

Von der Datenerfassung zur Energie-Effizienz: Messsysteme im Fokus der Energieeffizienzoptimierung

Christian Wolf^{1,2(✉)}, Daniel Umgelter^{1,2}, Christian Schneider^{1,2}, Alexander Sauer^{1,2}

¹ Universität Stuttgart Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP), Allmandring 35, 70569 Stuttgart, +49 711 970-3527, christian.wolf@eep.uni-stuttgart.de, <https://www.eep.uni-stuttgart.de>

² Fraunhofer Institut für Produktion und Automatisierung IPA, Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart, Deutschland, <https://www.ipa.fraunhofer.de/>

Kurzfassung: Industrie 4.0 geprägte Konzepte wie das »*Industrial Internet of Things*« (IIoT) sind für die steigende Menge an Daten in Produktionsanlagen maßgeblich verantwortlich. Dieser Beitrag beschreibt ein Messsystem, welches die langzeitliche Aufnahme und Verarbeitung industrieller Maschinendaten präzise, automatisiert und strukturiert vornimmt. Sensible Maschinendaten überschreiten aufgrund des festen Serverstandorts im Produktionsbetrieb nicht die unternehmenseigenen Grenzen. Mittels Literaturrecherche werden Anforderungen an ein Messsystem-Konzept gestellt. Die Anforderungen münden in der Entwicklung eines Messsystem-Konzepts, welches in zwei industriellen Anwendungen implementiert und getestet wird.

Keywords: Energieflexibilität, energetische Transparenz, Flexibilitätspotentiale, industrielle Energiesysteme

1 Einleitung

Die intelligente Fabrik, auch bekannt als Smart Manufacturing Plant, stellt ein Teil der modernen Industrie dar. Durch den intensiven Einsatz von Sensoren entstehen große Datenmengen, die durch gezielte Datenerfassung und –verarbeitung wertvolle Einblicke in die energetischen Muster von Maschinen liefern [1]. Die Erfassung von Energiedaten Ein Schlüsselaspekt dieser Entwicklung ist das aktive Management der Verbrauchsseite. Hierbei stehen Maßnahmen zur Steigerung des Verhältnisses der eingesetzten Energiemenge und dem Nutzen (Energieeffizienz) im Vordergrund. Diese Maßnahmen beinhalten u.a. die Optimierung des Energiebezugs auf Maschinenkomponentenebene. [2, 3]

Aufgrund des nicht mehr durchführbaren manuellen Aufwands bei der Datenauswertung bleiben Mehrwerte aufgrund fehlender Einblicke in die Vorgänge von Maschinen aus [4]. Die Daten verschwinden unbeachtet auf teuren unternehmenseigenen Servern. Dagegen erfreuen sich Cloud-Infrastrukturen steigender Beliebtheit: Die Speicher-Ressourcen lassen sich elastisch erweitern, bzw. verringern (Skalierbarkeit) und die Komponenten sind kostenflexibel erhältlich [5, 6]. Jedoch birgt das Speichern sensibler Maschinendaten häufig Sicherheitsrisiken und Datenschutz-Konflikte. Auch sind die Unternehmen von den Serviceleistungen des Cloud-Anbieters abhängig [6, 7].

Ein Messsystem, das über lange Zeiträume lokal und ausfallsicher sensible Produktions- und Maschinendaten aufnimmt, strukturiert speichert und verarbeitet, ist notwendig.

Im Folgenden wird der Fokus auf die Beantwortung der Forschungsfrage gelegt: „Wie lässt sich ein Messsystem zur langzeitlichen Datenerfassung und –verarbeitung für industrielle Anlagen konzipieren und testen?“. Nach einer Literaturrecherche, die den aktuellen Stand der Technik beleuchtet, wird eine Anforderungsdefinition für ein Messsystem-Konzept erstellt. Dieses Konzept wird in der Folge ausgearbeitet. Das Messsystem-Konzept wird im industriellen Kontext angewandt und mittels festgelegter quantitativer Leistungskennzahlen in Bezug auf abgeleitete Kriterien überprüft.

2 Stand der Technik und Anforderungen

Liebl [8] konzentriert sich auf die systematische Erfassung und Analyse von Energiedaten in Bestandsanlagen in der Produktion. Die automatisierte Erfassung von Energie-, Betriebs- und Maschinendaten erfolgt u.a. über eine Datenlogger-Applikation, sowie eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS). Über ein individuelles Analysetool werden die Daten mehrerer Maschinen auf verschiedenen Ebenen analysiert. In der Arbeit wird ein vollständiges Analysekonzept vorgestellt. Die Daten werden entweder als Textdatei gespeichert oder in einer SQL-Datenbank abgelegt. Die Daten werden mit einer Frequenz von 1 Hz erfasst.

Kärcher et al. [9] beschreiben die im Zuge von Industrie 4.0 einhergehenden Herausforderungen wie hohe Investitionen und intransparente Lösungen bestehender Probleme. Zur Bewältigung stellen die Autoren ein modulares Messsystem vor, welches in verschiedenen Produktionsbereichen zum Einsatz kommen kann. Das modulare Messsystem besteht aus einem Magnetometer, Gyroskop, Beschleunigungssensor, Mikroprozessor und einer Funkeinheit (Sensorpaket), das bei einer Frequenz von 100 Hz abtastet. Im Betrieb befindet sich das Messsystem unmittelbar am Produktionsmittel und sendet die erfassten Daten über die Funkeinheit an ein Edge-Device. Systeme mit drahtloser Übertragung bergen Risiken für die Sicherheit sensibler Daten und können durch Sensorpakete und Verbindungsabbrüche die Messung über längere Zeiträume beeinträchtigen.

Chowdhury et al. [10] fokussieren in ihrer Publikation insbesondere Plattformen für die Aufnahme und Integration von großen Datenmengen aus heterogenen Quellen (engl. Big Data), was eine zeit- und arbeitsaufwändige Aufgabe darstellt. Die Autoren konzipieren eine aus populären Komponenten zusammengesetzte Datenpipeline. Das Konzept wird durch die Sensormessdaten pH-Wert und Leitfähigkeit von Wasser validiert.

Raj et al. [11] gehen insbesondere auf Herausforderungen bei der Konzeptionierung von Datenpipelines im Zusammenhang mit Datenmanagement ein. So müssen fehlende Daten aufgrund von Authentifizierungsfehlern, Umweltfaktoren oder Ausfällen von Erfassungsgeräten berücksichtigt werden. Außerdem können Datenpipelines zur Latenz eines Gesamtsystems beitragen.

O'Donovan et al. [12] stellen eine Methodik für industrielle Analytik vor, die den Übergang zu intelligenten Fertigungsbetrieben unterstützt und datengetriebene Ansätze in der Fertigung nutzt. Sie beschreiben eine Cloud basierte Infrastruktur mit Datenverarbeitungsmodulen und technischen Komponenten, die Betriebsdaten archivieren und mit Technologiekomponenten kommunizieren.

Die Datenspeicherung für industrielle Anwendungen soll lokal erfolgen. Die Isolation der Softwarekomponenten ermöglicht die automatische Wiederausführung von Anwendungen nach Unterbrechungen und trägt zur langzeitlichen Benutzung des Messsystems bei [13]. Ergänzend sollen standardisierte Kommunikationsarchitekturen und bewährte Datenpipeline-Komponenten den langzeitlichen Betrieb unterstützen. Im Rahmen des Messsystemkonzepts soll ein Frequenzband von etwa 1 Hz bis hin zu 40 kHz für den langzeitlichen Betrieb betrachtet werden. Die Verwendung von Leistungskennzahlen in der Datenerfassung und -verarbeitung ist wesentlich, um die Leistung objektiv zu messen, Optimierungspotentiale zu identifizieren und die Effizienz zu steigern. Die Anforderungen an das Messsystem sollen durch Leistungskennzahlen bewertet werden. Die vorgeschaltete Sensorik soll mit Blick auf die Präzisionsanforderungen außer Acht gelassen werden, um die universelle Anwendbarkeit des Messsystems zu gewährleisten. Die Datensammlung der Energiedaten soll mithilfe von Zeitstempeln, welche durch die Signalerfassung im Sensor erzeugt und auf dem Messsystem synchronisiert werden, in einer Datenbank erfolgen. Für chronologisch aufgenommene Daten, wie sie üblicherweise von Sensoren bereitgestellt werden, eignen sich insbesondere Zeitreihendatenbanken [14]. Die Wahrnehmung von Informationen durch den Benutzer gelingt vorwiegend durch visuelle Aufbereitung [15]. Eine Visualisierungsanwendung soll bereitgestellt werden.

Die Hardware fasst das Messsystem in einen physischen Rahmen. Besonderes Augenmerk gilt der Portabilität des Messsystems. Zum Schutz vor äußeren Einflüssen soll das Messsystem durch ein robustes Gehäuse geschützt sein. Die Leistungsfähigkeit der Hardware ist mit der Hardwaredimension und dem Gewicht der Hardware verzahnt. Die Auswahl soll unter Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit, sowie der Dimensionen erfolgen. Die Volatilität realer Stromversorgungen soll durch ein zusätzliches Stromversorgungssystem abgefangen werden. Um die Sensorschnittstellen an das Messsystem anzubinden, ist eine zentrale Kommunikationseinheit zur Steuerung des Datenverkehrs nötig. Grundlegenden Schutz gegenüber Angriffen auf die Software des Messsystems soll durch eine externe Sicherheitseinheit gewährleistet werden.

3 Konzept und Aufbau eines Messsystems zur Energieeffizienzanalyse

Das Konzept eines Messsystems für die Energieeffizienzanalyse beginnt unmittelbar nach der Erfassung der physikalischen Größen durch die Sensorik und legt nicht nur Wert auf die Datenverarbeitung über ein breites Frequenzband, sondern auch auf die Portabilität, um es in unterschiedlichen Produktionsumgebungen einzusetzen. Besonderem Fokus gilt dem lokalen Speichern der sensiblen Maschinendaten.

Mit dem Hardwarekonzept wird die Grundlage für das Konzept geschaffen. Die Hardware des Messsystems besteht aus einem Computer zum Verarbeiten, Analysieren und Archivieren von Daten, einem Switch welcher die Energiedaten aus diversen Sensorquellen aufnimmt, einer Firewall zum Schutz vor unbefugten Dritten, sowie einem Router für den sicheren Zugriff auf das Messsystem aus der Ferne. Im Gehäuse sind die Komponenten platziert. Das Gehäuse hält das Messsystem portable und äußere Umwelteinflüsse fern. Die Notfallstromversorgung ist in den Kreislauf eingebunden und versorgt die Komponenten als Schutzmaßnahme vor

Datenverlust für einen Zeitraum von etwa 35 Minuten mit Strom. In dieser Zeit können laufende Datenverarbeitungsvorgänge abgeschlossen und so der Datenverlust vermieden werden.

Trotz zweckmäßiger Ausführung der Anwendungen kann es zu Ausfällen kommen. Durch eine isolierte Anwendungsumgebung wird nach einer Komplikation der Normalzustand automatisch wiederhergestellt. Die Datenbank sortiert die erfassten Maschinendaten auf der Basis von Zeitstempeln und speichert sie lokal ab. Die Zeitreihen-Visualisierung ermöglicht dem Benutzer durch optische Kontrolle ausgewählter Zeiträume den Prozesszustand. Die Steuerung und die Verknüpfung der Komponenten erfolgt in einer Anwendungsverwaltung (engl. Agent). Im Publisher/Subscriber-Modell werden die Daten von veröffentlichenden Geräten (engl. Publisher) an einen Server (engl. Broker) übermittelt und an Klienten (engl. Clients) weitergegeben [16]. Sämtliche Komponenten befinden sich in einer isolierten Container-Umgebung, was die Stabilität des Messsystems maßgeblich erhöht. Zusätzlich zur lokalen Zugriffsoption kann der Benutzer von beliebigen Orten aus direkt auf das Messsystem zugreifen und seine Funktionen nutzen. Bild 1 zeigt das Softwarekonzept zur Energieeffizienzanalyse in industriellen Energiesystemen.

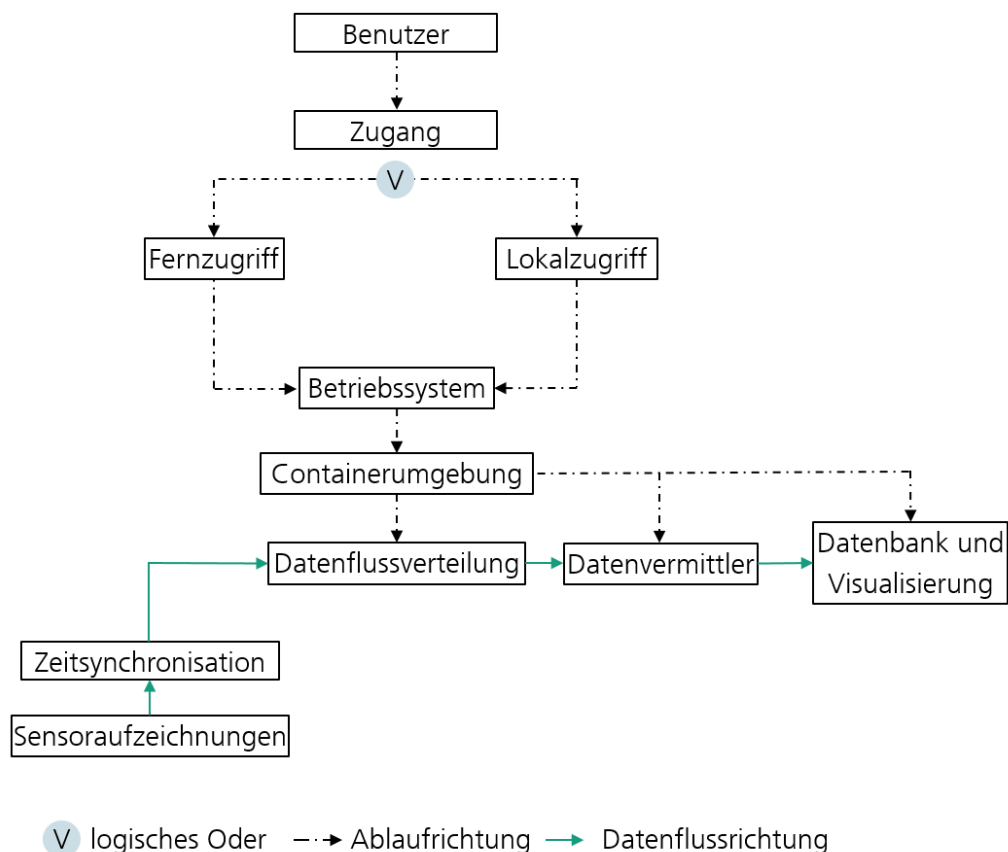


Bild 1: Softwarekonzept des Messsystems. Grafik: Fraunhofer IPA

3.1 Aufbau des Messsystems

Die Softwarearchitektur des Messsystems besteht aus frei verfügbarer Software. Kundenspezifische Software für die Analyse von Produktionsprozessen findet in industriellen Produktionsstätten bereits Verwendung, ist jedoch mit hohen Kosten verbunden. Mit einer

Open-Source-Software Umsetzung des Konzepts soll deshalb die Bindung an ein Unternehmen (engl. Vendor Lock-In) vermieden und Kosten gespart werden [17].

Unter Beachtung der definierten Anforderungen werden die Eigenschaften der Software-Komponenten ausgewählt. Die Anwendungsisolierung wird durch eine Containerplattform realisiert. Die vom Entwickler *Docker Inc.* entwickelte *Docker*-Anwendung gilt als de facto Standard für Container-Umgebungen [18]. Die Anwendung *Telegraf* ist frei verfügbar und rechenschonend [19]. Die Verknüpfung der Datenbank mit der Kommunikationsarchitektur sowie die Regelung der Datenströme wird in der *Telegraf*-Anwendung vorgenommen. *InfluxDB* des Entwicklers *InfluxData* ist eine Zeitreihendatenbank, die für große Datenmengen mit Zeitstempeln bis in die Nanosekunden optimiert ist [14]. Die *MQTT*-Publisher sind mit dem *MQTT*-Broker verbunden, der die Nachrichten an die in *Telegraf* festgelegten *MQTT*-Subscriber leitet.

Die Komponenten *Server* (*Dell Inc. Precision Rack 3930*, *Intel XeonE2286G*, 128 GB RAM, 500 GB SSD, *Quadro RTX 5000* mit 16 GB GPU-Speicher), *Switch* (*US-24-250W*), *Firewall* (*USG-PRO-4*), *Router* (*RUTXR1*) und die unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) (*APC-Smart-UPS*) finden in dem Gehäuse (*24“ Roto Shock*) Platz. Die Stromversorgung wird über überspannungsgeschützte Verteilersteckdosen bereitgestellt. Die Komponente Strom (blau) versorgt die Komponenten *Computer*, *Switch* und *Firewall* mit Strom. Die Steckdosenleiste ist an den *Router* und an die *USV* angebunden.

Der reale Einbau der Komponenten in das Gehäuse ist in *Bild 2* und in *Bild 3* dargestellt. Der *Router* befindet sich auf der Rückseite des *Gehäuses*. Das System mit einem Gesamtgewicht von 64 kg kann von einer Person mithilfe der bodenseitig angebrachten Rollen problemlos verschoben und für kurze Zeit von zwei Personen in höhere/niedrig gelegene Ebenen transportiert werden.



Bild 2: Messsystem Vorderansicht.
Foto: Fraunhofer IPA



Bild 3: Messsystem Rückansicht.
Foto: Fraunhofer IPA

4 Anwendungsfälle

Die Steigerung der Energieeffizienz ist ein Schlüsselaspekt des aktiven Managements der Verbrauchsseite. Selbst bewährte Technologien müssen überdacht werden. Der Übergang von einem Wechselstrom- zu einem Gleichstromnetz in Fabriken kann die Energieeffizienz erhöhen und die Energienutzung optimieren [20]. Zur Untersuchung der Gleichstrompotentiale

wird das Messsystem in den Produktionsbetrieb eingebunden. Sensoren messen elektrische Spannungen, sowie Ströme bei einer Frequenz von 41,7 kHz. Die Anbindung des Messsystems an die Sensorschnittstelle erfolgt an einem Patch-Panel, das über eine Treppe im oberen Geschoss der Produktionshalle zugänglich ist. Unmittelbar nach dem Bootvorgang des Servers ist das Messsystem für den langfristigen Betrieb einsatzbereit. Eine im Router befindliche SIM-Karte ermöglicht mit einer Geschwindigkeit von 1,2 Mbit/s im Upload und 2 Mbit/s im Download den Zugriff aus der Ferne zur Datensichtung und -analyse.

Im Druckluftnetz produzierender Unternehmen entweicht bis zu 30 % der eingesetzten Energie durch kleine Lecks, wie Löcher, Knicke und undichte Verbindungsstücke. Das Aufspüren der Leckagen ist mit großem Aufwand verbunden. Der Druckluftdemonstrator am Fraunhofer IPA bildet die Grundlage für Forschungen im Bereich der Leckage-Erkennung. Er verfügt über 16 Durchflusssensoren und 20 Aktoren. Der Demonstrator simuliert Leckagen, etwa in Form von Löchern und undichten Verbindungsstücken. Mithilfe des Messsystems werden u.a. der Luftdruck, Temperatur und Massenstrom erfasst [21]. Der maximale Luftdruck an der Anlage beträgt 6 bar. An einem Aktor (blau), der über ein 5/2-Wegventil (orange) mit Druckluft versorgt wird, tasten Durchflusssensoren (grün) bei einer Frequenz von 100 Hz verschiedene physikalische Größen im Druckluftschlauch ab (siehe *Bild 4*). Der Zeitraum der Messung beträgt drei Monate.



Bild 4: Druckluftdemonstrator (Ventil in orange, Durchflusssensor in grün, Aktor in blau).
Foto: Fraunhofer IPA

Bei einer Druckluftzufuhr von 6 bar bewirkt ein Zufallsgenerator die Zustandsänderung des Aktors (eingefahren/ausgefahren). Das Messsystem ist über eine Ethernet-Schnittstelle mit der Druckluftanlage verbunden und einsatzbereit. Aufgrund der Portabilität kann das Messsystem in der Versuchshalle der Druckluftanlage positioniert werden. Tabelle 1 listet die Anforderungen, sowie quantitative Leistungskennzahlen des Messsystems auf.

Tabelle 1: Messsystem in der Praxis

Anforderung	Anwendungsfall	
	Gleichstromproduktion	Druckluftanwendung
Frequenzband	41,7 kHz	100,0 Hz
Laufzeit	12 Monate	3 Monate
Gesamtdatenmenge	23,3 TB	12,0 GB
Portabilität	Obergeschoss	Ground-Floor
Fernzugriffsfähigkeit (Tageswerte gemittelt über einen Monat)	1,2 Mbit/s Upload	661,9 Mbit/s Upload
	2,0 Mbit/s Download	610,5 Mbit/s Download
Anwendungsflexibilität	Elektrischer Strom	Luftdruck
	Elektrische Spannung	Temperatur
	Elektrische Leistungsaufnahme	Massenstrom
		Volumenstrom

Es lässt sich zusammenfassen, dass das Messsystem die Anforderungen der Anwendungen, darunter die lokale, chronologische und synchronisierte Datenerfassung und -verarbeitung in einem breiten Sensorfrequenzbereich erfüllt. Es zeigt sich, dass die Anwendungsfälle variierbar sind und durch die vorgeschaltete Sensorik keine Beeinträchtigung auf die Funktionalität des Messsystems besteht.

Die präzise Erfassung von Daten aus Sensorquellen wie elektrische Spannung, Stromfluss, Luftdruck und Temperatur tragen maßgeblich zur Datenverfügbarkeit bei. Die Datenflussregelung, sowie die Speicherung und Visualisierung der Daten verbessern die Datenmanagementfähigkeiten und erleichtern die Datenanalyse erheblich. Mit einem Gesamtgewicht von 64 kg ist das Messsystem durch zwei Personen kurzzeitig tragbar. Aufgrund der bodenseitigen Rollen ist es horizontal beweglich und kann flexibel innerhalb der Produktionshalle positioniert werden, wodurch es die Portabilitätskriterien erfüllt. Insgesamt zeigt diese Arbeit das Potential von Messsystemen, die Analyse von Energiedaten im Kontext der industriellen Energiesysteme maßgeblich zu unterstützen.

5 Anwendungsfälle

Das in dieser Arbeit entwickelte Messsystem dient als Möglichkeit zur langfristigen Aufnahme und Verarbeitung von Maschinendaten. Das bedienerfreundliche Messsystem schafft durch die hochfrequente, chronologisch gereichte Datenspeicherung Einblicke in die energetischen Vorgänge auf Maschinenebene (energetische Transparenz) und befähigt u.a. zur Energieeffizienzanalyse. Im Kontext der Einhaltung von Datenschutz- und Sicherheitsstandards ist das Messsystem so entwickelt worden, dass es autonom ohne die Notwendigkeit einer Internetverbindung vollumfänglich betrieben werden kann. Diese Konzeption sichert die Speicherung und Analyse von Daten innerhalb der Produktionsinfrastruktur des Kunden, wodurch ein hohes Maß an Datensicherheit und Vertraulichkeit gewährleistet wird.

Blickt man in die Zukunft, so kann die Skalierbarkeit der Messsysteme die Datenverarbeitungsarchitektur auf Softwareebene ausnutzen und die Hardware-Dimension auf einen Bruchteil der aktuellen Größe reduzieren. Das ist ein entscheidender Aspekt im industriellen Umfeld, in dem die Größe eines Messsystems unter Berücksichtigung von Installationszeit, Platzbedarf und Kosten ein entscheidendes Kriterium sein kann.

In zukünftigen Arbeiten wird die Skalierbarkeit Messsystems und intensiv untersucht. Die breite Implementierung des Messsystems in verschiedene industrielle Szenarien wird ein bedeutender Schritt zur Ausschöpfung energetischer Potentiale der intelligenten Fertigung im Zeitalter der Industrie 4.0.

6 Literatur

- [1] Rai, R.; Tiwari, M. K.; Ivanov, D. et al.: Machine learning in manufacturing and industry 4.0 applications. *International Journal of Production Research* 59 (2021), Nr. 16, S. 4773–4778.
- [2] Sauer, A.; Weckmann, S.: Dezentrale Steuerung von Energieflexibilität in der Produktion. *Industrie 4.0 Management* (2017), Nr. 1, S. 47–51.
- [3] Bundesregierung: Energieeffizienz - Unverzichtbar für das Gelingen der Energiewende. Ein sparsamer Umgang mit Energie zahlt sich aus, denn die billigste und klimafreundlichste Kilowattstunde ist die, die gar nicht erst verbraucht wird. Wer also energieeffizient handelt, schont das Klima und seinen privaten Geldbeutel. Internetadresse: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/energieeffizienz--1755970>.
- [4] Schulz, T.; Huber, M.; Oppermann, H. (Hrsg.): *Analytics in der Industrie. Die Verarbeitungskette der Datenanalyse. Schlüsseltechnologie für die Digitale Transformation*. Würzburg: Vogel Communication Group 2022.
- [5] Mell, P. M.; Grance, T.: *The NIST definition of cloud computing*. Gaithersburg, MD 2011.
- [6] Avram, M. G.: Advantages and Challenges of Adopting Cloud Computing from an Enterprise Perspective. *Procedia Technology* 12 (2014), S. 529–534.
- [7] Wang, C.; Lou, W.; Li, J. et al.: Toward Publicly Auditable Secure Cloud Data Storage Services. *IEEE Network*, S. 19–24. Internetadresse: DOI:10.1109/MNET.2010.5510914.
- [8] Liebl, C.: *Systematische Energiedatenerfassung in der Produktion*. Dissertation, Technische Universität München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, München 2020.
- [9] Kärcher, S.: Use Cases eines Sensor-systems für die Produktion. Den Nutzen von Industrie 4.0 herausarbeiten. In: *wt Werkstattstechnik online*, S. 407–412.
- [10] Chowdhury, A. G.; Illian, M.; Wisniewski, L. et al.: An Approach for Data Pipeline with Distributed Query Engine for Industrial Applications (2020).
- [11] A. Raj; J. Bosch; H. H. Olsson et al.: Modelling Data Pipelines. In: *2020 46th Euromicro Conference on Software Engineering and Advanced Applications (SEAA)*. 2020 46th Euromicro Conference on Software Engineering and Advanced Applications (SEAA), S. 13–20 2020.

- [12] O'Donovan, P.; Bruton, K.; O'Sullivan, D.: Case study: the implementation of a data-driven industrial analytics methodology and platform for smart manufacturing. In: International Journal of Prognostics and Health Management, 22pp.
- [13] Bashari Rad, B.; Bhatti, H.; Ahmadi, M.: An Introduction to Docker and Analysis of its Performance. IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security 173 (2017), S. 8.
- [14] Naqvi, S. N.; Yfantidou, S.: Time Series Databases and InfluxDB. Seminararbeit, Université libre de Bruxelles, Brussels 2017.
- [15] Barton, T.; Müller, C. (Hrsg.): Angewandte Wirtschaftsinformatik. Einführung, Anwendungen und Projekte. Wiesbaden: Springer Vieweg Wiesbaden 2021.
- [16] Hunkeler, U.; Truong, H. L.; Stanford-Clark, A. J.: MQTT-S — A publish/subscribe protocol for Wireless Sensor Networks. 2008 3rd International Conference on Communication Systems Software and Middleware and Workshops (COMSWARE '08) (2008), S. 791–798.
- [17] Johnson, B.: Cloud computing is a trap, warns GNU founder Richard Stallman. Web-based programs like Google's Gmail will force people to buy into locked, proprietary systems that will cost more and more over time, according to the free software campaigner. The Guardian 2008. Internetadresse: <https://www.theguardian.com/technology/2008/sep/29/cloud.computing.richard.stallman>. Zuletzt aufgerufen am 29.01.2024.
- [18] Cito, J.; Schermann, G.; Wittern, E. et al.: An Empirical Analysis of the Docker Container Ecosystem on GitHub 2017.
- [19] P. Rattanatamrong; Y. Boonpalit; S. Suwanjinda et al.: Overhead Study of Telegraf as a Real-Time Monitoring Agent. In: 2020 17th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE). 2020 17th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE), S. 42–46 2020.
- [20] Kuhlmann, T.; Schaab, D. A.; Sauer, A.: Wie die Gleichstromfabrik real wird. Effizienzsteigerung bei der Energieversorgung in sieben Schritten. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (2022), S. 35–40. Internetadresse: DOI:10.1515/zwf-2022-1003.
- [21] Dierolf, C.: Druckluftanlagen: Intelligenter Sensor erkennt Leckagen. Die lästige Suche nach Lecks in Druckluftanlagen könnte bald sehr viel einfacher werden. Produktion (2022), Nr. 15, S. 16. Internetadresse: 0344-6166.