

# Industrie 4.0 – Lösungen für effiziente Motorsysteme

---

Bericht

---

Verfasser: Konstantin Kulterer

---

Auftraggeber: Bericht im Rahmen der IEA-Forschungskooperationen

---

Datum: Wien, Juni 2019

---

---

**IEA** FORSCHUNGS  
KOOPERATION

 **Bundesministerium**  
Verkehr, Innovation  
und Technologie

#### IMPRESSUM

Herausgeberin: Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency, Mariahilfer Straße 136, A-1150 Wien,  
T. +43 (1) 586 15 24, Fax DW 340, office@energyagency.at | www.energyagency.at

Für den Inhalt verantwortlich: DI Peter Traupmann | Gesamtleitung: Konstantin Kulterer

Lektorat: Mag. Bao An Phan Quoc, BA

Herstellerin: Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency | Verlagsort und Herstellungsort: Wien  
Nachdruck nur auszugsweise und mit genauer Quellenangabe gestattet. Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier.

Die Österreichische Energieagentur hat die Inhalte der vorliegenden Publikation mit größter Sorgfalt recherchiert und dokumentiert. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte können wir jedoch keine Gewähr übernehmen.

# 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 (Arbeiter, Maschinen, Werkstücke, 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 Forschungsk Kooperationen des bmvit (Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie), als Leiter des Tasks „New Industrial Developments“ des Annex Elektrische Motorsysteme (EMSA) Effekte von Industrie 4.0 auf den Elektromotorenmarkt.

Dieser Bericht 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. Abschließend enthält der Bericht eine Zusammenstellung der Anforderungen für Elektromotoren, die mit Industrie 4.0 verbunden sind.

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 zahlreiche 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. Als wesentliche Anforderungen an die Entwicklung von Elektromotoren wurden bisher folgende Aspekte erfasst: Informationserfassung über Sensoren, Konnektivität über unterschiedliche Bussysteme, Darstellungsmöglichkeiten der erfassten Daten vor Ort und zentral, automatisierte Auswertungsmöglichkeiten, Aspekte der Mensch-Maschinenkollaboration und kostengünstiger, effizienter Technologieeinsatz.

# Abstract

Motor systems are responsible for 70% of the electricity consumption in industry according to Statistics Austria. They comprise among others pumps, fans, cooling, and compressed air systems.

The comprehensive digitalization of production will enable all production-relevant factors (workers, machinery, workpieces, plants, etc.) to be actively involved in the production process and to communicate with one another via intelligent networks. On the one hand, intelligent networking of consumers and producers has a decreasing effect on the energy consumption of motor-driven systems, on the other hand, expanding automation has an increasing effect on energy consumption.

The Austrian Energy Agency, financed by the IEA Research Cooperation programme of bmvit – Federal Ministry for Transport, Innovation and Technology, is investigating the effects of Industry 4.0 on the electric motor market as task leader of the "New Industrial Developments" task of the Annex Electric Motor Systems (ESMA).

This report highlights the key elements of Industry 4.0 and their potential impact on energy consumption, summarizes Industry 4.0's savings effects revealed by several studies, and lists a number of Industry 4.0 application examples and products in different motor-driven systems. In addition, options for energy management in the layers of the automation pyramid are presented. The report also contains a summary of the requirements for electric motors associated with Industry 4.0.

Electric motors provide a broad field for applying technologies associated with Industry 4.0, and are already integrated into many automation solutions as the most important component of many automated processes.

All relevant manufacturers offer products for capturing data from electric motors and motor systems using sensors and calculation models to make them "intelligent". These sensors collect data and pass it on. This can already lead to transparency within the system for increasing efficiency, but also at the level of the company with regard to the largest energy consumers and their current level of efficiency. In this context, frequency converters represent a central interface between data acquisition and control.

By means of transmission and representation of the data on site or in the cloud, these data can then also be analyzed manually or through algorithms with regard to abnormalities and optimization possibilities and compared with "digital twins" of the respective system or of the respective motor. The following aspects have been recorded as essential requirements for the development of electric motors: information acquisition via sensors, connectivity via different bus systems, display possibilities of the recorded data locally and centrally, automated evaluation possibilities, aspects of human-machine collaboration and cost-effective, efficient technology use.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>7</b>
1.1	Annex Elektrische Motorsysteme	7
1.2	Das Ziel des Tasks „Monitoring and Assessing New Industrial Developments“	7
1.3	Methode	7
1.4	Hintergrund	8
<b>2</b>	<b>INDUSTRIE 4.0: DEFINITION, ANWENDUNGSBEREICHE</b>	<b>10</b>
2.1	Definition und Technologiebereiche von Industrie 4.0	10
2.2	Vorteile/Möglichkeiten von Industrie 4.0	12
2.3	Marktdurchdringung Industrie 4.0	14
2.4	Häufigste Nutzung, Treiber und Barrieren	15
<b>3</b>	<b>INDUSTRIE 4.0 UND ENERGIEEFFIZIENZ</b>	<b>16</b>
3.1	Grobanalyse von Energie-Einspareffekten von Industrie 4.0	19
<b>4</b>	<b>INDUSTRIE-4.0-LÖSUNGEN FÜR ELEKTROMOTOREN</b>	<b>21</b>
4.1	Smartboxen für Elektromotoren	21
4.2	Daten für Motoren mit fixer Drehzahl	22
4.3	Frequenzumrichter als lokaler Datensammelpunkt	23
4.4	Intelligente Pumpen und Ventilatoren	25
4.5	Industrie 4.0 und Druckluftanlagen	26
<b>5</b>	<b>MÖGLICHKEITEN ZUM ENERGIEMANAGEMENT IN DEN SCHICHTEN DER AUTOMATISIERUNGSPYRAMIDE</b>	<b>28</b>
<b>6</b>	<b>INDUSTRIE-4.0-ANFORDERUNGEN AN DIE ENTWICKLUNG VON E-MOTOREN</b>	<b>31</b>
6.1	Ausstattung mit Sensoren	31
6.2	Steuerungsmöglichkeiten	31
6.3	Konnektivität	31
6.4	Algorithmenentwicklung/Virtualisierung	32
6.5	Cloud Computing	32
6.6	Condition Monitoring	32
6.7	Maschinensicherheit /Worker Collaboration	33
6.8	Neue Technologieaspekte	33
6.9	Innovative Motorsteuerungsmechanismen	34
6.10	Energieaspekte der Robotertechnik	34
<b>7</b>	<b>LITERATUR</b>	<b>35</b>
<b>8</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>38</b>
<b>9</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>	<b>39</b>



# 1 Einleitung

Dieser Bericht wurde von der Österreichischen Energieagentur als Leiterin des Tasks „New Industrial Developments“ des Annex Elektrische Motorsysteme (EMSA) des IEA „Technology Collaboration Programme on Energy Efficient End-use Equipment (4E)“ erstellt. Er zeigt die Ergebnisse der Analyse der Effekte von Industrie 4.0 auf den Elektromotorenmarkt.

## 1.1 Annex Elektrische Motorsysteme

Kernthema des 4E Technology Co-operation Programme ist die Energieeffizienz von energieverbrauchenden Geräten. Politische Entscheidungsträger und Industrievertreter sollen noch mehr für das Thema Energiesparen sensibilisiert werden. Innerhalb 4E erfüllt der Annex Elektrische Motorsysteme (EMSA) 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 neuer Motortechnologien aufzubereiten und zu diskutieren. Die österreichische Beteiligung daran wird über das Programm IEA Forschungsk Kooperationen des bmvit finanziert.

## 1.2 Das Ziel des Tasks „Monitoring and Assessing New Industrial Developments“

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.

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 bewirkt eine intelligente Vernetzung der Verbraucher und Erzeuger eine Verringerung des Energieverbrauchs von Motorsystemen, andererseits hat die zunehmende Automatisierung einen steigenden Effekt auf den Energieverbrauch.

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

## 1.3 Methode

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
- Organisation 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?
- Welche Anforderungen könnten für Elektromotoren mit Industrie 4.0 verbunden sein?

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

Dieser Bericht 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. Weiter enthält der Bericht eine Zusammenstellung der Anforderungen für Elektromotoren, die mit Industrie 4.0 verbunden sind.

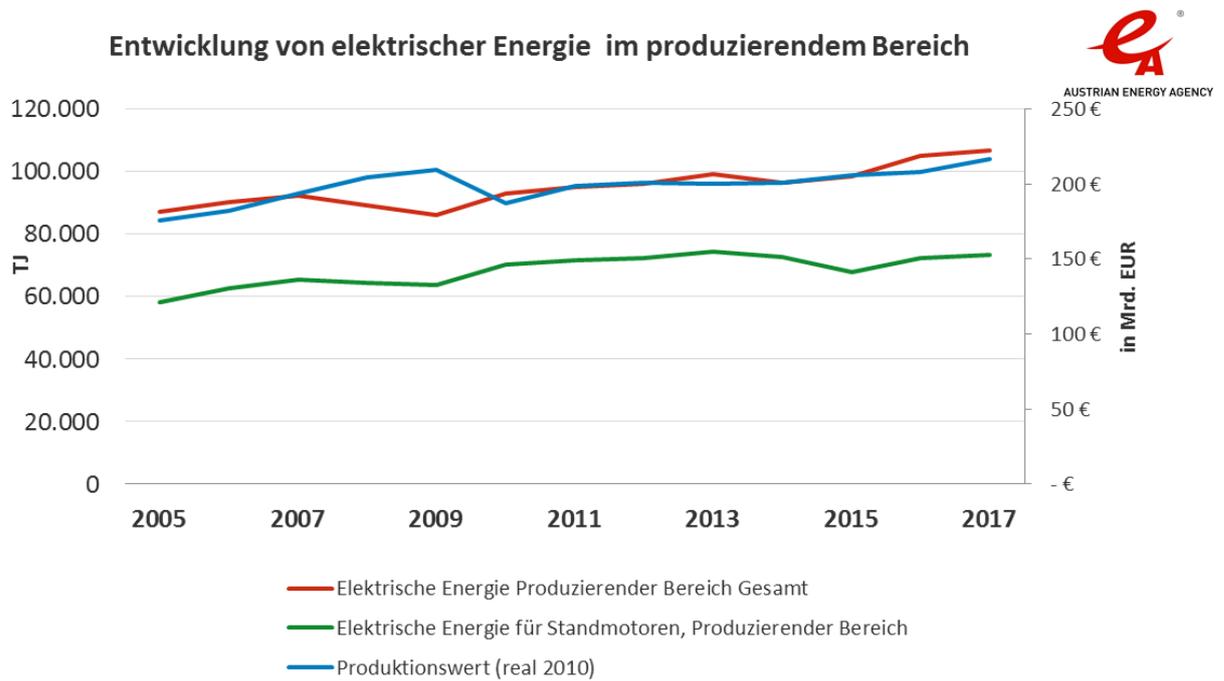
### 1.4 Hintergrund

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 %) (Statistik Austria, 2018a, eigene Berechnung). Der Produktionswert verzeichnete in diesen Zeiträumen einen Anstieg um 12 % bzw. 4 % (Statistik Austria, 2018b).

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 größten Teil aus (Statistik Austria, 2018a, 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 0,75 kW machen hingegen mit 59,7 % der Verkaufszahlen einen Anteil am Stromverbrauch von 5,3 % aus (Brunner, Werle, 2018).

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.



Quelle: Statistik Austria | Berechnungen: Österreichische Energieagentur

Abbildung 1: Entwicklung des Stromverbrauchs im Sektor Produktion in Österreich in den Jahren 2005 bis 2017 (Statistik Austria, 2018)

## 2 Industrie 4.0: Definition, Anwendungsbereiche

Dieses Kapitel enthält zunächst Definitionen und einen Überblick der wichtigsten Elemente von Industrie 4.0 und „Smart Manufacturing“, weiters werden Anwendungsmöglichkeiten, Marktdurchdringung, Treiber und Barrieren von Industrie 4.0 angeführt.

### 2.1 Definition und Technologiebereiche von Industrie 4.0

Als in diesem Zusammenhang relevante Definitionen von Industrie 4.0 wurden folgende identifiziert:

„Industrie 4.0 bezeichnet die intelligente Vernetzung von Maschinen und Abläufen in der Industrie mit Hilfe von Informations- und Kommunikationstechnologie“ (Deutsches Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2019).

„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“ (VDI ZRE, 2017, S. 17).

„Im industriellen Kontext bezeichnet der Begriff Industrie 4.0 die Verbindung der digitalen Welt des Internets mit den konventionellen Prozessen und Diensten der produzierenden Wirtschaft. Es handelt sich dabei um die horizontale und vertikale Vernetzung entlang der Wertschöpfungskette mit Verlagerung der Steuerung von oben nach unten“ (BMW, 2015).

„Industrie 4.0‘ beschreibt eine Form industrieller Wertschöpfung, die durch Digitalisierung, Automatisierung sowie Vernetzung aller an der Wertschöpfung beteiligter Akteure charakterisiert ist und auf Prozesse, Produkte und Geschäftsmodelle von Industriebetrieben einwirkt“ (Obermair, 2016, S. 8).

Als zentrale Treiber oder Industrie-4.0-Charakteristika bezeichnet Obermair also die Bereiche:

- Automatisierung
- Digitalisierung
- Vernetzung aller an der Wertschöpfung beteiligten Akteure

Ähnliche technologische Megatrends identifiziert das World Economic Forum (2019):

- Konnektivität: schafft Verbindung zwischen diskreten Netzwerkknoten und erhöht so die Sichtbarkeit
- Künstliche Intelligenz: ermöglicht automatisiertes Erkennen von Ereignissen und bildet die Grundlage für Entscheidungsfindung
- Flexible Automation, beinhaltet Response-Mechanismen, Automatisierung und Remote-Bewegung

Im englischen Sprachraum wird statt Industrie 4.0 der Begriff „Smart Manufacturing“ verwendet, der teilweise auch noch weiter gefasst wird:

„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“ (Rogers, 2014, S. 3).

Zur Abgrenzung von heutiger Automatisierung zu „Smart Manufacturing“ werden bei Rogers und Junga (2017, S. 24) 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)“

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 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“ (Rogers, 2014).

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 (Obermair, 2016).

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 (Obermair, 2016, S. 13)

## 2.2 Vorteile/Möglichkeiten von Industrie 4.0

Generell können folgende Ziele von Industrie 4.0 zusammengefasst werden:

- Ressourcenproduktivität und -effizienz
- Wendigkeit und Reaktionsfähigkeit
- Wertsteigernde Dienstleistungen und Business Model Innovation
- Geschwindigkeit der Markteinführung
- Anpassungsfähigkeit an Kundenanforderung (World Economic Forum, 2019)

Laut den Ergebnissen der Befragung „Industrie 4.0 im österreichischen Mittelstand“ von Ernst & Young (2018) sind folgende Ziele bei Investitionen in digitale Technologie die wichtigsten:

- Flexiblere Reaktion auf die sich verändernden Anforderungen (65 %)
- Schnellere Anpassung an Nachfrageschwankungen (39 %)
- Erweiterung des Produktportfolios (37 %)
- Senkung der Produktionskosten/Effizienzsteigerung (36 %)
- Größere räumliche Nähe zum Kunden/Produktion vor Ort (35 %)
- Individualisierung/Personalisierung der Produktion (21 %)

Die Studie „Industrie 4.0 – Deutscher Industrie 4.0 Index 2018“ der Staufen AG (2018) erwähnt folgende Motive für Industrie 4.0-/Digitalisierungsmaßnahmen in Unternehmen, die sich bereits mit Industrie 4.0 beschäftigen:

- Steigerung der internen Effizienz (80 %)
- Transparenz in den Abläufen, z. B. in der Produktion (71 %)
- Kostensenkungen (54 %)
- Wettbewerbsvorsprung durch moderne Produkte (48 %)
- Stärkung der Schnittstelle zum Kunden (44 %)
- Umsatzsteigerung durch neue Geschäftsmodelle (39 %)
- Umsatzsteigerung durch zusätzliche Services, z. B. Predictive Maintenance (38 %)
- Möglichkeiten zur wirtschaftlichen individualisierten Fertigung (Losgröße 1) (37 %)

Zu beachten ist: „Jeweils für sich genommen, sagt die Verfügbarkeit dieser Technologien noch nichts über deren betriebswirtschaftlichen Nutzen aus. Erst die explizite Nutzbarmachung im Rahmen der betrieblichen Leistungserstellung eröffnet Potenziale für Steigerung von Produktivität und Wirtschaftlichkeit des Industriebetriebs“ (Obermair, 2017, S 15).

Die Nutzung von Technologien aus dem Bereich Industrie 4.0 ergeben für Unternehmen zahlreiche Möglichkeiten. Folgende Tabelle fasst einige Beispiele zusammen.

Tabelle 1: Vorteile der Nutzung von Industrie-4.0-Technologien

Vorteile	Beschreibung
Flexible Produktion	Digital vernetzt können mehrere Unternehmen, die in die Entstehung eines Produkts eingebunden sind, besser abgestimmt und die Auslastung der Maschinen in den unterschiedlichen Unternehmen besser geplant werden.

Vorteile	Beschreibung
Wandelbare Fabrik	Der modulare Aufbau von Produktionsstraßen wird in Zukunft raschen Umbau ermöglichen und damit die Herstellung von individualisierten Produkten in kleiner Stückzahl.
Kundenzentrierte Lösungen	Die Kunden können selbst Produkte nach ihren Wünschen mitgestalten. Durch Übertragung und Auswertung von Daten zur Nutzung von smarten Produkten kann der Produzent seine Produkte verbessern und dem Kunden neuartige Services bieten.
Optimierte Logistik	Algorithmen berechnen ideale Lieferwege, Maschinen melden selbstständig, wenn sie neues Material benötigen, und ermöglichen optimalen Warenfluss.
Einsatz von Daten	<p>Prozessdaten und Zustandsdaten des Produkts können gesammelt und ausgewertet werden, um eine effizientere Herstellung zu gewährleisten.</p> <p>Durch Auswertung des Zustands von Maschinen und Anlagen über Sensoren und Datenübertragung können neue Dienstleistungen, wie z. B. vorausschauende Wartung, angeboten werden.</p>
Ressourcenschonende Kreislaufwirtschaft	Produkte können über ihren vollständigen Lebenszyklus betrachtet werden. Im Design kann festgelegt werden, in welcher Form die Materialien wiederverwertet werden können.

Quelle: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2019

Die Auswirkungen von Industrie 4.0 auf die unterschiedlichen Unternehmensbereiche können auch hinsichtlich der jeweiligen Produktionsfaktoren analysiert werden. Untenstehende Tabelle gibt dazu eine Zusammenfassung.

Tabelle 2: Auswirkungen von Industrie 4.0 auf die jeweiligen Produktionsfaktoren

Produktionsfaktoren	Auswirkungen Industrie 4.0 auf das Produktivsystem
<p>Betriebsmittel:</p> <p>Automatisierung und Robotik, additive Fertigungstechnologie (3-D-Druck), Sensorik, Aktorik</p> <p>Eingebettete Systeme, Software und Systemtechnik (Simulation, Big Data Analytics, Cloud Services), Vernetzung (Internet- und Kommunikationstechnologie), Internet of Things</p>	<p>Betriebsmittel werden über eingebettete Systeme intelligenter, indem sie Fähigkeiten wie Condition Monitoring und teilweise Selbststeuerung entwickeln.</p>
<p>Mensch-Maschine-Interaktion:</p> <p>Intuitive Bedienelemente, kontextbasierte Informationsdarstellung, Sprach-, Gegensteuerung</p> <p>Augmented-Reality-Systeme</p>	<p>Können weitergehende Automatisierung bereitstellen, im Bedarfsfall Mitarbeiter einschalten; Mitarbeiter durch automatisierte Routinen entlasten.</p> <p>Assistenzsysteme unterstützen Menschen bei Tätigkeiten, ermöglichen damit effiziente Arbeits- und Produktionsprozesse.</p>

Produktionsfaktoren	Auswirkungen Industrie 4.0 auf das Produktivsystem
<p>Werkstoffe:</p> <p>Sender-Empfänger-Systeme (RFID – Radio-Frequency Identification)</p> <p>CPS: dezentrale, intelligente Vernetzung aller an der Wertschöpfung beteiligten Akteure</p>	<p>Enthalten Lage, Informationen über ihre Eigenschaften und erforderliche Arbeitsschritte (Arbeitspläne).</p> <p>Können effizient transportiert, gelagert, be- oder verarbeitet bzw. montiert werden.</p>
<p>Dispositiver Faktor:</p> <p>Datenerfassung und -verarbeitung in Echtzeit, horizontale, vertikale Vernetzung</p>	<p>Im Rahmen der Einführung von integrierten Softwaresystemen für die Produktionsplanung und -steuerung und dem Product Lifecycle Management wird vertikale Integration realisiert, die dann mittels Supply Chain Management zu horizontalen Vernetzungen mit Kunden und Lieferanten über Unternehmensgrenzen hinweg erweitert werden kann.</p>

Quelle: Obermair, 2017

## 2.3 Marktdurchdringung Industrie 4.0

Laut Ernst & Young (2018) produzieren 60 % der mittelständischen Industrieunternehmen in Österreich zumindest teilweise digital gesteuert (zum Vergleich: in Deutschland sind es erst 54 %). Davon geben 7 % der befragten Unternehmen an, dass die Produktion bereits weitgehend oder vollständig digital vernetzt ist, in 16 % der Unternehmen ist sie teilweise vernetzt. Weitere 37 % sagen, dass Teile der Produktion digital gesteuert werden. Umgekehrt erklären 24 % Prozent der Unternehmen, gar nicht über digital vernetzte Fertigung zu verfügen und es auch nicht planen. Diese Aussagen basieren auf der Befragung von 250 Industrieunternehmen in Österreich im Dezember 2017.

In Deutschland verfolgen 43 % der Unternehmen operative Einzelprojekte in Sachen Industrie 4.0, 9 % haben Industrie 4.0 bereits umfassend eingesetzt. Ein Fünftel der Unternehmen im Sektor Automobilindustrie implementiert bereits durchgängige Industrie-4.0-Ansätze. Ein Grund liegt in der Ausrichtung auf individuelle Kundenanforderung. Als Quelle dient dazu die Befragung von 450 Industrieunternehmen in Deutschland (Staufen AG, 2018).

Laut einer Studie von Capgemini, durchgeführt bei 1.000 leitenden Angestellten weltweit, gaben 43 % der Unternehmen an, eine Initiative zur Einführung von Industrie 4.0 bereits operativ umzusetzen. Deutschland liegt hier im Vergleich bei 46 %, die USA bei 54 % (Capgemini, 2017).

Diese Studie unterscheidet zwischen zwei Dimensionen des digitalen Reifegrades:

- Digitale Intensität, oder wie weit Prozesse bereits digitalisiert sind
- Transformationsmanagement, oder wie gut die Transformation gesteuert wird, inkl. Unternehmensvision und -führung und Ausbildungsstand der Mitarbeiter

Nur 6 % der Unternehmen weltweit dürfen sich demnach als „Digital Masters“ bezeichnen, die auf beiden Dimensionen hohe Punktezahlen erreichen. Insbesondere die Branche „Industrielle Fertigung“ hat mit 14 % einen sehr hohen Anteil an Digital Masters (Capgemini, 2017).

## 2.4 Häufigste Nutzung, Treiber und Barrieren

Laut einer Befragung von Ernst & Young (2018) erfolgt die Nutzung digitaler Technologien in Österreich vorwiegend in den Bereichen:

- Automatisierung von Produktionsprozessen (86 %)
- Flexible Produktion (im Gegensatz zu starrer Serienproduktion) (57 %)
- Robot Process Automation (RPA) (22 %)
- 3-D-Druck (17 %)
- Künstliche Intelligenz (7 %)

Als Treiber und Barrieren bei der Umsetzung von Industrie 4.0 spielen unterschiedliche Faktoren eine Rolle. Die wichtigsten sind in folgender Tabelle enthalten:

Tabelle 3: Treiber und Barrieren bei der Umsetzung von Industrie 4.0 (gereiht nach Prozentsatz)

Treiber	Barrieren
Gezielter Know-how-Aufbau (61 %)	Fehlende Kapazitäten (68 %)
Strukturiertes Vorgehen mit klaren Prozessen (59 %)	Leistungsschwache IT-Infrastruktur (46 %)
Hohe Akzeptanz bei den Mitarbeitern (36 %)	Fehlendes Know-how (38 %)
Moderne Führungsmethoden (29 %)	Unstrukturiertes Vorgehen mit mangelhaften Prozessen (35 %)
Zusätzliche Kapazitäten aufgebaut (28 %)	Veraltete Führungsmethoden (30 %)
Leistungsstarke IT-Infrastruktur (26 %)	Fehlende Akzeptanz bei den Mitarbeitern (27 %)

Quelle: Staufen, 2018, S. 21, 23

Der wichtigste Erfolgsfaktor ist nach dieser Studie der gezielte Aufbau von Kompetenzen. Ein strukturiertes Vorgehen mit klaren Prozessen ist eine gute Voraussetzung zur Umsetzung von Industrie 4.0. In nur rund einem Drittel der Unternehmen zeigen die Mitarbeiter eine hohe Akzeptanz gegenüber der digitalen Transformation. Hier wäre es an den Führungskräften diese Akzeptanz zu erhöhen, doch auch diese haben an sich zu arbeiten: nur ein Drittel der Unternehmen weist zeitgemäße Führungsmethoden auf. 28 Prozent der Unternehmen haben zusätzliche Kapazitäten aufgebaut, 26 Prozent führen ihren Erfolg auf eine leistungsstarke IT-Infrastruktur zurück.

Diejenigen Unternehmen, die bisher bei der Einführung von Industrie 4.0 Technologien noch nicht so erfolgreich waren, führen dies auf fehlende Kapazitäten zurück. Fast die Hälfte der Unternehmen fehlt es damit auch an einer leistungsstarken IT-Infrastruktur und entsprechendem Know-how. Weiters bestehen organisatorische Hemmnisse in der Bewältigung von komplexen Digitalisierungsprozessen. Bei einem Drittel der Unternehmen führen auch veraltete Führungsmethoden zu fehlender Akzeptanz der Mitarbeiter (Staufen, 2018).

### 3 Industrie 4.0 und Energieeffizienz

Folgende technologische Entwicklungen werden dem Thema „Intelligent Efficiency“ (Rogers, Jung, 2017, S. 24) zugeordnet:

- „Connected devices
- Integrated manufacturing process
- Energy management
- Demand response“

„Smart manufacturing is different than automation [...] it builds on automation, [...] is more than just the next iteration of process automation and resource management. Smart manufacturing simplifies the decision as to when to turn a piece of equipment on or off by closing the gaps in connectivity that currently exist between devices, systems, facilities, and people. It provides the ability to run a process, production line, facility, and even an entire company more efficiently through more informed decision making“ (Rogers, 2014, S. 4).

Berger (2016) ermittelt die Ausgangslage von Unternehmen in den sog. Green-Tech-Leitmärkten: Energieerzeugung, -speicherung, -verteilung, Energieeffizienz, Rohstoff- und Materialeffizienz, nachhaltige Mobilität, Kreislaufwirtschaft und Wasserwirtschaft für Industrie 4.0. Anhand einer qualitativen Einschätzung von vier Kriterien (Gründungsaktivitäten, Anwendung digitaler Technologien, Vorhandensein von digitalen Systemen und Innovationsdynamik) errechnet die Studie den digitalen Readiness-Grad auf einer Skala bis 100 %. Energieeffizienz erreicht die höchste Bewertung aller Leitmärkte aufgrund vieler Neugründungen mit einem breiten Angebot innovativer digitaler Dienstleistungen und das Vorhandensein digitaler Systeme. Insbesondere die Hebel digitale Nutzerschnittstelle und Vernetzung haben eine hohe Relevanz für die weitere Digitalisierung. Automatisierung und digitale Daten werden mit mittlerer Relevanz bewertet.

Die VDI-Studie 2017 definierte eine Liste von elf Maßnahmen der digitalen Transformation und beschreibt Beispiele und Auswirkungen auf Energie- und Ressourcenverbrauch. Tabelle 4 fasst die Beschreibung dieser Maßnahmen zusammen.

Tabelle 4: Elf Maßnahmen der digitalen Transformation, Beschreibung und Beispiele

Maßnahmentitel	Beschreibung, Beispiele für Anwendungen
Vernetzung von Sensoren und Aktoren	Digitale Anbindung von Sensoren und Aktoren, um die Daten über längeren Zeitraum zu überwachen und aufzuzeichnen  Beispielsweise können automatische gesteuerte Aktoren zukünftig Druckluftleitungsbereiche schließen, wenn Ultraschall-Sensoren Leckagen aufspüren und melden. Fertigungsaufträge können mittels CAD-Dateien automatisch an Schneidemaschinen durch Kunden direkt an die jeweilige Maschine übermittelt werden, die über die vorhandene Sensorik und Aktorik justiert wird.
Einsatz digitaler Objektgedächtnisse	Physische Objekte der Produktion, wie Produkte, Maschinen und Feldgeräte, werden mit digitalem Objektgedächtnis ausgestattet (z. B. Produktionsdaten am Produkt) und liegen direkt an Maschine oder Produkt vor, dadurch direkte Zuordnung relevanter Produktionsdaten zum Ressourcenverbrauch des jeweiligen Bauteils. Kontinuierliche Überwachung lässt Abweichungen vom Regelbetrieb erkennen. Durch optimierte

Maßnahmentitel	Beschreibung, Beispiele für Anwendungen
	Werkzeugstandzeiten auf Basis Einzel-Werkzeug-Historien kann Energie eingespart werden.
Dezentrale Steuerung	Intelligentes Werkstück ist ein Baustein im dezentral gesteuerten Fertigungs- und Wertschöpfungsnetzwerk. Es kennt seine Eigenschaften und hält Informationen bereit, wie es gefertigt werden kann. Es kann damit den eigenen Produktionsprozess steuern. Unternehmen mit dezentralem Ansatz können Steuerungsparameter hinsichtlich der Ressourceneffizienz optimieren, z. B. kurze Produktionswege, hohe Maschinenauslastung und automatische Abschaltung von Anlagenteilen. Bei dezentraler Steuerung reduzieren sich die Abhängigkeiten einzelner Produktionsschritte. Jede Komponente kommuniziert mit anderen Komponenten ohne zentrale Steuerung: So werden Störungen vermieden, Fehler erkannt und Optimierungspotenziale erkannt (Beispiel: papierlose Produktionslinie).
Maßnahmen zur Werkerunterstützung und Assistenz	Assistenzsysteme können Werker (unter Zuhilfenahme mobiler Endgeräte) bei vielfältigen Aufgaben in der Fertigung und Montage unterstützen. In den Arbeitsprozess integrierte Systeme (Pick-by-Light, Laservorgaben) nutzen optimale Materialausnutzung bei Stanz- und Schnittprozessen. Softwaresysteme sprechen auf Basis der vernetzten Infrastruktur und der Auswertung der verfügbaren Sensorik Empfehlungen zur Gestaltung des Produktionsprozesses aus. Fehlproduktion und Ausschuss werden reduziert. Außerdem können Anlagen besser ausgenutzt und effizienter gewartet und instand gehalten werden.
Dynamisch kooperierende Systeme und Modularisierung	Durch modular gekapselte Funktionalität können Fertigungsanlagen leicht um neue oder veränderte Anlagenteile ergänzt werden. Dadurch können mehrere Produktvarianten hergestellt werden. Es können Anlagen und Anlagenteile bei Nichtnutzung abgeschaltet werden, daraus ergibt sich bessere Auslastung von Anlagen und Anlagenteile.
Einführung und Verwendung von Ortungs- und Lokalisierungssystemen	Mit Hilfe von Ortungs- und Lokalisierungssystemen sind Maschinen und Anlagenteile in einer Produktionsstätte leichter lokalisiert und in den Fertigungsauftrag integriert. Sie steigern die Transparenz des Transportflusses und vermeiden unnötige Transporte. Maschinen, Werkstückträger und Transportsysteme können sich selbst lokalisieren, autonom navigieren und untereinander kooperieren.
Zustandsüberwachung	Verschiedene Betriebszustände von Anlagen und Prozessen werden auf Basis erfasster Daten und mithilfe geeigneter Softwarelösungen kontinuierlich analysiert sowie Abweichungen markiert und gemeldet. Unerwartete Systemausfälle sollen durch die konstante Überwachung und Analyse vermieden werden. Fehleinstellungen, Fehlnutzungen und Fehlbedienung durch den Werker oder Maschinenführer werden frühzeitig erkannt. Verschleißteile werden bis zur tatsächlichen Nutzungsgrenze eingesetzt, anstatt sie auszutauschen. Zustandsüberwachung verhindert Maschinenausfälle und Schadenslagen. Fehlproduktionen werden reduziert.
Prädiktive Wartung	Systeme der prädiktiven Wartung dienen der Überwachung und frühzeitigen Identifikation von Verschleiß und erhöhtem Ressourcenverbrauch und entdecken Maschinenfehler (z. B. Maschinenausfälle oder Störungen), bevor sie überhaupt auftreten. Fehler werden durch Instandhaltung oder frühzeitige Reparatur verhindert. Dadurch erreicht man Reduktion von Fehlproduktion und Ausschuss. Beispiel ist die Zustandsüberwachung der Bearbeitungszentren, die direkt von Lieferanten in Echtzeit ausgewertet werden.

Maßnahmentitel	Beschreibung, Beispiele für Anwendungen
Durchgängige Datenintegration	Die durchgängige Datenintegration und der einheitliche Zugriff auf Datenstrukturen ermöglichen die integrierte Betrachtung von Fertigung und Auftragsplanung. Durchgängige Datenintegration spart Energie ein.
Virtuelle Produktentwicklung	Bei der virtuellen Produktentwicklung wird ein digitales dreidimensionales Modell eines neuen Produktes im Computer entworfen. Das virtuelle Modell kann beliebig modifiziert, getestet und durch Simulationen optimiert werden.  Virtuelle Produktentwicklung benötigt im Vergleich zu subtraktiven Fertigungsprozessen bei Prototypenfertigung weniger Ressourcen. Kostengünstige physische Prototypen lassen sich auf Basis des Modells mittels neuer Fertigungsverfahren wie 3-D-Druck erzeugen.
Cloud Computing	Einzelne Arbeitsbereiche (z. B. Programme, Softwarepakete, Speicherplatz, Rechenkapazität) werden nicht mehr auf der Festplatte, sondern über das Internet oder lokale Netzwerke (Cloud) bereitgestellt. Die Verlagerung der Rechenleistung und Datenspeicherung von betriebsinternen Servern auf energieeffiziente externe Rechenzentren führt zu Energieeinsparungen. Der Zugriff zur Cloud ermöglicht Dienstleistern oder Herstellern, zentral ihre Anlagen zu überwachen, zu analysieren und zu optimieren.

Quelle: VDI, RZE 2017

Aufbauend auf dieser Tabelle in Kombination mit weiteren Quellen sind für wesentliche Technologiebereiche und Komponenten von Industrie 4.0 die Energieeffekte in untenstehender Tabelle aufgelistet.

Tabelle 5: Wesentliche Komponenten von Industrie 4.0 und deren Energieeffekte

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 und damit zur Energieoptimierung.
Robotik und Automatisierungstechnologien	Der Energieeffekt ist eher negativ, ist aber auch abhängig vom Roboter-Stand-by-Verbrauch und der Zeit, um die Prozesse zu beschleunigen 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 aller relevanten Daten (inkl. Energiedaten) Prozess- und Qualitätsverbesserungen zu erreichen. Dies beinhaltet auch verbesserte Methoden zur Evaluierung und Validierung.

Teilkomponenten von Industrie 4.0	Energieeffekte
Automatische Steuerung Onlineüberwachung	Die zeitliche Erfassung verfahrensrelevanter Daten in Echtzeit und deren Auswertung ermöglicht 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. Key Performance Indicators (KPIs) auf Benutzerdisplay.  Augmented Reality kann Wartungsprozesse erleichtern.
Digital Twin/Digitaler Schatten	Ein Abbild des Prozesses ermöglicht, eine echtzeitfähige Auswertungsbasis aller relevanten Daten zu erstellen, Auskunft über aktuelle Zustände zu geben und Prognosen zukünftiger Zustände durchzuführen. Außerdem ermöglichen Digital Twins, auch effizientere Prozesse und Teilkomponenten zu entwickeln, wodurch in weiterer Folge Energie gespart wird.
Verbindung von Produktions-, Umwelt- und Energiedaten	Betriebsinformationssystem speichert alle verfügbaren Daten (Energie-, Materialverbrauch), ermöglicht eine Auswertung über längere Zeiträume; Einsparungspotenziale werden erkannt.

Quelle: VDI ZRE, 2017; Obermair, 2016; Rogers, 2014; eigene Einschätzung

Energieeffekte in Industrie-4.0-Systemen umfassen folgende Möglichkeiten:

- Effiziente Komponente statt Standardprodukt
- Komponente arbeitet nur bei Bedarf zur Erfüllung der Anforderung (statt Ein-/Ausschaltung)
- Prozess arbeitet nur bei Bedarf – soweit zur Erfüllung des Produktionsziels erforderlich (statt Ein-/Ausschaltung)
- Einstellungen auf Basis von Erfahrungen aus vergangenem Betrieb statt „Best Guess Settings“
- Smart Design (statt konventionellem Design)
- Verbundene Systeme und Business Units statt isolierten Systemen (Rogers, 2014, S. 29)

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

### 3.1 Grobanalyse von Energie-Einspareffekten von Industrie 4.0

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

Laut Smart Manufacturing Leadership Coalition können Technologien im Kontext von Smart Manufacturing die Energieeffizienz um 25 % verbessern (SMLC, 2011).

Jene Unternehmen, die in der Studie „Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0“ untersucht wurden, ordneten die erzielte Verringerung des Energieverbrauchs (elektrische Energie) durch Maßnahmen der digitalen

Transformation überwiegend im Bereich bis 25 % ein (VDI ZRE, 2017, S. 144). Basierend auf den Erfahrungen bei Sensitec nimmt dieselbe Studie eine mögliche Einsparung an Strom durch eine Echtzeitsteuerung der Fertigungslinie zwischen 10 % und 20 % an (VDI ZRE, 2017, S. 141).

Der Einsatz von Big Data und Advanced Analytics kann zu einer 20- bis 25%igen Erhöhung des Produktionsvolumens und zu einer 45%igen Reduktion von Stillstandszeiten führen, was wiederum die Stand-by-Verluste minimiert und somit Energie für die Bedienung der Anlagen einspart (McKinsey Digital, 2015; VDI ZRE, 2017, S. 33).

Die Studie des World Economic Forums 2019 gibt eine Steigerung der Energieeffizienz für ausgewählte Anwendungsbeispiele von Industrie 4.0 von 2 bis 50 % an (World Economic Forum, 2019).

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 entfallen ca. 9,6 TWh auf die Industrie) (VDI ZRE, S. 14).

Global geht die Global e-Sustainability Initiative (GeSI) im Bericht „Smarter 2020“ davon aus, dass innerhalb der durch IT verursachten Emissionen als fortgeschrittener Technologie ein Emissionsminderungspotenzial bis 2020 von 9,1 Milliarden t erreichbar ist und das den Ausstoß von rund 1,3 Milliarden t, der auf IT selbst entfällt, um den Faktor 7,2 übertrifft (Reger, Kosch, 2017).

## 4 Industrie-4.0-Lösungen für Elektromotoren

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 zu zeigen. 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) (Obermair, 2016)

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

- Einer der ersten Schritte zu Industrie 4.0 besteht darin, 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 ist die Übertragung und Darstellung von Daten.
- Der dritte Schritt schließt die Analyse von Daten und evtl. bereits eine Ableitung von Maßnahmen ein. Auf dieser Ebene können bereits Dienstleistungen angeboten werden.
- Der vierte Schritt würde die automatisierte Steuerung der Anlage auf Basis dieser Analyse umfassen.

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, dazu siehe Kapitel 5).

### 4.1 Smartboxen 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, Klebstoff oder Schrauben auf den Kühlschlitzen 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, Exzentrizität des Stators oder der Welle, Motorausrichtung, fehlende Schmierung, Probleme im Bereich der Lager usw. (z. B. Test Motors, o.J.; Siemens, 2017; ABB, 2019).

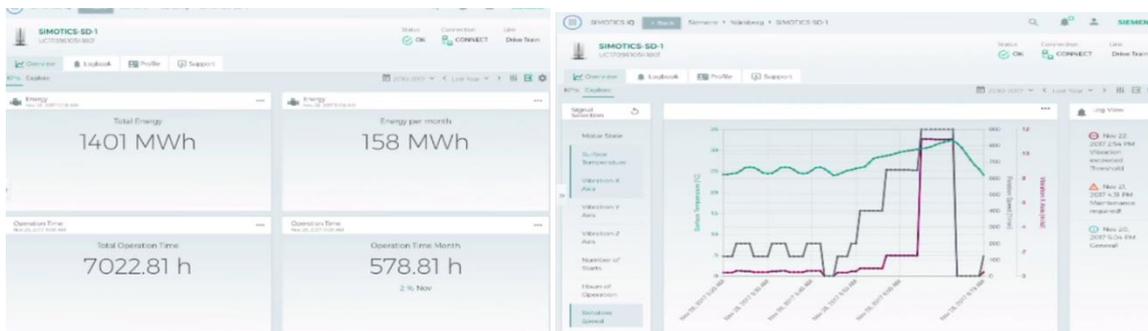


Abbildung 2: Anzeige energie- und wartungsrelevanter Daten in der Cloud auf Basis von Messwerten einer Smartbox (Siemens, 2017)

### 4.2 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 Motor Control Center, 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 (Siemens, 2019).

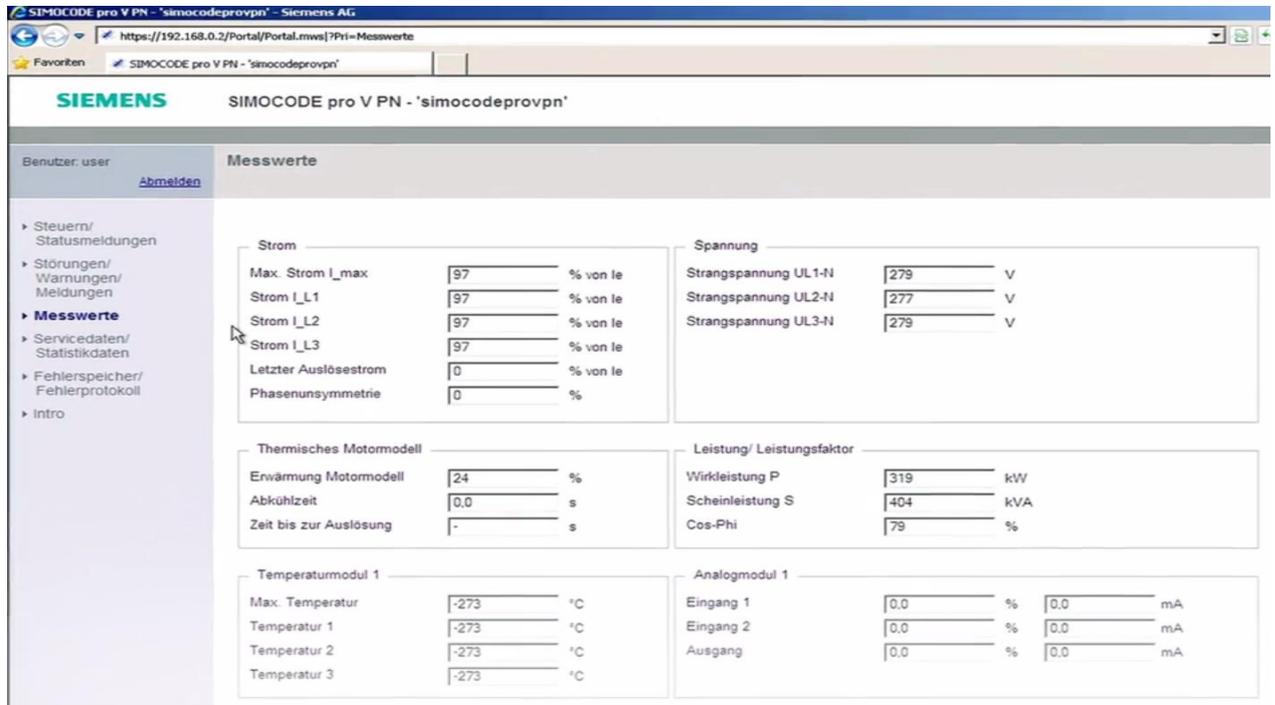


Abbildung 3: Anzeige von elektrischen Messwerten für einen Elektromotor mittels Siemens Software (Siemens, 2019)

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 (Siemens, 2019).

### 4.3 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 (Hanigovszki, 2018).

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

- Ungenügende Schmierung
- Verstopfte Luftfilter
- Fouling an Pumpen und Rohren
- Abgenutzte Getriebe (Hanigovszki, 2018).

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 (Yaskawa, 2019).

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 (Yaskawa, 2019).

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 grafische Darstellung, Fehlerhistorie, Auswertung der Energiekennzahl kWh/m<sup>3</sup> 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 Niveausteuern
- 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 Stand-by-Modus, ausgeschalteten Gerätelüfter und deaktivierte Beleuchtung und Display (Schneider Electric, 2018; Schneider Electric, 2019).

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

#### 4.4 Intelligente Pumpen und Ventilatoren

Der Pumpenhersteller 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-, Rücklauf-temperatur). 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.); Multi-Flow Adaption (Ermittlung des Summenvolumenstroms durch die Zubringerpumpe für die bedarfsgerechte Versorgung von Sekundärpumpen in Heizkreisverteiltern); 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 (Wilo, 2017)

Die Pumpe kann insgesamt 42 Parameter weitergeben, dazu gehören: Betriebsstatus, Drehrichtung, Differenzdruck, Durchflussmenge (berechnet), Energieverbrauch, Pumpenleistung [W], Strom [A], Mediumstemperatur, Betriebsstunden, Sollwertabweichung, Drehzahl, verschiedene Störungen, Frequenzsollwert, max. Drehzahl, min. Drehzahl, Steuerungsmodus (konstanter Druck, konstantes Volumen) (WILO, 2018).

Laut Einschätzung des Wilo Experten (siehe Literaturverzeichnis) wird die Energieeinsparung einerseits durch die Nutzung von hocheffizienten Komponenten (z. B. IE4-Motoren) in Kombination mit einer Regelung der Pumpe mit einem Frequenzumrichter erreicht. Andererseits entstehen Einspareffekte durch die Möglichkeit, Benutzerparameter wie die Raumtemperatur als Steuerparameter zu nutzen und nicht wie in der Vergangenheit lediglich den Druck als Steuerparameter heranzuziehen (Wilo, 2019).

KSB, ein weiterer Pumpenhersteller bietet im Leistungsbereich bis 45 kW IE5-Motoren auf Basis der Synchron-Reluktanzmotoren an. Außerdem wurde eine App entwickelt, die durch Aufnahme der Geräuschfrequenz des Asynchronmotors über das Smartphone in Kombination mit den einzugebenden Daten der jeweiligen Pumpe und Motor den Betriebspunkt der Pumpe über eine gesicherte Verbindung in die KSB-Cloud mittels Schätz-Algorithmus analysiert und damit erkennt, ob eine Steigerung der Effizienz möglich ist (KSB, 2019).

Ziehl-Abegg entwickelt Motoren und Frequenzumrichter für seine Ventilatoren, die eine Vielzahl von Messwerten erfassen, übertragen und anzeigen können, und bietet darüber hinaus weitere Funktionen an:

- Anzeige von Drehzahl, Status, Spannung, Strom, Leistung
- Weiters die Anzeige des Status (aktiv, Stopp), Fehleranzeigen
- Darstellung von Trends dieser Werte
- Vibrationsmessung aller drei Achsen
- Messung und Anzeige von Hoch- und Rücklaufzeit
- Algorithmus zur Berechnung der Lebensdauer (z. B. abhängig von Laufzeit und Umgebungsbedingungen)
- Überwachung erfolgt für die Kühlbedingungen (z. B. Verschmutzung der Ventilatoreinhausung und des Motors), Vibration und Betriebsstunden (z. B. Lastprofil)
- Messung der Temperatur des Transistors (IGBT – Insulated-gate Bipolar Transistor)
- Die Konnektivität erfolgt über MODBUS oder Bluetooth, was eine Steuerung des Ventilators über Smartphone oder Tablet ermöglicht.
- Der Zugriff auf die Daten erfolgt über eine Cloudlösung.

Diese Daten ermöglichen auch ein sog. „Predictive Maintenance“, um die verbleibende Lebensdauer zu erfassen, Vibration und Überhitzung zu bemerken und damit Ausfälle zu vermeiden.

Die Regelung der Ventilatoren erfolgt normalerweise vom Zentralregler des Lüftungsgeräts als Drehzahlvorgabe über die Spannung bzw. über die Feuchte- und Temperaturregelung, kann aber auch über Druck-, Differenzdruck-, Luftgeschwindigkeits- oder CO<sub>2</sub>-Sensoren erfolgen.

Generell werden im Leistungsbereich 1,25 bis 6,6 kW sog. EC-Motoren (bürstenlose Synchronmotoren) der Effizienzklasse IE5 eingesetzt, darüber bis 22 kW IE4-Motoren. Für die Ventilatorentwicklung können nachwachsende Rohstoffe (Biopolymer auf Raps-, Hanfbasis) eingesetzt werden. Das Design verwendet Elemente der Bionik und ermöglicht höhere Wirkungsgrade bei geringerer Geräusentwicklung.

### 4.5 Industrie 4.0 und Druckluftanlagen

Der Energieverbrauch von Druckluftanlagen hängt u. a. davon ab, wie lange die Anlage in den unterschiedlichen Betriebszuständen betrieben wird. Bei starren Kompressoren sind dies Volllast, 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 Marktführer für Kompressoren bieten zum optimalen Betrieb der Kompressoren Einzel- und Verbundsteuerungen an.

Beispielsweise analysiert der „SIGMA AIR MANAGER 4.0 with adaptive 3-D advanced control“ von Kaeser den Zusammenhang zwischen den verschiedenen Parametern: Start, Stopp, Teillast, Verluste des Frequenzumrichters und Flexibilität des Drucks. Dadurch wird der Druck optimiert und reduziert und somit Energie gespart (Kaeser, 2019a).

Das Überwachungssystem Elektronikon® für Kompressoren von Atlas Copco sammelt Temperatur- und Druckdaten von Sensoren, die im Kompressor verbaut sind, und ermöglicht dadurch, die Effizienz des Kompressors zu optimieren: Durch Einstellung zweier unterschiedlicher 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 dadurch 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 (Atlas Copco, 2019).

Die Steuerung von Kaeser liefert permanent und in Echtzeit alle Betriebs- und Umgebungsparameter an das Kaeser Data Center. Mithilfe 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 (Kaeser, 2019b).

Durch die Echtzeitübertragung 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 (Kaeser, 2019c).

### **Druckluftverbraucher**

In vielen Betrieben stellen die Leckagen in Druckluftsystemen eine wesentliche Verbrauchsquelle dar. In Betrieben mit funktionierendem Leckagenmanagement liegen diese Leckagen bei maximal 5–10 %, können aber im schlimmsten Fall bis zu 50 % oder sogar 70 % der gesamten erzeugten Druckluft ausmachen. Um Leckagen z. B. in Webmaschinen frühzeitig zu erkennen, werden Durchflussmessung installiert und diese in die Energiedatenerfassung der Produktionsanlage integriert, um Zeiten und Volumina zu erfassen und beispielsweise Alarme einzurichten, die direkt auf Leckagen schließen lassen.

SMC Pneumatik bietet mit dem sog. „Automatic Leak Detection System“ ein System zur Leckagenerkennung an, das digitale Durchflussmessung mit Umlenkventil kombiniert und den Leckagenwert in Liter pro Minute und die Position der Leckage angibt, auch wenn die Maschine in Betrieb ist. Dazu muss allerdings vom Maschinenhersteller selbst die Sequenz-Instruktion zur Leckagemessung in die Maschinensteuerung integriert werden bzw. programmiert werden. Diese Funktion kann über das System entsprechende SMS an die Wartungsmannschaft versenden.

Darüber hinaus können Drucksensoren das Druckniveau im Druckluftnetz überwachen und die Farbe der Anzeige je nach Druckniveau wechseln, sodass im Normalzustand die Anzeige grün ist, aber bei Überschreitung eines bestimmten Wertes rot geschaltet wird. Der Vorteil dieser Lösung, die eigentlich nicht Industrie 4.0 ist, ist, dass dies ohne Verbindung mit Maschinensoftware erfolgen kann und daher kein Programmieraufwand notwendig ist, dennoch eine zeitnahe Information der Verantwortlichen erfolgt.

## 5 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 etwa 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 beispielsweise in Abhängigkeit des Drucks und/oder der Temperatur die Anlagen regelt.

Die Prozessleitebene (Level-2) 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 Datenerfassungssystemen (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, grafische Anzeige mit aktuellem Leistungsbereich.

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

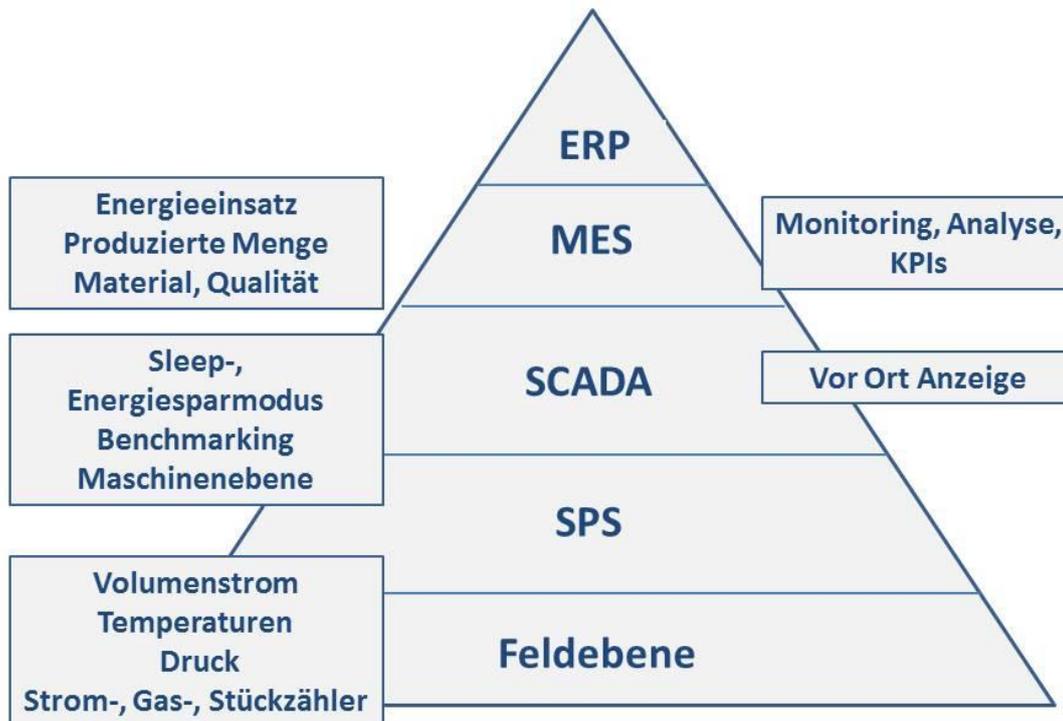


Abbildung 4: Automatisierungspyramide mit energierelevanten Daten und Funktionen im Energiedatenmanagement (Kulterer, 2019)

ERP: Enterprise-Ressource-Planning-Systeme

MES: Manufacturing Execution Systems

SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition

SPS: Speicherprogrammierbare Steuerung

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 dieser Ebene kann mit der Berichtsfunktion der Software der Inhalt des Monatsberichts für das Energie- oder Topmanagement definiert und erstellt werden. Dazu gehören etwa Monatsverbräuche der einzelnen Medien (Gas, Strom), die Aufteilung auf die wichtigsten Verbraucher und bestimmte Trends von vordefinierten Kennzahlen. Teilweise können diese Kennzahlen auch flexibel definiert werden. Für gemessene Verbraucher,

wie beispielsweise Motorsysteme können aber darüber hinaus noch viel detailliertere Daten dargestellt werden.

Für Druckluftanlagen könnte es beispielsweise sinnvoll sein, folgende Daten in der Software zum Energiedatenmanagement darzustellen:

- Gesamtdruckluftverbrauch
- Betriebsdruck
- Aufgenommene Leistung der Druckluftanlage
- Genutzte Wärme – Wärmerückgewinnung
- Taupunkt
- Spezifischer Druckluftverbrauch

Zur Effizienzanalyse der Druckluftanlage lassen sich etwa folgende Kurven anzeigen:

- Druckluftanlage Leistung [kW] über die Zeit
- Liefermenge [m<sup>3</sup>/h] über die Zeit
- Energieverbrauch pro Liefermenge

Weiters ist eine flexible Kennzahlendarstellung möglich, z.B. durch Auswahl des Zeitraums oder durch Anzeige von Mittelwerten.

Für das Cockpit einer Druckluftanlage könnten beispielsweise folgende Daten und Diagramme angezeigt werden (Weidmüller, 2018):

- Spezifischer Druckluftverbrauch mit Tachometeranzeige mit hinterlegten Werten (Schlecht, Mittel, Gut, Optimal)
- Gesamtverbrauch Druckluftmenge [m<sup>3</sup>] pro Kalenderwoche, Leistungsaufnahme pro Kalenderwoche [kWh]
- Druckluft V-Zahl: spezifischer Druckluftverbrauch über die bereitgestellte Druckluftmenge

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

## 6 Industrie-4.0-Anforderungen an die Entwicklung von E-Motoren

In diesem Kapitel werden Informationen dargestellt, welche Anforderungen Industrie 4.0 auf die Motorentwicklung haben wird. Die Informationen dieses Kapitels wurden auf Basis der durchgeführten Interviews erstellt, sind also keine umfassende Analyse der derzeitigen Forschungstätigkeit auf diesem Gebiet. Sie geben aber die wichtigsten Tendenzen wider. In den Stakeholder-Interviews wurde konkret die Frage gestellt, welche Auswirkungen Industrie 4.0 auf die Entwicklung von Elektromotoren bzw. Motorsysteme zu erwarten sind. Folgende Themenfelder wurden identifiziert:

### 6.1 Ausstattung mit Sensoren

Im Zusammenhang mit Industrie 4.0 wird von Komponenten wie Motoren erwartet, dass sie über ihren Zustand selbstständig nicht nur Information geben können, sondern sich in weiterer Folge selbst überwachen und optimieren können. Dazu gehören eine Vielzahl von Sensoren, die Vibration, unterschiedliche Umgebungs- und Komponententemperaturen, Drücke, Volumenströme, Beschleunigungsgrößen, elektrische Kenngrößen usw. erfassen können. Weitere Sensoren wären z. B. Luftfeuchtigkeit, Erkennen von Vereisung.

Dadurch werden z. B. Druckluft- oder Lüftungsanlagen, ähnlich bereits verfügbarer Systeme für Beleuchtungsanlagen, nur mehr jene Bereiche in Unternehmen oder Gebäuden versorgen, in denen zur konkreten Zeit (z. B. Nachtschicht) Menschen oder Maschinen arbeiten und diese Systeme benötigen. Sonst werden diese Systeme automatisch abgeschaltet, auf das erforderliche Niveau zurückgeregelt oder der jeweilige Bereich abgetrennt werden.

### 6.2 Steuerungsmöglichkeiten

Generell wird sich die Anzahl der Sensoren in der Umgebung stark erhöhen, auf diese Werte können Motoren dann z. B. innerhalb von Lüftungs- oder Heizungsanlagen reagieren. Daher wird die Regelung von Motorsystemen nicht mehr über Drücke (also z. B. Ventilstellungen, Klappen), sondern direkt über entsprechende Sensorsignale (Temperatur, Feuchte) erfolgen. Pumpen beispielsweise werden dann nur mehr den Durchfluss, der zur Aufrechterhaltung des jeweiligen Temperaturniveaus erforderlich ist, bereitstellen.

### 6.3 Konnektivität

Um den Motor in die automatisierte Fabrik integrieren zu können, muss eine sog. bidirektionale Konnektivität gewährleistet werden. Hier ist auch im industriellen Umfeld eine Vielzahl von Systemen in Anwendung. Beispiele für Systeme sind derzeit für Feldbussysteme Modbus, Fieldbus, CAN, Profibus oder die Ethernetlösungen Profinet, EtherNet, EtherCAT, SERCOS III, POWERLINK und in weiterer Folge Bluetooth. Dabei setzen die Hersteller auf eine Vielzahl von Möglichkeiten. Unterbrechungssicherheit aber auch Security-Aspekte spielen dabei eine große Rolle.

## 6.4 Algorithmenentwicklung/Virtualisierung

Um von den gesammelten Daten auch auf belastbare Aussagen zu kommen, müssen diese Daten übertragen, gespeichert und auch ausgewertet werden. Je größer der Umfang der Daten, umso wichtiger wird automatisierte Datenaufbereitung und -auswertung über entsprechende Algorithmen.

Ziele von Algorithmen sind derzeit insbesondere das Condition Monitoring, d. h. die frühzeitige Fehlererkennung im System. Darauf aufbauend werden dann Services wie z. B. das zeitnahe Bestellen von Ersatzkomponenten usw. entwickelt oder bereits angeboten.

Andere Ziele könnten aber auch die Optimierung hinsichtlich des Energieverbrauchs von Einzelkomponenten bis hin zur gesamten Anlage sein. Derzeit erfolgt dies in der Praxis händisch mit Excel-Lösungen oder über Zeitverläufe der Einschaltzeiten und Energieaufnahme einzelner Anlagen in einer Energiemanagementsoftware.

Dazu sind neben Trend- und Kennzahlenentwicklung aber auch eine Vielzahl von realen Betriebserfahrungen notwendig, um beispielsweise Aussagen über die verbleibende Lebensdauer von Komponenten oder Aussagen über den Betriebszustand (z. B. Verschmutzung) machen zu können. Diese kann abhängig von einer Vielzahl von Umgebungs- und Betriebsparametern sein (Temperatur, Feuchtigkeit, Kühlung, Betriebsstunden, Stromaufnahme, Lastzustand usw.). Alle diese Parameter könnten mit entsprechender Erfahrung und Know-how mit Wertebereichen hinterlegt werden, die für einen optimalen Betrieb erforderlich sind. Kombiniert wird das mit virtuellen Modellen des Prozesses oder der Maschine.

## 6.5 Cloud Computing

Eine Voraussetzung zur Datenanalyse zentral über mehrere Standorte, über mobile Endgeräte oder auch über zentrale Datacenter ist die Sammlung und Speicherung von Daten in der Cloud.

Themenbereiche, die dabei eine Rolle spielen sind u. a. Edge Computing (ein Prozessor macht auf Produktionsebene Datenanalyse und sendet nur ausgewählte Daten an die Cloud) oder Advanced Data Analytics, um die steigende Datenmenge sinnvoll analysieren zu können.

## 6.6 Condition Monitoring

Durch Condition Monitoring wird der Betriebszustand laufend überwacht und dabei werden auch energetisch ungünstige Betriebszustände erkannt. Dazu gehören insbesondere erhöhte Vibrationen, erhöhte Stromaufnahme, erhöhte Anzahl von Starts, unregelmäßige Laufzeiten usw. Durch entsprechende Auswertung (auch über Algorithmen) kann daraus auf verschiedene Ursachen (z. B. ungenügende Schmierung, verstopfte Luftfilter, Fouling an Pumpen und Rohren, abgenutzte Getriebe, Änderung der Anforderungen) geschlossen und entsprechende Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Dies kann über Warnsignale bis hin zur automatisierten Bestellung der Ersatzkomponente und Terminanfrage zum Austausch oder Wartung geschehen. Fernziel ist, dass sich jede einzelne Komponente selbst überwacht. Beispiel dazu wäre ein Magnetventil an einer Ventilinsel, das erkennt, wenn z. B. eine Spule zu viel Strom benötigt. und damit erkennt, wenn ein Austausch oder eine Reparatur erforderlich ist.

Generell werden Maschinenproduzenten vermehrt die Daten über die Fahrweise ihrer Anlagen durch die Anlagenbetreiber auswerten und nutzen.

## 6.7 Maschinensicherheit /Worker Collaboration

Ein Ziel von Industrie 4.0 ist die weitere Verschränkung von Arbeitsplätzen von Robotern mit jenen von Menschen. Dabei hat die Sicherheit des Menschen höchste Priorität und ihre Sicherstellung wird von Normen und Richtlinien unterstützt. Laut Whitepaper „Sicherheit in der Mensch-Roboter-Kollaboration“ fehlen aber dazu noch Erfahrungswerte in der Praxisumsetzung (TÜV, Fraunhofer, 2016).

Mensch-Roboter-Kollaboration bezeichnet die Zusammenarbeit von Menschen und Robotern in einem gemeinsamen Arbeitssystem ohne Gitter, Zäune, Lichtgitter oder Laserscanner.

Motoren müssen daher entsprechende Anforderungen erfüllen, dazu gehören auch beispielsweise die Stoppkategorie 0 nach EN 60204. Die Energieversorgung zum Antrieb kann sofort unterbrochen werden, der Antrieb wird ungesteuert stillgesetzt. Der Antrieb kann dann nach der Abschaltung kein Drehmoment mehr erzeugen. Andere Möglichkeiten beinhalten, dass z. B. bei Werkstückwechsel eines Fräasers, der Motor auf sichere Drehzahl zurückgeregelt wird oder der Roboterarm sich langsamer bewegt, damit keine Gefahr für den Arbeiter droht, aber auch kein Neustart erforderlich ist. Neue Entwicklungen in diesem Bereich umfassen auch eine „künstliche Haut“ für Roboter, über die die Roboterarme zum Stillstand gebracht werden können.

## 6.8 Neue Technologieaspekte

Dieser Aspekt kann nicht unmittelbar Industrie-4.0-Aspekten zugeordnet werden, wird hier aber dennoch der Vollständigkeit halber angeführt.

In den letzten Jahren spielte die Energieeffizienz von Elektromotoren, angetrieben durch neue Technologieentwicklungen und aufgrund von Mindeststandards (derzeit IE3), eine große Rolle.

Folgende Technologieentwicklungen sind dabei erwähnenswert:

- Steigerung der Effizienz Richtung IE4 und IE5 bei Induktionsmotoren mit Kupferrotor
- Verbreiteter Einsatz von Permanentmagnetmotoren mit Frequenzumrichter oder über Wechselstrombetrieb; diese weisen im Teillastbereich und bei niedrigen Drehzahlen höhere Wirkungsgrade als Induktionsmotoren auf
- Angetrieben durch Anwendungen im E-Mobilitätsbereich gibt/gab es Kostensenkungen bei Permanentmagnetmotoren, reduzierte Volumina des magnetischen Materials und neue Entwicklungen beim Design des Permanentmagneten.
- Entwicklung von Synchron-Reluktanzmotoren, diese weisen höhere Wirkungsgrade bei niedrigeren Herstellkosten auf
- Permanentmagnet-unterstützter Synchron-Reluktanzmotor
- Neue Materialien bei der Entwicklung von Permanentmagnetmotoren (Ferrite), diese haben allerdings geringeres Drehmoment als seltene Erden-Magneten

Bei Linearmotoren für Automatisierungsanwendungen spielen Miniaturisierung, Geschwindigkeit und Beschleunigung und ein geringer Energiekonsum eine große Rolle. Außerdem muss eine einfache Kommunikation mit Industrielösungen möglich sein. Diese Lösungen sollen auch als (Plug & Play) funktionieren. Die Herstellung kleiner Linearmotoren ist auch ein Einsatzgebiet für 3-D-Druck.

## 6.9 Innovative Motorsteuerungsmechanismen

Permanentmagnetmotoren benötigten bisher Lagesensoren, um ein hohes Anfahrmoment zu erzeugen und damit die Maschine rasch in den gewünschten Betriebszustand zu beschleunigen. Dies wird über Hallsensoren oder Lagegeber auf der Welle des Motors umgesetzt, die den Statorstrom in einem bestimmten Winkel relativ zum Rotor einprägen. Bei sensorloser Regelung wird die Lage des Rotors über die aktuellen Strom- und Spannungswerte über Testimpulse bestimmt. Bei niedrigen Drehzahlen oder Stillstand kann dies z. B. über die an der TU Wien entwickelten INFORM-Methode erfolgen. Damit ist diese Art von Motoren für eine Vielzahl von Gebieten möglich (TU Wien, 2019). Für Hochgeschwindigkeitsanwendungen werden auch bürstenlose Gleichstrommotoren angewendet. Dabei spielt die Positionserkennung über Winkelmessung eine große Rolle zur exakten Steuerung des Drehmoments. Kompensationsalgorithmen im Sensor selbst können den Übertragungsfehler aufgrund der Zeitverzögerung von Messung und Übertragung verringern und damit Vibration und andere störende, mechanische Effekte reduzieren (AMS, 2018).

## 6.10 Energieaspekte der Robotertechnik

Bezogen auf den Gesamtenergiebedarf in der Industrie benötigen Roboter noch einen sehr geringen Anteil an Energie; in spezifischen Anwendungen, z. B. in der Autofertigung für den Karosserierohbau, verbrauchen sie aber über die Hälfte der benötigten Gesamtenergie (Elektrotechnik, 2014). Möglichkeiten bzw. Trends zur Energieeffizienz umfassen u. a.:

Bei Elektromotoren für Roboter sind die wesentlichen Aspekte die Bewegungssteuerung und das Verhältnis aus Drehmoment zu Gewicht. Trends zu effizienteren Motoren umfassen verbesserte Technologie, kompaktere Bauweise und damit geringere Masse und geringere Stromverbräuche.

Effizienzaspekte bei Robotern sind die Reduktion des Gewichts und Verringerung der Größe (z. B. bei Hebearmen), die Verringerung des Stand-by-Verbrauchs (die Energieaufnahme beträgt z. B. bei kleineren Robotern nahezu dieselbe wie im aktiven Zustand) und die Rückspeisung von Energie bei Brems- und Senkbewegungen (Yaskawa, 2018).

Die Kühlung und die Bewegungsgeschwindigkeit von Robotern haben ebenfalls wesentlichen Einfluss auf den Energieverbrauch. Weitere Entwicklungsschritte sind die Entwicklung der statischen und dynamischen Festigkeit und die Bearbeitungsgenauigkeit (Uhlmann et al., 2016).

Unnötige Bewegungen (z. B. durch falsche Installationshöhe, Ausweichmanöver) sind mit unnötigem Energieverbrauch verbunden; ruckartige Bewegungen (also das rasche Beschleunigen und Abbremsen) verursachen Lastspitzen im Energieverbrauch und belasten die Mechanik. Simulationsmodelle, die optimierte Bahnkurven ohne abrupte Richtungswechsel errechnen, ergaben in Labortests Stromeinsparpotenziale von 10 bis 50 Prozent.

## 7 Literatur

AMS: Position sensing in high-speed applications, <https://ams.com/daec> (Zugriff: 28.10.2018)

ABB: ABB Ability™ Smart Sensor for motors, <https://new.abb.com/motors-generators/service/advanced-services/smart-sensor/smart-sensor-for-motors> (Zugriff: 28.01.2019)

Atlas Copco: Atlas Copco Schraubenkompressoren mit Öleinspritzung, [https://www.gross-gmbh.eu/fileadmin/dokumente/pdf/Baureihe\\_GA\\_30\\_-90\\_GA\\_30-90\\_VSD\\_\\_30-90\\_kW.pdf](https://www.gross-gmbh.eu/fileadmin/dokumente/pdf/Baureihe_GA_30_-90_GA_30-90_VSD__30-90_kW.pdf) (Zugriff: 28.01.2019)

BMWi: Industrie 4.0 – Volks- und betriebswirtschaftliche Faktoren für den Standort Deutschland – Eine Studie im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm AUTONOMIK für Industrie 4.0, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: <https://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html> (Zugriff: 29.3.2019)

Brunner, C.U., Werle, R.: Topmotors Market Report 2018, Impact Energy im Auftrag von Bundesamt für Energie (BFE), Bern, 2018

Capgemini: Smart Factories: How can manufacturers realize the potential of digital industrial revolution, 2017

Elektrotechnik, Automatisierung: <https://www.elektrotechnik.vogel.de/volkswagen-will-bei-robotern-sparen-a-449404/>, (veröffentlicht am: 30.6.2014, Zugriff: 6.4.2019)

Ernst & Young: EY-Umfrage: Industrie 4.0 im österreichischen Mittelstand, Befragungsergebnisse, 2018

Hanigovszki, N.: Industry 4.0, Condition monitoring & smart sensors, presentation at the Motor Summit 2018 International, Zurich, Switzerland (Zugriff: 15.11.2018)

KAESER Kompressoren (a): Verbund Steuerung: Sigma Air Manager 4.0, <https://www.kaeser.de/produkte/steuerung/verbundsteuerung/> (Zugriff: 28.01.2019)

KAESER Kompressoren (b): Industrie 4.0 - die Zukunft hat begonnen, [http://www.kaeser.at/Products\\_and\\_Solutions/industrie-4-0/default.asp](http://www.kaeser.at/Products_and_Solutions/industrie-4-0/default.asp) (Zugriff: 28.01.2019)

KAESER Kompressoren (c): KAESER SIGMA NETWORK, <http://de.kaeserkompressoren.ch/m/produkte/steuerungen/SIGMA-AIR-MANAGER-4-0/sigma-air-manager-4-0-network.asp> (Zugriff: 28.01.2019)

Kulterer, K.: Integration von Produktions- und Energiedaten, klimaaktiv energieeffiziente betriebe, Wien 2019

KSB: Optimierungspotenziale aufdecken, die KSB sonolyzer App, <https://www.ksb.com/sonolyzer-de> (Zugriff: 8.4.2019)

McKinsey Digital: Industry 4.0 – How to navigate digitization of the manufacturing sector, McKinsey & Company, München, 2015

Obermair, R.: Industrie 4.0 als unternehmerische Gestaltungsaufgabe: Strategische und operative Handlungsfelder für Industriebetriebe, Springer Verlag, 2016

Reger, J., Kosch, B.: Energieaspekte der Informationstechnologie, in Matzen, F.J., Tesch, R (Hrsg.) Industrielle Energiestrategie, Springer, 2017

Rogers, E.: The Energy Saving Potential of Smart Manufacturing, American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE), 2014

Rogers, E., Junga, E.: Intelligent Efficiency Technology and Market Assessment, American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE), 2017

Roland Berger: Die Digitalisierung in der GreenTech-Branche, Roland Berger GmbH, München, 2016

Schneider Electric: Altivar Machine ATV 320, Setzen Sie neue Maßstäbe bei der Maschinenleistung, <https://www.tecworld.com/wp-content/uploads/frequenzumrichter-altivar-320-produktpraesentation.pdf>, (Zugriff: 28.01.2019)

Schneider Electric: Altivar Prozess ATV 600, Mehr als nur ein Antrieb, Michael Krammer, TL PAE 2018

Siemens: Simotics IQ, Halten Sie Ihre Motoren fit - mit SIMOTICS IQ, <https://www.youtube.com/watch?v=1solobPLCsQ> (veröffentlicht am: 29.11.2017, Zugriff: 28.01.2019)

Siemens: Pump Cleaning in der Wasserwirtschaft, <https://www.siemens.com/global/de/home/produkte/automatisierung/industrielle-schalttechnik/simocode.html> (Zugriff: 28.01.2019)

Smart Manufacturing Leadership Coalition (SMLC), Implementing 21st Century Smart Manufacturing. Workshop Summary Report, University of California, Los Angeles, 2011

Statistik Austria: Nutzenergieanalyse 2018

Statistik Austria: Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen, 1995-2017, Hauptergebnisse

Staufen AG, Staufen Digital Neonex GmbH: Deutscher Industrie 4.0 Index 2018, 2018

Test Motors: Smart Motor Sensor (SMS), The condition of all your electric motors at your displays anytime, anywhere (o.J.), <http://www.testmotors.com/en/smart-motor-sensor/> (Zugriff: 28.01.2019)

TU Wien, Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe: Sensorlose Regelung für Synchronmotoren, 2019

TÜV AUSTRIA Holding AG, Fraunhofer Austria Research GmbH: Whitepaper „Sicherheit in der Mensch-Roboter-Kollaboration“, 2016

Uhlmann, E., Reinkober, S., Hollerbach, T.: Energy efficient usage of industrial robots for machining processes, 23rd CIRP Conference on Life Cycle Engineering, 2016

VDI ZRE (Zentrum für Ressourceneffizienz): Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0, Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes, 2017

Weidmüller: <https://www.weidmueller.de/de/produkte/elektronik-und-automatisierung/mess--und-monitoringsysteme/energiemonitoring/neuigkeiten/ecoexplorer-4-0>, (Zugriff: 17.12.2018)

Wilo CS: Wilo Stratos MAXO, product in application, <https://www.youtube.com/watch?v=2wPxSVsu2IE>, (veröffentlicht am: 12.04.2017, Zugriff: 28.01.2019)

Wilo: Experteninterview und E-Mail-Korrespondenz, Gerhard Rauch, 15.10.2018

World Economic Forum: Fourth Industrial Revolution, Beacons of Technology and Innovation in Manufacturing, in collaboration with McKinsey & Company, January 2019

Yaskawa: Annual Report 2018

Yaskawa: i<sup>3</sup>-Mechatronics, <https://www.yaskawa-global.com/product/i3-mechatronics> (Zugriff: 28.01.2019)

### **Interviewpartner:**

Die Österreichische Energieagentur führte mit folgenden Personen im Zeitraum Juli 2018 bis März 2019 vertiefende Interviews:

- Prof. Anibal De Almeida, Universität von Coimbra, Director of the Institute for Systems and Robotics (UC)
- Ing. Clement Pucher, Leiter Technik, SMC Pneumatik
- Ing. Gerhard Rauch, Berater Anlagenoptimierung und Energieauditor gem. EEffG. für Gebäude Wilo Pumpen Österreich GmbH
- Ing. Christian Gerl, Geschäftsführer Chriger Solutions
- Ing. Andreas Schaufler, Drives, Motion Controls Division, Yaskawa Europe GmbH
- DI Michael Krammer, Teamleiter Applikationsspezialisten Geschäftsbereich Industrie, Schneider Electric Austria Ges.m.b.H.
- Christian Gorbach, Business Development Manager, ZIEHL-ABEGG Ges.m.b.H.

Weitere Gespräche wurden noch vor Fertigstellung des Interviewleitfadens mit ExpertInnen von ABB, Siemens, SEW Eurodrive geführt.

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung des Stromverbrauchs im Sektor Produktion in Österreich in den Jahren 2005 bis 2017 (Statistik Austria, 2018).....	9
Abbildung 2: Anzeige energie- und wartungsrelevanter Daten in der Cloud auf Basis von Messwerten einer Smartbox (Siemens, 2017) .....	22
Abbildung 3: Anzeige von elektrischen Messwerten für einen Elektromotor mittels Siemens Software (Siemens, 2019) .....	23
Abbildung 5: Automatisierungspyramide mit energierelevanten Daten und Funktionen im Energiedatenmanagement (Kulterer, 2019) .....	29

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vorteile der Nutzung von Industrie-4.0-Technologien.....	12
Tabelle 2: Auswirkungen von Industrie 4.0 auf die jeweiligen Produktionsfaktoren .....	13
Tabelle 3: Treiber und Barrieren bei der Umsetzung von Industrie 4.0 (gereiht nach Prozentsatz) ....	15
Tabelle 4: Elf Maßnahmen der digitalen Transformation, Beschreibung und Beispiele.....	16
Tabelle 5: Wesentliche Komponenten von Industrie 4.0 und deren Energieeffekte .....	18



### ÜBER DIE ÖSTERREICHISCHE ENERGIEAGENTUR – AUSTRIAN ENERGY AGENCY (AEA)

Die Österreichische Energieagentur liefert Antworten für die Energiezukunft. Sie berät auf wissenschaftlicher Basis Entscheidungsträgerinnen und -träger aus Politik, Wirtschaft und Verwaltung – sowohl national als auch international.

Als Kompetenzzentrum für Energie konzentriert sie sich auf drei strategische Schwerpunkte: **missionzero**, **transformation** und **energieintelligenz**. Beim Schwerpunkt **missionzero** verfolgt die Österreichische Energieagentur das langfristige Ziel, mit Strategieentwicklung und der Umsetzung von konkreten Maßnahmen die Zukunft fossilfrei zu gestalten. Beim Schwerpunkt **transformation** des Energiesystems setzt sie sich mit den damit verbundenen Umbrüchen und profitablen Geschäftsmöglichkeiten in den energierelevanten Branchen auseinander. Im Rahmen der **energieintelligenz** beschäftigt sie sich mit dem smarten und flexiblen Energiesystem der digitalen Zukunft. Im Vordergrund steht die Steigerung von Energieeffizienz und erneuerbaren Energieträgern im Spannungsfeld zwischen Wettbewerbsfähigkeit, Klima- und Umweltschutz sowie Versorgungssicherheit.

Die Österreichische Energieagentur entwickelt Strategien für eine nachhaltige und sichere Energieversorgung, führt Beratungen und Schulungen durch und ist die Vernetzungsplattform für die Energiebranche. Sie setzt klimaaktiv – die Klimaschutzinitiative des Bundesministeriums für Nachhaltigkeit und Tourismus (BMNT) – operativ um und koordiniert die verschiedenen Maßnahmen in den Themenbereichen Mobilität, Energiesparen, Bauen & Sanieren und Erneuerbare Energie. Zudem betreibt die Österreichische Energieagentur im Auftrag des BMNT die Nationale Energieeffizienz-Monitoringstelle. Weitere Informationen für Interessenten unter [www.energyagency.at](http://www.energyagency.at).

