}^3}$
$C_1$	prozessspezifischer Nutzungsfaktor in $\frac{J}{s}$
$C_2$	prozessspezifischer Nutzungsfaktor in J
$Cov(x_i, y)$	Kovarianz zwischen einem Signal $x_i$ und dem Messwert der Zielgröße $y$
$\Delta E$	Energiebedarf beim Übergang zwischen zwei Betriebsmodi
$E_{in}$	eingehende Energie in W
$E_{out}$	ausgehende Energie in W
$err_{m,bm}$	approximierter Prognosefehler je Maschine $m$ , Betriebsmodus $bm$ und Zeitschritt $t$
$Err_{m,bm}$	approximierter Prognosefehler je Maschine $m$ und Betriebsmodus $bm$
$Err_{Linie}$	aggregierter Prognosefehler auf Linienenebene in W
$\Delta Err_{Linie}$	Differenz des gemessenen und erwarteten aggregierten Prognosefehlers auf Linienenebene in W
$f_n$	Anzahl falsch negativer binärer Klassifikationen
$f_p$	Anzahl falsch positiver binärer Klassifikationen
$H_{p,j}$	Helligkeitswert des Pixel $j$ an LED-Position $i$
$i$	Zinssatz in %
$K_{Abs}$	kalkulatorische Abschreibung in €
$K_{EK}$	Anschaffungskosten in €
$K_f$	Fixkosten in €
$K_{PMP}$	Implementierungskosten des physischen Messstellenkonzepts in €
$k_v$	variable Kosten in €
$K_{VMP}$	Implementierungskosten des virtuellen Messstellenkonzepts in €
$\Delta K_{ges}$	Reduktion der Implementierungskosten in €
$K_Z$	kalkulatorischen Zinsen in €
$I$	Stromstärke (Effektivwert) in A
$I_{fund}$	Effektivwert der Grundschwingung der Stromstärke
$I_{n,harm}$	Effektivwert der $n$ -ten Oberschwingung der Stromstärke
$Korr(x_i, y)$	Korrelationskoeffizient nach Pearson für Signal $x_i$ und Zielgröße $y$
$M$	Anzahl der Fertigungsmaschinen in Produktionslinie
$MAE$	mittlerer absoluter Fehler (engl.: mean absolute error) in W
$MK$	Materialkosten in €
$MRR$	Materialabtragsrate (engl.: material removal rate) in $\frac{\text{cm}^3}{s}$
$n$	Anzahl der Messwerte im Datensatz
$N$	Anzahl der Aggregate einer Fertigungsmaschine
$n_p$	Anzahl an Pixel einer markierter LED-Position
$n_{PMP}$	Nutzungsdauer der physischen Messstellen in Jahren

$n_{\text{Spindel}}$	Spindeldrehzahl
$n_{\text{VMP}}$	Nutzungsdauer der virtuellen Messstellen in Jahren
$NRMSE_{99-1\%}$	normierte Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (engl.: normalized root-mean-square error) bezogen auf den Wertebereich des 1 bis 99 % Perzentils in %
$NRMSE_R$	normierte Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (engl.: normalized root-mean-square error) bezogen auf die Spannweite des Wertebereichs in %
$P$	Wirkleistung in W
$\hat{P}$	prognostizierten Wirkleistung in W
$P_{\text{el Aggregat}}$	Wirkleistungsbedarf eines Maschinenaggregats in W
$P_{\text{el Maschine}}$	Wirkleistungsbedarf der Maschine in W
$P_{\text{idle}}$	Leerlaufleistung in W
$P_{\text{Kleinverbraucher}}$	Leistung nichtvermessener Kleinverbraucher einer Fertigungslinie in W
$P_n$	Nennleistung in W
$P_{\text{use Maschine}}$	Nutzenergiebedarf der Maschine
$P_{\text{working}}$	Leistungsaufnahme bei Bearbeitung in W
$PK$	Personalkosten in €
$PFI_j$	Permutation Feature Importance des Merkmals j
$PFI_{\text{rel } j}$	Relative Permutation Feature Importance des Merkmals j
$Q$	Blindleistung in var
$\dot{Q}_{ab}$	Abwärme in W
$R$	Spannweite (engl.: range) in W
$R^2$	Bestimmtheitsmaß
$relMAE$	relativer mittlerer absoluter Fehler (engl.: relative mean absolute error) in %
$RW$	Restwert am Ende der Nutzungsdauer in €
$r_n$	Anzahl richtig negativer binärer Klassifikationen
$r_p$	Anzahl richtig positiver binärer Klassifikationen
$RMSE$	Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (engl.: root-mean-square error) in W
$S$	Scheinleistung in VA
$S_{LED,i}$	Zustand der Status-LED i
$SEC$	spezifischer Energiebedarf (engl.: specific energy consumption) in $\frac{J}{\text{cm}^3}$
$\Delta t$	Transitionsdauer beim Übergang zwischen zwei Betriebsmodi
$t$	Zeit in s
$T_{bm}$	kumulierte Dauer des jeweiligen Betriebsmodus in s
$t_{LED}$	Schwellenwert des Helligkeitswerts
$THD_1$	Oberschwingungsgesamtverzerrung der Stromstärke (engl.: total harmonic distortion of current)
$THD_U$	Oberschwingungsgesamtverzerrung der Spannung (engl.: total harmonic distortion of voltage)
$TPR$	Richtig-positiv-Rate (engl.: true positive ratio)
$TNR$	Falsch-negativ-Rate (engl.: false negative ratio)
$U$	Spannung (Effektivwert) in V
$U_{\text{fund}}$	Effektivwert der Spannungsgrundschwingung
$U_{n,\text{harm}}$	Effektivwert der n-ten Oberschwingung der Spannung
$W$	Arbeit in J
$\eta$	Wirkungsgrad in %
$\Psi$	Kontaktwinkel in °
$\rho$	Dichte in $\frac{g}{\text{cm}^3}$

---

$\varphi$	Phasenverschiebung in rad
$x$	Eingangsgröße eines empirischen Modells
$y$	Messwert der Zielgröße
$y_{\max}$	größter Messwert im Wertebereich der Zielgröße
$y_{\min}$	kleinster Messwert im Wertebereich der Zielgröße
$y_{p=0,01}$	Messwert des 1 %-Perzentil des Wertebereichs der Zielgröße
$y_{p=0,99}$	Messwert des 99 %-Perzentil des Wertebereichs der Zielgröße
$\hat{y}$	prognostizierte Zielgröße
$\bar{y}$	arithmetischer Mittelwert der Zielgröße