

Industrie 4.0 Lösungen für Energieeffizienz in Motorsystemen

Konstantin Kulterer¹

Österreichische Energieagentur, Mariahilfer Str. 136, 1150 Wien, 01/5861524-114,
konstantin.kulterer@energyagency.at, www.energyagency.at

Kurzfassung:

Motorsysteme sind laut Statistik Austria in Österreich für rund 70 % des Stromverbrauchs in der Industrie verantwortlich. Sie umfassen u.a. Pumpen-, Ventilator-, Kälte- und Druckluftsysteme.

Die umfassende Digitalisierung der Produktion wird es künftig ermöglichen, dass alle produktionsrelevanten Faktoren (Mensch und Anlagen) aktiv in den Produktionsprozess einbezogen sind und über intelligente Netze miteinander kommunizieren. Einerseits wirkt sich eine intelligente Vernetzung der Verbraucher und Erzeuger senkend auf den Energieverbrauch von Motorsystemen aus, andererseits hat die zunehmende Automatisierung einen steigenden Effekt auf den Energieverbrauch.

Die Österreichische Energieagentur untersucht, finanziert über das Programm IEA Forschungskooperationen des bmvit, als Leiter des Tasks „New Industrial Developments“ des Annex Elektrische Motorsysteme (ESMA) Effekte von Industrie 4.0 auf den Elektromotorenmarkt.

Dieser Artikel gibt einen Überblick der wichtigsten Elemente von Industrie 4.0 und deren mögliche Auswirkung auf den Energieverbrauch, fasst Einspareffekte von Industrie 4.0 aus mehreren Studien zusammen und führt eine Reihe von Anwendungsbeispielen und Produkten für Industrie 4.0 in unterschiedlichen Motorsystemen an. Darüber hinaus werden Möglichkeiten zum Energiemanagement in den Schichten der Automatisierungspyramide dargestellt und eine Grobabschätzung für den Energieverbrauch von Industrierobotern in Österreich durchgeführt.

Elektromotoren bieten ein weites Feld zur Anwendung von Technologien, die Industrie 4.0 zugeordnet werden, und sind als wichtigster Bestandteil von vielen automatischen Prozessen bereits in viele Automatisierungslösungen integriert.

Alle relevanten Hersteller bieten Produkte zur Erfassung von Daten von Motoren und Motorsystemen mittels Sensoren und Berechnungsmodellen an, um diese „intelligent“ zu machen. Diese Sensoren erfassen Daten und leiten diese weiter. Dies kann bereits innerhalb des Systems zur Erhöhung der Effizienz aber auch auf Ebene des Unternehmens zu Transparenz hinsichtlich der größten Energieverbraucher und ihrem derzeitigen Effizienzniveau führen. Frequenzumrichter stellen in diesem Zusammenhang eine zentrale Schnittstelle zwischen Datenerfassung und Steuerung dar. Mittels Übertragung und Darstellung der Daten vor Ort oder in der Cloud können diese Daten dann auch hinsichtlich Auffälligkeiten

und Optimierungsmöglichkeiten manuell oder mittels Algorithmen analysiert und mit „digital twins“ der jeweiligen Anlage oder des jeweiligen Motors verglichen werden.

Keywords: Industrie 4.0, Energieeffizienz, Motorsysteme

1 Motivation und Rahmenbedingungen

In Österreich stieg der Stromverbrauch im Sektor Sachgüterproduktion in den Jahren 2007 bis 2017 um 16 % (durchschnittlich um 1,6 %), im Zeitraum 2009 bis 2017 sogar um 24 % (durchschnittlich um 3 %) [1, eigene Berechnung]. Der Produktionswert verzeichnete in diesen Zeiträumen einen Anstieg um 12 % bzw. 4 % [28].

Der Anteil von Standmotoren am Stromverbrauch in diesem Sektor sank zwar von 74 bis 75 % in den Jahren 2009 bis 2014 auf rund 69 % in den Jahren 2015 bis 2017, macht aber mit 20.370 GWh im Jahr 2017 den allergrößten Teil aus [1, eigene Berechnung].

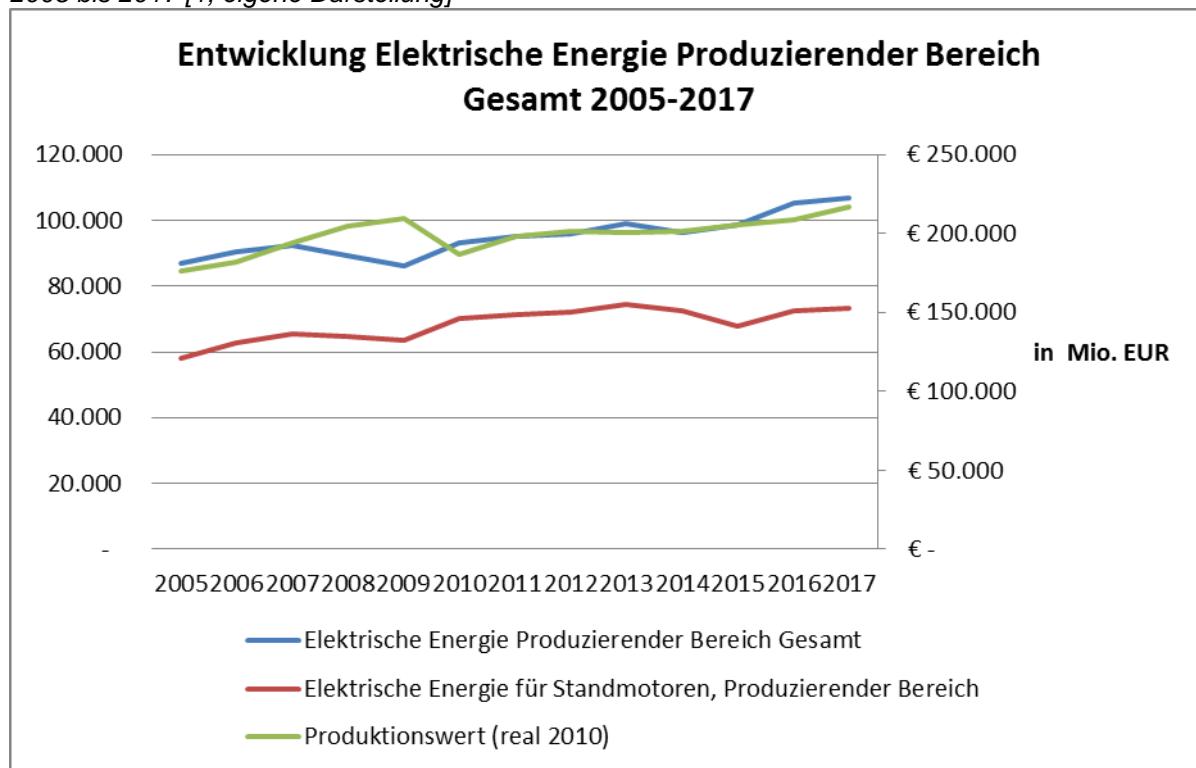
Laut dem Topmotors Market Report Schweiz 2017 machen Elektromotoren in der Schweiz in der Leistungsklasse 7,7 bis 375 kW 72,6 % des elektrischen Energieverbrauchs bei Elektromotoren aus, bei rund 12,5 % der Verkaufszahlen. Motoren mit der Nennleistung 0,12 bis 0,75k W machen hingegen mit 59,7 % der Verkaufszahlen einen Anteil am Stromverbrauch von 5,3 % aus [2].

Die wichtigsten Anwendungen umfassen u.a. Pumpen-, Ventilator-, Kälte- und Druckluftsysteme. Man geht davon aus, dass durch entsprechende Optimierungsmaßnahmen durchschnittlich 20 % des Stromverbrauchs eingespart werden können.

Die umfassende Digitalisierung der Produktion wird es künftig ermöglichen, dass alle produktionsrelevanten Faktoren (Mensch und Anlagen) aktiv in den Produktionsprozess einbezogen sind und über intelligente Netze miteinander kommunizieren. Einerseits wirkt sich eine intelligente Vernetzung der Verbraucher und Erzeuger senkend auf den Energieverbrauch von Motorsystemen aus, andererseits hat die zunehmende Automatisierung einen steigenden Effekt auf den Energieverbrauch.

Kernthema des 4E Technology Co-operation Programme ist die Energieeffizienz von energieverbrauchenden Geräten. Es sollen Regierungen und Industrie noch mehr für das Thema Energiesparen sensibilisiert werden. Innerhalb 4E erfüllt der Annex Elektrische Motorsysteme (ESMA) mehrere Funktionen: Dazu gehören insbesondere der internationale Austausch zu technischen und politischen Maßnahmen im Bereich Motorsysteme und die Erarbeitung von Hilfestellungen bei der konkreten Umsetzung von internationalen Normen, insbesondere zu Energieeffizienzklassen und zu Motorentests. Hier sind auch weitere Entwicklungen vorrangig im Bereich neue Motortechnologien aufzubereiten und zu diskutieren. Die Österreichische Beteiligung daran wird über das Programm IEA Forschungskooperationen des bmvit finanziert.

Abbildung 1: Entwicklung des Verbrauchs an elektrischer Energie im produzierenden Bereich von 2005 bis 2017 [1, eigene Darstellung]



2 Fragestellung und Zielsetzung

Das Ziel des von der Österreichischen Energieagentur geleiteten Tasks „Monitoring and Assessing New Industrial Developments“ des Electric Motor Systems Annex der Internationalen Energieagentur umfasst die Darstellung wesentlicher Trends aus dem Bereich Industrie 4.0 und deren Energieeffekte auf Motorsysteme.

Folgende Fragestellungen stehen dabei im Vordergrund:

- Beurteilung, ob und wie Industrie 4.0 Auswirkungen auf die Stromverbrauchsentwicklung allgemein und insbesondere von Elektromotoren hat und/oder haben wird
- Einschätzung, welche Technologieentwicklungen im Bereich Automatisierung und Digitalisierung besonderen Einfluss auf den Stromverbrauch von Elektromotoren haben werden
- Einschätzung, welche Anforderungen für Elektromotoren mit Industrie 4.0 verbunden sind.

Aus der Analyse der Antworten bisheriger Experteninterviews und begleitender Recherchen können zum jetzigen Zeitpunkt folgende Ergebnisse vorgestellt werden:

- Überblick der wichtigsten Elemente von Industrie 4.0 und mögliche Auswirkungen auf den Energieverbrauch
- Grobanalyse von Einspareffekten von Industrie 4.0
- Anwendungsbeispiele und -produkte für Industrie 4.0 in den unterschiedlichen Motorsystemen

- Möglichkeiten zum Energiemanagement in den Schichten der Automatisierungs-pyramide
- Grobabschätzung des Energieverbrauchs von Industrierobotern in Österreich.

3 Methodische Vorgangsweise

Österreich prüft unter dem Titel „Monitoring and assessing new industrial developments“, ob neue Entwicklungen bei der Industrieautomatisierung Auswirkungen auf den Stromverbrauch in Industriebetrieben haben und welche Auswirkungen auf den Motorenmarkt zu erwarten sind.

Dazu werden durchgeführt:

- Analyse von Studien, wissenschaftlichen Beiträgen und Vorträgen
- Stakeholder-Interviews mit Anbietern, Anwendern und EnergieberaterInnen
- Ergänzende, umfassende Internetrecherche zu den Fallbeispielen und Produkten
- Durchführung von nationalem und internationalem Erfahrungsaustausch.

Der Interviewleitfaden zur Durchführung der Experteninterviews umfasst beispielhaft folgende Fragen:

- Welche Anwendungen von Industrie 4.0 beeinflussen den Energieverbrauch?
- Welche Technologieentwicklungen im Bereich Automatisierung und Digitalisierung werden besonderen Einfluss auf den Stromverbrauch von Elektromotoren haben?
- Einschätzung, welche Anforderungen für Elektromotoren mit Industrie 4.0 verbunden sind?

Bisher (Ende Jänner 2019) wurden sechs Experteninterviews zu Motorsystemen durchgeführt und Gespräche mit weiteren Akteuren in diesem Bereich geführt. Außerdem wurde eine Vielzahl von Informationen von unterschiedlichen Quellen (Web, Konferenzbeiträge, Studien) analysiert.

4 Überblick der wichtigsten Elemente von Industrie 4.0 und mögliche Auswirkungen auf den Energieverbrauch

Vor einem Überblick der wichtigsten Elemente von Industrie 4.0 und Smart Manufacturing wurden verschiedene Definitionen dieser Begriffe in der Literatur untersucht. Als in diesem Zusammenhang brauchbare Definitionen von Industrie 4.0 wurden folgende identifiziert.

„Die Begriffe „digitale Transformation“ und „Industrie 4.0“ beziehen sich auf die Verbindung der physischen mit der digitalen Welt. Konkret bedeutet das für die Industrie und das verarbeitende Gewerbe die Verbindung von Anlagen, Maschinen, Werkstücken und Produkten mit digitalen Technologien, welche durch neue Informationstechnologien, insbesondere durch das Internet und Cyber-physikalische Systeme (CPS), ermöglicht wird.“ [3, S. 17].

„Industrie 4.0“ beschreibt eine Form industrieller Wertschöpfung, die durch Digitalisierung, Automatisierung sowie Vernetzung aller an der Wertschöpfung beteiligter Akteure charakte-

risiert ist und auf Prozesse, Produkte und Geschäftsmodelle von Industriebetrieben einwirkt“ [4, S. 8].

Als zentrale Treiber oder Industrie 3.0-Charakteristika bezeichnet (Obermair, 2017) die Bereiche:

- Automatisierung
- Digitalisierung
- Vernetzung aller an der Wertschöpfung beteiligten Akteure [4].

„Simply put, it is the integration of all aspects of manufacturing, regardless of level of automation, and all the individual units of an organization, for the purpose of achieving superior control and productivity“ [5, S3].

Zur Abgrenzung von heutiger Automatisierung zu „smart manufacturing“ werden in ACEEE 2017 folgende drei grundlegende Funktionen als Fundament für „smart manufacturing“ angesehen:

- „Networked
- Access to logic (data analytics and simulation)
- Use of logic to optimize energy use (anticipatory)“ [6, S. 24].

Ähnlich dem deutschen Sprachraum wird auch hier die Vernetzung als wesentlicher Punkt angesehen. Konkret spielen für die Erhöhung der Energieeffizienz Datenanalysen und zukünftig auch die Anwendung von Algorithmen zur Optimierung des Energieverbrauchs ebenfalls eine Rolle.

Im Zusammenhang mit Energieeffizienz in Motorsystemen ist auch noch ein weiterer Begriff aus dem amerikanischen Sprachraum interessant:

„Intelligent efficiency“ is energy efficiency made possible by the deployment of affordable next-generation sensor, control, and communication technologies that gather, manage, interpret, communicate, and act upon disparate and often large volumes of data to improve device, process, facility, or organization performance.“[5, S. 4].

Die Kombination folgender technologischer Innovationen bietet die Grundlage für die Entwicklung der Produktionsvision „Industrie 4.0“.

Ausgangspunkt sind jegliche Objekte, die auf Basis

- sog. eingebetteter Systeme („embedded systems“) mit Fähigkeit zur Selbststeuerung ausgestattet sind und
- mittels Sensoren Daten erfassen, mittels eingebetteter Software aufbereiten und mittels Aktoren auf reale Vorgänge einwirken
- über eine Dateninfrastruktur (Internet) kommunizieren und über
- Mensch-Maschine-Schnittstellen verfügen
- und ihrerseits selbst wiederum mit anderen CPS zu einem Internet of Things vernetzt werden [4].

Darauf aufbauend umfassen für Industrie 4.0 relevante Technologien folgende fünf Felder:

- Internet- und Kommunikationstechnologie
- Automatisierung, Fertigungstechnologie und Robotik
- Sensorik und Aktorik
- Eingebettete Systeme, Analytik und Systemtechnik
- Mensch-Maschine-Schnittstellen [4, S. 13].

Folgende technologische Entwicklungen werden lt. ACEEE 2017 dem Thema „intelligent efficiency“ zugeordnet:

- „Connected devices
- Integrated manufacturing process
- Energy management
- Demand response“ [6, S. 24].

Wesentliche Technologiebereiche und Komponenten von Industrie 4.0 und deren Energieeffekte sind in untenstehender Tabelle aufgelistet.

Tabelle 1: Wesentliche Komponenten von Industrie 4.0 und deren Energieeffekte ([3,4,5], eigene Einschätzung)

| Teilkomponenten von Industrie 4.0 | Energieeffekte |
|---|---|
| Aktoren, Sensoren | Eine Kommunikation miteinander und mit übergeordneten Systemen erhöht den Informationsstand und bietet Möglichkeiten zu Analysen und Zustandsüberwachung. |
| Robotik und Automatisierungs-technologien | Der Energieeffekt ist eher negativ, ist aber auch abhängig vom Roboter-Stand-By-Verbrauch und der Zeit, um die Prozesse schneller werden und daher den spez. Energieverbrauch reduzieren. |
| Additive Fertigungstechnologie (3 D-Druck) | Generell ist das Ziel, Maßanfertigung zu Kosten einer Großserienproduktion, d.h. der Energieverbrauch ist verglichen mit Großserien pro Stück höher. Der Energieeffekt ist aber abhängig von der bisher verwendeten Technologie. Theoretisch kann energieeffizientes Design besser umgesetzt werden. |
| Big Data, Data Mining Data Analytics Cloud based data analytics | Die Auswertung von Prozessdaten ermöglicht die Identifikation von Schwachstellen und Störungen. Das Ziel ist, durch die Erfassung und Auswertung von Daten, Prozess- und Qualitätsverbesserungen zu erreichen. Verbesserte Methoden zur Evaluierung und Validierung. |
| Automatische Steuerung | Die zeitliche Erfassung verfahrensrelevanter Daten in Echtzeit und deren Auswertung ermög- |

| | |
|--|---|
| Online Überwachung | licht Energieeinsparung. Eine sofortige Fehlermeldung ermöglicht Eingriff in den Produktionsprozess; Ausschussraten und Materialeinsatz werden minimiert. Bedarfsorientierte Regelung (z.B. automatische Temperaturregelung) zur Wärmebehandlung erhöht Qualität bei geringerer Gasmenge. |
| Human Machine Interface/Collaboration Augmented Reality | Assistenzsysteme unterstützen Menschen bei energieeffizientem Betrieb der Maschine z.B. KPIs auf SCADA. Augmented Reality kann Wartungsprozesse erleichtern. |
| Digital Twin/Digitaler Schatten | Ein Abbild des Prozesses ermöglicht, eine echtzeitfähige Auswertungsbasis aller relevanten Daten zu erstellen und ermöglicht Prognosen zukünftiger Zustände und gibt Auskunft über aktuelle Zustände. Ermöglicht, auch effizientere Prozesse und Teilkomponenten zu entwickeln. |
| Verbindung von Produktions- und Umwelt- und Energiedaten | Betriebsinformationssystem speichert alle verfügbaren Daten (Energie-, Materialverbrauch), ermöglicht eine Auswertung über längere Zeiträume, Einsparungspotenziale werden erkannt. |

Energieeffekte in Industrie 4.0 Systemen umfassen folgende Möglichkeiten:

- Effiziente Komponente statt Standardprodukt
- Komponente arbeitet nur bei Bedarf zur Erfüllung der Anforderung (statt Ein/Aus-Schaltung)
- Prozess arbeitet nur bei Bedarf - soweit zur Erfüllung des Produktionsziels erforderlich (statt Ein/Aus-Schaltung)
- Einstellungen auf Basis Erfahrungen aus vergangenem Betrieb statt „best guess settings“
- Smart design (statt konventionellem Design)
- Verbundene Systeme und Business Units statt isolierten Systemen [5, S. 29].

Generell kann Industrie 4.0 - soweit für diesen Beitrag relevant - auf den Ebenen Produkt (Objekt), Prozess und Standort zu Energieeffizienz beitragen.

Für diese Analyse relevant sind einerseits Elektromotoren (als Produkt oder Objekt), Prozess (in diesem Fall z.B. Motorsystem, beispielsweise Pumpen- oder Druckluftsystem) und Standort (z.B. betriebliche Energiedatenerfassung und Energiemanagement).

5 Grobanalyse von Einspareffekten von Industrie 4.0

Aussagen zu Einspareffekten, die mit Industrie 4.0 verbunden sind, wurden beispielhaft in folgenden Studien angeführt:

Laut SMLC 2011 können Technologien im Kontext von „Smart Manufacturing“ die Energieeffizienz um 25% verbessern [7].

Jene Unternehmen, die in der Studie VDI RZE 2017 untersucht wurden, ordneten die erzielte Verringerung des Energieverbrauchs (elektrische Energie) durch Maßnahmen der digitalen Transformation überwiegend im Bereich bis 25 % ein [3, S. 144].

Die Studie VDI RZE 2017 nimmt basierend auf den Erfahrungen bei Sensitec eine mögliche Einsparung an Strom durch eine Echtzeitsteuerung der Fertigungslinie zwischen 10 % und 20 % an [3, S. 141].

Umgekehrt errechnet das Umweltbundesamt Deutschland 2017 den durch Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) bedingten Stromverbrauch 2014 in Deutschland auf ca. 75,2 TWh (entsprechend einem Anteil von rund 10 % am gesamten Stromverbrauch, davon ca. 9,6 TWh in der Industrie [3, S. 14]).

Global geht die Global e-Sustainability Initiative (GeSI) im Bericht „Smarter 2020“ davon aus, dass sowohl innerhalb der durch IT verursachten Emissionen als fortgeschrittenen Technologie ein Emissionsminderungspotenzial bis 2020 von 9,1 Milliarden t erreichbar ist und den Ausstoß von rund 1,3 Milliarden t, der auf IT selbst entfällt, um den Faktor 7,2 übertrifft [8].

6 Anwendungsbeispiele und -produkte für Industrie 4.0 in den unterschiedlichen Motorsystemen

Auf allgemeiner Ebene ist es möglich, allgemeine Trends aus dem Bereich Industrie 4.0 zu identifizieren und einen Effekt auf die Energieeffizienz darzustellen. Konkret für Motorsysteme ist es aber leichter, die derzeitigen Trends für den Motormarkt anhand von Produktbeispielen mit Effekt auf den Energieverbrauch darzustellen. Dies erfolgt in diesem Abschnitt.

Generell ermöglichen folgende Faktoren, ein Objekt in Cyber-physikalische Systeme einzubinden:

- Physisches Element, das die Grundfunktion des Produkts vorgibt (Motor)
- Intelligentes Element, das zukünftig die Leistung des physischen Elements verstärkt (Sensor, Aktor, Steuerung)
- Vernetzungselement, das die Verlagerung von Teilen der Intelligenz aus dem Produkt ermöglicht (Sende-, Empfangseinheiten) [4].

Für Elektromotoren und Motorsysteme sind folgende Schritte notwendig, um sie Industrie 4.0-tauglich zu machen:

- Einer der ersten Schritte zu Industrie 4.0 umfasst, die Produkte selbst „intelligent“ zu machen. Dies beinhaltet als ersten Schritt die Erfassung von Daten mittels Sensoren, die Erfassung und Speicherung der Daten und das Errechnen weiterer Daten.
- Der zweite Schritt umfasst die Übertragung und Darstellung von Daten.

- Der dritte Schritt beinhaltet die Analyse von Daten und evtl. bereits eine Ableitung von Maßnahmen. Auf dieser Ebene können bereits Dienstleistungen angeboten werden.
- Der vierte Schritt würde die (automatisierte) Steuerung der Anlage auf Basis dieser Analyse umfassen.

6.1 Smartboxes für Elektromotoren

Die kleinste Einheit in Motorsystemen bilden elektrische Motoren selbst. Die häufigste Ausführungsform im industriellen Anwendungsbereich sind die Dreiphasen-Asynchronmotoren. Diese Motoren sind normalerweise ohne Sensoren ausgestattet.

In den letzten Jahren brachten die wichtigsten Motorenhersteller sogenannte „Sensor-Boxes“ auf den Markt. Diese Boxen sind ohne Verkabelung direkt auf den Motor, teilweise sogar im Betrieb zu montieren - das kann mit Magnet, mit Klebstoff oder mit Schrauben auf den Kühlsschlitten erfolgen. Im Wesentlichen messen sie die Parameter magnetisches Feld, Vibration und Oberflächentemperatur.

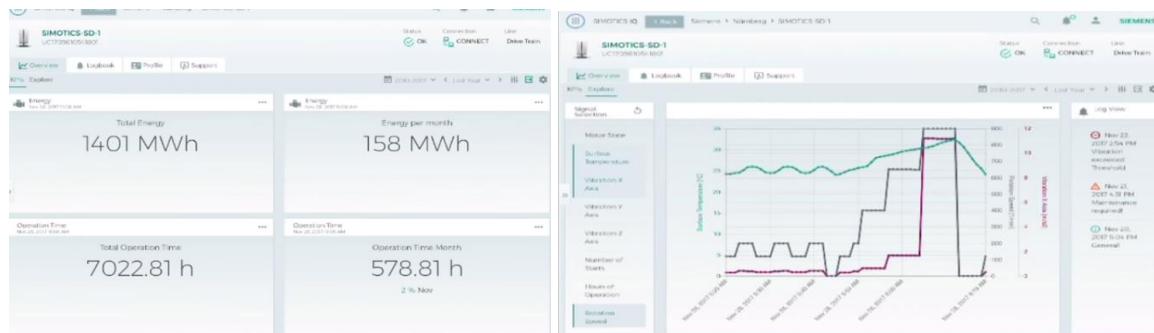
Diese Boxen sind in vielen Fällen zur Anwendung auf Motoren des jeweiligen Herstellers entwickelt worden. Mithilfe der hinterlegten Motordaten können auf Basis der gemessenen Werte weitere Werte berechnet werden. Beispielsweise wird auf Basis der Oberflächentemperatur die Motorwicklungstemperatur berechnet. Mittels magnetischem Feld wird auf die aktuelle Belastung des Motors und damit die Leistung geschlossen. Die Vibration kann auf fehlerhafte Lager schließen lassen.

Diese Boxen übertragen ihre Daten mittels WLAN in die Cloud, wo die Daten dargestellt werden können (siehe Abbildung 2).

Weitere Anwendungsbeispiele umfassen:

Überlast, Probleme mit der Leistungsversorgung, Probleme mit der Isolation des Stators, Motorunwucht, Exzentrik des Stators oder der Welle, Motorausrichtung, fehlende Schmierung, Probleme im Bereich der Lager usw. [z.B. 9, 10, 11].

Abbildung 2: Anzeige energie- und wartungsrelevanter Daten in der Cloud auf Basis von Messwerten einer Smartbox [10]



6.2 Daten für Motoren mit fixer Drehzahl

Eine weitere Methode, Daten zu ermitteln, besteht in der Nutzung der Motorschutzeinheit zur Überwachung des Motorstroms im Schaltschrank von Elektromotoren, die direkt vom Netz (also ohne Softstarter oder Frequenzumrichter) betrieben werden.

Erweiterungen können die Spannungserfassung und damit in Kombination mit dem Strom die Wirkleistungserfassung ermöglichen und weitere Messgrößen überwachen:

Durch Anschluss analoger Temperatursensoren können z.B. Lager-, Getriebeöl- oder Kühlmitteltemperatur des Motors überwacht werden.

Weitere Sensoranschlüsse können z.B. die Prozessüberwachung von Füllständen, Durchflüssen, Trockenlauf oder Filterverschmutzung ermöglichen.

Die Anbindung an überlagernde Automatisierungssysteme erfolgt neben Profibus und Modbus auch über Ethernet/IP und Profinet. Bei Anbindung über Simocode pro über Profinet steht auch eine integrierte Kommunikationsschnittstelle zum Offline-Kommunikationsstandard Unified Architecture (OPC UA) zur Verfügung. Eine Anzeige kann daher im Motorcontrolcenter, an der Leitwarte oder über die Cloud und damit an allen mobilen Endgeräten erfolgen.

Neben verschiedener Statusmeldungen (Betriebsdaten, Stillstandszeiten, Überlast, Übersymmetrie) und Störungs- und Wartungsmeldungen können auch Messwerte (Strom und Spannung für jede Phase, Wirk- und Scheinleistung) angezeigt werden.

Kombiniert mit anderen Daten, die direkt aus dem Prozess in die Cloud geliefert werden, lässt sich so effizientes Energiemanagement, vorausschauende Wartung und Ressourcenoptimierung anlagenübergreifend realisieren [12].

Abbildung 3: Anzeige von elektrischen Messwerten für einen Elektromotor mittels Siemens Software [12]

| Strom | | Spannung | |
|----------------------|-------------|----------------------|-------|
| Max. Strom I_max | 97 % von Ie | Strangspannung UL1-N | 279 V |
| Strom I_L1 | 97 % von Ie | Strangspannung UL2-N | 277 V |
| Strom I_L2 | 97 % von Ie | Strangspannung UL3-N | 279 V |
| Strom I_L3 | 97 % von Ie | | |
| Letzter Auslösestrom | 0 % | | |
| Phasenunsymmetrie | 0 % | | |

| Thermisches Motormodell | | Leistung/ Leistungsfaktor | |
|-------------------------|-------|---------------------------|---------|
| Erwärmung Motormodell | 24 % | Wirkleistung P | 319 kW |
| Abkühlzeit | 0.0 s | Scheinleistung S | 404 kVA |
| Zeit bis zur Auslösung | - s | Cos-Phi | 79 % |

| Temperaturmodul 1 | | Analogmodul 1 | |
|-------------------|---------|---------------|--------|
| Max. Temperatur | -273 °C | Eingang 1 | 0.0 % |
| Temperatur 1 | -273 °C | Eingang 2 | 0.0 % |
| Temperatur 2 | -273 °C | Ausgang | 0.0 mA |
| Temperatur 3 | -273 °C | | |

Anwendungsbeispiele sind:

Trockenlaufschutz: Mit der Überwachung der aufgenommenen Leistung des Motors kann der Pumpenstatus überwacht werden. Bei Unterschreitung eines definierten Wertes kann die Pumpe abgeschaltet werden.

Pumpenreinigung: Bei Überwachung des Werts des aufgenommenen Motorstroms kann (auf Basis bisheriger Erfahrungswerte) auf verschmutzte Pumpen geschlossen werden und durch Änderung der Drehrichtung der Selbstreinigungsmechanismus der Pumpe aktiviert werden. Außerdem kann die Anzahl von Pumpenstarts überwacht werden [12].

6.3 Frequenzumrichter als lokaler Datensammelpunkt

Ein Frequenzumrichter erfasst bzw. regelt die Drehzahl eines Motors über die Amplitude und Frequenz seiner Ausgangsspannung. Über die Spannungs- und Stromsensoren verfügt der Umrichter über eine Vielzahl von Daten in Echtzeit. Aufgrund der Vielzahl und des Umfangs der Daten müssen diese lokal gefiltert und verarbeitet werden.

Über weitere Sensoreingänge erfasst der Frequenzumrichter die Drehzahl und die momentane Rotorposition (Winkelposition) des angetriebenen Motors. Darüber hinaus kann aber ein Frequenzumrichter über weitere Eingänge Vibration, Druck (Luft, Wasser) und Temperatur erfassen.

Der Frequenzumrichter kann diese Daten mit der Drehzahl und der Last korrelieren, das Signal verarbeiten und analysieren. Grundsätzlich können auf Basis der erfassten Daten Kenntnisse über den Zustand der industriellen Prozesse gewonnen und damit das System optimiert werden. In weiterer Folge werden daraus Dienstleistungen und Analysen entwickelt werden [13].

Ein Beispiel ist das sog. „Condition Monitoring“ zur Vermeidung von Bedingungen, die zu erhöhten Verlusten führen:

- Ungerügende Schmierung
- Verstopfte Luftfilter
- Fouling an Pumpen und Rohren
- Abgenutzte Getriebe [13].

Frequenzumrichter ermöglichen es, den Betriebsstatus von Ventilatoren in Echtzeit über den Motor ohne weitere Sensoren zu erfassen. Beispielsweise verringern verstopfte Filter den Volumenstrom, dabei sinkt der Stromwert. Auf Basis einer festgelegten Warnschwelle kann der Anwender über den Zeitpunkt der Filterbelegung informiert werden [14].

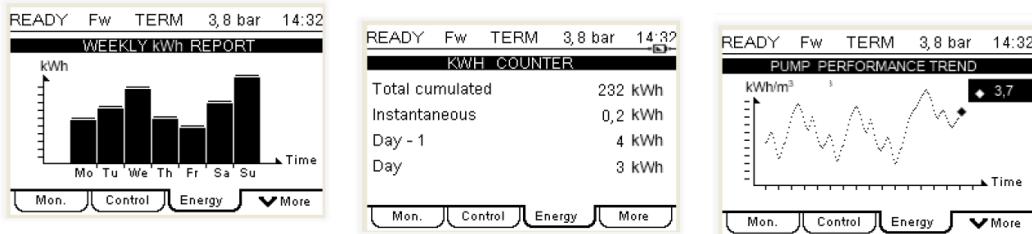
Die Überwachung des Drehmoments ermöglicht beispielsweise das Erkennen des Eindringens von Fremdkörpern in den Antriebsstrang, z.B. einer Kette. Auch hier kann über Warnschwellen der Anwender alarmiert werden [14],

Weitere Eigenschaften von Frequenzumrichtern im Zusammenhang mit Industrie 4.0 und Energie umfassen:

- Erweiterte Konnektivität, vollständige Integration in alle Automatisierungssysteme
- Schutzfunktionen für Pumpen (Trockenlaufschutz, Vermeidung von Kavitation, Inlet/Outlet pressure protection)
- „Energiesparkennlinie“ (Reduktion der Spannung auf für erforderliche Wellenleistung notwendigen Wert)
- Bremsung und Rückspeisung der Bremsenergie

- Benutzerdisplay: Anzeige des Energieverbrauchs (z.B. wöchentlich verbrauchte Energie in kWh), Strom-, Spannungsinformation auf dem Display, Trend und graphische Darstellung, Fehlerhistorie, Auswertung der Energiekennzahl kWh/m³ über die Zeit
- Über QR-Code wird die Wartung erleichtert, über Fehlercodes in Kombination mit Apps können beispielsweise die erforderlichen Ersatzteile rasch nachbestellt werden
- Über farbiges Display kann am Frequenzumrichter mittels Warnschwellen Alarm hinsichtlich Motorbetrieb gegeben werden (dazu gehören z.B. Temperaturen oder Spannungsasymmetrie)
- „Best Efficiency Point Function for Pumps“: dazu wird im Frequenzumrichter eine Pumpenkennlinie hinterlegt, der Frequenzumrichter sucht auf Basis dieser Information den besten Punkt
- Druck-, Durchfluss- oder Niveausteuierung
- Multipumpenmanagement (Steuerung mehrerer Pumpen)
- Sicherheitsfunktionen: Dies ist eine unmittelbare Anforderung aus der Zusammenarbeit von Maschine und Arbeiter. Beispiele sind Safe Torque Off (sicher abgeschaltetes Drehmoment) aber auch andere Mechanismen, bei denen die Drehzahl nur vermindert werden muss und damit rascheres Hochfahren des Prozesses ermöglicht wird. Dies führt zu verminderter Wartungszeit (verbesserte Wartungsleistung) durch reduzierte Ausfallzeit der Maschine.
- Ausschalten des Antriebs im Stillstand und Verringerung des Energieverbrauchs durch Schaltung des Leistungsteils im Standby-Modus, ausgeschalteten Gerätelüfter und deaktivierte Beleuchtung und Display [15, 16].

Abbildung 4: Anzeige von energierelevanten Daten und Kennzahlen an einem Frequenzumrichter [17]



Ein wichtiger Punkt ist die Einbindung von Frequenzumrichtern in das Energiedatenmanagement (siehe nächstes Kapitel). Daher verfügen diese Bestandteile über Kommunikationsmöglichkeiten über Ethernet oder Bussysteme.

6.4 Intelligente Pumpe

WILO führt derzeit eine sogenannte intelligente Pumpe in den Markt ein. Folgende Faktoren machen diese Pumpe „intelligent“:

- Sensoren zur Temperatur- und Leistungsmessung, analoge Schnittstelle zu externen Sensoren (z.B. für die Vorlauf-, Rücklauftemperatur). Der Durchfluss wird über die aufgenommene Leistung und die jeweilige Pumpenkurve berechnet.
- Berechnung der übertragenen Wärmeenergie aus oben genannten Daten

- Innovative Regelstrategien nach Druck, Temperatur oder Durchfluss (z.B. konstante Raumtemperatur, konstante Differenztemperatur usw.), Multiflow adaption (Ermittlung des Summenvolumenstroms durch die Zubringerpumpe für die bedarfsgerechte Versorgung von Sekundärpumpen in Heizkreis-Verteilern), Absenkbetrieb
- No-Flow Stop (Trockenlauf-Stopp)
- Volumenstrombegrenzung
- Dynamische Sollwertanpassung
- Farbanzeige an Pumpe von Durchfluss, Förderhöhe, Temperatur und Leistungsaufnahme
- Auswahl der Anwendungen (z.B. Art der Kälte- oder Wärmeübertragung, z.B. Fußbodenheizung) ermöglicht rasches Set-up
- Konnektivität: Bluetooth, WILO Net
- Cloud/Gateway App ermöglichen Monitoring- und Analysefunktion
- Warnmeldungen für Gebäudeautomatisierungssysteme [18].

Die Pumpe kann insgesamt 42 Parameter weitergeben, dazu gehören:

Betriebsstatus, Drehrichtung, Differenzdruck, Durchflussmenge (berechnet), Energieverbrauch, Pumpenleistung [W], Strom [A], Mediumstemperatur, Betriebsstunden, Sollwertsabweichung, Drehzahl, verschiedene Störungen, Frequenzsollwert, max. Drehzahl, min. Drehzahl, Steuerungsmodus (konstanter Druck, konstantes Volumen) [19].

Laut Einschätzung des Experten kommt die Energieeinsparung neben der Nutzung von hocheffizienten Komponenten (z.B. IE4 Motoren) in Kombination mit Regelung (Frequenzumrichter) insbesondere von der Möglichkeit, Benutzerparameter wie die Raumtemperatur als Steuerparameter zu nutzen und nicht wie in der Vergangenheit den Druck [19].

6.5 Industrie 4.0 und Druckluftanlagen

Der Energieverbrauch von Druckluftanlagen hängt u.a. davon ab, wieviel Zeit die Anlage in den unterschiedlichen Betriebszuständen betrieben wird. Bei starren Kompressoren sind dies Vollast, Teillast, Start/Stopp. Bei Kompressoren mit Frequenzumrichter hängt der spezifische Energieverbrauch vom jeweiligen Lastzustand ab. Dieser ist wiederum abhängig von der jeweiligen Last bzw. dem Druckluftverbrauch, dem Druck und den eingestellten Druckbändern.

Die größten Druckluftanbieter bieten zum optimalen Betrieb automatische Regelstrategien an.

Beispielsweise analysiert der „SIGMA AIR MANAGER 4.0 with adaptive 3-D advanced control“ von KAESER den Zusammenhang zwischen den verschiedenen Parametern: Start, Stopps, Teillast, Verluste des Frequenzumrichters und Flexibilität des Drucks. Dadurch wird der Druck optimiert und reduziert und somit Energie gespart [20].

Das Überwachungssystem Elektronikon® für Kompressoren von Atlas Copco sammelt Temperatur- und Druck-Daten von Sensoren, die im Kompressor verbaut sind und ermöglicht dadurch, die Effizienz des Kompressors zu optimieren: Durch Einstellung zweier unter-

schiedlicher Druckbänder kann die Anlage auch am Wochenende oder nachts bei niedriger Auslastung optimal betrieben werden. Der intelligente DDS-Steuer-Algorithmus (Delayed Second Stop) startet den Antriebsmotor nur bei Bedarf und erhält dabei den gewünschten Systemdruck: dadurch wird die Motorlaufzeit reduziert. Mithilfe eines Umgebungssensors zur Überwachung der erforderlichen Reduktion des Drucktaupunkts startet und stoppt die Steuerung den Kältetrockner und den Ventilator nur bei Bedarf. Im Schwachlastbetrieb wird der Energieverbrauch des Kältetrockners reduziert.

Die Steuerung kann mit mobilen Geräten wie Tablets und Smartphones verbunden werden und ermöglicht so, die mobile Überwachung über ein sicheres Netzwerk auszuführen. Durch ein automatisches Warnsystem informiert das mobile Gerät im Fall einer Unregelmäßigkeit [21].

Die Steuerung von KAESER liefert permanent und in Echtzeit alle Betriebs- und Umgebungsparameter an das KAESER DATA CENTER. Mit Hilfe eigens programmierter Expertentools werden dort Auffälligkeiten frühzeitig erkannt und Betriebsstörungen verhindert. Die dadurch mögliche Wartung nach tatsächlichem Bedarf statt aufgrund fest definierter Serviceintervalle senkt die Kosten [22].

Durch die Echtzeit-Übertragung und Auswertung bzw. Überwachung wichtiger Betriebsparameter wie z.B. Verdichtungsendtemperatur, Drucktaupunkt oder Differenzdrücke kann die Energieeffizienz der Druckluftanlage immer im optimalen Bereich gehalten werden, z.B. auch bei kurzfristigen Produktionsanpassungen [23].

7 Möglichkeiten zum Energiemanagement in den Schichten der Automatisierungspyramide

Ein weiterer wichtiger Bestandteil von Industrie 4.0 ist die Datenanalyse auf Unternehmensebene. Grundsätzlich wird Industrie 4.0 dazu führen, die Automatisierungspyramide aufzubrechen. Teilweise geschieht dies bereits, da wie oben erwähnt z.B. Motoren auf der untersten Ebene ihre Daten direkt über WLAN Übertragungsmechanismen an die Cloud senden, wo bereits eine Auswertung der Daten stattfinden kann.

Auf der anderen Seite ist aber eine durchgängige Automatisierung der Datenerfassung in den wenigsten Betrieben bereits vorhanden.

Motoren, Frequenzumrichter und Sensoren stellen dabei die unterste Ebene dar und können Daten erfassen, speichern, teilweise sogar schon anzeigen und weiterleiten. Daher sollen an dieser Stelle die Möglichkeiten der Energiedatenerfassung im Rahmen einer kurzen Beschreibung der Automatisierungspyramide erfolgen:

Auf der Feldebene (sog. „Level-1“) sind Beispiele für Komponenten, die energierelevante Daten liefern können:

- Intelligente Feldgeräte mit integrierten Energiedaten, z.B. Leistungsschalter, Frequenzumrichter, Motorstarter, Ventile. Frequenzumrichter können auch Spannung, Strom und Drehzahl messen und weitere Werte wie z.B. das Drehmoment errechnen und damit die Vibration messen und speichern.
- Erweiterbare Messgeräte wie z.B. elektrische Messgeräte; Gas-, Wasser-, Dampf- und Druckluftmessungen

- Sensoren: Temperaturen, Druck, Niveau/Füllstand
- Zähler für Strom, Stückzahl.

Alle diese Werte können bei entsprechender Hard- und Software auch auf Maschinenebene in zeitlichem Verlauf dargestellt werden.

Auf der Steuerungsebene (ebenfalls Level-1) ist die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) verortet. Es ist ein auf digitaler Basis programmiertes Gerät zur Steuerung oder Regelung von Maschinen. An der SPS lassen sich auch Maschinenzustände ablesen. Diese Ebene wird oft mit der Ebene 2 zusammengefasst. Viele energierelevante Anlagen besitzen eine interne Steuerung, die z.B. in Abhängigkeit des Drucks und/oder der Temperatur die Anlagen regelt.

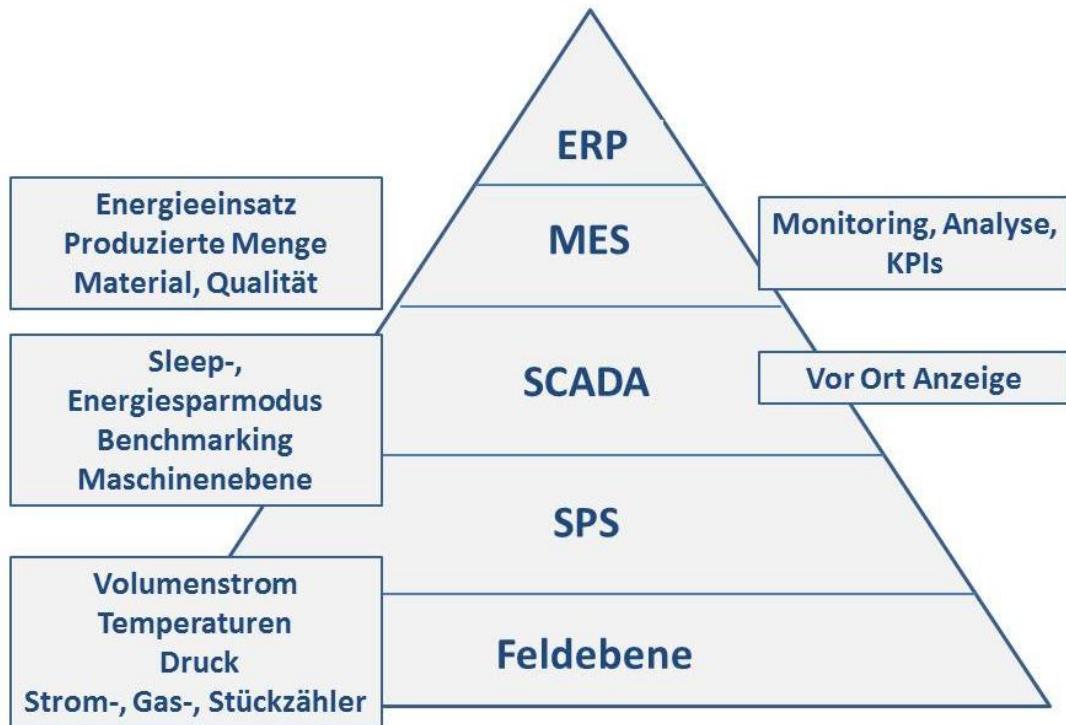
Die Prozesselebene (Level-2 Ebene) hat die Aufgabe, die Level-1-Automation zu überwachen und zu optimieren, aber auch Stellgrößen und Sollwerte auszugeben und steuernd in den Prozess einzugreifen. Die Daten aus der Level-1-Automation werden dabei in einer benutzerfreundlichen Darstellung präsentiert. Dies geschieht mit Überwachungs- und Daten erfassungssystemen (SCADA). Auf dieser Ebene werden Daten durch verschiedene Produkte erhoben, die ganz unterschiedliche Daten aufnehmen können. Das sind unterschiedliche Softwareprodukte, welche die Integration der Messstellen auf der Feldebene auf einfache Weise ermöglichen.

Funktionen auf dieser Ebene sind beispielsweise die vor-Ort-Anzeige folgender Daten:

Status und Name des Energieobjekts, aktueller und vergangener Energieverbrauch und Leistungsaufnahme, graphische Anzeige mit aktuellem Leistungsbereich.

Zu energierelevanten aktiven Funktionen auf dieser Ebene gehören: Lastmanagement (automatischer Lastabwurf für Spitzenlastmanagement), Energiesparzustand und -strategien, Alarm-Ereignismeldung.

Abbildung 5: Automatisierungspyramide mit energierelevanten Daten und Funktionen im Energiemanagement [24]



Auf Betriebsleitebene (Level-3) erfolgt die Planung, Qualitätssicherung, Dokumentation und Optimierung des Produktionsprozesses und werden die wesentlichen Analysen im Rahmen von Energiemanagementaktivitäten durchgeführt. Unter anderem wird der Energieverbrauch ermittelt, mittels Kennzahlen überwacht und dargestellt. Darüber hinaus muss aber für jeden auffälligen Verbrauchswert geprüft werden, wie der Status der jeweiligen Anlage im betrachteten Zeitraum war, wie z.B. Ausfall, im Stand-By-Modus, Wartung oder beim Warten auf ein zu bearbeitendes Teil.

Auf der obersten Ebene der Automatisierungspyramide, der Unternehmensebene, werden Enterprise Ressource Planning-Systeme (ERP-Systeme) zur Bestellabwicklung eingesetzt. Diese enthalten ökonomische Geschäfts-, Logistik- und Finanzdaten. Auf dieser Ebene sind folgende Schnittstellen zu Energiedaten relevant:

- Verbrauchswerte
- Energiepreise
- Zugriffsmöglichkeit zu Energiedaten für Buchhaltung und Kostenrechnung.

(für eine detailliertere Darstellung siehe [24])

8 Grobabschätzung für Energieverbrauch durch Roboter/Automatisierung

Generell ist eine Erhöhung der Automatisierung mit der Erhöhung des Energieverbrauchs verbunden. Grundsätzlich werden automatisierte Anlagen auf Einhaltung einer bestimmten Taktzeit gebaut. Durch intelligente Überwachung und Wartungs- und Instandhaltungstätigkeit

lassen sich die damit verbundenen Energieverbräuche nahezu konstant halten. Dennoch gibt es immer wieder Möglichkeiten, effizienter zu produzieren.

Ein Beispiel sind optimierte Produktionsplanung und Maschinenbelegung. Dadurch lassen sich beispielsweise Wartezeiten einzelner Maschinen und damit Stand-By-Verbräuche reduzieren. Auch optimierte Spann- und Werkzeugwechselvorrichtungen usw. ermöglichen es, solche Zeiten zu reduzieren.

In diesem Abschnitt erfolgt eine Grobabschätzung des Stromverbrauchs von Industrierobotern für Österreich:

Laut International Federation of Robotics (IFR) betrug die Anzahl der Roboter im Jahr 2016 in Österreich 144 pro 10.000 Beschäftigte in der Industrie [25]. Im Sachgüterbereich waren im Jahr 2016 629.625 Personen in Österreich beschäftigt [26].

Die Gesamtzahl der Roboter in Österreich beträgt laut diesen Angaben rund 9.100 (9066,6).

Brunner errechnet auf Basis eines Industrieroboters mit 210 kg Traglast, einer Reichweite von 2,7 m, mit einer Volllastleistung von 3,5 kW und einem detaillierten Lastprofil (ca. 19 % der Zeit 3 kW, 10 % in Warteposition mit 0,7 kW; restl. Zeit inkl. Wochenendabschaltung und Warten mit Bremsen ca. 0,2 kW) einen Gesamtstromverbrauch von 7.000 kWh pro Jahr [27]. Dies würde einer durchschnittlichen Leistung von ca. 0,8 kW oder 2.000 Vollaststunden entsprechen.

Rechnet man auf Basis dieses Roboters den Energieverbrauch hoch, ergibt dies für Österreich einen Wert von rund 63,5 GWh. Der Stromverbrauch für Industrieroboter machte daher 2016 einen Anteil von 0,22 % des gesamten Stromverbrauchs von 29.175 GWh in der Sachgüterproduktion aus.

9 Schlussfolgerungen und Ausblick

Elektromotoren bieten ein weites Feld zur Anwendung von Technologien, die Industrie 4.0 zugeordnet werden und sind als wichtigster Bestandteil von vielen automatischen Prozessen in viele Automatisierungslösungen bereits integriert.

Alle relevanten Hersteller bieten Produkte zur Erfassung von Daten von Motoren und Motorsystemen mittels Sensoren und Berechnungsmodellen an, um diese „intelligent“ zu machen. Diese Sensoren erfassen Daten und leiten diese weiter. Dies kann bereits innerhalb des Systems zu Erhöhung der Effizienz, aber auch auf Ebene des Unternehmens zu Transparenz hinsichtlich der größten Energieverbraucher und ihrem derzeitigen Effizienzniveau führen. Frequenzumrichter stellen in diesem Zusammenhang eine zentrale Schnittstelle zwischen Datenerfassung und Steuerung dar. Mittels Übertragung und Darstellung der Daten vor Ort oder in der Cloud können diese Daten dann auch hinsichtlich Auffälligkeiten und Optimierungsmöglichkeiten manuell oder mittels Algorithmen analysiert und mit „digital twins“ der jeweiligen Anlage oder des jeweiligen Motors verglichen werden.

Energiedatenerfassungssysteme können einen wesentlichen Beitrag leisten, die Daten der einzelnen Maschinen und Anlagen auf Unternehmensebene sichtbar und vergleichbar zu machen. Dadurch können die wichtigsten Energieverbraucher permanent überwacht und der Energieverbrauch über das gesamte Werk verfolgt werden.

Während von Hard- und Softwareseite bereits eine lückenlose Erfassung von Energiedaten von Komponenten bis Unternehmensebene (MES-Systeme) möglich ist, würde der nächste Schritt die (automatisierte) Steuerung der Anlage auf Basis dieser Analyse umfassen. Dazu könnten alle relevanten Daten (z.B. Auftragslage, Betriebsstatus, Produktqualität und -menge, Umweltbedingungen) in Echtzeit-Auflösung genutzt werden, um die Maschinen im optimalen Betriebszustand zu betreiben.

10 Literatur

- [1] Statistik Austria: Nutzenergieanalyse 2018
- [2] Brunner, C.,U., Werle, R.: Topmotors Market Report 2018, Impact Energy im Auftrag von Bundesamt für Energie (BFE), Bern, 2018
- [3] VDI ZRE (Zentrum für Ressourceneffizienz): Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0, Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes, 2017
- [4] Obermair, R.: Industrie 4.0 als unternehmerische Gestaltungsaufgabe: Strategische und operative Handlungsfelder für Industriebetriebe, Springer Verlag, 2016
- [5] Rogers, E.: The Energy Saving Potential of Smart Manufacturing, American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE), 2014
- [6] Rogers, E., Junga, E.: Intelligent Efficiency Technology and Market Assessment, American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE), 2017
- [7] Smart Manufacturing Leadership Coalition (SMLC), Implementing 21st Century Smart Manufacturing. Workshop Summary Report, University of California, Los Angeles, 2011
- [8] Reger, J., Kosch, B.: Energieaspekte der Informationstechnologie, in Matzen, F.J., Tesch, R (Hrsg.) Industrielle Energiestrategie, Springer, 2017
- [9] Test Motors: Smart Motor Sensor (SMS), The condition of all your electric motors at your displays anytime, anywhere (o.J.), unter <http://www.testmotors.com/en/smart-motor-sensor/> (Zugriff: 28.01.2019)
- [10] Siemens: Simotics IQ, Halten Sie Ihre Motoren fit - mit SIMOTICS IQ, unter <https://www.youtube.com/watch?v=1solobPLCsQ> 29.11.2017 (Zugriff: 28.01.2019)
- [11] ABB: ABB Ability™ Smart Sensor for motors, unter <https://new.abb.com/motors-generators/service/advanced-services/smart-sensor/smart-sensor-for-motors> (Zugriff: 28.01.2019)
- [12] Siemens: Pump Cleaning in der Wasserwirtschaft, unter <https://www.siemens.com/global/de/home/produkte/automatisierung/industrielle-schalttechnik/simocode.html> (Zugriff: 28.01.2019)
- [13] Hanigovszki, N.: Industry 4.0, Condition monitoring & smart sensors, presentation at the Motor Summit 2018 International, Zurich, Switzerland, 15.11.2018
- [14] Yaskawa: i³-Mechatronics, unter <https://www.yaskawa-global.com/product/i3-mechatronics> (Zugriff: 28.01.2019)
- [15] Schneider Electric: Altivar Machine ATV 320, Setzen Sie neue Maßstäbe bei der Maschinenleistung, unter <https://www.tecworld.com/wp-content/uploads/frequenzumrichter-altivar-320-produktpraesentation.pdf>, (Zugriff: 28.01.2019)
- [16] Schneider Electric: Altivar Prozess ATV 600, Mehr als nur ein Antrieb, Michael Krammer, TL PAE 2018
- [17] Schneider Electric: Altivar, new generation of drives, Ramazan Tuncer, Tbilisi 2018
- [18] Wilo CS: Wilo Stratos MAXO, product in application, unter <https://www.youtube.com/watch?v=2wPxSVsu2IE>, 12.04.2017 (Zugriff: 28.01.2019)
- [19] Wilo: Experteninterview und Email-Korrespondenz, Gerhard Rauch, 15.10.2018
- [20] KAESER Kompressoren: Verbund Steuerung: Sigma Air Manager 4.0, unter <https://www.kaeser.de/produkte/steuerung/verbundsteuerung/> (Zugriff: 28.01.2019)
- [21] Atlas Copco: Atlas Copco Schraubenkompressoren mit Öl einspritzung, https://www.gross-gmbh.eu/fileadmin/dokumente/pdf/Baureihe_GA_30_-90_GA_30-90_VSD__30-90_kW.pdf (Zugriff: 28.01.2019)
- [22] KAESER Kompressoren: Industrie 4.0 - die Zukunft hat begonnen, http://www.kaeser.at/Products_and_Solutions/industrie-4-0/default.asp (Zugriff: 28.01.2019)
- [23] KAESER Kompressoren: KAESER SIGMA NETWORK, unter <http://de.kaeserkompressoren.ch/m/produkte/steuerungen/SIGMA-AIR-MANAGER-4-0/sigma-air-manager-4-0-network.asp> (Zugriff: 28.01.2019)

- [24] Kulterer, K.: Integration von Produktions- und Energiedaten, **klimaaktiv** energieeffiziente betriebe, Wien 2019
Download unter: https://www.klimaaktiv.at/energiesparen/betriebe_prozesse/Energie--und-Produktionsmanagement.html
- [25] International Federation of Robotics: Robot density rises globally, Frankfurt, 2018
- [26] WKO Statistik: <http://wko.at/statistik/jahrbuch/sach-beschaeftigte-2016.pdf> (Zugriff: 28.01.2019)
- [27] Brunner, C.: Topmotors Studie: Potentialuntersuchung Rotierende Maschinen und Transportanlagen, 2015, Zürich
- [28] Statistik Austria: Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen, 1995-2017, Hauptergebnisse