

VDI

Zentrum
Ressourceneffizienz

Im Auftrag des:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz,
Bau und Reaktorsicherheit



NATIONALE
KLIMASCHUTZ
INITIATIVE

Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0

Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes



© VDI ZRE



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz



HESSEN

Hessisches
Ministerium für
Wirtschaft, Energie,
Verkehr und
Landesentwicklung



Rheinland-Pfalz

MINISTERIUM FÜR UMWELT,
ENERGIE, ERNÄHRUNG
UND FORSTEN

Studie: Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes

Autoren:

TU Darmstadt - Institut IWAR, Fachgebiet SuR: Prof. Dr. rer. nat. Liselotte Schebek; Dr.-Ing. Jan Kannengießer; Alessio Campitelli, M.Sc.; Julia Fischer, M.Sc.

TU Darmstadt - Institut PTW: Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele; Christoph Bauerdick, M.Sc.

TU Darmstadt - Fachgebiet DiK: Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl; Sebastian Haag, M.Sc.

Fraunhofer IPA: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer; Dr.-Ing. Jörg Mandel; Dr.-Ing. Dominik Lucke; Dipl.-Ing. Ivan Bogdanov, M.Sc.; Anne-Kathrin Nuffer, M.Sc.; Prof. Dr.-Ing. Rolf Steinhilper; Dr.-Ing. Johannes Böhner; Dipl.-Wirtsch.-Ing. (FH) Gerald Lothes; Christoph Schock, M.Sc.

DFKI: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Detlef Zühlke; Dr.-Ing. Christiane Plociennik; Dipl.-Inf. (FH) Simon Bergweiler

Wir danken Herrn Dr.-Ing. Andreas Schlegel, Abteilungsleiter Ressourceneffiziente Fabrik, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU für seine fachliche Unterstützung.

Fachliche Ansprechpartner:

Stefan Kirmes, M.Eng., VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH

Dr.-Ing. Christof Oberender, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH

Dr. Martin Vogt, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH

Die Studie wurde durch das VDI Zentrum Ressourceneffizienz, das im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit arbeitet, in Zusammenarbeit mit dem Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, dem Hessischen Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung sowie dem Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz, beauftragt.

Die Studie wurde aus Mitteln der Nationalen Klimaschutzinitiative des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit und der beteiligten Landesministerien finanziert.

Redaktion:

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)

Bertolt-Brecht-Platz 3

10117 Berlin

Tel. +49 30-2759506-0

Fax +49 30-2759506-30

zre-info@vdi.de

www.ressource-deutschland.de

Titelbild: VDI ZRE

Druck: Bonifatius GmbH, Karl-Schurz-Straße 26, 33100 Paderborn

Gedruckt auf umweltfreundlichem Recyclingpapier.

VDI ZRE Publikationen:
Studien

Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0
Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes

INHALTSVERZEICHNIS

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	7
1 EINFÜHRUNG	10
1.1 Motivation	10
1.2 Zielsetzungen	14
1.3 Methodisches Vorgehen	16
2 GRUNDLAGEN UND BEGRIFFE	17
2.1 Digitale Transformation und Industrie 4.0	17
2.2 Ressourcen und Ressourceneffizienz	20
3 INDUSTRIE 4.0: STAND UND PERSPEKTIVEN	26
3.1 Technologische Basis	26
3.2 Standardisierung und Gremien	37
3.3 Architekturmodelle	38
4 DIGITALE TRANSFORMATION UND RESSOURCENEFFIZIENZ	44
4.1 Einzellösungen auf Prozessebene	44
4.2 Systemlösungen auf Ebene des Betriebs	50
4.3 Systemlösungen auf Ebene der Lieferkette	54
4.4 Systemlösungen auf Ebene des Produktlebenszyklus	56
4.5 Aktuelle Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten und Perspektiven	57
5 VORGEHENSWEISE DER WISSENSCHAFTLICHEN UNTERSUCHUNG	62
5.1 Methodik	62
5.2 Datengrundlagen zur Bewertung von Ressourceneffizienz	64
5.2.1 Datenquellen	64
5.2.2 Energieverbrauch während der Nutzungsphase	66
5.2.3 Rohstoffverbräuche und sonstige Aufwände in der Herstellungs- und Entsorgungsphase	69
5.3 Charakterisierung der digitalen Transformation	74
5.3.1 Strukturierungsansätze	74
5.3.2 Maßnahmen der digitalen Transformation	75
5.3.3 Digitaler Reifegrad	78
5.4 Untersuchungsmethodik der Fallstudien	80

6	ANALYSE DER FALLSTUDIEN	83
6.1	Identifikation relevanter Branchen	83
6.2	Auswahl der Unternehmen	85
6.3	Zusammenfassende Darstellung der Fallstudien	88
7	POTENZIALANALYSE RESSOURCENEFFIZIENZ	90
7.1	Vorgehen zur Analyse der Ressourceneffizienzpotenziale	90
7.2	Einzeldarstellung der untersuchten Praxisanwendungen	92
7.2.1	PA1: Optimierte Geschäftsprozesse	93
7.2.2	PA2: Druckluft-Leckage-App	96
7.2.3	PA3: One Piece Flow	99
7.2.4	PA4: Warehouse Management System	102
7.2.5	PA5: Data on a Stick	107
7.2.6	PA6: Virtuelle Produktsimulation	110
7.2.7	PA7: Business-Warehouse-System	113
7.2.8	PA8: Virtuelle Produktfertigung im Prototypenbau	117
7.2.9	PA9: Cloud-basierte Fertigung	120
7.2.10	PA10: FoamCreator	123
7.3	Zusammenfassende Auswertung der Praxisanwendungen	127
7.4	Abschätzung von Ressourceneffizienzpotenzialen	132
7.4.1	Vorgehen	132
7.4.2	Hochrechnungen für Deutschland	134
7.4.3	Qualitative Potenzialanalyse	144
8	MAßNAHMEN DER DIGITALEN TRANSFORMATION	147
8.1	M1: Vernetzung von Sensoren und Aktoren	147
8.2	M2: Einsatz digitaler Objektgedächtnisse	149
8.3	M3: Dezentrale Steuerung	151
8.4	M4: Maßnahmen zur Werkerunterstützung und -assistenz	152
8.5	M5: Dynamisch kooperierende Systeme und Modularisierung	154
8.6	M6: Einführung und Verwendung von Ortungs- und Lokalisierungssystemen	155
8.7	M7: Zustandsüberwachung	157
8.8	M8: Prädiktive Wartung	158
8.9	M9: Durchgängige Datenintegration	159
8.10	M10: Virtuelle Produktentwicklung	161
8.11	M11: Cloud Computing	163

9	HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR KMU, POLITIK UND WISSENSCHAFT	165
9.1	Handlungsempfehlungen für KMU	165
9.1.1	HK1: Ermittlung des Reifegrads der Digitalisierung und Auswahl von Maßnahmen	165
9.1.2	HK2: Erfassung und Auswertung von Ressourcendaten	167
9.1.3	HK3: Entwicklung von Strategien für Ressourceneffizienz im Unternehmen	171
9.2	Handlungsempfehlungen für die Politik	171
9.2.1	HP1: Vernetzung und Förderung von Beratungsangeboten zu Industrie 4.0 und Ressourceneffizienz	173
9.2.2	HP2: Kennzeichnung/Labeling der Stromverbrauchswerte von IKT und Internet-Diensten	175
9.2.3	HP3: Ausrichtung der Forschungsförderung zur Verknüpfung von Industrie 4.0 mit Ressourceneffizienz	176
9.3	Handlungsempfehlungen für die Wissenschaft	177
9.3.1	HW1: Datenerfassung, -auswertung, -präsentation durch Ansätze künstlicher Intelligenz	179
9.3.2	HW2: Verknüpfung betrieblicher Indikatoren mit natürlichen Ressourcen	180
9.3.3	HW3: Erkenntnistransfer durch Entwicklung von Praxisanwendungen aus Technolgie Demonstratoren	181
9.3.4	HW4: Identifikation von Stoffströmen und deren Synergien	182
9.3.5	HW5: Berücksichtigung von Ressourceneffizienz in der Produktentwicklung und im Recycling	183
9.3.6	HW6: Untersuchung der digitalen Transformation auf der gesamtwirtschaftlichen und gesellschaftlichen Ebene	184
10	ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT	186
11	GLOSSAR	194
	LITERATURVERZEICHNIS	203
	ANHANG 1: FALLSTUDIENPORTRÄTS	219

A1: Fallstudienporträt C&C Bark Metalldruckguss und Formenbau GmbH	219
A2: Fallstudienporträt Mader GmbH & Co. KG	224
A3: Fallstudienporträt J. Schmalz GmbH	228
A4: Fallstudienporträt MAINCOR Rohrsysteme GmbH & Co. KG	236
A5: Fallstudienporträt Sensitec GmbH	240
A6: Fallstudienporträt Hermos AG	244
A7: Fallstudienporträt Sanner GmbH	247
A8: Fallstudienporträt Festo AG & Co. KG	252
A9: Fallstudienporträt SMB Schwede Maschinenbau GmbH	259
A10: Fallstudienporträt Wetropa Kunststoffverarbeitung GmbH & Co. KG	262
ANHANG 2: RESSOURCENSELBSTEINSCHÄTZUNGSTOOL (RESET)	267

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BDE	Betriebsdatenerfassung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BWS	Business-Warehouse-System
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
CEE	Circular Economy Engineering
CO₂	Kohlenstoffdioxid
CO₂-Äq.	CO ₂ -Äquivalente
CPPS	Cyber-physisches Produktionssystem
CPS	Cyber-physikalisches System
DFKI	Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH
DiK	Datenverarbeitung in der Konstruktion
DPWS	Devices Profile for Web Services
ERP	Enterprise Resource Planning
ErP	Energieverbrauchsrelevante Produkte
FEM	Finite Elemente Methode
FGS	Frech Gating System
FU	Funktionelle Einheit
GPRS	General Packet Radio Service

HK	Handlungsempfehlungen für KMU
HMI	Human Machine Interface
HP	Handlungsempfehlungen für die Politik
HW	Handlungsempfehlung für die Wissenschaft
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
IoT	Internet of Things
IP	Internetprotokoll
IPA	Institut für Produktionstechnik und Automatisierung
ISO	International Organization for Standardization
IT	Informationstechnik
KDD	Knowledge Discovery in Databases
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LTE	Long Term Evolution
MDE	Maschinendatenerfassung
MES	Manufacturing Execution System
NFC	Near Field Communication
OEE	Overall Equipment Effectiveness
OPC	Object Linking and Embedding for Process Control
OPC-UA	Object Linking and Embedding for Process Control – Unified Architecture
PA	Praxisanwendung
PDM	Produktdatenmanagement
PIUS	Produktionsintegrierter Umweltschutz
PLM	Product Lifecycle Management
PPS	Produktionsplanung und -steuerung

ProgRess	Deutsches Ressourceneffizienzprogramm
PTW	Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen
QR	Quick Response
REP	Ressourceneffizienzpotenzial
ReSET	Ressourcenselbsteinschätzungstool
RFID	Radio-Frequency Identification
SAG	Strategiegruppe
SOA	Serviceorientierte Architektur
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SQL	Structured Query Language
SuR	Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USB	Universal Serial Bus
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDI ZRE	VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH
VPN	Virtual Private Network
WLAN	Wireless Local Area Network
WMS	Warehouse Management System
WSDL	Web Services Description Language
XML	Extensible Markup Language

1 EINFÜHRUNG

1.1 Motivation

Die digitale Transformation in der Entwicklung und Herstellung von Produkten, auch bekannt unter dem Schlagwort Industrie 4.0, wird zunehmend eine zentrale Herausforderung für die Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes in Deutschland. Die erfolgreiche Gestaltung dieser vierten industriellen Revolution ist einer der wichtigsten Voraussetzungen für den Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit des Industriestandorts Deutschlands. Die zweite große Herausforderung ist die notwendige Entkopplung des Wirtschaftswachstums vom Ressourcenverbrauch, die nur über eine zunehmend effizientere Nutzung der natürlichen Ressourcen in den Unternehmen erreicht werden kann. Die optimale Ausgestaltung der Wechselwirkung zwischen digitaler Transformation und Ressourceneffizienz sowie die konsequente Nutzung der daraus entstehenden Potenziale für eine Senkung des Verbrauchs von Material und Energie sind daher von entscheidender Bedeutung.

Im Jahr 2014 nahmen die Kosten für Materialaufwendungen mit rund 43 % den mit Abstand größten Kostenblock im verarbeitenden Gewerbe¹ ein. Die Kosten für Personal lagen demgegenüber bei knapp 19 %, die für Energie bei 1,9 %.² Obwohl im Vergleich zu den Materialaufwendungen die Energiekosten einen deutlich geringeren Anteil an der Bruttowertschöpfung ausmachen, sind diese nicht zu vernachlässigen. Denn in Deutschland entfielen 2014 29 % (2.514 PJ) der gesamten Endenergie auf das verarbeitende Gewerbe.³

¹ Verarbeitendes Gewerbe: „umfasst die mechanische, physikalische oder chemische Umwandlung von Stoffen oder Teilen in Waren. Es handelt sich dabei um Roh- oder Grundstoffe aus Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Fischerei und Fischzucht, Bergbau, Gewinnung von Steinen und Erden sowie um Erzeugnisse dieses Abschnitts selbst. Die wesentliche Änderung oder Neugestaltung von Waren wird generell als Herstellung von Waren angesehen und dem Verarbeitenden Gewerbe zugeordnet.“ (Statistisches Bundesamt (2008), S. 186).

² Vgl. Statistisches Bundesamt (2016a).

³ Vgl. Statistisches Bundesamt (2016b).

Vor diesem Hintergrund ist Ressourceneffizienz⁴ in der Produktion ein wichtiger Faktor für die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen. Denn Einsparungen im Bereich Material und Energie machen sich wirtschaftlich deutlich bemerkbar. Gleichzeitig stellt Ressourceneffizienz eine zentrale Thematik der Politik dar. Eine Motivation dafür ist die Rohstoffsicherung: Deutschland ist als rohstoffarmes Land von Importen abhängig. Der Bedarf an Rohstoffen ist heute doppelt so hoch wie 1970⁵ und es werden zunehmend sogenannte „kritische“ Rohstoffe⁶ (wie Magnesium oder Silizium) für Hightech Produkte eingesetzt.⁷ Ein weiterer wichtiger Motivationsfaktor besteht aber in der Tatsache, dass der Verbrauch an Rohstoffen und Energie ursächlich für viele globale Umwelt- und Nachhaltigkeitsprobleme ist, wie etwa den Klimawandel, die Emission von Schadstoffen in der Umwelt, aber auch für lokale und regionale Umweltfolgen des Abbaus von Rohstoffen.⁸ Diese Problematik wird auf globaler Ebene durch das Wirtschaftswachstum bevölkerungsreicher Schwellenländer gravierender. Weltweit stellt sich daher die Frage nach dem gerechten Zugang zu Rohstoffen für alle Nationen und vor allem nach den Grenzen des Planeten im Hinblick auf die Tragfähigkeit der Umwelt.

Der Begriff der Ressourcen wird heute daher in der Politik als „natürliche Ressourcen“ interpretiert: Diese umfassen im Wesentlichen einerseits die aus der Natur entnommenen Rohstoffe, andererseits die Beanspruchung der „Senke“ Umwelt und Naturhaushalt u. a. durch Emissionen in Luft und Wasser oder Deponierung von Abfällen.^{9, 10}

Das Ziel einer nachhaltigen Ressourcenwirtschaft liegt darin, das wirtschaftliche Wachstum und den Wohlstand vom Einsatz natürlicher Res-

⁴ Der Begriff Ressourceneffizienz wird in dieser Studie im Sinne eines effizienteren Umgangs mit natürlichen Ressourcen verwendet, vgl. dazu Kapitel 2.2 und Glossar.

⁵ Vgl. BMUB (2016b).

⁶ Kritische Rohstoffe: wirtschaftliche bedeutsame Rohstoffe, deren Versorgung als kritisch angesehen wird. Zur Liste und Definition der EU vgl. EU (2014).

⁷ Vgl. Marscheider-Weidemann, F. et al. (2016), S. 233 f.

⁸ Vgl. UBA (2015).

⁹ Vgl. UBA (2012).

¹⁰ Siehe auch VDI 4800 Blatt 1: 2016-02 (Näheres in Kapitel 2.2).

sources zu entkoppeln.¹¹ Die deutsche Politik hat entsprechende Zielsetzungen ausgewiesen: Im Rahmen der Nachhaltigkeitsstrategie sollen die Trends der Gesamtrohstoffproduktivität¹² der Jahre 2000 – 2010 bis 2030 fortgeschrieben werden.¹³ Des Weiteren sollen die Endenergieproduktivität um 2,1 % pro Jahr im Zeitraum von 2008 bis 2050 gesteigert und der Primärenergieverbrauch bis 2020 um 20 % und bis 2050 um 50 % gesenkt werden (Zahlen jeweils gegenüber 2008).¹⁴ Um die Erreichung dieser und der vorangegangenen Zielsetzungen zu unterstützen, wurde von der Bundesregierung 2012 das „Deutsche Ressourceneffizienzprogramm“ (ProgRess) beschlossen und 2016 fortgeschrieben (ProgRess II)¹⁵. Ein wichtiges Handlungsfeld des Programms ist die Ressourceneffizienz in der Produktion. Entsprechende Zielsetzungen verfolgen darüber hinaus auch viele Bundesländer in eigenständigen Ressourceneffizienzprogrammen und -aktivitäten.

Neue Möglichkeiten zur Steigerung der Ressourceneffizienz in der Wirtschaft werden heute aus der digitalen Transformation erwartet.¹⁶ Die durchgängige Vernetzung aller Wirtschaftsbereiche wird sowohl die industrielle Produktion selbst als auch die von Unternehmen angebotenen Produkte und Serviceleistungen tiefgreifend verändern. Zudem wird diese Vernetzung zu neuen Geschäftsmodellen und Wertschöpfungsprozessen führen.¹⁷

Das Schlagwort „Industrie 4.0“, das erstmals auf der Hannover-Messe 2011 geprägt wurde¹⁸, interpretiert diese Transformation als eine „vierte industrielle Revolution“¹⁹. Hieraus können sich erhebliche ökonomische Auswirkungen ergeben: Schätzungen zufolge kann eine erfolgreiche Digitalisie-

¹¹ Vgl. BMUB (2016b).

¹² Gesamtrohstoffproduktivität: das erwirtschaftete Bruttoinlandsprodukt und die Importe, bezogen auf das eingesetzte abiotische Primärmaterial (Raw Material Input - RMI) (Vgl. Bundesregierung (2016), S. 37).

¹³ Vgl. Bundesregierung (2016), S. 37.

¹⁴ Vgl. Bundesregierung (2016), S. 37.

¹⁵ Vgl. BMUB (2016a).

¹⁶ Vgl. Neligan, A. und Schmitz, E. (2017), S. 18.

¹⁷ Vgl. Roland Berger Strategy Consultants (2015).

¹⁸ Vgl. Bischoff, J. (2015).

¹⁹ Vgl. Roth, A. (2016).

Die Digitalisierung der Industrie zu einem zusätzlichen Wirtschaftswachstum zwischen 200 und 425 Milliarden Euro in Deutschland bis 2025 führen. Es bestehen auch große Erwartungen, dass dieses Wachstum mit Effizienzgewinnen und einer „Dematerialisierung“ einhergehen kann und der Verknappung natürlicher Ressourcen entgegenwirkt.²⁰ Gelingt diese Digitalisierung nicht, ist hingegen mit wirtschaftlichen Verlusten in Höhe von bis zu 600 Milliarden Euro zu rechnen.²¹

Möglichkeiten zur Verringerung des Verbrauchs von Materialien und Energie bieten sich prinzipiell auf allen Ebenen der Wertschöpfungskette:

- Auf der **Prozessebene** können durch bessere Steuerung bzw. Auslastung von Maschinen Energieverbräuche und Materialverluste verringert werden.
- Auf der **Produktebene** können eine bessere Wartung und ein vorausschauender Austausch von Komponenten die Lebensdauer verlängern und durch eine Kennzeichnung von Bestandteilen kann das spätere Recycling erleichtert werden.
- Die Digitalisierung von Produkten und Nutzeranwendungen kann u. a. durch das Zusammenwachsen von Produkten und Dienstleistungen zu ganz neuen **Systemlösungen bzw. -innovationen** führen.²²

Die Studie „Industrie 4.0 als Chance begreifen“ erwartet Ressourceneinsparungen durch die digitale Transformation von bis zu 50 %²³.

Die digitale Transformation bedarf jedoch selbst Ressourcen:

- Die Produktion von Komponenten der digitalen Transformation benötigt Materialien, darunter auch kritische Rohstoffe (z. B. Silizium oder Germanium für Sensoren).

²⁰ Vgl. BMBF (2013).

²¹ Vgl. BMWi (2015c), S. 4.

²² Vgl. Fraunhofer IPA und Dr. Wieselhuber & Partner GmbH (2015).

²³ Vgl. Plass, C. (2015), S.5.

- Der Betrieb von Hardware und Software benötigt elektrische Energie und trägt so zum Verbrauch (fossiler) Primärenergieträger und zur Emission von Treibhausgasen bei.

So betrug der durch Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) bedingte Stromverbrauch 2014 in Deutschland ca. 57,2 TWh^{24, 25} (entsprechend einem Anteil von rund 10 % am gesamten Stromverbrauch²⁶), davon ca. 9,6 TWh in der Industrie.²⁷ Schätzungen der Bundesregierung aus dem Jahr 2011 gehen davon aus, dass sich speziell der Strombedarf von Rechenzentren und Telekommunikationsnetzen bis 2020 verdoppeln wird.²⁸ Eine ganzheitliche Betrachtung der Chancen der digitalen Transformation zur Steigerung der Ressourceneffizienz muss daher ebenfalls die Effizienz der Bereitstellung und Nutzung der IKT berücksichtigen – auch hinsichtlich der darin enthaltenen kritischen Rohstoffe.

1.2 Zielsetzungen

Die vorliegende Studie wurde durch das VDI Zentrum Ressourceneffizienz, das im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit arbeitet, in Zusammenarbeit mit dem Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, dem Hessischen Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung sowie dem Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz beauftragt.

Ziel der Studie ist eine systematische Untersuchung der Auswirkungen der digitalen Transformation auf die Ressourceneffizienz mit Schwerpunkt auf der Ermittlung des Einflusses auf natürliche Ressourcen. Im Fokus der Studie stehen kleine und mittlere Unternehmen (KMU) des verarbeitenden Gewerbes, für die die digitale Transformation eine besondere Herausforderung

²⁴ Vgl. UBA (2017), S. 132.

²⁵ In der Studie des UBA (2017) werden zu den IKT-Technologien Desktop PC, Notebook, Monitor, Drucker, Server, Telefon und Router gezählt.

²⁶ Vgl. BDEW (2015), S. 17.

²⁷ Vgl. UBA (2017), S. 216.

²⁸ Vgl. Deutscher Bundestag (2011).

rung, aber auch eine Chance darstellt. Wesentliche Fragestellungen der Studie sind:

Forschungsfragen der Studie

- Welches sind „ressourceneffiziente Maßnahmen“ der digitalen Transformation und in welchem Umfang eröffnen sie Potenziale zur Einsparung von Ressourcen?
- Inwieweit sind „ressourceneffiziente Maßnahmen“ der digitalen Transformation schon in der Praxis angekommen und welche Erfahrungen haben Unternehmen damit gemacht?
- Welche Gute-Praxis-Beispiele gibt es für KMU und welche Herausforderungen können bei der Umsetzung einer digitalen Transformation zur Steigerung der Ressourceneffizienz für KMU bestehen?
- Wie können die Chancen der digitalen Transformation zur Steigerung von Ressourceneffizienz gezielt gefördert werden?
- Welche Handlungsansätze gibt es für Unternehmen sowie Akteure der Politik und Wissenschaft?

KMU fehlen häufig die Zeit und das Personal, um sich einen Überblick über die Möglichkeiten der Digitalisierung in der Industrie zu verschaffen. Auch das nötige Know-how zur Einführung von Maßnahmen der Digitalisierung im eigenen Betrieb ist nicht vorhanden. Dennoch werden gerade mittelständische Unternehmen wegen ihrer größeren Flexibilität im Vergleich zu Großunternehmen als besonders geeignet angesehen, die Ideen entsprechend Industrie 4.0 in Form neuer Produkte, Märkte und Geschäftsmodelle umzusetzen. Fakt ist jedoch, dass die Vorreiterrolle hinsichtlich einer digitalen Transformation bei den Großunternehmen und nicht den KMU liegt.^{29, 30}

²⁹ Vgl. Bischoff J. (2015).

³⁰ Vgl. Neligan, A. und Schmitz, E. (2017).

Vor diesem Hintergrund konzentriert sich die vorliegende Studie auf die Potenziale, welche die digitale Transformation innerhalb der Industrie - und insbesondere in KMU - zur Steigerung der Ressourceneffizienz ermöglicht. Ziel ist es darzustellen, in welchen Bereichen und in welcher Art solche Potenziale vorliegen. Zudem sollen Handlungsempfehlungen abgeleitet werden, um solche Potenziale zukünftig möglichst weitgehend auszuschöpfen. Mit Fokus auf KMU werden darüber hinaus konkrete Maßnahmen beschrieben und Gute-Praxis-Beispiele dargestellt, wie Chancen und Synergien zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Kontext der digitalen Transformation gezielt genutzt werden können.

1.3 Methodisches Vorgehen

Kernelemente der Studie sind die strukturierte Auswertung von Literatur und Expertenwissen der beteiligten Partner (Kapitel 2, Kapitel 3 und Kapitel 4), die Entwicklung einer systematischen Methodik zur Bewertung von Ressourceneffizienzpotenzialen (Kapitel 5) und die Untersuchung von Praxisbeispielen in Unternehmen (Kapitel 6 und Kapitel 7). Ergänzt wurde diese Informationsbasis durch einen Workshop mit Teilnehmenden aus Industrie, Wissenschaft, Verbänden und Verwaltung. Zudem wurde eine Tagung „Ressourceneffizienz durch Digitalisierung“ durchgeführt, bei der sich Teilnehmende aus der Industrie miteinander austauschten. Weiterhin wurden in der Studie elf Maßnahmen der digitalen Transformation identifiziert, die im Unternehmen direkt eingesetzt werden können und erhebliche Ressourceneffizienzpotenziale enthalten (Kapitel 8). Zusammenfassend wurden Handlungsansätze für KMU sowie für Akteure der Politik und der Wissenschaft abgeleitet (Kapitel 9).

2 GRUNDLAGEN UND BEGRIFFE

2.1 Digitale Transformation und Industrie 4.0

Die Begriffe „digitale Transformation“ und „Industrie 4.0“ beziehen sich auf die Verbindung der physischen mit der digitalen Welt. Konkret bedeutet dies für die Industrie und daher auch das verarbeitende Gewerbe die Verbindung von Anlagen, Maschinen, Werkstücken und Produkten mit digitalen Technologien³¹, welche durch neue Informationstechnologien, insbesondere durch das Internet und Cyber-physikalische Systeme (CPS), ermöglicht wird. Auf Basis der Digitalisierung von Prozessen und der dezentralen Erfassung von Daten entstehen Netzwerke mit (kontinuierlichem) Austausch von Informationen, die innovative und neuartige Produktions- und Wertschöpfungsketten ermöglichen und zu Systeminnovationen mit weitreichenden Veränderungen von Wirtschaft und Gesellschaft führen können.³²

Digitale Transformation

Die Bezeichnung **digitale Transformation** impliziert eine prozessbezogene Sicht auf die beschriebenen Sachverhalte: „Transformation“ wurde als politikwissenschaftlicher Begriff geprägt, der den grundlegenden Wechsel von politischen Regimen, gesellschaftlichen Ordnungen und wirtschaftlichen Systemen bezeichnet³³. Heute wird er auch für technologiegetriebene Veränderungsprozesse verwendet, wenn diese weitreichende sozioökonomische Folgen mit sich ziehen, wie dies z. B. im Falle des Übergangs des Energiesystems von fossilen zu erneuerbaren Energien der Fall ist³⁴. Solche wesentlichen Veränderungen sind auch durch die Informationstechnologie zu erwarten bzw. in Teilen bereits zu beobachten.

³¹ Vgl. BMBF (2013).

³² Vgl. RNE (2016), S. 7.

³³ Vgl. Merkel, W. (2010).

³⁴ Vgl. Büscher, C. und Schippl, J. (2013), S. 11 – 19.

Industrie 4.0

Demgegenüber bezieht sich der Begriff **Industrie 4.0** zum einen im engeren Sinne auf (produzierende) Unternehmen, zum anderen bezeichnet er weniger einen Prozess als vielmehr einen bestimmten Zustand, zu dem die digitale Transformation der Produktion führt. In einer Studie des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm AUTONOMIK für Industrie 4.0³⁵ findet sich folgende Definition:

Definition: Industrie 4.0

„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.“³⁶

Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) hat Industrie 4.0 grafisch als Haus dargestellt³⁷ (Abbildung 1): Industrie 4.0 im Sinne der zukünftigen Produktion hat als Grundlage das **Internet der Dinge und Dienste**.³⁸ Es umfasst alle Ebenen des Unternehmens und seiner Wertschöpfungsketten und kann als horizontale und vertikale Integration beschrieben werden.

³⁵ Vgl. BMWi (2015a).

³⁶ BMWi (2015a), S. 7.

³⁷ Vgl. Malanowski, N. und Brandt, J. C. (2014), S. 7.

³⁸ Das Internet der Dienste ist Teil des Internets, der Dienste und Funktionalitäten als granulare, webbasierte Softwarekomponenten abbildet, während das Internet der Dinge die Verknüpfung physischer Objekte (Dinge) mit einer virtuellen Repräsentation im Internet oder einer internetähnlichen Struktur darstellt. Die vollständige Definition befindet sich im Glossar. (Promotorengruppe Kommunikation (2013), S. 84 – 87.).



Abbildung 1: Das Industrie 4.0-Haus (Quelle: VDI e.V.)³⁹

Vertikale und horizontale Integration

- Die **vertikale Integration** steht für die vollständige Vernetzung zwischen allen Unternehmensebenen.⁴⁰ Sie besteht also in der Vernetzung von Produktionsmitteln, z. B. von Automatisierungsgeräten oder Diensten untereinander.
- Die **horizontale Integration** einer Wertschöpfungskette umfasst die Vernetzung aller Maschinen, Geräte und Mitarbeiter auf einer Unternehmensebene und vernetzt diese innerhalb der Wertschöpfungskette, d. h. zwischen Unternehmen. Die horizontale Integration über Wertschöpfungsnetzwerke, die über den einzelnen Fabrikstandort hinausgeht, ermöglicht außerdem die Bildung dynamischer Wertschöpfungsnetzwerke.⁴¹

Ähnliche Definitionen finden sich auch in der Studie „Erschließen der Potenziale der Anwendung von „Industrie 4.0“ im Mittelstand“⁴².

³⁹ Entnommen aus Malanowski, N. und Brandt, J. C. (2014), S. 7.

⁴⁰ Vgl. Malanowski, N. und Brandt, J. C. (2014), S. 6.

⁴¹ Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft und ZVEI (2015), S. 5 – 7.

⁴² Vgl. Bischoff, J. (2015).

Der Wandel hin zu Industrie 4.0 kann in unterschiedlichen Schritten, Zeitskalen und Abschnitten verlaufen. Vor diesem Hintergrund konzentriert sich die vorliegende Studie auf den Begriff der digitalen Transformation, mit dem alle unterschiedlichen Stufen, Maßnahmen oder Ebenen erfasst werden, auf denen sich Unternehmen auf dem Weg hin zur Industrie 4.0 befinden können.

2.2 Ressourcen und Ressourceneffizienz

Natürliche und betriebswirtschaftliche Ressourcen

Ressourceneffizienz ist ein heute sowohl im Bereich der Wirtschaft als auch in der Politik viel gebrauchter Begriff. In ihm kommt das unternehmerische Prinzip eines effizienten Wirtschaftens mit dem Grundprinzip der nachhaltigen Entwicklung zusammen, das „Naturkapital“ – die natürlichen Ressourcen der Gesellschaft – zu erhalten. Allerdings unterscheiden sich die Interpretationen der jeweils gemeinten Ressourcen deutlich:

Ressourcen aus betriebswirtschaftlicher und politischer Sicht

- In der betriebswirtschaftlichen Sicht umfassen **Ressourcen** alle ökonomisch notwendigen Faktoren für die Produktion, also insbesondere Betriebs- und Hilfsstoffe, Materialien und Werkstoffe, Energie, Kapital, Personal, Know-how und Zeit.⁴³
- In der deutschen und europäischen Politik wird der Begriff Ressource demgegenüber im Sinne von **natürlichen Ressourcen** wie folgt definiert:

„Ressource, die Bestandteil der Natur ist. Hierzu zählen erneuerbare und nicht erneuerbare Primärrohstoffe, physischer Raum (Fläche), Umweltmedien (Wasser, Boden, Luft), strömende Ressourcen (z. B. Erdwärme, Wind-, Gezeiten- und Sonnenenergie) sowie die Biodiversität. Es ist hierbei unwesentlich, ob die Ressourcen als Quellen für die Herstellung von Produkten oder als Senken zur Aufnahme von Emissionen (Wasser, Boden, Luft) dienen.“⁴⁴

⁴³ Vgl. Schebek et al. (2016), S. 5.

⁴⁴ UBA (2012).

Dieser Definition natürlicher Ressourcen folgt auch eine Richtlinie, mit der 2016 erstmals ein methodischer Rahmen zur Ermittlung von Ressourceneffizienz beschrieben wird: die VDI 4800 Blatt 1 „Ressourceneffizienz – Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien“⁴⁵, die durch weitere Blätter zu spezifischen Aspekten (z. B. Versorgungsrisiken von Rohstoffen) ergänzt werden wird⁴⁶.

Zusammenhang betrieblicher und natürlicher Ressourcen

Die Richtlinie VDI 4800 Blatt 1 bildet die Grundlage des methodischen Vorgehens innerhalb dieser Studie. Jedoch soll grundsätzlich sowohl der Sicht der betrieblichen als auch der natürlichen Ressourcen Rechnung getragen werden, um die gesellschaftliche Zielstellung der Verringerung des Verbrauchs natürlicher Ressourcen mit betrieblichen Handlungsmöglichkeiten zu verknüpfen. Darüber hinaus ist festzuhalten, dass der Einfluss auf die natürlichen Ressourcen in den meisten Fällen nicht unmittelbar in einem Unternehmen ermittelt werden kann.⁴⁷ Er ergibt sich vielmehr aus den Vor- oder Nachketten (Herstellung oder spätere Weiterverarbeitung, Nutzung und Entsorgung) der jeweiligen betrieblichen Ressourcen. Beispielsweise stellt elektrische Energie selbst keine natürliche Ressource dar, sie beeinflusst diese über den Verbrauch an Primärenergieträgern - z. B. Kohle - und die daraus resultierenden Umwelteinwirkungen, wie z. B. den steigenden CO₂-Gehalt der Atmosphäre und die großräumige Flächeninanspruchnahme durch den Tagebau.

Der bestehende Zusammenhang zwischen betrieblichen und natürlichen Ressourcen wird anhand der Zuordnung gängiger betrieblicher Ressourcen zu den dadurch beeinflussten natürlichen Ressourcen⁴⁸ in Tabelle 1 dargestellt. Es zeigt sich, dass die natürlichen Ressourcen durch bestimmte betriebliche Ressourcen beeinflusst werden, nämlich durch den Verbrauch

⁴⁵ Vgl. VDI 4800-1:2016-02.

⁴⁶ Derzeit liegen die Richtlinie VDI 4600: 2012-01 „Kumulierter Energieaufwand (KEA) – Begriffe, Berechnungsmethoden“ und der Richtlinienentwurf für VDI 4800 Blatt 2: 2016-03 „Ressourceneffizienz – Bewertung des Rohstoffaufwands“ vor. Die geplante Richtlinie VDI 4800 Blatt 3 „Ressourceneffizienz; Indikatoren zur Bewertung von Umweltwirkungen“ befindet sich noch in Bearbeitung.

⁴⁷ Vgl. Schebek et al. (2016), S. 3.

⁴⁸ Vgl. UBA (2012) und die leicht modifizierte Beschreibung nach VDI 4800 Blatt 1: 2016-02.

von Endenergie (elektrische oder thermische Energie), Materialien (z. B. Hilfsstoffe) und Fläche/ -Boden. Diese Teilmenge der betrieblichen Ressourcen wird als sogenannte **materielle betriebliche Ressourcen** bezeichnet. Darüber hinaus führen auf betrieblicher Ebene auch Emissionen in Luft und Wasser sowie der Anfall von Abfällen zum Verbrauch natürlicher Ressourcen in Form der Beanspruchung der Tragfähigkeit der Umwelt.⁴⁹

Ressourcen im Rahmen dieser Studie

Der Begriff der Ressourcen wird in der Studie durch die folgenden Begriffe konkretisiert:

- **natürliche** Ressourcen
- **betriebliche** Ressourcen
- **materielle betriebliche** Ressourcen
- **immaterielle betriebliche** Ressourcen

Die Definitionen können dem Glossar (S. 194) entnommen werden.

⁴⁹ Sinngemäß gilt dies auch für Vorgänge außerhalb von Betrieben: Beispielsweise wird für Transportvorgänge die materielle betriebliche Ressource Kraftstoff benötigt, welche die natürliche Ressource Erdöl verbraucht.

Tabelle 1: Zuordnung natürlicher Ressourcen zu betrieblichen Ressourcen

Natürliche Ressourcen			Betriebliche Ressourcen		
nach UBA (2012) ⁵⁰		nach VDI 4800-1 (2016)	Bezeichnung	Einheit	Beispiele
Primärrohstoffe	Primärrohstoffe (erneuerbar, fossil)	Rohstoffe	Materialien (Rohstoffe, Vorprodukte, Werkzeuge, Maschinen, Hilfs- und Betriebsstoffe)	mg, kg, t	z. B. Kunststoffe, Metalle, Chemikalien, Schmierstoffe etc.
	Primärenergieträger (erneuerbar, fossil)	Energieressourcen	Bedarf an elektrischer und thermischer Energie	kWh, MJ	Verbrauch elektrischer Energie und Wärme für z. B. Heiz- und Reinigungsvorgänge
Umweltmedien	Wasser	Wasser	Wasserverbrauch	l, m ³	Trinkwasser und Brauchwasser für z. B. Reinigungs- und Kühlvorgänge
		Ökosystemleistung	Emissionen in Wasser	kg/m ³ , g/l	Verunreinigung des Wassers durch Schadstoffe
	Luft	Ökosystemleistung	Emissionen in die Luft	kg/m ³ , g/l	Verunreinigung der Luft durch Schadstoffe
Umweltmedien-/ Physischer Raum	Boden/ Fläche	Boden/ Fläche	Flächeninanspruchnahme	m ² , ha	Bebaute Flächen für Gebäude und Straßen, Agrar- und Forstfläche
		Ökosystemleistung	Emissionen in den Boden, beseitigte Abfälle	kg/m ³ , g/l	Verunreinigung der Fläche durch Schadstoffe in den Boden oder die Deponierung von Abfällen
Strömende Ressourcen (z. B. Solar- und Windenergie)	Abgebildet über Primärenergieträger (erneuerbar)	Energieressourcen	Bedarf an elektrischer und thermischer Energie	kWh, MJ	Verbrauch elektrischer Energie und Wärme für z. B. Heiz- und Reinigungsvorgänge aus erneuerbaren Energieträgern
Biodiversität	Abgebildet über Fläche/Boden	Nicht berücksichtigt			

⁵⁰ In Anlehnung an EU (2005).

Methodik zur Ermittlung des Verbrauchs natürlicher Ressourcen

Die Ermittlung des Verbrauchs natürlicher Ressourcen aus dem Verbrauch betrieblicher Ressourcen unter Berücksichtigung von Vor- und Nachketten kann auf der methodischen Grundlage des Life Cycle Assessment (Ökobilanz) nach DIN EN ISO 14040 erfolgen. Die Ökobilanz ermittelt Stoffflüsse aus der Natur und in die Natur sowie die damit verbundenen Umwelteinwirkungen über die vollständige Prozesskette von Produkten, Materialien oder sonstigen Verbräuchen (z. B. elektrische Energie). Dieses Prinzip der Berücksichtigung der vollständigen Prozesskette – des „Lebenswegs“ – ist Bestandteil der Richtlinie VDI 4800, die dazu ebenfalls auf die Ökobilanz-Norm DIN EN ISO 14040 Bezug nimmt.

Ressourceneffizienz

Die Richtlinie VDI 4800-1:2016-02 definiert den Begriff der **Ressourceneffizienz** wie folgt: „Verhältnis eines bestimmten Nutzens oder Ergebnisses zum dafür nötigen Ressourceneinsatz.“⁵¹ Zur Ermittlung der Ressourceneffizienz muss daher ein **Nutzen** oder **Ergebnis** definiert werden. Ein solcher Nutzen könnte die Herstellung eines bestimmten Produkts sein (z. B. eines Motorblocks), aber auch die Durchführung eines bestimmten technischen Prozesses (z. B. eine Bohrung mit einer bestimmten Tiefe). Auch eine Dienstleistung, wie der Transport einer Ware über eine bestimmte Distanz oder die Bereitstellung von Informationen über elektronische Medien, kann als Nutzen definiert werden. Unter Bezug auf die Norm DIN EN ISO 14040 kann der Begriff des Nutzens oder Ergebnisses mit dem in der Ökobilanz verwendeten Begriff der **Funktionellen Einheit** (FU) gleichgesetzt werden, der definiert ist als „quantifizierter Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit“⁵².

Bezogen auf diesen Nutzen in Form eines Gegenstands oder Sachverhalts erfolgt dann im nächsten Schritt die Festlegung sogenannter **Systemgrenzen** (Systemrahmen), innerhalb derer die Ressourcenverbräuche zu ermit-

⁵¹ VDI 4800-1:2016-02, S. 6 – 10.

⁵² DIN EN ISO 14040:2009-11, S. 10.

teln sind. Diese Festlegung der Systemgrenzen muss der bereits erwähnten Anforderung folgen, den vollständigen Lebensweg im Sinne einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 zu berücksichtigen, damit mögliche Problemverlagerungen auf vor- bzw. nachgeschaltete Prozesse identifiziert werden können.⁵³ Die VDI 4800 Blatt 1 besagt, wie in Abhängigkeit eines bestimmten Nutzens die Systemgrenzen zu ermitteln sind. Diese Hinweise orientieren sich an der Überlegung, dass die mögliche Steigerung der Effizienz („Effizienzpotenzial“) von unterschiedlichen Typen einer Innovation beeinflusst wird. Diese Typen werden für vier unterschiedliche Innovationsstufen beschrieben: Typ 1: Produktverbesserung, Typ 2: Redesign-Innovation, Typ 3: Konzeptinnovation und Typ 4: Systeminnovation. Je höher der Typ der Innovationsstufe ist, desto größer sind die Systemgrenze und die Veränderung am Prozess bzw. Produkt. Bei Typ 1 können kleine (z. B. Werkstoffsubstitution) und für Typ 2 größere Veränderungen (z. B. Änderung des Fertigungsverfahrens) hervorgerufen werden. Im Gegensatz dazu werden unter Typ 3 Veränderungen am Produktkonzept und unter Typ 4 signifikante Veränderungen des Produktkonzepts, die auch eine Veränderung der benötigten Infrastruktur hervorrufen, verstanden.⁵⁴

⁵³ Vgl. VDI 4800-1:2016-02, S. 7.

⁵⁴ Vgl. VDI 4800-1:2016-02, S. 35.

3 INDUSTRIE 4.0: STAND UND PERSPEKTIVEN

3.1 Technologische Basis

Industrieunternehmen sind heute mit einem zunehmenden nationalen wie internationalen Wettbewerb konfrontiert. Es erfordert insgesamt eine ständige Anpassung der Produkte, Produktion und Logistik an die derzeitige Marktsituation, Produktivitätsverbesserungen und Innovation, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz ergeben hier einen wichtigen Baustein für die Optimierung.

Wichtige Grundlage ist die Verfügbarkeit aktueller Informationen an jedem Ort und zu jedem Zeitpunkt im Lebensweg eines Produkts. Der Lebensweg eines Produkts umfasst dessen Entwicklung, Herstellung, Betrieb und Instandhaltung bis hin zum Recycling. Auf dieser Basis können alle an der Wertschöpfung Beteiligten (Menschen, Maschinen und Produkte) an Zielvorgaben und an die aktuelle Situation angepasst werden und optimiert ihre Aufgaben ausführen. Eine weitreichende Vernetzung der Beteiligten liefert hier den Schlüssel zum Erfolg.

Der Einsatz von Sensorik und Aktorik, welche mit Informations- und Kommunikationstechnologien ausgestattet und vernetzt sind, bildet einen Ansatzpunkt für die Umsetzung auf der technischen Ebene. Damit sind auch die starke Digitalisierung der technischen und geschäftlichen Prozesse sowie die Verflechtung der physischen mit der digitalen Welt verbunden. In diesem Zusammenhang werden sogenannte Cyber-physische Systeme (CPS) sowie das „Internet der Dinge und Dienste“ als weitere Schlüsselkonzepte verwendet, um diese Leitideen zu strukturieren.⁵⁵

Das Ziel ist es, intelligente Wertschöpfungsnetzwerke aufzubauen. Diese bestehen aus intelligenten, digital vernetzten Systemen, die eine Vision einer selbstorganisierten Produktion, einer „Smart Factory“ ermöglichen: Maschinen, Anlagen, Logistik und Produkte kommunizieren und kooperieren direkt miteinander und mit dem Menschen. Unternehmensübergrei-

⁵⁵ Vgl. Bischoff, J. (2015).

fende Produktions- und Logistikprozesse werden intelligent miteinander gekoppelt, um die Produktion effizienter und flexibler zu gestalten.

Insgesamt verändern diese Entwicklungen radikal die Art und Weise, wie Produkte entwickelt, hergestellt, verkauft und betrieben werden, weshalb dieser Transformationsprozess im Kontext der industriellen Produktion auch als die vierte industrielle Revolution bezeichnet wird.⁵⁶

Der Begriff „Industrie 4.0“ bietet einen Rahmen, vorausgegangene, abgegrenzte Entwicklungstrends aus der Mikrosystemtechnik, Automatisierung und Produktionsinformationstechnik (u. a. Produktlebenszyklusmanagement, digitale Fabrik und Fabrikbetrieb) zu vereinen. Für Industrie 4.0 sind dabei folgende Aspekte im Unterschied zu den vorausgegangenen fachspezifischen Entwicklungstrends kennzeichnend:⁵⁷

- eine ganzheitliche Herangehensweise ausgehend vom Produktionslebenszyklus,
- die echtzeitnahe Synchronisierung der physischen Welt mit den Modellen in der digitalen Welt,
- eine flexible und sichere Vernetzung der Informationen in unterschiedlichen Werkzeugen und Systemen.

Im Folgenden werden neben Cyber-physischen Systemen weitere mit dem Thema „Industrie 4.0“ zusammenhängende Konzepte und Technologien vorgestellt.

Cyber-Physische Systeme (CPS)

Allgemein werden Cyber-physische Systeme (CPS) definiert als:

„Eingebettete Systeme, Produktions-, Logistik-, Engineering-, Koordinations- und Managementprozesse sowie Internetdienste, die mittels Sensoren unmittelbar physikalische Daten erfassen und mittels Aktoren auf

⁵⁶ Vgl. Promotorengruppe Kommunikation (2013).

⁵⁷ Vgl. Lucke, D. et al. (2014), S. 8.

physikalische Vorgänge einwirken, mittels digitaler Netze untereinander verbunden sind, weltweit verfügbare Daten und Dienste nutzen und über multimodale Mensch-Maschine-Schnittstellen verfügen. CPS sind offene soziotechnische Systeme und ermöglichen eine Reihe von neuartigen Funktionen, Diensten und Eigenschaften.“⁵⁸

CPS bauen hierbei auf mechatronischen Systemen oder auch „Smarten Objekten“ auf. Ein CPS besteht aus Sensoren, Aktoren, einer Benutzerschnittstelle und Funktionen, die alle Aufgaben der Datenaufnahme, -verarbeitung und -ausgabe ausführen. Die Sensoren und Aktoren können, im Unterschied zu mechatronischen Systemen, smarte in das CPS eingebettete Systeme sein, welche bereits „höherwertige“ Funktionen zur Signalverarbeitung oder Regelung sowie Internetprotokoll-(IP-)fähige, also internetfähige Kommunikationsschnittstellen beinhalten.

Der entscheidende Unterschied zu vorangegangenen Ansätzen liegt in der ständigen Vernetzung der Komponenten und in der Verwendung von Internettechnologien, Softwareservices, Serviceorientierten Architekturen (SOA) sowie in der Verwendung offener Standards.⁵⁹ CPS, welche für Anwendungen in der Produktion spezialisiert sind, werden als sog. Cyberphysische Produktionssysteme (CPPS) bezeichnet.

CPS können dabei als hoch verteilte Systeme je nach Anwendungsfall realisiert werden. Neben der intelligenten Vernetzung ist ein Vorteil, dass die Rechenleistung verteilt werden kann und damit ggf. auch Funktionen erst wirtschaftlich realisierbar sind. Ein Beispiel dafür bieten Teleserviceplattformen, welche über das Internet mit der Maschine verbunden sind. Die Maschinen speichern dezentral die erfassten Maschinenzustandsdaten und führen bereits eine Sensordatenverarbeitung durch, die eine nur geringe Rechenleistung benötigt, z. B. eine Mittelwertbildung über einen Messzeitraum. Es werden lediglich die verarbeiteten Messwerte an den cloudbasierten Datenspeicher übertragen, um das Kommunikationsnetzwerk so gering wie möglich zu belasten. Aus dem cloudbasierten Datenspeicher wiederum

⁵⁸ Promotorengruppe Kommunikation (2013).

⁵⁹ Vgl. Lucke, D. et al. (2014), S. 13.

kann eine Verschleißsimulation einer Maschinenkomponente, welche eine hohe Rechenleistung benötigt, auf einem zentralen Server ausgeführt werden. Das Ergebnis wird anschließend einem weiteren Server mit mittlerer Rechenleistung zur Verfügung gestellt, auf dem die webbasierte Benutzeroberfläche läuft. Je nach Anwendung kann die Systemgrenze eines CPS von Maschinenkomponenten über Maschinen bis hin zu ganzen Fabriken und Wertschöpfungsnetzwerken, welche über die gesamte Welt verteilt sein können, reichen. Aus technologischer Sicht sind CPS den verschiedenen Ebenen, welche diese abbilden, zugeordnet. Dabei sind Sub-CPS oder CPS-Komponenten meist Teil der Infrastruktur einer Maschine oder Anlage. Insgesamt können mit CPS neuartige Produkte realisiert und Daten vielfältiger und in höheren Mengen erzeugt werden. Aufgrund dieser Eigenschaften der Komponenten entstehen sog. intelligente Produkte, die in der Regel aus drei Elementen bestehen:⁶⁰

- dem physischen Element, das die Grundfunktionalität des Produkts vorgibt,
- dem intelligenten Element, das zukünftig die Leistung des physischen Elements verstärkt und
- dem Vernetzungselement, das die Verlagerung von Teilen der Intelligenz aus dem Produkt ermöglicht.

Smarte Sensoren und Aktoren

Sensoren sind technische Bauteile, welche Informationen über die Umwelt durch die qualitative oder quantitative Erfassung bestimmter physikalischer oder chemischer Eigenschaften gewinnen. Smarte Sensoren sind darüber hinaus fähig, die erfassten Signale in Form digitaler Daten umzuwandeln und weiterzuleiten. Sie verfügen außerdem über eine IP-fähige Kommunikationsschnittstelle. Somit handelt es sich um eingebettete Systeme, welche die Messwerte auch direkt verarbeiten können und daher dem übergeordneten System nur Messwerte außerhalb der Toleranz übertragen.

⁶⁰ Vgl. Fraunhofer IPA und Dr. Wieselhuber & Partner GmbH (2015), S. 15.

Die smarte Sensorik wird aktuell durch den Trend der Miniaturisierung und der Integration von Funktionen vorangetrieben, z. B. zur Signalverarbeitung und Kommunikation direkt im Sensor als Mikrosystem. Typisch dafür sind Beschleunigungssensoren, Gyroskope oder Mikrofone. Ein weiterer Trend besteht in der softwarebasierten Realisierung bisher fest „verdrahteter“ Funktionen mit flexibel programmierbaren Prozessoren. Ziel hierbei ist es, eine Verbesserung oder eine Nachrüstung von Funktionen in der Betriebsphase gleichzeitig zu ermöglichen. Ein weiterer Trend liegt in der Verwendung von IP-fähigen Kommunikationsschnittstellen wie z. B. Ethernet in Verbindung mit Transmission Control Protocol (TCP/IP) und Web Services. Neben der klassischen Sensorik können hier auch Technologien zur automatischen Identifikation und Datenerfassung (Auto-ID) von Objekten, beispielsweise über Radio-Frequency Identification (RFID), hinzugezählt werden.

Aktoren sind Komponenten, die das physikalische Umfeld beeinflussen. Es handelt sich um Systeme aus Elektronik, Mechanik und Software-Programmen, die elektrische Signale in Bewegungen, Kräfte und Momente umwandeln. Durch Aktoren kann ein Controller ein System beeinflussen. Smarte Aktoren verfügen zusätzlich über integrierte Funktionen, wie einen Analog-Digital-Umsetzer, und sind über ihre IP-Fähigkeit durch fremde CPS ansteuerbar. Im Bereich der agierenden Mikrosysteme und Mikroelektronik (smarte Aktorik) sind die Integration von Funktionen, z. B. zur Regelung, Zustandsdiagnose und Restlebensdauervorhersage oder „Plug and Produce“, für eine einfachere und schnellere Inbetriebnahme Trends. Durch den Einsatz cyber-physischer Zusatzmodule, wie z. B. intelligenter Messmittel oder Werkzeuge, wird angestrebt, zusätzliche Prozessschritte einfach zu integrieren, um das Einsatzspektrum von Werkzeugmaschinen flexibel anpassen zu können.

Analog dazu stellen Benutzerschnittstellen Bausteine von CPS dar, die meist Teil eines übergeordneten CPS, z. B. einer Maschine, sind. Dabei wird zwischen dem physischen Teil, der Hardware, und den Benutzerschnittstellen einer Software unterschieden. Einer der wichtigsten Trends ist hierbei die Verbreitung von multimodalen Schnittstellen. Dabei werden mehrere Kommunikationskanäle nebeneinander genutzt, um dadurch die Interaktion mit dem CPS intuitiver zu gestalten. In der Konsumgüterindustrie wird

dieser Ansatz bereits vielfach umgesetzt, indem Smartphones und Tablets über einen Touchscreen, aber auch über Spracheingaben gesteuert werden. Analog dazu kommen sprachverarbeitende Systeme z. B. für Pick-by-Voice-Systeme in modernen Logistikzentren zum Einsatz. Dabei handelt es sich um Systeme mit Spracherkennungsverfahren für die beleglose Kommissionierung im Lager.⁶¹

Die intelligente Fabrik (Smart Factory)

Eine Vernetzung von smarten Objekten kann unternehmensweit oder gar unternehmensübergreifend durch CPS realisiert werden. Diese bilden die Grundlage für eine Umsetzung einer Smart Factory. Dabei interagieren verschiedene Objekte in einem Produktionssystem bidirektional zwischen Mensch und Maschine.

Typische Architekturen für Maschine-zu-Maschine-Anwendungen bestehen aus Datenendpunkten für Sensor- und Aktorennetzwerke, Kommunikationsnetzwerken, Datenbankservern, Middleware, welche die unterschiedlichen Teilnehmer auf einer höheren Kommunikationsebene bzw. auf der Softwareebene verbindet, sowie der Software, die die Anwendungslogik enthält. Das Kommunikationsnetzwerk kann dabei ausgelegt sein als lokales Netz (Local Area Network - LAN), als Weitverkehrsnetz, als das Internet bzw. das Internet der Dinge (Internet of Things - IoT), als das kabellose Internet der Dinge (Wireless Internet of Things - WIoT), als kabelloses lokales Netz (Wireless Local Area Network - WLAN) oder als Mobilfunknetz.

Informationen, die in der Smart Factory verteilt und bereitgestellt werden, können auftragsspezifisch sowie produkt- oder prozessbezogen sein. Sie können auch Wissen zur Fabrikstruktur sowie zu den in der Fabrik zum Einsatz kommenden betrieblichen Ressourcen beinhalten. Produktbezogene Informationen können ein Produkt bis zum Ende des Produktlebens begleiten und so dem Hersteller durch Produktrückgabe, z. B. zur Wieder- oder Weiterverwertung, bereitgestellt werden. Im Rahmen der Auftrags-

⁶¹ Vgl. Lucke, D. et al. (2014), S. 16 - 32.

zeugung entstehen auftragsbezogene Informationen, die im Laufe der Auftragsabwicklung erweitert und verwendet werden. Informationstechnik (IT-)Systeme unterstützen dabei die Integration der verschiedenen Informationsquellen.⁶²

Die Fabrik 4.0 stellt ein Unternehmen als vernetztes, globales System auf mikroökonomischer Ebene dar. Außerhalb der Fabrik gibt es ein 4.0-Zulieferernetzwerk (Logistik 4.0: voll integrierte Lieferkette), Ressourcen der Zukunft (erneuerbare Energien, alternative Rohstoffe) sowie neue Kundenanforderungen. Innerhalb der Fabrik werden neue Produktionstechnologien, neue Materialien und neue Wege der Datenspeicherung, -verarbeitung und -nutzung betrachtet. Zu den wichtigsten Technologien zählen Cloud Computing, Big Data, die Sicherheit gegenüber Angriffen und Manipulation der IT-Systeme, fortgeschrittene Fertigungssysteme (Advanced Manufacturing Systems) durch CPS, fahrerlose Transportsysteme, Robotik sowie 3D-Druck/additive Fertigung, die eine Fabrik 4.0 ausmachen.⁶³

Eine Smart Factory kann individuelle Kundenwünsche berücksichtigen und sogar Einzelstücke wirtschaftlich herstellen. Die Produktion ist durchgängig transparent, kann kurzfristig verändert werden und flexibel auf Störungen und Ausfälle reagieren. Darüber hinaus bietet Industrie 4.0 die Chance zur Bewältigung aktueller Herausforderungen der Material- und Energieeffizienz sowie der urbanen Produktion. Ressourcenproduktivität und -effizienz lassen sich in einer Smart Factory fortlaufend und über das gesamte Wertschöpfungsnetzwerk hinweg verbessern.⁶⁴

Ein wesentlicher Effekt einer intelligenten Vernetzung betrifft die Auslagerung von Produktfunktionalitäten in die „Cloud“. Cloud Computing beschreibt im Allgemeinen das Bereitstellen von Rechen- und Speicherkapazitäten über das Internet als Service. Hierbei gibt es verschiedene Ausprägungen, was das Dienstleistungsangebot umfasst.

⁶² Vgl. Fraunhofer IPA und Dr. Wieselhuber & Partner GmbH (2015), S. 15 – 16.

⁶³ Vgl. Roland Berger Strategy Consultants (2014), S. 9 – 11.

⁶⁴ Vgl. Plattform Industrie 4.0 (Hrsg.) (2013), S. 5.

Das Cloud Computing realisiert den Datenaustausch zwischen Produkt und Betriebsumfeld, Hersteller, Nutzer und anderen Systemen. Ebenso kann eine Plattform für das Speichern von Daten sowie zur Ausführung von Softwarediensten gebildet werden.⁶⁵ Um Informationen bedarfsgesteuert auszuwerten und über das Internet bereitstellen zu können, werden lokale Services und Prozessabläufe in die Cloud versetzt.⁶⁶

Big Data

Die Entwicklung hin zu Industrie 4.0 ist mit einem enormen Datenwachstum verbunden. Um diese immer größere Datenmenge sinnvoll verwalten und nutzen zu können, hat sich ein Ansatz zum Umgang mit Massendaten entwickelt: „Big Data“. Unter diesem Begriff werden die wirtschaftlich sinnvolle Sammlung und Anwendung entscheidungsrelevanter Erkenntnisse aus qualitativ vielfältigen und unterschiedlich strukturierten Informationen verstanden. In diesem Ansatz kommen somit verschiedene Disziplinen rund um die Verwaltung und die Verwendung großer Datenmengen zusammen.⁶⁷

Die Erfassung und Auswertung generierter Daten spielen eine immer größere Rolle. Dabei handelt es sich um Daten zu Prozessen, Qualitätsmerkmalen, Produkten und Beschäftigten sowie deren Umfeld, mit dem Ziel einer Prozess- und Qualitätsverbesserung. Im Bereich der Produktion, wo steigende Qualitätsanforderungen, eine erhöhte Komplexität und ein hoher Kostendruck konkurrieren, sind die Erfassung und Analyse von Prozessdaten von großem Mehrwert.⁶⁸ 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 Stillstandzeiten führen⁶⁹, was wiederum die Stand-by-Verluste minimiert und somit Energie für die Bedienung der Anlagen einspart.

⁶⁵ Vgl. Fraunhofer IPA und Dr. Wieselhuber & Partner GmbH (2015), S. 15.

⁶⁶ Vgl. Fraunhofer IPA und Dr. Wieselhuber & Partner GmbH (2015), S. 14.

⁶⁷ Vgl. Fraunhofer IPA und Dr. Wieselhuber & Partner GmbH (2015), S. 14.

⁶⁸ Vgl. WGP (2016), S. 24 – 25.

⁶⁹ Vgl. McKinsey Digital (2015), S. 11.

Data-Mining

Die Grundlage der material- und energieeffizienten Gestaltung von Produktionsprozessen bildet unter anderem der Einsatz von Systemen zur Fertigungsdatenerfassung und -verarbeitung.

Der dafür grundlegende technologische Ansatz umfasst das Gewinnen von neuen Informationen aus vorhandenen Daten und wird „Data-Mining“ genannt. Dabei werden quantitative Daten aus verschiedenen Perspektiven rechnerisch analysiert, um Muster, Kategorisierungen und die Zusammenfassung potenzieller Beziehungen und Einflüsse zu identifizieren.⁷⁰

Einen wichtigen Grundstein dafür bilden Messungen in Echtzeit, die dadurch gekennzeichnet sind, dass sie in sehr kurzen Abständen durchgeführt werden. Sie sind auch stark in den Fertigungsprozess integriert, wobei sich – je nach Anforderung der Anwendung – zwischen In-Prozess-, Post-Prozess- und Inline-Messungen unterscheiden lässt. Lieferanten für Echtzeitdaten sind externe Sensoren, oft aber auch Maschinen- oder Anlagensteuerungen. Onlinemessungen sind kontinuierliche und sich wiederholende Messungen mit hoher Messrate während des Prozesses. Sie berücksichtigen keine Anforderungen bezüglich der Echtzeitfähigkeit.⁷¹

In der Praxis wird der Begriff „Data-Mining“ oft synonym zu „Knowledge Discovery in Databases“ (KDD) verwendet. KDD beinhaltet zusätzlich zum eigentlichen Data-Mining auch die Vorbereitung, also die Analyse und Bewertung bestehender Daten sowie die Evaluation der Ergebnisse. Bestimmte Datenpunkte werden dabei auf Konsistenz (z. B. widersprüchliche Start- und Endzeiten von Prozessen), Korrektheit (z. B. zunehmende Mengenangabe bei Fertigungsprozessen) und Vollständigkeit überprüft. Außerdem findet ein Test auf stochastische Abhängigkeit statt, damit die Daten unabhängig von dem Fehler selbst oder anderen Einflüssen berichtigt werden können. Mit dem Ziel, (Quer-) Verbindungen und Trends zu erkennen, werden nach der Analyse und Bewertung generische Algorithmen (z. B.

⁷⁰ Vgl. Schmitt, R.; Brecher, C.; Nau-Hermes, M. und Berners, T. (2015), S. 33.

⁷¹ Vgl. Schmitt, R.; Brecher, C.; Nau-Hermes, M. und Berners, T. (2015), S. 15 – 16.

Decision Tree Learning) auf die Datensätze angewendet. Im Anschluss findet eine Berichtigung der fehlerbehafteten Datenpunkte statt.⁷²

3D-Druck

Eine ausgesprochene Zielmarke von Industrie 4.0 stellt die Maßanfertigung zu Kosten der Großserienproduktion dar. Schlüsselfaktoren sind dabei komplexe Softwarelösungen, internetbasierte Kommunikationstechniken, aber auch disruptive Technologien, die Wertschöpfungsstufen auf neuartige Weise miteinander vernetzen.⁷³

Industrie 4.0 bringt somit mehr Freiheit und Flexibilität in die Produktionsprozesse, da die Produktion in Losgröße eins zu relativ niedrigen Kosten ermöglicht wird. Ebenfalls können Vertriebsprozesse von Ersatzteilen oder Produkten von geringer Komplexität vereinfacht werden, indem nur Daten übertragen werden. Lediglich die physische Produktion sollte lokal stattfinden. Dies wird im Fall der 3D-Druck-Technologie sichtbar: Der Markt für 3D-Drucker und entsprechenden Dienstleistungen wird sich bis 2017 gegenüber 2012 schätzungsweise fast verdreifachen.⁷⁴

Die 3D-Druck-Technologie, die einst lediglich bei Polymeren und Metallen einsetzbar war, ist inzwischen für eine Reihe von Stoffen wie Glas, Biozellen, Zucker und Zement geeignet. Dabei hat sich die maximale Größe von 3D-gedruckten Teilen in den letzten 25 Jahren mehr als verzehnfacht.⁷⁵

Ein renommierter britischer Hersteller von Flugzeugmotoren hat z. B. als Ziel, die 3D-Druck-Technologie für die Fertigung von Motorenkomponenten einzusetzen. Einige dieser Teile weisen lange Durchlaufzeiten auf, die Lieferzeiten betragen bis zu 18 Monate. Der 3D-Druck würde diesen Prozess deutlich verkürzen und die Produktion von Leichtbauteilen mit einem noch geringeren Gewicht ermöglichen.⁷⁶

⁷² Vgl. WGP (2016), S. 29.

⁷³ Vgl. DIHK (2015), S. 5 - 6.

⁷⁴ Vgl. Roland Berger Strategy Consultants (2014), S. 12.

⁷⁵ Vgl. McKinsey Digital (2015), S. 13.

⁷⁶ Vgl. Roland Berger Strategy Consultants (2014), S. 18.

Digitaler Schatten

Die Verknüpfung der zuvor genannten Technologien führt unmittelbar zu einem hinreichend genauen digitalen Abbild der Prozesse „[...] in der Produktion, der Entwicklung und angrenzender Bereiche mit dem Zweck, eine echtzeitfähige Auswertungsbasis [...]“⁷⁷ aller relevanten Daten zu erstellen. Dies wird als digitaler Schatten definiert. Analog zum Flugschreiber in der Luftfahrt, ist der digitale Schatten als Produktionsschreiber zu verstehen, der einerseits Auskunft über vergangene und aktuelle Zustände geben kann und andererseits auch eine Prognose zukünftiger Zustände ermöglicht. Der digitale Schatten veranschaulicht zunächst den realen Produktionsprozess in der virtuellen Welt. Darauf aufbauend stellt der digitale Zwilling, ein weit verbreiteter Begriff, durch ein Prozessmodell und durch Simulation ein verfeinertes und meist spezialisiertes Modell einer Maschine oder Anlage dar.

Zur Erzeugung eines digitalen Schattens muss zunächst eine fehlerfreie Datengrundlage vorliegen, bevor die Daten verdichtet und weiterverarbeitet werden. Gleichzeitig muss bei der Speicherung der Datensätze auch eine eindeutige Rückverfolgbarkeit der Daten sichergestellt werden, damit eine valide Auswertungsbasis entstehen kann. Dies erfordert somit eine umfassende Aufnahme der Produktionsdaten aus verschiedenen Quellen. Beispielsweise können Auftragsdaten aus einem System zur Maschinendatenerfassung (MDE) cloudbasiert dezentral gespeichert und verarbeitet werden.⁷⁸ So postuliert Siemens, dass mit dem digitalen Zwilling vorherrschende Potenziale zur Verbesserung der Effizienz und Qualität im Maschinenbau ausgeschöpft werden können. Damit verbundene Vorteile können z. B. eine unkomplizierte Inbetriebnahme, ein fehlerfreier Betrieb oder auch kurze Umrüstzeiten sein.⁷⁹

⁷⁷ Knüpfner, G. (2016).

⁷⁸ Vgl. WGP (2016), S. 23.

⁷⁹ Vgl. Siemens Aktiengesellschaft (2015).

3.2 Standardisierung und Gremien

Für ein effizientes Zusammenwirken unterschiedlichster Systeme verschiedenster Anwender ist die Entwicklung von Standards und Normen von besonderer Bedeutung. Die Umsetzung neuer Technologien und Konzepte durch die zunehmende digitale Transformation der Industrie kann mit Hilfe festgelegter Standards und Normen abgesichert werden.

Normungsgremien und deren Aufgaben

- Der DIN/DKE-Steuerkreis Industrie 4.0 hat als Hauptaufgabe, das Thema Industrie 4.0 aus Sicht der Normung strategisch, konzeptionell und organisatorisch weiterzuentwickeln. Unter diesem Steuerkreis wurde der Arbeitskreis „Normungs-Roadmap“ eingerichtet.⁸⁰
- Von diesem Arbeitskreis wurde auch die zweite Version der Deutschen Normungs-Roadmap zu Industrie 4.0 fortgeschrieben. Er ist ein Wegweiser für Akteure aus verschiedenen technologischen Sektoren und unterstützt forschungs- und entwicklungsbegleitend die Marktakzeptanz neuer Technologien.⁸¹
- Zur Hannover-Messe 2016 wurde der „Standardisation Council Industrie 4.0“ gegründet. Ziel ist die Sicherstellung der Initiierung und Koordinierung von Standards der digitalen Transformation. Die Initiative soll Standardisierungsprozesse beschleunigen sowie die Wettbewerbsfähigkeit des deutschen Industriestandorts stärken. Neue Industrie 4.0-Lösungen und die darin genutzten Standards können durch eine enge Zusammenarbeit mit dem neu gegründeten Verein „Labs Network Industrie 4.0“ getestet werden.⁸²
- Das Technical Management Board der International Organization for Standardization (ISO) hat die Einrichtung einer Strategiegruppe (SAG) zu dem Themenbereich Industrie 4.0/Smart Manufacturing vereinbart. Dabei wird eine enge Kooperation mit der Internationalen Elek-

⁸⁰ Vgl. DIN (2015b), S. 21.

⁸¹ Vgl. DIN (2015b), S. 7.

⁸² Vgl. Plattform Industrie 4.0 (2016).

trotechnischen Kommission und der Internationalen Fernmeldeunion angestrebt. Zu den Aufgaben der SAG zählt die Erarbeitung einer Definition von Industrie 4.0. Darüber hinaus sollen der Bestand der aktuell vorhandenen Normen und die derzeit laufenden Normungsaktivitäten ermittelt werden.⁸³

3.3 Architekturmodelle

Die Industrie 4.0-Fabrik wird geprägt sein von einem bisher nicht gekannten Ausmaß an Automation unter massiver Nutzung des Internets. Unterschiedliche Systeme müssen miteinander kommunizieren und interagieren. Damit dies gelingen kann, müssen Schnittstellen harmonisiert werden. Dies setzt wiederum voraus, dass sich die Ausgestaltung dieser Schnittstellen an möglichst international abgestimmten Normen und Standards orientiert.

Eine Referenzarchitektur, also eine einheitliche Begriffs- und Methodenstruktur, bildet dafür die Basis. Sie schafft eine gemeinsame Struktur und Sprache für die einheitliche Beschreibung und Spezifikation konkreter Systemarchitekturen für die Anwendung. Von der Plattform Industrie 4.0 existiert ein Vorschlag für ein lösungsneutrales Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0), das Grundlage für die weitere Arbeit der Plattform ist (Abbildung 2).⁸⁴

Solche Architekturen sollen die Vernetzung der Unternehmensleitebene mit der Betriebs-, Prozess- und Steuerungsleitebene bis hin zur Feldebene ermöglichen. Um kundenspezifische Unternehmens- und Fertigungsprozesse aufbauen zu können, sind „Plug-and-Produce“-fähige Fertigungsmodule, eine optimierte Produktionsplanung und -steuerung im Kundentakt mit der Möglichkeit einer Ad-hoc-Vernetzung von Produkten und Ressourcen zu realisieren. Dafür müssen die IT-Systeme der Unternehmensleitebene (Office Floor) mit den Systemen der Produktion (Shop Floor) vernetzt werden und in der Lage sein, ohne Barrieren und Medienbrüche miteinan-

⁸³ Vgl. DIN (2015a).

⁸⁴ Vgl. Plattform Industrie 4.0 (2017).

der zu kommunizieren. Dies sind die Grundlagen für eine kundenspezifische, variantenreiche und individualisierte Produktion.⁸⁵

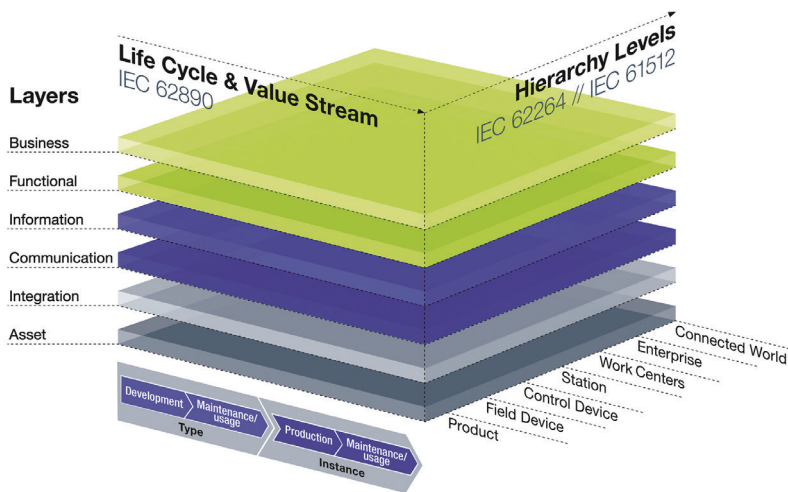


Abbildung 2: Referenzarchitekturmodell / Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0)⁸⁶

Das dreidimensionale Modell stellt den Industrie 4.0-Raum dar. In seinen Grundzügen orientiert es sich am Smart Grid Architecture Model (SGAM), das von der europäischen Smart Grid Coordination Group (SG-CG) definiert wurde. Anhand der Industrie 4.0-Erfordernisse wurde es angepasst und erweitert.

Die senkrechte Achse bildet die Schichten der unterschiedlichen Sichtweisen ab, wie Datenabbild, funktionale Beschreibung, Kommunikationsverhalten, Hardware/Assets oder auch Geschäftsprozesse. Dies entspricht dem Vorgehen in der IT, komplexe Projekte in überschaubare Teileinheiten zu gruppieren.

⁸⁵ Vgl. Plass, C. (2015), S. 8.

⁸⁶ Plattform Industrie 4.0 (2015), S. 7.

Ein weiterer wichtiger Aspekt besteht in der Darstellung des Produktlebenszyklus mit seinen enthaltenen Wertschöpfungsketten. Dieser wird in der links abgebildeten waagerechten Achse veranschaulicht. Somit können in dem Referenzarchitekturmodell auch Abhängigkeiten dargestellt werden, z. B. die durchgängige Datenerfassung über den gesamten Lebenszyklus.

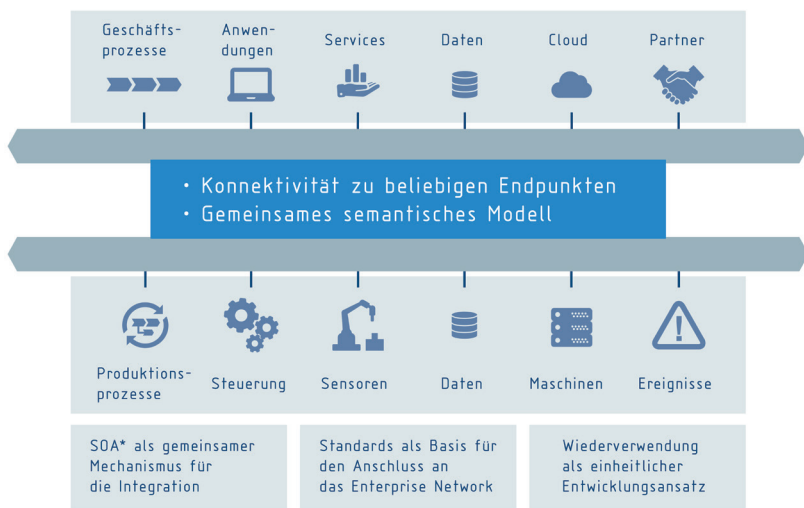
Die dritte Achse zeigt die Verortung von Funktionalitäten und Verantwortlichkeiten innerhalb der Fabriken oder Anlagen. Dabei handelt es sich nicht um Geräteklassen oder Hierarchieebenen der klassischen Automatisierungspyramide, sondern um eine funktionale Hierarchie. Somit schafft das Referenzarchitekturmodell die Voraussetzung, um hoch flexible Konzepte zu beschreiben sowie die schrittweise Migration aus der heutigen in die Industrie 4.0-Welt zu realisieren.⁸⁷

Die aktuellen Organisationsstrukturen von Unternehmen bestehen aus hierarchisch getrennten Ebenen, z. B. das Unternehmensnetzwerk oder Enterprise Network (Office Floor) oder das Echtzeitnetzwerk oder Real Time Network (Shop Floor). Das Enterprise Network beinhaltet die gesamte Vernetzung der Systeme und Anwendungen der Geschäftsprozesse in der Produktentwicklung, der Auftragsabwicklung und der Logistik sowie im Bereich Finanzen. Das Real Time Network enthält alle Systeme in der Produktion: Maschinen, Steuerungssysteme und Sensorik.

Die beiden Ebenen und die Systemwelt vernetzen sich durch das Manufacturing Execution System (MES) als zentralen Baustein. MES ermöglicht eine Durchgängigkeit der IT. 2014 veröffentlichte ZVEI ein Modell (Abbildung 3), das nach wie vor die Ebenen Enterprise Network (Office Floor) und Real Time Network (Shop Floor) aufweist. Obwohl die beiden Ebenen in sich schon gut vernetzt sind, findet diese Vernetzung nur mit erheblichem Aufwand statt, da hier noch notwendige Standards und Normen fehlen.

⁸⁷ Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft und ZVEI (2015), S. 5 – 7.

Die zentrale Kommunikations- und Verwaltungsplattform aller am System beteiligten Komponenten steht in diesem Architekturmodell somit im Vordergrund. Die Schnittstelle zwischen Office Floor und Shop Floor wird auf Basis von SOA-Konzepten (Service Oriented Architecture - dienstleistungsorientierte Architektur) als gemeinsamer Mechanismus für die Integration realisiert. Dafür werden allerdings noch weitere Standards als Grundlage für den Anschluss an das Enterprise Network benötigt.⁸⁸



* SOA: Service Oriented Architecture

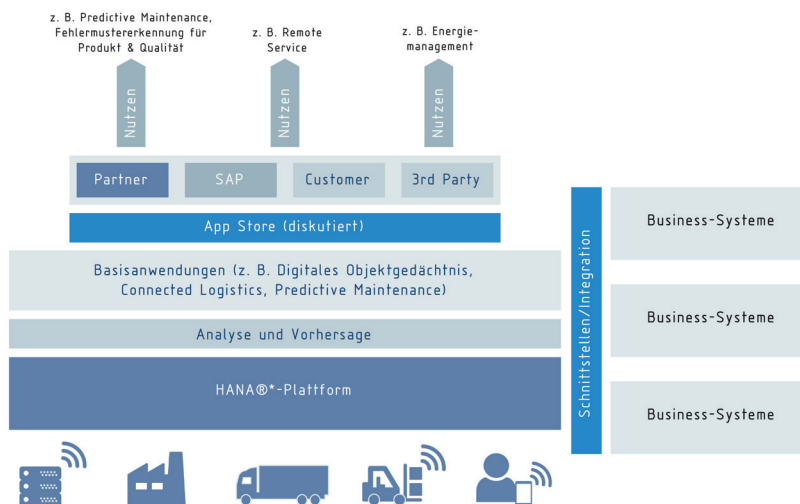
Abbildung 3: Herstellung der Konnektivität durch das Prinzip der serviceorientierten Architektur (Zentrale Verbindung zwischen Office Floor und Shop Floor – ZVEI, 2014)⁸⁹

2015 veröffentlichte SAP ein Grundkonzept der IoT-Plattform, das einen weiteren Blickwinkel in der Architekturdiskussion eröffnet. Dabei beschreibt die obere Hierarchieebene Business-Systeme, die über eine Schnittstelle in das Restsystem integriert werden. Diese IoT-Plattform (Abbildung 4) enthält die Schichten „Analyse und Vorhersage“, „Basis-Anwendungen“ sowie für Applikationen den „App Store“ und stellt eine

⁸⁸ Vgl. Plass, C. (2015), S. 15 – 16.

⁸⁹ Vgl. Plass, C. (2015).

Technologie in der Cloud dar. Die somit erzeugten Daten bilden dann die Grundlage für weitere Dienste von Partnern, Kunden und weiteren Nutzern. In diesem Modell stehen neu zu generierende Dienste, Geschäftsmodelle und durchgängige Prozesse im Fokus. Eine Herausforderung bei der Realisierung dieser neuen Geschäftsmodelle besteht in der Klärung, wem die Daten gehören und wer berechtigt ist, diese zu nutzen oder weiterzuverarbeiten. Somit wird entschieden, wer die Hoheit über das neue Geschäftsmodell hat – der Systemanbieter, der Anlagenbauer oder die neu entstehenden Service-Unternehmen.⁹⁰



* HANA: High Performance Analytic Appliance (Hochleistungsanalyseanwendung)

Abbildung 4: Plattformen mit verschiedenen Diensten zur Realisierung von IoT-Geschäftsmodellen (Angelehnt an offenes Grundkonzept der IoT-Plattform – SAP, 2015)⁹¹

⁹⁰ Vgl. Plass, C. (2015), S. 16 – 18.

⁹¹ Vgl. Plass, C. (2015).

Zusammenfassung

Die aufgeführten Technologien und Systemlösungen bilden die Grundlage für die Entwicklung hin zu Industrie 4.0. Die intelligente Vernetzung von reellen und digitalen Objekten im Internet der Dinge und Dienste aufgrund von CPS ermöglicht die Umsetzung von Maßnahmen und Lösungen, die u. a. auch Einfluss auf die Ressourceneffizienz nehmen können. Ausschlaggebend für die Auswirkungen der Digitalisierungsmaßnahmen auf die Ressourceneffizienz sind jeweils der berücksichtigte Systemrahmen sowie die Ebene in der Wertschöpfungskette.

4 DIGITALE TRANSFORMATION UND RESSOURCENEFFIZIENZ

Eine Reihe von Möglichkeiten zur Einsparung betrieblicher materieller Ressourcen, wie Energie und Material, aber auch „immaterieller“ Ressourcen, z. B. Kapital, zeigte bereits das vorangehende Kapitel der technologischen Grundlagen.

Das folgende Kapitel präsentiert Lösungen und Anwendungsbeispiele aus der Praxis, aber auch forschungsseitige Bestrebungen, welche Einflüsse die digitale Transformation auf die Verringerung des Ressourcenverbrauchs ausüben kann. Solche Einflüsse sind somit bereits erkennbar, wobei sich die hier aufgezeigten Beispiele auf unterschiedlichen Entwicklungsstufen der digitalen Transformation, auf dem Weg hin zu Industrie 4.0 befinden. Die Übergänge der Stufen verlaufen dabei fließend.

Laut einer aktuellen Studie⁹², die eine Vielzahl von Berichten zu geförderten Forschungsprojekten untersucht, setzen Unternehmen des produzierenden Gewerbes verschiedenste Technologien und Systemlösungen der digitalen Transformation als Pilot-Maßnahmen auf unterschiedlichen Ebenen ein, wodurch sie u. a. eine Optimierung ihres Material- und Energieeinsatzes erzielen. Die Vielfalt der Maßnahmen ist dabei genauso groß wie die der Unternehmenslandschaft. Im Folgenden wird dies anhand von Beispielen aus der Literatur illustriert, die nach unterschiedlichen Ebenen - Prozess, Unternehmen, Lieferkette - geordnet sind. Diese Ebenen entsprechen genau den Stellen, an denen die jeweiligen Technologien und Systemlösungen in der Praxis auch eingesetzt werden.

4.1 Einzellösungen auf Prozessebene

Digitalisierung beim industriellen Schmieden

Für einen industriellen Prozess des Schmiedens zeigte sich durch eine bedarfsgerechte Druckluftherzeugung ein Energie-Einsparpotenzial von bis zu 10 %, der Einsatz elektronischer Vorschaltgeräte führte im Schnitt zu

⁹² Vgl. Dückert, E.; Schäfer, L.; Schneider, R. und Wahren, S. (2015).

5 % weniger Energieverbrauch. Die Nutzung einer Stoffsimulation auf Basis der Finite-Element-Methode (FEM) brachte Energie- und Materialeinsparungen im einstelligen Prozentbereich. Innerhalb dieses industriellen Prozesses führten eine softwareunterstützte Auslegung der Prozesskette und die damit ermöglichte Optimierung der Prozessparameter ebenfalls zu Energieeinsparungen durch eine Verringerung der Erwärmungstemperatur für Rohteile. Bei der Wärmebehandlung ermöglichte eine Online-Prozesssteuerung in Verbindung mit der Temperaturmessung an den Bändern die Nutzung der Restwärme aus dem Walzprozess für die Glühöfen. Ein Prozessleitrechner verarbeitete die Messwerte im Glühmodell zu einer Echtzeit-Wärmebilanz, die eine bedarfsgerechte Beheizung der Glühöfen erlaubt. Dies führt am Ende zu einer Energieeinsparung von mehr als 50 %, neben der Reduktion von Hilfs- und Betriebsstoffen.⁹³

Optimierungspotenziale durch Data-Mining

Innerhalb des Projekts EIDodata der Universität Duisburg-Essen und der Hochschule Kempen wurde eine Software entwickelt, die durch die Auswertung von unterschiedlichen Prozessdaten in Produktionsprozessen von Unternehmen realisierbare Optimierungspotenziale aufzeigt. Dieses Beispiel des Data-Minings unterstützt Unternehmen bei einem effizienteren Umgang mit Energie und Rohstoffen, was neben einer umweltschonenden auch eine kostengünstigere Produktion ermöglicht.⁹⁴

Erhöhung der Recyclingrate von Metall mithilfe von Sensoren

Eine weit verbreitete Maßnahme der Digitalisierung besteht im Einsatz von Sensortechnik. Im Fall der Metallindustrie führt diese Maßnahme zu einer höheren Effizienz des Recycling-Prozesses. Eine sensorgestützte Sortieranlage zur Metallausschleusung bei der Schredderleichtfraktion erhöht die Rückgewinnung an wiederverwertbaren Metallen aus dem Schredderschrott (6 Gewichts-% Metalle) und führt zu einer nahezu metallfreien Schredderleichtfraktion (Restmetallgehalt in der Abfallfraktion < 1 Gewichts-%). Gleichzeitig errechnet ein Computer die genaue Lage der

⁹³ Vgl. Emec, S. et al. (2013), Anhang 3.

⁹⁴ Vgl. EIDodata GmbH i. G. (kein Datum).

einzelnen Materialien, die am Ende des Bandes mittels Druckluft gezielt aus dem Massenstrom herausgeschossen werden. Dadurch ist der Energieverbrauch für die Druckluftaufbereitung um bis zu zwei Drittel geringer als bei den bislang auf dem Markt befindlichen automatischen Sortiersystemen.⁹⁵ Innerhalb des Recyclingverfahrens der Firma Hydro Aluminium Recycling Deutschland GmbH trennt eine neue Schredderanlage nach einer Analyse die einzelnen Legierungen präzise voneinander ab. Für die akkurate Sortierung werden eine spezielle Röntgenanlage und verschiedene Siebverfahren eingesetzt. Ein Computer analysiert die Messungen des Röntgendetektors und steuert anhand der errechneten Echtzeitdaten die Druckluftdüsen. Dadurch wird eine sortenreine Trennung ermöglicht. Eine Wiederaufnahme in den Stoffkreislauf des Recyclingaluminiums ist demzufolge gegeben. Pro Jahr können so 30.000 Tonnen Aluminium zurückgewonnen werden. Gleichzeitig reduziert sich der CO₂-Ausstoß um 200.000 Tonnen im Jahr.⁹⁶

Intelligente Steuerungskonzepte

Auch der Energieverbrauch elektrischer Antriebe zum Betreiben von Pumpen, Kompressoren und Ventilatoren kann mittels elektronischer Drehzahlregelung um etwa ein Viertel verringert werden. Die Technologie ist allerdings aufgrund des Eigenverbrauchs der elektronischen Bauteile auf den Einsatz bei Anlagen, die überwiegend in Teillast betrieben werden, begrenzt. Außerdem können Stand-by-Verluste je nach Nutzungsprofil bis zur Hälfte des Jahresstromverbrauchs einer Maschine ausmachen. Intelligente Steuerungskonzepte zur Abschaltung von Maschinen in Schwachlastzeiten können diese Verluste minimieren und damit zu einer weiteren Energieeinsparung beitragen. Solche Steuerungskonzepte werden bereits von Unternehmen genutzt, um den Energieverbrauch zu optimieren. Der Ansatz ist besonders verbreitet in der Nahrungsmittelindustrie, dem Fahrzeugbau sowie in der Metallerzeugung und in der Kunststoffindustrie.⁹⁷

⁹⁵ Vgl. Dückert, E.; Schäfer, L.; Schneider, R. und Wahren, S. (2015), S. 155.

⁹⁶ Vgl. VDI ZRE (2014a).

⁹⁷ Vgl. Schröter, M.; Weißfloch, U. und Buschak, D. (2009), S. 5 - 6.

Optimierung von Hilfs- und Betriebsstoffen durch dynamische Prozesssteuerung

Dank der Entwicklung einer dynamischen Prozesssteuerung in der Prozessindustrie kann darüber hinaus der Einsatz bestimmter Hilfsstoffe reduziert und die Zufuhr von Betriebsstoffen optimiert werden. Bei der sekundärmetallurgischen Behandlung von Stahl wird innerhalb des Prozesses die Sauerstoffzufuhr optimiert, um den Abbrand von Chrom und anderen Metallen bei der Entkohlung hoch-chromhaltiger Stähle zu minimieren.⁹⁸

Sensorlose Steuerung

Eine bedarfsgerechte Energieaufnahme der Motoren wird durch die Entwicklung eines Verfahrens zur sensorlosen Steuerung von Linearmotoren einer Folienreckanlage ermöglicht. Dies reduziert den Energieverbrauch. Denselben Nutzen weist im Fall der Prozessperipherie auch der Einsatz drehzahl geregelter Schraubenverdichter bei der Druckluftherzeugung auf.⁹⁹

Bedarfsgerechte Steuerung in der Fertigung von Statoren

Bei der Fertigung von Statoren in umformtechnischen Verfahren werden durch eine bedarfsgerechte Steuerung des Prozesses Ressourcen eingespart. Die Ausstattung von Vorwärm- und Kühlbecken mit einer Temperaturregelung sowie einem Sekundärkreislauf mit Wärmetauscher führt sowohl zur Verbesserung der Badstandzeiten als auch zu einer Energieeinsparung. Dadurch wird der Verbrauch von Wasser und Energie in Form von Wärme reduziert. Allgemein kann eine bedarfsgerechte Steuerung von industriellen Prozessen, z. B. durch Abschalten bzw. bedarfsgerechtes Ansteuern elektronischer Motoren unter bestimmten Bedingungen, den Verbrauch elektrischer Energie reduzieren.¹⁰⁰

⁹⁸ Vgl. Dückert, E.; Schäfer, L.; Schneider, R. und Wahren, S. (2015), S. 40.

⁹⁹ Vgl. Dückert, E.; Schäfer, L.; Schneider, R. und Wahren, S. (2015), S. 54.

¹⁰⁰ Vgl. Dückert, E.; Schäfer, L.; Schneider, R. und Wahren, S. (2015), S. 65.

Bedarfsgerechte Steuerung der Prozessperipherie

Eine gezielte Steuerung weiterer Energieverbraucher der Prozessperipherie, wie z. B. der Beleuchtung oder der Heizungs-, Klima- und Lüftungsanlagen, kann zu erheblichen Einsparungen von Energie beitragen. Eine Maßnahme ist die bedarfsgerechte Steuerung der Beleuchtung bzw. ihre Anpassung an die Anforderungen eines Arbeitsgangs. Eine entsprechende Steuerung von Heißwasserpumpen führt ebenso zur Vermeidung von Energieverlusten. Bei Lackierprozessen (Applikation, Trocknen, Härten) bewirkt eine Energiesparschaltung für die Luftleistung in Verbindung mit frequenzgeregelten Ventilatoren für Zu- und Abluft oder die Integration eines bedarfsorientierten Managements der Luftleistung Optimierungen des Energieeinsatzes.¹⁰¹

Steuerung von industriellen Verfahren durch Datenmonitoring

Eine weitere Maßnahme zur intelligenten Steuerung von industriellen Verfahren besteht in der Erfassung verfahrensrelevanter Daten durch digitale Steuerungssysteme in Echtzeit. Ein umfangreiches Datenmonitoring kann bei einer effizienten Nutzung von Ressourcen unterstützen. Mit Hilfe der zeitlichen Erfassung aller Produktionsabläufe und deren regelmäßigen Auswertung konnte der Mittelständler MSR Technologies GmbH große Materialmengen und Energie sparen und damit auch Kosten reduzieren. Durch die sofortige Meldung bei Fehlern in der Produktion kann direkt in den Produktionsprozess eingegriffen werden. Die Ausschussraten und der damit verbundene Materialeinsatz werden dadurch deutlich minimiert.¹⁰² Ein Kurzfilm des VDI Zentrums Ressourceneffizienz mit dem Titel „Schnell, genau und effizient mit Datenmonitoring“ widmet sich genau dieser Thematik.¹⁰³ Auch in der Prozessindustrie wird durch die Erfassung von relevanten Daten u. a. die Überwachung der Konzentration von Verfahrenskemikalien ermöglicht. Eine zeitnahe Anpassung von Parametern, um verfahrenstechnische Werte einzuhalten, führt zu einer Verminderung von Emissionen und zu einer Einsparung von Material und Energie.¹⁰⁴

¹⁰¹ Vgl. Dückert, E.; Schäfer, L.; Schneider, R. und Wahren, S. (2015), S. 90.

¹⁰² Vgl. VDI ZRE (2014b), S. 24.

¹⁰³ Vgl. VDI ZRE (2014c).

¹⁰⁴ Vgl. Dückert, E.; Schäfer, L.; Schneider, R. und Wahren, S. (2015), S. 101.

Online-Überwachung in der Prozessindustrie

Auch beim Galvanisieren führt eine Echtzeitmessung im Bad bzw. eine analytische Online-Überwachung der Metallkonzentrationen im Elektrolyt zur Optimierung von Stromfluss und -dichte. Ein inhomogener Materialauftrag wird vermieden und somit der Materialeinsatz optimiert. Steuerungs- und Regelungselektronik sowie ein geeignetes Messsystem werden dafür benötigt.¹⁰⁵ Bei der Wärmebehandlung in der Prozessindustrie zeigt der Einsatz einer automatischen Temperaturregelung eine positive Auswirkung auf den Verbrauch von Energierohstoffen. Die Ausstattung eines Hubherdofens mit einer bedarfsorientierten Regelung führt neben einer verbesserten Steuerung der Stahlqualität in Abhängigkeit der Referenztemperatur auch zur Einsparung der benötigten Gasmenge.¹⁰⁶

Prognose und Simulation in der Kunststoffverarbeitung

Eine weitere Maßnahme der Digitalisierung stellt der Einsatz von Hilfswerkzeugen, wie Prognose- und Simulationssoftware, dar. Bei der Verarbeitung von Kunststoffen und Gummi führt die softwaregestützte Auslegung von Extruder- und Plastifiziereinheiten zu einer energetischen Optimierung des Spritzgießprozesses durch die Reduktion des erforderlichen Wärmebedarfs. Zudem kann die Motorleistung der Extruder- und Plastifiziereinheit reduziert werden, was zusätzlich Energie einspart.¹⁰⁷

Verschnittminimierung durch Online-Schneidepläne

Digitale Hilfswerkzeuge werden auch beim Trennen von Material eingesetzt. In der Metallbearbeitung werden z. B. eine Software zur Verschnittminimierung sowie ein Algorithmus und ein Analysetool zur Generierung von Online-Schneideplänen verwendet. Eine optimale qualitätsabhängige Zuteilung kann so zur Reduktion des Verschnittmaterials bzw. zur Steigerung der Ausbringungsmenge führen.¹⁰⁸

¹⁰⁵ Vgl. Dückert, E.; Schäfer, L.; Schneider, R. und Wahren, S. (2015), S. 112.

¹⁰⁶ Vgl. Dückert, E.; Schäfer, L.; Schneider, R. und Wahren, S. (2015), S. 118.

¹⁰⁷ Vgl. Dückert, E.; Schäfer, L.; Schneider, R. und Wahren, S. (2015), S. 52.

¹⁰⁸ Vgl. Dückert, E.; Schäfer, L.; Schneider, R. und Wahren, S. (2015), S. 74.

Individuelle Fahrzeuglösungen mithilfe des Baukasten-Systems

Bei einem Fahrzeughersteller konnten kundenindividuelle Fahrzeuglösungen durch Fertigungsverfahren mit einem „ausgeklügelten Baukasten-System“ umgesetzt werden. Auch die Bauzeit der Fahrzeuge, der Ressourceneinsatz sowie die damit verbundenen CO₂-Emissionen ließen sich damit nachhaltig senken.¹⁰⁹

4.2 Systemlösungen auf Ebene des Betriebs

Betriebsinformationssysteme in Kombination mit Messsensorik

Ein Beispiel aus der chemischen Industrie zeigt, wie der Einsatz eines geeigneten Betriebsinformationssystems alle verfügbaren Daten über den Energie- und Materialverbrauch eines Produktionsbetriebs in einer zentralen Datenbank speichert und deren Auswertung über einen längeren Zeitraum ermöglicht. So können Einsparungspotenziale erkannt und durch weitere Maßnahmen ausgeschöpft werden. Im Zuge der zentralen Datensammlung und -auswertung werden alle im Unternehmen heterogen vorliegenden Daten mit einer hohen zeitlichen Auflösung und einer hohen Verdichtung in Echtzeit für alle Mitarbeiter zugänglich gemacht. Damit können im Schnitt 5 bis 10 % der eingesetzten Energie ohne größere Investitionen eingespart werden. Durch die Software in Kombination mit Messsensorik zur Analyse der Reinigung vor Ort (Cleaning in Place - CIP) konnten die Nachspülzeiten im Tank halbiert werden. Dadurch wurden bei gleichem Reinigungsergebnis mehrere Tausend Kubikmeter Wasser pro Jahr eingespart.¹¹⁰

Smarte Produktionsdienstleistungen

Ein Anwendungsbeispiel im Bereich der Smarten Produktionsdienstleistungen ist eine Handelsplattform für Prozessparameter komplexer Produktionssysteme, wie z. B. Laserschneidaten für definierte Blechmaterialien. Sowohl Anlagenbetreiber und -hersteller, als auch Rohmateriallieferanten sind daran beteiligt. Statt eine Produktionsmaschine mit einem Set an

¹⁰⁹ Vgl. IHK NRW (2015), S. 21.

¹¹⁰ Vgl. Zettl, E.; Hawthorne, C.; Joas, R.; Lahl, U.; Litz, B.; Zeschmar-Lahl, B. und Joas A. (2014), S. 62 – 66.

Standard-Parametern zu erwerben, können künftig die notwendigen Prozessdaten bedarfsgerecht vom Markt bezogen werden. Dadurch kann der Anlagenbetreiber auf den zunehmenden Trend zur Losgröße eins noch flexibler reagieren und dabei u. a. notwendiges Testmaterial einsparen.¹¹¹

Metering & Accounting

Eine weitere Systemlösung auf der Ebene des gesamten Unternehmens bildet Metering & Accounting. Es stellt die Grundlage für Prozesssteuerungen dar und soll auch Messwerte für ein aktives Effizienzmanagement bereitstellen. Metering & Accounting steht für die Gesamtheit der Verfahren und technischen Ausrüstungen, um reproduzierbare Daten in Erzeugung, Transport, Speicherung und Verbrauch von Ressourcen zu erfassen. Dabei beinhaltet Metering die Verfahren und technischen Einrichtungen zum Messen und Aufzeichnen von Ressourcen-Verbräuchen wie Gas, Wasser, Elektrizität etc. Accounting umfasst die Systematik und die entsprechende Infrastruktur zur Aufzeichnung, Zusammenfassung und Analyse der erfassten Daten.

Smart Service

In der Smart-Service-Welt werden generische Methoden und Services benötigt, um auch anwendungsübergreifende Szenarien mit vielen Akteuren und hoher Verfahrenskomplexität abbilden zu können (z. B. CO₂-Footprint von Gütern). Ingenieurtechnische Lösungen sind mit diesen Methoden und Services sowie innovativen Geschäftsmodellen (z. B. Energiemarktplätze für Kleinerzeuger) in Einklang zu bringen.¹¹²

„Soziale“ Maschinen (social machines)

Eine komplett neuartige Systemlösung stellt ein bekannter Werkzeugmaschinenhersteller aus Baden-Württemberg auf, indem die ersten sogenannten „sozialen“ Maschinen (social machines) zum Einsatz kommen. Dabei verfügt jede Komponente über eine eigene Intelligenz und weiß, welche

¹¹¹ Vgl. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und Arbeitskreis Smart Service Welt (2015), S. 60 – 61.

¹¹² Vgl. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und Arbeitskreis Smart Service Welt (2015), S. 183.

Prozessschritte durchzuführen sind. Da die „soziale“ Fertigung Informationen über die Auslastung verarbeiten kann und auch mit anderen Standorten kommuniziert, wird die Produktion automatisch optimiert. Kunden können somit Bilder von ihren Produkten, in diesem Fall von Maschinen, in Echtzeit während der Produktion erhalten und haben die Chance, frühzeitig entsprechend ihren Anforderungen zu reagieren.¹¹³

Überwachung, Steuerung und Optimierung durch MES

Die Plattform Industrie 4.0 stellt die Landkarte Industrie 4.0 online zur Verfügung, auf der durch Praxisbeispiele dargestellt ist, wo der gleichnamige Ansatz schon heute in der Praxis in Deutschland eingesetzt wird. Es wird z. B. das Projekt „Steigerung von Transparenz und Effizienz“ dargestellt, in dem ein Unternehmen ein MES zur Überwachung, Steuerung und Optimierung der eigenen Formteilmontage nutzt. Im Fertigungsumfeld dient es als zentrale Informations- und Datendrehscheibe. Die Korrelation von Echtzeitdaten aus verschiedenen Quellen ermöglicht, neben einer zustandsorientierten Instandhaltung der Produktionsanlagen auch einen effizienten Ressourceneinsatz.¹¹⁴

Automatische Flurförderanlagen

Ein anderes Beispiel zeigt, wie ein Verpackungshersteller kleine Losgrößen und Materialeffizienz wirtschaftlich meistert. Der Transport durch Gabelstapler führte zu Beschädigungen der Kartonagen, die sich dadurch nicht mehr verkaufen ließen. Die Produktion wurde im Rahmen von Industrie 4.0 dadurch automatisiert, dass neue automatische Flurförderanlagen den Gabelstaplerverkehr ersetzt haben. Ein Transportwagen holt die Kartonagen ab und verteilt sie automatisch auf die Bandförderanlagen, wo das Material verarbeitet wird. Durch die Digitalisierung der Materialwirtschaft verläuft der Materialtransport somit viel schonender, übersichtlicher und auch effizienter. Barcodes ermöglichen eine bessere Darstellung von Material und Verarbeitungszustand. Außerdem erhält der Kunde den Lieferstatus in Echtzeit.¹¹⁵

¹¹³ Vgl. Roland Berger Strategy Consultants (2014), S. 18.

¹¹⁴ Vgl. Plattform Industrie 4.0 (2016).

¹¹⁵ Vgl. IHK NRW (2015), S. 32.

Informations-, kommunikations- und automationstechnische Lösungen

Durch den Einsatz der Informations-, Kommunikations- und Automations-technik lassen sich zur Verbesserung des Ressourceneinsatzes in der Produktion mehrere Optimierungshebel und entsprechende Anwendungsbeispiele identifizieren.¹¹⁶ Grundlagentechnologien und Systemlösungen, die dafür eingesetzt werden, sind z. B. Simulations- und Prognosemodelle, intelligente Software-Agenten, die Komponenten des Fertigungsmanagementsystems (z. B. MES) miteinander verbinden. Andere Technologien umfassen (selbstlernende) Assistenzsysteme und kabellose Diagnosewerkzeuge (Wireless Diagnose Tools) für Wartungs- und Reparaturarbeiten, Labor-am-Chip-Systeme (Lab on Chip) für Echtzeitanalysen anhand kleiner Substanzmengen sowie eine wertschöpfungskettenübergreifende Vernetzung von Stoffflüssen durch eine Schnittstellenoptimierung in Wertschöpfungsketten für eine verbesserte Ausnutzung von Ressourcen. Informations-, kommunikations- und automationstechnische Lösungen unterstützen somit Materialeffizienz, Produktionsrecycling und die Rückgewinnung von Verlustenergie. Prozessketten und Prozessstufen müssen dabei integriert betrachtet werden, damit eine Vernetzung der Ressourcenkreisläufe erreicht werden kann.¹¹⁷

Chemikalien-Leasing

Einsparungen von etwa 10 bis 70 % Lösemittel oder etwa 30 bis 50 % Energie lassen sich durch die Anwendung innovativer Geschäftsmodelle wie das ressourcenorientierte Konzept „Chemikalien-Leasing“ erzielen. Das Konzept „Nutzen statt Besitzen“ kann nur dann ungestört funktionieren, wenn der Informationsfluss zwischen den Geschäftspartnern reibungslos funktioniert. Mit automatisierter Mess- und Sensortechnik kann z. B. der Stoffanbieter in Echtzeit beobachten, welche Mengen von einem bestimmten Stoff aktuell beim Anwender vorhanden sind und welcher Verbrauch planmäßig erwartet wird. So kann eine vorausschauende Planung ohne Engpässe gewährleistet werden. Auch einfache Messinstrumente wie z. B.

¹¹⁶ Vgl. Behrendt, S. und Erdmann, L. (2010), S. 28.

¹¹⁷ Vgl. Behrendt, S. und Erdmann, L. (2010), S. 29 – 36.

Wasserzähler oder Steuerungselemente können in der chemischen Industrie dazu beitragen, 5 bis 10 % der eingesetzten Ressourcen einzusparen.¹¹⁸ Als ressourcen- und energieintensive Branche wird die chemische Industrie in Zukunft noch intensiver auf Innovationen in der Prozess- und Produktentwicklung setzen, um die Ressourceneffizienz zu steigern. Die eingeschränkte Verfügbarkeit von Rohstoffen und der steigende Bedarf an Konsumgütern, u. a. in Schwellenländern, beschleunigen diesen Prozess.¹¹⁹ Die „Digitalisierung der Produktion“ als Prozessinnovation kann auch in dieser Branche dazu beitragen, zukunftssträchtige und ressourcenschonende Rahmenbedingungen zu schaffen.¹²⁰

4.3 Systemlösungen auf Ebene der Lieferkette

RFID-Technik

Durch den Einsatz von RFID-Systemen, die sich in MES-Systeme einbinden lassen, können Güter innerhalb ihres Lagers oder über die gesamte Lieferkette hinweg nahtlos identifiziert werden. Dies führt unmittelbar zu integrierten Produktrückverfolgungslösungen von Materialbewegungen in der Herstellungskette. Diese Systemlösung schafft eine durchgängige Transparenz von Produktions- und Qualitätsdaten und führt im Ergebnis zu einer Optimierung der Produktionsprozesse.¹²¹ Letztendlich können diese Instrumente der Digitalisierung systematisch dazu genutzt werden, Ressourcen einzusparen.

Metallurgisches Internet der Dinge

Die digitale Integration der spezifischen Technologien und Systeme durch eine globale Vernetzung in der Metallindustrie führt zur Beschreibung von Kreislaufwirtschaftssystemen als dynamische Feedbackregelkreise, sprich das metallurgische Internet der Dinge (metallurgical IoT). Dabei handelt es sich um die globale Verknüpfung der Systeminfrastruktur in der Metallbranche, durch die sich alle Technologieelemente in der zugehörigen Infra-

¹¹⁸ Vgl. Zettl, E. et al. (2014), S. 62.

¹¹⁹ Vgl. Malanowski, N. und Brandt, J. C. (2014), S. 16.

¹²⁰ Vgl. Malanowski, N. und Brandt, J. C. (2014), S. 18.

¹²¹ Vgl. Behrendt, S. und Erdmann, L. (2010), S. 42 – 44.

struktur wiederfinden. Andere Begriffe dafür sind das digitalisierte Web der Metalle (digitalised Web of Metals - WoM) oder die systemintegrierte Materialproduktion (System Integrated Material Production - SIMP). Der Ansatz wird durch Folgendes veranschaulicht:¹²²

- Systemoptimierungsmodelle für die Multimetallverarbeitung, die große m-IoT-Systeme abbilden; diese stellen die Verbindung zu den Computer Aided-Design(CAD-)Werkzeugen der Erstausrüster her und fertigen einen Recycling-Index durch die Quantifizierung der Ressourceneffizienz,
- Optimierung von industriellen Systemlösungen zur Schaffung einer Kreislaufwirtschaft im Unternehmen (Circular Economy within a Corporation - CEC) sowie in der Gesellschaft,
- Echtzeitmessung der Eigenschaften von Erzen und Abfällen in intelligenten Fabrikstrukturen, verbunden mit der Modellierung, Simulation und Optimierung von Reaktoren für industrielle Abbauprozesse und Fabriken zur Verarbeitung von Primär- und Sekundärrohstoffen,
- Big-Data-Analysen und Prozesssteuerung von industriellen Systemen der Metallindustrie durch den Einsatz von Technologien der künstlichen Intelligenz und Computer Aided Engineering (CAE),
- Technologien, Simulationen und Analysewerkzeuge für die Verarbeitung von Mineralstoffen und die metallurgische Prozesstechnik, die alle Schlüsselfaktoren der Kreislaufwirtschaft darstellen,
- Visualisierung der Ergebnisse aller für die Abschätzung der Ressourceneffizienz des Kreislaufwirtschaftssystems eingesetzten Werkzeuge in einer für Endkunden und Öffentlichkeit verständlichen Form,
- die intelligente Integration von Werkzeugen und Methoden, welche die Ressourceneffizienz abschätzen und nachhaltige Lösungen bieten, genannt „Circular Economy Engineering (CEE)“.

¹²² Vgl. Reuter, M. A. (2016), S. 1 – 4.

4.4 Systemlösungen auf Ebene des Produktlebenszyklus

Vor dem Hintergrund der vierten industriellen Revolution und der Betrachtung des gesamten Produktlebenszyklus verändert sich auch die Art der Wertschöpfung. Es entstehen Möglichkeiten zur Entwicklung und Umsetzung neuer innovativer Geschäftsmodelle und damit auch neu auftretende Herausforderungen. Bisherige Produkte und Geschäftsmodelle können durch Industrie 4.0 stark verändert bzw. sogar abgelöst werden. In diesem Zusammenhang wachsen Dienstleistungen und Produkte immer mehr zusammen. Früher wurden diese meist getrennt und teilweise von unterschiedlichen Seiten angeboten. Zukünftig werden Produkte und Dienstleistungen stärker ineinander integriert, entsprechend einer lebenszyklusübergreifenden Betrachtungsweise. Angeboten wird nicht mehr das reine Produkt, sondern der Nutzen. Dieser Ansatz führt zur Entwicklung dreier strategischer Ausrichtungen bzw. entsprechender Geschäftsmodelle.

- Die Steigerung des Verfügbarkeitsbeitrags zielt auf die Erhöhung der für die Bearbeitung verfügbaren Zeit einer Maschine ab. Somit orientieren sich Unternehmen immer mehr an der Übernahme von Verfügbarkeitsverantwortung in Form eines Modells zur stundenweisen Abrechnung (pay-per-hour).
- Ein weiterer Weg ist die Steigerung des Produktivitätsbeitrags. Dieser bringt Unternehmen dazu, sich nicht mehr länger nur auf die Bereitstellung von Produktionsmitteln zu beschränken, sondern Produktionsverantwortung zu übernehmen. Im entsprechenden Geschäftsmodell der stückweisen Abrechnung (pay-per-piece) fällt der Umsatz nicht länger für die Maschine selbst, sondern für jedes von ihr produzierte Teil an.
- Ziel des Ansatzes der Steigerung des Applikationsbeitrags ist eine Steigerung des Nutzens für den Endkunden. Aus diesem Ansatz entwickelt sich das Geschäftsmodell der nutzenweisen Abrechnung (pay-per-value), wobei das eigene Produkt einen signifikanten Einfluss auf das Endprodukt ausüben muss.

Die digitale Transformation begünstigt die Umsetzung dieser Strategieansätze. Die immer stärkere Vernetzung mit dem Kunden und seinen Prozes-

sen bzw. die lebenszyklusübergreifende Betrachtung führen zu einer zunehmend stärkeren Integration zwischen Hersteller und Betreiber.¹²³

4.5 Aktuelle Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten und Perspektiven

Arbeitsgruppe "Forschung und Innovation" der Plattform Industrie 4.0

Ein wichtiger Grundstein zur Erreichung der Ziele von Industrie 4.0 sind Forschung und Entwicklung. Die Arbeitsgruppe „Forschung und Innovation“ der Plattform Industrie 4.0 hat das Ziel, Forschungsaktivitäten im Umfeld von Industrie 4.0 zu bündeln und im Sinne einer strukturierten und priorisierten Forschungsagenda zu bearbeiten. Als Grundlage dafür dient eine Reihe von Forschungs-Roadmaps zu verschiedenen Industrie 4.0-relevanten Forschungs- und Innovationsthemen, die in einem aktuellen Ergebnisbericht¹²⁴ ausführlich beschrieben sind.¹²⁵

Effizienzfabrik

Eine gemeinsame Initiative des Verbands Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA) und des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) ist die „Effizienzfabrik“. Diese informiert über Ergebnisse aus aktuellen Forschungsprojekten und bietet Experten eine Austauschplattform im Bereich Ressourceneffizienz und Elektromobilität.¹²⁶

E-Energy: IKT-basiertes Energiesystem der Zukunft

Vor dem Hintergrund knapper werdender Energieressourcen und einer steigenden Energienachfrage hat das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) das Leuchtturmprojekt „E-Energy: IKT-basiertes Energiesystem der Zukunft“ ins Leben gerufen. Kernaspekte in dem Projekt sind eine umfassende digitale Vernetzung, eine computerbasierte Steuerung sowie eine computerbasierte Überwachung des gesamten Energiesys-

¹²³ Vgl. Lucke, D. et al. (2014), S. 23 – 25.

¹²⁴ Vgl. Plattform Industrie 4.0 (2015).

¹²⁵ Vgl. Plattform Industrie 4.0 (2015), S. 18.

¹²⁶ Vgl. Forschungskuratorium Maschinenbau (2016).

tems. Das BMWi hat mit dem Ziel, die Innovationsentwicklungen zu beschleunigen, den E-Energy-Technologiewettbewerb zur Entwicklung von integralen Ideen und Systemkonzepten für ein „Internet der Energie“ initiiert.¹²⁷

Allianz für mehr Ressourceneffizienz

Im Rahmen der durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg ins Leben gerufenen „Allianz für mehr Ressourceneffizienz“ haben Unternehmen des produzierenden Gewerbes die Möglichkeit, ihre erfolgreich umgesetzten oder in Planung befindlichen Maßnahmen zur Ressourceneffizienz in Baden-Württemberg bekannt zu machen.¹²⁸

E³-Produktion

Mit dem Ziel, in einer ganzheitlichen Betrachtung zu erforschen, wie Stoff-, Energie- und Informationsflüsse in emissionsneutralen „E³-Fabriken“ mit energie- und ressourceneffizienter Produktion unter Einbindung des Menschen künftig besser geplant, umgesetzt und gesteuert werden können, hat die Fraunhofer-Gesellschaft das Leitprojekt „E³-Produktion“ realisiert. Mit diesem Leitprojekt leisten zwölf Fraunhofer-Institute einen wichtigen Beitrag zur nationalen Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung. Das Leitprojekt demonstriert eine E³-Forschungsfabrik, die alle Säulen einer E³-Produktion integriert.¹²⁹

Ultraeffizienzfabrik im urbanen Umfeld

Das Projekt "Ultraeffizienzfabrik im urbanen Umfeld" (Abbildung 5) zielt auf die nachhaltige und effiziente Gestaltung der Produktion ab. Um Ansätze der „Green Economy“ in den Maschinen- und Anlagenbau zu integrieren, untersuchen und bewerten drei Fraunhofer-Institute in dem vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg geförderten Projekt aktuell verwendete Technologien und koppeln diese

¹²⁷ Vgl. BMWi (2010), S. 66 – 68.

¹²⁸ Vgl. UTBW (2016).

¹²⁹ Vgl. Fraunhofer-Gesellschaft (2014).

mit nachhaltigen Technologieinnovationen. Dadurch sollen ultraeffiziente Fabriken geschaffen werden, die die Ressourcen bestmöglich nutzen – für eine höhere Nachhaltigkeit und gleichzeitig geringere Umweltbelastung.¹³⁰

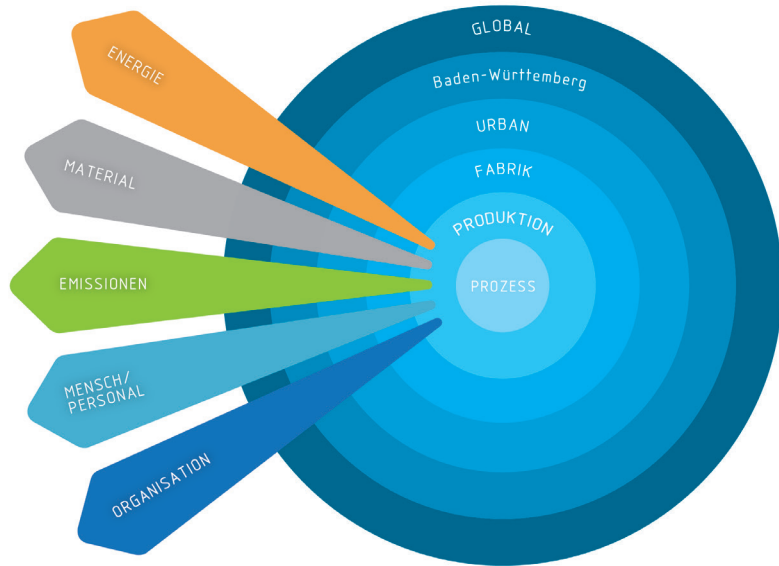


Abbildung 5: Die Ultraeffizienzfabrik im Überblick (Quelle: Fraunhofer-Gesellschaft)

RES-COM - Ressourcenschonung durch kontextaktivierte Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M)

In dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt „RES-COM - Ressourcenschonung durch kontextaktivierte Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M)“ wurden Konzepte und Szenarien zur kontextaktivierten Ressourcenschonung durch hochvernetzte und integrierte Sensor-Aktuator-Systeme von eingebetteten bis zu cyber-physischen Systemen in der Produktion entwickelt und prototypisch umgesetzt. Die Demonstrationsanlage (Abbildung 6) basiert auf Funktionsmo-

¹³⁰ Vgl. Fraunhofer IPA (2016).

dulen, die durch cyber-physische Systeme vernetzt sind und mittels serviceorientierter Architektur dynamisch gesteuert werden.^{131, 132} Dynamisch orchestrierte, semantische Dienste werden zur direkten Steuerung modularer Fertigungseinheiten verwendet. Entsprechend dem Fertigungsauftrag, den jedes Produkt anhand seines aktiven digitalen Produktgedächtnisses vorgibt, wird der Fertigungsprozess geplant und umgesetzt. Je nach Kontext: „hohe Auftragslage und liefertroue Fertigung“ oder „ressourcenschonende Fertigung“ werden Fertigungsparameter und Planungsprozess dynamisch angepasst.

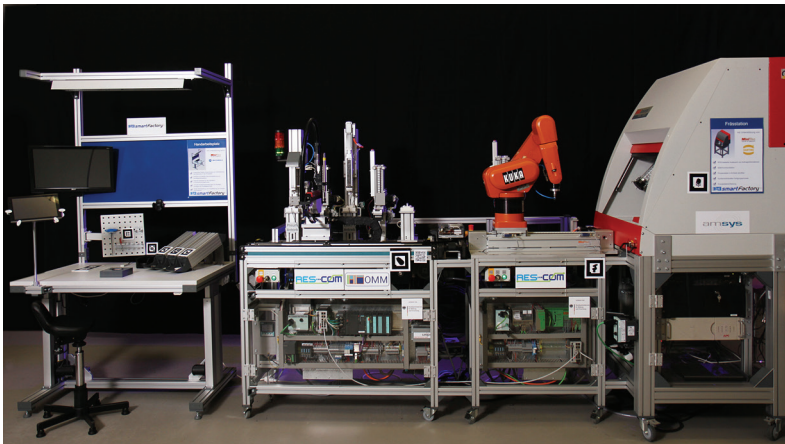


Abbildung 6: Die Demonstrationsanlage des Projekts RES-COM – Ressourcenschonung durch kontextaktivierte M2M-Kommunikation (Quelle: DFKI)

¹³¹ Vgl. Abele, L.; Ollinger, L.; Heck, I. und Kleinstüber, M. (2012).

¹³² Vgl. Loskyll, M.; Heck, I.; Schlick, J. und Schwarz, M. (2012).

Zusammenfassung

Die in diesem Kapitel beschriebenen Maßnahmen und Anwendungsbeispiele aus der Praxis, aber auch die präsentierten Forschungsvorhaben, zeigen, dass positive Auswirkungen hinsichtlich der effizienten Nutzung von Ressourcen durch die digitale Transformation bereits erkennbar sind.

Die fließenden Entwicklungsstufen dieser Transformation erschweren es zum jetzigen Zeitpunkt noch, direkte Zusammenhänge zwischen dem Einsatz von Industrie 4.0-fördernden technologischen Komponenten bzw. Lösungen und einer unmittelbaren Steigerung der Ressourceneffizienz deutlich zu machen.

Wechselwirkungen konnten demnach nur teilweise identifiziert werden. Die beschriebenen informations-, automatisierungs- und regelungstechnischen Maßnahmen in der Praxis, die als Grundlage für ganzheitliche Industrie 4.0-Lösungen dienen, können jedoch einen transparenteren und effizienteren Umgang mit Ressourcen ermöglichen.

5 VORGEHENSWEISE DER WISSENSCHAFTLICHEN UNTERSUCHUNG

5.1 Methodik

Wie in Kapitel 2.2 (S. 20) beschrieben, stellt die Richtlinie VDI 4800 Blatt 1 die Grundlage des methodischen Vorgehens bzgl. Ressourceneffizienz in dieser Studie dar. Der Begriff des Ressourceneffizienzpotenzials ist in der VDI 4800 nicht explizit definiert. Sinngemäß kann aber gesagt werden, dass er einer möglichen Verbesserung der Ressourceneffizienz durch eine spezifische Veränderung entspricht. Eine solche Veränderung kann eine Produkt- oder Prozessverbesserung oder eine Innovation der in der VDI 4800 genannten Typen sein (Kapitel 2.2, S. 20). Für die vorliegende Studie wird daher die folgende Definition verwendet:

Ressourceneffizienzpotenzial

Das Ressourceneffizienzpotenzial (REP) bezeichnet die mögliche Steigerung der Ressourceneffizienz durch die digitale Transformation für einen bestimmten Nutzen bzw. ein bestimmtes Ergebnis im Vergleich zu einem für diesen Nutzen bzw. das Ergebnis definierten Referenzzustand.

Zur Ermittlung des REP ist, wie in der Definition erwähnt, ein Referenzzustand in Form eines konventionellen Prozesses zu beschreiben, der durch die digitale Transformation verändert wird. Für eine quantitative Beschreibung müssen Daten zu den Verbräuchen des konventionellen Prozesses und Daten zu den Verbräuchen des Zustands nach der digitalen Transformation erhoben und gegenübergestellt werden. Als ein alternativer Rechengang können Angaben zu Einsparungen der digitalen Transformation unmittelbar mit Angaben zu den Aufwänden - z. B. in Form der notwendigen Hardware - verrechnet werden. So wird das REP in Form der Veränderung der betrieblichen materiellen Ressourcen beschrieben.

Sollen die natürlichen Ressourcen selbst ausgewiesen werden, so sind dafür Datensätze für den vollständigen Lebenszyklus erforderlich, wie sie in Ökobilanz-Datenbanken vorliegen oder aus anderen Quellen ableitbar sind. Durch Multiplikation mit den Faktoren solcher Datensätze wird ana-

log zu den in Tabelle 1 (S. 23) gezeigten Beziehungen das REP der natürlichen Ressourcen beschrieben.

Diese natürlichen Ressourcen können wiederum in Bezug zu gesamtgesellschaftliche Indikatoren, wie sie in Deutschland als Nachhaltigkeitsindikatoren vorliegen, gesetzt werden. Damit liegt ein durchgängiges Indikatorensystem vor, das betriebliche Kenngrößen mit gesellschaftlichen Zielen verbindet (Abbildung 7).

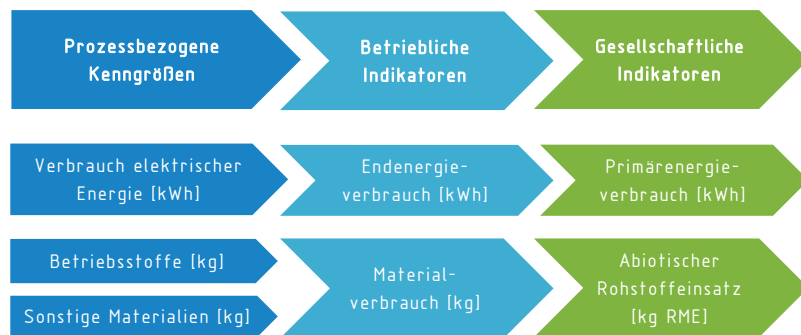


Abbildung 7: Zuordnung prozessbezogener Kenngrößen zu betrieblichen und gesellschaftlichen Indikatoren

Ein solches System wurde bereits im Rahmen einer Studie zur Ressourceneffizienz von Zerspanungsprozessen¹³³ angewandt. Es zeigte sich, dass für eine methodisch konsistente Anwendung derzeit noch Forschungsbedarf besteht. So unterscheidet sich z. B. der prozessbezogene Lebenszyklusansatz konzeptionell von der Definition der derzeit verwendeten volkswirtschaftlichen Indikatoren. Eine entsprechende wissenschaftliche Diskussion zur Weiterentwicklung wichtiger Indikatoren wird zurzeit geführt.¹³⁴ Prinzipiell steht daher mit dem hier beschriebenen Vorgehen eine durchgängige Indikatorik für die Erfolgsmessung von Zielen der Nachhaltigkeit im Bereich natürlicher Ressourcen zur Verfügung.

¹³³ Vgl. Schebek L. et al. (2016).

¹³⁴ Vgl. Hirschnitz-Garbers, M. et al. (2014).

5.2 Datengrundlagen zur Bewertung von Ressourceneffizienz

5.2.1 Datenquellen

Informationen zu Verbräuchen der Produktion bzw. Einsparungen der digitalen Transformation können grundsätzlich auf der betrieblichen Ebene erhoben werden. In der vorliegenden Studie erfolgt dies auf Basis der Auswertung der Fallstudien (Kapitel 6, S. 83). Die Datenquellen für den Bereich der Produktionsprozesse stellen daher die Angaben der Unternehmen zu Verbräuchen bzw. Einsparungen dar, soweit sie den Fallstudien entnommen werden können bzw. den Unternehmen selbst bekannt sind.

Darüber hinaus müssen für die Ermittlung des REP die Aufwände für die digitale Transformation beschrieben werden. Diese Aufwände können ggf. organisatorische, logistische oder andere fallbezogene Änderungen umfassen, die analog zu den Informationen zur Produktion selbst so weit möglich aus den Fallstudien ermittelt werden. Der „Kernbereich“ der Aufwände der digitalen Transformation beinhaltet jedoch die Technologien der digitalen Transformation bzw. deren Komponenten, also Hard- und Software. Diese üben v. a. durch zwei Effekte einen Einfluss auf die natürlichen Ressourcen aus: Die Hardware benötigt Rohstoffe für ihre Herstellung; Hardware und Software zusammen verbrauchen Energie im Betrieb. Zu diesen Verbräuchen hatten die Unternehmen selbst keine Informationen.

Im Rahmen der Studie wurde daher eine ausführliche Auswertung der Literatur zu den Aufwänden der digitalen Transformation vorgenommen. Berücksichtigt wurden hierbei auch die Dokumente, welche im Zusammenhang mit der Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Richtlinie (ErP-Richtlinie) veröffentlicht wurden. Die ErP-Richtlinie, auch bekannt als Ökodesign-Richtlinie, legt Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte fest. Der Geltungsbereich der Rahmenrichtlinie betrifft Produktgruppen, welche erstens europaweit ein hohes Marktvolumen besitzen, zweitens energieverbrauchsrelevant sind und drittens ein hohes Verbesserungspotenzial hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit aufweisen. Dabei werden durch die Richtlinie lediglich die grundsätzlichen Ziele und die Vorgehensweise zum Rechtsetzungsprozess definiert. Detaillierte Anforderungen werden erst durch sogenannte Durch-

führungsmaßnahmen spezifiziert und rechtskräftig.^{135, 136} Die nachfolgenden Produktgruppen können als relevant für die digitale Transformation identifiziert werden: PCs und Monitore, Geräte mit Druckfunktion, Stand-by- und Schein-aus-Verluste, externe Netzteile, Smart-grid-Geräte und Verbrauchszähler sowie Server.¹³⁷ Für die ersten vier genannten Produktgruppen wurden bereits Durchführungsmaßnahmen veröffentlicht. Für die Produktgruppe der Smart-grid-Geräte und Verbrauchszähler befindet sich derzeit ein Vorentwurf zur Durchführungsmaßnahme in Arbeit. Für die Produktgruppe Server existiert bereits ein solcher Vorentwurf¹³⁸, auf welchen innerhalb der Auswertung zu den Aufwänden der digitalen Transformation entsprechend verwiesen wird.

Die vorliegenden Erkenntnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Zu einer Reihe von Komponenten der digitalen Transformation wurden Ökobilanzstudien durchgeführt, vorzugsweise zu konsumnahen Produkten wie Laptop oder Smartphone, in denen Rohstoff- und Energieverbräuche analysiert wurden. Die vergleichsweise geringe Zahl dieser Studien bildet allerdings die aktuelle Vielfalt von Komponenten nur punktuell ab.
- Erwartungsgemäß ist die Herstellungsphase maßgeblich für den Verbrauch von Rohstoffen und die damit verbundenen Umweltwirkungen. Berücksichtigt werden muss aber auch die Entsorgungsphase: Hohe Recyclingraten nehmen einen positiven Einfluss auf die Umweltauswirkungen der Produkte. In Bezug auf zukünftige Recyclingprozesse, gerade für kritische Rohstoffe, besteht gegenwärtig noch eine sehr hohe Unsicherheit.
- Für den Fall von Servern konnte gezeigt werden, dass der Energieverbrauch zu 5 % der Herstellungsphase und zu 95 % der Nutzungsphase

¹³⁵ Vgl. EU (2009).

¹³⁶ Vgl. EBAM (2015).

¹³⁷ Vgl. UBA (2014).

¹³⁸ Vgl. EU (2015b).

zuzuordnen ist¹³⁹. Anders kann dies jedoch bei Endgeräten wie z. B. bei Laptops sein.¹⁴⁰

- Interessant ist, dass die Hardware den direkten „Energieverbraucher“ in Form von Strom ergibt,¹⁴¹ aber Schätzungen gehen davon aus, dass bis zu 90 % des benötigten Energiebedarfs von IKT-Hardware auf die laufende Software zurückzuführen ist.¹⁴² Dies zeigt, dass die Software eine wesentliche Stellschraube in Bezug auf die Energieeffizienz von IKT-Anwendungen darstellt.
- Für den Energieverbrauch der Nutzungsphase liegen über Ökobilanzen einzelner Komponenten hinaus auch gesamtwirtschaftliche Abschätzungen vor. Diese zeigen, dass einerseits der Energieverbrauch von Endgeräten wie Smartphones oder Notebooks sinkt, da diese effizienter werden. Demgegenüber steigt durch das Cloud Computing der Strombedarf von Rechenzentren und Telekommunikationsnetzen erheblich an.¹⁴³

Faktoren, die für die Quantifizierung von Aufwänden herangezogen werden können, sind in Form von Tabellen in den nachfolgenden Kapiteln 5.2.2 und 5.2.3 aufbereitet.

5.2.2 Energieverbrauch während der Nutzungsphase

In Tabelle 2 sind die Energieverbräuche von Hardware-Systemelementen sowie von spezifischen Datentransfer-Aktionen aus Ökobilanzstudien dargestellt. Die Angaben zur Hardware unterscheiden nicht den Einfluss der Software, da sich die Aufnahme softwarebezogener Kennzahlen als methodische Herausforderung darstellt.¹⁴⁴

¹³⁹ Vgl. EU (2015a).

¹⁴⁰ Vgl. Andrae, A. S. G. und Andersen, O. (2010).

¹⁴¹ Vgl. Hilty et al. (2015), S. 37.

¹⁴² Vgl. GHGP (2013), S. 4.

¹⁴³ Vgl. BMWi (2015b), S. 40 ff.

¹⁴⁴ Vgl. Hilty et al. (2015), S. 37.

Tabelle 2: Energieverbrauch von Systemelementen während der Nutzungsphase

Systemelement	Verbrauch elektr. Energie (Nutzung)	
	Verbrauch	Einheit
Computer		
Laptop PC ¹⁴⁵	47,5 – 116	kWh pro Jahr
Desktop PC (mit LCD-Screen) ¹⁴⁶	215	kWh pro Jahr
Thin Client ¹⁴⁷	35,7	kWh pro Jahr
Mobile Endgeräte		
3G Smartphone ¹⁴⁸	2	kWh pro Jahr
Tablet ¹⁴⁹	6,44	kWh pro Jahr
Server		
Datenserver ¹⁵⁰ – max. 96 GB	1.661 – 13.286	kWh pro Jahr
MicroServer – max. 40 TB ¹⁵¹	1.117	kWh pro Jahr
NAS-Server – max. 40 TB ¹⁵²	3.723	kWh pro Jahr
Rack-Server – max. 120 TB ¹⁵³	5.585	kWh pro Jahr
Enterprise Storage ¹⁵⁴	3.279	kWh pro Jahr
Nutzung von Geräten		
3D-Druck von Kunststoff ¹⁵⁵	0,072 – 0,135	kWh pro Stunde Druck
Datentransfer		
Datentransfer von virtuellen Desktops ¹⁵⁶	0,30 – 0,34	kWh pro GB
eine Google-Abfrage ¹⁵⁷	0,0003	kWh pro Abfrage
eine 500-k-E-Mail ¹⁵⁸	0,00014 – 0,00013	kWh pro E-Mail

Einfluss von Rechenzentren und Cloud Computing

Auf gesamtwirtschaftlicher Ebene wird allgemein erwartet, dass infolge der digitalen Transformation v. a. das Cloud Computing und damit einhergehend der Energiebedarf für Internet-Nutzung und externe Rechenzentren stark ansteigen wird.^{159, 160, 161} Die Vorstudie zur Durchführungsverordnung der ERP-Richtlinie für die Produktgruppe „Enterprise Server (ENTR

¹⁴⁵ Vgl. Andrae, A. S. G. und Andersen, O. (2010).

¹⁴⁶ Vgl. Andrae, A. S. G. und Andersen, O. (2010).

¹⁴⁷ Vgl. Andrae, A. S. G. (2012).

¹⁴⁸ Vgl. Andrae, A. S. G. und Andersen, O. (2010).

¹⁴⁹ Vgl. Andrae, A. S. G. (2012).

¹⁵⁰ Vgl. EU (2015a), S. 26.

¹⁵¹ Vgl. HPE (2017).

¹⁵² Vgl. Synology (2017).

¹⁵³ Vgl. LaCie (2017).

¹⁵⁴ Vgl. EU (2015a).

¹⁵⁵ Vgl. Wittbrodt et al. (2013), S. 715.

¹⁵⁶ Vgl. Andrae, A. S. G. (2012).

¹⁵⁷ Vgl. eLife (2017).

¹⁵⁸ Vgl. Andrae, A. S. G. (2012).

¹⁵⁹ Vgl. eLife (2017).

¹⁶⁰ Vgl. BMWi (2015b).

¹⁶¹ Vgl. Deutscher Bundestag (2011).

9)“ prognostiziert, dass die gesamte Arbeitslast von Rechenzentren in Europa jährlich um 14 % wachsen wird. Dabei steigen die Cloud-bezogenen Arbeitsbelastungen mit bis zu 30 % viel stärker als konventionelle Arbeitsbelastungen (zwischen 3 und 6 %).¹⁶²

Eine Studie vom Fraunhofer IZM und Borderstep geht davon aus, dass bis 2025 der elektrische Energiebedarf von Rechenzentren (inklusive Server-, Speicher- und Netzwerktechnik) in Deutschland aufgrund der erhöhten Nachfrage auf 16,4 TWh pro Jahr ansteigen wird (vgl. 2015: 12 TWh pro Jahr). Folglich steigen die benötigte Rechenleistung und die Speicherkapazität an, was wiederum die Erhöhung des Energiebedarfs von Servern, Storage und die damit verbundene Netzwerktechnik zur Folge hat.¹⁶³

Einfluss der Vernetzung von Sensoren und Aktoren

Der erhöhte Energiebedarf kann auch durch die verstärkte Vernetzung von Sensoren mit Steuerelementen, welche das Internet der Dinge (IoT) ermöglichen, hervorgerufen werden.¹⁶⁴ Von einer Prognose von Cisco ausgehend, wird weltweit ein finanzielles Wachstum von 19 Billionen Dollar bis zum Jahr 2020 für den Bereich des IoT erwartet.¹⁶⁵ Hingegen schätzt General Electric für den IoT-Bereich einen Wert von mehr als 15,5 Billionen Dollar bis 2020, wobei 5 % allein auf die Vernetzung von Sensoren zurückgehen.^{166, 167}

Einfluss von Datentransfer

In der Studie von Matsuno, Takahashi und Tsuda¹⁶⁸ aus dem Jahr 2007 wurden für Japan ganze Netzwerke sowie die Auswirkungen von IKT auf die Umwelt untersucht. Dabei wurden nicht einzelne Komponenten betrachtet, sondern lediglich der Datentransfer im Netzwerk. Die Untersu-

¹⁶² Vgl. EU (2015b), S. 17 f.

¹⁶³ Vgl. BMWi (2015b), S. 41.

¹⁶⁴ Vgl. BMWi (2015b), S. 24 f.

¹⁶⁵ Vgl. Cisco (2015).

¹⁶⁶ Vgl. Bryzek, J. (2014), S. 7.

¹⁶⁷ Vgl. GE (2014).

¹⁶⁸ Vgl. Matsuno, Y.; Takahashi, K.I. und Tsuda, M. (2007).

chungen haben ergeben, dass die Übertragung von 1 MB Information einen CO₂-Ausstoß von ca. 2,5 g (Bezug: Japan) beinhaltet.¹⁶⁹

Vor diesem Hintergrund wurde eine Reihe technologischer Optionen zur Verringerung des Energiebedarfs von Rechenzentren entwickelt. Insgesamt werden hier noch erhebliche Potenziale der Effizienzsteigerung gesehen.¹⁷⁰

5.2.3 Rohstoffverbräuche und sonstige Aufwände in der Herstellungs- und Entsorgungsphase

Die Rohstoffverbräuche sowie andere Aufwände über den Lebensweg (z. B. Primärenergieverbräuche oder CO₂-Emissionen) von Hardwarekomponenten sind in Tabelle 3 zusammenfassend dargestellt.

¹⁶⁹ Vgl. Matsuno, Y.; Takahashi, K.I. und Tsuda, M. (2007).

¹⁷⁰ Vgl. Fichter, K. (2007), S. 24.

Tabelle 3: Materialzusammensetzung und weitere Aufwendungen von Komponenten

Komponenten	Materialverbrauch gem. Stückliste	Primärenergieverbrauch	CO ₂ -Äquivalent (CO ₂ -Äq.)
	Materialien	Herstellungsphase (Materialien und Produktion)	Herstellungsphase (Materialien und Produktion) & Entsorgungsphase
Server			
Datenserver ¹⁷¹	s. Tabelle 4	6.053 - 26.435 MJ [pro Server]	245 - 1.160 kg CO ₂ -Äq. [pro Server]
Enterprise Storage ¹⁷²	s. Tabelle 4	17.184 MJ [pro Storage]	811 kg CO ₂ -Äq. [pro Storage]
Datentransfer (bezogen auf Nutzungsphase)			
Netzwerk Datentransfer ¹⁷³	-	-	0,002 kg CO ₂ -Äq [pro MB]
Datentransfer von virtuellen Desktops ¹⁷⁴	-	-	0,29 - 0,38 kg CO ₂ -Äq. [pro GB]
Datentransfer via UMTS mit Mobiltelefon ¹⁷⁵	-	-	429 kg CO ₂ -Äq. [pro GB]
Sensorik			
Sensor (Füllstandsmessung) ¹⁷⁶	Gehäuse: 0,61 g Polyurethan: 0,70 g Elektronik: 0,1 g Batterie: 0,059 g Andere Stoffe: 0,059 g	-	-
Computer			
Laptop PC (EU) ¹⁷⁷	-	350 - 840 kWh ^{a)} [pro Laptop PC]	94 - 614 kg CO ₂ -Äq. ^{b)} [pro Laptop PC]
Desktop PC (US) ¹⁷⁸	Alu & Stahl: 2,45 kg Display: 2,18 kg Kunststoff: 1,54 kg Glas: 0,62 kg Festplatte: 0,55 kg Leiterplatten: 0,40 kg Netzteil: 0,28 kg Andere Stoffe: 0,23 kg	-	426 kg CO ₂ -Äq. ^{b)} [pro Desktop PC]

^{a)} Primärenergieverbrauch der Produktion

^{b)} CO₂-Äquivalent der Produktion inklusive Transport

¹⁷¹ Vgl. EU (2015a).

¹⁷² Vgl. EU (2015a).

¹⁷³ Vgl. Matsuno, Y.; Takahashi, K.I. und Tsuda, M. (2007).

¹⁷⁴ Vgl. Andrae, A. S. G. (2012).

¹⁷⁵ Vgl. Andrae, A. S. G. (2012).

¹⁷⁶ Vgl. Bonvoisin, J.; Lelah, A.; Mathieux, F. und Brissaud, D. (2012) und (2014).

¹⁷⁷ Vgl. Andrae, A. S. G. und Andersen, O. (2010).

¹⁷⁸ Vgl. Apple (2009) und vgl. Andrae, A. S. G. und Andersen, O. (2010).

Komponenten	Materialverbrauch gem. Stückliste	Primärenergieverbrauch	CO ₂ -Äquivalent (CO ₂ -Äq.)
	Materialien	Herstellungsphase (Materialien und Produktion)	Herstellungsphase (Materialien und Produktion) & Entsorgungsphase
Computer			
Desktop PC inkl. LCD-Screen (EU) ¹⁷⁹	Desktop Computer LCD-Screen, Tastatur Maus, Computernutzung	2200 kWh ^{a)} [pro Desktop PC]	3200 kg CO ₂ -Äq. ^{b)} [pro Desktop PC]
Thin Client (global) ¹⁸⁰	-	-	32 kg CO ₂ -Äq. ^{c)} [pro Thin Client]
Mobile Endgeräte			
3G Smartphone (EU) ¹⁸¹	-	64 kWh ^{a)} [pro Smartphone]	16 kg CO ₂ -Äq. ^{b)} [pro Smartphone]
Tablet (global) ¹⁸²	-	-	22 kg CO ₂ -Äq. ^{c)} [pro Tablet]
Tablet (US) ¹⁸³	Batterie: 0,13 kg Aluminium: 0,76 kg Display: 0,11 kg Glas: 0,06 kg Kunststoff: 0,02 kg Leiterplatten: 0,042 kg Andere Metalle: 0,012 kg (50 % Kupfer/50 % Stahl)	-	190 kg CO ₂ -Äq. ^{d)} [pro Tablet]

^{a)} Primärenergieverbrauch der Produktion

^{b)} CO₂-Äquivalent der Produktion inklusive Transport

^{c)} CO₂-Äquivalent der Herstellungsphase inklusive Nutzung

^{d)} CO₂-Äquivalent der Materialien, Produktion, Transport, Nutzung und Entsorgung

Im Hinblick auf die Relevanz bezogen auf die digitale Transformation in Unternehmen werden im Folgenden Erkenntnisse von Ökobilanzstudien sowie weiterer Literatur zu „Sensoren“ und „Datenservern“ vorgestellt.

Sensoren

Die materielle Zusammensetzung von Sensoren kann je nach Messprinzip und Art stark variieren. Im Allgemeinen bestehen Sensoren jedoch häufig aus einem Messelement (Mikrocontroller, Elektronik, Platine), einer Energiequelle (z. B. Batterie, Kondensator) und einem Gehäuse. Die Gehäuse können sich aus Metallen (z. B. Stahl, Aluminium) und Metalllegierungen

¹⁷⁹ Vgl. Andrae, A. S. G. und Andersen, O. (2010).

¹⁸⁰ Vgl. Andrae, A. S. G. (2012).

¹⁸¹ Vgl. vgl. Andrae, A. S. G. und Andersen, O. (2010).

¹⁸² Vgl. Andrae, A. S. G. (2012).

¹⁸³ Vgl. Apple (2014) und vgl. Hischier, R.; Achachlouei, A. M.; Hilty, L. M. (2014).

(z. B. Nickel-Eisen), Halbleitern (z. B. Silizium, III-V-Halbleiter) aus Kunststoffen (z. B. Polyamid) oder Harzen sowie Keramiken (z. B. Keramik-Lichtleiter) zusammensetzen.^{184, 185} Je nachdem, was ein Sensor misst, kann auch das Gewicht eines Sensors variieren (von Gramm bis Tonne). Beispielsweise kann bei der Messung von Windgeschwindigkeiten von Windturbinen ein Sensor auch über eine Tonne wiegen. Jedoch wiegt in solchen Fällen das Messelement trotzdem wenig, lediglich das Gehäuse wird an die Verwendung angepasst. In einer Studie zu Wireless-Sensor-Networks¹⁸⁶ wurde quantitativ die Materialzusammensetzung eines Sensors beschrieben (Tabelle 3).

Datenserver

In einer Vorstudie zur ErP-Richtlinie im Auftrag der Europäischen Kommission wurden die Umweltauswirkungen im Lebenszyklusansatz von zwei Szenarien für Server (Rack Server und Blade System Server) und ein Szenario für ein Enterprise Storage-System untersucht.¹⁸⁷ Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass der Energieverbrauch lediglich zu 5 % der Herstellungsphase zuzuordnen ist, die restlichen 95 % gehen auf die Nutzungsphase zurück. Durch die hohen Wiederverwendungs- (25 - 50 %) und Recyclingraten (je nach Material: von 5 % für Kunststoffe bis zu 70 % für Metalle) der Produkte haben sie einen positiven Einfluss auf die Umweltauswirkungen. Für den Carbon-Footprint der untersuchten Server bedeutet dies eine Reduktion der CO₂-Emissionen um 5 %. Die Herstellungsphase ist v. a. relevant in Bezug auf den abiotischen Rohstoffverbrauch und den Verbrauch kritischer Rohstoffe, welche in den Servern verbaut sind. Die eingesetzten Materialien sowie kritischen Rohstoffe in den drei untersuchten Produkten sind Tabelle 4 zu entnehmen.

¹⁸⁴ Vgl. Hering, E. und Schönfelder, G. (2012).

¹⁸⁵ Vgl. Tränkler, H.-R. und Reindl, L. M. (2014).

¹⁸⁶ Vgl. Bonvoisin, J.; Lelah, A.; Mathieux, F. und Brissaud, D. (2012) und (2014).

¹⁸⁷ Vgl. EU (2015a).

Tabelle 4: Eingesetzte Materialien für Datenserver und Enterprise-Storage¹⁸⁸

Eingesetzte Materialien	Rack Server	Blade-System (mit 8 Servern)	Enterprise Storage
Speicherkapazität	96 GB	768 GB	40 TB
Gestell	12,27 kg	-	5,44 kg
Stahl	2 kg	128,36 kg	26,38 kg
Aluminium	2,1 kg	7,73 kg	9,49 kg
Kunststoffe (verschiedene)	1,6 kg	2,41 kg	2,25 kg
Kupfer	0,83 kg	2,17 kg	0,92 kg
Leiterplatten	0,98 kg	3,24 kg	1,58 kg
Elektronik	1,24 kg	5,43 kg	3,4 kg
Steuer-/Hauptplatine	1,67 kg	6,54 kg	5,04 kg
Sonstige Materialien (z. B. Zink, Kabel, Papier etc.)	0,33 kg	0,91 kg	0,39 kg
Kritische Rohstoffe in Leiterplatten und Festplattenlaufwerken			
Neodym	4,18 g	16,70 g	34,83 g
Silizium	11,01 g	24,40 g	28,53 g
Dysprosium	< 1 g	< 1 g	2 g
Praseodym	< 1 g	2,32 g	4,84 g
Palladium	< 1 g	2,06 g	2,41 g
Platin	< 1 g	< 1 g	< 1 g
Antimon			
Gallium			
Germanium	< 1 g	< 1 g	< 1 g
Kobalt			
Gesamtgewicht	23,02 kg	156,79 kg	54,89 kg

Einen weiteren Aspekt, den es im Kontext der Ressourceneffizienz bzw. der Ressourcenaufwände der IKT-Technologien zu beachten gilt, ist die Nutzungsdauer einzelner IKT-Technologien. Die Relevanz der Nutzungsdauer wird im Folgenden näher erläutert.

Einfluss der Nutzungsdauer von IKT-Technologien

Die Nutzungsdauer der verschiedenen IKT-Technologien kann sehr stark variieren. In verschiedenen Ökobilanzstudien wird für spezifische IKT-Technologien von folgenden Nutzungszeiträumen ausgegangen: Laptop - ca. 3 - 4,5 Jahre¹⁸⁹, Smartphone - ca. 3 Jahre¹⁹⁰, Server - ca. 4 Jahre¹⁹¹ und Sensor - 4 bis 7 Jahre¹⁹² (sensorspezifisch). Die kurzen Nutzungsdauern von IKT-Technologien können zum einen dadurch begründet werden, dass

¹⁸⁸ Vgl. EU (2015a), S. 11 f., 14 f. und 20.

¹⁸⁹ Vgl. Andrae, A. S. G. und Andersen, O. (2010), S. 829.

¹⁹⁰ Vgl. Andrae, A. S. G. und Andersen, O. (2010), S. 831.

¹⁹¹ Vgl. EU (2015a), S. 26.

¹⁹² Vgl. Bonvoisin, J.; Lelah, A.; Mathieux, F. und Brissaud, D. (2012), S. 151.

sich die Geräte selbst teilweise innerhalb weniger Monate rasant weiterentwickeln (z. B. durch größere Speicherkapazität, erhöhte Leistung) und die Verbraucher somit motiviert sind, „ältere“ Modelle durch aktuellere zu ersetzen. Zum anderen kommt auch sehr schnell neue Software auf den Markt, welche aufgrund neuer Anforderungen nicht mehr mit der Hardware kompatibel ist. Aufgrund dieser erforderlichen Kompatibilität mit der Software muss folglich die Hardware ersetzt werden.¹⁹³ Dieses Ersetzen wirkt sich unmittelbar auf den Verbrauch weiterer Rohstoffe für die Herstellung der Hardware aus.

5.3 Charakterisierung der digitalen Transformation

5.3.1 Strukturierungsansätze

Das methodische Vorgehen der Studie erfordert aus verschiedenen Gründen Strukturierungen, um den Begriff der digitalen Transformation zu konkretisieren. Zum einen sind für die Untersuchung von Fallstudien in Interviews und Fragebögen kompakte Begrifflichkeiten für die Kommunikation mit den Interviewpartnern notwendig. Zum anderen sind für die Auswertungen (z. B. REP-Ermittlung, Analyse von Herausforderungen und Chancen) „Bezugsgrößen“ für Aussagen und/ oder quantitative Sachverhalte erforderlich.

Insbesondere zwei Bereiche müssen durch Strukturierungsansätze konkretisiert werden: Zum einen zeigen die vorangehenden Darstellungen in Kapitel 3, dass sich aus der Literatur keine eindeutige Definition einzelner Technologien oder Maßnahmen der digitalen Transformation ableiten lässt, sondern, dass hier viele unterschiedliche Sichten nebeneinander bestehen. Dies erschwert eine klare Identifikation solcher „Technologien“ oder „Maßnahmen“ innerhalb von Fallstudien, auf die sich Erkenntnisse zur Ressourceneffizienz beziehen lassen. Zum anderen wurde auch in Kapitel 2.1 (S. 17) darauf hingewiesen, dass es sich bei dem Begriff der digitalen Transformation um eine prozessbezogene Sicht handelt und, dass sich Unternehmen auf unterschiedlichen Stufen dieses Prozesses befinden

¹⁹³ Vgl. Hilty et al. (2015), S. 10.

können. Auch diese Stufen sind zu konkretisieren, da erwartungsgemäß nicht alle Maßnahmen oder Handlungsmöglichkeiten für jedes Unternehmen unabhängig von seinem „digitalen Entwicklungszustand“ anwendbar sind. Im Folgenden werden die in der Studie für diese beiden Bereiche verwendeten Strukturierungen vorgestellt.

5.3.2 Maßnahmen der digitalen Transformation

Für die Strukturierung der digitalen Transformation wurde für die Studie der Begriff der „**Maßnahme**“ gewählt. Die zu identifizierenden Maßnahmen sollten sich an gängigen Terminologien der digitalen Transformation orientieren, welche eine Kombination digitaler Technologien, Komponenten und Prozesse bezeichnen. Diese Terminologien sollen Akteuren der Praxis üblicherweise bekannt und in möglichst eindeutiger Weise zu beschreiben sein, so dass ein klares Verständnis der Maßnahme sowohl im Rahmen der Untersuchung der Fallstudien als auch bei der darauffolgenden Auswertung möglich wird. Andererseits sollte die Beschreibung von Maßnahmen nicht so spezifisch sein, dass sie mit individuellen, nur in einem einzelnen untersuchten Betrieb anzutreffenden Praxisanwendungen zusammenfallen.

Da eine eindeutige Definition solcher Maßnahmen in der Literatur fehlt, wurde im Rahmen dieser Studie eine Liste von elf Maßnahmen der digitalen Transformation definiert und im Rahmen der Fallstudienanalyse validiert.

Diese Liste generischer Maßnahmen (Tabelle 5) stellt die gemeinsame Grundlage für die Analyse der Praxisanwendungen in den untersuchten Unternehmen in Hinblick auf das REP, die Herausforderungen und Chancen sowie die Erarbeitung von Handlungsempfehlungen dar. Zu erwarten ist, dass diese generischen Maßnahmen in der Praxis in unterschiedlicher individueller Kombination und Ausprägung auftreten. Aus diesem Grund wird im Rahmen der Fallstudienuntersuchungen der Begriff der **Praxisanwendung** verwendet. Dieser bezeichnet die im realen Unternehmen vorgefundene Kombination oder Ausprägung unterschiedlicher Maßnahmen.

Maßnahmen bzw. deren Umsetzung in einer Praxisanwendung können in Bezug auf ihre Ressourcenverbräuche durch Systemelemente der digitalen Transformation charakterisiert werden. Solche Systemelemente sind Kom-

ponenten unterschieden nach Soft- und Hardware, welche zur Realisierung einer Maßnahme oder einer Praxisanwendung notwendig sind und die Einfluss auf den Ressourcenverbrauch nehmen. Derartige Komponenten können entweder als generische Komponenten von Maßnahmen, oder als konkrete Komponenten einer Praxisanwendung in einem realen Unternehmen beschrieben werden. Die Zuordnung generischer Komponenten zu den beschriebenen elf Maßnahmen ist in Tabelle 6 enthalten.

Tabelle 5: Identifizierung von elf Maßnahmen der digitalen Transformation

ID	Maßnahme	Beschreibung
M1	Vernetzung von Sensoren und Aktoren	Eine zentrale Grundvoraussetzung zur digitalen Wertschöpfung ist die digitale Anbindung von Sensoren und Aktoren. Diese definiert die Basis, um die Daten unterschiedlicher Sensoren und Aktoren über einen längeren Zeitraum zu überwachen und aufzuzeichnen, und auch, um diese in einem integrierten Prozess in Kombination zu betrachten.
M2	Einsatz digitaler Objektgedächtnisse	Physische Objekte (Produkte, Maschinen) werden mit einem digitalen Gedächtnis ausgestattet. Relevante Daten werden im Gedächtnis hinterlegt und liegen direkt zugreifbar an der Maschine oder am Produkt vor.
M3	Dezentrale Steuerung	Das intelligente Werkstück wird zum wichtigen Baustein im dezentral gesteuerten Fertigungs- und Wertschöpfungsnetzwerk. Es hat Kenntnisse über seine Eigenschaften und hält Informationen dahingehend bereit, wie es gefertigt werden kann und was das Ziel der Fertigung ist. Somit kann es seinen eigenen Produktionsprozess steuern.
M4	Maßnahmen zur Werkerunterstützung und Assistenz	Assistenzsysteme können Werker (unter Zuhilfenahme mobiler Endgeräte) bei vielfältigen Aufgaben in der Fertigung und Montage unterstützen. Softwaresysteme sprechen auf Basis der vernetzten Infrastruktur und der Auswertung der verfügbaren Sensorik Empfehlungen zur Gestaltung des Produktionsprozesses aus.
M5	Dynamisch kooperierende Systeme und Modularisierung	Durch modular gekapselte Funktionalität können Fertigungsanlagen leicht um neue oder veränderte Anlagenteile ergänzt werden, Interoperation zwischen zwei oder mehr Beteiligten mit minimalem Arbeitsaufwand herstellen, ändern oder auflösen.
M6	Einführung und Verwendung von Ortungs- und Lokalisierungssystemen	Mithilfe von Ortungs- und Lokalisierungssystemen sind Maschinen und Anlagenteile in einer Produktionsstätte leichter zu finden. Auch die gefertigten Produkte können leichter lokalisiert und in den Fertigungsauftrag integriert werden.
M7	Zustandsüberwachung	Verschiedene Betriebszustände von Anlagen und Prozessen werden auf Basis erfasster Daten und mit Hilfe geeigneter Softwarelösungen kontinuierlich analysiert sowie Abweichungen markiert und gemeldet. Unerwartete Systemausfälle sollen durch die konstante Überwachung und Analyse vermieden werden.
M8	Prädiktive Wartung	Systeme zur prädiktiven Wartung sollen Maschinenfehler (z. B. Maschinenausfälle oder Störungen) entdecken, bevor sie überhaupt auftreten. Fehler sollen durch Instandhaltung oder frühzeitige Reparaturen verhindert werden.
M9	Durchgängige Datenintegration	Die durchgängige Datenintegration und der einheitliche Zugriff auf Datenstrukturen ermöglichen die integrierte Betrachtung von Fertigung und Auftragsplanung. Zur Umsetzung agiler Produktionsprozesse ist eine vertikale Integration von Enterprise Resource Planning-Systemen (ERP-System) zwingend notwendig.
M10	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. Kostengünstige physische Prototypen lassen sich auf Basis des Modells mittels neuer Fertigungsverfahren wie 3D-Druck erzeugen.
M11	Cloud Computing	Einzelne Arbeitsbereiche (z. B. Programme, Softwarepakete, Speicherplatz, Rechenkapazität) werden nicht mehr auf der Festplatte, sondern über das Internet oder lokale Netzwerke (der Cloud) bereitgestellt.

Tabelle 6: Einsatz generischer Komponenten für die elf identifizierten Maßnahmen

ID	Generische Komponenten								
	Hardware						Software		
	Sensorik	Aktorik	Server	Mobile Endgeräte	Computer	Mikrocontroller	Kommunikationstechnik	Schnittstelle & Funktion	Kommunikationstechnik
M1	X	X	-	-	-	X	-	X	-
M2	-	-	X	-	-	X	X	X	X
M3	-	-	-	-	-	X	-	-	X
M4	X	X	X	X	-	X	-	X	-
M5	-	-	-	-	-	X	-	-	X
M6	X	-	-	X	-	-	X	X	-
M7	X	X	X	X	X	X	X	-	X
M8	X	X	X	X	X	X	X	-	X
M9	X	-	X	-	-	-	-	X	-
M10	X	X	X	X	X	X	X	X	X
M11	X	X	X	X	-	X	-	X	-

5.3.3 Digitaler Reifegrad

Der sogenannte Reifegrad der Digitalisierung beschreibt, wie weit sich ein Unternehmen im Prozess der digitalen Transformation schon entwickelt hat. Aufbauend auf bestehende Ansätze der Literatur hat das Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Kaiserslautern ein Reifegradmodell¹⁹⁴ zur Bestimmung des Digitalisierungsstandes von Unternehmen, insbesondere KMU, definiert. Dieses wurde in der Studie verwendet und wird im Folgenden beschrieben. Eine Studie der Acatech¹⁹⁵ hat ebenfalls ein Modell für einen reifegradbasierten Ansatz entwickelt. Diese nimmt die Einstufung anhand von eingesetzten Technologien vor.

Das Modell betrachtet die fünf Dimensionen Unternehmensstrategie, Mitarbeiter, Technologie, Produkte und Dienstleistungen sowie Organisation und Prozesse jeweils für die fünf Stufen Erkunder, Einsteiger, Fortgeschrittener, Experte und Vorreiter im Rahmen von Industrie 4.0 (Abbildung 8).

¹⁹⁴ Vgl. Hellge, V. (2017).

¹⁹⁵ Vgl. Schuh, G.; Anderl, R.; Gausemeier, J.; ten Hompel, M. und Wahlster, W. (2017).



Abbildung 8: Stufen des digitalen Reifegrades

Die Anforderungen steigern sich in allen Dimensionen über die Reifegradstufen hinweg bis zur höchsten Reifegradstufe „5“ des Modells. Es besteht für jedes interessierte Unternehmen die Möglichkeit, diese individuelle Reifegradbestimmung online und kostenlos auf den Seiten des Mittelstand 4.0- Kompetenzzentrums Kaiserslautern durchzuführen¹⁹⁶.

Stufe 1: Industrie 4.0-Erkunder

Das Unternehmen steht am Beginn des digitalen Transformationsprozesses und die Digitalisierungsvorhaben befinden sich noch ganz am Anfang in der Findungs- und Planungsphase.

Stufe 2: Industrie 4.0-Einsteiger

Das Unternehmen hat Potenziale erkannt und entsprechende erste Digitalisierungslösungen geplant. Führungskräfte stehen nun vor der Aufgabe erste Erkenntnisse und Erfahrungen zu bewerten und weitere Schwerpunkte für die Weiterentwicklung zu setzen, um konkrete Umsetzungen einzuleiten.

Stufe 3: Industrie 4.0-Fortgeschrittener

Das Unternehmen setzt bereits in einigen Bereichen erste Digitalisierungslösungen ein. Demnach haben Führungskräfte Potenziale identifiziert, Schwerpunkte gesetzt und erste Effekte können anhand betriebswirtschaftlicher Kennzahlen angegeben und bewertet werden.

Stufe 4: Industrie 4.0-Experte

Das Unternehmen setzt in mehreren Bereichen unterschiedliche Digitalisierungslösungen ein. Mitarbeiter und Führungskräfte haben digitale

¹⁹⁶ Vgl. Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Kaiserslautern (kein Datum).

Trends erfasst und diese auf das Unternehmen übertragen. Die Digitalisierung ist Bestandteil der Unternehmensführung und ein Schwerpunkt bei der Weiterentwicklung des Unternehmens. Mitunter können anhand betriebswirtschaftlicher Kennzahlen erste Effekte benannt werden.

Stufe 5: Industrie 4.0-Vorreiter

Das Unternehmen setzt Digitalisierungslösungen zielbringend ein und nutzt diese zur zukunftsorientierten Weiterentwicklung. Mitarbeiter und Führungskräfte haben digitale Trends und Chancen verinnerlicht und können diese auf das Unternehmen übertragen. Potenziale, die sich aus digitalen Lösungen ergeben, werden im Unternehmen proaktiv verfolgt. Die Digitalisierung und Industrie 4.0 bilden zentrale Elemente der Strategie und Weiterentwicklung des Unternehmens.

5.4 Untersuchungsmethodik der Fallstudien

Zur Beleuchtung industrieller Umsetzungen der digitalen Transformation und deren Einflüsse auf die Ressourceneffizienz in Unternehmen wurden Fallstudien in Unternehmen durchgeführt. Das Ziel der Fallstudien liegt darin, positive sowie negative Wechselwirkungen zwischen Maßnahmen der digitalen Transformation und der betrieblichen Ressourceneffizienz zu identifizieren und wenn möglich zu quantifizieren.

Im Rahmen dieser Studie dienen das Design und die Methodik des **Case Study Research nach Yin**¹⁹⁷ als Grundlage für die Fallstudienanalyse. Diese ist durch die freie Gestaltbarkeit gut geeignet, einheitliche Fallstudien zu erstellen. Entsprechend der Methodik nach Yin¹⁹⁸ wurden Fallstudien in Unternehmen zur Erfassung von Maßnahmen und Potenzialen der digitalen Transformation zur Steigerung der Ressourceneffizienz durchgeführt. Der Ablauf und die Hauptinhalte der jeweiligen Schritte sind in Abbildung 9 dargestellt. Hierfür wurden die ersten Schritte „Plan“ und „Design“ zusammengefasst.

¹⁹⁷ Vgl. Yin, R. (2014).

¹⁹⁸ Vgl. Yin, R. (2014).

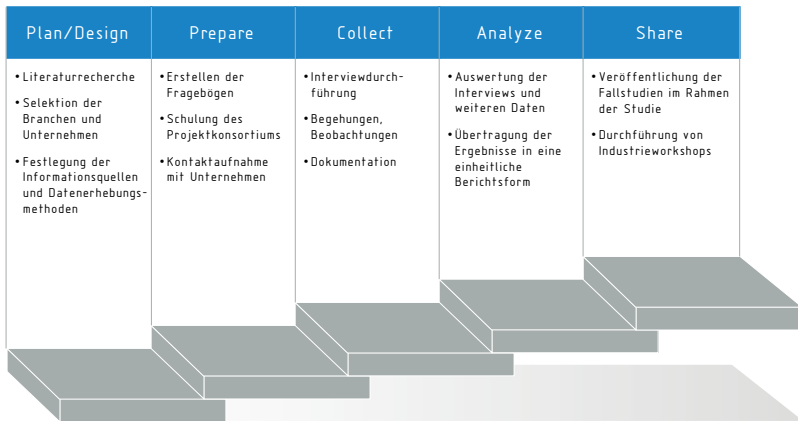


Abbildung 9: Ablauf der Fallstudie in Anlehnung an Yin (2014)

Bei „**Plan und Design**“ wird die grundlegende Planung der Fallstudie durchgeführt und entworfen. Untersuchungsgegenstand sind die Maßnahmen im Bereich der digitalen Transformation zur Steigerung der Ressourceneffizienz bei KMU. Im Rahmen der Studie werden nicht nur KMU selbst untersucht, sondern auch Unternehmen, die Wegbereiter sind und entsprechende Lösungen anbieten, sowie Unternehmen, die aufgrund der Struktur einem mittelständischen Unternehmen entsprechen.

„**Prepare**“ beinhaltet die Vorbereitung der Datenerhebungen bei den Unternehmen. Aufgrund der Vielzahl von Maßnahmen sowie deren potenziellen Auswirkungen auf die Ressourceneffizienz wurde ein „embedded case design“, bei dem mehrere Objekte sowohl qualitativ als auch quantitativ analysiert werden, zur Vorbereitung und Durchführung der Fallstudien herangezogen. Um auch die Validität der Methodik gewährleisten zu können, wurden folgende Datenquellen genutzt¹⁹⁹:

- Interviews
- Direkte Beobachtungen
- Unternehmensinterne Dokumentationen (z. B. Kennzahlenreports)

¹⁹⁹ Vgl. Yin, R. (2014), S. 106.

Zur Durchführung der Interviews wurde in Abstimmung mit dem Projektkonsortium ein semi-strukturierter Fragebogen entwickelt und verwendet, welcher eine geführte Diskussion statt einer Abfrage ermöglicht. Direkte Beobachtungen erfolgten im Rahmen von Begehungen der Unternehmen. Dokumentationen sind sämtliche Unterlagen, die hinsichtlich der zu untersuchenden Maßnahmen relevant sind, wie z. B. Prozesshandbücher, Wertstrom-Dokumente oder Kennzahlenreports. Da generierte Inhalte gegengeprüft und bei allen Interviewpartnern gleiche Fragen gestellt wurden, ist die interne und externe Validität der Fallstudien gesichert. Die Verlässlichkeit der Angaben ist durch die Dokumentation von Planung, Durchführung und Auswertung gegeben.

Im Interview-Fragebogen wurden fünf Bereiche abgefragt:

- (1) Unternehmensangaben
- (2) Digitale Transformation
- (3) Ressourceneffizienz
- (4) Wechselwirkungen
- (5) Maßnahmen

Im Schritt **„Collect“** erfolgte die Sammlung von Daten bei den Unternehmen vor Ort unter Berücksichtigung der Datenquellen-Interviews, der direkten Beobachtungen und Dokumentationen.

Beim Schritt **„Analyze“** wurden die in den Fallstudien erfassten Daten, welche durch die Dokumentation des Interviews und anderer Informationsquellen herangezogen werden konnten, analysiert. Für eine einheitliche Berichtsform wurde ein Muster für eine Ausformulierung der Fallstudien erstellt.

Im Schritt **„Share“** wurden die Ergebnisse durch die Veröffentlichung der Fallstudien innerhalb der vorliegenden Studie (s. Fallstudienporträts im Anhang 1 S. 219 ff.) geteilt.

6 ANALYSE DER FALLSTUDIEN

6.1 Identifikation relevanter Branchen

Als Fallstudien sollten grundsätzlich Unternehmen solcher Branchen erfasst werden, die eine hohe Relevanz in Bezug auf ökonomische und ökologische Kriterien aufweisen. Die Identifizierung derartiger Branchen erfolgte für den Bereich des verarbeitenden Gewerbes auf Grundlage der Definition der Wirtschaftsstatistik²⁰⁰. Die detaillierte Branchengliederung des produzierenden Gewerbes (NACE Rev.2²⁰¹, Abschnitte C10 - C33) wurde in Tabelle 7 zu insgesamt elf Branchen zusammengefasst, die als Grundlage für die weitere Betrachtung dienen.

Tabelle 7: Zusammenfassung der Wirtschaftszweige der Branchen

Wirtschaftszweig (WZ)	Branche
WZ08-10 Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln	Lebensmittelindustrie
WZ08-11 Getränkeherstellung	
WZ08-13 Herstellung von Textilien	Textilindustrie
WZ08-14 Herstellung von Bekleidung	
WZ08-15 Herstellung von Leder, Lederwaren und Schuhen	
WZ08-17 Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus	Papierindustrie
WZ08-20 Herstellung von chemischen Erzeugnissen	Chemie-/Prozessindustrie
WZ08-21 Herstellung von pharmazeutischen Erzeugnissen	Pharmaindustrie
WZ08-22 Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren	Kunststoffindustrie
WZ08-23 Herstellung von Glas-, -waren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden	Glasindustrie
WZ08-26 Herstellung von DV-Geräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen	Elektroindustrie
WZ08-27 Herstellung von elektrischen Ausrüstungen	
WZ08-24 Metallerzeugung und -bearbeitung	Maschinenbau
WZ08-25 Herstellung von Metallerzeugnissen	
WZ08-28 Maschinenbau	
WZ08-29 Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen	
WZ08-30 Sonstiger Fahrzeugbau	
WZ08-33 Reparatur und Installation von Maschinen und Ausrüstungen	
WZ08-31 Herstellung von Möbeln	Möbelindustrie
WZ08-32 Herstellung von sonstigen Waren	Herstellung sonstiger Waren

Zur Einstufung der ökonomischen Relevanz (Tabelle 8) wurden der Branchenumsatz, die Anzahl der Beschäftigten und die Anzahl der Betriebe näher analysiert. Basis für die Analyse der ökonomischen Relevanz waren

²⁰⁰ Vgl. Statistisches Bundesamt (2008).

²⁰¹ Vgl. EU (2008).

Statistiken des Statistischen Bundesamtes²⁰². Im Hinblick auf die betrachteten Kriterien erwiesen sich die Lebensmittel-, Chemie-, Elektro- und Kunststoffindustrie sowie der Maschinenbau als die Branchen mit der höchsten Relevanz innerhalb des verarbeitenden Gewerbes.

Neben der ökonomischen Relevanz der Branchen wurde auch eine Analyse hinsichtlich der ökologischen Relevanz (Tabelle 8) und der Bedeutung für die Ressourceneffizienz durchgeführt. Hierbei wurden neben den Inputstoffströmen, wie den verwendeten Rohstoffen, dem Energieeinsatz und dem Wassereinsatz auch die entsprechenden Outputstoffströme in Form von CO₂-Äquivalenten, Abwassermengen und gefährlichen Abfällen betrachtet. Basis für die Analyse der ökologischen Relevanz waren Statistiken des Statistischen Bundesamtes^{203, 204, 205, 206}. Die Branchen Chemieindustrie und Maschinenbau wiesen hier eine hohe Relevanz auf.

Tabelle 8: Ökonomische und ökologische Relevanz der Branchen

Branche	Ökonomische Relevanz	Ökologische Relevanz
Lebensmittelindustrie	hoch	mittel
Textilindustrie	mittel	niedrig
Papierindustrie	mittel	mittel
Chemieindustrie	hoch	hoch
Pharmaindustrie	niedrig	mittel
Kunststoffindustrie	hoch	mittel
Glasindustrie	mittel	mittel
Elektroindustrie	hoch	mittel
Maschinenbau	hoch	hoch
Möbelindustrie	niedrig	niedrig
Herstellung sonstiger Waren	niedrig	niedrig

Im Folgenden werden die in mindestens einer der beiden Kategorien mit hoher Relevanz eingestufteten Branchen (Lebensmittel-, Chemie-, Kunststoff-, Elektroindustrie und Maschinenbau) hinsichtlich ihrer Prozesscharakteristika und Besonderheiten für die weitere Untersuchung in den Fallstudien betrachtet.

²⁰² Vgl. Statistisches Bundesamt (2016c).

²⁰³ Vgl. Statistisches Bundesamt (2016d).

²⁰⁴ Vgl. Statistisches Bundesamt (2015a).

²⁰⁵ Vgl. Statistisches Bundesamt (2015b).

²⁰⁶ Vgl. Statistisches Bundesamt (2015c).

- Charakteristisch für die Fertigung in der **Kunststoffindustrie** sind eine geringe Fertigungstiefe, hohe Taktzeiten und ein breites Stückzahl-spektrum. Für die Fallbeispiel-Untersuchung ist die Kunststoffindustrie relevant, da sie bei hoher ökonomischer Relevanz vor allem durch kleine und mittlere Unternehmen geprägt ist.
- In der **Elektroindustrie** werden Produkte meist mit hohem Automatisierungsgrad, kurzer Taktzeit und mehrstufigem Fertigungsprozess hergestellt. Darüber hinaus ist die Elektroindustrie durch eine Vielzahl an benötigten Rohstoffen sowie den hieraus möglicherweise resultierenden Versorgungsrisiken gekennzeichnet, weshalb sie für vertiefte Untersuchungen ausgewählt wurde.
- Der **Maschinenbau** ist durch vielfältige Fertigungsverfahren, komplexe Fertigungsabläufe und eine hohe Fertigungstiefe bei überwiegend kleinen bis mittleren Stückzahlen charakterisiert. Aufgrund dieser spezifischen Merkmale sowie seiner hohen ökonomischen und ökologischen Relevanz wird diese Branche in die Fallstudien-Untersuchungen einbezogen.
- Die Lebensmittelindustrie und die Chemieindustrie sind beide größtenteils verfahrenstechnisch geprägt. Die Produkte werden durch Batchproduktion oder kontinuierliche Fertigung hergestellt. Aufgrund der höheren ökologischen Relevanz wurde stellvertretend die **Chemieindustrie** für die weitere Untersuchung ausgewählt. Im Bearbeitungszeitraum der Studie konnte jedoch kein geeignetes Unternehmen für die Teilnahme an den Fallstudien gewonnen werden.

6.2 Auswahl der Unternehmen

Im Rahmen der Studie wurden zehn Fallstudien im mittel- und süddeutschen Raum durchgeführt (Abbildung 10). Die Auswahl der Unternehmen oblag dabei den Forschungspartnern unter Berücksichtigung der identifizierten relevanten Branchen und der Vorschläge involvierter Ministerien. Die Unternehmen sind in den vier Bundesländern Baden-Württemberg, Bayern, Hessen und Rheinland Pfalz angesiedelt. Durch die Fallbeispiele werden die Branchen Maschinenbau, Kunststoff- und Elektroindustrie abgedeckt. Die zehn Fallstudien aus den drei Branchen können nicht alle

Bereiche der Digitalisierung in der Industrie abdecken. Ein hohes Maß an Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weitere Unternehmen und andere Fertigungsverfahren ist jedoch in vielen Fällen durch die verallgemeinerte Beschreibung der Maßnahmen der digitalen Transformation (Tabelle 5, S. 77) gegeben.

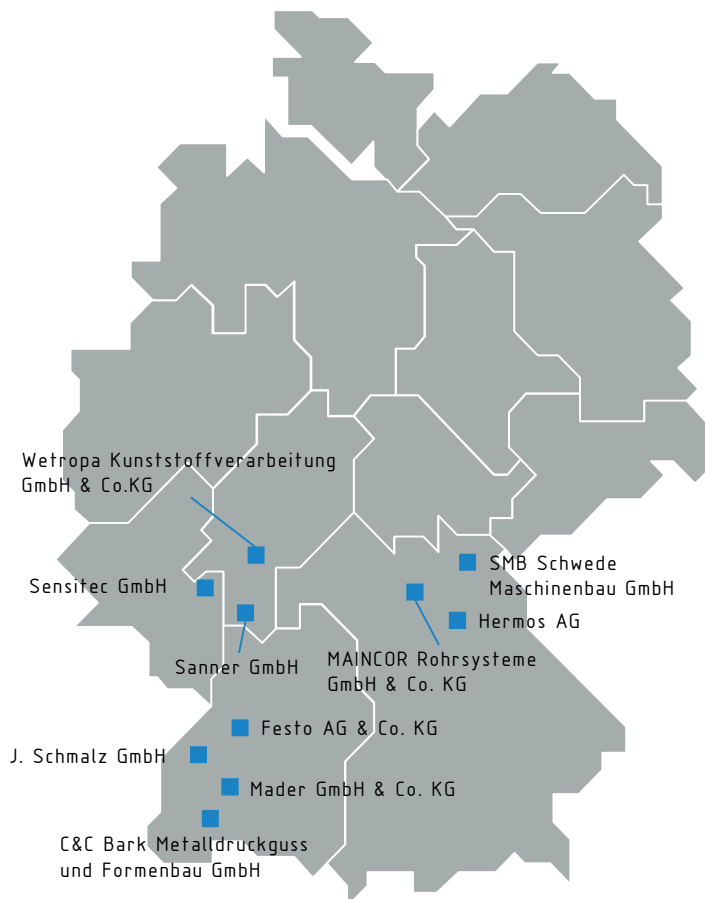


Abbildung 10: Übersicht der räumlichen Verteilung der Fallstudienpartner

Tabelle 9 gibt einen Überblick über die untersuchten Unternehmen, deren Branche und eine Zusammenfassung des Fallstudieninhalts. Die ausführliche Darstellung der Fallstudien findet sich in Form von Fallstudienporträts im Anhang 1 (S. 219 ff.).

Tabelle 9: Fallstudienübersicht

Unternehmen	Branche	Fallstudieninhalt
C&C Bark Metall-druckguss und Formenbau GmbH	Maschinenbau	Der mittelständische Hersteller von Magnesiumdruckgussteilen hat ein Enterprise Resource Planning-System (ERP-System) über alle Produktionsprozesse eingeführt. Somit konnte der Materialumlauf, aber auch Ausschuss und Nacharbeit reduziert werden. Dadurch kann der Materialeinsatz von Magnesium effizienter gestaltet werden. (Anhang 1 A1, S. 219 ff.)
Mader GmbH & Co. KG	Maschinenbau	Der mittelständische Experte für Druckluft erweiterte sein Produktportfolio um die neue Druckluftleckage-App für mobile Endgeräte. Diese liefert in Echtzeit eine Gesamtübersicht über verursachte Verluste in Form von Energie und Kosten und verschafft somit den Kunden eine Transparenz über Druckluftleckagen. (Anhang 1 A2, S. 224 ff.)
J. Schmalz GmbH	Maschinenbau	Der familiengeführte Weltmarktführer im Bereich Vakuum-Aufspanntechnik hat in einigen Montagebereichen die Produktion auf Einzelteilfertigung umgestellt. Dies führte u. a. zu einer nachhaltigen Steigerung der Materialeffizienz bei der Herstellung von hoch individualisierten Produkten in kleinen Losgrößen. (Anhang 1 A3, S. 228 ff.)
MAINCOR Rohrssysteme GmbH & Co. KG	Kunststoffindustrie	Der Hersteller von Rohrsystemen hat durch ein Informationsmanagementsystem die innerbetrieblichen Lagerhaltungsprozesse optimiert. (Anhang 1 A4, S. 236 ff.)
Sensitec GmbH	Elektroindustrie	Der Hersteller von magnetoresistiven Sensoren hat durch die Erweiterung seiner Werkstückträger um digitale Datenspeicher eine papierlose Produktion umgesetzt. (Anhang 1 A5, S. 240 ff.)
Hermos AG	Elektroindustrie	Der mittelständische Automatisierungstechnikerhersteller hat mittels eines Business-Warehouse-Systems, das eine durchgängige Datenintegration ermöglicht, die Planung und Durchführung des Wertschöpfungsprozesses digitalisiert und optimiert. (Anhang 1 A6, S. 244 ff.)
Sanner GmbH	Kunststoffindustrie	Das mittelständische Kunststoffunternehmen Sanner sieht die Potenziale der Digitalisierung und setzt bereits Maßnahmen der virtuellen Produktentwicklung zur schnellen Entwicklung von Prototypen ein. Das Unternehmen setzt außerdem auf die Nutzung von Cloud-Services zur Erhöhung der Ausfallsicherheit und besseren Kommunikation mit ausländischen Standorten. (Anhang 1 A7, S. 247 ff.)
Festo AG & Co. KG	Maschinenbau	Das familiengeführte Unternehmen Festo hat unterschiedliche Digitalisierungsmaßnahmen (z. B. Condition Monitoring) umgesetzt oder getestet. (Anhang 1 A8, S. 252ff.)
SMB Schwede Maschinenbau GmbH	Maschinenbau	Der Hersteller von Umreifungsmaschinen hat Produktentwicklung, Produktion und Service durch einen digitalen Produktzwilling optimiert. (Anhang 1 A9, S. 259 ff.)
Wetropa Kunststoffverarbeitung GmbH & Co. KG	Kunststoffindustrie	Das mittelständische Kunststoffunternehmen Wetropa verlagerte die Produktentwicklung zum Kunden und schafft damit individualisierte Produkte zu geringen Kosten unter Einsparung von Ressourcen (z. B. Material für Prototypen). Voraussetzung dafür war die Virtualisierung der Produktentwicklung im Unternehmen bis hin zur Fertigung. (Anhang 1 A10, S. 262 ff.)

6.3 Zusammenfassende Darstellung der Fallstudien

Insgesamt stellten die untersuchten Fallstudien einen Querschnitt aus vorwiegend mittleren Betrieben oder Standorten der betrachteten Branchen dar. Alle Unternehmen befassen sich mit dem Thema Nachhaltigkeit, teilweise sind Energie- und Umweltziele in der Unternehmenspolitik verankert. Spezifische Analyseinstrumente mit Bezug zu natürlichen Ressourcen wie z. B. der CO₂-Fußabdruck sind grundsätzlich bekannt, werden jedoch bei den betrachteten Unternehmen nicht eingesetzt.

In den Fallstudien wurden unterschiedliche Stufen von Industrie 4.0-Einsteiger bis Industrie 4.0-Experte der digitalen Transformation festgestellt. Alle Unternehmen setzen Maßnahmen der digitalen Transformation ein, jedoch meist nicht primär mit dem Ziel, die Ressourceneffizienz zu steigern. Grundsätzlich werden Maßnahmen häufig in Zusammenhang mit der Prozessautomatisierung realisiert. Dies erstreckt sich von Lagerhaltungsprozessen bis hin zu Dokumentationszwecken im Servicebereich. Tabelle 10 gibt einen Überblick über den Einsatz von Technologien der digitalen Transformation. Nicht in allen Fragestellungen werden sämtliche Fallbeispiele berücksichtigt, wenn der jeweilige Einsatz in den betrachteten Unternehmen nicht relevant ist.

Tabelle 10: Nutzung digitaler Technologien in den Fallstudien

Fragestellung	Anzahl
Erfassung von Maschinen- und Prozessdaten in der Produktion	9 von 9
Nutzen von digitalen Systemen in der Wertschöpfungskette	10 von 10
Einsatz digitaler Technologien zur Prozessverbesserung	9 von 9
Einsatz digitaler Technologien auf Ebene des Maschinen- und Anlagenmanagements	8 von 8
Einsatz digitaler Technologien auf Ebene der Mitarbeiterunterstützung	8 von 9
Einsatz digitaler Technologien auf Ebene des Produktionsmanagements	5 von 7

Sämtliche befragten Unternehmen erfassen Maschinen- und Prozessdaten in der Produktion und setzen auch digitale Systeme in der Wertschöpfungskette ein. Ebenso setzen alle Technologien der digitalen Transformation zur Prozessverbesserung und auf Ebene des Maschinen- und Anlagenmanagements ein.

Die befragten Unternehmen sehen für die Zukunft im Zuge der Digitalisierung große bis sehr große Potenziale für die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit ihres eigenen Unternehmens und ihrer Branche. Die Potenziale reichen von der Optimierung von Prozessen und Anlagen bis zur besseren Einbindung von Kunden und Lieferanten.

Dass der Zusammenhang von Ressourceneffizienz und digitaler Transformation oft erst im Rahmen der Fallstudien hergestellt wurde, bestätigt die vorherrschende Trennung beider Bereiche innerhalb der Unternehmensorganisation in einigen Fallstudien. Trotzdem wurden die Wechselwirkungen zwischen den beiden Handlungsfeldern positiv wahrgenommen. Die Auswirkungen von Maßnahmen der digitalen Transformation auf den Ressourceneinsatz sind in den Unternehmen häufig nicht bekannt oder bemessen. Begründet liegt dies darin, dass Verbräuche betrieblicher Ressourcen meist nicht spezifisch für Prozesse, Maschinen oder Anlagen erfasst werden.

7 POTENZIALANALYSE RESSOURCENEFFIZIENZ

7.1 Vorgehen zur Analyse der Ressourceneffizienzpotenziale

Grundlage der Ressourceneffizienzpotenzial-(REP-)Analyse ist die in Kapitel 5.1 beschriebene Methodik. Im ersten Schritt wurden die in den Fallstudien anzutreffenden Maßnahmen der digitalen Transformation auf Basis von Tabelle 5 (S. 77) identifiziert. Dabei zeigte sich, dass diese Maßnahmen in der Praxis erwartungsgemäß häufig in Kombination mit dem Ziel der Erreichung eines bestimmten Nutzens eingesetzt werden. Aus diesem Grund wurden nicht die Maßnahmen gesondert untersucht, sondern die in der Praxis vorgefundenen Kombinationen von Maßnahmen der digitalen Transformation. Diese Kombination von Maßnahmen, die jeweils einem bestimmten Zweck dient – dem in Kapitel 2.2 angesprochenen „Nutzen“ –, wird im Folgenden als Praxisanwendung bezeichnet.

Schritte der REP-Ermittlung

Die Ermittlung des REP durch die digitale Transformation wird in den in Abbildung 11 gezeigten Schritten beschrieben. Für jede Praxisanwendung wurde ein Referenzzustand, also die konventionelle Produktion ohne die Umsetzung von Maßnahmen der digitalen Transformation, mit gleichem Nutzen dargelegt. Der Referenzzustand wird im Folgenden mit „Vorher“, die Praxisanwendung mit „Nachher“ abgekürzt. Die bestehenden Abhängigkeiten zwischen Nutzen und Systemrahmen werden mit einem Doppelpfeil kenntlich gemacht.

Für ein genaueres Verständnis der Veränderungen zwischen „Vorher“ und „Nachher“ werden im Rahmen der Analyse die Effekte einer Praxisanwendung auf materielle betriebliche Ressourcen explizit herausgearbeitet (z. B. Verringerung der Fehlerrate einer Produktionslinie oder Vermeidung von Transportaufwendungen).

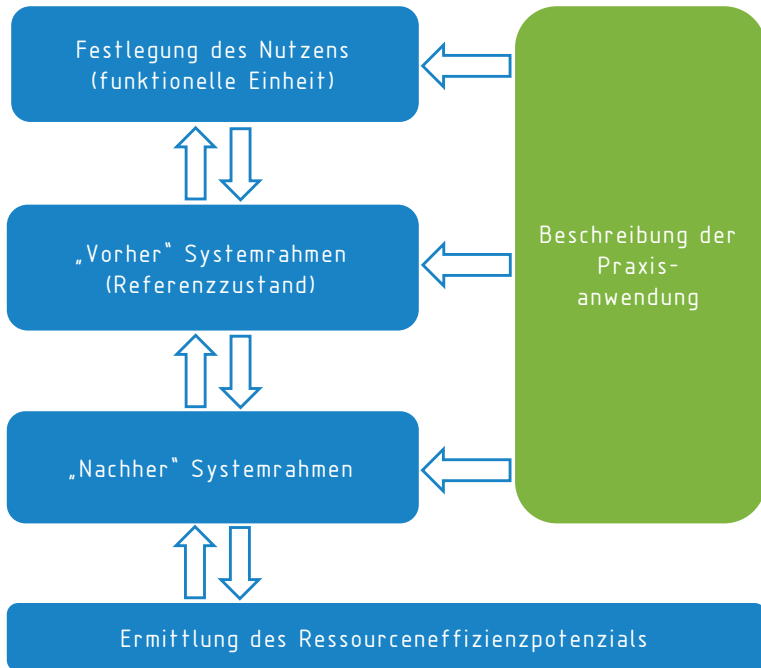


Abbildung 11: Methodik zur REP-Ermittlung der digitalen Transformation

Für die REP-Ermittlung müssen die relevanten Prozesse innerhalb des jeweiligen Systemrahmens („Vorher“ bzw. „Nachher“) identifiziert und anschließend die materiellen betrieblichen Ressourcenverbräuche jedes einzelnen Prozesses ermittelt werden. Der Begriff Prozess wird hierbei im Sinne des Prozessmoduls der DIN EN ISO 14040 verwendet, welcher den kleinsten zu berücksichtigenden Bestandteil einer Ökobilanz darstellt, für den Ein- und Ausgangsdaten quantifiziert werden müssen. Dies können sowohl Prozesse innerhalb des Betriebs sein als auch Prozesse der Vor- und Nachketten.

Folglich sind für den Zustand „Vorher“ zum einen konventionelle technologische Prozesse, die betriebliche Ressourcen benötigen (z. B. elektrische Energie, Betriebs- und Hilfsstoffe etc.), relevant und deren Verbrauch, der sich durch Maßnahmen der digitalen Transformation verändern kann. Zum anderen sind auch sonstige Prozesse konventioneller Wertschöpfungsket-

ten zu berücksichtigen, die Einfluss auf den Verbrauch von Material und Energie nehmen (z. B. Transportprozesse).

Für den Zustand „Nachher“ sind diejenigen Komponenten und Prozesse zu ermitteln, die durch die jeweilige Praxisanwendung neu hinzukommen. Dies können sein:

- **Hardware-Komponenten**, für deren Herstellung Material und Energie aufgewendet werden muss und deren Betrieb Energie oder Hilfs- und Betriebsstoffe erfordert,
- **Software-Komponenten**, deren Anwendung elektrische Energie erfordert,
- **sonstige Prozesse** (z. B. organisatorische Prozesse, Logistik) neuer Wertschöpfungsketten inner- und außerhalb des Betriebs, die Material verbrauchen oder Energie benötigen.

Darüber hinaus sind im Zustand „Nachher“ die veränderten Verbräuche sowie die anfallenden Abfälle von Prozessen des vorherigen Zustands für die Maßnahme der digitalen Transformation zu ermitteln. Liegen alle erforderlichen Daten zu den Verbräuchen von betrieblichen Ressourcen und entstehenden Abfällen bzw. Material- und Energieverbräuchen sonstiger Prozesse vor, so können in einem Lebenszyklusansatz die Verbräuche natürlicher Ressourcen ermittelt werden. Die Ressourcenverbräuche ergeben bezogen auf den Nutzen die Ressourceneffizienz der Zustände „Vorher“ und „Nachher“. Den Unterschied stellt das REP der untersuchten Praxisanwendung dar.

7.2 Einzeldarstellung der untersuchten Praxisanwendungen

Im Folgenden werden die in den Fallstudien identifizierten zehn Praxisanwendungen (PA) hinsichtlich ihrer Einsparungen und Aufwendungen analysiert. Eine Übersicht der analysierten Praxisanwendungen ist Tabelle 11 zu entnehmen.

Tabelle 11: Übersicht der untersuchten Praxisanwendungen

Übersicht der untersuchten Praxisanwendungen		
ID	Name der Praxisanwendung	Unternehmen bzw. Fallstudie
PA1	Optimierte Geschäftsprozesse	C&C Bark Metalldruckguss und Formenbau GmbH (zugehörige Fallstudie im Anhang 1 A1, S. 219 ff.)
PA2	Druckluft-Leckage-App	Mader GmbH & Co. KG (zugehörige Fallstudie im Anhang 1 A2, S. 224 ff.)
PA3	One Piece Flow	J. Schmalz GmbH (zugehörige Fallstudie im Anhang 1 A3, S. 228 ff.)
PA4	Warehouse Management System	MAINCOR Rohrsysteme GmbH und Co. KG (zugehörige Fallstudie im Anhang 1 A4, S. 236 ff.)
PA5	Data on a Stick	Sensitec GmbH (zugehörige Fallstudie im Anhang 1 A5, S. 240 ff.)
PA6	Virtuelle Produktsimulation	Hermos AG (zugehörige Fallstudie im Anhang 1 A6, S. 244 ff.)
PA7	Business Warehouse System	Sanner GmbH (zugehörige Fallstudie im Anhang 1 A7, S. 247 ff.)
PA8	Virtuelle Produktfertigung im Prototypenbau	Wetropa Kunststoffverarbeitung GmbH & Co. KG (zugehörige Fallstudie im Anhang 1 A10, S. 262 ff.)
PA9	Cloud-basierte Fertigung	
PA10	FoamCreator	

Jede Einzeldarstellung wird in einer Abbildung veranschaulicht. In den Abbildungen ist der jeweilige Systemrahmen nach Einführung der Praxisanwendungen zu entnehmen sowie mögliche Einsparungen und Aufwände bedingt durch zusätzliche Komponenten (grüne Umrandung) und wegfallende Prozesse (gestrichelte Umrandung).

Bei den Angaben zu Einsparungen und Aufwänden handelt es sich um Abschätzungen der befragten Unternehmen aus den durchgeführten Interviews. Folgende Antwortmöglichkeiten standen zur Auswahl: keine Einsparungen, bis 25 %, 25 bis 50 %, 50 bis 75 % und 75 bis 100 %. Darüber hinaus konnten, sofern bekannt, genaue Zahlenwerte angegeben werden.

7.2.1 PA1: Optimierte Geschäftsprozesse

In der Fallstudie des Unternehmens **C&C Bark Metalldruckguss und Formenbau GmbH** (Anhang 1 A1, S. 219) wird als Praxisanwendung das dort implementierte Enterprise Resource Planning-System (ERP-System) untersucht (Tabelle 12). Das System ermöglicht eine bessere Planung und Durchführung der unternehmensspezifischen Produktion von Magnesiumdruckgussteilen.

Tabelle 12: Charakterisierung der Praxisanwendung PA1

PA1: „Optimierte Geschäftsprozesse“ (C&C Bark Metalldruckguss und Formenbau GmbH)	
Beschreibung der Praxisanwendung	Von der Kundenauftragerfassung im Vertrieb über die Produktionsplanung und -steuerung (PPS), die Buchung von Lagerorten bis hin zum Einkauf, können durch die Eingliederung des Enterprise Resource Planning-Systems (ERP-Systems) Daten in allen Bereichen des Unternehmens erfasst und miteinander verknüpft werden. Auf Werkstattmonitoren sind die Daten jederzeit abrufbar, wodurch Rückschlüsse auf die jeweiligen Prozesse gezogen werden können. Zudem können Informationen z. B. über Maschinenlaufzeiten, Maschinenstillstandzeiten und Störgründe oder Nacharbeitsquoten ausgewertet werden. Vor Eingliederung des ERP-Systems war eine derartige Vernetzung nicht gegeben. Innerbetriebliche Prozesse liefen isoliert voneinander ab. Ältere Maschinen wurden für die Implementierung der Praxisanwendung entsprechend weitergebildet.
Eingeführt seit	2015
Eingesetzte Maßnahmen	M6: Einführung und Verwendung von Ortungs- und Lokalisierungssystemen M7: Zustandsüberwachung M9: Durchgängige Datenintegration
Vertikale Integration	<ul style="list-style-type: none"> - Daten werden von der Feldebene bis zur ERP-Ebene in allen Bereichen des betrachteten Unternehmens erfasst und miteinander verknüpft. - Ortung/ Rückverfolgbarkeit von einzelnen Produkten/Produktchargen bringt u. a. bei der Identifizierung von fehlerhaften Teilen oder bei Rückrufaktionen Sicherheit. - Der eigentliche Produktionsablauf für die Herstellung von Magnesiumdruckgussteilen erfährt durch das ERP-System keine Veränderung.
Beteiligte Akteure	Vertrieb, Supply Chain Management, Einkauf & Beschaffung, Produktion, Logistik & Lager, Fertigung & Montage, Instandhaltung
Horizontale Integration	<ul style="list-style-type: none"> - Austausch von digitalen Daten mit Kunden und Lieferanten beschleunigen den Produktions- und Kommunikationsprozess durch u. a. die Vermeidung von Medienbrüchen und Übertragungsfehlern. - Effekte durch das ERP-System haben hauptsächlich Auswirkungen auf Unternehmensseite.
Beteiligte Akteure	Kunden, Lieferanten

Systemrahmen vor und nach Einführung der Praxisanwendung

Vorher: Der Systemrahmen des Zustands „Vorher“ umfasst den gesamten betrieblichen Prozess zur Herstellung des Magnesiumdruckgussteils. Dieser beginnt mit dem Wareneingang und beinhaltet die Fertigungsprozesse „Gießen“, „Stanzen/ Anguss abbrechen“, „Strahlen/Gleichschleifen“, „Handentgraten/ Polieren“, „Oberflächenbehandlung“, „CNC-Bearbeitung“ und „Tampoprint/ Endkontrolle/ Versand“. Am Ende steht das verkaufsfähige Produkt.²⁰⁷

Nachher: Die notwendigen Hardware- und Software-Systemelemente aus Tabelle 13 sind in Abbildung 12 dargestellt. Da bei Kunden und Lieferan-

²⁰⁷ Die zuvor genannten Fertigungsprozessstufen zur Herstellung eines Magnesiumdruckgussteils werden dabei nachfolgend zur Einfachheit unter dem Sammelbegriff "Prozesskette (innerbetrieblich)" zusammengefasst.

ten ausschließlich immaterielle Ressourcen betroffen sind, werden die Effekte außerhalb des Betriebs nicht berücksichtigt.

Funktionelle Einheit (FU): Als FU für den Vergleich „Vorher-Nachher“ wird eine Einheit des spezifischen Produkts angenommen [1 Stück Magnesiumdruckgussteil].

Tabelle 13: Notwendige Systemelemente von PA1

Hardware		
Generische Systemelemente	Konkrete Komponenten	Relevant für Maßnahme
Sensorik	Druck-, Temperatursensoren und optische Sensoren	M6, M7, M9
Server	Datenserver	M7, M9
Computer	Notebooks, Workstations	M7
Software		
Generische Systemelemente	Konkrete Komponenten	Relevant für Maßnahme
Software (Funktion)	ERP ^{a)} -Software	M6, M7, M9
Software (Schnittstellen)	Impulsschnittstellen	M6, M7, M9

^{a)} ERP – Enterprise Resource Planning

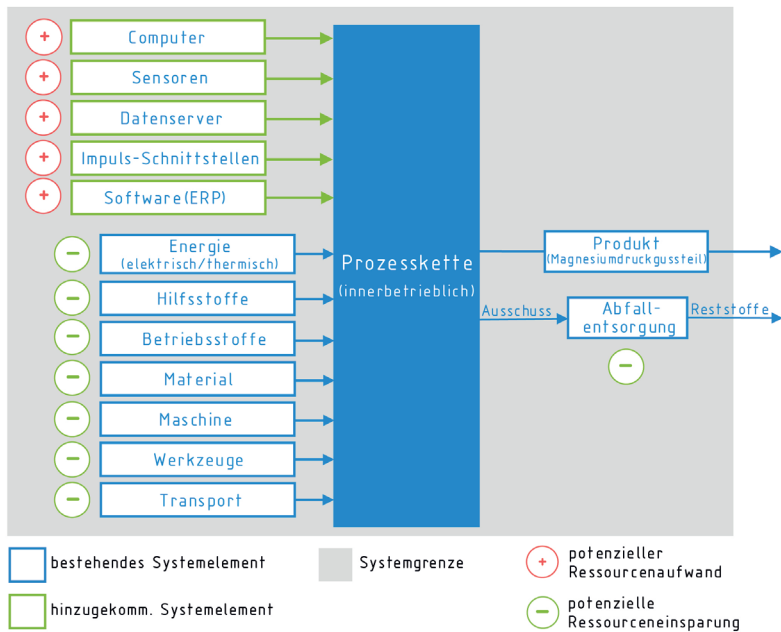


Abbildung 12: Systemrahmen von PA1 („Nachher“) mit Einsparungen und Aufwänden

Ermittlung von Einsparungen und Aufwänden an materiellen betrieblichen Ressourcen

In Tabelle 14 sind die Einsparungen und Aufwände sowie die verfügbaren Informationsgrundlagen zusammengestellt.

Tabelle 14: Einsparungen und Aufwände von PA1 [FU:1 Stück Magnesiumdruckgussteil]

Einsparungen bezogen auf FU				
Einsparungseffekte	Betroffene betrieblich materielle Ressourcen	Einsparungen pro FU	Beeinflusste natürliche Ressourcen ^{c)}	
Reduzierung des Umlaufbestands durch weniger Überproduktion	Durch die jederzeit abrufbaren Produkt- und Prozessinformationen (Größe der Charge, Produktionsstand, Lokalisationsort etc.) kann Überproduktion vermieden werden. Dies führt zu einer Verringerung des Umlaufbestands.	Material (Magnesium), Maschine/ Werkzeuge	bis 25 % ^{a)}	Rohstoffe, Energieressourcen, Ökosystemleistungen
Verringerung von innerbetrieblichen Transportaufwendungen mittels Lokalisierung	Die Lokalisierung einzelner Produkte oder Produktchargen ermöglicht es, unnötige Transporte zwischen Produktionsschritten zu verringern.	Elektr. Energie, Treibstoff	bis 25 % ^{a)}	Energieressourcen, Ökosystemleistungen (Emissionen, v. a. CO ₂)
Reduzierung der Fehlerrate durch Ortung defekter Teile	Mittels der möglichen Lokalisierung von Produkten bzw. Produktteilen können defekte (oder nicht qualitätskonforme) Teile während der Produktion geortet werden. Sie werden direkt aus der Produktionslinie entfernt und nicht mehr für nachfolgende Produktionsschritte herangezogen.	Material (Magnesium)	bis 25 % ^{b)d)}	Rohstoffe, Energieressourcen, Ökosystemleistungen
Aufwände bezogen auf FU				
Hardware ^{d)}		Software ^{d)}		
Sensoren, Datenserver, Impuls-Schnittstellen		ERP ^{e)} -Software		

^{a)} Fragebogen/ Interviews Fallstudie

^{b)} eigene Abschätzung auf Basis der Fallstudienanalysen.

^{c)} nach VDI 4800-1 (2016)

^{d)} keine Angaben zu Hardware-Mengen bzw. Stromverbräuchen der Software seitens des Unternehmens möglich.

^{e)} ERP - Enterprise Resource Planning

7.2.2 PA2: Druckluft-Leckage-App

Aus der Fallstudie des Unternehmens **Mader GmbH & Co. KG** (Anhang 1 A2, S. 224) wird als Praxisanwendung die dort entwickelte und angewendete Druckluft-Leckage-App untersucht (Tabelle 15). Das Unternehmen bietet neben anderen Produkten und Dienstleistungen für Druckluftsysteme

me und Pneumatik-Komponenten die Applikation als eigenständiges Produkt für die Überwachung des kompletten Druckluftprozesses an.

Tabelle 15: Charakterisierung der Praxisanwendung PA2

PA2: „Druckluft-Leckage-App“ (Mader GmbH & Co. KG)	
Beschreibung der Praxisanwendung	Das untersuchte Unternehmen konzipiert und implementiert komplette Druckluftsysteme. Zudem vertreibt es Produkte für verschiedene Anwendungsgebiete. Innerhalb der Servicedienstleistungen wurden früher beim Kunden Leckagen im Druckluftsystem durch einen Mitarbeiter manuell dokumentiert. Eine Analyse der Leckagestellen bzgl. Verlusten sowie eine Gegenüberstellung vor und nach Reparaturen wurden nicht durchgeführt. Durch die Einführung der Druckluft-Leckage-App können nun die Druckluftverluste beim Kunden digital erfasst und analysiert werden. Dabei werden v. a. Leckagen über die komplette Druckluftkette mithilfe von Ultraschallmessgeräten identifiziert und mithilfe von QR-Codes an der jeweiligen Stelle vor Ort direkt kenntlich gemacht. Leckage-relevante Daten (Größe der Leckage, Energie- und Kostenverluste, Reparatur-empfehlungen, erste Kostenabschätzung) werden auf einen Server bei Mader übertragen und verwaltet. Die Entwicklung und Einführung der Druckluft-Leckage-App waren somit ursprünglich ausschließlich als internes Werkzeug zur Werkerunterstützung für die leichtere Dokumentation von Druckluftleckagen ausgelegt; auf Kundenwunsch wurde es zum eigenständigen Produkt weiterentwickelt. Der Kunde hat via mobilem Endgerät oder per Computer Zugriff auf die jeweils eigenen Messdaten. Diese werden auf dem unternehmenseigenen Server hinterlegt und sind jederzeit durch den Kunden abrufbar.
Eingeführt seit	2015 (betriebsinterne Nutzung der Druckluft-Leckage-App) 2016 (Druckluft-Leckage-App für Kunden als Produkt)
Eingesetzte Maßnahmen	M1: Vernetzung von Sensoren und Aktoren M2: Einsatz digitaler Objektgedächtnisse M4: Maßnahmen zur Werkerunterstützung und Assistenz M7: Zustandsüberwachung M9: Durchgängige Datenintegration
Vertikale Integration	- Daten bezüglich Druckluftleckagen beim Kunden werden erfasst, gespeichert und verarbeitet. Somit kann das kundenspezifische Druckluftversorgungssystem in Echtzeit kontrolliert, gewartet und optimiert werden. - Daten zu kundenspezifisch durchgeführten Messungen werden durch die Druckluft-Leckage-App zugänglich gemacht.
Beteiligte Akteure	Vertrieb, Produktentwicklung, Prozessplanung & -entwicklung, Einkauf & Beschaffung, Logistik & Lager, Instandhaltung, IT & Cloud Services
Horizontale Integration	- Die Druckluft-Leckage-App stellt eine kundenspezifische Produktlösung dar. - Vernetzung mit dem Kunden findet über das unternehmensinterne IT-System statt. Kundenspezifische Daten können über mobile Endgeräte/Computer in Echtzeit vom Server abgerufen werden.
Beteiligte Akteure	Kunden, Lieferanten, Dienstleister: Energie- und Enterprise Resource Planning (ERP-)Beratung

Systemrahmen vor und nach Einführung der Praxisanwendung

Vorher: Der Systemrahmen des Zustands „Vorher“ umfasst den Konzeptions- und Wartungsprozess eines Druckluftsystems durch Mader sowie den Druckluftversorgungsprozess beim Kunden. Das Detektieren und Aufnehmen der Leckagen im Druckluftsystem finden manuell statt.

Nachher: PA2 umfasst die Maßnahmen M1, M2, M4, M7 und M9. Die für das Unternehmen selbst und den Kunden notwendigen Hardware- und Software-Systemelemente aus Tabelle 16 sind in Abbildung 13 dargestellt.

Funktionelle Einheit (FU): Als FU für den Vergleich „Vorher-Nachher“ wird eine Einheit der Druckluftmenge angenommen, die zur Herstellung eines kundenspezifischen Produktes notwendig ist [1 Normkubikmeter hergestellte Druckluft].

Tabelle 16: Notwendige Systemelemente von PA2

Hardware		
Generische Systemelemente	Konkrete Komponenten	Relevant für Maßnahme
Sensorik	Position, Druck/ Kraft, Strom/ Spannung, Medium, Temperatur	M1, M4, M7, M9
Aktoren	pneumatisch, unstetig	M1, M4, M7
Server	Datenserver, Application Server	M2, M4, M7, M9
Mobile Endgeräte	Smartphone, Tablet, Datenbrillen jeweils mit Bluetooth 4.0., WLAN ^{a)} ,	M4, M7
Computer	Notebooks	M7
Software		
Generische Systemelemente	Konkrete Komponenten	Relevant für Maßnahme
Kommunikationstechnik	Bluetooth 4.0, (Industrial) WLAN ^{a)} , Internetprotokoll, GPRS ^{b)} , QR ^{c)}	M2
Software (Funktion)	Datenbank, Cloudspeicher, SQL ^{d)} -Server, ERP ^{e)} -Software	M2, M4, M7, M9
Software (Schnittstellen)	XML ^{f)} -Standard	M2, M4, M7, M9

- ^{a)} WLAN - Wireless Local Area Network
- ^{b)} GPRS - General Packet Radio Service
- ^{c)} QR - Quick Response
- ^{d)} SQL - Structured Query Language
- ^{e)} ERP - Enterprise Resource Planning
- ^{f)} XML - Extensible Markup Language

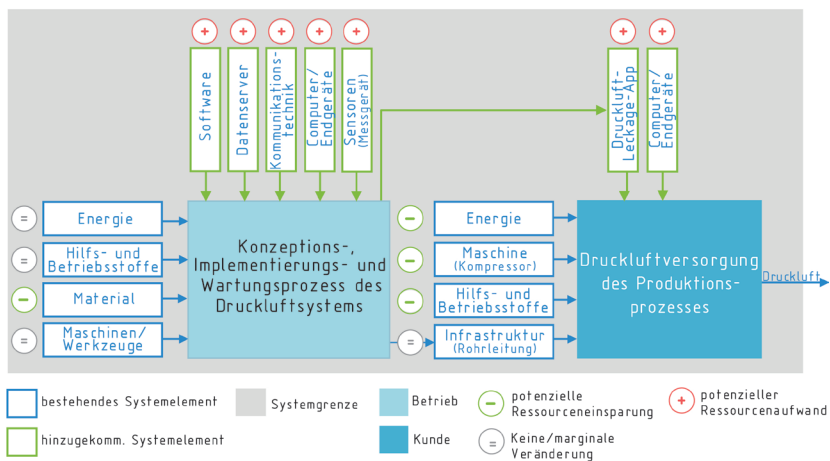


Abbildung 13: Systemrahmen von PA2 (‚Nachher‘) mit Einsparungen und Aufwänden

Ermittlung von Einsparungen und Aufwänden an materiellen betrieblichen Ressourcen

In Tabelle 17 sind die Einsparungen und Aufwände sowie die verfügbaren Informationsgrundlagen zusammengestellt.

Tabelle 17: Einsparungen und Aufwände von PA2 [FU: 1 Normkubikmeter Druckluft]

Einsparungen bezogen auf FU				
Einsparungseffekte		Betroffene betrieblich materielle Ressourcen	Einsparungen pro FU	Beeinflusste natürliche Ressourcen ^{b)}
Verringerung des Energiebedarfs durch Optimierung der Druckluftsystemüberwachung	Durch die optimierte Druckluftsystemüberwachung können Aufwendungen für die Herstellung von zusätzlicher Druckluft vermieden werden. In diesem Zusammenhang sinkt der benötigte Energiebedarf.	Elektr. Energie	bis 50 % ^{a)}	Energieresourcen, Ökosystemleistungen
Verringerung des Materialeinsatzes durch papierlose Prozessabwicklung	Durch die papierlose Dokumentation der Druckluftleckagen und die digitale Speicherung der kundenspezifischen Daten im unternehmensinternen IT-System minimieren sich analoge Dokumentationsvorgänge. In diesem Zusammenhang sinkt der Einsatz von Dokumentationsmaterial.	Material (Papier)	Keine Angaben ^{a)}	Rohstoffe
Aufwände bezogen auf FU				
Hardware ^{c)}		Software ^{c)}		
Sensoren, Datenserver, mobile Endgeräte, Computer		Software, Kommunikationstechnik, Druckluft-Leckage-App		

^{a)} Fragebogen/Interviews Fallstudie

^{b)} nach VDI 4800-1 (2016)

^{c)} keine Angaben zu Hardware-Mengen bzw. Stromverbräuchen der Software seitens des Unternehmens möglich.

7.2.3 PA3: One Piece Flow

Aus der Fallstudie des Unternehmens **J. Schmalz GmbH** (Anhang 1 A3, S. 228) wird als Praxisanwendung die dort realisierte Einzelteilfertigung (One Piece Flow) zur Herstellung von individuell durch den Kunden konfigurierbaren Flächengreifern untersucht (Tabelle 18). Diese PA umfasst die Verknüpfung mit einem intelligenten Nachschublogistiksystem (Kanban-System).

Tabelle 18: Charakterisierung der Praxisanwendung PA3

PA3: „One Piece Flow“ (J. Schmalz GmbH)	
Beschreibung der Praxisanwendung	Im untersuchten Unternehmen werden u. a. Flächengreifer produziert. Ein Bestandteil dieser Flächengreifer sind Schaumteile, welche separat an Schneidemaschinen gefertigt werden. Die Schaumteile wurden früher konventionell mittels eines sogenannten Fräsbildes standardisiert, in Serie und nach Kundenwünschen bei einem externen Dienstleister hergestellt und anschließend bis zur Bestellung durch den Kunden gelagert. Durch zu lange Lagerzeiten verschlechterten sich die Materialeigenschaften der Schaumteile, so dass diese nicht mehr verbaut werden konnten. Nach Umstellung auf „One Piece Flow“ werden nun Formbilder von Schaumteilen nach der individualisierten Bestellung durch den Kunden mittels CAD-Dateien automatisch an die Schneidemaschine übertragen; diese stellt über Nacht das benötigte Schaumteil her, das dann unmittelbar in den Greifer eingebaut wird. Die in kleinen Losgrößen nach Kundenbestellung gefertigten Greifer werden sofort ausgeliefert.
Eingeführt seit	Sukzessiver Umsetzungsprozess von 2011 bis 2014
Eingesetzte Maßnahmen	M1: Vernetzung von Sensoren und Aktoren M7: Zustandsüberwachung M9: Durchgängige Datenintegration M10: Virtuelle Produktentwicklung
Vertikale Integration	- Neukonzipierung der Produktionslinie: von Vorzugsreihen-Fertigung zu einer durch Bestellung der Kunden gesteuerten flexibilisierten und individualisierten Fertigung - Automatisierte Übertragung der Schaumteilformbilder als CAD-Dateien an die Schneidemaschine und anschließende Fertigung
Beteiligte Akteure	Vertrieb, Produktentwicklung, Prozessplanung/-entwicklung, Einkauf & Beschaffung, Produktion, IT & Cloud Services, Finanzen, Steuern, Recht, Gesellschaften im Ausland
Horizontale Integration	- Kunde hat direkten Zugang zur individualisierten Produktion - Lieferanten haben Zugriff auf produktionsinternes Kanban-System - Kompatibilität der Bestellsysteme/Produktdaten zwischen Schmalz, Kunden und Lieferanten
Beteiligte Akteure	Kunden (Fabrikaurüster), Lieferanten

Systemrahmen vor und nach Einführung der Praxisanwendung

Vorher: Der Systemrahmen des Zustands „Vorher“ umfasst die Produktion in Vorzugsreihen-Fertigung der Greifsysteme inklusive der dazu bei einem externen Dienstleister ausgelagerten standardisierten (Massen-)Produktion der Schaumteile sowie die Lagerung bis zum Abruf durch den Kunden.

Nachher: PA3 umfasst die Maßnahmen M1, M7, M9 und M10. Die dadurch notwendigen Hardware- und Software-Systemelemente aus Tabelle 19 sind in Abbildung 14 dargestellt. Die Effekte außerhalb des Betriebs (horizontale Integration) werden nicht berücksichtigt, da bei Kunden und Lieferanten ausschließlich immaterielle Ressourcen betroffen sind.

Funktionelle Einheit (FU): Als FU für den Vergleich „Vorher-Nachher“ wird eine Einheit dieses spezifischen Produkts angenommen [1 Stück Flächengreifer].

Tabelle 19: Notwendige Systemelemente von PA3

Hardware		
Generische Systemelemente	Konkrete Komponenten	Relevant für Maßnahme
Sensorik	Trägheit, Druck/Kraft, Licht, Bildkameras, Temperatur	M1, M7, M9 M10
Server	Application Server, OPC ^{a)} -Server	M7, M9 M10
Computer	SPS ^{b)} -Steuerung, Notebooks, Embedded Personal Computer	M7, M10
Kommunikationstechnik	Feldbussysteme, OPC-UA ^{c)}	M7, M10
Software		
Generische Systemelemente	Konkrete Komponenten	Relevant für Maßnahme
Software (Funktion)	Simulationssoftware, PDM/PLM ^{d)}	M7, M9, M10
Software (Schnittstellen)	XML ^{e)} -Standard	M1, M7, M9, M10

- a) OPC - Object Linking and Embedding for Process Control
- b) SPS - Speicherprogrammierbare Steuerung
- c) OPC-UA - Object Linking and Embedding for Process Control - Unified Architecture
- d) PDM/PLM - Produktdatenmanagement/Product Lifecycle Management
- e) XML - Extensible Markup Language

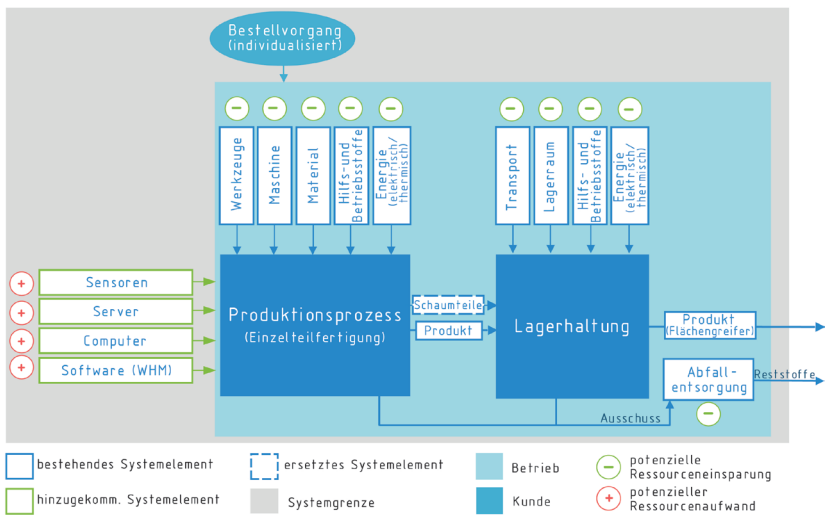


Abbildung 14: Systemrahmen von PA3 („Nachher“) mit Einsparungen und Aufwänden

Ermittlung von Einsparungen und Aufwänden an materiellen betrieblichen Ressourcen

In Tabelle 20 sind die Einsparungen und Aufwände sowie die verfügbaren Informationsgrundlagen zusammengestellt.

Tabelle 20: Einsparungen und Aufwände von PA3 [FU: 1 Stück Flächengreifer]

Einsparungen bezogen auf FU				
Einsparungseffekte		Betroffene betrieblich materielle Ressourcen	Einsparungen pro FU	Beeinflusste natürliche Ressourcen ^{c)}
Vermeidung von Abfall durch Überlagerung von Schaumstoffteilen	Durch lange Lagerzeiten verschlechterte sich die Materialeigenschaft von überproduzierten Schaumstoffteilen, so dass diese als Abfall entsorgt werden mussten. Die flexibilisierte Fertigungslinie verhindert Überproduktion und somit Abfälle (Schaumstoff).	Schaumstoff, Verschleiß Maschine/Werkzeuge	bis 25 % ^{a)}	Rohstoffe, Energieressourcen, Ökosystemleistungen
Verringerung von Transportaufwendung	Früher wurden die Schaumteile bei einem externen Dienstleister gefertigt. Nun findet die Produktion dieser direkt an der Montagelinie statt. So reduzieren sich Transportaufwendungen für die Schaumteile.	Elektr. Energie, Treibstoff	bis 25 % ^{a)}	Energieressourcen, Ökosystemleistungen (Emissionen, v. a. CO ₂)
Reduzierung der Fehlerrate in der Fertigung	Durch das Wegfallen der Überproduktion bzw. der Lagerung von Schaumteilen sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass überlagerte bzw. nicht mehr qualitätskonforme Schaumteile bei der Produktion des Flächengreifers verwendet werden. In diesem Zusammenhang sinkt die Fehlerrate.	Schaumstoff	50 - 75 % ^{a)}	Rohstoffe, Energieressourcen, Ökosystemleistungen
Einsparung von Lagerraum durch Flexibilisierung der Produktion	Durch die Flexibilisierung der Produktion konnten die Lagerbestände der Schaumstoffteile beinahe vollständig eliminiert werden. Der Lagerraum kann dadurch anderweitig genutzt bzw. ggf. kann dadurch eine zukünftige Lagererweiterung vermieden werden.	-	Anteilige Einsparungen der Bauaufwendungen für das Lager ^{b),e)}	-
Aufwände bezogen auf FU				
Hardware ^{d)}			Software ^{d)}	
Sensoren, Datenserver, Computer, Kommunikationstechnik			WHM-Software	

^{a)} Fragebogen/Interviews Fallstudie

^{b)} eigene Abschätzung auf Basis der Fallstudienanalysen.

^{c)} nach VDI 4800-1 (2016)

^{d)} keine Angaben zu Hardware-Mengen bzw. Stromverbräuchen der Software seitens des Unternehmens möglich.

^{e)} vermutlich geringer Beitrag; wird daher in der Bilanzierung nicht berücksichtigt.

7.2.4 PA4: Warehouse Management System

Aus der Fallstudie des Unternehmens MAINCOR Rohrsysteme GmbH & Co. KG (Anhang 1 A4, S. 236) wird als Praxisanwendung das dort implementierte Warehouse Management System (WMS) analysiert (Tabelle 21).

Dieses ermöglicht eine geregelte Verwaltung und systematische Steuerung der innerbetrieblichen Logistikprozesse.

Tabelle 21: Charakterisierung der Praxisanwendung PA4

PA4: „Warehouse Management System“ (MAINCOR Rohrsysteme GmbH & Co. KG)	
Beschreibung der Praxisanwendung	Das Unternehmen MAINCOR stellt Rohrsysteme für verschiedene Anwendungsbereiche her. Zur Optimierung von Logistikprozessen, insbesondere von Einlagerungs- und Auslagerungsprozessen, wurde ein Warehouse Management System (WMS) inklusive optischer Objektidentifikation implementiert. Dabei stellt das WMS ein softwarebasiertes Verwaltungssystem für die Organisation von Warenlagern dar. Durch die Markierung der Waren mittels produktspezifischer Strichcodes können Produktinformationen mittels manueller Bediengeräte in das WMS aufgenommen, verändert und bei Bedarf aus dem System abgerufen werden. So ist neben den Funktionen der optimieren Lagerverwaltung (Mengen- und Lagerplatzverwaltung, Zustand der gelagerten Produkte, Fördermittelsteuerung und Disposition) auch die Überprüfung bestimmter Produktzustände aufgrund digitaler Objektgedächtnisse möglich.
Eingeführt seit	2015
Eingesetzte Maßnahmen	M1: Vernetzung von Sensoren und Aktoren M2: Einsatz digitaler Objektgedächtnisse M4: Maßnahmen zu Werkerunterstützung und Assistenz M6: Einführung und Verwendung von Ortungs- und Lokalisierungssystemen
Vertikale Integration	- Optimierung der Lagerverwaltung wird ermöglicht. - Der eigentliche Produktionsablauf der Rohrsysteme erfährt durch das WMS keine Veränderung.
Beteiligte Akteure	Vertrieb, Produktion, Logistik & Lager, IT & Cloud Services
Horizontale Integration	Kunden haben eingeschränkten Zugriff auf Informationen zu aktuellen Lagerkapazitäten und Beständen über das WMS.
Beteiligte Akteure	IT-Dienstleister, Kunden

Systemrahmen vor und nach Einführung der Praxisanwendung

Vorher: Im Systemrahmen des Zustands „Vorher“ werden alle betrieblichen Prozesse zur Lagerhaltung der Rohrsystemteile („chaotisches“ Lagerungssystem) festgehalten. Die Dokumentation der Lagerlogistik bzw. spezifischer Produktinformationen findet analog statt.

Nachher: PA4 umfasst die Maßnahmen M1, M2, M4 und M6. Die dadurch notwendigen Hardware- und Software-Systemelemente aus Tabelle 22 sind in Abbildung 15 dargestellt. Obwohl Kunden auf Bereiche des betriebsinternen WMS Zugriff haben, liegen die materiellen Effekte ausschließlich auf Unternehmensseite²⁰⁸.

²⁰⁸ Effekte außerhalb des Betriebs werden somit nicht berücksichtigt.

Funktionelle Einheit (FU): Als FU für den Vergleich „Vorher-Nachher“ wird eine Einheit des produzierten Produkts angenommen [1 Stück Rohrsystembestandteil].

Tabelle 22: Notwendige Systemelemente von PA4

Hardware		
Generische Systemelemente	Konkrete Komponenten	Relevant für Maßnahme
Sensorik	Trägheit, Strom/Spannung, Medium, Temperatur	M1, M4, M6
Aktoren	elektrisch, pneumatisch, hydraulisch	M1, M4
Server	Datenserver, Application Server	M2, M4
mobile Endgeräte	Smartphones mit WLAN	M4, M6
Computer	SPS ^{a)} -Steuerung, Workstations, Notebooks	M2, M4, M6
Mikrocontroller	Pi	M1, M2, M4
Software		
Generische Systemelemente	Konkrete Komponenten	Relevant für Maßnahme
Kommunikationstechnik	(Industrial) WLAN ^{b)} , Internetprotokoll	M2
Software (Funktion)	WMS ^{c)} - und Simulationssoftware, Datenbanken, SQL ^{d)} -Server, CAE ^{e)} , PDM/PLM ^{f)}	M2, M4, M6
Software (Schnittstellen)	XML ^{g)} -Standard, Data-Dictionary, DPWS ^{h)} , WSDL ⁱ⁾	M1, M2, M4, M6

^{a)} SPS - Speicherprogrammierbare Steuerung

^{b)} WLAN - Wireless Local Area Network

^{c)} WMS - Warehouse Management System

^{d)} SQL - Structured Query Language

^{e)} CAE - Computer Aided Engineering

^{f)} PDM/PLM - Produktdatenmanagement/Product Lifecycle Management

^{g)} XML - Extensible Markup Language

^{h)} DPWS - Devices Profile for Web Services

ⁱ⁾ WSDL - Web Services Description Language

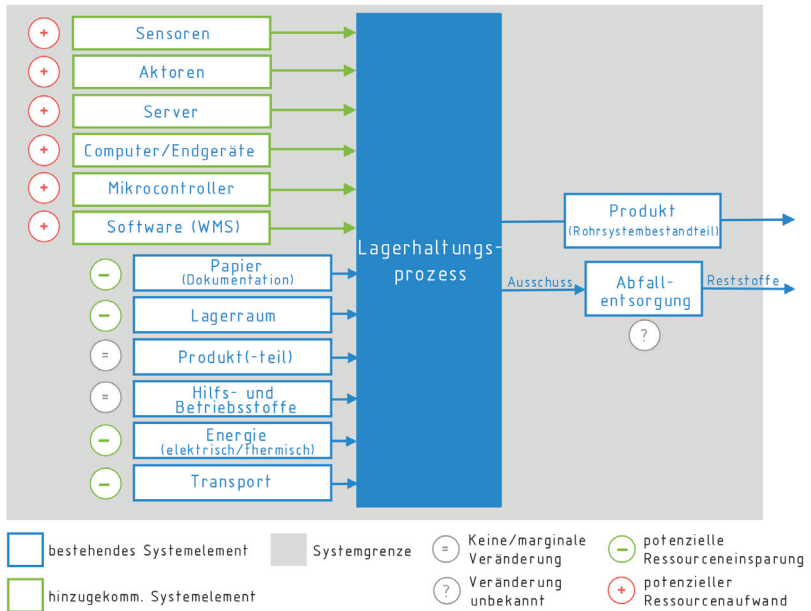


Abbildung 15: Systemrahmen von PA4 („Nachher“) mit Einsparungen und Aufwänden

Ermittlung von Einsparungen und Aufwänden an materiellen betrieblichen Ressourcen

In Tabelle 23 sind die Einsparungen und Aufwände sowie die verfügbaren Informationsgrundlagen zusammengestellt.

Tabelle 23: Einsparungen und Aufwände von PA4 [FU: 1 Stück Rohrsystembestandteil]

Einsparungen bezogen auf FU				
Einsparungseffekte		Betroffene betrieblich materielle Ressourcen	Einsparungen pro FU	Beeinflusste natürliche Ressourcen ^{d)}
Verringerung von Transportaufwendungen durch digitales Objektgedächtnis	Nach dem chaotischen Lagerhaltungssystem können Produkte bzw. Produktteile nun durch Lokalisierung geortet werden. In diesem Zusammenhang sinken unnötige Transportaufwendungen zwischen Produktionslinie und Lager sowie die benötigte Energiemenge zum Finden von Produkten bzw. Produktteilen.	Elektr. Energie, Treibstoff	Keine Angaben ^{a)}	Energieressourcen, Ökosystemleistungen (Emissionen, v. a. CO ₂)
Einsparung von Lagerraum durch das optimierte Lagermanagement	Durch beschleunigte Ein- und Auslagerprozesse aufgrund der Reduktion schriftlicher Unterlagen wird der Durchlauf von Produkten im Lager erhöht. Die benötigte Lagerfläche kann reduziert bzw. gegebenenfalls anderweitig genutzt werden.	-	Anteilige Einsparungen der Bauaufwendungen für das Lager ^{b),e)}	-
Verringerung des Materialeinsatzes durch digitales Lagerhaltungssystem	Durch die digitale Ablage der Produkt- bzw. (teilw.) Prozessinformationen im WMS und die dadurch mögliche papierlose Auftragsabwicklung minimieren sich analoge Dokumentationsvorgänge. In diesem Zusammenhang sinkt der Einsatz von Dokumentationsmaterial (Papier).	Papier, Materialien	Keine Angaben ^{a)}	Rohstoffe
Aufwände bezogen auf FU				
Hardware ^{d)}		Software ^{d)}		
Sensoren, Aktoren, Server, Endgeräte/Computer, Microcontroller		WMS ^{f)} -Software		

^{a)} Fragebogen/Interviews Fallstudie

^{b)} eigene Abschätzung auf Basis der Fallstudienanalysen.

^{c)} nach VDI 4800-1 (2016)

^{d)} keine Angaben zu Hardware-Mengen bzw. Stromverbräuchen der Software seitens des Unternehmens möglich.

^{e)} vermutlich geringer Beitrag; wird daher in der Bilanzierung nicht berücksichtigt.

^{f)} WMS – Wireless Local Area Network

7.2.5 PA5: Data on a Stick

Aus der Fallstudie des Unternehmens **Sensitec GmbH** (Anhang 1 A5, S. 240) wird als Praxisanwendung die dort realisierte papierlose Fertigung (Data on a Stick) zur Herstellung von Wafern untersucht (Tabelle 24).

Tabelle 24: Charakterisierung der Praxisanwendung PA5

PA5: „Data on a Stick“ (Sensitec GmbH)	
Beschreibung der Praxisanwendung	Im untersuchten Unternehmen werden u. a. Wafer mittels Beschichtung und Strukturierung in einem sterilen Produktionsbereich produziert. Für die Umstellung auf eine papierlose Fertigung wurden Datenträger in den Produktionsprozess integriert, auf welchen sämtliche Herstellungsschritte dokumentiert werden. Diese werden jeweils mit jedem einzelnen Produkt mitgeführt, nehmen alle produktspezifischen Informationen auf und speichern diese zentral im unternehmenseigenen Datenverwaltungssystem (MES-System) ab. Vor Eingliederung der Praxisanwendung wurden Daten zur Produktion bzw. zum Produkt analog auf Reinraumpapier aufgenommen. Hintergrund für die Einführung war eine zunehmende Häufigkeit von Netzwerkausfällen durch werksnahe Baumaßnahmen. Dies hatte jedes Mal einen Stopp der Produktion zur Folge. Nach der Umsetzung der Praxisanwendung konnte die Produktion auch bei Netzwerkausfall fortgesetzt werden.
Eingeführt seit	2011
Eingesetzte Maßnahmen	M1: Vernetzung von Sensoren und Aktoren M2: Einsatz digitaler Objektgedächtnisse M3: Dezentrale Steuerung M6: Einführung und Verwendung von Ortungs- und Lokalisierungssystemen M7: Zustandsüberwachung M8: Prädiktive Wartung M9: Durchgängige Datenintegration
Vertikale Integration	- Daten werden ab der Feldebene in allen Bereichen des betrachteten Unternehmens erfasst, gespeichert und miteinander verknüpft. - Echtzeit-Steuerung von Fertigungsabläufen wird ermöglicht. - Der <u>eigentliche Produktionsablauf der Wafer erfährt dabei keine Veränderung.</u>
Beteiligte Akteure	Produktentwicklung, Prozessplanung & -entwicklung, Fabrikplanung, Supply Chain Management, Einkauf & Beschaffung, Produktion, Logistik & Lager, Fertigung & Montage, Instandhaltung, IT & Cloud Services
Horizontale Integration	- Austausch von digitalen Daten mit Kunden und Lieferanten beschleunigt den Entwicklungs- und Fertigungsprozess durch Vermeidung von Medienbrüchen und Übertragungsfehlern. - Effekte durch die Praxisanwendung haben hauptsächlich Auswirkungen auf Unternehmensseite.
Beteiligte Akteure	Kunden, Lieferanten

Systemrahmen vor und nach Einführung der Praxisanwendung

Vorher: Der Systemrahmen des Zustands „Vorher“ umfasst die Produktion von Wafern. Diese werden durch die Fertigungslinie auf Werkstückträgern geführt, an welchen die gesamten Produkt- und Prozessinformationen in Papierform (u. a. Produktdaten, Arbeitsplan, Produktionsdaten) angeheftet sind.

Nachher: PA5 umfasst die Maßnahmen M1, M2, M3, M6, M7, M8 und M9. Die dadurch notwendigen Hardware- und Software-Systemelemente aus Tabelle 25 sind in Abbildung 16 dargestellt. Das zuvor benötigte Reiraumpapier ist nicht mehr für die Dokumentation erforderlich. Die Effekte außerhalb des Betriebs werden nicht berücksichtigt, da bei Kunden und Lieferanten keine betrieblich materiellen Ressourcen betroffen sind.

Funktionelle Einheit (FU): Als FU für den Vergleich „Vorher-Nachher“ wird eine Einheit des gefertigten Produkts angenommen [1 Stück Wafer].

Tabelle 25: Notwendige Systemelemente von PA5

Hardware		
Generische Systemelemente	Konkrete Komponenten	Relevant für Maßnahme
Server	Datenserver, Application Server	M2, M7, M8, M9
Computer	Workstations	M7, M8
Kommunikationstechnik	USB ^{a)} -Sticks	M3, M6, M7, M8
Software		
Generische Systemelemente	Konkrete Komponenten	Relevant für Maßnahme
Software (Funktion)	Datenbank, SQL ^{b)} -Server	M2, M3, M6, M7, M8, M9
Software (Schnittstellen)	Schnittstellen	M1, M2, M6, M7, M8, M9

^{a)} USB – Universal Serial Bus

^{b)} SQL – Structured Query Language

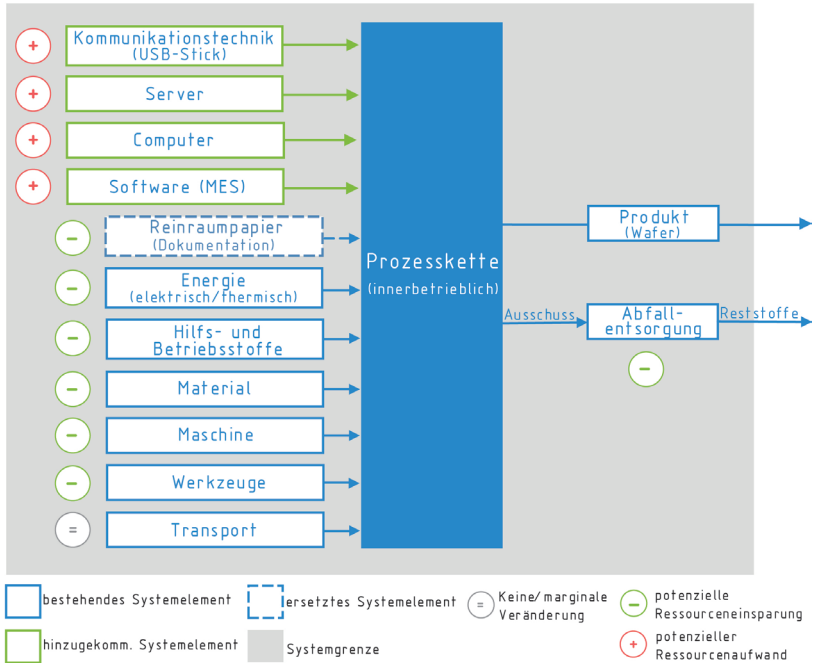


Abbildung 16: Systemrahmen von PA5 („Nachher“) mit Einsparungen und Aufwänden

Ermittlung von Einsparungen und Aufwänden an materiellen betrieblichen Ressourcen

In Tabelle 26 sind die Einsparungen und Aufwände sowie die verfügbaren Informationsgrundlagen zusammengestellt.

Tabelle 26: Einsparungen und Aufwände von PA5 [FU: 1 Stück Wafer]

Einsparungen bezogen auf FU				
Einsparungseffekte		Betroffene betrieblich materielle Ressourcen	Einsparungen pro FU	Beeinflusste natürliche Ressourcen ^{b)}
Vermeidung von Abfall aufgrund geringerer Kontaminationsgefahr	Der Ersatz des Reinraumpapiers durch Datenträger verringert die Gefahr von Fremdeintragungen in den sterilen Produktionsbereich. In diesem Zusammenhang sinkt die Ausschuss- bzw. Abfallmenge.	Material, Verschleiß Maschine/ Werkzeuge	bis 25 % ^{a)}	Rohstoffe, Energieressourcen, Ökosystemleistungen
Reduzierung der Fehlerrate durch Lokalisierung fehlerhafter Teile	Durch die Lokalisierung und das Aussortieren fehlerhafter Wafer-Teile werden diese keinen weiterführenden Verarbeitungsschritten zugeführt. In diesem Zusammenhang sinkt die Fehlerrate.	Materialien, Verschleiß Maschine/ Werkzeuge, Betriebs- und Hilfsstoffe	bis 25 % ^{a)} (Fotolacke: 5 %; Wasser: 10 %) ^{a)}	Rohstoffe, Energieressourcen, Ökosystemleistungen
Einsparung von Material durch Datenträger	Vor Eingliederung der Praxisanwendung wurden alle produkt- und prozessrelevanten Informationen auf Reinraumpapier mit dem Werkstück durch die Fertigungslinie geführt. Durch die Eingliederung von Datenträgern können jährlich 6.000 – 10.000 Blatt Reinraumpapier eingespart werden.	Material (Reinraumpapier)	bis 25 % ^{a)}	Rohstoffe, Energieressourcen, Ökosystemleistungen
Reduzierung des Energiebedarfs mittels Echtzeitsteuerung	Früher wies der Produktionsablauf einen relativ statischen Charakter auf und Versorgungseinrichtungen waren stets in Betriebsbereitschaft. Die Echtzeitsteuerung des Produktionsprozesses und von Versorgungseinrichtungen (gezieltes Ein- und Abschalten) mittels des MES-Systems führt zu einem geringeren Energiebedarf.	Elektr. Energie	> 20 % ^{a)}	Energieressourcen, Ökosystemleistungen (Emissionen, v. a. CO ₂)
Aufwände bezogen auf FU				
Hardware ^{c)}		Software ^{c)}		
USB ^{d)} -Sticks, Server, Computer		MES ^{e)} -Software		

^{a)} Fragebogen/Interviews Fallstudie

^{b)} nach VDI 4800-1 (2016)

^{c)} keine Angaben zu Hardware-Mengen bzw. Stromverbräuchen der Software seitens des Unternehmens möglich.

^{d)} USB – Universal Serial Bus

^{e)} MES – Manufacturing Execution System

7.2.6 PA6: Virtuelle Produktsimulation

Aus der Fallstudie des Unternehmens **Sensitec GmbH** (Anhang 1 A5, S. 240) wird als Praxisanwendung die dort realisierte virtuelle Produktsi-

mulation zur Entwicklung von Produktmustern für magnetoresistive Sensoren untersucht (Tabelle 27). Diese Praxisanwendung ermöglicht es, durch Softwarewerkzeuge Produktmuster virtuell zu simulieren, bevor diese als physischer Prototyp gefertigt werden.

Tabelle 27: Charakterisierung der Praxisanwendung PA6

PA6: „Virtuelle Produktsimulation“ (Sensitec GmbH)	
Beschreibung der Praxisanwendung	Im untersuchten Unternehmen werden u. a. magnetoresistive Sensoren für Weg-, Winkel-, Feld- und Strommessung produziert. In der Phase der Produktentwicklung werden durch die eingeführte Praxisanwendung benötigte Produktmuster zunächst virtuell entwickelt und simuliert, bevor sie erstmals gefertigt werden. Die virtuelle Simulation des Musters wird mit dem Kunden abgesprochen, um bereits vor der ersten Fertigung des Musters mögliche Änderungen in das digitale Modell zu integrieren. Dafür reicht die Fertigung eines Produktmusters oft aus. Vor Einführung der Anwendung war die Fertigung der Muster notwendig, um dem Kunden das Produktmuster zu präsentieren. Bei möglichen Änderungswünschen wurde das Muster an die Änderungen angepasst, gefertigt und dem Kunden erneut vorgestellt. Dadurch mussten oftmals mehrere Prototypen gefertigt werden.
Eingeführt seit	2006
Eingesetzte Maßnahmen	M10: virtuelle Produktentwicklung
Vertikale Integration	Die Produktentwicklung benötigt eine kleinere Anzahl an gefertigten Produktmustern.
Beteiligte Akteure	Vertrieb, Produktentwicklung, Prozessplanung & -entwicklung, Fabrikplanung, Supply Chain Management, Produktion, Fertigung & Montage, IT & Cloud Services
Horizontale Integration	Der Austausch von digitalen Daten mit Kunden und Lieferanten wird gesteigert.
Beteiligte Akteure	Kunden, Lieferanten

Systemrahmen vor und nach Einführung der Praxisanwendung

Vorher: Der Systemrahmen des Zustands „Vorher“ umfasst die Produktion von magnetoresistiven Sensoren. Darin sind die Produktentwicklung der Produktmuster sowie deren Fertigung enthalten.

Nachher: PA6 umfasst die Maßnahme M10. Die dadurch notwendigen Software-Systemelemente aus Tabelle 28 sind in Abbildung 17 dargestellt. Durch die virtuelle Produktentwicklung erfolgt vor Fertigung eines physischen Musters zunächst eine virtuelle Simulation. Die Eingliederung von PA6 beeinflusst den direkten Materialaufwand (d. h. die im Produkt selbst enthaltenen Materialien) nicht. Die Effekte außerhalb des Betriebs werden nicht berücksichtigt, da bei Kunden und Lieferanten keine betrieblich materiellen Ressourcen betroffen sind.

Funktionelle Einheit (FU): Als FU für den Vergleich „Vorher-Nachher“ wird der magneto-resistive Sensor als Produkt angenommen [1 Stück magneto-resistiver Sensor].

Tabelle 28: Notwendige Systemelemente von PA6

Hardware		
Generische Systemelemente	Konkrete Komponenten	Relevant für Maßnahme
-	-	-
Software		
Generische Systemelemente	Konkrete Komponenten	Relevant für Maßnahme
Software (Funktion)	Datenbank, SQL ^{a)} -Server, Simulationssoftware, CAE ^{b)} , PDM/PLM ^{c)}	M10

^{a)} SQL – Structured Query Language

^{b)} CAE – Computer Aided Engineering

^{c)} PDM/PLM – Produktdatenmanagement/Product Lifecycle Management

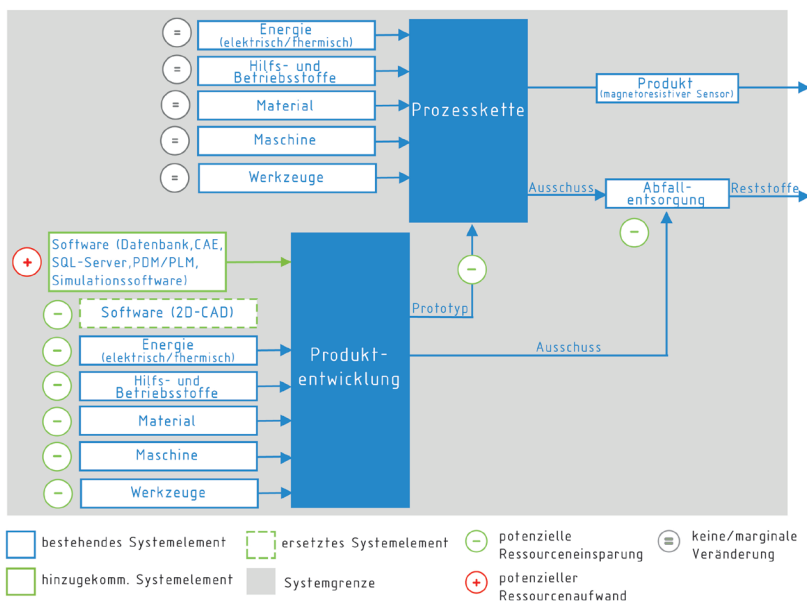


Abbildung 17: Systemrahmen von PA6 („Nachher“) mit Einsparungen und Aufwänden

Ermittlung von Einsparungen und Aufwänden an materiellen betrieblichen Ressourcen

In Tabelle 29 sind die Einsparungen und Aufwände sowie die verfügbaren Informationsgrundlagen zusammengestellt.

Tabelle 29: Einsparungen und Aufwände von PA6 [FU: 1 Stück magnetoresistiver Sensor]

Einsparungen bezogen auf FU				
Einsparungseffekte		Betroffene betrieblich materielle Ressourcen	Einsparungen pro FU	Beeinflusste natürliche Ressourcen ^{b)}
Reduzierung der Fehlerrate durch den digitalen Datenaustausch	Beim Austausch von Daten mit Kunden und Lieferanten können Übertragungsfehler und Medienbrüche entstehen, welche die Produktqualität negativ beeinflussen können. Die Anwendung verringert die Fehlerrate und somit auch den potenziellen Ausschuss.	Materialien, Betriebs- und Hilfsstoffe, Maschinenverschleiß	Keine Angaben ^{a)}	Rohstoffe, Ökosystemleistungen
Einsparung überflüssiger Prototypen	Früher waren physische Prototypen für die Vorstellung des Produkts beim Kunden notwendig. Durch PA6 kann anhand der virtuellen Simulation von Prototypen die Anzahl an Mustern reduziert werden. Dadurch werden Materialien sowie Hilfs- und Betriebsstoffe für die Produktion von überflüssigen Mustern eingespart. Da diese überflüssigen Muster entsorgt wurden, wird durch diese Praxisanwendung unmittelbar Abfall vermieden.	Elektrische Energie, Materialien, Betriebs- und Hilfsstoffe, Maschinenverschleiß	bis 25 % ^{a)}	Energieressourcen, Rohstoffe, Ökosystemleistungen
Aufwände bezogen auf FU				
Hardware ^{c)}		Software ^{c)}		
-		Diverse Software		

^{a)} Fragebogen/Interviews Fallstudie

^{b)} nach VDI 4800-1 (2016)

^{c)} keine Angaben zu Hardware-Mengen bzw. Stromverbräuchen der Software seitens des Unternehmens möglich.

7.2.7 PA7: Business-Warehouse-System

Aus der Fallstudie des Unternehmens **Hermos AG** (Anhang 1 A6, S. 244) wird als Praxisanwendung das dort implementierte Business-Warehouse-System (BWS) untersucht (Tabelle 30). Dieses ermöglicht eine optimierte Planung und Durchführung der unternehmensspezifischen Produktion von Gebäudeautomatisierungslösungen mittels durchgängiger Datenintegration.

Tabelle 30: Charakterisierung der Praxisanwendung PA7

PA7: „Business-Warehouse-System“ (Hermos AG)	
Beschreibung der Praxisanwendung	Im untersuchten Unternehmen werden u. a. auf den Kunden zugeschnittene Gebäudeautomatisierungslösungen hergestellt. Nach Eingang einer Produktbestellung durch den Kunden werden die Daten im Business-Warehouse-System (BWS) verarbeitet. Durch die darin gespeicherten produkt- und prozessübergreifenden Informationen (z. B. Produktparameter, Produktpreise, Lieferanten und Verfügbarkeiten) können entsprechend den Kundenanforderungen sowohl die Schaltpläne direkt digital erstellt sowie die produktspezifische Software unmittelbar programmiert werden. Parallel hierzu findet die Bestellung benötigter Bauteile bei den jeweiligen Zulieferern über das System statt. Basierend auf den erstellten Schaltplänen werden die benötigten Kabel, inkl. Isolierung, Zuschnitt und spez. Kennzeichnung hinsichtlich Installationsort, automatisiert hergestellt. Die Auftragsabwicklung mit dem Tochterunternehmen Hermos Schaltanlagen GmbH wird bis zur Auslieferung des Produkts an den Kunden mittels des BWS vollständig elektronisch dokumentiert. Vor Eingliederung des Systems fanden Dokumentations- sowie Auftragsabwicklungsprozesse analog statt. Benötigte Bauteile wurden bei den jeweiligen Zulieferern in größeren Mengen auf Vorrat bestellt. Es erfolgte keine automatisierte Produktion von spezifischen Produktbestandteilen.
Eingeführt seit	90er Jahre (kontinuierliche Entwicklung)
Eingesetzte Maßnahmen	M1: Vernetzung von Sensoren und Aktoren M2: Einsatz digitaler Objektgedächtnisse M3: Dezentrale Steuerung M4: Maßnahmen zur Werkerunterstützung und Assistenz M5: Dynamisch kooperierende Systeme und Modularisierung M6: Einführung und Verwendung von Ortungs- und Lokalisierungssystemen M7: Zustandsüberwachung M8: Prädiktive Wartung
Vertikale Integration	- Daten werden in allen Bereichen des betrachteten Unternehmens erfasst und miteinander verknüpft. - Digitale Vernetzung ermöglicht papierlose Auftrags- und Fertigungsabwicklung.
Beteiligte Akteure	Vertrieb, Produktentwicklung, Einkauf & Beschaffung, Produktion, Service
Horizontale Integration	- Direkte Vernetzung mit dem Tochterunternehmen sowie mit Lieferanten. - Automatische Bestellung benötigter Bauteile von Lieferanten durch das BWS.
Beteiligte Akteure	Kunden, Lieferanten, Tochterunternehmen (Hermos Schaltanlagen GmbH)

Systemrahmen vor und nach Einführung der Praxisanwendung

Vorher: Der Systemrahmen des Zustands „Vorher“ umfasst die standardisierte Produktion einer Gebäudeautomatisierungslösung sowie die Lagerung bis zum Abruf durch den Kunden.

Nachher: PA7 umfasst die Maßnahmen M1 bis M8. Die dadurch notwendigen Hardware- und Software-Systemelemente aus Tabelle 31 sind in Abbildung 18 dargestellt. Die Effekte außerhalb der Einheit Hermos AG und Hermos Schaltanlagen GmbH werden nicht berücksichtigt.

Funktionelle Einheit (FU): Als FU für den Vergleich „Vorher-Nachher“ wird eine Einheit des spezifischen Produkts angenommen [1 Stück Gebäudeautomatisierung].

Tabelle 31: Notwendige Systemelemente von PA7

Hardware		
Generische Systemelemente	Konkrete Komponenten	Relevant für Maßnahme
Sensorik	Position, Bewegung, Trägheit, Druck/Kraft, Licht, Bildkameras, magnet. Feld, Strom/Spannung, Medium, Temperatur	M1, M4, M6 bis M8
Aktoren	Elektrisch, pneumatisch, hydraulisch	M1, M4, M7, M8
Server	Datenserver, Application und OPC ^{a)} -Server	M2, M4, M7, M8
mobile Endgeräte	Smartphone, Tablet mit WLAN	M4, M6 bis M8
Computer	SPS-Steuerung, Workstations, Notebooks, Embedded Personal Computer	M7, M8
Mikrocontroller	Trinkerforge, Pi, Aduino, ARIA, DigiConnect, .Net Gadgeteer, MICA, Pic, Beagle board, Eigenentwicklung	M1 bis M8
Kommunikationstechnik	Feldbussysteme, RFID ^{b)}	M1 bis M5, M7, M8
Software		
Generische Systemelemente	Konkrete Komponenten	Relevant für Maßnahme
Kommunikationstechnik	(Industrial) WLAN und Ethernet, Internetprotokoll, GPRS ^{c)} , UMTS ^{d)} , LTE ^{e)} , EnOcean	M2, M3, M5
Software (Funktion)	Datenbanken, Cloudspeicher, Simulationssoftware, SQL ^{f)} -Server, ERP ^{g)} , CAE ^{h)} , CAD ⁱ⁾ , BDE ^{j)} , MDE ^{k)} , WMS ^{l)} , PPS ^{m)}	M2 bis M4, M6 bis M8
Software (Schnittstellen)	XML ⁿ⁾ -Standard, Data Dictionary, DPWS ^{o)} , WSDL ^{o)}	M1, M2, M4, M6 bis M8

^{a)} OPC – Object Linking and Embedding for Process Control

^{b)} RFID – Radio-Frequency Identification

^{c)} GPRS – General Packet Radio Service

^{d)} UMTS – Universal Mobile Telecommunications System

^{e)} LTE – Long Term Evolution

^{f)} SQL – Structured Query Language

^{g)} ERP – Enterprise Resource Planning

^{h)} CAE – Computer Aided Engineering

ⁱ⁾ CAD – Computer Aided Design

^{j)} BDE – Betriebsdatenerfassung

^{k)} MDE – Maschinendatenerfassung

^{l)} WMS – Warehouse Management System

^{m)} PPS – Produktionsplanung und -steuerung

ⁿ⁾ XML – Extensible Markup Language

^{o)} DPWS – Devices Profile for Web Services

^{o)} WSDL – Web Services Description Language

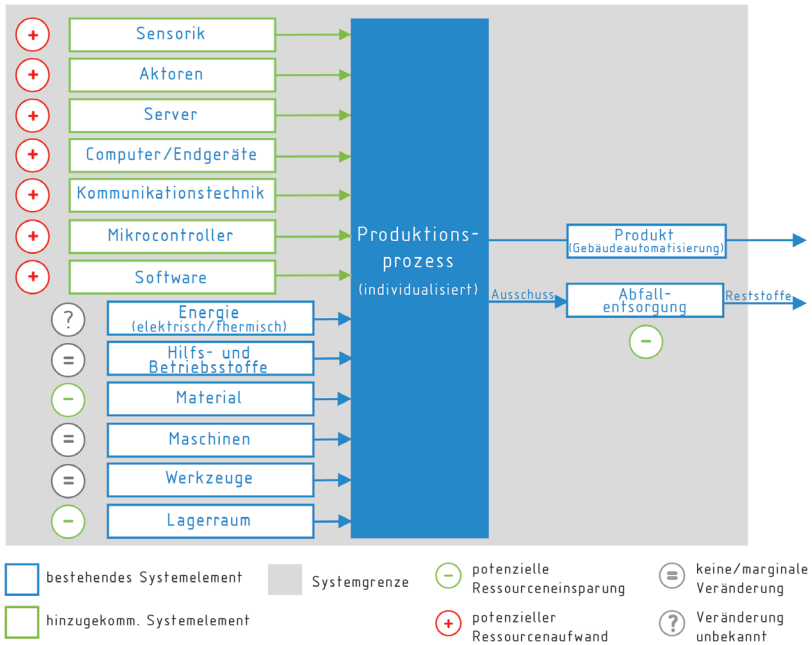


Abbildung 18: Systemrahmen der PA7 („Nachher“) mit Einsparungen und Aufwänden

Ermittlung von Einsparungen und Aufwänden an materiellen betrieblichen Ressourcen

In Tabelle 32 sind die Einsparungen und Aufwände sowie die verfügbaren Informationsgrundlagen zusammengestellt.

Tabelle 32: Einsparungen und Aufwände von PA7 [FU: 1 Stück Gebäudeautomatisierung]

Einsparungen bezogen auf FU				
Einsparungseffekte		Betroffene betrieblich materielle Ressourcen	Einsparungen pro FU	Beeinflusste natürliche Ressourcen ^{c)}
Einsparung von Lager-raum durch bedarfsge-rechte Bauteilbestel-lungen	Mittels der durchgehenden Datenintegration und dadurch möglichen individuellen Bauteilbestellungen je spezifischem Produkt müssen weniger Materialien auf Vorrat bestellt werden. Dies führt zu einer Verringerung des Lager-raumbedarfs für die Bauteile.	-	Anteilige Einsparun-gen der Bauauf-wendungen für das Lager ^{b), e)}	-
Verringerung des Material-einsatzes durch weniger Falschbestel-lungen	Früher wurden Materialien und Bauteile von Zulieferern auf Vorrat analog bestellt, wodurch häufiger falsche Bestellungen getätigt wurden. Durch die individualisierte Fertigung und die damit verbundene automa-tische Bestellung von Bauteilen über das Business-Warehouse-System (BWS) werden weniger Falschbestellungen getätigt. In diesem Zusammenhang sinkt der Materialaufwand.	Materialien	bis 25 % ^{a)}	Rohstoffe, Öko-systemleistungen
Aufwände bezogen auf FU				
Hardware ^{d)}		Software ^{d)}		
Sensoren, Aktoren, Server, Computer/Endgeräte, Kommunikationstechnik, Microcontroller		Kommunikationstechnik, diverse Software		

^{a)} Fragebogen/Interviews Fallstudie

^{b)} eigene Abschätzung auf Basis der Fallstudienanalysen.

^{c)} nach VDI 4800-1 (2016)

^{d)} keine Angaben zu Hardware-Mengen bzw. Stromverbräuchen der Software seitens des Unternehmens möglich.

^{e)} vermutlich geringer Beitrag; wird daher in der Bilanzierung nicht berücksichtigt.

7.2.8 PA8: Virtuelle Produktfertigung im Prototypenbau

Aus der Fallstudie des Unternehmens **Sanner GmbH** (Anhang 1 A7, S. 247) wird als Praxisanwendung die dort umgesetzte Produktfertigung mittels 3D-Druck (Tabelle 33) zur Herstellung von Kunststoffverschluss-Prototypen untersucht.

Tabelle 33: Charakterisierung der Praxisanwendung PA8

PA8: „Virtuelle Produktfertigung im Prototypenbau“ (Sanner GmbH)	
Beschreibung der Praxisanwendung	Die Firma Sanner stellt mithilfe des Spritzgussverfahrens Kunststoffverpackungen und Komponenten für Pharma-, Medizin- und Healthcareprodukte her. Vor Umsetzung der Praxisanwendung mussten für die einzelnen Prototypen spezifische Werkzeuge hergestellt werden. Jede Änderung am Prototypaufbau führte dazu, dass ein neues Musterwerkzeug entwickelt und gefertigt werden musste. Bis zur finalen Freigabe durch den Kunden vergingen zwischen sechs bis zwölf Monate. Durch die 3D-Druck-Technologie können die Prototypen anhand eines digitalen Modells direkt gedruckt werden. Dabei konnten die Freigabeschleifen reduziert werden, so dass sie nun wenige Wochen bis Monate andauern. Damit können das Spritzgussverfahren sowie die aufwendige konventionelle Musterwerkzeugherstellung umgangen werden. Heute werden nur prototypspezifische Musterwerkzeuge auf Kundenwunsch hergestellt.
Eingeführt seit	2014
Eingesetzte Maßnahmen	M9: Durchgängige Datenintegration M10: Virtuelle Produktentwicklung
Vertikale Integration	- Für die Herstellung eines Prototyps sind keine Musterwerkzeuge zwingend erforderlich. Erst nach Abnahme des digitalen Modells wird das Werkzeug für die Serienfertigung erstellt. - Die Anzahl der im Betrieb hergestellten Werkzeuge nimmt ab.
Beteiligte Akteure	Produktentwicklung, Werkzeugtechnik
Horizontale Integration	Da die Firma Sanner einen Großteil ihrer Musterwerkzeuge extern herstellen lässt, zeigt die reduzierte Anzahl an Werkzeugbestellungen unmittelbaren Einfluss auf die Werkzeughersteller.
Beteiligte Akteure	Werkzeughersteller

Systemrahmen vor und nach Einführung der Praxisanwendung

Vorher: Für die Herstellung eines Prototyps aus Kunststoff mit dem Spritzgussverfahren werden neben einer CAD-Zeichnung auch die dafür benötigten Musterwerkzeuge für den Produktionsprozess (z. B. Spritzguss-Werkzeuge) benötigt.

Nachher: PA8 umfasst die Maßnahmen M9 und M10. Die dadurch notwendigen Hard- und Software-Systemelemente aus Tabelle 34 sind in Abbildung 19 dargestellt. Für die Herstellung von Prototypen kommt ein 3D-Drucker zum Einsatz. Dadurch können die virtuellen 3D-Zeichnungen der Prototypen direkt gedruckt werden. Da Musterwerkzeuge nur bei komplexen Funktionsbauteilen oder notwendigen Kundenanforderungen erforderlich sind, werden die Musterwerkzeuge in der weiteren Bewertung nicht berücksichtigt. Eventuelle Änderungen der Prototypstruktur werden am digitalen Modell durchgeführt.

Funktionelle Einheit (FU): Als FU wird eine Einheit Prototyp eines Kunststoffverschlusses gewählt [1 Stück Kunststoffverschluss].

Tabelle 34: Notwendige Systemelemente von PA8

Hardware		
Generische Systemelemente	Konkrete Komponenten	Relevant für Maßnahme
Drucker	3D-Drucker	M10
Software		
Generische Systemelemente	Konkrete Komponenten	Relevant für Maßnahme
Software (Funktion)	3D-Druckersoftware	M9, M10

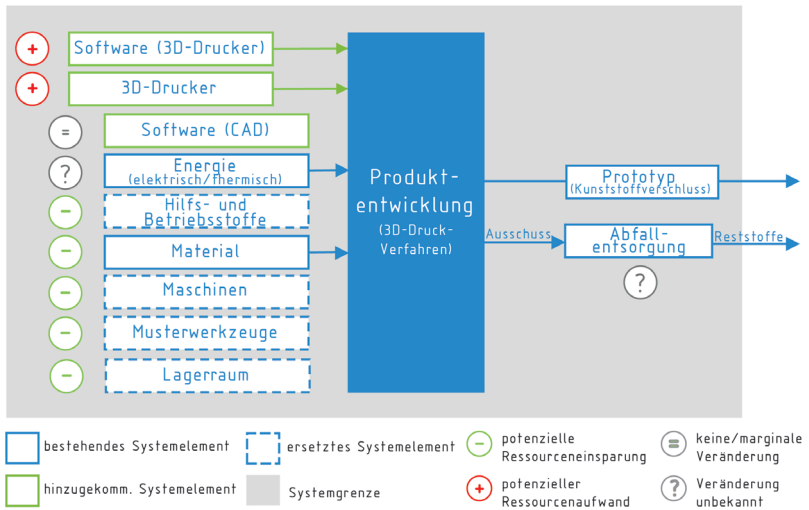


Abbildung 19: Systemrahmen von PA8 („Nachher“) mit Einsparungen und Aufwänden

Ermittlung von Einsparungen und Aufwänden an materiellen betrieblichen Ressourcen

In Tabelle 35 sind die Einsparungen und Aufwände sowie die verfügbaren Informationsgrundlagen zusammengestellt.

Tabelle 35: Einsparungen und Aufwände von PA8 [FU: 1 Stück Kunststoffverschluss]

Einsparungen bezogen auf FU				
Einsparungseffekte		Betroffene betrieblich materielle Ressourcen	Einsparungen pro FU	Beeinflusste natürliche Ressourcen ¹⁾
Einsparung von Lagerraum für Musterwerkzeuge	Die Musterwerkzeuge werden nach einmaliger Nutzung im Betrieb gelagert. Aus der Reduzierung der hergestellten Musterwerkzeugmenge resultiert eine Senkung des für diese Werkzeuge benötigten Lagerumbedarfs.	-	Anteilige Einsparungen der Bauaufwendungen für das Lager ^{b), c)}	-
Materialeinsparung durch Substitution des konventionellen Fertigungsverfahrens	Mit dem 3D-Druck kann der Prozessschritt der Prototypherstellung mittels Spritzgussverfahren substituiert werden. Dadurch werden nicht nur die dafür benötigten Musterwerkzeuge eingespart, sondern auch Hilfs- und Betriebsstoffe für den Betrieb der Spritzgussanlagen.	Werkzeuge, Material, Betriebs- und Hilfsstoffe	Musterwerkzeuge: > 50 % ^{a)} 3D-Druck-Verfahren: keine Angaben ^{a)}	Rohstoffe
Verringerung des Energiebedarfs für die Werkzeug- und Prototypherstellung	Durch den 3D-Druck kann die benötigte Energiemenge sowohl für die betriebsinterne Werkzeugherstellung als auch für die Prototypfertigung durch das Spritzgussverfahren eingespart werden.	Elektrische Energie	Keine Angaben ^{a)}	Energieressourcen
Aufwände bezogen auf FU				
Hardware ^{d)}		Software ^{d)}		
1x 3D-Drucker		3D-CAD ^{d)} -Software		

^{a)} Fragebogen/Interviews Fallstudie

^{b)} eigene Abschätzung auf Basis der Fallstudienanalysen.

^{c)} nach VDI 4800-1 (2016)

^{d)} keine Angaben zu den Stromverbräuchen der Software seitens des Unternehmens möglich.

^{e)} vermutlich geringer Beitrag; wird daher in der Bilanzierung nicht berücksichtigt.

^{f)} CAD – Computer Aided Design

7.2.9 PA9: Cloud-basierte Fertigung

Aus der Fallstudie des Unternehmens **Sanner GmbH** (Anhang 1 A7, S. 247) wird auch die dort umgesetzte Praxisanwendung Cloud-basierte Fertigung (Tabelle 36) untersucht. Durch die Nutzung von Cloud-basierten Dienstleistungen sollte vor allem die Systemstabilität und die damit verbundene Prozessstabilität gesteigert werden.

Tabelle 36: Charakterisierung der Praxisanwendung PA9

PA9: „Cloud-basierte Fertigung“ (Sanner GmbH)	
Beschreibung der Praxisanwendung	Das Unternehmen bezieht das Manufacturing Execution System (MES) sowie das SAP-System als Webservice über das Internet. Durch diese Praxisanwendung wird der Speicherort der betriebsinternen Daten vom betriebseigenen Datenserver in ein Rechenzentrum ausgelagert, welches durch einen externen IT-Dienstleister betrieben wird. Die Datenspeicherung des unternehmensinternen MES- und SAP-Systems erfolgt in diesem Zusammenhang ebenfalls durch den externen Dienstleister. Vor Eingliederung der Praxisanwendung wurden jegliche Betriebsdaten bzw. Softwareprogramme auf betriebsinternen Datenservern gespeichert bzw. ausgeführt. Für die Umsetzung der Praxisanwendung wurde am Standort eine zweite Datenleitung als Notfalleitung gelegt.
Eingeführt seit	2009
Eingesetzte Maßnahmen	M9: Durchgängige Datenintegration M11: Cloud Computing
Vertikale Integration	<ul style="list-style-type: none"> - Keine Veränderung von betriebsinternen Prozessen. Die Anwendung läuft vollständig im Hintergrund ab - Durch die Praxisanwendung können nun auch andere Standorte des Unternehmens auf den Datenserver und somit auf aktuelle Prozess- und Betriebsinformationen zugreifen.
Beteiligte Akteure	IT & Cloud Services
Horizontale Integration	Der externe Dienstleister des Rechenzentrums übernimmt die Speicherung und Bereitstellung von betriebseigenen Daten und Softwareprogrammen.
Beteiligte Akteure	Externer Dienstleister des Rechenzentrums

Systemrahmen vor und nach Einführung der Praxisanwendung

Vorher: Der Systemrahmen des Zustands „Vorher“ umfasst die Produktion von Kunststoffverschlässen inklusive der für die Produktion genutzten Serverleistung (Datenspeicherung, Softwarenutzung etc.).

Nachher: PA9 umfasst die Maßnahmen M9 und M11. Die dadurch notwendigen Hard- und Software-Systemelemente aus Tabelle 37 sind in Abbildung 20 dargestellt. Die betrachteten Effekte außerhalb des Betriebs (horizontale Integration) werden nur für den externen Dienstleister des Rechenzentrums mitberücksichtigt. Im Prozessmodul „Rechenzentrum“ sind neben der dafür beanspruchten Datenserver die IT-Infrastruktur sowie die dafür benötigte Energiemenge enthalten.

Funktionelle Einheit (FU): Als FU für den Vergleich „Vorher-Nachher“ wird eine Einheit eines spezifischen Produkts (z. B. Kunststoffverschluss) angenommen [1 Stück Kunststoffverschluss].

Tabelle 37: Notwendige Systemelemente von PA9

Hardware		
Generische Systemelemente	Konkrete Komponenten	Relevant für Maßnahme
Server	Datenserver	M9, M11
Kommunikationstechnik	Datenleitung	M9, M11
Software		
Generische Systemelemente	Konkrete Komponenten	Relevant für Maßnahme
Software (Funktion)	Cloudspeicher	M9, M11
Software (Schnittstellen)	VPN ^{a)} -Verbindung	M9, M11

a) VPN – Virtual Private Network

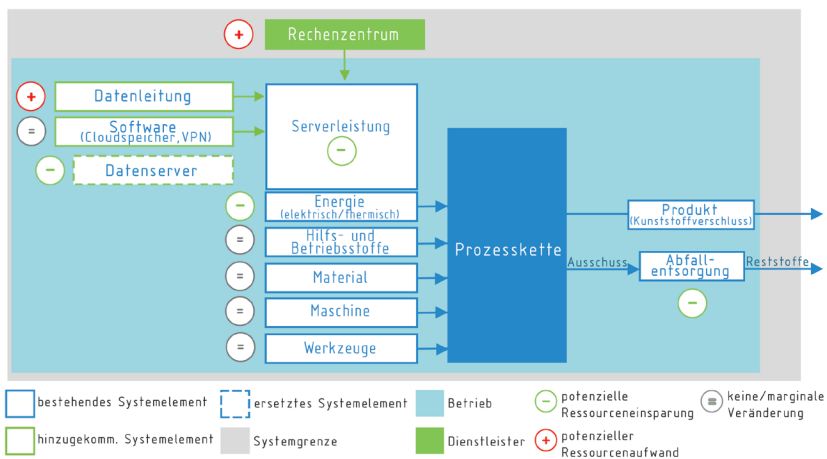


Abbildung 20: Systemrahmen von PA9 („Nacher“) mit Einsparungen und Aufwänden

Ermittlung von Einsparungen und Aufwänden an materiellen betrieblichen Ressourcen

In Tabelle 38 sind die Einsparungen und Aufwände sowie die verfügbaren Informationsgrundlagen zusammengestellt.

Tabelle 38: Einsparungen und Aufwände von PA9 [FU: 1 Stück Kunststoffverschluss]

Einsparungen bezogen auf FU				
Einsparungseffekte		Betroffene betrieblich materielle Ressourcen	Einsparungen pro FU	Beeinflusste natürliche Ressourcen ^{b)}
Abfallvermeidung durch Reduzierung von Prozessausfällen	Bei Problemen an den betriebseigenen Servern standen aufgrund der Vernetzung der Server mit den Produktionsmaschinen die Maschinen zum Teil mehrere Tage still, bis das Problem behoben wurde. Derartige Ausfälle können dazu führen, dass die Produktionslinie aufgrund vorhandener Prozessinstabilitäten mehr Ausschuss generiert. Die Auslagerung des Datenservers hat eine hohe Ausfallsicherheit der Serverleistung zur Folge. Dadurch wird die betriebspezifische Prozessstabilität auch bei unvorhersehbaren Ereignissen (z. B. Stromausfällen) erhöht.	Material	Keine Angaben ^{a)}	Rohstoffe, Ökosystemleistungen
Verringerung des Materialeinsatzes	Durch die Auslagerung der Datenserver sind keine physischen Datenserver vor Ort mehr notwendig. Außerdem fallen die Wartung sowie der Betrieb der Server vor Ort weg. Die Verlagerung auf ein Rechenzentrum ermöglicht eine Verdichtung der Serverkapazitäten.	Materielle Aufwendungen für Server	Keine Angaben ^{a)}	Rohstoffe
Verringerung des Energiebedarfs	Durch die Verlagerung der Serverleistung auf eine externe Cloud kann im Betrieb elektrische Energie für den Betrieb der Server eingespart werden. Der Energieverbrauch für den Serverbetrieb wurde im Zuge der Auslagerung der Serverleistung auf den externen Dienstleister verlagert.	Elektrische Energie	Keine Angaben ^{a)}	Energieressourcen
Aufwände bezogen auf FU				
Hardware ^{c)}		Software ^{c)}		
Rechenzentrum		Cloud-Speicher, VPN ^{d)} -Verbindung		

^{a)} Fragebogen/Interviews Fallstudie

^{b)} nach VDI 4800-1 (2016)

^{c)} keine Angaben zu Hardware-Mengen bzw. Stromverbräuchen der Software seitens des Unternehmens möglich.

^{d)} VPN - Virtual Private Network

7.2.10 PA10: FoamCreator

Aus der Fallstudie des Unternehmens **Wetropa Kunststoffverarbeitung GmbH & Co. KG** (Anhang 1 A10, S. 262 ff.) wird als Praxisanwendung die virtuelle Produktentwicklung in Form des sogenannten „FoamCreator“

(Tabelle 39) untersucht. Dieses virtuelle Produktentwicklungssystem ermöglicht Kunden eine individuelle Gestaltung und Bestellung von Schaumstoffeinlagen mit dem derzeitigen Fokus auf einfachen Werkzeugen.

Tabelle 39: Charakterisierung der Praxisanwendung PA10

PA10: „FoamCreator“ (Wetropa Kunststoffverarbeitung GmbH & Co)	
Beschreibung der Praxisanwendung	Mittels des vom Unternehmen entwickelten FoamCreators wurde die herkömmliche Entwicklung von Schaumstoffeinlagen auf eine durch den Kunden individualisierte virtuelle Produktentwicklung umgestellt. Der FoamCreator kann als webbasiertes Programm auf einem Computer oder als Applikation auf einem Smartphone oder Tablet verwendet werden. Im Zuge der Produktentwicklung der individualisierten Schaumstoffeinlage kann der Kunde aus einer hinterlegten Datenbank Formen für seine Einlage nutzen. Er kann diese individuell anordnen, oder der Kunde fotografiert das Objekt, für welches eine Einlage angefertigt werden soll. Für diesen Zweck steht die ebenfalls für Wetropa entwickelte App „ToolScan“ zur Verfügung. Mit Hilfe der App lädt der Kunde das Abbild seines Werkzeuges in den FoamCreator. Nach Angabe einer einzelnen Abmessung des Objektes und der Auswahl von spezifischen Produktkonfigurationen (z. B. Art und Farbe des Schaumstoffs) durch den Kunden wird automatisch ein einfaches, digitales Modell der Schaumstoffeinlage vom Programm erstellt. Ist der Kunde mit dem virtuellen Prototyp einverstanden, bestätigt er dies durch die Bestellung der Schaumstoffeinlage. Hierbei erfolgt die Übermittlung des Angebots (inkl. des Liefertermins) an den Kunden. Nach dessen Annahme wird die Bestellung direkt an das Unternehmen überführt und der Auftrag in die Fertigungsplanung eingegliedert. Vor dem Einsatz des FoamCreators und des ToolScans mussten die Kundenobjekte vor Ort aufgenommen und in einem CAD-Programm nachmodelliert werden. Erst nach Abstimmungs- und Anpassungsschleifen durch den Konstrukteur und Kunden konnten die Schaumstoffeinlageprototypen zur Fertigung freigegeben werden.
Eingeführt seit	Studie seit 2015
Eingesetzte Maßnahmen	M1: Vernetzung von Sensoren und Aktoren M2: Einsatz digitaler Objektgedächtnisse M9: Durchgängige Datenintegration M10: Virtuelle Produktentwicklung
Vertikale Integration	- Nach Eingang der Kundenbestellung wird der Auftrag mittels durchgängiger Datenintegration direkt in die digitale Fertigungsplanung übertragen. - Der eigentliche Produktionsablauf für die Herstellung einer Schaumstoffeinlage erfährt durch den FoamCreator keine Veränderung.
Beteiligte Akteure	Vertrieb, Produktentwicklung, Prozessplanung & -entwicklung, Supply Chain Management, Einkauf & Beschaffung, Produktion, Logistik & Lager, Fertigung & Montage, IT & Cloud Services
Horizontale Integration	- Die digitalisierte individuelle Gestaltung und Bestellung durch den Kunden beschleunigen die Kommunikations- und Produktionskette. - Effekte bzgl. materieller Ressourcen durch den FoamCreator liegen maßgeblich auf Unternehmensseite.
Beteiligte Akteure	Kunden

Systemrahmen vor und nach Einführung der Praxisanwendung

Vorher: Der Systemrahmen des Zustands „Vorher“ beinhaltet den gesamten außer- und innerbetrieblichen Prozess zur Entwicklung der Schaumstoffeinlage. Als iterativer Vorgang umfasst dieser dabei die Abmessungen- und Aufnahmerunden des Objektes beim Kunden, die CAD-Modellierung

des Objektes und der Schaumstoffeinlage durch den Konstrukteur, die Erstellung eines Prototyps, die Endabnahme durch den Kunden sowie die Inauftraggabe zur Fertigung im Unternehmen.

Nachher: PA10 umfasst die Maßnahmen M1, M2, M9 und M10. Die notwendigen Hard- und Software-Systemelemente aus Tabelle 40 sind in Abbildung 21 dargestellt. Die Produktentwicklung findet nun virtuell durch den Kunden mittels des FoamCreators statt. Durch den digitalisierten Entwicklungsprozess erübrigen sich die Herstellung von physischen Prototypen und die Aufwendungen, die mit der herkömmlichen Produktentwicklung (z. B. Transportaufwendungen zwischen Kunden und Unternehmen) einhergehen.

Funktionelle Einheit (FU): Als FU für den Vergleich „Vorher-Nachher“ wird eine Einheit des spezifischen Produkts angenommen [1 Stück Schaumstoffeinlage]. Die absolute Menge an Schaumstoff, die für die Einlage (Endprodukt) benötigt wird, ändert sich durch den Einsatz der Applikation nicht.

Tabelle 40: Notwendige Systemelemente von PA10

Hardware		
Generische Systemelemente	Konkrete Komponenten	Relevant für Maßnahme
Sensorik	Kamera (Kunde)	M2, M9, M10
Server	Datenserver	M9, M10
Mobiles Endgerät	Smartphone, Tablet (Kunde) jeweils mit WLAN ^{a)}	M1, M2, M10
Computer	Notebooks, Workstations, internetfähiger Rechner	M1, M2, M10
Kommunikationstechnik	Breitbandinternetanschluss	M10
Software		
Generische Systemelemente	Konkrete Komponenten	Relevant für Maßnahme
Kommunikationstechnik	Internet, WLAN ^{a)}	M9, M10
Software (Funktion)	ERP ^{b)} /WMS ^{c)} und MES ^{d)} - Software, CAD ^{e)} /CAM ^{f)} - Software, FoamCreator- und ToolScan-App	M9, M10
Software (Schnittstellen)	Schnittstelle zwischen Fo- amCreator und Fertigungstech- nik	M9, M10

^{a)} WLAN - Wireless Local Area Network

^{b)} ERP - Enterprise Resource Planning

^{c)} WMS - Warehouse Management System

^{d)} MES - Manufacturing Execution System

^{e)} CAD - Computer Aided Design

^{f)} CAM - Computer Aided Manufacturing

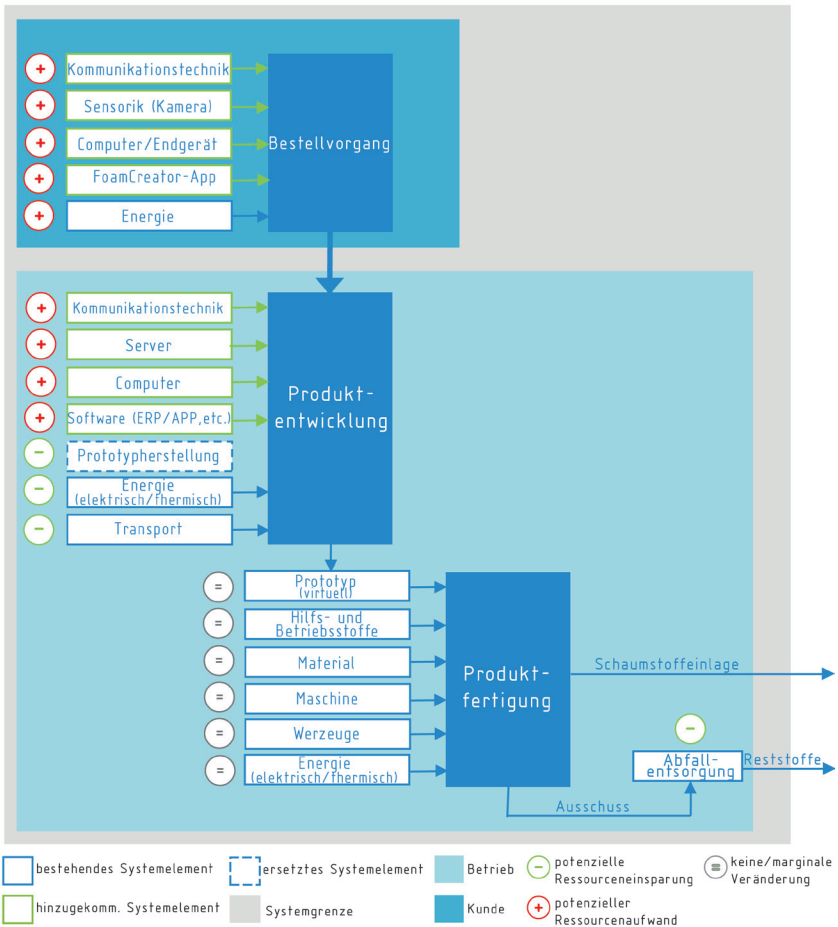


Abbildung 21: Systemrahmen von PA10 („Nachher“) mit Einsparungen und Aufwänden

Ermittlung von Einsparungen und Aufwänden an materiellen betrieblichen Ressourcen

In Tabelle 41 sind die Einsparungen und Aufwände sowie die verfügbaren Informationsgrundlagen zusammengestellt.

Tabelle 41: Einsparungen und Aufwände von PA10 [FU: 1 Stück Schaumstoffeinlage]

Einsparungen bezogen auf FU				
Einsparungseffekte		Betroffene betriebliche materielle Ressourcen	Einsparungen pro FU	Beeinflusste natürliche Ressourcen ^{b)}
Wegfall von Prototypen	Mittels der virtuellen und individuellen Konfiguration der Schaumstoffeinlagen durch den Kunden müssen keine physischen Prototypen mehr entwickelt und gefertigt werden. Diesbezügliche Aufwendungen entfallen.	Material (Schaumstoff), elektr. Energie, Verschleiß Maschine/ Werkzeuge	25 % ^{a)}	Rohstoffe, Energieressourcen, Ökosystemleistungen
Verringerung von Transportaufwendungen	Durch die digitale Abwicklung des Entwicklungsprozesses können zusätzliche Liefervorgänge von Prototypen und Transportaufwendungen zwischen Unternehmen und Kunden verringert werden.	Elektr. Energie, Treibstoff	33 % ^{a)}	Energieressourcen, Ökosystemleistungen (Emissionen, v. a. CO ₂)
Aufwände bezogen auf FU				
Hardware ^{c)}		Software ^{c)}		
Kamera, Breitbandinternetanschluss, Datenserver, Smartphone/Tablet, Notebooks/ Workstations (genaue Mengen nicht bekannt) ^{d)}		ERP ^{d)} /WMS ^{e)} und MES ^{f)} -Software, CAD ^{g)} /CAM ^{h)} -Software, FoamCreator- und ToolScan-App, Internet, WLAN ⁱ⁾		

^{a)} Fragebogen/Interviews Fallstudie

^{b)} nach VDI 4800-1 (2016)

^{c)} keine Angaben zu Hardware-Mengen bzw. Stromverbräuchen der Software seitens des Unternehmens möglich.

^{d)} ERP - Enterprise Resource Planning

^{e)} WMS - Warehouse Management System

^{f)} MES - Manufacturing Execution System

^{g)} CAD - Computer Aided Design

^{h)} CAM - Computer Aided Manufacturing

ⁱ⁾ WLAN - Wireless Local Area Network

7.3 Zusammenfassende Auswertung der Praxisanwendungen

In Tabelle 42 sind die aus den Praxisanwendungen der Studie ermittelten Einspareffekte aufgelistet. Sechs Effekte wurden identifiziert: Vermeidung von **Abfällen** (E1), Einsparung von **Energie** in Form von Strom (E2), Verringerung der **Fehlerrate** und des damit einhergehenden Ausschusses (E3), Einsparung von **Lagerraum** (E4), Verringerung des **Materialeinsatzes** (E5) und Einsparung von (innerbetrieblichen) **Transporten** (E6). Tabelle 42 stellt für jeden Einspareffekt die resultierenden Einflüsse auf die betrieblich materiellen sowie auf die natürlichen Ressourcen dar. Die letzte Spalte (Faktor/Ökobilanzdatensatz) gibt an, aus welchen Datengrundlagen Faktoren stammen, mit denen die Berechnung der natürlichen Ressourcen aus dem Verbrauch der betrieblich materiellen Ressourcen möglich ist.

Tabelle 42: Einspareffekte durch die digitale Transformation

Einspar-effekte	Betriebliche materielle Ressourcen	Natürliche Ressourcen	Faktor/ Ökobilanzdatensatz
E1: Abfall	Material, Verschleiß Maschine/Werkzeuge	Rohstoffe, Energieressourcen, Ökosystemleistungen	Ökobilanzdatensätze
E2: Energie	Elektrische Energie	Energieressourcen, Rohstoffe, Ökosystemleistungen	spez. CO ₂ -Emissionen unterschiedlicher Energieträger; CO ₂ - und Primärenergiefaktoren zum deutschen Strommix
E3: Fehlerrate	Material, Verschleiß Maschine/Werkzeuge, Betriebs- und Hilfsstoffe	Rohstoffe, Energieressourcen, Ökosystemleistungen	Ökobilanzdatensätze
E4: Lagerraum	Flächeninanspruchnahme, Betriebsstoffe, Energie	Fläche/Boden, Rohstoffe, Energieressourcen, Ökosystemleistungen	-
E5: Material	Material, Verschleiß Maschine/Werkzeuge	Rohstoffe, Energieressourcen, Ökosystemleistungen	Ökobilanzdatensätze
E6: Transport	Elektrische Energie, Treibstoff	Energieressourcen, Ökosystemleistungen (Emissionen, v. a. CO ₂)	spez. CO ₂ -Emissionen unterschiedlicher Energieträger; CO ₂ - und Primärenergiefaktoren zum deutschen Strommix

Die nachfolgenden Einzeldarstellungen der Praxisanwendungen sind nach betrieblichen Einsparungen (Tabelle 43) und betrieblichen Aufwänden (Tabelle 44) zusammenfassend ausgewertet.

Tabelle 43: Betriebliche Einsparungen je Praxisanwendung

Einspareffekte	Praxisanwendungen									
	PA 1	PA 2	PA 3	PA 4	PA 5	PA 6	PA 7	PA 8	PA 9	PA 10
	Optimierte Geschäftsprozesse	Druckluft-Leckage-App	One Piece Flow	Warehouse Management System	Data on a Stick	Virtuelle Produktsimulation	Business-Warehouse-System	Virtuelle Produktfertigung im Prototypenbau	Cloud-basierte Fertigung	FoamCreator
Betriebliche Einsparungen										
E1: Abfall	bis 25 %	n. r.	bis 25 %	n. r.	bis 25 %	n. r.	n. r.	n. r.	k. A.	n. r.
E2: Fehler-rate	bis 25 %	n. r.	50 - 75 %	n. r.	bis 25 %	k. A.	n. r.	n. r.	n. r.	n. r.
E3: Lager-raum	n. r.	n. r.	k. A.	k. A.	n. r.	n. r.	k. A.	k. A.	n. r.	n. r.
E4: Material	n. r.	k. A.	n. r.	k. A.	bis 25 %	bis 25 %	bis 25 %	> 50 % ^{a)} k. A. ^{b)}	k. A.	25 %
E5: Strom	n. r.	bis 50 %	n. r.	n. r.	> 20 %	bis 25 %	bis 25 %	k. A.	k. A.	n. r.
E6: Transport	bis 25 %	n. r.	bis 25 %	k. A.	n. r.	n. r.	n. r.	n. r.	n. r.	33 %
Einfluss auf natürliche Ressourcen										
Roh-stoffe	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Ener-gier-es-sourcen	x	x	x	x	x	x	n. r.	x	x	x
Öko-sys-tem-leis-tungen	x	x	x	x	x	x	x	n. r.	x	x
Fläche	n. r.	n. r.	x	x	n. r.	n. r.	x	n. r.	n. r.	n. r.
^{a)} Einsparungen durch die reduzierte Anzahl an produzierten Musterwerkzeugen ^{b)} Einsparungen durch 3D-Druck-Verfahren k. A.: Es liegen keine quantitativen Angaben zum jeweiligen Einspareffekt vor. n. r.: Die Maßnahme ist nicht relevant für den jeweiligen Einspareffekt oder die natürlichen Ressourcen.										

Wie zu Beginn des Kapitels 7.2 beschrieben, stellen die möglichen Einsparpotenziale aus Tabelle 43 Abschätzungen der befragten Unternehmen dar, die aus den Interviews hervorgingen. Diese beziehen sich auf den jeweils beeinflussten oder den vorrangig wahrgenommenen Effekt bzw. die Zielsetzungen der jeweiligen Praxisanwendung. So sind z. B. Materialeinsparung und Vermeidung von Abfall als getrennte Effekte aufgeführt, ob-

wohl diese aus einer stoffstrombezogenen Sicht zusammenhängen: Die Einsparung von Material (z. B. durch den Entfall der Herstellung von Prototypen) führt auch zur Verringerung des Abfallaufkommens und umgekehrt. Ebenso liegt der Effekt einer Reduktion der Fehlerrate sowohl in der Einsparung von Material als auch in der Einsparung von Abfall. Getrennt aufgeführt wurden gleichfalls Energieeinsparungen in der Produktion (z. B. Strom) und Einsparungen von Transporten. Beides führt letztlich zur Einsparung von Endenergie in Form von Strom oder Kraftstoff. Mehrfach aufgeführt wurde auch der Effekt einer Einsparung von Lagerraum. Hier ist allerdings der Verbrauch betrieblicher materieller Ressourcen schwierig zuzuordnen, da dieser nur mittelbar denkbar ist, z. B. über eine Vermeidung zukünftiger baulicher Erweiterungsmaßnahmen.

Generell zeigt Tabelle 43, dass die Datengrundlage zur Quantifizierung von Einsparungen noch unbefriedigend ist. Wie schon in Kapitel 6 beschrieben, stand bei den untersuchten Unternehmen in dem Digitalisierungsprozess die Motivation zur Einsparung von Ressourcen nicht im Vordergrund. Trotzdem gaben die Unternehmen an, dass durch die beschriebenen Praxisanwendungen Einsparungen entstehen. Eine Selbsteinschätzung in Form der vorgegebenen Kategorien zu Bereichen prozentualer Einsparungen wurde in den Fragebögen für sechs der neun Praxisanwendungen gegeben. Weiterführende Informationen zur Beschreibung der Einsparungen lagen häufig bei den Ansprechpartnern der Praxisbeispiele nicht vor. Dies gilt u. a. für den Bereich von Transporten, bei denen generell keine Informationen zu Transportdistanzen oder Transportmitteln vorlagen. Auch im Fall von Materialeinsparungen fehlten häufig genauere Informationen zum verwendeten Material – oder die Angaben dazu durften nicht veröffentlicht werden.

Tabelle 44: Betriebliche Aufwände je Praxisanwendung

Generische Systemelemente		Praxisanwendungen									
		PA 1	PA 2	PA 3	PA 4	PA 5	PA 6	PA 7	PA 8	PA 9	PA 10
		Optimierte Geschäftsprozesse	Druckluft-Leckage-App	One Piece Flow	Warehouse Management System	Data on a Stick	Virtuelle Produktsimulation	Business-Warehouse-System	Virtuelle Produktfertigung im Prototypenbau	Cloud-basierte Fertigung	FoamCreator
Hardware	Sensorik	x	x	x	x	n. r.	n. r.	x	n. r.	n. r.	x
	Aktorik	n. r.	x	n. r.	x	n. r.	n. r.	x	n. r.	n. r.	n. r.
	Server	x	x	x	x	x	n. r.	x	n. r.	x	x
	Computer	x	x	x	x	x	n. r.	x	n. r.	n. r.	x
	Mobile Endgeräte	n. r.	x	x	x	n. r.	n. r.	x	n. r.	n. r.	x
	3D-Drucker	n. r.	n. r.	n. r.	n. r.	n. r.	n. r.	n. r.	x ^{a)}	n. r.	n. r.
	Mikrocontroller	n. r.	n. r.	n. r.	x	n. r.	n. r.	x	n. r.	n. r.	n. r.
	Kommunikationstechnik	n. r.	n. r.	x	n. r.	x	n. r.	x	n. r.	x	x
Software	Kommunikationstechnik	n. r.	x	n. r.	x	n. r.	n. r.	x	n. r.	n. r.	x
	Software (Funktion)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Software (Schnittstelle)	x	x	x	x	x	n. r.	x	n. r.	x	x
^{a)} Eingesetzte Menge: 1x 3D-Drucker n. r.: Das generische Systemelement ist nicht relevant für die jeweilige Praxisanwendung.											

Tabelle 44 zeigt den Überblick der in den Praxisanwendungen genannten Aufwände in Form von Hard- und Software (hier beschrieben als generische Systemelemente). Hier lagen mit einer Ausnahme (PA8: Anschaffung eines 3D-Druckers vgl. S. 117) lediglich qualitative und überwiegend allgemein gehaltene Angaben vor; so wurden z. B. nur wenige Angaben zur Art der verwendeten Sensoren gemacht.

Die außerbetrieblichen Auswirkungen der Praxisanwendungen wurden von den Unternehmen nur für direkte Lieferanten und Kunden genannt und ausschließlich beschreibend ohne Einschätzung von Größenordnungen dargestellt. Zu diesen Auswirkungen, bezogen auf die einzelnen Praxisanwendungen, gehörten:

- Vereinfachter Datenaustausch (PA1, PA5, PA6)
- Vernetzung mit Kunden (PA2, PA10)
- Individualisierte Produktion nach Kundenwunsch (PA3, PA10)
- Datenzugriff für Kunden auf WMS (PA4)
- Vernetzung mit Tochterunternehmen und Lieferanten (PA7)
- Unmittelbarer Einfluss auf Werkzeughersteller durch reduzierte Anzahl an Werkzeugbestellungen (PA8)
- Bereitstellung von betriebseigenen Daten und Softwareprogrammen durch Dienstleister (PA9)

7.4 Abschätzung von Ressourceneffizienzpotenzialen

7.4.1 Vorgehen

Die vorangehenden Darstellungen zeigen, dass die Datengrundlagen für die quantitative REP-Ermittlung durch die Gegenüberstellung von Einsparungen und Aufwänden für die konkreten untersuchten Praxisanwendungen derzeit zum Teil nicht gegeben sind. Dies hat vor allem zwei Gründe:

- Angaben zu Einsparungen lagen als Schätzwerte in Prozenten vor. Die erforderlichen Bezugsgrößen für die Berechnung absoluter Zahlen, die eine Gegenüberstellung der jeweiligen Anwendungen ermöglichen, waren den Unternehmen nicht bekannt. So fehlten z. B. Angaben zum jährlichen Strombedarf einzelner Maschinen/Produktionslinien oder zu jährlichen Transportdistanzen.
- Hinsichtlich der Aufwände hatten die Betriebe kaum Informationen zu Anzahl und Art der verwendeten Hardware-Komponenten (außer in einfachen Fällen wie Laptop oder Smartphone). So konnten z. B. keine Angaben zu Art und Menge der für eine spezifische Praxisanwendung verwendeten/verbauten Sensoren gemacht werden. Produzierende Unternehmen verfügen in der Regel nicht über derartige Informationen. Ansprechpartner sind hier vielmehr die IT-Experten der jeweiligen Fachfirmen/IT-Ausrüster.

Um dennoch Aussagen zu REP ableiten zu können, wurde daher folgendes Vorgehen gewählt: Die in den Fallstudien ermittelten prozentualen Angaben wurden mit absoluten Angaben zum Verbrauch aus z. B. Statistiken²⁰⁹ oder aus der Ökobilanzdatenbank Ecoinvent verknüpft.

Aufgrund fehlender sachlicher Zuordnungen und statistischer Daten konnten „vergleichbare“ Praxisanwendungen in den meisten Fällen nicht ermittelt werden. In zwei Fällen konnten beispielhaft erste Abschätzungen des REP auf Grundlage von Praxisanwendungen berechnet werden.

Die Informationen zu Aufwänden für Hardware basieren auf eigenen Annahmen oder wurden aufgrund von Literaturangaben abgeschätzt. Um Einsparungen und Aufwendungen vergleichbar zu machen, wurden energetische Indikatoren verwendet (Endenergie und die unter Annahme des deutschen Strommixes resultierenden CO₂-Emissionen). Die dazu notwendigen Faktoren, mit denen diese Angaben aus betrieblichen materiellen Ressourcen errechnet werden können, wurden Ökobilanzdatenbanken bzw. den in Kapitel 5.2 (S. 64 ff.) dokumentierten Publikationen entnommen.

Auf diese Weise ließen sich erste Aussagen für zwei Praxisanwendungen bezüglich des Verhältnisses von Einsparungen und Aufwänden ableiten. Ausdrücklich hinzuweisen ist auf die großen Unsicherheiten, da auf mehreren Ebenen mit Annahmen und Annäherungen gearbeitet werden musste:

- Auf der betrieblichen Ebene konnten nur die Spannbreiten der prozentualen Einsparungen herangezogen werden, die auf Schätzungen der befragten Betriebe beruhen.
- Hinsichtlich der Statistik wurden fehlende Angaben durch Annahmen ersetzt.
- Datensätze für die Ökobilanzierung waren häufig nur für allgemeine Komponenten verfügbar. So findet sich z. B. in der Literatur lediglich ein

²⁰⁹ Vgl. UBA (2017).

Datensatz zu einem ausgewählten Sensor. Dieser wurde für die Abbildung der Ressourcenverbräuche von Sensoren generell herangezogen, wohl wissend, dass es eine große Zahl sehr unterschiedlicher Sensoren gibt.

- Die Ermittlung natürlicher Ressourcen wurde auf die Kerngröße des Energieaufwands (Endenergie Strom) der Herstellung und Nutzung beschränkt, da alle weiteren Umweltwirkungen einer vertieften Untersuchung bedurft hätten und mit den beschriebenen Datengrundlagen nicht abbildbar sind. Die Umrechnung in CO₂-Emissionen erfolgte mit dem deutschen Strommix.

7.4.2 Hochrechnungen für Deutschland

7.4.2.1 Praxisanwendung „Druckluft-Leckage-App“ (Mader GmbH & Co. KG)

Erkenntnisse aus der Fallstudien-Analyse

Während in manchen Unternehmen Druckluft-Leckagen noch durch Abhören des Verteilungssystems (Hören auf Zischgeräusche in produktionsfreien Zeiten) oder andere manuelle Dichtheitsprüfungsvorgänge detektiert werden, kommt an anderen Produktionsstandorten für diesen Vorgang entsprechende Messtechnik zum Einsatz.²¹⁰ Das Unternehmen Mader GmbH & Co. KG bietet derzeit bei Vor-Ort-Terminen beim Kunden Druckluft-Leckage-Prüfungen mit Ultraschallmessgeräten als Serviceleistung an. Eine Besonderheit liegt dabei in der digitalen Dokumentation des Prüfungsvorganges und der Auswertung der gemessenen Daten mittels der von Mader entwickelten Druckluft-Leckage-App (Abbildung 22).

²¹⁰ Vgl. IHK Nürnberg für Mittelfranken (2012).

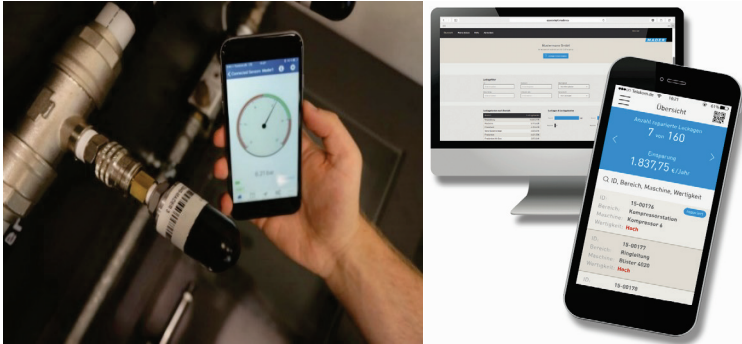


Abbildung 22: Überwachung von Druck und Temperatur mittels Sensor (links) und Druckluft-Leckage-App für mobile Endgeräte (rechts) (Quelle: Mader GmbH & Co. KG)

Die Daten werden dabei in Echtzeit anhand ökonomischer und ökologischer Kriterien bewertet (Aufwendungen bzw. Einsparungen in kWh, CO₂-Emissionen und Euro) und nach ihrer Behebungsdringlichkeit priorisiert. Zukünftig plant das Unternehmen, dass die Prüfung und Kontrolle des Druckluftsystems beim Kunden vollautomatisch durch Sensoren, die direkt vor Ort in das Leitungsnetz integriert werden, erfolgen. Dabei werden zukünftig die durch die Sensoren gemessenen Daten direkt an die Applikation weitergeleitet und entsprechend o. g. Ausführung verarbeitet. Die Druckluft-Leckage-App der Mader GmbH & Co. KG in Verbindung mit der Integration von Sensoren im Verteilernetz ermöglicht somit eine optimierte Druckluftsystem-Überwachung und zeitnahe Aufdeckung von Leckagen. Unter Leckagen werden hierbei lediglich vermeidbare undichte Stellen innerhalb des Druckluftleitungs- bzw. Verteilungsnetzes verstanden und keine systembedingten Verluste am Aktuator. Nach Erfahrung von Mader kann dadurch bei den Kunden bis zu 35 % der Druckluft eingespart werden. Dies entspricht einer Verringerung des Strombedarfs für die Druckluftherzeugung um ebenfalls bis zu 35 %.²¹¹

²¹¹ Informationen aus Interview/Fragebogen mit dem Unternehmen Mader GmbH & Co. KG entnommen.

Allgemeine Relevanz der Praxisanwendung der Fallstudie

Der Einsatz der Druckluft-Leckage-App (inkl. der Integration von Sensoren) bzw. vergleichbarer digitaler Anwendungen anderer Unternehmen ist grundsätzlich branchenunabhängig bei allen Nutzern von Druckluft möglich. Allein für die industrielle Druckluftherstellung wurden in Deutschland in den letzten Jahren im Mittel (2005 - 2014) 17,29 TWh Endenergie (Strom) aufgewendet.²¹² Druckluft gilt als ineffizient gegenüber anderen Energieformen, da durch hohe Konversionsverluste von elektrischer in mechanische Energie lediglich Systemwirkungsgrade von 4 bis 7 % erreicht werden können (sofern keine Abwärmenutzung in den Druckluftherstellungsprozess integriert wird). Gerade dies macht einen sparsamen und effizienten Einsatz des Mediums aus Ressourcensicht notwendig²¹³ und erfordert regelmäßige Leckage-Prüfungen am Verteilernetz. Mittels der Kombination von Druckluft-Leckage-App und integrierten Sensoren wird eine einfache und kontinuierliche Überwachung des Druckluftverteilungsnetzes möglich, so dass bei zeitnaher Behebung erkannter Leckagen der Verlust von Druckluft weitgehend vermieden werden kann. Dies führt auch zu erheblichen Kosteneinsparungen für den Betrieb. Die folgende REP-Ermittlung erfolgt entsprechend o. g. Vorteile für die kundenseitige Nutzung der Druckluft-Leckage-App in Verbindung mit der Integration der Sensortechnik, die in der Praxisanwendung (vgl. PA2, S. 96) noch nicht realisiert war.

Abschätzung des REP für Deutschland

Die betrieblichen Einsparungen an Druckluft bzw. Strom durch ähnliche digitale Anwendungen wie der Druckluft-Leckage-App des Unternehmens Mader werden konservativ mit 10 % und optimistisch, entsprechend den Erkenntnissen aus der Fallstudie, mit 35 % angesetzt. Auf Basis des o. g. Gesamtverbrauchs an Druckluft bzw. Strom in Deutschland und unter der Annahme, dass nur eine anteilige Anrechnung von 50 % stattfindet,²¹⁴

²¹² Vgl. UBA (2017).

²¹³ Vgl. HMWVL (2011).

²¹⁴ Es wird davon ausgegangen, dass nur dieser Energieaufwendungsanteil aus einer unzureichenden Kontrolle von Druckluftsystemen resultiert. Den restlichen 50% des Gesamtenergieverbrauchs werden Druckluftsystemen zugerechnet, die stetig und sorgfältig kontrolliert bzw. gewartet werden.

ergibt sich daraus eine Einsparung der Endenergie Strom in Höhe von 0,86 bis 3,03 TWh pro Jahr für Deutschland. Daraus lassen sich Einsparungen bezüglich des damit verbundenen CO₂-Aufkommens²¹⁵ von 462.508 bis 1.618.776 Tonnen CO₂-Emissionen pro Jahr berechnen.

Die Aufwände in Form von Hardware (Smartphone, Computer und Sensoren) für die Nutzung einer Druckluft-Leckage-App liegen v. a. beim Anwender, d. h. bei den Kunden der Mader GmbH & Co. KG bzw. von Unternehmen, die ähnliche digitale Anwendungen wie die Druckluft-Leckage-App anbieten. Hierbei benötigt der Anwender (Kunde) ein Smartphone oder einen Computer bzw. Laptop, auf welchem die Applikation betrieben werden kann. Diese Aufwände werden auf Basis von Literaturdaten wie folgt abgeschätzt: Konservativ wird die Annahme getroffen, dass die Anwender sowohl einen Computer als auch ein Smartphone für die Nutzung der Druckluft-Leckage-App verwenden, obwohl eines der Endgeräte für die Anwendung ausreichen würde. Zudem wird davon ausgegangen, dass der Computer und das Smartphone ausschließlich für die Applikation in Gebrauch sind und nicht anteilig für andere Nutzungen angerechnet werden. Der Nutzungszeitraum des Smartphones und des Computers wird mit drei Jahren angenommen, angelehnt an die Abschreibungsdauer eines Notebooks.²¹⁶ Unter diesen Annahmen kann unter Verwendung von ökobilanziellen Daten der Energiebedarf für den Betrieb von einem Jahr wie folgt berechnet werden: Computer 248 kWh pro Jahr^{217, 218} und Smartphones 6 kWh pro Jahr^{219, 220, 221}. Wird nun davon ausgegangen, dass innerhalb Deutschlands die Hälfte der KMU aus dem Wirtschaftszweig „verarbeitendes Gewerbe“ (101.216 Betriebe²²²) eine kontinuierliche Druckluftsystem-

²¹⁵ Bei der Erzeugung einer Kilowattstunde Strom (deutscher Strommix) wurden im Jahr 2015 durchschnittlich 535 g Kohlendioxid emittiert (Vgl. UBA (2016)).

²¹⁶ Vgl. BMF (2000).

²¹⁷ Vgl. Ecoinvent (2016b).

²¹⁸ Unter der Annahme, dass das Endgerät acht Stunden pro Tag an 365 Tagen im Jahr betrieben wird.

²¹⁹ Vgl. Andrae, A. S. G. und Andersen, O. (2010).

²²⁰ Unter der Annahme, dass das Endgerät acht Stunden pro Tag an 365 Tagen im Jahr betrieben wird.

²²¹ Die Daten beziehen dabei sowohl die Herstellungs- als auch die Nutzenphase der Endgeräte ein.

²²² Vgl. Söllner, R. (2014).

überwachung betreiben, können als Summe der Aufwände²²³ für die Herstellung und die einjährige Nutzung aller Computer und Smartphones 0,026 TWh pro Jahr bzw. 13.753 Tonnen CO₂-Emissionen pro Jahr angenommen werden. Die Aufwände, welche mit der Nutzung der Software bzw. Applikation einhergehen, liegen ebenfalls beim Anwender. Es wird angenommen, dass eine Abfrage innerhalb der Applikation den gleichen Endenergieverbrauch wie eine Google-Abfrage aufweist (0,0003 kWh pro Abfrage)²²⁴ und die Anwender am Tag jeweils fünf Abfragen zur Kontrolle des Druckluftsystems tätigen²²⁵. Bei 101.216 Anwendern lässt sich demnach ein zusätzlicher Endenergiebedarf für Deutschland von 55,42 MWh pro Jahr berechnen. Das daraus resultierende CO₂-Aufkommen beläuft sich auf 30 Tonnen CO₂-Emissionen pro Jahr.

Zudem erfolgt die Integration von Sensoren in das jeweilige Druckluftverteilungsnetz. Das Unternehmen Mader installiert hierbei grundsätzlich Volumenstromsensoren und Drucksensoren an Kompressorstationen und in Produktionshallen. Durchschnittliche Leistungswerte dieser Sensoren liegen bei Volumenstrommessgeräten bei 3,3 W, bei Drucksensoren bei 0,45 W. Konservativ wird für die Hochrechnung die Annahme getroffen, dass lediglich Volumenstromsensoren in die Systeme eingegliedert werden. Da die Anzahl der benötigten Sensoren zum einen von der Größe des Druckluftsystems und zum anderen von der vom Kunden gewünschten Messgenauigkeit abhängig ist, kann keine genaue Aussage bzgl. der durchschnittlichen Menge an benötigten Sensoren getroffen werden. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle hypothetisch angenommen, dass pro Unternehmen fünf bis 50 Sensoren (Volumenstrommessgeräte) in das System integriert werden.²²⁶ Unter Berücksichtigung des Anteils der als relevant eingestuften Betriebe lässt sich bezogen auf Deutschland ein zusätzlicher jährlicher Energiebedarf von 0,004 bis 0,044 TWh Endenergie

²²³ Hierbei ist festzuhalten, dass in der Methodik des Lebenszyklusansatzes die Aufwände der Herstellung als Summe der Aufwände aller Prozesse der Produktionskette berechnet werden. Diese Prozesse finden größtenteils im Ausland statt.

²²⁴ Vgl. Google (2009).

²²⁵ Bei 365 Tagen im Jahr.

²²⁶ Vgl. Mader (2017).

für die Nutzenphase berechnen.²²⁷ Das daraus resultierende zusätzliche CO₂-Aufkommen beläuft sich auf 2.372 bis 23.718 Tonnen CO₂-Emissionen pro Jahr.

Gegenüberstellung Einsparungen und Aufwände

Für den Betrachtungszeitraum von einem Jahr stehen damit 0,86 bis 3,03 TWh Endenergie (bzw. 462.508 bis 1.618.776 Tonnen CO₂-Emissionen) an Einsparungen 0,03 bis 0,07 TWh Endenergie (bzw. 16.154 bis 37.500 Tonnen CO₂-Emissionen) an Aufwendungen gegenüber. Daraus lässt sich bezogen auf die CO₂-Emissionen eine Differenz von 446.353 bis 1.581.276 Tonnen CO₂-Emissionen berechnen. Durch die Realisierung der Praxisanwendung „Druckluft-Leckage-App“ kann daher auch unter den in der Beispielrechnung verwendeten konservativen Annahmen mit Netto-Einsparungen für den Wirtschaftsstandort Deutschland gerechnet werden.

7.4.2.2 Praxisanwendung „Data on a Stick“ (Sensitec GmbH)

Erkenntnisse aus der Fallstudien-Analyse

Die Praxisanwendung „Data on a Stick“ der Sensitec GmbH ermöglicht innerhalb der unternehmenseigenen Wafer-Produktionslinie (Mikroelektronik) durch den Einsatz von Datenträgern (USB-Sticks) die Umstellung auf einen papierlosen Fertigungsprozess. Nach Einschätzung von Sensitec können durch die Umstellung jährlich 6.000 bis 10.000 Blatt Spezialpapier für Reinraumanwendungen eingespart werden. Zudem konnte nach Aussage des Unternehmens durch die Eingliederung der Datenträger und der dadurch möglichen Echtzeitsteuerung des Fertigungsprozesses der elektrische Energiebedarf der Fertigungslinie gesenkt werden. Mittels eines gezielten An- und Abschaltens von prozessrelevanten Anlagen liegt das Energieeinsparungspotenzial bei bis zu 20 %.²²⁸ Durch die digitale Datenaufnahme konnte das Unternehmen des Weiteren die Fehlerrate reduzieren, die zu einem großen Teil aus den Fremdeintragungen in den sterilen Produktionsbereich über das Dokumentationsmaterial resultierte. Da hierzu

²²⁷ Unter der Annahme, dass die Sensoren 24 Stunden pro Tag an 365 Tagen im Jahr betrieben werden.

²²⁸ Informationen wurden aus Interview/Fragebogen mit dem Unternehmen Sensitec GmbH bezogen.

keine Abschätzungen seitens des Unternehmens vorlagen, wird dies im Weiteren nicht berücksichtigt.

Allgemeine Relevanz der Praxisanwendung der Fallstudie

Papierlose Fertigungsansätze werden in industriellen Produktionsprozessen eher selten umgesetzt.²²⁹ Grundsätzlich ist eine generelle Übertragbarkeit papierloser Fertigungsansätze branchenübergreifend möglich. Die Praxisanwendung von Sensitec ist allerdings in zwei Aspekten spezifisch. Zum einen betreffen die Einsparungen hochwertiges Reinraumpapier, das in der Produktionslinie für die Wafer-Verarbeitung²³⁰ benötigt wird. Zum anderen wurde im Fall von Sensitec auch eine Echtzeitsteuerung der Fertigungslinie realisiert. Die Einführung muss nicht zwangsläufig gleichzeitig erfolgen, sie bietet sich jedoch an und ermöglicht zusätzliche Energieeinsparungen durch das gezielte Zu- bzw. Abschalten von Anlagenteilen. Im Folgenden werden beide Effekte gemeinsam für den Bereich der Wafer-Verarbeitung mit Verwendung von Reinraumpapier betrachtet. Nach Einschätzung von Sensitec verarbeiten innerhalb der Branche Elektroindustrie insgesamt 20 bis 50 Betriebe Wafer-Scheiben zum fertigen Produkt in vergleichbarer Weise wie Sensitec weiter. Der Anteil von Unternehmen, welche die Wafer-Weiterverarbeitung bereits papierlos betreiben, wird mit 10 % angenommen, die übrigen Betriebe nutzen noch Reinraumpapier.²³¹ Damit lassen sich 18 bis 45 produktionsverwandte Unternehmen identifizieren, auf die diese Praxisanwendung übertragbar ist.²³²

Abschätzung des REP für Deutschland

Die Einsparungen an Reinraumpapier auf Basis der Erfahrungen bei Sensitec werden pro Unternehmen konservativ mit 6.000 und optimistisch mit 10.000 Blättern Reinraumpapier pro Jahr angesetzt.²³³ Wird dies mit der

²²⁹ Vgl. Handelsblatt (2016).

²³⁰ Das Unternehmen kauft die Wafer-Scheiben extern ein und verarbeitet diese am eigenen Produktionsstandort weiter. Dabei werden die Scheiben so strukturiert, dass Mikrochips integriert werden können.

²³¹ Gestützt auf die Aussage, dass eine papierlose Fertigung bei kleineren Unternehmen eher unüblich und bei größeren Unternehmen eher üblich ist.

²³² Informationen des Unternehmens Sensitec GmbH.

²³³ Informationen wurden aus Interview/Fragebogen mit dem Unternehmen Sensitec GmbH bezogen.

o. g. Gesamtzahl der Hersteller von Wafern in Verbindung gesetzt, ergibt sich für Deutschland ein Einsparpotenzial von 108.000 bis 450.000 Blättern pro Jahr. Um diese Angaben vergleichbar zu machen, werden mittels Ökobilanzdaten die Aufwendungen der Papierproduktion in Form des benötigten Endenergiebedarfs und von CO₂-Emissionen berechnet. Dabei wird ein Datensatz für beschichtetes Papier herangezogen^{234, 235}, da Angaben speziell für Reinraumpapier nicht verfügbar sind. Der Endenergieverbrauch für die Herstellung der jährlich benötigten Papiermenge beträgt demnach 189 bis 786 kWh pro Jahr. Die damit verbundenen CO₂-Emissionen, die sich mit dem Faktor des deutschen Strommixes²³⁶ berechnen lassen, belaufen sich auf 0,10 bis 0,42 Tonnen CO₂-Emissionen pro Jahr.

Die Einsparung an Strom durch eine Echtzeitsteuerung der Fertigungslinie wird basierend auf den Erfahrungen bei Sensitec zwischen 10 und 20 % angenommen.²³⁷ Es wird davon ausgegangen, dass sich der elektrische Energiebedarf für die gesamte Herstellung eines Wafers auf 30 kWh pro m² Wafer beläuft.²³⁸ Da allerdings nur der Weiterverarbeitungsprozess der Wafer-Scheiben, ohne die eigentliche Herstellung der polykristallinen (Halbleiter-)Rohlinge, bei Sensitec stattfindet, wird die hypothetische Annahme getroffen, dass dieser Produktionsschritt 1 bis 10 % des Gesamtenergiebedarfs der ganzen Herstellungskette ausmacht. Zudem wird davon ausgegangen, dass die Unternehmen jeweils 1.750 Wafer pro Jahr weiterverarbeiten²³⁹ und dass diese eine durchschnittliche Größe von 0,0243 m²²⁴⁰ aufweisen. Pro Jahr werden somit je Unternehmen 43 m² Wafer weiterverarbeitet. Unter Einbeziehung der o. g. Annahmen lässt sich somit ein jährliches unternehmensbezogenes Energieeinsparpotenzial von 1 bis 26 kWh pro Jahr berechnen. Das Potenzial für Deutschland beläuft

²³⁴ Vgl. Ecoinvent (2016c).

²³⁵ DIN A4, Einzelblatt 80 g/m².

²³⁶ Vgl. UBA (2016).

²³⁷ Informationen wurden aus Interview/Fragebogen mit dem Unternehmen Sensitec GmbH bezogen.

²³⁸ Vgl. Ecoinvent (2016a).

²³⁹ Informationen des Unternehmens Sensitec GmbH.

²⁴⁰ Vgl. Ecoinvent (2016a).

sich demnach auf 23 bis 1.148 kWh pro Jahr. Diese Strommenge (Endenergie), verrechnet mit dem Faktor des deutschen Strommixes²⁴¹, führt zu einer Einsparung von 0,01 bis 0,61 Tonnen CO₂-Emissionen pro Jahr.

Die Aufwände, welche mit der Umstellung auf eine papierlose Fertigungslinie einhergehen, liegen auf Seiten des Unternehmens maßgeblich in der Nutzung von USB-Sticks, dem anteiligen Gebrauch eines Servers sowie in der Nutzung eines Computers²⁴², inklusive der jeweils benötigten Software. Für die Abschätzung wird konservativ davon ausgegangen, dass die USB-Sticks sowie der Computer nur für die betrachtete Anwendung in Verwendung sind. Unter Einsatz von Daten aus der Ökobilanzdatenbank Ecoinvent entspricht der auf ein Jahr umgerechnete Endenergiebedarf für die Herstellung und Nutzung eines Computers 248 kWh.^{243, 244} Die Anzahl der pro Jahr benötigten Datenträger, die für den papierlosen Prozess in die Fertigungslinie integriert werden müssen, beläuft sich auf 500 Stück. Die USB-Sticks werden dabei für verschiedene Produktionsvorgänge wiederverwendet und wiederholt überschrieben. Der Endenergiebedarf für die Nutzung aller USB-Sticks im Unternehmen beträgt laut Berechnung 0,4 Wh bis 18 kWh pro Jahr.^{245, 246} Angaben zur Herstellung von USB-Sticks lagen nicht vor. Auch existieren keine Informationen zum Anteil der umgestellten Produktionslinie an der Serverleistung. Hypothetisch wird dafür zwischen 1 und 5 % der unternehmensinternen Serverleistung angesetzt. Insgesamt errechnet sich hierfür ein jährlicher Endenergieverbrauch von 56 bis 279 kWh.²⁴⁷ Somit belaufen sich die unternehmensinternen Auf-

²⁴¹ Bei der Erzeugung einer Kilowattstunde Strom (deutscher Strommix) wurden im Jahr 2015 durchschnittlich 535 g Kohlenstoffdioxid pro kWh emittiert. Vgl. UBA (2016).

²⁴² Einschließlich eines LCD-Monitors, einer Mouse und einer Tastatur.

²⁴³ Vgl. Ecoinvent (2016b).

²⁴⁴ Unter der Annahme, dass das Endgerät acht Stunden am Tag an 365 Tagen im Jahr betrieben wird und, angelehnt an die Abschreibungsdauer eines Computers, der Nutzungszeitraum drei Jahre beträgt (Vgl. BMF (2000)).

²⁴⁵ Die Berechnung basiert auf einer durchschnittlichen Leistungsaufnahme eines Datenträgers von 0,1 bis 0,9 W für jeden Lese- bzw. Schreibvorgang. Hierbei werden 0,01- bis 50-mal in der Stunde Informationen auf den Datenträger übermittelt bzw. vom Datenträger abgerufen (Informationen der Sensitec GmbH). Es wird die Annahme getroffen, dass ein Lese- bzw. Schreibvorgang eine Dauer von einer Sekunde benötigt.

²⁴⁶ Unter der Annahme, dass die USB-Sticks acht Stunden pro Tag an 365 Tagen im Jahr in Betrieb sind.

²⁴⁷ Vgl. LaCie (2017).

wände auf einen zusätzlichen jährlichen Gesamtenergiebedarf von 304 bis 546 kWh. Bezogen auf Deutschland und die produktionsverwandten Unternehmen lässt sich ein Energieaufwand von 5.473 bis 24.557 kWh pro Jahr berechnen. Daraus können mit dem Faktor des deutschen Strommixes CO₂-Emissionen²⁴⁸ in Höhe von drei bis 13 Tonnen CO₂-Emissionen pro Jahr berechnet werden. Zur Vereinfachung wird vernachlässigt, dass die Herstellung der Sticks und des Servers nicht bewertet wurde.

Gegenüberstellung Einsparungen und Aufwände

Innerhalb des Betrachtungszeitraums von einem Jahr stehen somit die Einsparungen in Form von Reinraumpapier (108.000 bis 450.000 Blätter pro Jahr), Energieaufwendungen (212 bis 1.935 kWh pro Jahr) und CO₂-Emissionen (0,1 bis 1 Tonnen CO₂-Emissionen pro Jahr) den Aufwänden in Form der zusätzlich benötigten Energiemenge (5.473 bis 24.557 kWh pro Jahr) und den damit verbundenen CO₂-Emissionen (2,9 bis 13 Tonnen CO₂-Emissionen pro Jahr) gegenüber. Daraus lässt sich bezogen auf die CO₂-Emissionen eine Differenz von 2,8 bis 12 Tonnen CO₂-Emissionen berechnen.

Die Realisierung der Praxisanwendung „Data on a Stick“ führt also unter den in der Beispielrechnung verwendeten konservativen Annahmen zu geringen Netto-Aufwänden, die vor allem aus dem Strombedarf der eingegliederten Systemelemente (Computer/USB-Sticks/Server, anteilig) resultieren. Angesichts der großen Unsicherheiten der Berechnung unter Verwendung grober Abschätzungen kann dieses Ergebnis nur als erste orientierende Aussage dahingehend bewertet werden, dass Einsparungen und Aufwände in etwa gleicher Größenordnung liegen. Zu berücksichtigen ist, dass die Auswirkungen durch die reduzierte Fehlerrate nicht einbezogen werden konnten. Zudem werden in der Beispielrechnung mit den Indikatoren Energie und CO₂-Emissionen keine sonstigen Wirkungskategorien bzw. Auswirkungen der Papierproduktion auf die Umwelt erfasst, die möglicherweise zu anderen Aussagen bei einer Gegenüberstellung von Material- und Energieeinsparung führen könnten.

²⁴⁸ Vgl. UBA (2016).

7.4.3 Qualitative Potenzialanalyse

Im vorliegenden Kapitel werden die Erkenntnisse zur Steigerung der Ressourceneffizienz durch die digitale Transformation und die Erkenntnisse aus der Literaturlauswertung und Fallstudienanalyse zusammengeführt und diskutiert.

Als allgemeine Erkenntnis aus der Auswertung von Literatur ist zunächst festzuhalten, dass der Begriff der Ressourcen in den zuvor erwähnten Studien im Allgemeinen nicht klar definiert ist und selten im Sinne einer umfassenden Betrachtung natürlicher Ressourcen verwendet wird. Viele Untersuchungen beschäftigen sich hauptsächlich mit Energieeffizienz und dem Beitrag zum Klimaschutz. Ebenso bezeichnet die Literatur die Datenlage in Bezug auf Material- und Rohstoffeffizienz als eher lückenhaft, obwohl die Materialkosten im verarbeitenden Gewerbe den größten Kostenfaktor darstellen.²⁴⁹ Dies kann durch die Untersuchungsergebnisse dieser Studie teilweise bestätigt werden, da, wie bereits erwähnt, die Datenlage in den Fallstudien grundsätzlich lückenhaft ausfällt. Unterschiede hinsichtlich der Bereiche Energie und Material (z. B. Reduktion von Fehlerraten oder Überproduktion) zeigten sich jedoch nicht (Tabelle 43, S. 129).

Das Materialeinsparpotenzial wird für das verarbeitende Gewerbe in Deutschland nach einer neuen Studie auf 3 bis 4 % geschätzt, entsprechend einem Wert von knapp zwei Milliarden Euro.²⁵⁰ Speziell für den Energieverbrauch wurden im Rahmen einer Umfrage unter Unternehmen Einsparpotenziale von durchschnittlich 15 % ermittelt, in Branchen wie dem Fahrzeug- oder Maschinenbau wird ein größeres Einsparpotenzial vermutet.²⁵¹ Diese Aussage stimmt grundsätzlich mit dem Bild der Fallstudien überein: **Die untersuchten Betriebe ordneten die erzielte Verringerung des Energieverbrauchs (elektrische Energie) durch Maßnahmen der digitalen Transformation überwiegend im Bereich bis 25 % ein.**

²⁴⁹ Vgl. Behrendt, S. und Erdmann, L. (2010), S. 7 und 14.

²⁵⁰ Vgl. Neligan, A. und Schmitz, E. (2017), S. 3.

²⁵¹ Vgl. Schröter, M.; Weißfloch, U. und Buschak, D. (2009), S. 6.

Im speziellen Kontext der digitalen Transformation stellt eine Studie von Roland Berger fest, dass hier „[...] erst langsam das Thema Rohstoff- und Materialeffizienz auch im Kontext Industrie 4.0 als relevanter Baustein angesehen (wird)“²⁵². Obwohl die Digitalisierung bei großen Unternehmen eine entscheidende Rolle v. a. in Bezug auf Fertigungsprozesse und Nutzung neuer Techniken spielt, werden laut einer Studie des Instituts der deutschen Wirtschaft die Möglichkeiten der digitalen Vernetzung kaum oder nur in einem sehr kleinen Maße genutzt, um bestehende REP auszu-schöpfen.²⁵³

In der Literatur finden sich darüber hinaus auch Aussagen bezüglich einiger Einzelaspekte, zu denen in den Fallstudien Erkenntnisse gewonnen werden konnten.

So wird darauf hingewiesen, dass sich prinzipielle Vorteile bezüglich Ressourceneffizienz durch den Einsatz von Sensorik zur unmittelbaren Überwachung der Rohstoffqualität, des Energieverbrauchs oder der Materialqualität und -menge ergeben. Während des Produktionsablaufs kann so bei Störungen und Engpässen in Echtzeit eingegriffen werden. Entsprechende Maßnahmen fanden sich in der Praxisanwendung PA5: Data on a Stick (Sensitec GmbH) (Kapitel 7.2.5, S. 107).

Durch den Einsatz von Sensorik ist es zudem auch möglich, auf Abruf eine Bereitstellung benötigter Vorprodukte oder Materialien sicher zu stellen. Auf diese Weise können Überkapazitäten erkannt und reduziert werden. Dies war der Fall in der Praxisanwendung PA1 (Kapitel 7.2.1, S. 93). Hierbei konnte der Umlaufbestand durch die verringerte Überproduktion und das Material Magnesium bis zu 25 % reduziert werden.

Die Literatur beschäftigt sich auch speziell mit Querschnittstechnologien, wie z. B. Pumpen- oder Druckluftsystemen, die eine große Relevanz für den Energieverbrauch zeigen. Neben effektiveren Technologien und Peripheriegeräten kann auch z. B. der Einsatz elektronischer Vorschaltgeräte bei

²⁵² Roland Berger (2016), S. 13.

²⁵³ Vgl. Neligan, A. und Schmitz, E. (2017).

der Energieeinsparung helfen.²⁵⁴ Bei bestehenden Druckluftsystemen ist die Identifikation von Leckagen zentral für die Steigerung des Leistungsgrades einer Anlage.²⁵⁵

Die Erfahrungen aus der untersuchten Praxisanwendung PA2 Druckluft-Leckage-App (Kapitel 7.2.2, S. 96) liegen sogar über dieser Schätzung. Als Maximalwert der bei den eigenen Kunden erzielten Einsparungen wurde vom Unternehmen Mader GmbH & Co. KG eine Einsparung in Höhe von bis zu 35 % der vorher verbrauchten Druckluft und des entsprechenden Stromverbrauchs genannt.

Die Literatur weist auch darauf hin, dass bei der Herstellung und Nutzung der benötigten IKT-Technologien und -Geräte, wie z. B. PCs und Notebooks, mit einem großen Ressourcenverbrauch zu rechnen ist. Aufgrund des IKT-bedingten Stromverbrauchs durch die Nutzung von IKT wurden 2007 in Deutschland bereits etwa 30 Mio. Tonnen CO₂ emittiert. In den nächsten Jahren wird mit einem deutlichen Anstieg gerechnet, der insbesondere auch durch das Cloud Computing hervorgerufen wird.^{256, 257, 258}

Auch eine Studie des Instituts der deutschen Wirtschaft Köln weist darauf hin, dass die mit der Digitalisierung verbundenen Aufwände in den Unternehmen bislang weitestgehend unbekannt sind.²⁵⁹

²⁵⁴ Vgl. Emec, S. (2013), S. 52.

²⁵⁵ Vgl. Schmitt, R.; Brecher, C.; Nau-Hermes, M. und Berners, T. (2015), S. 29.

²⁵⁶ Vgl. eLife (2017).

²⁵⁷ Vgl. BMWi (2015b).

²⁵⁸ Vgl. Deutscher Bundestag (2011).

²⁵⁹ Vgl. Neligan, A. und Schmitz, E. (2017).

8 MAßNAHMEN DER DIGITALEN TRANSFORMATION

In den vorangegangenen Kapiteln wurden elf Maßnahmen der digitalen Transformation (Kapitel 5.3.2, S. 75) identifiziert und in den Praxisanwendungen der Fallbeispiele (Kapitel 7.2, S. 92) validiert. Die Maßnahmen können eigenständig oder in Kombination eingesetzt werden, um die digitale Transformation im Unternehmen voranzutreiben und gleichzeitig Ressourcen einzusparen.

Um Unternehmen die Auswahl der Maßnahme zu erleichtern, wird im Folgenden jede der elf Maßnahmen in einem kompakten, handlungsorientierten Steckbrief beschrieben, der die Voraussetzungen, Herausforderungen und Chancen tabellarisch darstellt. Anschließend wird ein Überblick über die möglichen Ressourceneinsparpotenziale gegeben. Zudem werden Bezüge zu den Praxisanwendungen (Kapitel 7.2, S. 92) sowie den im Anhang 1 beschriebenen Fallstudien (S. 219 ff.) hergestellt.

8.1 M1: Vernetzung von Sensoren und Aktoren

Die Vernetzung von Sensoren und Aktoren bildet die Basis zur digitalen Wertschöpfung und Bestimmung möglicher Einsparpotenziale (Tabelle 45). Daher sollte die Vernetzung von Sensorik und Aktorik ein zentraler Bestandteil der Digitalisierungsstrategie eines fertigenden Unternehmens sein. Durch die Datenerfassung über einen längeren Zeitraum und die anschließende Auswertung sowie erweiterte Betrachtung und Analyse kombinierter Datenquellen können Einsparpotenziale aufgedeckt werden. Zudem schafft eine koordinierte Datenerfassung vorliegender Sensorik und Aktorik eine integrierte Sicht auf ablaufende Prozesse in Produktion und Fertigung durch die erhöhte Transparenz.

Tabelle 45: Herausforderungen und Chancen durch Vernetzung von Sensoren und Aktoren

Voraussetzungen	Herausforderungen	Chancen
Hardware: - Sensoren und Aktoren - Mikrocontroller - Kommunikationsschnittstelle Anforderungen: - Energiearm - Fehlerrobust - Skalierbar - Mobil Sicherheitsanforderungen: - Verfügbarkeit - Vertraulichkeit - Datenintegrität - Datenauthentizität	Einbindung heterogener Sensorik und Aktorik Qualifizierungsbedarf bei Mitarbeitern Datensicherheit Umgebungseinflüsse Störungen in der drahtlosen Kommunikation Netzwerkangriffe	Grundlage für viele Digitalisierungsmaßnahmen höherer Ordnung Überwachung und Analyse der erfassten Sensordaten Prozesstransparenz Ableitung neuer Möglichkeiten für Planung und Optimierung von Prozessen Basis für Maßnahmen wie Zustandüberwachung oder Prädiktive Wartung

Potenziale zur Einsparung natürlicher Ressourcen

Die Vernetzung von Sensoren und Aktoren ist die Basis für weitere Maßnahmen und somit Grundbestandteil für die Einsparung von Ressourcen. Sie bildet die Grundvoraussetzung zur Datenerfassung, welche wiederum die Datenanalyse, die Entdeckung von Potenzialen und Transparenz ermöglicht.

Bezug zu Praxisanwendungen und Fallstudien

PA2 „Druckluft-Leckage-App“ (Mader GmbH & Co. KG): Zukünftig können automatisch gesteuerte Aktoren Druckluftleitungsbereiche schließen, wenn Ultraschall-Sensoren Leckagen dort aufspüren und es dem System melden. Aktuell ist dies aber noch nicht umgesetzt.

PA3 „One Piece Flow“ (J. Schmalz GmbH): In dieser PA werden Formbilder von Schaumteilen nach der individualisierten Bestellung durch den Kunden mittels CAD-Dateien automatisch an die Schneidemaschine übertragen. Die Fertigungsaufträge werden direkt an die jeweilige Maschine übermittelt und die vorhandene Sensorik und Aktorik entsprechend automatisch justiert. Diese stellt über Nacht das benötigte Schaumteil her, das dann unmittelbar in den Greifer eingebaut wird.

8.2 M2: Einsatz digitaler Objektgedächtnisse

Indem physische Objekte der Produktion, wie Produkte, Maschinen und Feldgeräte, mit einem digitalen Objektgedächtnis ausgestattet werden, werden die Speicherung und Nutzung relevanter Daten (z. B. Produktionsdaten) direkt am Produkt ermöglicht. Damit bietet das digitale Objektgedächtnis eine direkte Zuordnung relevanter Produktionsdaten zum Ressourcenverbrauch des jeweiligen Bauteils der Produktion. Durch eine kontinuierliche Überwachung lassen sich zudem Abweichungen von Vorgaben des Regelbetriebs erkennen. Tabelle 46 fasst Voraussetzungen, Herausforderungen und Chancen des Einsatzes eines digitalen Objektgedächtnisses zusammen.

Tabelle 46: Herausforderungen und Chancen durch den Einsatz digitaler Objektgedächtnisse

Voraussetzungen	Herausforderungen	Chancen
Durchgängige Datenintegration	Mangel an Standards	Sicherung der Produktqualität
Intelligente Sensornetzwerke	Hohe Netzwerkkomplexität	Kundenindividuelle Produktion
Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M)	Hohe Menge an Daten	Papierlose Produktion
Semantische Technologien	Echtzeitfähigkeit	Dokumentation durchgeführter Wartungsoperationen
Eingebettete Systeme	Markierung der Bauteile	Automatisierung logistischer Prozesse
Ausreichende Speicherkapazität Erweiterbarkeit des Gedächtnisses		Informationen zu Herkunft, Zusammensetzung, Qualität, Lagerbedingungen etc. liegen direkt am Produkt vor
Schneller Zugang zum Inhalt des Gedächtnisses		Informationsbereitstellung für Endverbraucher (z. B. durch Interaktion mit mobilem Endgerät)
Standardisierte interoperable Hardware		Verfolgung und Rückverfolgung
Kleiner Bauraum		Basis für Maßnahmen wie: dezentrale Steuerung, Assistenzsysteme, Modularität, Zustandsüberwachung und prädiktive Wartung
Geringe Kosten		Einsatz von digitalen Objektgedächtnissen zur Qualifizierung von Prozessen und für produktbezogene Qualitätsnachweise
Flexible Architektur und Datenstruktur		

Potenziale zur Einsparung natürlicher Ressourcen

Digitale Objektgedächtnisse ermöglichen eine direkte Zuordnung des Ressourcenverbrauchs zu Bauteilen. Durch eine Überwachung von Fluktuationen lassen sich z. B. Prozesse optimieren. Da die relevanten Daten (Produktionsdaten, Dokumentation) direkt am Produkt vorliegen, lässt sich auch eine papierlose Produktion realisieren. Auf diese Weise reduziert sich der Eintrag von Fremdmaterialien, was zur Verringerung der Kontaminationsgefahr in sensiblen Produktionsorten (Reinräumen) und damit auch zur Reduzierung von Fehlproduktion führt. Durch optimierte Werkzeugstandzeiten auf Basis von Einzel-Werkzeug-Historien, gespeichert in z. B. einem Objektgedächtnis, kann zudem Energie eingespart werden. In der Produktion führen Objektgedächtnisse somit zur Einsparung von Rohstoffen, Energieressourcen und Ökosystemleistungen (Abfall). Auf der Verkaufseite bietet sich ein weiterer Vorteil: Dem Kunden können einfach Informationen zum Ressourcen-Footprint eines Produkts bereitgestellt werden, was seine Kaufentscheidung beeinflussen kann.

Bezug zu Praxisanwendungen und Fallstudien

PA2 „Druckluft-Leckage-App“ (Mader GmbH & Co. KG): Im zentralen Druckluft-Leckage-Managementsystem (Server) werden für jede Druckluft-Leckage-Stelle alle relevanten Daten gespeichert, wie z. B. Größe und Druck. Diese Daten werden weiterverarbeitet und den jeweiligen App-Nutzern im Unternehmen (Mitarbeiter, Energiemanager, Geschäftsführer etc.) in Echtzeit zur Verfügung gestellt.

PA4 „Warehouse Management System“ (MAINCOR Rohrsysteme GmbH & Co. KG): Durch die Nutzung eines auf optischer Identifikation basierenden Warehouse Management System wird die Integration produktrelevanter Daten realisiert. Neben produktbezogenen werden auch mengen- und zeitbezogene Daten gespeichert. Diese werden bedarfsgerecht zur Ablafoptimierung in der Lagerhaltung bereitgestellt.

PA5 „Data on a Stick“ (Sensitec GmbH): Das Unternehmen hat durch Anbringung von USB-Sticks an den Werkstückträger diesen zum Informationsträger ausgebaut. Dadurch wurde die papierlose Produktion ermöglicht. Des Weiteren müssen jetzt zur Fehleranalyse nicht mehr die Daten vom Papier digitalisiert werden.

8.3 M3: Dezentrale Steuerung

Das intelligente Werkstück wird zum wichtigen Baustein im dezentral gesteuerten Fertigungs- und Wertschöpfungsnetzwerk. Es ist mit einem digitalen Objektgedächtnis ausgestattet (M2), hat Kenntnisse über seine Eigenschaften und hält Informationen zu seiner Fertigung und deren Ziel bereit. Das zu fertigende Produkt kann so selbstständig den Fertigungsablauf steuern. Unternehmen, die einen dezentralen Ansatz wählen, können Steuerungsparameter hinsichtlich der Ressourceneffizienz optimieren, z. B. kurze Produktionswege, hohe Maschinenauslastung und automatische Abschaltung von Anlagenteilen (Tabelle 47)

Tabelle 47: Herausforderungen und Chancen durch dezentrale Steuerung

Voraussetzungen	Herausforderungen	Chancen
Vernetzung von Sensoren und Aktoren	Umstellung von zentraler deterministischer Planung	Flexible, dezentral organisierte Steuerungsnetzwerke statt starre Struktur der Automatisierungspyramide
Durchgängige Datenintegration	Einbindung aktueller Enterprise Resource Planning Systeme (ERP-Systeme)	Reduktion der Planungskomplexität von Produktionsprozessen
Einsatz digitaler Objektgedächtnisse	Abgrenzung zwischen zentraler und dezentraler Steuerung	Befähigung hoher Produktvielfalt bei geringen Losgrößen
Standardisierte Maschine-zu-Maschine-Kommunikation		Lokale Optimierung von Aufgaben und Auftragsreihenfolgen
Aufbau einer Architektur, die eine Kombination aus zentraler und dezentraler Steuerung ermöglicht		Einsatz digitaler Objektgedächtnisse als sinnvolle Voraussetzung für die dezentrale Steuerung.
Maschinen- und Anlagenbeschaffenheit auf die dezentrale Steuerung abstimmen: Maschinen müssen Bauteile erkennen und Informationen abrufen können		Dezentrale Steuerung ermöglicht wiederum Modularisierung

Potenziale zur Einsparung natürlicher Ressourcen

Bei Einsatz der dezentralen Steuerung reduzieren sich die Abhängigkeiten der einzelnen Produktionsschritte. Innovative Produktionssysteme sind vernetzt und dezentral organisiert, so dass jede Komponente des Produktionssystems (Sensor, Aktor, Steuerungseinheit) mit anderen Komponenten des (Firmen-)Netzwerks ohne zentrale Steuerung kommuniziert. So können Störungen vermieden, Fehler frühzeitig erkannt und Potenziale zur Optimierung der Effizienz von Produktion und Produkt identifiziert werden.

Insgesamt kann dies zu einer Reduzierung der Fehlproduktion führen, was die Einsparung von Rohstoffen, Energieressourcen und Ökosystemleistungen (Abfall) zur Folge hat.

Bezug zu Praxisanwendungen und Fallstudien

PA5 „Data on a Stick“ (Sensitec GmbH): Mittels der in den Produktionsprozess eingegliederten Datenträger (USB-Sticks) und der damit möglichen papierlosen Produktionslinie konnten Informations- und Kommunikationsprozesse hinsichtlich der Wafer-Fertigung vereinfacht sowie beschleunigt werden.

PA7 „Business-Warehouse-System“ (Hermos AG): Durch die zentrale Speicherung und Verarbeitung aller Kundenaufträge und die produkt- und prozessübergreifenden Informationen wurden eine optimierte Planung und Durchführung der unternehmensspezifischen Produktion ermöglicht.

8.4 M4: Maßnahmen zur Werkerunterstützung und -assistenz

Multimodale Assistenzsysteme können Werker bei vielfältigen Aufgaben in der Fertigung und Montage durch maßgeschneiderte Anweisungen auf mobilen Endgeräten oder durch in den Arbeitsplatz integrierte Sensorik unterstützen (Tabelle 48). Zur Unterstützung der Werker sollten in den Arbeitsplatz integrierte Systeme, z. B. Pick-by-Light oder Laservorgaben für die optimale Materialausnutzung bei Stanz- und Schnittprozessen, genutzt werden. Diese unterstützen den Werker bei der Fertigung und führen gleichzeitig zu einer effizienteren Materialausnutzung und zu Einsparungen von Rohstoffen. In einer zukünftigen Ausbaustufe können Maschinen- und Anlagenbauer ihre Produkte direkt mit selbst entwickelter Software zur Werkerassistenz (z. B. in Form von Apps) ausliefern, etwa um die Werker, die bei ihren Kunden angestellt sind, bei der Maschinenbedienung und Instandhaltung zu unterstützen.

Tabelle 48: Herausforderungen und Chancen durch Maßnahmen zur Werkerunterstützung und -assistenz

Voraussetzungen	Herausforderungen	Chancen
Praxistaugliche Endgeräte	Fehlende Akzeptanz der Beschäftigten	Beschleunigung der Einarbeitungsprozesse
Geeignete Softwaresysteme	Hohe Abhängigkeit von der IT	Verbesserung der Produktivität
Vernetzung von Product Lifecycle Management Systemen (PLM-Systeme)	Hoher Betreuungs- und Pflegeaufwand	Vereinfachung der Variantenbeherrschung
Entwicklung von Konzepten für Erweiterte-Realität-Anwendungen	Keine einheitlichen Standards	Fehlerreduktion/-vermeidung
Offene, einfach zugängliche Schnittstellen	Mangelnde Kompatibilität verschiedener Assistenzsysteme	Erhöhung der Arbeitssicherheit
	Geringe Anwendungsflexibilität	Kostensenkung durch Verbraucherprodukte
	Weiterbildungsaufwendungen	Verbesserung der Ergonomie
		Gezielte Unterstützung älterer Arbeitnehmer

Potenziale zur Einsparung natürlicher Ressourcen

Durch maßgeschneiderte Anweisungen für den Werker lassen sich Fehlproduktion und Ausschuss reduzieren sowie eine effizientere Materialausnutzung und Instandhaltung erreichen. Somit können Assistenzsysteme zur Einsparung von Rohstoffen, Energieressourcen und Ökosystemleistungen (Abfall) beitragen.

Bezug zu Praxisanwendungen und Fallstudien

PA2 „Druckluft-Leckage-App“ (Mader GmbH & Co. KG): Die Druckluft-Leckage-App wurde ursprünglich als Maßnahme zur Werkerunterstützung eingesetzt. Dabei erfolgten die Druckluft-Leckage-Aufnahme und -Protokollierung mithilfe der App, welche die Daten in Echtzeit weiterverarbeitete und zur Verfügung stellte.

PA4 „Warehouse Management System“ (MAINCOR Rohrsysteme GmbH & Co. KG): Durch die Bereitstellung gespeicherter Lagerdaten wird bei der Firma Maincor das Logistikpersonal effizienter eingesetzt und zudem werden Lagerhaltungsprozesse optimiert.

8.5 M5: Dynamisch kooperierende Systeme und Modularisierung

Moderne Fertigungsanlagen können aus austauschbaren und erweiterbaren kooperierenden Systemen zusammengesetzt werden. Die Automatisierungshierarchie zwischen der Feld-, Koordinations- und Steuerungsebene verläuft flach und die Grenzen verschwimmen teilweise. Jede Funktionseinheit kapselt bestimmte Funktionalitäten, die in den Produktionsablauf integriert oder auch einfach wieder herausgelöst werden können, wenn sie nicht benötigt werden (Paradigma des Plug-and-Produce). Dadurch können mehrere Produktvarianten hergestellt werden, wobei sich u. a. das Produkt selbst durch die Fertigung steuern kann. Ebenso können Stand-by-Verluste durch die Abschaltung nicht benötigter Anlagen vermieden werden. Tabelle 49 gibt eine Übersicht über Voraussetzungen, Herausforderungen und Chancen von dynamisch kooperierenden Systemen und Modularisierung.

Tabelle 49: Herausforderungen und Chancen durch dynamisch kooperierende Systeme und Modularisierung

Voraussetzungen	Herausforderungen	Chancen
Dezentrale Steuerung	Standards	Erhöhte Flexibilität
Modularisierung von Fertigungssystemen	Geeignete Schnittstellen	Geringere Auf- bzw. Umbauzeiten
	Kompatibilität von Modulen	Steigerung der Produktivität
Standardisierung der Module	Inbetriebnahmestrategien	Effiziente Produktion kleiner Mengen
Kompakte Ausführung der Module		Skalierbarkeit der Produktion
Mobilität von Modulen		Verkürzte Anlagenanlaufzeiten
		Abschaltung ungenutzter Module
		Hohe Wiederverwendbarkeit der Module
		Durch die Verkettung von vor- und nachgeschalteten Zuständen eines digital beschriebenen Objekts können diese in die Betrachtung der Produktentwicklung einbezogen werden

Potenziale zur Einsparung natürlicher Ressourcen

Durch Modularisierung wird die Anpassung von Produktionsprozessen einfacher und kann durch den Austausch einzelner Module realisiert werden. Es können auch Anlagen und Anlagenteile bei Nichtnutzung abge-

schaltet werden. Daraus ergibt sich eine bessere Auslastung von Anlagen und Anlagenteilen. Eine modulare Produktionsfertigung ermöglicht es zudem, dass ein Produkt nicht die komplette Produktionslinie durchlaufen muss. Somit ergeben sich mögliche Einsparungen bei Rohstoffen, Energieressourcen und Ökosystemleistungen (Abfall).

Bezug zu Praxisanwendungen und Fallstudien

PA7 „Business-Warehouse-System“ (Hermos AG): Durch das Business-Warehouse-System werden automatisch nach Eingang des Kundenauftrags u. a. die Schaltpläne digital erstellt, die produktspezifische Software programmiert und benötigte Bauteile bei den jeweiligen Zulieferern bestellt.

8.6 M6: Einführung und Verwendung von Ortungs- und Lokalisierungssystemen

Durch Ortungs- und Lokalisierungssysteme können gefertigte Produkte und Maschinen in der Produktionsstätte leichter gefunden und zugeordnet werden. Sie bieten die Chance, die Transparenz des Transportflusses zu steigern und somit unnötige Transporte zu vermeiden (Tabelle 50). Durch diesen Ansatz können sich Maschinen, Werkstückträger und Transportsysteme selbst lokalisieren, autonom navigieren und untereinander kooperieren (z. B. Roboter-Roboter-Kooperation). Die Prozesse und Vorgänge entlang der gesamten Lieferkette können in die Betrachtung einfließen.

Tabelle 50: Herausforderungen und Chancen durch Einführung und Verwendung von Ortungs- und Lokalisierungssystemen

Voraussetzungen	Herausforderungen	Chancen
Lokalisierungsinfrastruktur: - Markierung zu lokalisieren- der Objekte - Sende- und Empfangseinhei- ten	Auswahl geeigneter Systeme Echtzeitfähigkeit der Ortungs- systeme	Optimierung von Vorgängen entlang dem gesamten Herstel- lungsprozess Reduzierung oder Eliminierung von Fehlern und nichtwertschöp- fenden Prozessen Verfolgung und Rückverfolgung von Bauteilen und Maschinen Transparenz und Optimierung des Transportflusses Reduzierung von Lagerhaltung Diebstahlsicherung Geofencing Vereinfachung von Rückrufakti- onen durch verbesserte Nachver- folgbarkeit

Potenziale zur Einsparung natürlicher Ressourcen

Diese Maßnahme übt einen direkten Einfluss auf den inner- bzw. außerbetrieblichen Transport aus. Transportwege können z. B. analysiert und optimiert werden. Produkte, Werkzeuge etc. können leichter gefunden werden, wodurch sich Überproduktion reduzieren lässt. Dadurch können Rohstoffe und Ökosystemleistungen (Abfall, CO₂) eingespart werden.

Bezug zu Praxisanwendungen und Fallstudien

PA1 „Optimierte Geschäftsprozesse“ (C&C Bark Metalldruckguss und Formenbau GmbH): Im Rahmen dieser PA ermöglicht eine Funktion des eingeführten ERP-Systems die genaue und echtzeitnahe Ortung sowie Rückverfolgbarkeit sämtlicher Produkt-Chargen und -Lose während der Produktion.

PA5 „Data on a Stick“ (Sensitec GmbH): Das Unternehmen hat durch das Einführen von USB-Sticks ein „indirektes“ Lokalisierungssystem geschaffen. Durch Anmeldung des USB-Sticks an der Maschine ist bekannt, wo sich der Auftrag gerade befindet. Vor Einführung der Praxisanwendung, als

die Aufträge noch auf Papier ausgedruckt vorlagen, mussten sie bei Bedarf aufwändig vom Personal gesucht werden.

8.7 M7: Zustandsüberwachung

Durch die kontinuierliche Überwachung und Analyse der Daten von Sensoren und Aktoren können Abweichungen von einem Referenzzustand frühzeitig erkannt und behoben werden. So sollten z. B. durch Verschleiß auftretende Abweichungen registriert und frühzeitig angezeigt werden. Zudem ermöglicht die Überwachung der Betriebszustände von Anlagen und Prozessabläufen eine frühzeitige Erkennung von Fehleinstellungen, Fehlnutzung und Fehlbedienung durch den Werker oder den Maschinenführer.

Tabelle 51: Herausforderungen und Chancen durch Zustandsüberwachung

Voraussetzungen	Herausforderungen	Chancen
Vernetzung von Sensoren und Aktoren	Auswahl geeigneter Daten und Messstellen	Kontinuierliche Zustands-, Prozess- und Qualitätsüberwachung
Durchgängige Datenintegration	Erfassung, Speicherung und Verarbeitung großer Datenmengen	Prädiktive Wartung
Regelmäßige Erfassung aussagekräftiger Daten	Datenhandhabung bei kontinuierlicher Erfassung	Transparente Produktion (auch in Bezug auf Ressourceneinsatz)
Identifikation zur Zustandsbewertung geeigneter Daten	Nutzenbringende Analyse der Daten	Fehleranalysen auf fundierter Datenbasis
Entsprechende Hard- und Software	Korrelation zu Prozessparametern	Verringerung des Ausschusses durch Überwachung der Prozessstabilität
		Ermöglicht prädiktive Instandhaltung
		Basis für Assistenzsysteme

Potenziale zur Einsparung natürlicher Ressourcen

Die Zustandsüberwachung ermöglicht es, Verschleißteile bis zur tatsächlichen Nutzungsgrenze einzusetzen, anstatt sie in feststehenden Intervallen auszutauschen. Die Zustandsüberwachung kann auch Maschinenausfälle mit den dadurch entstehenden Schadenslagen und Ausschuss verhindern. Die Erkennung von Abweichungen und die Behebung untypischer Fehler führen zudem zur Reduzierung von Fehlproduktionen. Dadurch lassen sich Rohstoffe, Energieressourcen und Ökosystemleistungen (Abfall) einsparen.

Bezug zu Praxisanwendungen und Fallstudien

PA1 „Optimierte Geschäftsprozesse“ (C&C Bark Metalldruckguss und Formenbau GmbH): Das eingeführte ERP-System verfügt über eine Funktion, die die Vernetzung der Maschinen mit dem System ermöglicht. Betriebs- und Maschinendaten werden dem System in Echtzeit gemeldet. Somit wird eine Zustandsüberwachung möglich.

PA2 „Druckluft-Leckage-App“ (Mader GmbH & Co. KG): Diese PA stellt ein digitales Werkzeug zur Zustandsüberwachung dar. Mithilfe von Ultraschall-Sensoren bis hin zu mobilen Endgeräten wird der Zustand von Druckluftanlagen (v. a. Leitungen) überwacht und die Informationen werden in Echtzeit zur Verfügung gestellt.

PA3 „One Piece Flow“ (J. Schmalz GmbH): Die Bearbeitungszentren sind mit einer Software zur Zustandsüberwachung ausgestattet. Eventuelle Stördaten werden dann zum Teil direkt von den Maschinenlieferanten ausgewertet, um ihre Wartungseinsätze optimal zu gestalten.

PA5 „Data on a Stick“ (Sensitec GmbH): Durch die Entwicklung eines eigenen Manufacturing Execution System (MES) können Maschinen und insbesondere kritische Betriebsstoffe (z. B. Chemikalien) überwacht werden.

8.8 M8: Prädiktive Wartung

Systeme zur prädiktiven Wartung sagen Maschinenfehler (z. B. Maschinenausfälle oder Störungen) zustandsabhängig voraus. Folglich sind Unternehmen in der Lage, Reparaturen bedarfsgerecht durchzuführen. Standzeiten durch Verschleißteile können optimal ausgenutzt werden. Der Bezug von Ersatzteilen erfolgt erst, wenn sie benötigt werden, wodurch deren Lagerung entfällt. Mittels vorbeugender Instandhaltungsmaßnahmen und rechtzeitiger Reparaturen werden Störungen und Maschinenausfälle reduziert.

Tabelle 52: Herausforderungen und Chancen durch prädiktive Wartung

Voraussetzungen	Herausforderungen	Chancen
Zustandsüberwachung	Schwellenwertbestimmung für unterschiedliche Komponenten, Maschinen und Anlagen	<p>Vermeidung von Produktionsausfällen</p> <p>Erhöhte Maschinenverfügbarkeit</p> <p>Planbare Instandhaltungsmaßnahmen während ohnehin geplanter Betriebsunterbrechungen</p> <p>Möglichkeit Ersatzteile und Reparaturpersonal im Voraus zu bestellen</p> <p>Frühzeitige Erkennung von Schäden/Vermeidung von Folgeschäden</p> <p>Nutzung von Verschleißteilen bis zur Nutzungsgrenze</p>

Potenziale zur Einsparung natürlicher Ressourcen

Systeme zur prädiktiven Wartung dienen der Überwachung und frühzeitigen Identifikation von Verschleiß und erhöhtem Ressourcenverbrauch (z. B. Leckage finden, Ausschuss überwachen). Auch können Instandhaltungsaspekte in die Betrachtung miteinfließen. Die Erkennung von Abweichungen und die Behebung untypischer Fehler führen zur Reduzierung von Fehlproduktion und Ausschuss. Dadurch lassen sich Rohstoffe, Energieressourcen und Ökosystemleistungen (Abfall) einsparen.

Bezug zu Praxisanwendungen und Fallstudien

PA3 „One Piece Flow“ (J. Schmalz GmbH): Das Unternehmen arbeitet mit einer Software zur Zustandsüberwachung der Bearbeitungszentren, die zum Teil direkt von den Lieferanten in Echtzeit ausgewertet wird. Dies ist ein hervorragendes Beispiel für eine prädiktive Wartung.

PA5 „Data on a Stick“ (Sensitec GmbH): Durch die Überwachung des Zustands und Qualitätsverlaufs kritischer Betriebsstoffe (z. B. Chemikalien) kann der Betriebsstoff ausgetauscht werden, bevor es zu einem Ausschuss kommt.

8.9 M9: Durchgängige Datenintegration

Die durchgängige Datenintegration bildet die Grundlage für den einheitlichen Zugriff auf unterschiedliche Datenstrukturen aus heterogenen Datenquellen sowohl in Bestands- als auch in Neuanlagen. Die Kombination und

Auswertung dieser Daten ermöglichen es, auftretende Korrelationen zu ermitteln. Durch Erkennen und Beheben von Abweichungen und Fehlern zwischen Planung und Fertigung können Fehlproduktionen reduziert werden. Die verbesserte Nachverfolgbarkeit über Systemgrenzen hinweg verhindert eine Überproduktion, die Weiterverarbeitung defekter Produkte sowie unnötige Materialeinkäufe.

Tabelle 53: Herausforderungen und Chancen durch durchgängige Datenintegration

Voraussetzungen	Herausforderungen	Chancen
Sinnvolle Aufbereitung und Aggregation der Daten	Kompatibilität verschiedener Schnittstellen	Vernetzung von Betriebsbereichen, z. B. Shopfloor mit Führungsbereichen (einheitliche Systeme)
Schnittstellen zum Austausch	Hohe Komplexität aufgrund uneinheitlicher Datenstrukturen und -formate	Einheitliche Betrachtung und Auswertung von Informationen
Informationsmodell zur Abbildung und Konsolidierung der Daten	Erfassung und Verarbeitung großer Datenmengen	Basis für fast alle Digitalisierungsmaßnahmen höherer Ordnung
Umfassende Datenmanagementstruktur	Kontrolle der Datenqualität	Rückverfolgbarkeit von Daten über Lebenszyklen von Produkten und Anlagen
	Operativer Aufwand beim Datensammeln aus verschiedenen Geschäftsbereichen	Hohe Transparenz von Prozessen
	Echtzeitanforderung	Entscheidungen basierend auf Daten
	Skalierbarkeit des Systems	Zeitersparnis
	Unterschiedliche Technologiestände des Maschinenparks	Reduzierung von Fehlern
	Sicherheitsanforderungen	Daten über den Ressourcenverbrauch aus der Nutzungsphase und dem End of Life können vom Hersteller zur Produktoptimierung genutzt werden
	Auflösung bzw. Vermeidung von Datensilos	Schaffung branchenspezifischer Standards als Orientierungshilfe im Digitalisierungsprozess

Potenziale zur Einsparung natürlicher Ressourcen

Laut einer Studie der IMPULS-Stiftung erhebt die Mehrzahl der befragten KMU bereits Maschinen- und Prozessdaten in irgendeiner Form.^{260, 261} Zum Zweck der Optimierung von Ressourcenverbräuchen nutzt die Hälfte dieser Unternehmen derartig erhobene Daten. Eine vollständige Erfassung von

²⁶⁰ Vgl. Lichtblau et al. (2015), S. 37.

²⁶¹ Befragung der Mitglieder des Vereins Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer (VDMA).

Maschinen- und Prozessdaten stellt in den Unternehmen jedoch noch die absolute Ausnahme dar. Mittels durchgängiger Datenintegration lassen sich Rohstoffe, Energieressourcen, Ökosystemleistungen (Abfall, CO₂) und Fläche einsparen.

Bezug zu Praxisanwendungen und Fallstudien

PA1 „Optimierte Geschäftsprozesse“ (C&C Bark Metalldruckguss und Formenbau GmbH): Das eingeführte ERP-System ermöglicht eine unternehmensweite Vernetzung der Maschinen und Anlagen sowie einen Datenaustausch. Dadurch werden Betriebs- und Maschinendaten in Echtzeit ins System übertragen.

PA2 „Druckluft-Leckage-App“ (Mader GmbH & Co. KG): Dadurch, dass die Druckluft-Leckage-App selbst Daten über eine Druckluftanlage in Echtzeit zur Verfügung stellt, ermöglicht sie eine durchgängige Datenintegration.

PA3 „One Piece Flow“ (J. Schmalz GmbH): Im One Piece Flow-Fertigungsbereich ist eine durchgängige Datenintegration vorhanden. Hier ist die Produktion mit dem Auftragsmanagement gekoppelt und der Bestellprozess frühzeitig mit digitalen Daten versorgt.

PA7 „Business Warehouse System“ (Hermos AG): Eine durchgängige Datenintegration ermöglicht sowohl die Steigerung der Transparenz und die Optimierung von Auftragsabarbeitungsprozessen als auch eine automatisierte Kostenkalkulation.

PA10 „FoamCreator“ (Wetropa Kunststoffverarbeitung GmbH & Co): Durch die Änderung des Geschäftsmodells erfolgt die Produktentwicklung nun durch den Kunden. Dabei entstehende Daten können bis in die Produktion geleitet werden.

8.10 M10: Virtuelle Produktentwicklung

Die virtuelle Produktentwicklung ermöglicht in Kombination mit der virtuellen Simulation, dass Produkttests an virtuellen Testobjekten durchgeführt werden. Dadurch verringert sich der Bedarf an physischen Prototypen. Die

Prototypen, die dennoch benötigt werden, können oft mittels additiver Verfahren, wie z. B. 3D-Druck, erzeugt werden.

Tabelle 54: Herausforderungen und Chancen durch virtuelle Produktentwicklung

Voraussetzungen	Herausforderungen	Chancen
Dateninfrastruktur und -management	Schulung der Mitarbeiter	Schnelle Entwicklungszyklen
Zugänglichkeit von Prozess und Projektdaten	Produktdatenmanagement	Frühes Feedback
Systemintegration	Administrativer Aufwand	Frontloading
Mitarbeiter Know-how	Hohe Softwarekosten	Simulationsuntersuchungen
Hohe Rechenleistung		Fundierte Entscheidungsbasis
		Ressourcenschonung durch weniger späte konstruktive Änderungen und virtuelle Prototypen
		Qualitätsverbesserung
		Prozessoptimierung (Freigabe/ Änderung)
		Vermeidung von Medienbrüchen
		3D-Datenaustausch mit Kunden/ Lieferanten
		Additive Fertigung (3D-Druck)

Potenziale zur Einsparung natürlicher Ressourcen

Im Vergleich zu herkömmlichen subtraktiven Fertigungsprozessen benötigt die virtuelle Produktentwicklung bei der Prototypenfertigung wesentlich weniger Ressourcen: Einerseits werden quantitativ weniger Rohstoffe für sie gebraucht, andererseits fallen auch Werkzeuge für die Herstellung der Prototypen sowie deren Wartung weg. Eine durchgängige digitale CAD-Prozesskette spart zudem weitere Ressourcen durch die Vermeidung von Medienbrüchen ein. Inhalte müssen nicht mehr manuell eingepflegt oder mittels Werkzeuge konvertiert werden. Insgesamt ergeben sich Einsparungen an Rohstoffen, Energieressourcen und Ökosystemleistungen (Abfall).

Bezug zu Praxisanwendungen und Fallstudien

PA3 „One Piece Flow“ (J. Schmalz GmbH): Der 3D-Druck wird für die Herstellung von Prototypen von Kunststoffteilen, aber auch für kundenindividuelle Lösungen eingesetzt.

PA8 „Virtuelle Produktfertigung im Prototypenbau“ (Sanner GmbH):

Produkte werden digital entwickelt. Anschließend erfolgt die Prototypenfertigung mittels 3D-Druck. Damit entfällt die aufwendige iterative Werkzeugfertigung. Zudem bietet diese Methode die Möglichkeit, die Prototypen schnell dem Kunden vorzustellen.

PA10 „FoamCreator“ (Wetropa Kunststoffverarbeitung GmbH & Co):

Die Produktentwicklung wurde durch die Bereitstellung einer App und Internetplattform an den Kunden ausgelagert. Fertigungsdaten können vom Kunden direkt zur Produktion bzw. zu den Maschinen geleitet werden.

8.11 M11: Cloud Computing

Die Verlagerung von komplexen Anwendungen oder Daten aus Produktion und Fertigung in Cloud-basierte Lösungen ermöglicht einen einfacheren Datenaustausch und senkt den Administrationsaufwand. Auf die in der Cloud hinterlegten Daten und Applikationen kann weltweit rund um die Uhr von unterschiedlichen Rechnern aus zugegriffen werden.

Tabelle 55: Herausforderungen und Chancen durch Cloud Computing

Voraussetzungen	Herausforderungen	Chancen
Zuverlässige Breitbandinternetverbindung	Gewährleistung der Datensicherheit sensibler Unternehmensdaten	Verbesserte Energie- und Ressourceneffizienz durch optimierte Auslastung von IT-Kapazitäten
Datensicherheit	Ausreichende Performanz für flüssige Prozesse	Dynamischer Zugriff auf IT-Kapazitäten
Rechtssicherheit	Herstellung von Zuverlässigkeit und Ausfallsicherheit	Abrechnung nach flexiblen Bezahlmodellen
Interoperabilität der Cloud-Dienste mit der vorhandenen IT-Infrastruktur		Geringer Administrationsaufwand
		Mobile Verfügbarkeit
		Verfügbarkeitsgarantie durch Cloud-Anbieter
		Verlagerung langfristiger Investitionsausgaben zu operativen Kosten
		Befähigung unternehmensübergreifender Partnernetzwerke
		Vereinfachung von Wartungsaufgaben durch direkte Ansteuerung von Feldgeräten

Potenziale zur Einsparung natürlicher Ressourcen

Die Verlagerung der Rechenleistung und Datenspeicherung von betriebsinternen Servern auf energieeffizientere externe Rechenzentren führt zu Energieeinsparungen, da größere Zentren effizienter betrieben werden können. Entsprechend werden Server und die anschließende Infrastruktur aus Kühlsystemen und Speicherlösungen sowie deren eigentliche Fertigung, die aus unterschiedlichsten Rohstoffen und kritischen Materialien bestehen, eingespart. Daher ergibt sich die Möglichkeit, Energie und Rohstoffe einzusparen.

Bezug zu Praxisanwendungen und Fallstudien

PA9 „Cloud-basierte Fertigung“ (Sanner GmbH): Ein ERP-System mit MES-Funktionalitäten wurde an einen externen Servicedienstleister ausgelagert. Zudem werden Daten bei einem Cloud-Anbieter gespeichert. Im Zuge dessen wurde die eigene IT-Infrastruktur heruntergefahren, wodurch Energieeinsparungen und eine höhere Verfügbarkeit erzielt werden konnten.

9 HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR KMU, POLITIK UND WISSENSCHAFT

Wesentliche Bestandteile dieser Studie sind eine strukturierte Literaturauswertung, die Betrachtung einer systematischen Methodik zur Bewertung von Ressourceneffizienzpotenzialen und die Untersuchung von Praxisbeispielen in Unternehmen. Ergänzt wurde diese Informationsbasis durch einen Workshop und eine Tagung mit Teilnehmenden aus Industrie, Wissenschaft, Verbänden und Politik. Aus den Ergebnissen der Untersuchung werden im Folgenden Handlungsansätze für KMU sowie Politik und Wissenschaft abgeleitet.

9.1 Handlungsempfehlungen für KMU

In KMU stellen sich vor allem zwei Herausforderungen, um Ressourceneffizienzpotenziale zu realisieren: Unternehmen müssen zum einen geeignete Maßnahmen für den eigenen Betrieb auswählen. Zum anderen sollten sie die neuen Möglichkeiten der Digitalisierung gezielt dazu nutzen, um Daten über Ressourcenverbräuche im Betrieb und in der Wertschöpfungskette zu generieren und sich damit eine strategische Informationsbasis für die Identifikation von Einsparmöglichkeiten und das Controlling von Erfolgen zu schaffen. Die Handlungsempfehlungen für KMU (HK) sind im Folgenden entsprechend dieser Zielsetzungen strukturiert.

9.1.1 HK1: Ermittlung des Reifegrads der Digitalisierung und Auswahl von Maßnahmen

Handlungsempfehlung

Die in der Studie identifizierten Maßnahmen der digitalen Transformation können branchenübergreifend zur Steigerung der Ressourceneffizienz genutzt werden. Welche Maßnahme ausgewählt und in welchem Umfang sie umgesetzt wird, muss individuell an die Randbedingungen eines jeden Betriebs angepasst werden.

Unternehmen sollten einen „Readiness-Check“ mit dem Ziel durchführen, den vorliegenden Reifegrad der Digitalisierung zu ermitteln. Basierend auf dem ermittelten Reifegrad können entsprechende Maßnahmen M1 bis M11 und deren Ausbaustufe ausgewählt werden. Dabei sollten Ressourceneffizienzpotenziale konsequent berücksichtigt werden.

Jede Maßnahme der digitalen Transformation (Kapitel 8, S. 147) existiert in mehreren Reifegradstufen (Kapitel 5.3.3, S. 78). Sie kann in Abhängigkeit des Entwicklungsstands und des Digitalisierungsstadiums des Unternehmens angewendet werden. Einige Maßnahmen sollten jedoch aufgrund der technischen Voraussetzungen nur in einem fortgeschrittenen Stadium genutzt werden (Abbildung 23). Beispielsweise kann das Konzept des digitalen Objektgedächtnisses (M2) in unterschiedlichen Ausbaustufen zum Einsatz kommen. Auf der Stufe des I4.0-Fortgeschrittenen können z. B. Fertigungsdaten auf einem digitalen, wiederbeschreibbaren Speichermedium detailliert protokolliert werden. Als I4.0-Experte oder I4.0-Vorreiter ist es auch möglich diese Maßnahme komplex, z. B. in Form eines cyberphysischen Systems mit drahtloser Netzwerkverbindung, zur Effizienzsteigerung der Produktion einzusetzen.

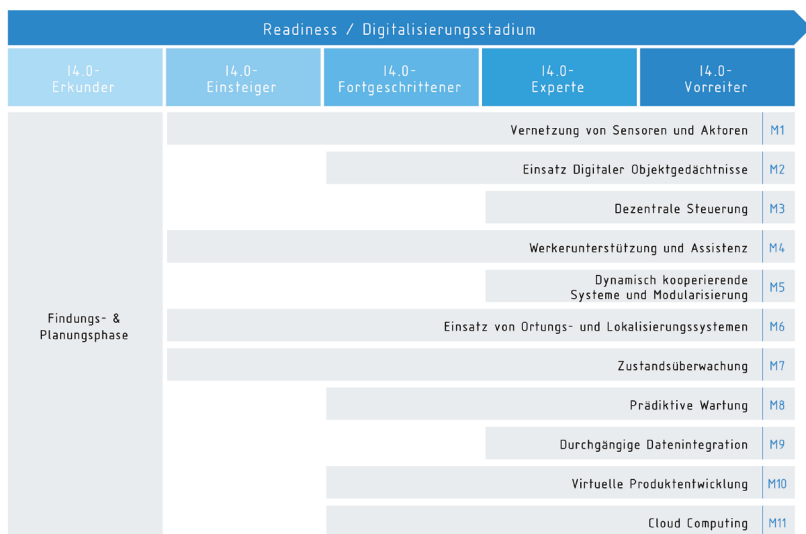


Abbildung 23: Zuordnung von Maßnahmen entsprechend des Digitalisierungsstandes

Um geeignete Maßnahmen oder deren Übertragbarkeit für das eigene Unternehmen einzuordnen, empfiehlt es sich den eigenen Digitalisierungsstand zu ermitteln. Hierfür bietet sich z. B. der vom Mittelstand 4.0-

Kompetenzzentrum Kaiserslautern entwickelte Readiness-Check an.²⁶² Der Readiness-Check bestimmt mittels 25 Fragen den Industrie 4.0-Reifegrad eines Unternehmens und ordnet es einem von fünf Stufen zu – vom I4.0-Erkunder bis hin zum I4.0-Vorreiter. Entsprechend des ermittelten Industrie 4.0-Reifegrads sollten die Maßnahmen der digitalen Transformation ausgewählt und umgesetzt werden. Die Potenziale zur Einsparung von Ressourcen (Kapitel 8, S. 147) sollten konsequent berücksichtigt werden.

9.1.2 HK2: Erfassung und Auswertung von Ressourcendaten

Handlungsempfehlung

Industrie 4.0 bietet neue Möglichkeiten für die anlagen- und prozessbezogene Erfassung und Auswertung von Daten zu betrieblichen Ressourcenverbräuchen. Wesentlich dafür ist es, die relevanten betrieblichen Kenngrößen zu identifizieren und für deren Erfassung die im Rahmen der Digitalisierung eingeführten IKT-Komponenten zu nutzen.

Unternehmen wird empfohlen, die Möglichkeiten von Industrie 4.0 für die Schaffung einer anlagen- und prozessbezogenen Datenbasis über die spezifischen Ressourcenverbräuche ihrer Prozesse anzulegen. Durch die Weiterverarbeitung und Analyse der Daten werden die Identifikation von Ressourceneffizienzpotenzialen und das gezielte Erfolgscontrolling zukünftiger Maßnahmen ermöglicht. Hilfestellung hierfür bietet das in der Studie entwickelte Ressourcenselbsteinschätzungstool (ReSET).

Laut der Studie „Erschließen der Potenziale der Anwendung von ‚Industrie 4.0‘ im Mittelstand“²⁶³ werden in mittelständischen Unternehmen zwar viele Daten gesammelt, jedoch wird die Datenanalyse meist stark vernachlässigt. Darüber hinaus werde bei der Datenerfassung nicht systematisch vorgegangen. Eine klare Strategie fehlt, welche Daten aufgenommen werden sollten, um zu relevanten Erkenntnissen zu gelangen. Dies konnte durch die in dieser Studie gesammelten Erfahrungen bestätigt werden.

²⁶² Vgl. Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Kaiserslautern (kein Datum).

²⁶³ Vgl. Bischoff, J. (2015).

Im Folgenden wird ein Tool vorgestellt, das v. a. KMU hilft, die digitale Transformation im Unternehmen für die systematische Datenerfassung und -analyse zu nutzen. Des Weiteren soll es die Unternehmen befähigen, weiterführende Schritte selbstständig zu ihrem konkreten Anwendungsfall ableiten und die daraus entstehenden Ressourcenpotenziale abschätzen zu können. Das Tool wurde in Anlehnung an die im Leitfaden Industrie 4.0²⁶⁴ veröffentlichten Werkzeugkästen Industrie 4.0 entwickelt.

Ressourcenselbsteinschätzungstool (ReSET)

Im vorliegenden Ressourcenselbsteinschätzungstool (ReSET) werden sechs betriebliche materielle Ressourcen in sechs Entwicklungsstufen der Datenerfassung und -analyse gezeigt.

Abbildung 24 gibt die generalisierte Ausführung des Ressourcenselbsteinschätzungstools wieder. Für die sechs materiellen betrieblichen Ressourcen elektrische Energie, thermische Energie, Rohstoffe, Betriebsstoffe, spezifische Emissionen und Abfälle zur Beseitigung wurden übergreifend sechs Entwicklungsstufen der Digitalisierung definiert.²⁶⁵ Diese erstrecken sich von links nach rechts, von einer nicht vorhandenen Datenerfassung zum Ressourceneinsatz, über eine Erfassung mit immer höherer Auflösung bis hin zu vollautomatisierten Systemen, die Daten erfassen, analysieren und in der Lage sind, abgeleitete Optimierungsmaßnahmen eigenständig umzusetzen.

²⁶⁴ Vgl. Anderl, R. (2015).

²⁶⁵ Durch den in Kapitel 2.2 beschriebenen Zusammenhang zwischen betrieblichen und natürlichen Ressourcen kann von den sechs betrieblichen materiellen Ressourcen auf die natürlichen Ressourcen geschlossen werden.

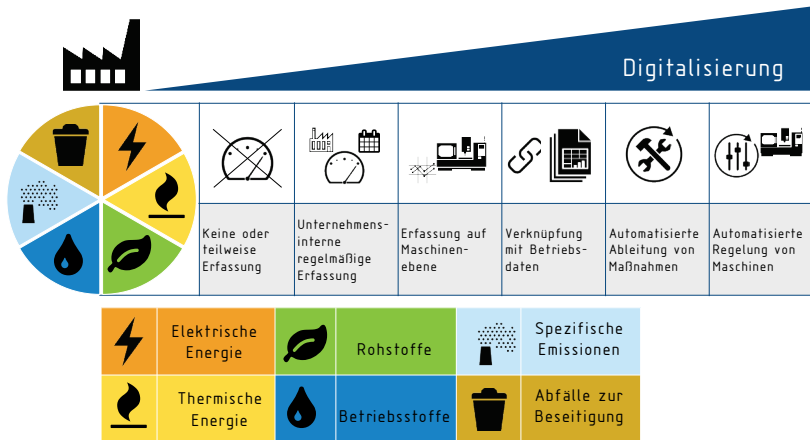


Abbildung 24: Generalisierte Ausführung des Ressourcenselbsteinschätzungstools (ReSET)

Auf **Stufe 1** werden zur jeweiligen Ressource keine, nur ungeordnete oder unregelmäßige Daten erfasst. Auch ohne den Einsatz moderner Sensorik fallen Daten über den Einsatz von Ressourcen an, z. B. aus Bestellungen des Einkaufs oder Rechnungen der Energieversorger. Diese verbleiben jedoch in ihren jeweiligen Organisationseinheiten und werden nicht für eine holistische Betrachtung der Ressourceneffizienz herangezogen.

Unternehmen auf **Stufe 2** erfassen regelmäßig und strukturiert die relevanten Bezugsgrößen auf Unternehmensebene. Ein Bewusstsein für den Ressourceneinsatz wird geschaffen. Die Daten können aus den vorhandenen Datensätzen extrahiert oder gezielt manuell erhoben werden. Auch ein erster Einsatz von Sensorik zur automatisierten Datenerfassung ist denkbar, wird jedoch begleitet von hohen Anforderungen an die IT-Infrastruktur des Unternehmens. Aus den gesammelten Daten können zeitliche Verläufe erstellt, saisonale Schwankungen identifiziert sowie erste Optimierungsmaßnahmen abgeleitet werden.

Auf **Stufe 3** erfolgt eine Erhöhung der Auflösung durch die Erfassung der Ressourcendaten auf Maschinenebene. Eine automatisierte Datenerfassung und vertikale Datenintegration sind in dieser Stufe zielführend. Die Granularität des Datenbestandes wird erhöht. Es lassen sich gezielte Maßnahmen für individuelle Maschinen oder Fertigungsbereiche ableiten. Das

entstehende Wissen über den Ressourceneinsatz kann in die Arbeitsvorbereitung mit eingebracht werden.

Die ersten drei Stufen beschreiben den Weg von einer nicht vorhandenen Erfassung von Ressourcendaten zu einem größer werdenden Bewusstsein des Ressourceneinsatzes durch Erfassung der relevanten Daten und einer anschließenden Erhöhung sowohl der Frequenz als auch der Bezugspunkte. Dies schafft eine wachsende Transparenz der Prozessabläufe im Unternehmen im Hinblick auf die Ressourceneffizienz und bildet den Grundstein für weitere Digitalisierungsschritte.

Auf **Stufe 4** werden die erfassten Ressourcendaten mit Betriebsdaten, also Maschinen- oder Prozessdaten, verknüpft. Eine intensive Analyse der gekoppelten Daten führt zu neuen Erkenntnissen über den Zusammenhang zwischen Produktion und Ressourceneinsatz und erlaubt die Ableitung weiterer Optimierungen zur Ressourceneffizienzsteigerung.

Mit Hilfe von maschinellem Lernen können auf **Stufe 5** Muster und Gesetzmäßigkeiten in den Prozessen erkannt werden. Algorithmen lernen von kontinuierlich erfassten Daten und treffen auf deren Basis Vorhersagen über zukünftige Ereignisse. Das künstliche System kann so auch auf unbekannte Daten reagieren und eigenständig Optimierungsmaßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz ableiten. Diese werden den Mitarbeitern zur Umsetzung vorgeschlagen.

Die höchste Stufe der Digitalisierungsentwicklung (**Stufe 6**) bilden autonome Systeme, welche die maschinell abgeleiteten Optimierungsmaßnahmen eigenständig umsetzen. Eine vollständige Vernetzung von Sensorik, künstlicher Intelligenz und Aktorik ist hierfür Voraussetzung. Durch den Einsatz autonomer Systeme ergeben sich zahlreiche neue Chancen, die sich auf Basis des heutigen Wissens noch nicht umfänglich abschätzen lassen.

Während die zugrundeliegenden Technologien der Stufen 1 bis 4 im Allgemeinen Stand der Technik sind, jedoch noch nicht flächendeckend umgesetzt werden, handelt es sich bei den Technologien der Stufen 5 und 6 um Gegenstände aktueller Forschungsvorhaben, welche noch wenig bis gar keine Anwendung in der industriellen Praxis, insbesondere in KMU, fin-

den. Die Stufen wurden dennoch inkludiert, um der Vision einer vollständigen Digitalisierung Rechnung zu tragen. Eine detaillierte Beschreibung des Ressourcenselbststeinschätzungstools befindet sich im Anhang 2 (S. 267).

9.1.3 HK3: Entwicklung von Strategien für Ressourceneffizienz im Unternehmen

Handlungsempfehlung

Ressourceneffizienz stellt derzeit für KMU ein eher untergeordnetes Ziel der digitalen Transformation dar. Sie sollte von Unternehmen im stärkeren Maß als eine eigenständige Chance für die Steigerung der Ressourceneffizienz betrachtet werden.

Unternehmen sollten eine gezielte Strategie für Maßnahmen der Ressourceneffizienz im Rahmen ihrer digitalen Transformation entwickeln.

Weiterführende Informationen zu den Maßnahmen M1 bis M11 können bei den an dieser Studie beteiligten Partnern und deren Netzwerken eingeholt werden. Mittelfristig sollten die Beratungsangebote bestehender Kompetenzzentren vernetzt werden (siehe HP1, S. 173). Als Ausgangspunkt können unter anderem das ReSET-Tool und der Readiness-Check genutzt werden.

9.2 Handlungsempfehlungen für die Politik

Die richtigen politischen Rahmenbedingungen sind für den Erfolg der digitalen Transformation in KMU des verarbeitenden Gewerbes von besonderer Bedeutung. So treibt die Politik aktuell den Fortschritt der digitalen Transformation durch den Ausbau der Netzinfrastruktur voran. Davon profitieren besonders kleinere Gewerbebetriebe im ländlichen Raum. Zukünftig kann davon ausgegangen werden, dass Unternehmen die Infrastruktur unabhängig von ihrer Region und Größe für die digitale Transformation zur Verfügung haben und dabei auch die Möglichkeiten zur Steigerung der Ressourceneffizienz nutzen können. Die Politik kann dies vor allem durch Unterstützung gezielter Beratungsangebote und Hilfestellungen für Unternehmen fördern.

Gleichzeitig hat die Politik die Aufgabe, die durch das Internet und die Digitalisierung auf die Gesellschaft und die Unternehmen zukommenden Risiken im Auge zu behalten. Dies betrifft vor allem die folgenden Punkte:

- IT-Systeme und deren Infrastrukturen sind mittlerweile integrale Bestandteile fast aller Produkte und Dienstleistungen der deutschen Wirtschaft. Demnach sollte ein besonderes Augenmerk auf dem Datenschutz und der Datensicherheit liegen. Für die Sicherheit von Daten und den Schutz kritischer Infrastrukturen muss sich noch ein stärkeres Bewusstsein entwickeln. Es ist wichtig, die Anfälligkeit, Schwachstellen und Angreifbarkeit von Leitungen für Daten, Gas, Strom und Wasser zu kennen und abzusichern, um eine Versorgung der Bevölkerung und damit auch der inländischen Produktion gewährleisten zu können. Es muss Vertrauen in IT-Infrastrukturen und Systeme geschaffen werden, so dass KMU ohne Scheu den Schritt in Richtung Digitalisierung wagen können. Betriebs- und Datensicherheit sollten bei der Vernetzung von Produktionsstandorten bzw. von Maschinen und Anlagen sowie deren Sensorik und Aktorik immer als integraler Bestandteil angesehen werden.
- Durch Verfahren der künstlichen Intelligenz besteht die Möglichkeit, zunächst „versteckte“ Informationen in Daten durch Datenanalysen (Korrelationsanalysen) zutage zu fördern und sichtbar zu machen. Dies geht einher mit der Frage nach dem Besitzanspruch in Bezug auf die digitalen Daten eines Produkts, die in der Herstellungs- und Nutzungsphase erzeugt werden: Wer darf diese einsehen und (weiter) nutzen? Es muss eine Sensibilisierung für derartige Fragestellungen stattfinden.
- In Bezug auf die Einführung von Ortungs- und Lokalisierungssystemen sollte die Politik den rechtlichen Rahmen für den Einsatz solcher Systeme abstecken. Diese können potenziell auch zur Überwachung der Mitarbeiter eingesetzt werden. Solcherlei Missbrauch gilt es durch geeignete Gesetze zu verhindern.
- Zudem sollte sich die Politik um die rechtliche Absicherung der Infrastruktur sowie die Förderung von Cloud-Lösungen auch auf EU-Ebene kümmern und eine Standardisierung und Interoperabilität zwischen Cloud-Anbietern anstreben, um Anbieterabhängigkeiten (Vendor-Lock-in) zu vermeiden.

Im Folgenden werden die wichtigsten Handlungsempfehlungen für die Politik (HP) beschrieben, die Voraussetzungen für eine Realisierung der Potenziale der digitalen Transformation hinsichtlich der Steigerung der Ressourceneffizienz in KMU des verarbeitenden Gewerbes sind.

9.2.1 HP1: Vernetzung und Förderung von Beratungsangeboten zu Industrie 4.0 und Ressourceneffizienz

Handlungsempfehlung

Sowohl im Bereich Industrie 4.0 als auch im Bereich Ressourceneffizienz bestehen auf den Ebenen des Bundes und einiger Länder öffentlich geförderte Institutionen, die Unterstützung für KMU sowie Beratungs- und Schulungsmaßnahmen anbieten. Auf Bundesebene sind dies z. B. die Mittelstands 4.0-Kompetenzzentren des BMWi und das Kompetenzzentrum Ressourceneffizienz des BMUB, das beim VDI ZRE angesiedelt ist. Auch in einzelnen Ländern sind hier entsprechende Beratungsangebote vorhanden.

Eine zentrale Handlungsempfehlung ist die Vernetzung dieser Beratungsangebote mit dem Ziel der Entwicklung eines einheitlichen Baukastens zur Unterstützung der KMU bei der Identifizierung und Realisierung von Ressourceneffizienzpotenzialen im Rahmen von Industrie 4.0 (Ressourceneffizienz 4.0).

Ausgangssituation

Viele KMU des verarbeitenden Gewerbes stehen bei der Umsetzung von Digitalisierungsmaßnahmen noch ganz am Anfang. Auf der anderen Seite haben die Fallbeispiele gezeigt, dass bei der Implementierung solcher Maßnahmen Aspekte der Ressourceneffizienz eher eine nachgeordnete Rolle spielen. Wie in den vorhergehenden Kapiteln gezeigt, kann die digitale Transformation jedoch große Potenziale bei der Steigerung von Ressourceneffizienz in den Unternehmen bieten. Wichtig ist dabei, dass Aspekte der Material- und Energieeffizienz von Anfang an in die Digitalisierungsmaßnahmen integriert werden.

Umsetzung

Die Erfahrung zeigt, dass Beratungs- und Informationsmaßnahmen für KMU nur dann Erfolg haben, wenn sie übersichtlich und für die Unternehmen leicht handhabbar sind. Wichtig ist daher die Entwicklung eines einheitlichen Baukastens an Beratungs- und Informationsangeboten, der durch alle Beratungsagenturen des Bundes und der Länder gleichermaßen genutzt werden kann. Hierzu wird vorgeschlagen, dass eine Task Force, bestehend aus Vertretern der Mittelstands 4.0-Kompetenzzentren und des VDI ZRE, in einem ersten Schritt eine gemeinsame **Roadmap zur Erarbeitung eines Baukastens Ressourceneffizienz 4.0** entwickelt. Diese kann dann mit den Beratungsagenturen der Länder entsprechend abgestimmt werden. Damit ist sichergestellt, dass alle komplementären Kompetenzen und Erfahrungen berücksichtigt werden. Der Baukasten Ressourceneffizienz 4.0 könnte z. B. Tools, Qualifizierungsmodule oder Gute-Praxis-Beispiele enthalten. Neue Tools könnten z. B. aus bestehenden Online-Tools des VDI ZRE (Ressourcenchecks, Prozessketten etc.) und dem in Kapitel 9.1.2 vorgestellten Ressourcenselbsteinschätzungstool unter Nutzung der in Kapitel 2.2 und Kapitel 5 dieser Studie dargestellten Methodik zur Bewertung von Ressourceneffizienz entwickelt werden. Als verbindendes Element erscheint die Einrichtung einer gemeinsamen digitalen Plattform mit Verlinkungen zu den unterschiedlichen Elementen des Baukastens sinnvoll.

Mit Hilfe des Baukastens Ressourceneffizienz 4.0 kann ein sowohl regional als auch inhaltlich breit aufgestelltes Netzwerk zu Ressourceneffizienz und Industrie 4.0 mit einem **einheitlichen Informations- und Beratungsangebot für KMU** etabliert werden.

9.2.2 HP2: Kennzeichnung/Labeling der Strom- Verbrauchswerte von IKT und Internet-Diensten

Handlungsempfehlung

Betriebliche Maßnahmen der digitalen Transformation erfordern IKT-Hard- und Software und greifen auf Dienstleistungen zurück, die über das Internet angeboten werden. Dadurch werden natürliche Ressourcen in Form von Rohstoffen/Materialien für Hardware und Strom für den Betrieb benötigt, die bei der Bewertung der Ressourceneffizienz berücksichtigt werden müssen. Insbesondere weisen Studien auf den steigenden Strombedarf durch die zunehmende Nutzung von Internet-Dienstleistungen hin.

Die Politik sollte daher die Entwicklung von Labeln und Kennzeichnungssystemen für IKT-Hersteller bzw. Anbieter von internet-basierten Diensten zur Angabe des Stromverbrauchs bei der Nutzung und Herstellung fördern.

Ausgangssituation

Der Stromverbrauch durch die Nutzung von IKT-Hard- und Software (innerbetrieblich) und von Dienstleistungen, die über das Internet angeboten werden (außerhalb des Betriebs), ist Unternehmen oft nicht bekannt. Diese Verbräuche können daher im Rahmen betrieblicher Effizienzmaßnahmen nicht berücksichtigt werden.

Umsetzung

Die existierenden Regelungen zu energieverbrauchsrelevanten Produkten (ErP-Richtlinie bzw. Ökodesign-Richtlinie (2009/125/EG)) sollten um relevante Produktgruppen von IKT für Unternehmen (z. B. Sensoren) und insbesondere um Verbräuche spezifischer Software sowie Internet- bzw. Cloud-Dienste mit einem Verbrauchslabel erweitert bzw. mit einer Kennzeichnung für den Stromverbrauch ausgestattet werden. Diese sollen ausweisen, wie viel Strom pro Nutzeinheit verbraucht wird. Solche Label/Kennzeichnungen könnten auch mit dem Geschäftsmodell „Software as a Service“ verknüpft werden, in dem lediglich die Nutzung einer Dienstleistung (Pay-per-Use oder Pay-per-MB), z. B. einer Cloud, in Rechnung gestellt wird. Somit würden neben den Kosten auch der damit verbundene

Stromverbrauch (Stromverbrauch pro MB) bzw. die emittierten Treibhausgasemissionen (CO₂-Äq. pro MB) ausgewiesen. Die Angabe der Verbrauchswerte führt zu einer direkten Vergleichbarkeit von Anbietern, ermöglicht Unternehmen die Wahl der energieeffizientesten Komponente oder Dienstleistung und stärkt damit den Wettbewerb im Bereich der Energieeffizienz von IKT. Darüber hinaus könnten sich an die Ausweisung von Verbrauchswerten auch Treibhausgas-Kompensationsmodelle, wie gegenwärtig schon im Transportbereich, anschließen.

Im Kontext der Entwicklung von Labeln könnten über den Stromverbrauch hinaus ergänzend auch die folgenden Aspekte in ein Labeling einbezogen werden: Lebenszykluskosten, Jahresarbeitszahl von Systemen, Reparierbarkeit, Transparenz von Informationen, insbesondere zu Akkus (u. a. Kapazitätskennzahlen). Notwendige methodische Vorgehensweisen und Kenngrößen können hierzu im Rahmen von Forschungsprojekten entwickelt werden.

9.2.3 HP3: Ausrichtung der Forschungsförderung zur Verknüpfung von Industrie 4.0 mit Ressourceneffizienz

Handlungsempfehlung

Die Forschungsförderung der Bundesministerien adressiert mit verschiedenen Programmen Themen im Umfeld von Industrie 4.0 und Ressourceneffizienz.

Es wird empfohlen, dass im Rahmen dieser Programme spezifische Fragestellungen für die Realisierung der Potenziale der digitalen Transformation zur Steigerung der Ressourceneffizienz integriert werden. Darüber hinaus sollten zukünftige Schwerpunktthemen der Forschungsförderung zur Entwicklung von Technologien und zur Generierung neuen Wissens entwickelt bzw. ausgearbeitet werden.

Ausgangssituation

Konkrete Handlungsempfehlungen für die Wissenschaft zur Zusammenführung von Industrie 4.0 und Ressourceneffizienz werden in Kapitel 9.3

präzisiert. Aber auch vorangegangene Handlungsempfehlungen weisen in verschiedenen Punkten einen Bezug zur Forschung auf.

Umsetzung

Der Bedarf nach Forschung und die Themen der Forschungsförderung lassen sich in zwei Bereiche strukturieren. So steht einerseits aus Sicht der Ressourceneffizienz weiterhin die technologisch orientierte Forschung zur IKT im Fokus, verbunden mit Fragen der Rahmenbedingungen (Zugang zur Infrastruktur, Datensicherheit etc.). Andererseits ist zukünftig verstärkt ein breiter interdisziplinärer und transdisziplinärer Ansatz erforderlich, um weitergehende methodische Ansätze zur Erfassung der Auswirkungen auf natürliche Ressourcen bereitzustellen und neue Anwendungen der Digitalisierung, z. B. in der Kreislaufwirtschaft, gemeinsam mit Akteuren dieser Handlungsfelder voranzubringen.

9.3 Handlungsempfehlungen für die Wissenschaft

Die Wissenschaft kann die Ausrichtung der digitalen Transformation auf eine Steigerung der Ressourceneffizienz in unterschiedlicher Weise fördern. So kann IKT-bezogene Forschung spezifische Aspekte der Ressourceneinsparung herausarbeiten. Darüber hinaus sollte sie sich v. a. mit systemaren komplexen Effekten beschäftigen und die gesamtgesellschaftlichen Auswirkungen der digitalen Transformation erforschen.

In futuristischen Forschungsfabriken, Future Factories, erheben Forscher Daten aus Steuerung und Produktion, und die Maschinen geben selbstständig Auskunft über die Qualität der gefertigten Produkte sowie die Betriebszustände der Anlage und aktuelle Verbräuche, von z. B. Schmierstoffen, Energie und Druckluft. Sämtliche Produktionsdaten werden in Mensch-Maschine-Schnittstellen, Human Machine Interfaces, für den Benutzer verständlich dargestellt. Auf diese Weise werden das Zusammenspiel der modularen Fertigung und der entsprechende Materialfluss sowie der Einsatz von Energie und Betriebsstoffen in Tabellen und Diagrammen dokumentiert und visualisiert.

Um diese Vision zu realisieren, ist noch viel Forschungs- und Entwicklungsbedarf erforderlich. Allgemein sind dabei folgende Schwerpunkte besonders wichtig:

- Die Wissenschaft muss KMU für die Angreifbarkeit der IT-Infrastruktur (Strom- und Wasserversorgung) sensibilisieren und ein Bewusstsein schaffen, damit das Thema Sicherheit und Absicherung von IT-Systemen und Datenstrukturen eine höhere Sichtbarkeit erfährt. Weiterhin muss sie Lösungsansätze und Verfahren präsentieren, die als Barrieren für Angriffe auf die vernetzte Infrastruktur fungieren. Dies ist nötig, um das Vertrauen in IT-Lösungen zu schaffen. Denn nur, wenn ein Vertrauen der jeweiligen Entscheider in IT-Lösungen besteht, hat der digitale Wandel und damit die digitale Transformation eine Chance. Die Wissenschaft sollte die Übertragbarkeit der Ansätze und Repräsentationsformate verbessern und daran forschen, die Sicherheit von IT-Systemen und Datenstrukturen zu erhöhen.
- Die Wissenschaft muss die Weiterentwicklung cyber-physischer Systeme und eine direkte Integration in Fertigungsmodule vorantreiben. Im Ergebnis könnten Softwareagenten eine flexiblere Fertigung steuern - dezentral von verschiedenen Computersystemen aus. Das Hauptaugenmerk bei der Entwicklung modularer Ansätze sollte auf der Ressourcenschonung (z. B. durch Reduzierung von Ausschuss) liegen.
- Zur Orientierung bei der Einführung von Digitalisierungslösungen im Kontext von Industrie 4.0 werden immer mehr Forderungen der Unternehmen nach Standards und Normen sowie Zertifizierungen laut. Insbesondere in Bezug auf die Daten müssen Methoden, Repräsentationsformate und Grundlagen für ein durchgängiges Indikatorensystem zur Ressourceneffizienz entwickelt werden. Erst darauf kann ein Standardisierungsprozess aufsetzen. Ein mögliches Forschungsthema ist die standardisierte Überführung von Daten der Produktentwicklung in Daten der Produktionsplanung und in Maschinen-Codes, um direkt fertigen zu können.

Im Folgenden werden Handlungsempfehlungen für die Wissenschaft (HW) mit besonderer Relevanz für die Ressourceneffizienz noch einmal genauer thematisiert.

9.3.1 HW1: Datenerfassung, -auswertung, -präsentation durch Ansätze künstlicher Intelligenz

Handlungsempfehlung

Eine geeignete Erfassung, Auswertung und Repräsentation von Produktionsdaten können sowohl bei der Prozesssteuerung und -überwachung als auch im Wartungsfall zur Einsparung von Ressourcen von Nutzen sein. Allerdings sind bestehende Verfahren zur Datenerfassung und zu -analysen hinsichtlich Quantität und Komplexität der zu erwartenden Datenvorkommen nicht geeignet.

Die Wissenschaft sollte Verfahren zur Datenerfassung, -auswertung und -präsentation durch Ansätze der künstlichen Intelligenz (maschinelle Lernverfahren, wie Deep Learning) entwickeln sowie die Ableitung von spezifischen automatisierten Handlungsstrategien vorantreiben.

Potenziale zur Einsparung natürlicher Ressourcen

Bei der Datenauswertung durch maschinelles Lernen gilt es, aus der Historie typischer Verläufe zu lernen und Ausreißer sowie atypische Verläufe zu erkennen und frühzeitig anzuzeigen. Typische Verläufe werden dann durch Toleranzschläuche bzw. (teil-)automatisierte Schwellwertdefinitionen in Messreihen abgebildet.

Zudem sollten Verfahren zur einfacheren Verarbeitung und Auswertung von CAD-Datensätzen entwickelt werden. Auch die Überführung in standardisierte Repräsentationsformate zur weiteren Auswertung mittels Lernverfahren (Deep Learning) bietet noch viel Forschungspotenzial.

Einer Suche nach ressourcenintensiven Prozessen durch Messreihen, aufgezeichnet in z. B. der eigenen Fertigungsanlage, folgen eine Analyse und Abwägung von Kosten für Materialien und Rohstoffe, um signifikante Einsparpotenziale zu identifizieren. Zur Speicherung der Messreihen ist der Einsatz von anlagen- und produktspezifischen Datenstrukturen und deren Aufzeichnung in digitalen Objektgedächtnissen (Maßnahme M2, S. 149) möglich. Dies erlaubt eine reelle Einschätzung der Ressourcenverbräuche des Produktes oder der Anlage während der Nutzungsphase. Eine solche

Lösung folgt dem übergeordneten Konzept einer durchgängigen Datenintegration (Maßnahme M9, S. 159) und schafft Transparenz in der Produktion. Die vorliegenden reellen Daten können kontinuierlich mit prognostizierten Ressourcenverbräuchen verglichen werden. Daraus können spezifische automatisierte Handlungsstrategien entwickelt werden.

9.3.2 HW2: Verknüpfung betrieblicher Indikatoren mit natürlichen Ressourcen

Handlungsempfehlung

Je nach Branche und eingesetztem Prozess eines Unternehmens werden unterschiedliche materielle betriebliche Ressourcen und infolgedessen natürliche Ressourcen beeinflusst. Unternehmen, die durch ihr Handeln einen nachvollziehbaren Beitrag zur Ressourcenschonung leisten möchten, müssen dazu befähigt werden, den Beitrag betrieblicher Maßnahmen zu unterschiedlichen natürlichen Ressourcen und ggf. den jeweiligen Indikatoren der Nachhaltigkeitsstrategie zu ermitteln.

Daher sollten Faktoren zur Umrechnung betrieblicher Indikatoren auf Indikatoren der Nachhaltigkeitsstrategie identifiziert und deren Messung in Industrie 4.0-Lösungen integriert werden. Hierzu wird die Zusammenarbeit zwischen Forschung und I4.0-Enablern für die Entwicklung einer einheitlichen Methodik als besonders wichtig erachtet. Entsprechend dieser Methodik können dann erst Werkzeuge implementiert werden.

Potenziale zur Einsparung natürlicher Ressourcen

Unternehmen sehen Ressourceneffizienz als Teil ihrer Nachhaltigkeitspolitik an und sind motiviert, sich im Rahmen von Umwelt- und Nachhaltigkeitsmanagement an gesellschaftlichen Zielsetzungen zu orientieren. Bislang fehlen aber Tools, mit denen Unternehmen den Zusammenhang zwischen betrieblichen Maßnahmen und den Auswirkungen auf die natürlichen Ressourcen und die relevanten Indikatoren der deutschen Nachhaltigkeitspolitik quantifizieren können. Um dies zu ermöglichen, sind von der Forschung unterschiedliche Teilbereiche zu adressieren: Als Grundlage ist eine (Weiter-)Entwicklung der Methodik zu einer durchgängigen Indikatrix erforderlich, die relevante betriebliche Kenngrößen identifiziert und

diese an die Systematik der deutschen Nachhaltigkeitsindikatoren mit Bezug zu den natürlichen Ressourcen anbindet. Weiterhin sind Datengrundlagen zu schaffen, die den Betrieben selbst nicht bekannt sind. Hierzu zählen Sachverhalte, wie z. B. Materialgehalte von IKT-Hardware, die in den oben erwähnten Tools für die betriebliche Ebene eingebunden werden können.

Entsprechende Tools können sich die zukünftigen Möglichkeiten von Industrie 4.0, welche die automatisierte Erfassung und intelligente Analyse von Daten ermöglicht, zu Nutze machen. Damit können die relevanten betrieblichen Kenngrößen für natürliche Ressourcen erhoben und automatisiert zur Darstellung von Ressourcenverbräuchen ausgewertet werden. Mit solchen Tools werden Unternehmen in die Lage versetzt, die Konzeption von Maßnahmen und die betriebliche Umweltpolitik strategisch an gesellschaftliche Zielsetzungen auszurichten und möglichst effizient zur Verringerung des gesamtwirtschaftlichen Verbrauchs natürlicher Ressourcen beizutragen.

9.3.3 HW3: Erkenntnistransfer durch Entwicklung von Praxisanwendungen aus Technologiedemonstratoren

Handlungsempfehlung

Die prototypische Umsetzung von Technologiedemonstratoren ist ein Hauptbestandteil vieler Forschungsprojekte, da anhand einer praktischen Realisierung eines Systems zahlreiche Erkenntnisse, in positiver als auch negativer Hinsicht, gewonnen werden können. Eine mögliche Umgebung für die Umsetzung von Technologiedemonstratoren sind je nach Bedarf z. B. die vom BMWi und vom BMBF gemeinsam geförderten Testzentren oder die an verschiedenen Technischen Universitäten existierenden Lernfabriken zur Energie- und Ressourceneffizienz.

Den beteiligten wissenschaftlichen Institutionen kommt die Rolle zu, die daraus resultierenden Erkenntnisse (Gute-Praxis-Beispiele) in Bezug auf die Steigerung der Ressourceneffizienz im Rahmen von Industrie 4.0 in Praxisanwendungen zu übertragen und in Kooperation mit der Industrie in die Anwendung zu bringen (Transfer von Forschung in Unternehmen).

Potenziale zur Einsparung natürlicher Ressourcen

Die im Rahmen dieser Studie vorgestellten Praxisanwendungen sowie Technologiedemonstratoren zeigen die Potenziale der digitalen Transformation zur Einsparung von Ressourcen auf und dienen als Muster für eigene technologische Umsetzungen.

9.3.4 HW4: Identifikation von Stoffströmen und deren Synergien

Handlungsempfehlung

Die digitale Transformation kann Wertschöpfungsnetzwerke und unternehmensübergreifende Prozesse, z. B. in Industrieparks, unterstützen („Industrielle Symbiose“).

Die Wissenschaft sollte dabei unterstützen, geeignete Stoffströme und deren Synergien untereinander zu identifizieren. Dabei soll die Wissenschaft prüfen, inwiefern dies mit digitalen Plattformen (bzw. mithilfe digitaler Werkzeuge) realisiert werden kann. Gleiches gilt für Maßnahmen der Energieeffizienz, wie die Abwärmenutzung. Über technologische und IKT-bezogene Fragen sind auch ökonomische und rechtliche Aspekte von Kooperationsmodellen und Fragen der Datenzugänglichkeit/Datensicherheit zu klären.

Potenziale zur Einsparung natürlicher Ressourcen

Es ergeben sich vielfältige Möglichkeiten zur Einsparung von Ressourcen. Die Betrachtung mehrerer Unternehmen in einem Wertschöpfungsnetzwerk ermöglicht die Bündelung von Synergiepotenzialen zur Kreislaufführung, Kaskadennutzung, „Huckepack-Strategien“ oder vergleichbaren Möglichkeiten. Der Datenaustausch kann hier z. B. Informationen über anfallende Abfälle beinhalten, die von anderen Unternehmen als Rohstoffe genutzt werden können. Eine andere Möglichkeit wäre das Teilen von Daten über zu erwartende Energieverbräuche (Lastspitzenregulierung) oder auch Abwärme im Netzwerk, so dass die Prozessplanung in den einzelnen Unternehmen entsprechend angepasst werden kann.

Mögliche Anwendungsfelder sind z. B. Nullemissionsgewerbegebiete oder Projekte zur industriellen Symbiose.

9.3.5 HW5: Berücksichtigung von Ressourceneffizienz in der Produktentwicklung und im Recycling

Handlungsempfehlung

In der Produktentwicklung arbeiten Großunternehmen schon lange mit Ökobilanzen, um Produkte unter Umweltaspekten zu optimieren. Der Arbeitsaufwand für die Ermittlung der Ressourcenverbräuche von Produkten ist aber sehr hoch und für KMU oftmals nicht zu leisten.

Möglichkeiten der durchgängigen Datenintegration sind weiterzuentwickeln, um eine direkte Bewertung der Ressourceneffizienz von Produktvarianten während des Produktentwicklungsprozesses zu ermöglichen. Weiterhin ist Forschung notwendig, um Informationen aus einer digitalen Lebenszyklusakte in der gesamten Wertschöpfungskette und insbesondere der Entsorgungsphase zu nutzen.

Potenziale zur Einsparung natürlicher Ressourcen

Die Handlungsempfehlung ist integriert in das Konzept einer durchgängigen Datenintegration M9 (S. 159). Darüber hinaus wird in Kombination mit Maßnahme M2 (S. 149) durch den Einsatz eines digitalen Produktgedächtnisses die Nutzung von Produktionsdaten für produktbezogene Informationen ermöglicht. Hier ist weitere Forschung notwendig, um diese Informationen z. B. in einer „digitalen Lebenszyklusakte“ zu verwalten und damit Wissen aus der gesamten Wertschöpfungskette unter Integration der Nutzungs- und Entsorgungsphase verfügbar zu machen. Unternehmen – auch KMU – können dann dieses Wissen zur Optimierung des Ressourceneinsatzes über die gesamte Wertschöpfungskette nutzen. Denkbar ist auch die Generierung von Produktinformationen, die der Verbraucher über ein mobiles Endgerät abrufen kann.

Auch für den Bereich des Recyclings ergeben sich ganz neue Möglichkeiten, wenn Materialinformationen für die spätere Verwertung oder die Weiterverwendung einzelner noch funktionsfähiger Komponenten verfügbar sind: Optionen, wie Pfandsysteme oder Leasing von Produkten, können hier unterstützt werden. Im Rahmen einer aktuellen Studie für den Rat für Nachhaltige Entwicklung wurde gerade der Bereich der „Circular Econo-

my“ als Beispiel zukünftiger Chancen der Industrie 4.0 in einem Expertenworkshop diskutiert²⁶⁶.

Neue Möglichkeiten ergeben sich auch für die durch die digitale Transformation gebotene Gestaltung individualisierter Produkte: Ein Vergleich der prognostizierten Ressourcenverbräuche verschiedener Entwürfe eines Produkts schon während der Entwicklung ermöglicht es, die (wahrscheinlich) ressourceneffizienteste Variante auszuwählen. Reelle Ressourcenverbräuche des Produkts während der Nutzungsphase beim Kunden können dann mit den – im digitalen Objektgedächtnis des Produkts M2 (S. 149) – hinterlegten, prognostizierten Ressourcenverbräuchen verglichen werden. Diese Betrachtungen können wiederum mit der Entwicklungsphase rückgekoppelt werden und so in eine mögliche Überarbeitung des Produkts einfließen.

9.3.6 HW6: Untersuchung der digitalen Transformation auf der gesamtwirtschaftlichen und gesellschaftlichen Ebene

Handlungsempfehlung

Die Veränderung von Prozessen und Produktionslinien durch die digitale Transformation kann bis hin zu völlig neuen Wertschöpfungsketten und Geschäftsmodellen führen. Die gesellschaftlichen Auswirkungen können alleine aus der unternehmerischen Perspektive und mit der Beschränkung auf direkte Rückwirkungen auf Lieferanten oder Kunden nur unzureichend erkannt werden.

Es wird als sinnvoll erachtet, bei zukünftigen Forschungsarbeiten die Wirkungen der digitalen Transformation in Unternehmen auf der gesamtwirtschaftlichen und gesellschaftlichen Ebene zu untersuchen. Dabei sollte eine breite interdisziplinäre Perspektive (z. B. Auswirkungen auf Konsumverhalten) adressiert werden.

²⁶⁶ Vgl. RNE (2016).

Potenziale zur Einsparung natürlicher Ressourcen

Einflüsse der digitalen Transformation auf Systeminnovationen in ganz neuen Wertschöpfungsketten und auf gesellschaftliche Prozesse können umfassende Folgen mit Wirkungen auf den Ressourcenverbrauch haben. Insbesondere stellt sich hier die Frage nach möglichen Rebound-Effekten, wenn z. B. Produkte durch Digitalisierung effizienter und damit preisgünstiger hergestellt werden können. Solche Fragen bedürfen weitergehender Forschungsarbeiten, die auch die Entwicklung neuer methodischer Ansätze umfassen, um die Folgen auf der gesamtwirtschaftlichen Ebene für den aggregierten Ressourcenverbrauch zu ermitteln und dies mit gesellschaftlichen Folgerungen zu verbinden.

10 ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Die vorliegende Studie untersucht die Umsetzung von Maßnahmen der digitalen Transformation zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Im Mittelpunkt stehen KMU des verarbeitenden Gewerbes.

Gemäß der in **Kapitel 1** formulierten Motivation und Zielsetzung geht es in dieser Studie insbesondere darum, die Zusammenhänge zwischen der digitalen Transformation und der Ressourceneffizienz zu untersuchen, den diesbezüglichen Entwicklungsstand herauszuarbeiten und daraus Handlungsempfehlungen für KMU, Politik und Wissenschaft abzuleiten.

In **Kapitel 2** werden die dafür notwendigen Grundlagen und Begriffe definiert und erläutert. Neben der Definition von Industrie 4.0 wird hier auch die Notwendigkeit eines ganzheitlichen Ansatzes bei der Betrachtung der Ressourceneffizienz herausgearbeitet. Die Thematik wird im Kontext von Industrie 4.0 bislang mit zwei Ansätzen untersucht: Einzelne Studien betrachten die erwarteten gesamtwirtschaftlichen Potenziale und leiten Aussagen für die gesamte Volkswirtschaft oder für bestimmte Branchen ab. Andere Studien untersuchen einzelne Unternehmen oder konkrete Produktionstechnologien im Sinne von Fallbeispielen für die Einsparung betrieblicher Ressourcen, meist ohne Berücksichtigung von Aufwänden (z. B. Strombedarf digitaler Technologien) oder Einflüssen außerhalb des Unternehmens. Eine ganzheitliche Betrachtung erfordert jedoch die Einbeziehung der Einsparungen wie auch der Verbräuche, die durch Industrie 4.0-Lösungen realisiert werden, und zwar unter Berücksichtigung des gesamten Lebenswegs.

Um die Auswirkungen der digitalen Transformation auf die Ressourceneffizienz von industriellen Prozessen und Technologien untersuchen zu können, sind in **Kapitel 3** Stand und Perspektiven von Industrie 4.0 bezüglich relevanter Technologien dargestellt. Existierende Normungsgremien und Architekturmodelle werden ebenfalls kurz beschrieben. Ausschlaggebend für die Auswirkungen der Digitalisierungsmaßnahmen auf die Ressourceneffizienz sind jeweils der berücksichtigte Systemrahmen sowie die Ebene, auf der die Maßnahmen umgesetzt werden (Prozess, Unternehmen, Wertschöpfungskette).

In **Kapitel 4** werden Lösungs- und Anwendungsfälle aus der Praxis präsentiert, bei denen die in Kapitel 3 vorgestellten Technologien bereits konkret zur Einsparung von Ressourcen in Unternehmen beitragen können. Die Beispiele umfassen Einzellösungen auf der Prozessebene sowie Systemlösungen auf der Unternehmensebene, innerhalb der Lieferkette sowie hinsichtlich des gesamten Lebenswegs eines Produkts. Weiterhin werden bestehende Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten vorgestellt. Die Maßnahmen und Anwendungsbeispiele zeigen, dass positive Auswirkungen der digitalen Transformation auf die effiziente Nutzung von Ressourcen bereits erkennbar sind. Die fließenden Entwicklungsstufen dieser Transformation erschweren es zum derzeitigen Zeitpunkt noch, direkte Zusammenhänge zwischen dem Einsatz von Industrie 4.0 fördernden technologischen Komponenten bzw. Lösungen und einer unmittelbaren Steigerung der Ressourceneffizienz deutlich zu machen. Wechselwirkungen werden demnach nur teilweise identifiziert. Die beschriebenen informations-, automatisierungs- und regelungstechnischen Maßnahmen für ganzheitliche Industrie 4.0-Lösungen in der Praxis können jedoch einen transparenteren und effizienteren Umgang mit Ressourcen ermöglichen.

Kapitel 5 stellt die Vorgehensweise der wissenschaftlichen Untersuchung von Ressourceneffizienzpotenzialen durch Lösungen der Industrie 4.0 dar. Für die Ermittlung der Ressourceneffizienzpotenziale wird ein methodisches Vorgehen auf Basis der VDI Richtlinie 4800 unter Berücksichtigung der Normen zur Ökobilanz (DIN EN ISO 14040/44) entwickelt. Diese Methodik zeigt, wie aus betrieblichen Kenngrößen (z. B. Betriebsstoffverbrauch oder Energieeinsatz) und unter Berücksichtigung von Aufwänden durch IKT die Einsparungen natürlicher Ressourcen ermittelt werden können. Zur besseren Einordnung werden elf Maßnahmen der digitalen Transformation sowie fünf Stufen des digitalen Reifegrads eines Unternehmens definiert.

Kapitel 6 identifiziert relevante Branchen und stellt die darauf aufbauende Auswahl von zehn Fallstudien dar. Die Elektro- und die Kunststoffindustrie sowie der Maschinenbau erweisen sich im Hinblick auf die betrachteten Kriterien als die Branchen mit der höchsten Relevanz innerhalb des verarbeitenden Gewerbes. Die ausgewählten Unternehmen sind alle in den vier Bundesländern beheimatet, die als Mitauftraggeber der Studie fungieren.

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse ist durch die allgemeine Darstellung der Maßnahmen der digitalen Transformation innerhalb der Studie gegeben.

In **Kapitel 7** werden die ausgewählten Fallstudien gemäß der in Kapitel 5 entwickelten Methodik qualitativ untersucht. Zwei Fallstudien werden darüber hinaus auch einer quantitativen Bewertung unterzogen.

Die untersuchten Fallstudien zeigen, dass Maßnahmen der digitalen Transformation **Einsparungen betrieblicher Ressourcen** bewirken: Neben der Verringerung des Stromverbrauchs und des Materialeinsatzes sind dies zum Beispiel die Vermeidung oder Verminderung von Abfällen, die Einsparung von (innerbetrieblichen) Transporten, die Reduzierung fehlerhafter Teile und damit Ausschuss und die Einsparung von benötigtem Lagerraum. Schätzwerte für den Umfang der Einsparungen konnten nur von einigen Unternehmen genannt werden. Diese liegen in den meisten Fällen in einem **Bereich von bis zu 25 %**, in nur wenigen Fällen darüber. Aus den Fallstudien ergeben sich auch Hinweise darauf, dass möglicherweise weitere spezifische Effekte auf der betrieblichen Ebene existieren, die jedoch einer vertieften Untersuchung der individuellen Rahmenbedingungen der jeweils speziellen Produktionskette bedürften. Außerdem ist darauf hinzuweisen, dass in den untersuchten Betrieben in vielen Fällen auch Einsparungen an nicht-materiellen betrieblichen Ressourcen erzielt werden, z. B. an Kapital. Maßnahmen der digitalen Transformation haben **Aufwände an Ressourcen** und somit einen Einfluss auf den Verbrauch an natürlichen Ressourcen: einerseits durch den Einsatz zusätzlicher Hardware-Komponenten und den damit verbundenen höheren Rohstoffverbrauch, andererseits durch den Stromverbrauch des Betriebs von Hard- und Software.

Zur Ermittlung von Ressourceneffizienzpotenzialen werden durch die Zusammenführung von Informationen der Fallstudien mit Daten aus Literatur und Statistik erste **beispielhafte Berechnungen** durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass das Verhältnis von Einsparungen zu Aufwänden im Sinne der durch eine Maßnahme bewirkten Netto-Einsparungen sehr unterschiedlich ausfallen kann. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die Art des Materials einen großen Einfluss auf die Bewertung ausübt. Denn die zu

erwartenden Einsparungen natürlicher Ressourcen liegen bei solchen Materialien höher, die einen großen Aufwand an Energie und Rohstoffen für ihre Herstellung benötigen.

Als **Fazit aus den Fallstudien** kann festgestellt werden:

- Maßnahmen der digitalen Transformation werden in Unternehmen in Form unterschiedlicher Praxisanwendungen umgesetzt. Sie tragen zur Einsparung betrieblicher Ressourcen, v. a. in Form verringerter Fehleraten, Ausschuss- und Abfallmengen sowie eingesparter elektrischer Energie, bei.
- Die ressourcenbezogenen Aufwände der Digitalisierung, insbesondere der Mengenbedarf an spezifischer Hardware und der damit verbundene Stromverbrauch, sind sowohl auf der innerbetrieblichen als auch auf der außerbetrieblichen Ebene bislang weitestgehend unbekannt.
- Erste Beispielrechnungen auf Grundlage der entwickelten methodischen Vorgehensweise zeigen, dass die Berücksichtigung von Aufwänden die Netto-Einsparungen von Maßnahmen reduzieren kann und dass diese daher für die Ermittlung der Ressourceneffizienz zwingend einbezogen werden müssen.

Die untersuchten Unternehmen messen der digitalen Transformation für die Zukunft einen hohen Stellenwert bei, auch wenn sie sich gegenwärtig z. T. erst in frühen Stadien der digitalen Transformation befinden. Wesentliche Motivation ist die Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit.

Die Steigerung der Ressourceneffizienz wird beim Einsatz digitaler Technologien in den meisten Fällen nur als ein Nebeneffekt angesehen, der z. B. mit der Prozessautomatisierung einhergeht. **Daher erfolgt auch keine systematische Erfolgskontrolle zur Nachverfolgung und Quantifizierung von Ressourceneinsparungen.** Den Unternehmen fehlen damit die Informationsgrundlagen zu ihren betrieblichen Ressourcenverbräuchen, die sie für die Ableitung zielgerichteter Maßnahmen nutzen könnten. **Die systematische Messung und Auswertung von Ressourcenverbräuchen sind daher eine unabdingbare Voraussetzung für die Identifizierung und Realisierung aller Ressourceneffizienzpotenziale im Unternehmen.**

In **Kapitel 8** wurden die elf in den Praxisanwendungen validierten Maßnahmen detailliert dargestellt: **M1**: Vernetzung von Sensoren und Aktoren, **M2**: Einsatz digitaler Objektgedächtnisse, **M3**: Dezentrale Steuerung, **M4**: Maßnahmen zur Werkerunterstützung und -assistenz, **M5**: Dynamisch kooperierende Systeme und Modularisierung, **M6**: Einführung und Verwendung von Ortungs- und Lokalisierungssystemen, **M7**: Zustandsüberwachung, **M8**: Prädiktive Wartung, **M9**: Durchgängige Datenintegration, **M10**: Virtuelle Produktentwicklung und **M11**: Cloud Computing. Diese Darstellung soll KMU bei der Auswahl geeigneter Maßnahmen unterstützen. Diese bilden die Grundlage von Praxisanwendungen der digitalen Transformation, deren gezielter Einsatz zur Einsparung von Ressourcen führen kann.

In **Kapitel 9** werden auf Grundlage der Ergebnisse der Studie Handlungsempfehlungen für die Industrie, insbesondere KMU des verarbeitenden Gewerbes, die Politik und die Wissenschaft entwickelt.

Drei Handlungsempfehlungen richten sich an KMU:

- **HK1**: Unternehmen wird die Auswahl der in Kapitel 8 beschriebenen Maßnahmen in Abhängigkeit vom Stand der Digitalisierung empfohlen. Im ersten Schritt wird die **Durchführung eines Readiness-Checks** für die Ermittlung des eigenen Reifegrades der Digitalisierung vorgeschlagen. Auf Basis des Ergebnisses können zum Reifegrad passende **Maßnahmen und deren Ausbaustufen ausgewählt** werden.
- **HK2**: Die Möglichkeiten der Digitalisierung für die anlagen- und prozessbezogene **Erfassung und Auswertung von Daten zu betrieblichen Ressourcenverbräuchen** sollten zukünftig **als strategische Aufgabe** im Fokus der Unternehmen stehen. Entsprechende Informationsgrundlagen sind essentiell für die Identifikation von Ressourceneffizienzpotenzialen und das Erfolgscontrolling. Das in der Studie entwickelte Ressourcenselbsteinschätzungstool (ReSET) bietet hierfür Hilfestellung.

- **HK3:** Die **digitale Transformation** sollte in stärkerem Maße **als Chance für die Steigerung der Ressourceneffizienz** betrachtet werden. Unternehmen sollten dazu eine gezielte Strategie entwickeln.

Aus den Ergebnissen der Studie werden **drei Handlungsempfehlungen für die Politik** erarbeitet:

- **HP1:** Die KMU stehen größtenteils am Beginn der digitalen Transformation. Dadurch ergibt sich die Chance, dass Aspekte der Ressourceneffizienz von Anfang an mit berücksichtigt und in Lösungen der Industrie 4.0 integriert werden. Hierzu ist ein einheitliches Beratungsangebot erforderlich. Ein wichtiger Schritt dazu wäre die **Vernetzung bestehender Beratungsangebote für KMU** mit dem Ziel der Entwicklung gemeinsamer Beratungsangebote. Ein dahingehender Vorschlag ist in der Realisierung eines **Baukastens Ressourceneffizienz 4.0** zu sehen.
- **HP2:** Maßnahmen der Digitalisierung tragen zum Anstieg des Energieverbrauchs, v. a. durch den Betrieb innerbetrieblicher IKT-Hardware und Software und durch die Nutzung von Dienstleistungen über das Internet, bei. Die Politik sollte die **Entwicklung von Labels/Kennzeichnungssystemen** zur Angabe des Energieverbrauchs für IKT-Hersteller bzw. Anbieter von Dienstleistungen des Internets fördern, da Verbrauchsdaten für eine Ressourceneffizienz oft nicht vorliegen.
- **HP3:** Die Forschungsförderung sollte **spezifische Fragestellungen für die Realisierung der Potenziale der digitalen Transformation zur Steigerung der Ressourceneffizienz** in ihre Programme integrieren, wie sie in den Handlungsempfehlungen für die Wissenschaft dargelegt werden.

Folgende **sechs Handlungsempfehlungen für die Wissenschaft** werden aus den Studienergebnissen abgeleitet:

- **HW1: Zentrale Methoden zur Datenerfassung, -auswertung und -präsentation** durch Verfahren der künstlichen Intelligenz (selbstlernende Algorithmen) sollten stärker erforscht und in Hinblick auf die Unterstützung der Ressourceneffizienz weiterentwickelt werden. Mit Hilfe

digitaler Objektgedächtnisse und durchgängiger Datenintegration können spezifische automatisierte Handlungsstrategien entwickelt werden.

- **HW2:** Eine Optimierung betrieblicher Prozesse im Hinblick auf die Verringerung des Verbrauchs natürlicher Ressourcen erfordert das Herstellen von Zusammenhängen zwischen betrieblichen Kenngrößen und entsprechenden Indikatoren. Um dies zu erreichen, sind die Entwicklung **einer einheitlichen Methodik und die Erarbeitung von Tools in Zusammenarbeit zwischen Forschung und Industrie 4.0-Enablern** besonders wichtig.
- **HW3:** Mit dem Ziel eines verbesserten Transfers von Forschungsergebnissen in die Unternehmen sollten die **in Technologiedemonstratoren gewonnenen Erkenntnisse** zur Ressourceneffizienz im Rahmen von Industrie 4.0 **in Kooperation mit der Industrie in die Anwendung gebracht** werden. Hierbei kommt den beteiligten wissenschaftlichen Institutionen eine wesentliche Rolle zu.
- **HW4:** Die digitale Transformation kann **industrielle Symbiosen innerhalb von Wertschöpfungsnetzwerken** unterstützen. Hierzu ist Forschung erforderlich im Hinblick auf die Identifikation geeigneter Stoffströme, die Entwicklung von Synergien und die Umsetzung mit digitalen Plattformen und digitalen Werkzeugen. Dabei sind auch **ökonomische und rechtliche Aspekte** zu klären.
- **HW5:** Der Arbeitsaufwand für die Prognose der Ressourcenverbräuche in der Entwicklungsphase zukünftiger Produkte ist sehr hoch und für KMU oftmals nicht zu leisten. Daher sind Möglichkeiten der Digitalisierung, wie durchgängige Datenintegration, weiterzuentwickeln mit dem Ziel einer **effizienten Bewertung des Ressourcenverbrauchs bereits im Produktentwicklungsprozess**. Dies gilt ebenfalls für die Auswirkung von Produktvarianten auf das Recycling.
- **HW6:** Die Untersuchung gesellschaftlicher Auswirkungen der Digitalisierung muss über die betriebliche Ebene hinausgehen und auch Folgen auf das Konsumentenverhalten miteinbeziehen. Zukünftige Forschungsarbeiten sollten aus einer interdisziplinären Perspektive insbesondere

Fragestellungen aus einem nur begrenzt vorhersehbaren Konsumenten- und Nutzerverhalten adressieren.

Unternehmen, auch im Bereich der KMU, sehen die digitale Transformation als ein wesentliches Zukunftsthema an. Gleichzeitig ist die Thematik Ressourceneffizienz in vielen Unternehmen in Form von Energie- und Umweltzielen in der Unternehmenspolitik präsent. Eine strategisch ausgerichtete Verknüpfung beider Bereiche findet in der Praxis aber bisher kaum statt.

Die Studie zeigt, dass Unternehmen Maßnahmen in verschiedenen Stadien der digitalen Transformation umsetzen können, mit denen betriebliche Ressourcen-Einsparungen ermöglicht werden, u. a. in Form der Vermeidung von Fehlproduktion und Abfall oder der Verringerung des Stromverbrauchs. Gleichzeitig wird deutlich, dass die Datengrundlagen zur Identifikation solcher Einsparpotenziale innerhalb der Unternehmen derzeit noch unzureichend sind. Die Chancen einer Digitalisierung liegen gerade darin, dies mit den neuen informationstechnischen Möglichkeiten zu ändern: Ziel muss es sein, dass Unternehmen zukünftig spezifische Daten zum Ressourcenverbrauch auf der betrieblichen Ebene als strategische Planungsgrundlage zur Verfügung stehen. Beratungs- und Schulungsangebote könnten Unternehmen beim Aufbau betrieblicher Informations- und Controlling-Instrumente unter Nutzung von Technologien der Digitalisierung unterstützen.

Insgesamt kann gesagt werden, dass die Realisierung der Chancen von Industrie 4.0 zur Verringerung des gesellschaftlichen Verbrauchs natürlicher Ressourcen eine sehr komplexe Herausforderung darstellt. Diese sollte in den nächsten Jahren strategisch und durch Vernetzung unterschiedlicher Handlungsfelder sowie Anstrengungen auf den Ebenen von Unternehmen, Politik und Wissenschaft angegangen werden.

11 GLOSSAR

Begriff	Definition
Abfall	„Bewegliche Gegenstände, Stoffe, deren sich der Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss.“ ²⁶⁷
Aktor	„Technisches Element, das die physische Welt entsprechend der Vorgaben der Informationsverarbeitung unter Zunahme von Hilfsenergie verändert. Durch den Einsatz von herstellerepezifischen Schnittstellen ist das System zudem in der Lage, die gewonnenen Informationen an den Menschen oder an mechatronische Systeme weiterzuleiten.“ ²⁶⁸
Betriebsstoffe	Betriebsstoffe umfassen Stoffe, die die Produktion erst möglich machen, z. B. Strom, Druckluft etc.
Big Data	Massendaten (Big Data) sind Daten, die zu groß oder zu komplex sind, um sie mit herkömmlichen Prozessen oder Methoden der Datenverarbeitung auszuwerten und unterliegen rapider, kontinuierlicher Veränderung. Dies geht mit einer Inversion der Prioritäten der IT einher: da die Daten zu groß sind, muss nun das Programm flexibel und beweglich sein. ²⁶⁹
Cloud	„Abstrahierte virtualisierte IT-Ressourcen (wie z. B. Datenspeicher, Rechenkapazität, Anwendungen oder Dienste wie etwa Freemail-Dienste), die von Dienstleistern verwaltet werden. Der Zugang erfolgt über ein Netzwerk, meist das Internet. Der Begriff ‚Wolke‘ (engl. Cloud) meint, dass der eigentliche physische Standort der Infrastruktur dieser Leistungen für den Nutzer oft nicht erkennbar rückverfolgt werden kann, sondern die Ressourcen ‚wie aus den Wolken‘, abgerufen werden können.“ ²⁷⁰
Cyber Physical Production System (CPPS)	„Anwendung von Cyber-Physical Systems in der produzierenden Industrie und somit die Befähigung zur durchgängigen Betrachtung von Produkt, Produktionsmittel und Produktionssystem unter Berücksichtigung sich ändernder und geänderter Prozesse.“ ²⁷¹
Cyber Physical Systems (CPS)	„CPS umfassen eingebettete Systeme, Produktions-, Logistik-, Engineering-, Koordinations- und Managementprozesse sowie Internetdienste, die mittels Sensoren unmittelbar physikalische Daten erfassen und mittels Aktoren auf physikalische Vorgänge einwirken, mittels digitaler Netze untereinander verbunden sind, weltweit verfügbare Daten und Dienste nutzen und über multimodale Mensch-Maschine-Schnittstellen verfügen. Cyber-Physical Systems sind offene soziotechnische Systeme und ermöglichen eine Reihe von neuartigen Funktionen, Diensten und Eigenschaften.“ ²⁷²

²⁶⁷ § 3 Abs. 1 KrWG.

²⁶⁸ Lucke D. et al. (2014), S. 43 f.

²⁶⁹ Vgl. Lichtblau, K. et al. (2015), S. 66.

²⁷⁰ Promotorengruppe Kommunikation (2013), S. 84.

²⁷¹ Promotorengruppe Kommunikation (2013), S. 84.

²⁷² Promotorengruppe Kommunikation (2013), S. 84.

Begriff	Definition
Datensicherheit	„Der Schutz von Daten und Diensten in (digitalen) Systemen gegen Missbrauch, wie unbefugten Zugriff, Veränderung oder Zerstörung. Die Ziele von Maßnahmen zur Angriffssicherheit sind die Erhöhung der Vertraulichkeit (Confidentiality; Einschränkung des Zugriffs auf Daten und Dienste auf bestimmte technische/menschliche Nutzer), der Integrität (Integrity; Korrektheit/Unversehrtheit von Daten und korrekte Funktion von Diensten) und Verfügbarkeit (Availability; Maß für die Fähigkeit eines Systems, eine Funktion in einer bestimmten Zeitspanne zu erfüllen). Je nach konkretem technischen System und den darin enthaltenen Daten und Diensten bildet, Angriffssicherheit sowohl die Grundlage für den Datenschutz (Information Privacy), also den Schutz des Einzelnen vor Beeinträchtigungen seines Persönlichkeitsrechtes in Bezug auf personenbezogene Daten, als auch eine Maßnahme für den Know-How-Schutz (Schutz der Intellectual Property Rights).“ ²⁷³
Dienste	„In der Informatik die Bündelung von fachlichen Funktionen eines Programms, in Netzwerken die Bereitstellung eines Programms auf einem Server und in der Telekommunikation die Übertragung von Daten. Als Synonym wird der Begriff ‚Service‘ verwendet. Dienste bezeichnen das Bereitstellen von Leistungen zur Erfüllung eines definierten Bedarfs.“ ²⁷⁴
Digitale Fabrik	„Die digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – unter anderem der Simulation und dreidimensionalen Visualisierung – die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden. Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt.“ ²⁷⁵
Digitale Transformation	Übergang zur durchgängigen Vernetzung aller Wirtschaftsbereiche und Anpassung der Akteure an die neuen Gegebenheiten. Entscheidungen in vernetzten Systemen umfassen Datenaustausch und -analyse, Berechnung und Bewertung von Optionen sowie Initiierung von Handlungen und Einleitung von Konsequenzen. Diese neuen Werkzeuge werden viele etablierte Geschäftsmodelle und Wertschöpfungsprozesse grundlegend verändern. ²⁷⁶
Digitalisierung	Digitalisierung führt dazu, dass reichhaltigste Daten jederzeit, überall und zu akzeptablen Kosten in der jeweils benötigten Qualität und Quantität zur Verfügung stehen. ²⁷⁷
Echtzeit	In der Informations- und Kommunikationstechnik versteht man unter Echtzeit die Zeit in der eine vorgegebene Aktion erfolgt. Die Aktion kann für den Betrachter simultan ablaufen, ohne merkliche Zeitverzögerung, für die technischen Einrichtungen läuft sie nach vorgegebenen und garantierten Verzögerungszeiten ab. ²⁷⁸
Echtzeitanforderung	Die Echtzeitanforderung ist ein Leitbegriff bei Industrie 4.0, unter dem man die Entscheidungsunterstützung aus der Datenanalytik versteht, bei der Daten zu dem Zeitpunkt vorliegen müssen, zu dem sie noch gebraucht werden. Dies muss nicht zwangsläufig ohne jede Zeitverzögerung ‚jetzt‘ sein. ²⁷⁹

²⁷³ Promotorengruppe Kommunikation (2013), S. 51.

²⁷⁴ Promotorengruppe Kommunikation (2013), S. 85.

²⁷⁵ VDI 4499 Blatt 1:2008-02, S. 3.

²⁷⁶ Vgl. Roland Berger Strategy Consultants (2015).

²⁷⁷ Vgl. Computer Sciences Corporation (2015).

²⁷⁸ ITWissen (2016).

²⁷⁹ Vgl. Lichtblau, K. et al. (2015), S. 66.

Begriff	Definition
Echtzeitfähigkeit	„Echtzeitfähigkeit ist eine wesentliche Anforderung, die viele industrielle Anwendungen stellen. Kann ein System unter allen Betriebsbedingungen richtig und rechtzeitig auf alle auftretenden Ereignisse reagieren, so ist es echtzeitfähig. Erfüllt also ein Kommunikationssystem die qualitativen und zeitlichen Forderungen an den Datenaustausch der Komponenten einer konkreten Anwendung, so ist es - bezogen auf diese Anwendung - echtzeitfähig.“ ²⁸⁰
Eingebettetes System	„Hardware- und Softwarekomponenten, die in ein umfassendes System integriert sind, um systemspezifische Funktionsmerkmale zu realisieren.“ ²⁸¹
Engineering, System Engineering	„Interdisziplinärer Ansatz, um komplexe technische Systeme bedarfsgerecht zu gestalten, systematisch zu entwickeln und zu realisieren (etwa Industrial Engineering: stützt sich auf spezialisierte Kenntnisse und Fertigkeiten in Mathematik, Physik, Informatik, Sozialwissenschaften, etc., zusammen mit den Prinzipien und Methoden von technischer Analyse und Entwurf, um integrierte Systeme von Menschen, technischen Komponenten, Materialien, und Informationen sowie von Ausrüstung und Energie zu realisieren oder zu verbessern).“ ²⁸²
Enterprise Resource Planning-Systeme (ERP-Systeme)	ERP-Systeme bieten integrierte Softwarelösungen für Administration sowie Planung und Steuerung der betrieblichen Wertschöpfungsprozesse und bilden so die Grundlage für die Informationsverarbeitung im Unternehmen. Der Fokus aktueller ERP-Systeme liegt auf der Erweiterung der Funktionalitäten durch Integration verschiedener funktional spezialisierter Systeme. Dies geschieht unter dem Begriff APS (Advanced Planning and Scheduling). ²⁸³
Feldbussystem	„Leitungsgebundene serielle Bussysteme mit denen Sensoren (Feldgeräte) und Aktoren mit Steuerungsgeräten und Leitrechnern verbunden werden und über die der Datenaustausch zwischen den Komponenten erfolgt.“ ²⁸⁴
Funktionelle Einheit (FU)	„Quantifizierter Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit.“ ²⁸⁵ Die FU ist demnach ein Instrument zur Quantifizierung des Nutzens für die Verwendung als Vergleichseinheit, welche für die Ressourceneffizienzbewertung grundlegend ist.
Geschäftsmodell	„Ein Geschäftsmodell ist eine vereinfachte Darstellung eines Unternehmens und eine Abstraktion davon, wie sein Geschäft und seine Wertschöpfung funktionieren, um letztendlich Geld zu verdienen. Es beschreibt auf kompakte Weise Organisation, Kostenstrukturen, Finanzströme, Wertschöpfungskette und Produkte eines Unternehmens. Der Prozess zur Definition eines Geschäftsmodells ist Teil der Geschäftsstrategie.“ ²⁸⁶
Hilfsstoffe	Hilfsstoffe gelten als Ergänzungsmaterial, das für das Endprodukt zwar weniger bedeutend, oft sogar unbedeutend, aber notwendig ist, z. B. Leim für die Herstellung von Möbeln.

²⁸⁰ Virtuelle Software-Engineering-Kompetenzzentrum (2016).

²⁸¹ Promotorengruppe Kommunikation (2013), S. 85.

²⁸² Promotorengruppe Kommunikation (2013), S. 85.

²⁸³ Vgl. Lichtblau, K. et al. (2015), S. 66.

²⁸⁴ Lucke D. et al. (2014), S. 43 f.

²⁸⁵ Vgl. DIN EN ISO 14040:2009-11, S. 10.

²⁸⁶ Promotorengruppe Kommunikation (2013), S. 85.

Begriff	Definition
Horizontale Integration	Die horizontale Integration einer Wertschöpfungskette umfasst die Vernetzung aller Maschinen, Geräte und Mitarbeiter auf einer Unternehmensebene und vernetzt diese innerhalb der Wertschöpfungskette, d. h. zwischen Unternehmen. Die horizontale Integration über Wertschöpfungsnetzwerke, die über den einzelnen Fabrikstandort hinausgeht, ermöglicht außerdem die Bildung von dynamischen Wertschöpfungsnetzwerken. ²⁸⁷
Human Machine Interface (HMI)	„Bestandteile eines interaktiven Systems (Software und Hardware), die Informationen und Steuerelemente zur Verfügung stellen, die für den Benutzer notwendig sind, um eine bestimmte Arbeitsaufgabe mit dem interaktiven System zu erledigen.“ ²⁸⁸
Industrie	„Bereich der gewerblichen Wirtschaft für die Gewinnung von Rohstoffen, die Bearbeitung und Verarbeitung von Rohstoffen und Halbfabrikaten, die Herstellung von Endprodukten sowie für Montage- und Reparaturarbeiten. Industriebetriebe sind vor allem durch maschinelle Produktion, weitgehende Arbeitsteilung und Massenfertigung meist in größeren Betriebsstätten gekennzeichnet. In der Wirtschaftsstatistik wird die Industrie im engeren Sinn auch als verarbeitendes Gewerbe bezeichnet, der industrielle Sektor im Unterschied zum Agrarsektor und Dienstleistungssektor als produzierendes Gewerbe.“ ²⁸⁹
Industrie 4.0	„Der Begriff ‚Industrie 4.0‘ steht für die vierte industrielle Revolution, einer neuen Stufe der Organisation und Steuerung der gesamten Wertschöpfungskette über den Lebenszyklus von Produkten. Dieser Zyklus orientiert sich an den zunehmend individualisierten Kundenwünschen und erstreckt sich von der Idee, dem Auftrag über die Entwicklung und Fertigung, die Auslieferung eines Produkts an den Endkunden bis hin zum Recycling, einschließlich der damit verbundenen Dienstleistungen. Basis ist die Verfügbarkeit aller relevanten Informationen in Echtzeit durch Vernetzung aller an der Wertschöpfung beteiligten Instanzen sowie die Fähigkeit, aus den Daten den zu jedem Zeitpunkt optimalen Wertschöpfungsfluss abzuleiten. Durch die Verbindung von Menschen, Objekten und Systemen entstehen dynamische, echtzeitoptimierte und selbst organisierende, unternehmensübergreifende Wertschöpfungsnetzwerke, die sich nach unterschiedlichen Kriterien wie z. B. Kosten, Verfügbarkeit und Ressourcenverbrauch optimieren lassen.“ ²⁹⁰
Industrielle Symbiose	„Industrielle Symbiose ist eine Art von Vermittlung, die Unternehmen in eine innovative Zusammenarbeit bringt, mit dem Ziel[,] Wege zu finden, die Abfälle des Einen als Rohstoffe des Anderen zu verwerten.“ ²⁹¹
Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT)	Unter Informations- und Kommunikationstechnologien werden all diejenigen technischen Geräte und Einrichtungen zusammengefasst, die Informationen aller Art digital umsetzen, verarbeiten, speichern und übertragen können. ²⁹²
Internet der Dinge	„Verknüpfung physischer Objekte (Dinge) mit einer virtuellen Repräsentation im Internet oder einer internetähnlichen Struktur. Die automatische Identifikation mittels RFID ist eine mögliche Ausprägung des Internets der Dinge, über Sensor- und Aktortechnologie kann die Funktionalität um die Erfassung von Zuständen beziehungsweise die Ausführung von Aktionen erweitert werden.“ ²⁹³

²⁸⁷ Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft; ZVEI (2015), S. 5 – 7.

²⁸⁸ Lucke D. et al. (2014), S. 43 f.

²⁸⁹ Duden Wirtschaft (2016).

²⁹⁰ VDI/VDE-Gesellschaft (2014), S. 2.

²⁹¹ FISSAC (kein Datum).

²⁹² Vgl. Lichtblau, K. et al. (2015), S. 67.

²⁹³ Promotorengruppe Kommunikation (2013), S. 85.

Begriff	Definition
Internet of Things (IoT)	s. Internet der Dinge
Interoperabilität	„Fähigkeit zur aktiven, zweckgebundenen Zusammenarbeit von verschiedenen Komponenten, Systemen, Techniken oder Organisationen.“ ²⁹⁴
IP-Fähigkeit	„Das Internetprotokoll (IP) ist ein Netzwerkprotokoll und stellt die Grundlage des Internets dar. Ein IP-fähiges Gerät ist im Netz adressierbar und damit erreichbar.“ ²⁹⁵
Kleine und mittlere Unternehmen (KMU)	KMU werden in der EU-Empfehlung 2003/361 definiert. Danach zählt ein Unternehmen zu den KMU, wenn es nicht mehr als 249 Beschäftigte hat und einen Jahresumsatz von höchstens 50 Mio. Euro erwirtschaftet oder eine Bilanzsumme von maximal 43 Mio. Euro aufweist. ²⁹⁶ Zusätzlich werden in dieser Studie unter dem Begriff KMU auch Standorte aus Branchen verstanden, die von KMU geprägt sind und KMU entsprechen. Damit sind Unternehmen bestimmter Standorte gemeint, die aufgrund einer Zugehörigkeit zu einem größeren Unternehmen laut EU-Definition nicht mehr unter KMU fallen, aber an sich eine KMU-ähnliche Struktur (Mitarbeiter, Umsatz, Bilanzsumme) aufweisen.
Künstliche Intelligenz	Die künstliche Intelligenz ist ein Teilgebiet der Informatik. Sie versucht Methoden zu schaffen, die einen Computer in die Lage versetzen, Aufgaben zu lösen, für die, wenn sie vom Menschen gelöst werden, Intelligenz erforderlich ist. ²⁹⁷
Lebensweg	Aufeinander folgende und miteinander verbundene Stufen eines Produktsystems von der Rohstoffgewinnung oder Rohstoffherzeugung bis zur endgültigen Beseitigung. ²⁹⁸
Machine-2-Machine-Kommunikation (M2M)	Machine-2-Machine-Kommunikation (M2M) steht für den automatisierten Informationsaustausch zwischen technischen Systemen untereinander oder mit einer zentralen Stelle. Typische Anwendungen sind die Fernüberwachung und -steuerung. M2M verknüpft Informations- und Kommunikationstechnik und bildet das sogenannte ‚Internet der Dinge‘. ²⁹⁹
Manufacturing Execution Systems (MES)	„Als Manufacturing Execution System wird ein am technischen Produktionsprozess operierendes IT-System bezeichnet. Es zeichnet sich gegenüber ähnlich wirksamen Systemen zur Produktionsplanung (sogenannte Enterprise Resource Planning Systeme) durch die direkte Anbindung an die verteilten Systeme des Prozessleitsystems aus und ermöglicht die Führung, Lenkung, Steuerung und Kontrolle der Produktion in Echtzeit. Dazu gehören klassische Datenerfassungen und Aufbereitungen wie Betriebsdatenerfassung, Maschinendatenerfassung und Personaldatenerfassung, aber auch alle anderen Prozesse, die eine zeitnahe Auswirkung auf den technischen Produktionsprozess haben.“ ³⁰⁰
Nutzen	s. Funktionelle Einheit Ein solcher Nutzen könnte z. B. sein: die Herstellung eines Produktes, die Durchführung eines bestimmten technischen Prozesses oder auch eine Dienstleistung.

²⁹⁴ Fraunhofer IOSB (2016c), Stichwort: Interoperabilität.

²⁹⁵ Lucke D. et al. (2014), S. 43 f.

²⁹⁶ Vgl. EU (2003).

²⁹⁷ Vgl. Gabler Wirtschaftslexikon (2017).

²⁹⁸ Vgl. DIN EN ISO 14040:2009-11, S. 8.

²⁹⁹ Vgl. Lichtblau, K. et al. (2015), S. 67.

³⁰⁰ Promotorengruppe Kommunikation (2013), S. 85.

Begriff	Definition
Ökosystemleistungen (inkl. Senkenfunktion)	„Leistungen, die Menschen von Ökosystemen erhalten. Anmerkung: Diese umfassen Versorgungsleistungen wie Nahrung und Wasser, regulierende Leistungen wie Schutz vor Hochwasser, Trockenheit, Bodendegradation und Krankheiten, Basisleistungen wie Bodenbildung und Nährstoffkreisläufe [...]“ ³⁰¹
Plug and Produce	„Interoperation zwischen zwei oder mehr Beteiligten mit minimalem Arbeitsaufwand herstellen, ändern oder auflösen.“ ³⁰²
Praxisanwendung	Sie bezeichnet die im realen Unternehmen vorgefundene Kombination oder Ausprägung unterschiedlicher Maßnahmen.
Primärrohstoff	„Rohstoff, der durch Entnahme aus der Natur gewonnen wird.“ ³⁰³
Produktlebenszyklus- Management (PLM)	„Konzept/Strategie zur Verwaltung produktbeschreibender Informationen über den Lebenszyklus eines Produktes. PLM geht dabei über die Verwaltung von Produktionsdaten hinaus und beschreibt einen umfassenderen Prozess, der nicht nur Entwicklung und Konstruktion, sondern auch Einkauf, Fertigung, Montage, Service und Marketing beinhaltet. Bei PLM wird das Bestreben nach einer digitalen Fertigung bzw. Fabrik im Zusammenhang mit dem Produktlebenszyklus betrachtet. Dabei spielt die Internettechnologie eine wesentliche Rolle als Kommunikationsplattform.“ ³⁰⁴
Produktsystem	„Gesamtheit der mit einem Produkt über seinen gesamten Lebensweg in Verbindung stehenden Prozesse sowie der zugehörigen stofflichen und energetischen Flüsse.“ ³⁰⁵
Prozess	Entspricht in diesem Sinne dem „Prozessmodul“ der DIN EN ISO 14040, welches den kleinsten zu berücksichtigten Bestandteil einer Ökobilanz darstellt und für das Input- und Output-Daten quantifiziert werden müssen.“ ³⁰⁶
Radio Frequency Identification (RFID)	Radio Frequency Identification Tags sind Identifikations- und Informationsträger für eine moderne automatische Datenerfassung über eine sicht- und kontaktlose Datenübertragung auf Basis elektronischer Wellen auch durch körperliche Hindernisse hindurch. Potenziale bieten sich in der Produktion, für die Materialverfolgung, zur Kommissionierung, in der Lagerhaltung, beim Transport, beim Wareneingang und -ausgang, zur Bestandskontrolle oder zur Regaloptimierung.“ ³⁰⁷
Referenzarchitektur	„Begriffs- und Methodenstruktur, die eine einheitliche Basis für die Beschreibung und Spezifikation von Systemarchitekturen bildet. Ziel von Referenzarchitekturen ist es einerseits, eine gemeinsame Struktur und Sprache für Architekturbeschreibungen zu schaffen. Andererseits geben sie eine Methode vor, zu einer konkreten Architekturbeschreibung zu gelangen.“ ³⁰⁸
Referenzzustand	Im Rahmen dieser Studie ist der Referenzzustand der untersuchten Fallstudien die konventionelle Produktion ohne die Umsetzung von Maßnahmen der digitalen Transformation.
Ressource	In dieser Studie als zusammenfassender Begriff aller Ressourcen oder im Kontext eines Kapitels als Kurzbezeichnung für die dort behandelten Ressourcen (natürliche, betriebliche) verwendet.

³⁰¹ VDI 4800 Blatt 1:2016-02, S. 7.

³⁰² Fraunhofer IOSB (2016b).

³⁰³ UBA (2012), S. 17.

³⁰⁴ Blien R. (2011).

³⁰⁵ UBA (2012), S. 19.

³⁰⁶ Vgl. DIN EN ISO 14040:2009-11, S. 10

³⁰⁷ Vgl. Syska, A. (2006).

³⁰⁸ Promotorengruppe Kommunikation (2013), S. 86.

Begriff	Definition
Ressource, natürliche	Ressource, die Bestandteil der Natur ist. Hierzu zählen erneuerbare und nicht erneuerbare Primärrohstoffe, physischer Raum (Fläche), Umweltmedien (Wasser, Boden, Luft), strömende Ressourcen (z. B. Erdwärme, Wind-, Gezeiten- und Sonnenenergie) sowie die Biodiversität. Es ist hierbei unwesentlich, ob die Ressourcen als Quellen für die Herstellung von Produkten oder als Senken zur Aufnahme von Emissionen (Wasser, Boden, Luft) dienen. ³⁰⁹
Ressource, betriebliche immaterielle	Sonstige betriebliche Ressourcen (d. h. ohne materielle Ressourcen), also z. B. Zeit oder Kosten.
Ressource, betriebliche materielle	Diejenigen betrieblichen Ressourcen, die unmittelbaren Einfluss auf den Verbrauch natürlicher Ressourcen haben. Dazu zählen Materialien (inkl. Rohstoffe und Wasser), Energie, Emissionen, Abfall und Fläche.
Ressource, betriebliche	Aus Sicht eines Unternehmens können als Ressourcen Betriebsstoffe, Werkstoffe, Kapital, Personal, Know-how und Zeit angesehen werden. Eine betriebliche Ressource kann materieller oder immaterieller Art sein.
Ressourceneffizienz	„Verhältnis eines bestimmten Nutzens oder Ergebnisses zum dafür nötigen Ressourceneinsatz.“ ³¹⁰
Ressourceneffizienzpotenzial (REP)	Das REP bezeichnet die mögliche Steigerung der Ressourceneffizienz durch die digitale Transformation für einen bestimmten Nutzen bzw. ein bestimmtes Ergebnis im Vergleich zu einem für diesen Nutzen bzw. das Ergebnis definierten Referenzzustand.
Ressourceneinsatz	„Verwendung von [natürlichen] Ressourcen in Prozessen.“ ³¹¹
Ressourcenverbrauch	„Form der Ressourcennutzung, bei der die natürlichen Ressourcen so umgewandelt werden, dass sie einer erneuten Nutzung nicht mehr zur Verfügung stehen (z. B. Verlust an Biodiversität, Bodenerosion, Verbrennung oder dissipative Verluste). In diesem Sinne wird auch der Begriff Energieverbrauch verwendet.“ ³¹²
Rohstoffe, kritisch	„Wirtschaftliche bedeutsame Rohstoffe, deren Versorgung als kritisch angesehen wird.“ ³¹³
Sekundärrohstoff	„Rohstoff, der aus Abfällen oder Produktionsrückständen gewonnen wird. Er kann Primärrohstoffe ersetzen.“ ³¹⁴
Sensor	„Technisches Bauteil, das bestimmte physikalische oder chemische Eigenschaften qualitativ oder als Messgröße quantitativ erfassen kann.“ ³¹⁵
Smart Factory	„Einzelnes oder Verbund von Unternehmen, das bzw. der IKT zur Produktentwicklung, Engineering des Produktionssystems, Produktion, Logistik und Koordination der Schnittstellen zu den Kunden nutzt, um flexibler auf Anfragen reagieren zu können. Die Smart Factory beherrscht Komplexität, ist weniger störanfällig und steigert die Effizienz in der Produktion. In der Smart Factory kommunizieren Menschen, Maschinen und Ressourcen selbstverständlich wie in einem sozialen Netzwerk.“ ³¹⁶

³⁰⁹ Vgl. UBA (2012).³¹⁰ VDI 4800 Blatt 1:2016-02, S. 9.³¹¹ UBA (2012), S. 24.³¹² UBA (2012), S. 26.³¹³ EU (2014).³¹⁴ UBA (2012), S. 33.³¹⁵ Promotorengruppe Kommunikation (2013), S. 86.³¹⁶ Promotorengruppe Kommunikation (2013), S. 87.

Begriff	Definition
Systemelemente	Systemelemente sind Komponenten (unterschieden nach Soft- und Hardware), welche zur Realisierung einer Maßnahme oder einer Praxisanwendung notwendig sind und die Einfluss auf den Ressourcenverbrauch haben. Diese Komponenten können als generische Komponenten von Maßnahmen, oder als konkrete Komponenten einer Praxisanwendung in einem realen Unternehmen beschrieben werden.
Systemgrenze	Satz von Kriterien zur Festlegung, welche Prozessmodule Teil eines Produktsystems sind. ³¹⁷
Systeminnovationen	„Systeminnovationen sind technologisch basierte Innovationen die sich in wirtschaftlich tragfähige und gesellschaftlich akzeptierte Produkte oder Dienstleistungen umsetzen lassen, wenn es gelingt, die notwendigen Komponenten und Kompetenzen in funktionierende Systemarchitekturen einzubinden. Sie überwinden organisatorische und fachliche Grenzen, sind geprägt durch ein funktionierendes Zusammenwirken unterschiedlicher Stakeholder entlang von Wertschöpfungsprozessen und ermöglichen Geschäftsmodelle, die erst durch die Akzeptanz der relevanten Akteure und Akteurinnen zum Erfolg geführt werden können.“ ³¹⁸
Systemlösung	„Dienstleistung, die (besonders im Bereich IT) die [kompletten] erforderlichen Systemkomponenten und deren Integration zur Lösung eines Problems oder Erfüllung eines Kundenwunsches umfasst.“ ³¹⁹
Systemrahmen	s. Systemgrenze
Verarbeitendes Gewerbe	Verarbeitendes Gewerbe „umfasst die mechanische, physikalische oder chemische Umwandlung von Stoffen oder Teilen in Waren. Es handelt sich dabei um Roh- oder Grundstoffe aus Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Fischerei und Fischzucht, Bergbau, Gewinnung von Steinen und Erden sowie um Erzeugnisse dieses Abschnitts selbst. Die wesentliche Änderung oder Neugestaltung von Waren wird generell als Herstellung von Waren angesehen und dem Verarbeitenden Gewerbe zugeordnet.“ ³²⁰
Vertikale Integration	Die vertikale Integration steht für die vollständige Vernetzung zwischen allen Unternehmensebenen. ³²¹ Sie besteht also in der Vernetzung von Produktionsmitteln, z. B. von Automatisierungsgeräten oder Diensten untereinander.
Wertschöpfungskette	„Modell der Wertschöpfung als sequenzielle, abgestufte Reihung von Tätigkeiten beziehungsweise Prozessen, von der Entwicklung über die Produktion bis hin zu Vermarktung und Dienstleistungen.“ ³²²
Wertschöpfungsnetzwerk	„Dezentrales polyzentrisches Netzwerk, das gekennzeichnet ist durch komplexe wechselseitige Beziehungen zwischen autonomen, rechtlich selbstständigen Akteuren. Es bildet eine Interessengemeinschaft von potenziellen Wertschöpfungspartnern, die bei Bedarf in gemeinsamen Prozessen interagieren. Die Entstehung von Wertschöpfungsnetzwerken ist auf nachhaltigen ökonomischen Mehrwert ausgerichtet. Besondere Ausprägungen von Wertschöpfungsnetzwerken werden als Business Webs bezeichnet.“ ³²³
Wertschöpfungsprozess	„Prozess, aus dem ein für Abnehmer wertvolles Gut entsteht.“ ³²⁴

³¹⁷ Vgl. DIN EN ISO 14040:2009-11, S. 12.

³¹⁸ Institut für Innovation und Technik (2016).

³¹⁹ Duden (2016).

³²⁰ Statistisches Bundesamt (2008), S. 186.

³²¹ Vgl. Malanowski, N. und Brandt, J. C. (2014), S. 6.

³²² Promotorengruppe Kommunikation (2013), S. 87.

³²³ Promotorengruppe Kommunikation (2013), S. 87.

³²⁴ Fraunhofer IOSB (2016a) [Stichwort: Wertschöpfungsprozess].

LITERATURVERZEICHNIS

Abele, L.; Ollinger, L.; Heck, I. und Kleinsteuber, M. (2012): A Decentralized Resource Monitoring System Using Structural, Context and Process Information. In: Trends in Intelligent Robotics, Automation and Manufacturing. Intelligent Robotics, Automation and Manufacturing (IRAM-2012), 28 - 30. November, Kuala Lumpur, Malaysia, Vol. 330. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, Communications in Compute, S. 371-378.

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und Arbeitskreis Smart Service Welt (2015): Smart Service Welt – Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Internetbasierte Dienste für die Wirtschaft- Abschlussbericht. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Berlin.

Anderl, R. (2015): Leitfaden Industrie 4.0. Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand, VDMA-Verlag, Frankfurt am Main.

Andrae, A. S. G. (2012): Comparative Micro Life Cycle Assessment of Physical and Virtual Desktops in a Cloud Computing Network with Consequential, Efficiency, and Rebound Considerations. Journal of Green engineering, Vol. 3, S. 193 – 218.

Andrae, A. S. G. und Andersen, O. (2010): Life cycle assessments of consumer electronics – are they consistent? [online]. International Journal of Life Cycle Assessment, 8. Jul. 2010 [abgerufen am: 4. Feb. 2017], verfügbar unter:
www.researchgate.net/publication/224777494_Life_cycle_assessments_of_consumer_electronics-are_they_consistent_Int_J_Life_Cycle_Assess

Apple (2009): iMac Environmental Report [online]. 3. März 2009. [abgerufen am: 4. Feb. 2017], verfügbar unter:
www.apple.com/environment/reports/docs/iMac-20-inch-Environmental-Report.pdf

Apple (2014): iPad Air 2 Environmental Report [online]. 16. Okt. 2014. [abgerufen am: 20. Feb. 2017], verfügbar unter:
images.apple.com/environment/pdf/products/archive/2014/iPadAir2_PER_oct2014.pdf

BDEW (2015): Entwicklung der Energieversorgung 2014 [online]. BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Berlin, 10. März 2015 [abgerufen am: 14. Feb. 2017], verfügbar unter: [www.bdew.de/internet.nsf/id/0CDCAA69F51E56CFC1257E0C0047C7E3/\\$file/Entwicklung_der_Energieversorgung_2014.pdf](http://www.bdew.de/internet.nsf/id/0CDCAA69F51E56CFC1257E0C0047C7E3/$file/Entwicklung_der_Energieversorgung_2014.pdf)

Behrendt, S. und Erdmann, L. (2010): Querschnittstechnologien - Innovationssprünge für Ressourceneffizienz - Eine Explorationsstudie. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung; VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Berlin.

Bischoff, J. (2015): Erschließen der Potenziale der Anwendung von ‚Industrie 4.0‘ im Mittelstand. agiplan GmbH; Fraunhofer IML; ZENIT GmbH, Mülheim an der Ruhr.

Blien R. (2011): Stichwort: Produktlebenszyklusmanagement. [online]. CAD-Glossar [abgerufen am 21. Juni 2016], verfügbar unter: www.blien.de/ralf/cad/db/plm.htm

BMBF (2013): Zukunftsbild Industrie 4.0. Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn, auch verfügbar als PDF unter: www.bmbf.de/pub/Zukunftsbild_Industrie_4.0.pdf

BMF (2000): AfA-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter („AV“). Bundesministerium der Finanzen, auch verfügbar als PDF unter: www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere_Steuertemen/Betriebspruefung/Afa-Tabellen/2000-12-15-afa-103.pdf?__blob=publicationFile&v=1

BMUB (2016a): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II - Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Berlin.

BMUB (2016b): Kurzinfo Ressourceneffizienz [online]. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) [abgerufen am: 3. Feb. 2017], verfügbar unter: www.bmub.bund.de/themen/wirtschaftsprodukte-ressourcen-tourismus/ressourceneffizienz/kurzinfo/

BMWi (2010): Energieeffizienz - Made in Germany - Energieeffizienz im Bereich Industrie, Gebäudeanwendungen und Verkehr. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Berlin.

BMWi (2015a): Industrie 4.0 -Volks- und betriebswirtschaftliche Faktoren für den Standort Deutschland - Eine Studie im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm AUTONOMIK für Industrie 4.0. 1. Auflage, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin.

BMWi (2015b): Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland - Abschlussbericht [online]. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [abgerufen am: 13. Feb. 2017], verfügbar unter: www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/entwicklung-des-ikt-bedingten-strombedarfs-in-deutschland-abschlussbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=3

BMWi (2015c): Industrie 4.0 und digitale Wirtschaft. [online] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin, [abgerufen am: 3. Feb. 2017], verfügbar unter: www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/industrie-4-0-und-digitale-wirtschaft.pdf?__blob=publicationFile&v=3

Bonvoisin, J.; Lelah, A.; Mathieux, F. und Brissaud, D. (2012): An environmental assessment method for wireless sensor networks. Int. J. of LCA. Volume 33, September 2012, S. 145 - 154.

Bonvoisin, J.; Lelah, A.; Mathieux, F. und Brissaud, D. (2014): An integrated method for environmental assessment and ecodesign of ICT-based optimization services. Int. J. of LCA, 68, Januar 2014, S. 144 - 154.

Bryzek, J. (2014): Trillion Sensors: Foundation for Abundance, Exponential Organizations, Internet of Everything and mHealth [online]. Sensor Magazin, Mai 2014, Band 5 [abgerufen am: 20. Feb. 2017], verfügbar unter: www.sensormagazin.de/dateien/smonline/redaktion/fachartikel/fachartike12_sm5_14.pdf

Bundesregierung (2016): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie- Neuauflage 2016. Eversfrank Berlin GmbH, Berlin.

Büscher, C. und Schippl, J. (2013): Die Transformation der Energieversorgung: Einheit und Differenz soziotechnischer Systeme. TATuP Nr. 2, 22. Jahrgang, Karlsruhe.

Cisco (2015): The Internet of Everything is the New Economy [online]. Cisco letztes Update, 29. Sep. 2015 [abgerufen am: 20. Feb. 2017], verfügbar unter: www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/enterprise/cisco-on-cisco/Cisco_IT_Trends_IoE_Is_the_New_Economy.html

Computer Sciences Corporation (2015): Digitale Agenda 2020. 1. Auflage, Computer Sciences Corporation (CSC).

Daiyue, H.; Chao, L. und Puel G. (2015): Spatial Environmental Balance to Information and Communication Technology products in different regions of China by using LCA [online]. Journal of Cleaner Production 91, S. 128 - 135.

Deutscher Bundestag (2011): Energieeffizienz bei Breitbandtechnologien [online]. Deutscher Bundestag, 26. Okt. 2011, Drucksache 17/7472 [abgerufen am: 3. Feb. 2017], verfügbar unter: dipbt.bundestag.de/dip21/btd/17/074/1707472.pdf

DIHK (2015): Wirtschaft 4.0: Große Chancen, viel zu tun- Das IHK-Unternehmensbarometer zur Digitalisierung. Deutscher Industrie- und Handelskammertag (DIHK), Berlin.

DIN (2015a): Industrie 4.0: ISO richtet Strategieguppe ein [online]. Deutsches Institut für Normung e. V (DIN), 14. Juli 2015 [abgerufen am: 27. April 2016], verfügbar unter: www.din.de/de/forschung-und-innovation/industrie4-0/industrie-4-0-iso-richtet-strategieguppe-ein-66482

DIN (2015b): Deutsche Normungs-Roadmap Industrie 4.0. Version 2, DIN Deutsches Institut für Normung e. V.; DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, Berlin.

DIN EN ISO 14040:2009-11: DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006). Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Dückert, E.; Schäfer, L.; Schneider, R. und Wahren, S. (2015): Analytische Untersuchung zur Ressourceneffizienz im verarbeitenden Gewerbe. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Berlin.

Duden (2016): Stichwort: Systemlösung [online]. Hrsg. Verlags Bibliographisches Institut GmbH [abgerufen am 21. Juni 2016], verfügbar unter: www.duden.de/rechtschreibung/Systemloesung

Duden Wirtschaft (2016): Duden Wirtschaft von A bis Z: Grundlagenwissen für Schule und Studium, Beruf und Alltag. 6. Aufl., Lizenzausgabe Bonn, Bundeszentrale für politische Bildung, Bibliographisches Institut Mannheim, 2016.

EBAM (2015): Ökodesign / Energielabel [online]. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (EBAM) [abgerufen am 7. April 2017], verfügbar unter: www.ebpg.bam.de/de/richtlinie/

Ecoinvent (2016a): Name des Datensatzes: single-Si wafer production, for electronics | single-Si wafer, for electronics | cut-off, U - RER.

Ecoinvent (2016b): Name des Datensatzes: operation, computer, desktop, with liquid crystal display, active mode | operation, computer, desktop, with liquid crystal display, active mode | APOS, U - Europe without Switzerland.

Ecoinvent (2016c): Name des Datensatzes: paper production, woodfree, coated, at integrated mill | paper, woodfree, coated | APOS, U - RER.

EIDodata GmbH i.G. (kein Datum): Die EIDodata-Software und welcher Nutzen daraus gezogen werden kann? [online]. EIDodata GmbH i.G [abgerufen am: 4. April 2017], www.eidodata.de/produkte

eLife (2017): Ständig unter Strom: So viel verbraucht das Internet [online]. eLife Vattenfall [abgerufen am: 4. Feb. 2017], verfügbar unter: elife.vattenfall.de/trend/energieverbrauch-internet/

Emec, S.; Stock, T.; Bilge, P.; Tufinkgi, P.; Kaden, C. und Seliger, G. (2013): Analyse von Potenzialen der Material- und Energieeffizienz in ausgewählten Branchen der Metallverarbeitenden Industrie. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Berlin.

EU (2003): Empfehlung der Kommission vom 6. Mai 2003 betreffend die Definition der Kleinstunternehmen sowie der kleinen und mittleren Unternehmen (2003/361/EG (2003)). Europäische Kommission, 20. Mai 2003.

EU (2005): Thematische Strategie für eine nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen. Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Brüssel.

EU (2008): METADTATA Statistische Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft. Rev. 2., Hrsg. European Commission [abgerufen am 23.Juli 2016], verfügbar unter: ec.europa.eu/eurostat/ramon/nomenclatures/index.cfm?TargetUrl=LST_NO M_DTL&StrNom=NACE_REV2&StrLanguageCode=DE

EU (2009): Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte), Amtsblatt der Europäischen Union.

EU (2014): Große Herausforderung für die Industrie der EU: 20 kritische Rohstoffe (Pressemitteilung) [online]. [abgerufen am: 29. Mrz. 2017], verfügbar unter: europa.eu/rapid/press-release_IP-14-599_de.htm

EU (2015a): Preparatory study for implementing measures of the Ecodesign Directive 2009/125/EC - DG ENTR Lot 9 - Enterprise servers and data equipment. Task 5: Environment & Economics. Final Report, Jul. 2015 [online]. Bio by Deloitte, Fraunhofer IZM; Europäische Kommission.

EU (2015b): Preparatory study for implementing measures of the Ecodesign Directive 2009/125/EC - DG ENTR Lot 9 - Enterprise servers and data equipment. Task 3: User. Final Report, Jul. 2015 [online]. Bio by Deloitte; Fraunhofer IZM; Europäische Kommission.

Fichter, K. (2007): Zukunftsmarkt Energieeffiziente Rechenzentren. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

FISSAC (kein Datum): Was ist industrielle Symbiose? [online]. Fostering Industrial Symbiosis for a Sustainable Resource Intensive Industry across the extended Construction Value Chain (FISSAC) [abgerufen am: 7. April 2017], verfügbar unter: fissacproject.eu/de/was-ist-industrielle-symbiose/

Forschungskuratorium Maschinenbau (2016): Effizienzfabrik. Innovationsplattform für die Produktion [online]. Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. im VDMA [abgerufen am: 15. Juni 2016], verfügbar unter: www.effizienzfabrik.de/de/

Fraunhofer IOSB (2016a): FA7.21 Begriffe - Allgemein [online]. Hrsg. Fraunhofer IOSB [abgerufen am 21. Juni 2016], verfügbar unter: i40.iosb.fraunhofer.de/FA7.21%20Begriffe%20-%20Allgemein

Fraunhofer IOSB (2016b): FA7.21 Begriffe - Industrie 4.0 [online]. Hrsg. Fraunhofer IOSB [abgerufen am 21. Juni 2016], verfügbar unter: i40.iosb.fraunhofer.de/FA7.21%20Begriffe%20-%20Industrie%204.0

Fraunhofer IOSB (2016c): FA7.21 Begriffe - IKT [online]. Hrsg. Fraunhofer IOSB [abgerufen am 21. Juni 2016], verfügbar unter: i40.iosb.fraunhofer.de/FA7.21%20Begriffe%20-%20IKT

Fraunhofer IPA (2016): Forschungsprojekt - Die Ultraeffizienzfabrik im urbanen Umfeld [online]. Fraunhofer IPA [abgerufen am: 10. Juni 2016], verfügbar unter: www.ipa.fraunhofer.de/ultraeffizienzfabrik0.html

Fraunhofer IPA und Dr. Wieselhuber & Partner GmbH (2015): Geschäftsmodell-Innovation durch Industrie 4.0 - Chancen und Risiken für den Maschinen- und Anlagenbau. Dr. Wieselhuber & Partner GmbH, München.

Fraunhofer-Gesellschaft (2014): Leitprojekt E³-Produktion - Projektbroschüre. Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., München.

Gabler Wirtschaftslexikon (2017): Stichwort: Künstliche Intelligenz (KI) [online]. In: Gabler Wirtschaftslexikon, Springer Gabler Verlag [abgerufen am: 4. April 2017], verfügbar unter: wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/74650/kuenstliche-intelligenz-ki-v12.html

GE (2014): Industrial Internet Insights report for 2015 [online]. General Electric Company [abgerufen am: 20. Feb. 2017], verfügbar unter: www.ge.com/digital/sites/default/files/industrial-internet-insights-report.pdf

GHGP (2013): GHG Protocol Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard ICT Sector Guidance, Chapter 7, Software, Draft v2.9 [online]. Green House Gas Protocol (GHGP), [abgerufen am: 22. Feb. 2017], verfügbar unter: www.ghgprotocol.org/files/ghgp/GHGP-ICT-Software-v2-9-26JAN2013.pdf

Google (2009): Powering a Google search [online]. Google, 11. Jan. 2010 [abgerufen am 2. März 2017], verfügbar unter: googl-blog.blogspot.de/2009/01/powering-google-search.html

Handelsblatt (2016): Digitale Produktion: Papier war gestern [online]. Handelsblatt GmbH, 15. Dez. 2016 [abgerufen am: 7 März 2017], verfügbar unter: unternehmen.handelsblatt.com/digitale-produktion.html

Hellge, V. (2017): Readiness Check Digitalisierung - Ergebnisse der Online-Selbstbewertung Januar 2017 [online]. Kaiserslautern [abgerufen am: 14 März 2017], kompetenzzentrum-kaiserslautern.digital/wordpress/wp-content/uploads/2017/03/Kurzbericht_Ergebnisse_Readiness_Check_Januar2017.pdf

Hering, E. und Schönfelder G. (2012): Sensoren in Wissenschaft und Technik. Funktionsweise und Einsatzgebiete. Hering, E. und Schönfelder G., Vieweg und Teubner, Wiesbaden, 2012.

Hilty, L. M.; Lohmann, W; Behrendt, S; Evers-Wölk, M.; Fichter, K. und Hintemann, R. (2015): Grüne Software. Schlussbericht zum Vorhaben: Ermittlung und Erschließung von Umweltschutzpotenzialen der Informations- und Kommunikationstechnik (Green IT). Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin.

Hirschnitz-Garbers, M.; Srebotnjak, T.; Gradmann, A.; Lutter, S. und Giljum, S. (2014): Further Development of Material and Raw Material Input Indicators – Methodological Discussion and Approaches for Consistent Data Sets. Input paper for expert workshop. 26. May 2014.

Hischier, R.; Achachlouei, A. M. und Hilty, L. M. (2014): Evaluating the sustainability of electronic media: Strategies for life cycle inventory data collection and their implications for LCA results. Environmental Modelling & Software, Vol. 56, S. 27 – 36.

HMWVL (2011): Praxisleitfaden Energieeffizienz in der Produktion. 2. Auflage, HA Hessen Agentur GmbH, Wiesbaden.

HPE (2017): HPE ProLiant MicroServer Gen8 [online]. Hewlett-Packard GmbH [abgerufen am: 5. Jan. 2017], verfügbar unter: www.hpe.com/de/de/product-catalog/servers/proliant-servers/pip.hpe-proliant-microserver-gen8.5379860.html

IHK NRW (2015): Digitale Transformation und Industrie 4.0 - Unternehmen und Forschungseinrichtungen aus NRW zeigen Best Practice. IHK Innovationsberater, die Industrie- und Handelskammern in Nordrhein-Westfalen e.V. (IHK), Düsseldorf.

IHK Nürnberg für Mittelfranken (2012): Druckluft effizient nutzen. Praxisleitfaden für Energieeffizienz und Kosteneinsparung der Industrie- und Handelskammer Nürnberg für Mittelfranken [online]. Industrie- und Handelskammer Nürnberg für Mittelfranken [abgerufen am: 6. März 2017], verfügbar unter: www.ihk-nuernberg.de/de/media/PDF/Innovation-Umwelt/Energie/leitfaden-druckluft-effizient-nutzen.pdf

Institut für Innovation und Technik (2016): Systeminnovationen [online]. Hrsg. Institut für Innovation und Technik (iit) [abgerufen am 21. Juni 2016], verfügbar unter: www.iit-berlin.de/de/themenfelder/systeminnovationen

ITWissen (2016): Stichwort: Echtzeit [online]. Hrsg. ITWissen [abgerufen am 21. Juni 2016], verfügbar unter: www.itwissen.info/definition/lexikon/Echtzeit-RT-realtime.html

Knüpfner, G. (2016): Wie man mit dem digitalen Schatten die Produktion vorhersehen kann [online]. Produktion, 10. März 2016 [abgerufen am: 28. April 2017], verfügbar unter: www.produktion.de/nachrichten/unternehmen-maerkte/wie-man-mit-dem-digitalen-schatten-die-produktion-vorhersehen-kann-117.html

KrWG (2012): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG).

LaCie (2017): LaCie 8big Rack Thunderbolt™ 2 [online]. Seagate Technology GmbH [abgerufen am: 6. März 2017], verfügbar unter: www.lacie.com/de/de/professional/rackmount/8big-rack-thunderbolt-2/

Lichtblau, K.; Stich, V.; Bertenrath, R.; Blum, M.; Bleider, M.; Millack, A.; Schmitt, K.; Schmitz, E. und Schröter, M. (2015): Industrie 4.0-Readiness. IMPULS-Stiftung für den Maschinenbau, den Anlagenbau und die Informationstechnik, Frankfurt.

Loskyll, M.; Heck, I.; Schlick, J. und Schwarz, M. (2012): Context-based Orchestration for Control of Resource-efficient Manufacturing Processes. Future Internet, MDPI, Vol. 4, Nr. 3, S. 737 - 761.

Lucke, D.; Görzig, D; Kacir, M.; Volkmann, J.; Haist, C.; Sachsenmaier, M. und Rentschler, H. (2014): Strukturstudie „Industrie 4.0 für Baden-Württemberg“ - Baden-Württemberg auf dem Weg zu Industrie 4.0. Stuttgart.

Malanowski, N. und Brandt, J. C. (2014): Innovations- und Effizienzsprünge in der chemischen Industrie? Wirkungen und Herausforderungen von Industrie 4.0 und Co. Druckerei Bonifatius, Paderborn.

Marscheider-Weidemann, F.; Langkau, S.; Hummen, T.; Erdmann, L.; Espinoza, L. T.; Angerer, G.; Marwede, M. und Benecke S. (2016): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016. Auftragsstudie. 28 DERA Rohstoffinformationen. Deutsche Rohstoffagentur (DERA), Berlin.

Matsuno, Y.; Takahashi, K.I. und Tsuda, M. (2007): Eco-Efficiency for Information and Communications Technology (ICT): The State of Knowledge in Japan [online]. In: Proceedings of the 2007 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, [abgerufen am: 04. Feb. 2017], verfügbar unter: ieeexplore.ieee.org/document/4222845/

McKinsey Digital (2015): Industry 4.0 - How to navigate digitization of the manufacturing sector. McKinsey & Company, München.

Merkel, W. (2010): Systemtransformation - Eine Einführung in die Theorie und Empirie der Transformationsforschung, 2., überarbeitete und erweiterte Auflage, VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden.

Meyer, L. und Reker, J. (2016): Industrie 4.0 im Mittelstand. Deloitte, auch verfügbar als PDF unter: www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/Mittelstand/industrie-4-0-mittelstand-komplett-safe.pdf

Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Kaiserslautern (kein Datum): Readiness Check – Möchten Sie wissen, wie weit Ihr Unternehmen digitalisiert ist? [online] Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Kaiserslautern [abgerufen am 20. April 2017], verfügbar unter: komzkl.de/wordpress/readiness-check/

Neligan, A. und Schmitz, E. (2017): Digitale Strategien für mehr Materialeffizienz in der Industrie - Ergebnisse aus dem IW-Zukunftspanel. Institut der deutschen Wirtschaft Köln, IW-Report 3/2017, Köln.

Plass, C. (2015): Industrie 4.0 als Chance begreifen. Unity AG, Berlin.

Plattform Industrie 4.0 (2013): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 - Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern - Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Frankfurt am Main.

Plattform Industrie 4.0 (2015): Umsetzungsstrategie Industrie 4.0 - Ergebnisbericht. Bitkom; VDMA; ZVEI, Berlin.

Plattform Industrie 4.0 (2016): Deutsche Industrie startet Normungsinitiative für Industrie 4.0 [online]. BMWi, 21.April 2016 [abgerufen am: 27. April 2016], verfügbar unter: www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2016/2016-04-21-deutsche-industrie-startet-normungsinitiative-fuer-i40.html

Plattform Industrie 4.0 (2017): Normen & Standards - Eine gemeinsame Sprache für Industrie 4.0-Technologien [online]. BMWi und BMBF [abgerufen am: 18. Jan. 2017], verfügbar unter: www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/DE/Standardartikel/handlungsfelder-normen-standards.html

Promotorengruppe Kommunikation (2013): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie. Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion Wirtschaft - Wissenschaft, Frankfurt.

Reuter, M. A. (2016): Digitalizing the Circular Economy - Circular Economy Engineering defined by the metallurgical Internet of Things - 2016 TMS EPD Distinguished Lecture Award. TU Bergakademie Freiberg, Freiberg.

RNE (2016): Industrie 4.0 und Nachhaltigkeit: Chancen und Risiken für die Nachhaltige Entwicklung. Rat für nachhaltige Entwicklung.

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

Roland Berger Strategy Consultants (2014): Industry 4.0 - The new industrial revolution - How Europe will succeed. München.

Roland Berger Strategy Consultants (2015): Die digitale Transformation der Industrie. Was sie bedeutet. Wer gewinnt. Was jetzt zu tun ist. 1. Auflage, Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI), auch verfügbar als PDF unter: bdi.eu/media/presse/publikationen/information-und-telekommunikation/Digitale_Transformation.pdf

Roth, A. (2016): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0 - Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.

Schebek, L.; Abele, E.; Campitelli, A.; Becker, B. und Joshi, M. (2016): Praxisleitfaden: Ressourceneffizienz in der Produktion - Zerspanungsprozesse. 1. Auflage, Hessen Trade & Invest. GmbH, Wiesbaden, Band 17 der Schriftenreihe der Technologielinie Hessen-Umwelttech.

Schmitt, R.; Brecher, C.; Nau-Hermes, M. und Berners, T. (2015): Material- und Energieeffizienzpotenziale durch den Einsatz von Fertigungsdatenerfassung und -verarbeitung. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Berlin.

Schröter, M.; Lerch, C. und Jäger, A. (2011): Materialeffizienz in der Produktion: Einsparpotenziale und Verbreitung von Konzepten zur Materialeinsparung im Verarbeitenden Gewerbe. 1. Auflage, Fraunhofer ISI, Karlsruhe

Schröter, M.; Weißfloch, U. und Buschak, D. (2009): Energieeffizienz in der Produktion - Wunsch oder Wirklichkeit? Energieeinsparpotenziale und Verbreitungsgrad energieeffizienter Techniken. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe, Modernisierung der Produktion; Mitteilungen aus der ISI-Erhebung.

Schuh, G.; Anderl, R.; Gausemeier, J.; ten Hompel, M. und Wahlster, W. (2017): Industrie 4.0 - Maturity Index. Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten, auch verfügbar als PDF unter: www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Publikationen/Projektberichte/acatech_STUDIE_Maturity_Index_WEB.pdf

Siemens Aktiengesellschaft (2015): Digitalisierung im Maschinenbau - Der digitale Zwilling [online]. Siemens AG [abgerufen am: 4. April 2017], verfügbar unter: www.siemens.com/customer-magazine/de/home/industrie/digitalisierung-im-maschinenbau/der-digitale-zwilling.html

Söllner, R. (2014): Die wirtschaftliche Bedeutung kleiner und mittlerer Unternehmen in Deutschland. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Jan. 2014, auch verfügbar als PDF unter: www.destatis.de/DE/Publikationen/WirtschaftStatistik/UnternehmenGewerbeanzeigen/BedeutungKleinerMittlererUnternehmen_12014.pdf?__blob=publicationFile

Statistisches Bundesamt (2008): Klassifikation der Wirtschaftszweige mit Erläuterungen. Statistisches Bundesamt (Destatis), Wiesbaden.

Statistisches Bundesamt (2015a): Umwelt - Abfallentsorgung 2013. korrigierte Version des 10. August 2015, Statistisches Bundesamt (Destatis), Wiesbaden, Fachserie 19 Reihe 1.

Statistisches Bundesamt (2015b): Umweltnutzung und Wirtschaft - Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen 2015 - Teil 2: Energie. Version des 8. Dez. 2015, Statistisches Bundesamt (Destatis), Wiesbaden.

Statistisches Bundesamt (2015c): Umweltnutzung und Wirtschaft - Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen 2015 - Teil 3: Anthropogene Luftemissionen. Version des 8. Dez. 2015, Statistisches Bundesamt (Destatis), Wiesbaden.

Statistisches Bundesamt (2016a): Produzierendes Gewerbe. Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden 2014. Version des 03. Jun. 2016, Statistisches Bundesamt (Destatis), Wiesbaden, Fachserie 4 Reihe 4.3.

Statistisches Bundesamt (2016b): Umweltnutzung und Wirtschaft - Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen - Teil 2: Vorbericht Energie. Berichtszeitraum 1995 - 2014. Version des 14. April 2016, Statistisches Bundesamt (Destatis), Wiesbaden.

Statistisches Bundesamt (2016c): Betriebe, Tätige Personen und Umsatz des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden nach Beschäftigtengrößenklassen 2015. Version des 1. Juni 2016, Statistisches Bundesamt (Destatis), Wiesbaden, Fachserie 4 Reihe 4.1.2

Statistisches Bundesamt (2016d): Umweltnutzung und Wirtschaft - Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen 2015 - Teil 4: Rohstoffe, Wassereinsatz, Abwasser, Abfall. korrigierte Version des 8. März 2016, Statistisches Bundesamt (Destatis), Wiesbaden.

Synology (2017): RackStation RS815+/RS815RP+ [online]. Synology [abgerufen am: 05. Jan. 2017], verfügbar unter: www.synology.com/de-de/products/RS815+#spec

Syska, A. (2006): Produktionsmanagement. Das A - Z wichtiger Methoden und Konzepte für die Produktion von heute. 1. Auflage, Gabler, Wiesbaden.

Tränkler, H.-R. und Reindl L. M. (2014): Sensortechnik - Handbuch für Praxis und Wissenschaft. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.

UBA (2012): Glossar zum Ressourcenschutz [online]. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau [abgerufen am 2. Dez. 2016], verfügbar unter: www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4242.pdf

UBA (2014): Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Richtlinie/Ökodesign-Richtlinie (2009/125/EG), Energieverbrauchskennzeichnungs-Richtlinie (2010/30/EG), Übersicht über den Stand der Prozesse zur Verabschiedung von Durchführungsmaßnahmen. Umweltbundesamt, 18. Dez. 2014.

UBA (2015): Rohstoffnutzung und ihre Folgen [online]. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau, [abgerufen am 30. März 2017] verfügbar unter: www.umweltbundesamt.de/daten/rohstoffe-als-ressource/rohstoffnutzung-ihre-folgen

UBA (2016): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2015. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Climate Change 26/2016, auch verfügbar als PDF unter: www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_26_2016_entwicklung_der_spezifischen_kohlendioxid-emissionen_des_deutschen_strommix.pdf

UBA (2017): Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in der Zeitreihe 2005 - 2014 - Endbericht. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Climate Change 01/2017, auch verfügbar als PDF unter: www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/2017-01-09_cc_01-2017_endbericht-datenbasis-energieeffizienz.pdf

UTBW (2016): Baden-Württemberg sucht: 100 Betriebe für Ressourceneffizienz [online]. Umwelttechnik und Ressourceneffizienz Baden-Württemberg GmbH [abgerufen am: 10. Juni 2016], verfügbar unter: pure-bw.de/de/100betriebe/overview

VDI 4499 Blatt 1:2008-02: Verein Deutscher Ingenieure e. V., Digitale Fabrik - Grundlagen. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 4600: 2012-01: Verein Deutscher Ingenieure e. V., Kumulierter Energieaufwand (KEA) - Begriffe, Berechnungsmethoden. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 4800 Blatt 1: 2016-02: Verein Deutscher Ingenieure e. V., Ressourceneffizienz - Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 4800 Blatt 2: 2016-03: Verein Deutscher Ingenieure e. V., Ressourceneffizienz - Bewertung des Rohstoffaufwands [Entwurf]. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI ZRE (2014a): Perfekter Stoffkreislauf für Aluminium [online]. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Berlin [abgerufen am: 4. April 2017], verfügbar unter:
www.ressource-deutschland.tv/themen/metallverarbeitung/perfekter-stoffkreislauf-fuer-aluminium/

VDI ZRE (2014b): Wettbewerbsvorteil Ressourceneffizienz - Definitionen, Grundlagen, Fakten und Beispiele. 2. Auflage, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Berlin.

VDI ZRE (2014c): Schnell, genau und effizient mit Datenmonitoring - Ressourceneffizienz [online]. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Berlin [abgerufen am: 4. April 2017], verfügbar unter:
www.youtube.com/watch?v=sNPdkFR1HT4&index=17&list=PLVS82M2ywu_rdlbzKZkhmGDvezoW4Qf1vB

VDI/VDE-Gesellschaft und ZVEI (2015): Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0)- Statusreport. Verein Deutscher Ingenieure e.V.; VDI/VDE-Gesellschaft; ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e.V., Düsseldorf.

Virtuelle Software-Engineering-Kompetenzzentrum (2016): Begriffsdefinition: Echtzeitfähigkeit, Rechtzeitigkeit, Gleichzeitigkeit, Jitter, Determinismus [online]. Hrsg. Virtuelle Software-Engineering-Kompetenzzentrum (VSEK) [abgerufen am 21. Juni 2016], verfügbar unter: www.software-kompetenz.de/servlet/is/28612/?print=true

WGP (2016): WGP-Standpunkt Industrie 4.0 [online]. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e. V. (WGP), Juni 2016 [abgerufen am: 4. Juli 2016], verfügbar unter: www.wgp.de/uploads/media/WGP-Standpunkt_Industrie_4-0.pdf

Wittbrodt, B. T.; Glover, A. G.; Laureto, J.; Anzalone, G. C.; Oppliger, D.; Irwin, J.L. und Pearce, J.M. (2013): Life-cycle economic analysis of distributed manufacturing with open-source 3-D printers [online]. *Mechatronics*, Sep. 2013, Volume 23, Issue 6, S. 713 - 726.

Yin, R. (2014): Case Study Research - Design and Methods. 5. Auflage, SAGE Publications, Inc., Los Angeles, ISBN 978-1-4522-425.

Zarnekow, R. und Kolbe L. M. (2013): Green IT: Erkenntnisse und Best Practices aus Fallstudien. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.

Zettl, E.; Hawthorne, C.; Joas, R.; Lahl, U.; Litz, B.; Zeschmar-Lahl, B. und Joas A. (2014): Analyse von Ressourceneffizienzpotenzialen in KMU der chemischen Industrie. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Berlin.

ANHANG 1: FALLSTUDIENPORTRÄTS

A1: Fallstudienporträt C&C Bark Metalldruckguss und Formenbau GmbH



Unternehmen

Bereits in der dritten Generation konzentriert sich die Firma C&C Bark Metalldruckguss und Formenbau GmbH mit ihren 70 Mitarbeitern in Schömberg bei Rottweil auf die Herstellung von Magnesiumdruckgussteilen für verschiedenste Anwendungen. Dabei bietet das Unternehmen die gesamte Prozesskette, von der Unterstützung in der Entwicklungs- und Konstruktionsphase über das Gießen, die Oberflächenbehandlung bis hin zur spanenden Bearbeitung an. Je nach Anforderung kann zwischen Warm- und Kaltammerdruckguss gewählt werden. Zudem ergänzen gussnahe Prozesse wie Stanzen, Fräsen, Schnittentgraten, Gleitschleifen und Handentgraten das Angebot. CNC-Bearbeitungsschritte wie das Fräsen von Gewinden, die Bearbeitung von Passungen oder das Bedrucken einzelner Teile (z. B. durch Tampondruck) werden ebenfalls durchgeführt.

Zu den Kunden des Unternehmens gehören unter anderem Motorrad- und Elektrowerkzeughersteller (z. B. Bohrhammer-Gehäuse) sowie die Optikbranche. Damit konnte ein Umsatz von 7,5 Mio. Euro im Jahr 2015 erzielt werden. Für die Gießerei C&C Bark ist es gerade aufgrund der Zugehörigkeit zu einer emissionsstarken Branche wichtig, sich im Rahmen ihrer Möglichkeiten mit Nachhaltigkeits- und Umweltthemen zu beschäftigen und mit gutem Vorbild voranzugehen.

Ressourceneffizienz

Neben der Steigerung der Effektivität in allen Bereichen spielt auch das Thema Ressourceneffizienz bei C&C Bark eine wichtige Rolle. Zum einen stellt das Thema Materialeffizienz in der Magnesiumgießerei einen wichti-

gen Einsparhebel dar und zum anderen ist die Reduktion der Energieverbräuche vor allem der Schmelzöfen ein wichtiges Thema.

So konnte durch die Einführung eines ERP-Systems über alle Produktionsprozesse bis hin zum Vertrieb der Materialumlauf reduziert werden. Dies spart Lagerbestände. Ebenso kann bei kurzfristigen Änderungen am Produkt schneller eingegriffen werden, da nun jede Charge einfacher geortet werden kann. Das hat wiederum positive Auswirkungen auf die Reduktion von Ausschuss und Nacharbeit. Indirekt kann dadurch der Materialeinsatz von Magnesium effektiver gestaltet werden.

Auch in Richtung technologischer Neuerungen hat sich C&C Bark bezüglich Materialeinsparungen Gedanken gemacht. Dementsprechend wird ein innovatives Verfahren für den Warmkammerdruckguss angewendet, welches einen kleineren Angusszapfen gewährleistet und dadurch Materialeinsparungen ermöglicht. Durch das in Zusammenarbeit mit der Oskar Frech GmbH + Co. KG entwickelte FGS-(Frech-Gating-System)Verfahren können 45 - 80 % des üblichen Kreislaufmaterials vermieden werden. Je nach Artikel spart C&C Bark als Mitentwickler des FGS etwa 50 g Magnesium pro gegossenem Teil. Der geringere Materialeinsatz führt zudem zu einer Energieeinsparung, da pro Teil weniger Material eingeschmolzen werden muss. Aufgrund von Verunreinigungen durch Oxide oder Trennmittelreste ist es nicht möglich, den Angusszapfen in der Gießerei selbst wieder einzuschmelzen. Folglich wird das Angussmaterial und jeglicher Ausschuss extern recycelt und eingeschmolzen, was wiederum mit zusätzlichen Kosten und Energieverbrauch verbunden ist. Das FGS-Verfahren ist somit umweltfreundlicher als herkömmliche Warmkammergießprozesse und führt auch zu Kosteneinsparungen.

In Bezug auf Energie wurde bei C&C Bark ein Spitzenlastmanagementsystem eingeführt. Dadurch wird die Tiegeltemperatur in den Öfen mithilfe von Sensoren abgefragt. Das System weiß dann genau, welche Öfen ihre optimale Temperatur erreicht haben und welche nicht. So kann es entscheiden, welche Öfen noch aufgeheizt werden müssen. Hierfür wurde ein Algorithmus entwickelt, der verhindert, dass alle Öfen gleichzeitig aufgeheizt werden. Dies führt wiederum dazu, dass eine gewisse Lastspitze, die

die Preisgrundlage für ein ganzes Betriebsjahr bestimmt, nicht überschritten wird.

Auch einfache organisatorische Maßnahmen, wie eine ressourceneffizientere Pausenregelung, haben bei C&C Bark bereits zu einem ressourcenschonenden Wirtschaften beigetragen. Dadurch, dass die Mitarbeiter im Wechsel Pause machen, müssen die Maschinen nicht heruntergefahren werden. Das erneute Hochfahren der Maschinen fällt weg, wodurch weniger Energie verbraucht wird und auch ein geringerer Ausschuss anfällt, da weniger Anfahrteile produziert werden.

Natürlich sind die treibenden Faktoren, derartige Umrüstungen umzusetzen, vornehmlich von dem Effizienzgedanken getrieben. Dennoch ist es für das Unternehmen auch aus Gründen der äußeren Wahrnehmung wichtig, von den Vorurteilen über Gießereien wie „dreckig, gefährlich und emissionsstark“ weg zu kommen. Potenzielle Wettbewerbsvorteile durch den effizienteren Einsatz von Ressourcen fließen gleichfalls in die Überlegungen mit ein.

Digitale Transformation

Neben dem Engagement im Ressourcenschutz hat C&C Bark 2015 ein durchgängiges ERP-System integriert. Von der Kundenauftragserfassung im Vertrieb über die Produktionsplanung und -steuerung (PPS), die Buchung von Lagerorten bis hin zum Einkauf werden Daten in allen Bereichen erfasst und miteinander verknüpft. Zudem ist das ERP-System auch über die Finanzbuchhaltung verbunden, was ein effizientes Arbeiten begünstigt.

Alle wichtigen Maschinen- und Prozessdaten werden ebenfalls automatisch über WLAN erfasst. Auf Werkstattmonitoren können diese jederzeit aufgerufen und so Rückschlüsse auf die Produktion gezogen werden. Informationen über Maschinenlaufzeit, Maschinenunterbrechungen und Störgründe können genauso ausgewertet werden wie die Nacharbeitsquote. Für die Datenerfassung wurden ältere Maschinen (teilweise mehr als 30 Jahre alt) umgerüstet, also mit Impuls-Schnittstellen und Sensoren an den Türen ausgestattet. Das Kapazitätsplanungsmodul des ERP-Systems schlägt automatisch Produktionspläne, z. B. zur besseren Maschinenauslastung und

einem geeigneteren Ressourceneinsatz, vor, eine Selbstoptimierung der Maschinen ist jedoch noch nicht möglich. Obwohl Kunden keine konkreten Anforderungen an C&C Bark in Bezug auf die Digitalisierung gestellt haben, ist hingegen die Transparenz der Kundenteile essentiell. Durch das ERP-System kann jederzeit angezeigt werden, wo sich wie viele Teile einer Charge aufhalten, auch wenn sie sich extern beim Beschichten oder bereits im Konsignationslager befinden. Diese Rückverfolgbarkeit bringt auch eine gewisse Sicherheit mit sich, u. a. wenn fehlerhafte Teile identifiziert werden müssen oder bei Rückrufaktionen. So sieht C&C Bark in Zukunft die Potenziale der digitalen Transformation darin, durch mehr Transparenz schneller, flexibler und effizienter zu produzieren.

Der Einsatz von Simulationswerkzeugen würde sich laut C&C Bark im Rahmen ihrer Tätigkeit nicht lohnen, da jeder Guss physikalisch bedingt unterschiedlich abläuft und während des äußerst kurzen Prozesses nicht eingegriffen werden kann. Jedoch kann sich das Unternehmen vorstellen, in geraumer Zukunft - im Kontext der digitalen Transformation - neue Fertigungsverfahren wie z. B. das 3D-Druckverfahren anzuwenden. Vernetzte Sensoren und Aktoren kommen bei dem Mittelständler ebenfalls bereits zum Einsatz. Ein lineares Greifsystem nimmt z. B. ein Teil in der Maschine ab und hält es vor eine Kamera. Wird dieses als fehlerhaft über den optischen Sensor erkannt, gibt dieser den Aktorbefehl „Stopp“. Damit wird gewährleistet, dass das Teil nicht weiterbearbeitet wird. Dadurch werden u. a. auch Energie und Material eingespart.

Ziel der Implementierung des ERP-Systems waren in erster Linie die Reduktion der Durchlaufzeiten und eine Steigerung der Produktivität. Vor der Einführung des Systems konnte nicht immer eindeutig nachvollzogen werden, wo sich bestimmte Teile genau befinden und Über- oder Unterproduktion kamen häufiger vor. Bei der korrekten Erfassung der Teile und der Abbildung des Prozesses mittels ERP-System besteht eine Herausforderung in der Produktion von Familienformen. Aus einem Rohteil werden z. B. vier Fertigteile, d. h., ein Auftrag entspricht den vier Fertigteilen. Hierfür entwickelt C&C Bark gerade eine sinnvolle Lösung. Neben der Effektivitätssteigerung können die über das ERP-System generierten Daten auch für das Mitarbeiterbewertungssystem verwendet werden. So können feinere leis-

tungsorientierte Kennzahlen abgebildet und Personalressourcen optimal eingesetzt werden.

Wechselwirkungen zwischen digitaler Transformation und Ressourceneffizienz

Die Wechselwirkung zwischen digitaler Transformationen und Ressourceneffizienz findet sich bei C&C Bark im Bereich des Energiemanagements wieder. Der positive Zusammenhang zeigt sich anhand des Spitzenlastmanagements, wo durch die automatische Abfrage der Ofentemperatur ein hoher Energieverbrauch verhindert wird. Auch die durchgängige Datenintegration über das ERP-System trägt dazu bei, dass die Materialbestände reduziert werden können. Die Transparenz des ERP-Systems führt durch die schnelle Eingriffsmöglichkeit zu weniger Ausschuss, weniger Lagerbeständen und zu einem geringeren Risiko der Überproduktion. Indirekt kann so Material, in diesem Fall Magnesium, eingespart werden.

Eine hochspezialisierte Digitalisierung ist laut C&C Bark jedoch in großen Gießereien aufgrund der zur Verfügung stehenden Kapazitäten und Mittel einfacher umzusetzen.

Das mittelständische Unternehmen C&C Bark ist ein Beispiel dafür, dass auch kleine Schritte in Richtung Digitalisierung eine große Wirkung hinsichtlich der Produktions- und Ressourceneffizienz erzielen können.

A2: Fallstudienporträt Mader GmbH & Co. KG



Unternehmen

Der mittelständische Experte für Druckluft aus Baden-Württemberg, die Mader GmbH & Co. KG, bietet aufgrund seiner jahrzehntelangen Erfahrung – sowohl in der Druckluftversorgung als auch in der Steuerung und Anwendung von Druckluft – Dienstleistungen und Produkte für den kompletten Druckluftprozess an: von der Druckluftherzeugung bis hin zur Pneumatik. Herzstück des Produkt- und Dienstleistungsportfolios sind energetisch optimierte Druckluft- und Pneumatikanlagen, sowie eine Druckluftleckage-App. Das Unternehmen mit Sitz in Leinfelden-Echterdingen wurde im Rahmen des Deutschen Nachhaltigkeitspreises 2015 unter die Top 3 der nachhaltigsten deutschen KMU gewählt und beschäftigt an zwei Standorten rund 85 Mitarbeiter. Im Zeichen der Nachhaltigkeit veröffentlicht die Mader GmbH regelmäßig einen Nachhaltigkeitsbericht und ist nach den wichtigsten Normen des Managements zertifiziert, u. a. DIN EN ISO 9001:2015, DIN EN ISO 14001:2009 und DIN EN ISO 50001:2011.

Ressourceneffizienz

Das in Nachhaltigkeitsmaßnahmen sehr engagierte Unternehmen setzte bereits eine Reihe von Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz um. Beginnend mit den **Umwelt- und Energiezertifizierungen** wurden u. a. die gesamte Beleuchtung am Hauptstandort auf LED umgestellt sowie die Anzahl der eingesetzten Rechnerserver durch deren Virtualisierung reduziert. Die Gesamtheit der Maßnahmen führte zu einer Verringerung des Energieverbrauchs um ca. 85 % zwischen 2011 – 2015, obwohl die Energiekosten für das Unternehmen weniger relevant sind. Dazu führte auch ein Ansatz der Unternehmenspolitik, nämlich die Sensibilisierung der Belegschaft für den Ressourcenverbrauch im Unternehmen, z. B. durch einen sparsamen Umgang mit Strom. Jede Generation von Auszubildenden bekommt außerdem am Anfang ihrer Tätigkeit ein Energieeinsparprojekt am Standort zugewiesen, wie z. B. die Identifizierung von Stromverschwendung. Ein weiterer Ansatz ist der interne Wettbewerb per App bzgl.

des Kraftstoffverbrauchs im Außendienst. Die Spitze der internen Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz bildet die Aufstellung eines sehr innovativen und ressourcenschonenden Energiemanagementkonzeptes für ein neu geplantes Firmengebäude. Die Beweggründe für diese Maßnahmen liegen laut Geschäftsführung in der eigenen Motivation, die Glaubwürdigkeit des mittelständischen Unternehmens zu stärken. Die wichtigsten Vorteile, die sich dadurch ergeben, beinhalten laut Geschäftsführung der Aufbau von Alleinstellungsmerkmalen und die Feststellung von Differenzierungspotenzialen. Eine positive Erfahrung bei der Umsetzung dieser Maßnahmen stellt z. B. eine bessere Wahrnehmung des äußeren Unternehmensbildes durch die regelmäßige Herausgabe eines Nachhaltigkeitsberichtes dar.

Auch in Richtung Materialeffizienz ist Mader GmbH aktiv. Aktuell läuft in Zusammenarbeit mit einem Kunden ein Test zur **selbststeuernden Kreislaufschließung und Wiederverwendung** von Verpackungssystemen - Kunststoffbehälter für Stahlzylinder. Auch wenn sich die Bereitschaft seitens der Kunden dafür in Grenzen hält und eine dahingehende wirtschaftliche Voraussetzung große Bestellvolumina sind, ist die Geschäftsleitung insgesamt davon überzeugt, dass sich das KMU auf dem richtigen Weg in Richtung Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz befindet.

Digitale Transformation

Das mittelständische Unternehmen engagiert sich nicht nur im Bereich Nachhaltigkeit, sondern ist auch innovativ aufgestellt. Der organisatorische Bereich Innovationsmanagement sorgt dafür, dass sowohl das Produkt- und Dienstleistungsportfolio als auch die intern geplanten und umgesetzten Maßnahmen ständig effizient und auf dem neusten Stand der Technik bleiben.

Intern setzt das KMU ein System zur **Unternehmensressourcenplanung** (Enterprise Resource Planing - ERP) ein, auf dessen Share Point Server Daten sowohl zum Auftragsmanagement - als Kundenanforderung für eine papierlose Auftragsabwicklung - als auch zu kundenspezifisch durchgeführten Messungen von Druckluftleckagen digital abgelegt und weiterverarbeitet werden. Dabei besteht ebenso eine digitale Vernetzung mit den Kunden, die über die jeweils bei ihnen aufgenommenen Daten über mobile

Endgeräte oder Rechner, durch Identifizierung der jeweiligen IP-Adresse, rund um die Uhr Einsicht haben.

Außerdem verläuft der **Service-Prozess** inzwischen **digital**, indem Wartungspläne, Serviceberichte über die Historie der Reparaturen, Checklisten, Materiallisten sowie Betriebsanleitungen von Maschinen und Anlagen in digitaler Form, über mobile Endgeräte, papierlos geführt und verwaltet werden. Dabei erfolgt die Informationsbereitstellung, aber auch die Aufnahme der Arbeitszeiten standortunabhängig, genau und in Echtzeit. Das ERP-System stellt darüber hinaus aufgrund der digitalen Materiallisten jeweils das für einen bestimmten Serviceeinsatz benötigte Material zur Verfügung. Das alles spart also Zeit und Ressourcen und bringt somit mehr Effizienz in den Prozess. Das Unternehmen ist somit produktiver und genauer. Durch die Digitalisierung des Serviceprozesses und die Verknüpfung des ERP-Systems werden die gesammelten Daten automatisch erfasst, überprüft und abgerechnet. Die erfassten Daten beinhalten sowohl Arbeitszeiten als auch verwendete Materialien, sogar bei ungeplanten Wartungseinsätzen. Dadurch strebt das Unternehmen u. a. einen optimalen internen Ressourceneinsatz an. Druckluftleckagen werden mittels moderner Ultraschall-Ortungstechnik systematisch erfasst.

Die Spitze des Produkt- und Dienstleistungsportfolios bildet jedoch aktuell die Transparenz schaffende **Druckluftleakage-App für mobile Endgeräte**.

Diese verwaltet, quantifiziert und priorisiert digital die aufgenommenen Leckagen - Stelle, Art, Größe, Druckverlust, Foto - und liefert darüber hinaus eine in Echtzeit aktuell verfügbare und kundenspezifische Gesamtübersicht über verursachte Verluste und Verschwendungen in Form von Energie und Kosten, aber auch über priorisierte Reparaturempfehlungen und -kostenschätzungen. 2015 ursprünglich als digitales Werkzeug ausschließlich zur internen Mitarbeiterunterstützung bei der Aufnahme von Druckluftleckagen entwickelt, kommt die App inzwischen als Ergänzung der Dienstleistungen und sogar als eigenständig nachgefragtes Produkt zum Einsatz. Durch die Verwaltung und Behebung der Leckagen mit Hilfe der App konnten die Druckluftverluste im Schnitt um ca. 30 - 35 % reduziert werden. Dadurch wird u. a. auch eine vorausschauende Instandhaltung, sowohl im eigenen Unternehmen als auch beim Kunden ermöglicht.

Mit der Einführung solcher Maßnahmen sind jedoch auch Herausforderungen und Nachteile verbunden. Dabei geht es hauptsächlich um das Personal. Eine entsprechende Akzeptanz der Mitarbeiter für Maßnahmen der Digitalisierung muss zunächst geschaffen werden. Eine genauere und standortunabhängige Arbeitszeiterfassung in Echtzeit kann z. B. leicht für Unmut sorgen. Durch die digitale Transformation erfahren auch die Arbeitsplätze einen Wandel hin zu dem Bedarf an zum Teil höherer Qualifizierung. Die Weiterbildung bzw. Umschulung von Mitarbeitern stellt dabei eine weitere Herausforderung dar. Das Finden geeigneter Fachleute, insbesondere für Programmier Tätigkeiten für App-Entwicklungen, kann sich ebenfalls als Schwierigkeit erweisen. Darüber hinaus stellt ggf. die fehlende Erfahrung mit somit möglicherweise neu entstehenden digitalen Geschäftsmodellen eine deutliche Herausforderung dar, die Unternehmer bewältigen müssen. Damit verbunden ist auch der Bedarf an Klärung weiterer Aspekte, wie z. B. hinsichtlich des Standes des Eigentums der Daten über die beim Kunden gemessenen Werte: Wem gehören die Daten und wie lange? Wer hat Zugriff darauf und wie?

Die digitale Transformation führt somit im Maschinenbau - Drucklufterzeugung - nicht nur zu Produktivitätssteigerungen und Fehlervermeidung, sondern auch zu Energieeinsparungen und somit zu einer Kostenreduktion, vor allem, wenn die Lebenszykluskosten z. B. von Anlagen zur Drucklufterzeugung in Betracht gezogen werden: 12 % Investition, 6 % Wartung und 82 % Energieverbrauch. Darüber hinaus können solche Ansätze und Maßnahmen zu einer Digitalisierung und Dematerialisierung der Geschäftsmodelle führen.

Wechselwirkungen zwischen digitaler Transformation und Ressourceneffizienz

Als wichtigste Grundlage der digitalen Transformation erfolgt die Datenerfassung bei der Mader GmbH im großen Maße mit dem Zweck der Steigerung der Ressourcen- und Energieeffizienz, sowohl im eigenen Unternehmen als auch bei den Kunden. Dabei werden u. a. sowohl anlagen- und prozess- als auch standortspezifische Verbräuche, Verluste und Verschwendungen in Form digitaler Daten aufgenommen. Somit wird ein Schritt zur Steigerung der Ressourceneffizienz vollzogen: Schaffung von Transparenz über die Druckluftanlage und die damit verbundenen Verluste.

A3: Fallstudienporträt J. Schmalz GmbH



Unternehmen

Das Unternehmen J. Schmalz GmbH ist der weltweit führende Anbieter in der Automatisierungs-, Handhabungs- und Aufspanntechnik und bietet Kunden aus zahlreichen Branchen innovative und effiziente Lösungen aus dem Bereich der Vakuum-Technik. Das familiengeführte Unternehmen mit mehr als 1.100 Mitarbeitern stellt ein breites Spektrum an Produkten her. Es reicht von einzelnen Vakuum-Komponenten über komplette Systeme zum Greifen und Spannen in automatisierten Prozessen bis hin zu Handhabungsgeräten zur Gestaltung von ergonomischen Arbeitsplätzen. Der von Schmalz entwickelte Montagearbeitsplatz „Pick-by-Shutter“ wurde mit dem Preis für die „Beste Montage-Idee 2011“ prämiert. Die innovative Arbeitsplatzlösung verbessert nachhaltig die Arbeitsbedingungen und verkürzt Montage-, Rüst- und Prüfzeiten. Zusätzlich zur Zertifizierung durch umweltrelevante Managementnormen wie DIN EN ISO 14001:2009 und DIN EN ISO 50001:2011 veröffentlicht die J. Schmalz GmbH regelmäßig einen Nachhaltigkeitsbericht. Untersucht wurde der Hauptsitz der J. Schmalz GmbH in Glatten, im Schwarzwald, an dem mehr als 750 Mitarbeiter arbeiten.

Ressourceneffizienz

Die J. Schmalz GmbH ist als Familienunternehmen seit Jahrzehnten von Nachhaltigkeits- und Ressourceneffizienzzielen angetrieben. Wie in den meisten Unternehmen im Maschinenbau, nehmen auch bei der J. Schmalz GmbH die Materialkosten einen sehr hohen Stellenwert ein. Vor diesem Hintergrund verfolgt das Unternehmen mehrere Ansätze zur Steigerung der Materialeffizienz. Zum einen ist dies der Ansatz der **Materials substitution**: Hier ist es vor allem das Ziel, Aluminium in einigen Bauteilen durch Kunststoff zu ersetzen, um Kosten, aber auch Gewicht zu sparen. Letzteres ist insbesondere dort sehr wichtig, wo diese Bauteile eine Funktion im Produkt haben, bei der sie bewegt werden müssen (z. B. am Roboterarm).

Leichtere Bauteile sparen somit vor allem in der Nutzungsphase beim Kunden Energie ein. Zum anderen konzentrierte sich die J. Schmalz GmbH auf Maßnahmen zur Einsparung von Material in der Produktion. Diese Einsparungen konnten durch **Änderungen der Verfahren** - Drehen und Sägen statt Fräsen - sowie bei der Rohmaterialauswahl - Nutzung von Hohlmaterial - erreicht werden. In der Summe konnte somit über eine Tonne Kunststoff im Jahr eingespart werden.

Ein weiterer Aspekt betrifft die **Verwertung von Produktionsabfällen**. Um einen hohen Recyclinggrad zu erreichen, werden Wertstoffe nach insgesamt über 40 verschiedenen Fraktionen getrennt. Insbesondere werden Metallabfälle in eigenen Containern gesammelt. Dadurch werden nur trockene Späne entsorgt und die Kühlschmierstoffe wieder in den Kreislauf gebracht.

Auch **Energieeffizienz** hat für die J. Schmalz GmbH eine große Bedeutung. Inzwischen verfügen alle neuen Gebäude am Standort Glatten über LED-Beleuchtung. Motivation dafür war u. a. auch die Verringerung der hohen internen Wärmelast durch konventionelle Leuchtmittel in Kombination mit den sehr gut gedämmten Gebäuden. Die Einführung der LED-Beleuchtung hat zu einer Reduktion des Wärmeeintrags durch die Beleuchtung um 30 - 40 % und zu einer entsprechenden Verringerung des Kühlbedarfs geführt. Die Kühlung der Gebäude funktioniert zum einen als Nachtkühlung, wobei kalte Außenluft über einen Felsrückraum angesaugt und in die Gebäude eingeblasen wird. Zum anderen wird Betonkernaktivierung genutzt, um die Decken mithilfe des Bachwassers zu kühlen. Der Serverraum wird mit Sprinklerwasser gekühlt, wobei sich der Sprinklertank aufwärmt. Diesem wird dann über eine Wärmepumpe die Wärme entzogen, um sie für Prozesse oder als Raumwärme zu nutzen. Um den Energieverbrauch möglichst zu minimieren, werden nach einer bestimmten Uhrzeit in den Bürogebäuden die Steckdosen automatisch ausgeschaltet - außer die Mitarbeiter melden dem System, dass sie auch später Elektrizität im Büro benötigen. Den Ansatz „Green IT“ verfolgt die J. Schmalz GmbH, indem breitflächig energieeffiziente IT-Technologie eingesetzt wird. Aus Gründen des Klimaschutzes setzt das familiengeführte Unternehmen seit Jahrzehnten auch auf die Eigenerzeugung von Energie durch erneuerbare Energiequellen. Für die Erzeugung stehen zur Verfügung: 1,1-MW-Photovoltaik-Anlagen,

2,1 MW Windkraftanlagen, 32 kW Wasserkraftanlage und eine Hack-schnitzelheizanlage. Der über den selbst erzeugten und genutzten hinausgehende benötigte Strom wird extern CO₂-neutral bezogen. Im Rahmen der Energie- und Umweltmanagementsysteme führte die J. Schmalz GmbH zur systematischen Betrachtung der klima- und umweltrelevanten Maßnahmen ein eigenes Tool zur Errechnung der Ökobilanz und des CO₂-Fußabdrucks ein. Des Weiteren vermeidet die aus eigenen Anlagen ins Netz eingespeiste erneuerbare Energie deutlich mehr CO₂-Emissionen als die die das Unternehmen verursacht. Insofern weist die J. Schmalz GmbH eine negative CO₂-Bilanz auf und verfügt somit über ein „CO₂-Guthaben“, das in den CO₂-Fußabdruck der Produkte eingeht.

Die betriebsinternen Maßnahmen im Bereich der Nachhaltigkeit werden auch zur Außendarstellung genutzt. Dies unterstützt die Kommunikation zur Nachhaltigkeit der Produkte, die in ihrer Nutzungsphase bei den Kunden ressourcen- und energiesparender sein können und sich durch weitgehende Rezyklierbarkeit auszeichnen.

Digitale Transformation

Die digitale Transformation wird bei der J. Schmalz GmbH in unterschiedlichen Richtungen entwickelt. Einerseits geht es um die **Gestaltung der Produkte**, so dass diese in eine digitalisierte industrielle Produktionsumgebung mit CPS integrierbar sind. Dies führt grundsätzlich zu ganz neuen Anforderungen an die Produkte: Sie müssen fähig sein, Daten zu erfassen, und diese der Industrie 4.0-Welt zur Verfügung stellen. Genaue Kundenanforderungen richten sich dabei an die Kompatibilität der Daten, die die Produkte von Schmalz liefern, damit diese in den Systemen der Kunden weiterverarbeitet werden können. So entstehen bei der J. Schmalz GmbH z. B. mit Intelligenz- und Kommunikationsfähigkeiten ausgestattete Vakuum-Erzeuger. Diese sind in der Lage, Daten über den Energieverbrauch im Betrieb zu erheben und aufzubereiten. So ermöglicht z. B. eine neue Sensorgeneration, die über Near Field Communication Technologie (NFC-Technologie) identifiziert werden kann, mobilen Endgeräten den Zugriff auf das digitale Abbild der Geräte. Diese sogenannten „Smart Field Devices“ sind somit im Prinzip „CPS auf Ebene der Feldgeräte“. Sie bieten klare Vorteile, z. B. eine schnellere und kostengünstigere Instandhaltung. Darüber hinaus setzt das Familienunternehmen auf die **Verbesserung des**

Datenaustausches bei den internen Produktionsprozessen. Dabei geht es um die Verknüpfung des Gedankens einer schlanken Produktion mit der Unterstützung durch digitale Werkzeuge, z. B. beim Energiemanagement sowie bei der Interaktion mit den Kunden.

Dafür werden über verschiedene Systeme Maschinen- und Prozessdaten erfasst und weiterverarbeitet. Bearbeitungszentren sind z. B. mit einer Software zur Zustandsüberwachung ausgestattet, wobei eventuelle Stördaten dann direkt von den Maschinenlieferanten ausgewertet werden, um ihre Wartungseinsätze optimal zu gestalten.

An den meisten Maschinen wird die Gesamtanlageneffektivität (engl. overall equipment effectiveness – OEE) ermittelt und es werden Ausfalldaten, Betriebszeiten und Ausschuss erfasst. Diese und viele andere Kennzahlen, wie z. B. Stand der Auftragslage und Erfüllungsgrad pro Tag, werden digital erfasst, visualisiert, kommuniziert und weiterverarbeitet. Das führende System zur Unternehmensressourcenplanung (Enterprise Resource Planning – ERP) ist sehr modular aufgestellt. Es deckt ebenfalls das Supply-Chain-Management (SCM) ab, auch das sogenannte „Vendor Managed Inventory“ kommt bei Schmalz zum Einsatz.

Auch die **Lieferanten- und Kundenbeziehungen** sind in die Digitalisierung einbezogen. Kunden können online aktuelle Verfügbarkeiten prüfen. Außerdem sind manche Lieferanten über eine Webcam, die ständig auf ein klassisches Kanban-System schaut, jederzeit über die aktuellen Bedarfe an Material informiert. Ein hoher Anteil der Aufträge und Bestellungen an Lieferanten wird bei der J. Schmalz GmbH mittlerweile nur durch Einscannen von Barcodes an Kisten automatisch ausgelöst. Dabei richten sich die Kundenanforderungen – v. a. von Großkunden – an die Kompatibilität dieser Bestellsysteme mit den eigenen Systemen. Die Verwaltung von Kunden- und Lageraufträgen bzgl. Lieferfristen wird im Halbstundentakt automatisch aktualisiert und optimiert. Es besteht auch die Möglichkeit, manuell einzugreifen und z. B. Maschinen, die das Material nur zum Teil bearbeitet haben, weiterlaufen zu lassen, um Rüstzeiten, aber auch Ressourcen zu reduzieren.

Die gesamte **Lagerstrategie** des Betriebes wird durch Simulation optimiert. Dabei wird eine möglichst hohe „Pick-Zahl“ im Lager angestrebt. Dies ist möglich, da das Warehouse Management System (WMS) durchgehend die Kontrolle über das Palettenlager sowie das vollautomatisierte Kleinteilelager hat. Letzteres ist darüber hinaus automatisch energetisch lastoptimiert. Drehregalbediengeräte werden dabei automatisch daran gehindert, gleichzeitig in die Beschleunigung zu gehen. Die aus Bremsbewegungen zurückgewonnene Energie wird außerdem für Hubbewegungen eingesetzt oder ins Netz eingespeist. Auch die neuen Drehmaschinen im Unternehmen verfügen über dieses System.

Im Zuge der Errichtung einer neuen Produktionshalle bei der Firma J. Schmalz GmbH wurde in den Montagebereichen in einem sukzessiven dreijährigen Prozess die Produktion von Vorzugsreihen-Fertigung auf **Einzelteilfertigung (One Piece Flow)** umgestellt. Damit wurden die Ziele verfolgt, Prozesse schneller und kundengerechter zu gestalten, den Lagerbestand zu reduzieren sowie Ausschussteile zu minimieren. Ein Beispiel dafür ist eine durch Bestellungen gesteuerte, individuell konfigurierbare Fertigungslinie eines sogenannten Flächengreifers.

Vor der Umstellung wurde dieser Greifer standardisiert hergestellt und anschließend gelagert. Dies führte zu hohen Beständen, langen Lager- und Lieferzeiten sowie Materialverschwendung.

Der Greifer kann nach der Umstellung nun in mehr als einer Million möglichen Varianten entsprechend den spezifischen Anforderungen der Kunden hergestellt werden. Dabei werden die Formbilder der Schaumteile als CAD-Dateien automatisch an die Schneidmaschine übertragen, die dann über Nacht die spezifische Schaumform schneidet. Diese individualisierte Fertigung wurde mit dem intelligenten Nachschub-Logistik-System (Kanban-System) verbunden. Insgesamt führt diese Flexibilisierung von Fertigung und Lagerung zu einem fast komplett eliminierten Lagerbestand, einer nachhaltigen Steigerung der Materialeffizienz sowie zu einer erheblichen Reduktion der Prozesskosten und Lieferzeiten für hoch individualisierte Produkte in kleinen Losgrößen.

In dem familiengeführten Unternehmen wurde des Weiteren der **Montagearbeitsplatz „Pick-by-Shutter“** entwickelt, an dem zahlreiche Varianten

eines Vakuum-Erzeugers aus Einzelteilen effektiver zusammengebaut werden. Der nun teilautomatisierte Arbeitsplatz ist mit kleinen Toren ausgestattet, die sich je nach Produktvariante automatisch öffnen oder schließen. Dieses Prinzip verhindert eine falsche Bauteilentnahme und reduziert somit die Ausschussrate.

Auch **neue Fertigungsverfahren** setzt die J. Schmalz GmbH ein, wie den 3D-Druck von Kunststoffteilen. Dies geschieht sowohl im Prototypenbau als auch für einige Kundenprojekte, wo Teile im 3D-Druckverfahren für kundenspezifische und -individuelle Lösungen hergestellt werden.

Das Familienunternehmen hat insgesamt die Einschätzung, dass die bisherigen Schritte der digitalen Transformation sowohl die Materialeffizienz als auch die Flexibilität der Produktion erhöhen, die Produktqualität steigern, Durchlaufzeiten verkürzen, Lagerbestände reduzieren und die Herstellkosten senken.

Die größten Herausforderungen und Hindernisse der digitalen Transformation stellen für die J. Schmalz GmbH der Initialaufwand für die Umsetzung sowie die ursprüngliche Skepsis der Mitarbeiter dar, da sich der Erfolg dieser Maßnahmen nie ganz genau voraussehen lässt. Punktuell hat sich der Lärmeintrag durch die Anwesenheit von Fertigungsmaschinen im Montagebereich im Zuge der Umstellung auf **Einzelfertigung (One-Piece-Flow)** als einziger Nachteil erwiesen.

Die Chancen durch die digitale Transformation sieht die J. Schmalz GmbH sowohl in einer Erweiterung von Marktchancen für die eigenen Produkte als auch in der verbesserten Konkurrenzfähigkeit durch eine effizientere Produktion. Im Markt entsteht ein Bedarf an neuen Produkten und Dienstleistungen dadurch, dass sich die eigenen Produkte genau dort befinden, wo die Daten für die digitalisierte Produktion entstehen.

Ebenfalls sieht das Unternehmen aus dem Schwarzwald eine große Chance darin, die internen Prozesse weiter zu verbessern, diese durchgängig zu machen und zu standardisieren. In der Produktion selber geht es darum, Kundenwünsche noch besser zu erfüllen, indem individualisierte Produkte langfristig angeboten werden. Durch die Nutzung der verfügbaren Daten

aus der Produktion gilt es, einen optimalen Ressourceneinsatz anzustreben.

Genau diese Nutzung von Daten wird in einem Pilotprojekt von Schmalz dahingehend untersucht, wer diese Daten wie nutzt - eine Frage der Sicherheit und der Wirtschaftlichkeit.

Weiteres Potenzial wurde im Unternehmen darin identifiziert, den eigenen Energiebedarf mit dem fluktuierenden Angebot der Märkte in Einklang zu bringen. Die Laststeuerung (engl. Demand-Side-Management, DSM) kann ausgeweitet werden, um z. B. Stromlastspitzen zu vermeiden, für die man preislich „bestraft“ wird. Wenn also bei der J. Schmalz GmbH neue Lastspitzen aufzutreten drohen, werden aktuell schon automatisiert Lasten abgeschaltet. Um einen mit den Strommarktpreisen in Einklang gebrachten Energieverlauf zu fahren, werden z. B. - wenn möglich - nachts Wärme und Strom erzeugt, um diese tagsüber zu verbrauchen. Auch die Beteiligung an virtuellen Kraftwerken und die damit verbundene Vernetzung und Transparenz bieten Potenziale, die das Unternehmen noch ausschöpfen möchte. Die Digitalisierung wird hierbei eine entscheidende Rolle spielen.

Wechselwirkungen zwischen digitaler Transformation und Ressourceneffizienz

Wie beschrieben, zielen die Digitalisierungsmaßnahmen der J. Schmalz GmbH einerseits auf die Funktionen von Produkten beim Kunden, andererseits auf die Erhöhung von Energie- und Materialeffizienz am Standort, d. h. in der Produktion. Entsprechend sind Effekte auf die Ressourceneffizienz auch beim Kunden zu erwarten: So entstehen bei der J. Schmalz GmbH z. B. mit Intelligenz- und Kommunikationsfähigkeiten ausgestattete Vakuum-Erzeuger, die Daten über den Energieverbrauch im Betrieb erheben und so aufbereiten, dass diese weltweit verfügbar sind. Den Kunden stehen damit ganz neue Möglichkeiten für das Monitoring des Energieverbrauchs und die Konzeption von Effizienzmaßnahmen zur Verfügung.

Innerhalb des untersuchten Standorts lassen sich Effekte auf die Ressourceneffizienz in unterschiedlichen Bereichen verorten:

- Durch die Optimierung der Lagerstrategie durch Simulation wird eine bessere Ausnutzung des Lagers erreicht. Indirekt führt dies zur zeitli-

chen Verzögerung der Erweiterung der Lager um neue Regalgassen. Dadurch werden sowohl Flächen als auch Ressourcen für bauliche Anlagen eingespart.

- In letzter Zeit setzt die Firma vermehrt digitale Werkzeuge zum Monitoring des Materialeinsatzes ein. Das integrierte Kanban-System ermöglicht einen schlanken und effizienten Materialfluss. Somit kann verfolgt werden, welcher Anteil des eingesetzten Materials am Ende im Produkt landet.
- Die Einführung eines Energiemanagementsystems, gekoppelt mit der Erfassung und Auswertung von ressourcenrelevanten Daten in der Produktion hat zu einer wesentlichen Steigerung der Energieeffizienz am Standort Glatten geführt.

Ein weiterer Schritt, den sich Schmalz vornimmt, ist die Erweiterung des eigenen Ökobilanz-Tools zur Errechnung von CO₂-relevanten Daten, um die Erfassung von Nachhaltigkeitskennzahlen in der Konstruktion zu ermöglichen sowie um noch ressourceneffizientere Produkte herzustellen.

Diese Synergien in der Konstruktion werden im Maschinenbau laut Vertretern des Unternehmens im Allgemeinen noch nicht im möglichen Umfang ausgeschöpft. Die Systematisierung von Materialeffizienz hängt stark mit dem Einsatz digitaler Werkzeuge zusammen. Beginnend mit der Konstruktion, sollte eine bessere Vergleichbarkeit von Produktentwürfen aufgrund von automatisch erhobenen Nachhaltigkeitskennzahlen gegeben werden, um eine Variantenoptimierung zu ermöglichen. Systeme, die solche Kennzahlen auswerten, stehen noch am Anfang. Beispielsweise stellt sich die Frage, was ist materialeffizienter oder in Summe effizienter: Aluminium-Druckguss, Kunststoff-Spritzguss oder generative Fertigung? Was zeigt den geringsten CO₂-Eintrag?

Solche Nachhaltigkeitskennzahlen könnten außerdem auch Technologie-Benchmarks sinnvoll begleiten. Dafür müssten laut der J. Schmalz GmbH digitale Werkzeuge entwickelt werden sowie die Lebenszykluskosten und die Lebenszyklusbelastung von Material und Energie mehr in den Fokus rücken.

A4: Fallstudienporträt MAINCOR Rohrsysteme GmbH & Co. KG



Unternehmen

Das mittelständische Unternehmen Maincor Rohrsysteme GmbH & Co. KG (kurz: Maincor) mit Standorten in Schweinfurt und Knetzgau (Bayern) produziert Kunststoffrohrsysteme für unterschiedlichste Anwendungsbereiche. Das Unternehmen gehört der Kunststoffbranche an und gliedert sich in die zwei Geschäftsbereiche Rohrsysteme Gebäudetechnik (Heizung & Sanitär, Elektro & Lüftung) und Rohrsysteme Industrie (industrielle Anwendungen). Das Produktspektrum reicht von Rohren für die Automotive-, Industrie- und Weißgerätebranche über Heizung, Elektro, Lüftung und Sanitär bis hin zur Kunststoffoberflächenveredelung im Nanostrukturbereich. Maincor beschäftigt an seinen beiden Standorten insgesamt 210 Mitarbeiter. Im Jahr 2016 erwirtschaftete das Unternehmen einen Jahresumsatz von 43 Mio. Euro und erzielte somit eine Umsatzsteigerung von 6 Mio. Euro im Vergleich zum Jahr 2015.

Ressourceneffizienz

Das Unternehmen kann aufgrund umgesetzter Projekte zur Steigerung der Ressourceneffizienz umfassende Erfahrungen vorweisen. Als Beispiel ist neben dem Forschungsprojekt „Energieeffiziente Extrusion“ mit dem Ziel, energieeffizientere Extrusionsprozesse zu schaffen, die Einführung eines DIN EN ISO 50001 entsprechenden Energiemanagementsystems zu nennen. Bei der Einführung des Systems wurden an verschiedenen Punkten des Unternehmens Energieströme gemessen, die Ergebnisse mit dem Stand der Technik verglichen und daraus Handlungsmaßnahmen abgeleitet. Durch die Umsetzung abgeleiteter Maßnahmen konnten bereits prozessspezifisch 30 - 35 % der Energie und Kosten eingespart sowie eine Qualitätsverbesserung erreicht werden. Das wirtschaftliche Potenzial im Bereich Energieeffizienz liegt bei einer Reduzierung des spezifischen Energieverbrauchs um 25 % im Bereich Produktion. Im Bereich der Materialeffizienz hat das Unternehmen Maßnahmen und Programme eingeführt, um den

Ausschuss und den Verschnitt bei der Fertigung von Rohrsystemen zu reduzieren. Anfallender Ausschuss und Verschnitt werden so weit möglich recycelt. Das Unternehmen berichtet jedoch, dass für höherwertige Kunststoffreststoffe aktuell kein Abnahmemarkt vorhanden ist. Durch den Einsatz eines modernen Anlagenparks können hohe Genauigkeiten erreicht werden und dadurch kann innerhalb der Fertigungstoleranz ressourcensparend produziert werden. Als Beispiel hierfür dient ein Heizungsrohr. Die gültige Toleranz von $\pm 0,3$ mm kann durch die Genauigkeit der Anlage auf $\pm 0,05$ mm verbessert werden, was eine Material- und Energieeinsparung zur Folge hat.

Für die bei der Fertigung der Kunststoffrohre anfallenden Produktions- und Verpackungsabfälle wurde eine Recyclingstrategie definiert, die die Wiederverwendung dieser Materialien vorsieht.

Digitale Transformation

Die vorherrschende Datenlandschaft der Maincor besteht derzeit aus zwei Systemen, dem ERP-System zur Ressourcen-, Betriebsmittel- und Materialplanung sowie dem WMS zur Verwaltung von Lagerbeständen. Auf Maschinenebene bestehen zur Betriebsdaten- und Qualitätsmerkmalserfassung verschiedene Systeme. Die Einführung eines MES bzw. die eines Systems zur Produktionsplanung und Steuerung befindet sich in Planung (PPS).

Insbesondere die horizontale Vernetzung von Supply Chains ist aus Sicht des Unternehmens ein wichtiger Schritt in Richtung der digitalen Transformation. Neben der angestrebten Digitalisierung eigener Prozesse ist für das Unternehmen daher die Integration des Kunden, z. B. durch die Möglichkeit zur individuellen Auslegung von Heizungssystemen, von Bedeutung. Auch der Vernetzung und dem Datenaustausch mit Lieferanten wird ein hoher Stellenwert beigemessen. So wird Zulieferern derzeit Zugang zum WMS inklusive aktueller Lagerkapazitäten und Bestände gewährt, um das Liefermanagement zu verbessern. Hinsichtlich der Digitalisierung der eigenen Produktion bestehen bereits Insellösungen zur Erfassung und Auswertung von Daten, jedoch kann die Datenbestandssituation als noch heterogen bezeichnet werden. Dies wird dadurch verdeutlicht, dass Störungsdaten und deren Ursachen händisch dokumentiert werden, Quali-

tätsmerkmals- und Maschinenbetriebsdaten jedoch digital aufgenommen werden. Zudem gibt es zur Datenaufnahme und -auswertung auf Maschinenebene keine Systemstandards, weshalb auch vorhandene Datenbestände noch unzureichend ausgewertet werden.

Im Zuge der Digitalisierung soll u. a. dem Kunden ermöglicht werden, Systeme individuell anzupassen und deren Verfügbarkeiten online einzusehen. Derzeit werden dazu in einer Sharepoint-Lösung Systeme gemeinsam mit dem Kunden entwickelt. Zudem soll auf Anlagen-, Prozess- und Produktionsebene die Vernetzung weiter vorangetrieben werden, so dass Anlagen und Prozesse aufeinander abgestimmt und die Ressourceneffizienz gesteigert werden kann. Hierzu wurden bereits die Grundvoraussetzungen erfüllt und erste Pilotumsetzungen geplant.

Umgesetzt hingegen wurde im Bereich der Prozessoptimierung 2015 ein digitales Produktgedächtnis in Form eines WMS inklusive optischer Objektidentifikation mittels manueller Bediengeräte. Das System, das der chaotischen Einlagerung folgt, speichert objektrelevante Daten und soll auf die Produktion von Maincor angepasst werden. Nebeneffekt der Maßnahme ist die Effizienzsteigerung im Lager durch beschleunigte Ein- und Auslagerprozesse und die Reduktion von schriftlichen Unterlagen. Die Umsetzung der Maßnahme erfolgte bisher reibungslos und wird als durchweg positiv beurteilt. Besonders positiv wird hierbei für die Wertschöpfungskette des Unternehmens die Optimierung der Lagerhaltung bewertet. Trotz einer Reduktion von Personal wurde gleichzeitig ein um 25 % höherer Durchlauf erreicht. Zur Erweiterung des Produktgedächtnisses sind in Zukunft Maßnahmen zur Vernetzung durch weitere Sensoren und auch Aktoren vorgesehen. Dies soll durch eine homogene Datenintegration und -nutzung neben der Umsetzung von Condition Monitoring auch Predictive Analytics mit der Predictive Maintenance ermöglichen.

Wechselwirkungen zwischen digitaler Transformation und Ressourceneffizienz

Die Wechselwirkungen zwischen der digitalen Transformation und der Ressourceneffizienz werden im Hause Maincor positiv gesehen. Zwar bedingt die Digitalisierung häufig Einmalaufwände bei der Implementierung von Anwendungen und Aufwände hinsichtlich der Datenerfassung und

-auswertung, jedoch steht diesen die Steigerung der Verfügbarkeit von Informationen gegenüber. Dadurch können Maßnahmen zu Effizienzsteigerungen in den Bereichen Energie und Material besser geplant und kontrolliert werden. So konnte durch die Einführungen eines digitalen Produktgedächtnisses die Effizienz der Prozesse in der Intralogistik verbessert werden, was neben einem geringeren Energieverbrauch auch einen niedrigeren Platzbedarf der Lagerhaltung zur Folge hatte.

A5: Fallstudienporträt Sensitec GmbH



Unternehmen

Die Firma Sensitec ist ein mittelständisches Unternehmen, welches auf die Entwicklung und Fertigung von Sensoren spezialisiert ist. Das Unternehmen wurde 1999 gegründet und gehört seit 2013 zum Körber Konzern, welcher Ende 2015 Sensitec komplett übernahm. Es beschäftigt insgesamt 145 Mitarbeiter, von denen etwa 60 am Standort Mainz tätig sind. Der andere Standort befindet sich in Lahnau bei Wetzlar. Zum Produktportfolio zählen hauptsächlich magnetoresistive Sensoren, die Größen wie Weg, Winkel, Strom und magnetische Felder erfassen können. Etwa ein Drittel der produzierten Ware geht dabei an die Automobilindustrie, während die restlichen zwei Drittel an weitere Industrien geliefert werden. Die von Sensitec produzierte Sensorik ermöglicht wiederum die Digitalisierung von Produkten und Produktion anderer Unternehmen.

Ressourceneffizienz

Seit Januar 2015 produziert das Unternehmen ausschließlich mit Ökostrom. Darüber hinaus hat das Unternehmen ein neues Energiesystem entwickelt, das es ihm ermöglicht, seinen Energiebedarf um bis zu 20 % zu senken. Dies geschieht z. B. durch teilweise automatische Abschaltung von einzelnen Maschinen oder Fertigungsbereichen, welche für einen gewissen Zeitraum nicht benötigt werden. Diese Maßnahme führt ebenso dazu, dass der Materialbedarf erheblich sinkt, da bestimmte Betriebsmittel seltener ausgetauscht werden müssen.

Weiterhin ist die Sensibilität der Kunden gegenüber Ressourceneffizienz in den letzten Jahren erheblich gestiegen, so dass Veränderungen dieser Art nicht nur dem wirtschaftlichen, sondern auch dem sozialen Ansehen des Unternehmens dienen. Aufgrund einer Baumaßnahme wird das Werk des Mainzer Standorts bald in unmittelbarer Nachbarschaft eines Wohngebietes stehen, so dass ein umweltfreundlicher Gesamteindruck späteren Konflikten mit Bewohnern vorbeugen soll. In der Steigerung der Ressourceneffizienz

fizienz sieht das Unternehmen vor allem die Möglichkeit, Kosten zu senken sowie zusätzliche Kunden durch eine umweltfreundliche und moderne Produktion zu gewinnen.

Des Weiteren ist das Unternehmen über einen Zeitraum von weniger als zwei Jahren auf eine vollkommen papierfreie Produktion umgestiegen. Die Maßnahme zu dieser Umstellung nennt Sensitec „Data-On-a-Stick“ (DOS), welche durch Datenträger realisiert wird, die für die Dauer der Produktion fest mit dem Werkstückträger verbunden sind und so das Produkt auf jedem Schritt durch die Fertigung begleiten.

Eine weitere Maßnahme stellt eine strenge Kontrolle des Recyclingkreislaufes diverser Elemente des Fertigungsprozesses dar. So werden einige Materialien im hauseigenen Zyklus recycelt, bei anderen, wie z. B. Gold, werden externe Firmen mit einbezogen.

Digitale Transformation

Die digitale Transformation stellt sich bei Sensitec besonders bei der Überwachung von Prozessketten in der Produktion ein. Die Fertigungen beider Werke sind standortübergreifend vernetzt und übermitteln Maschinen- und Prozessdaten. Dies ermöglicht eine durchgehende Überwachung der Daten (Condition Monitoring) und kann zu einer frühzeitigen Erkennung von Trends, z. B. dem Güteverlust eines kritischen Betriebsmittels, führen (Predictive Maintenance).

Die in der Produktion anfallenden Daten werden durch ein MES erfasst und weiterverarbeitet. Das MES bildet den Kern der Produktion und ist für Sensitec von so hohem Stellenwert, dass hierfür eine Eigenlösung entwickelt wurde, da die am Markt verfügbaren Systeme entweder nicht die erforderlichen Funktionalitäten boten oder den funktionellen und finanziellen Rahmen einer mittelständischen Produktion überstiegen. Des Weiteren werden Messdaten in der Qualitätssicherung erfasst, wobei bestimmte optische Inspektionen weiterhin durch Menschen durchgeführt werden, da laut Sensitec kein optischer Sensor existiert, der die Sensibilität des menschlichen Auges sowie die Erfahrung der Mitarbeiter übertrifft.

Im Jahr 2011 konzeptionierte das Unternehmen die Maßnahme der digitalen Transformation „Data-On-a-Stick“ (DOS). DOS stellt eine vollständige Umstellung zu einer papierlosen Fertigung dar. Vor ihrer Einführung bewegten sich die produzierten Wafer (Silizium-Scheiben, die die Grundlage für mikroelektronische Bauelemente bilden) in Werkstückträgern durch die Produktion, an welche die gesamte Dokumentation, also Produktdaten, Arbeitsplan, Produktionsdaten etc., in Papierform angeheftet war. Dies führt bei einer Produktion im Reinraum nicht nur zu einer steten Verunreinigung, sondern auch zu hohen Kosten durch den Einsatz von teurem Reinraumpapier. Des Weiteren war eine Ortung eines bestimmten Werkstückträgers nicht möglich und im Falle eines Produktionsfehlers mussten die auf Papier erfassten und archivierten Produktionsdaten zunächst manuell digitalisiert werden, um die Ursache des Fehlers finden zu können. Seit der Umstellung wird kein Papier mehr in der Produktion verwendet. Die erforderlichen Daten werden jetzt auf einem digitalen Datenträger gespeichert, der - mit dem Werkstückträger fest verbunden - durch die Produktion reist. Der Datenträger meldet sich an der jeweiligen Fertigungsstation (derzeit noch mittels USB, jedoch zukünftig geplant über eine kabellose Technologie) an und sendet und empfängt die erforderlichen Produktionsdaten. Ein weiterer Grund für die Einführung von DOS lag in einer zunehmenden Häufigkeit von Stromausfällen durch werksnahe Baumaßnahmen, die jedes Mal mit einem Netzwerkausfall einhergingen. Der Netzwerkausfall führte wiederum zu einem Stopp der Produktion. Seit der Umsetzung der Data-on-a-Stick-Maßnahme kann die Produktion auch bei Ausfällen des Datennetzwerks fortgesetzt werden. Die Einführung einer Maßnahme der digitalen Transformation erfolgte demnach aus einer Notwendigkeit heraus. Jedoch konnten mit ihr die zuvor erwähnten, über die reine Notwendigkeit hinausgehenden Vorteile papierfreie Produktion, kontinuierliche Zustandsüberwachung und Lokalisierung eines Loses umgesetzt werden.

Bis zum heutigen Stand kann das Unternehmen nur positive Aspekte aus der Strukturierung und Digitalisierung seiner Wertschöpfungskette nennen. Das Unternehmen zieht bislang ein positives Fazit aus der Strukturierung und Digitalisierung seiner Wertschöpfungskette. Die Vernetzung der Daten und die Umstrukturierung auf das DOS-System sparen dem Unternehmen nicht nur Geld, sondern auch Zeit, unnötige Wege und Stress der

Mitarbeiter, z. B. durch die aufgrund der direkten Datenverfügbarkeit erheblich vereinfachte Fehlersuche.

Eine wichtige Erkenntnis bei der Umstellung eines vorhandenen Systems bestand darin, dass die Digitalisierung im Allgemeinen eine soziotechnische Aufgabe darstellt. Ein großer Teil des Erfolgs von DOS wird der Tatsache zugeschrieben, dass die Mitarbeiter des Unternehmens früh in die Umstellung miteinbezogen sowie die Vorteile der Transformation den einzelnen Mitarbeitern deutlich gemacht wurden. Ohne die Akzeptanz der Mitarbeiter lasse sich jede noch so fortschrittliche technologische Neuerung nicht umsetzen.

Eine Besonderheit des Unternehmens liegt darin, dass es, aus historischen Gründen, eine für ein KMU außergewöhnlich qualifizierte IT-Abteilung vorweisen kann. Diese war ein weiterer maßgeblicher Erfolgsfaktor sowohl bei der Umstellung auf die papierlose Fertigung als auch bei der Entwicklung des hauseigenen MES.

Wechselwirkungen zwischen digitaler Transformation und Ressourceneffizienz

Daten, die Sensitec erhebt, werden dazu genutzt, Prozesse in Echtzeit zu überwachen. Dies führt dazu, dass nicht genutzte Anlagen abgeschaltet und dadurch Energie und Betriebsmittel eingespart werden können. Weiterhin ermöglichen die Datenerfassung und -auswertung eine kontinuierliche Überwachung der Güte kritischer Betriebsmittel, so dass bei Unterschreitung eines Grenzwerts interveniert und ein Qualitätsverlust am Produkt bis hin zum Ausschuss vermieden werden kann.

A6: Fallstudienporträt Hermos AG



HERMOS

Unternehmen

Die in den Bereichen Automatisierung und Informationsverarbeitung tätige Hermos AG mit Hauptsitz in Mistelgau (Bayern) ist eine Firmengruppe mit zwölf Standorten in Deutschland und vier internationalen Standorten in den USA, Polen, Malaysia und den Vereinigten Arabischen Emiraten. Hermos bietet seinen Kunden Produkte und Dienstleistungen in Form von maßgeschneiderten Lösungen für Industrie, Energie, Umwelt und Gebäude an. Dazu gehören die Bereiche Engineering, die Fertigung von Schaltanlagen über die Tochtergesellschaft Hermos Schaltanlagen GmbH, die Entwicklung von Software für Automatisierungs- und IT-Systeme sowie die Bereitstellung eines After-Sales-Service. Für die Umsetzung von SCADA, Energie-Monitoring, Systemintegration und MES vertreibt Hermos die eigens entwickelten IT-Plattformen FIS# und MATRIX. Lösungen für Produkttracking (Track & Trace) basieren auf selbstentwickelten RFID-Komponenten und Bildverarbeitung. Insgesamt beschäftigt die Hermos AG 200 Mitarbeiter, davon 110 am Standort Mistelgau. Im Jahr 2015 erwirtschaftete das Unternehmen am Firmenstandort Mistelgau einen Umsatz von 18 Mio. Euro. Insgesamt verzeichnete die Hermos AG einen Jahresumsatz von 25 Mio. Euro.

Ressourceneffizienz

Zusammen mit dem Neubau einer Halle für die Schaltanlagenfertigung wurde eine moderne Energiezentrale am Standort Mistelgau implementiert. Neben dem eigentlichen Zweck der Eigenversorgung des Werks wird die errichtete Energiezentrale für technische und wirtschaftliche Untersuchungen von Anlagenkonzepten mit verschiedenen Energiewandlern, -speichern und -verteilersystemen genutzt. Mithilfe der eingesetzten Software FIS#energy, einem zertifizierten Energiedaten-Managementsystem, können Energie- und Medienverbräuche erfasst, in Grafiken dargestellt und

anschließend ausgewertet werden. Ziele dieser Maßnahme sind neben der Energieeinsparung die Steigerung der Wirtschaftlichkeit, das Aufdecken von Kosteneinsparpotenzialen sowie die Reduzierung von CO₂-Emissionen. Neben der Energieeinsparung kann durch die von Hermos entwickelten IT-Lösungen vor allem der Faktor „Zeit“ eingespart werden. Als Beispiel sei hier die voll automatisierte Herstellung von Schaltschrankkabeln in gewünschter Länge, Beschriftung und den vorgesehenen Kabelschuhen genannt. Die Optimierung der Produktion kann durch den Einsatz des modularen, skalierbaren MATRIX Applikationsframework realisiert werden. Mithilfe dieser IT-Software lassen sich komplexe, verteilte Produktionsabläufe einfach und effizient managen. Durch all diese Maßnahmen können insbesondere Kosten eingespart und die Prozesse schneller gestaltet werden. Als weiteren positiven Effekt der digitalen Transformation sieht Hermos hier insbesondere die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit.

Zur Verbesserung der Energieeffizienz wurden an Anlagen der Hermos Schaltanlagen GmbH verschiedene Maßnahmen durchgeführt, um den Energieverbrauch zu senken. Bezogen auf die Materialeffizienz, fallen durch die voll automatisierte Herstellung der Kabelstränge deutlich weniger Ausschuss und Verschnitt an. Kupferreste werden recycelt. Anfallendes Verpackungsmaterial wie Plastik und Kartons werden gesammelt, getrennt und dem Recyclingkreislauf zugeführt. In Zusammenarbeit mit Komponentenzulieferern werden bei der Hermos Schaltanlagen GmbH Schaltschränke und Einzelteile nicht mehr komplett verpackt, sondern in Kisten angeliefert. Dadurch konnte erheblich Verpackungsmaterial eingespart werden.

Digitale Transformation

Bei der Umsetzung der digitalen Transformation hat Hermos eine durchgängige Datenintegration umgesetzt. Exemplarisch wird diese anhand einer Bestellung einer Gebäudeautomatisierung beschrieben. Bei der Beauftragung werden die Kundendaten an das Unternehmen übergeben. Im Business-Warehouse-System (BWS) sind Daten zu den Produkten wie Produktparameter, Zeitdauern für standardisierte Arbeitsschritte, Produktpreise, Lieferanten und Verfügbarkeiten hinterlegt. Parallel zur Erstellung der Schaltpläne und der Programmierung der Software werden alle benötigten Bauteile (z. B. Schaltschrank, Sensoren, Aktoren) bei den jeweiligen Zulie-

ferern bestellt. Aus den Produktdatenbanken und den Schaltplänen werden automatisiert die benötigten Kabel für die Verdrahtung der Schaltschränke mit den Parametern Art, Farbe, Länge, Anschlusstechnik und Beschriftung an die Produktion übergeben. Eine Produktionsanlage isoliert und längt die Kabel automatisiert nach Plan ab und kennzeichnet sie anschließend mit den Anschlussorten. So findet der Monteur alle benötigten Informationen auf den Kabeln. Der Auftrag wird bis zur Auslieferung komplett elektronisch dokumentiert.

Diese durchgehende Datenintegration ermöglicht dem Unternehmen eine sehr detaillierte Kostenerfassung und Projektkalkulation, die in die Auftragsverhandlungen mit Kunden einfließen. Für die durchgehende Datenintegration wurde eine umfassende Datenlandschaft integriert. Im Unternehmen werden ERP, CAE, CAD, BDE, MDE, WMS und PPS genutzt.

Durch die Datenintegration konnte neben der verbesserten Prozesstransparenz auch die Lagerhaltung im Unternehmen selbst optimiert werden. Hermos ist auch Enabler für die digitale Transformation und bietet Automatisierungslösungen an. Für einen Hersteller von Halbleiterprodukten wurde die Lagerhaltung optimiert. So konnte durch eine detaillierte Lagerhaltung von Zwischenprodukten, z. B. bei sich wiederholenden Prozessschritten, die Fehlererkennungsrate innerhalb eines Prozesses deutlich erhöht werden. Dadurch konnte die durchschnittliche Bearbeitungszeit eines fehlerhaften Produkts durch den Wegfall überflüssiger Prozessschritte reduziert werden.

Wechselwirkungen zwischen digitaler Transformation und Ressourceneffizienz

Hermos konnte durch eine durchgehende Datenintegration Einsparungen im Bereich Energie und Rohstoffe erreichen. In den Bereichen Gebäude, Industrie und Energie werden vom Unternehmen Automatisierungslösungen und IT-Dienstleistungen angeboten, die in der Regel zu einer höheren Ressourceneffizienz führen.

A7: Fallstudienporträt Sanner GmbH



Protecting Health.

Unternehmen

Die Firma Sanner mit Hauptsitz in Bensheim, Hessen, ist ein global aufgestelltes Familienunternehmen und produziert und entwickelt seit über 100 Jahren Kunststoffverpackungen und Komponenten für Pharma-, Medizintechnik- und Healthcare-Produkte sowie Nahrungsergänzungsmittel. Das Unternehmen erwirtschaftet mit rund 500 Mitarbeitern in Deutschland, China, Indonesien, Ungarn und den USA einen Umsatz von ca. 55 Millionen Euro (2014). Am Standort in Bensheim sind 220 Mitarbeiter tätig und es werden rund 30 Millionen Euro Umsatz pro Jahr erwirtschaftet. Dieser Standort wird im Folgenden betrachtet.

Ressourceneffizienz

Um Kosten einzusparen, setzt Sanner Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Bereich Material, Energie und Mitarbeiter um, wobei die Unternehmensvertreter im Bereich der Energieeffizienzsteigerung das größte Potenzial sehen. Derzeit verwendet das Unternehmen ein Verbesserungsmanagement in Form der 20-Keys-Methode sowie ein Energiemanagement nach DIN EN ISO 50001.

Von Seiten der Kunden werden keine konkreten Anforderungen bezüglich Ressourceneffizienz an das Unternehmen gestellt. Im Gegenteil gibt es strenge Auflagen, die den Einsatz von recyceltem Kunststoff oder Biokunststoff nicht zulassen, da die Firma Sanner für die Pharma- und Medizintechnikindustrie produziert. Von einigen Kunden werden allerdings Abwassermengen, Energieverbrauch und eine Spezifizierung des Abfalls erfragt.

Energiekosten sind im Bereich Anlage bzw. Prozess (Spritzgussanlagen) finanziell relevant für das Unternehmen und es werden Maßnahmen zur

Senkung des Energieverbrauchs durchgeführt. Beispielsweise wurde bei der Anschaffung von 14 neuen Spritzgussmaschinen auf Energieeffizienz geachtet. Das Unternehmen ist außerdem Mitglied im regionalen Energieeffizienznetzwerk „ETA-Plus“.

Bei den Prozessen geht Produktionsmaterial durch Ausschuss und Verschnitt verloren und es werden Maßnahmen zur Reduzierung des Materialbedarfs durchgeführt. Es wird bereits in der Entwicklung auf eine materialeffiziente Konstruktionsweise der Produkte geachtet und es werden z. B. Geometrieänderungen zur Ausschussvermeidung vorgenommen. Im Prototypenbau wird nun seit 2015 ein 3D-Drucker eingesetzt. Dadurch entfällt der teure und ressourcenintensive Bau von Spritzgusswerkzeugen zur Herstellung von immer neuen Prototypen bis zur Kundenzufriedenheit. In der Produktion wird in die Optimierung von Anlagen investiert, um Ausschuss und Materialbedarf zu reduzieren.

Zusätzlich fällt bei den Anlagen Produktions- und Verpackungsabfall an, der sortenrein getrennt, von einem externen Unternehmen recycelt und in Unternehmen außerhalb der Pharmaindustrie wiederverwendet wird. Die recycelten Materialien werden aufgrund der strengen Auflagen der Branche nicht in die eigene Produktion zurückgeführt. Zur Verringerung des Einsatzes von Bioziden zieht Sanner ein standardisiertes System heran: Hierfür werden alle zwei Jahre die eingesetzten Biozide betrachtet und überprüft, ob es nicht- oder weniger toxische Ersatzstoffe gibt, die eingesetzt werden können.

Allgemein fällt es der Sanner GmbH als mittelständisches Unternehmen schwer, personelle und finanzielle Kapazitäten für Projekte zur Steigerung der Ressourceneffizienz bereitzustellen.

Digitale Transformation

Die digitale Transformation stellt sich in der Sanner GmbH hauptsächlich in Form eines digitalen Prüfplans als Werkerunterstützung, des Einsatzes einer Gebäudeleittechnik für Condition Monitoring, der Verwendung von 3D-Druck in der Entwicklung und des Einsatzes von Cloud Computing dar. Außerdem wird von einem externen IT-Berater alle zwei bis drei Jahre eine IT-Strategie für das Unternehmen entwickelt. Dabei wurde nun auch das

Thema Industrie 4.0 mit der strategischen Ausrichtung auf die Themenfelder Flexibilisierung und Produktivität aufgenommen.

Genutzte Software-Systeme

Das Unternehmen verfügt über eine ständige Prozess- und Maschinendatenerfassung, deren Daten hinsichtlich Gesamtanlageneffektivität, mittlerer Betriebsdauer zwischen Ausfällen für instandgesetzte Einheiten, Ausschuss, Anlaufausschuss und Energieverbrauch ausgewertet werden. Es werden ein ERP, MES, WMS, PPS, CAD/CAM, BDE, MDE sowie eine Schulungssoftware zur Verwaltung der Mitarbeiterkompetenzen und Schulungsgrade eingesetzt, wobei ca. 70 % der Systeme über SAP abgebildet werden.

Digitaler Prüfplan zur Werkerunterstützung

Um den Einsatz von Papier bei der Prüfung sowie Fehler bei der Übertragung von handschriftlich notierten Prüfwerten in digitale Systeme zu vermeiden, wurde eine Optimierung des Prüfprozesses angestrebt. Zusätzlich sollten die Mitarbeiter durch einheitliche Prüfpläne entlastet werden. Seit 2002 werden die Mitarbeiter von einem digitalen Prüfplan geführt, in dem die einzelnen Arbeitsschritte vorgegeben sind und vom Mitarbeiter bestätigt werden müssen. Sämtliche Prüfergebnisse werden gespeichert. Durch die Umsetzung dieser Maßnahme müssen in der Fertigung keine Prüfdokumente mehr verwaltet werden.

Einführung einer übergreifenden Gebäudeleittechnik

Aufgrund der hohen Qualitätsanforderungen an die Produkte bilden konstante Produktionsbedingungen eine wichtige Voraussetzung für das Unternehmen. Neben der Sicherstellung der Prozessstabilität sollten energetische Einsparungen mit Hilfe eines Energiemanagements umgesetzt werden, so dass sich Sanner im Jahr 2013 für die Einführung einer selbst regelnden Gebäudeleittechnik entschied. Mit Hilfe der Gebäudeleittechnik sollten die vorher genutzten Insellösungen durch ein ganzheitliches System ersetzt werden. Bei der Umsetzung kam es jedoch aufgrund personeller Fehlbesetzung zu großen Problemen, so dass auch heute noch eine stetige Verbesserung der Leittechnik nötig ist.

Einführung eines 3D-Druckverfahrens für die Prototypenfertigung

Mit dem Ziel, Kunden- und Ausstellungsmuster schnell zu erzeugen und die Kosten für die Werkzeugherstellung für Prototypen einzusparen, wurde im Jahr 2015 ein 3D-Drucker für den Bereich Produktentwicklung angeschafft. Der 3D-Drucker wird in der Entwicklung zur Erzeugung von Prototypen verwendet und trägt zur Ressourcen- und Materialeinsparung bei, indem die Werkzeugherstellung für Prototypen entfällt. Außerdem bewirkt diese Maßnahme eine große Zeiteinsparung bei der Auftragsakquise und dem Produktentwicklungsprozess.

Cloud Computing

Aufgrund der hohen Anforderungen bezüglich Verfügbarkeit an die IT-Systeme wurde eine Auslagerung dieser Services gegenüber einer Investition in die eigene IT-Abteilung vorgezogen. Der Dienstleister sollte mehr Sicherheit und eine hohe Verfügbarkeit sowie einen Support rund um die Uhr bieten. Im Fall von Sanner werden das Hosting des MES und ERP (SAP) sowie die Datenbankverwaltung seit dem Jahr 2006 von einem externen Dienstleister übernommen. Alle Standorte sind per VPN dorthin verbunden. Der Dienstleister verfügt über zwei Rechenzentren und ist sowohl SAP-zertifiziert als auch auditiert. Als Folge der Maßnahme wird weniger Spezialwissen am Standort benötigt und es steht ein Service rund um die Uhr zur Verfügung. Ausfallzeiten konnten minimiert werden. Außerdem konnte die hauseigene Serverinfrastruktur verkleinert und somit auch der Energieverbrauch reduziert werden. (Rechenzentren können im Allgemeinen effizienter betrieben werden als dezentrale Serveranlagen.)³²⁵

Zukünftig geplante Maßnahmen

Bezüglich weiterer Maßnahmen der digitalen Transformation sind bei Sanner in naher Zukunft ein digitales Produktgedächtnis, ein führerloses Transportsystem mit digitaler Integration des Maschinenparks, mobile Bediengeräte und neue HMI an Maschinen mit Arbeitsplänen sowie die Möglichkeit des elektronischen Know-how-Transfers sowie der Ausbau des

³²⁵ Zarnekow, R. und Kolbe L. M. (2013), S. 44.

Condition Monitorings geplant. Auch Augmented-Reality-Anwendungen zur Unterstützung der Instandhaltung werden derzeit geplant.

Die Umsetzung von Digitalisierungsmaßnahmen wird besonders durch die hohen Anforderungen der Pharma- und medizintechnischen Industrie an die Dokumentation erschwert. Softwarelösungen, vor allem im Bereich der Qualitätsüberprüfung und -nachverfolgung, sind derzeit noch nicht einführbar, da eine Softwarevalidierung nicht erfolgen kann. Dazu fehlen einheitliche Standards und Bewertungskriterien.

Maßnahmen Fazit

Sanner führt Digitalisierungsmaßnahmen durch, allerdings wurde bislang nicht gezielt nach Möglichkeiten zum Einsatz von Digitalisierung gesucht, sondern es wurden Lösungen für bestehende Probleme erarbeitet, (teilweise) ohne diese mit Industrie 4.0 in Verbindung zu bringen. Dies hat sich jedoch nach der letzten Erstellung der IT-Strategie geändert. Das Unternehmen sucht nun gezielt nach Maßnahmen, um die strategischen Ziele Flexibilität und Produktivität zu erreichen. Dazu werden zumeist Task-Forces mit wenigen Mitarbeitern gebildet, die mit einem begrenzten Budget Maßnahmen testen können.

Wechselwirkungen zwischen digitaler Transformation und Ressourceneffizienz

Die Wechselwirkung zwischen Ressourceneffizienz und Digitalisierung zeigt sich bei der Sanner GmbH in der Ausschussreduzierung. So wird der Maschinenausschuss überwacht und die erfassten Daten werden genutzt, um Maßnahmen zur Ausschussminimierung abzuleiten.

A8: Fallstudienporträt Festo AG & Co. KG



Unternehmen

Die Festo AG & Co. KG mit Sitz in Esslingen am Neckar wurde im Jahr 1925 gegründet und unterteilt sich in die beiden Geschäftsbereiche Automation (Automatisierungstechnik) und Didactic (Lernsysteme, Training und Consulting). Das unabhängige Familienunternehmen erwirtschaftet mit rund 18.700 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern weltweit einen Umsatz von ca. 2,64 Mrd. EUR und liefert pneumatische und elektrische Automatisierungstechnik für 300.000 Kunden in 35 Branchen. In der Technologiefabrik in Scharnhausen, die in dieser Studie betrachtet wird, sind ca. 1.200 Mitarbeiter tätig und es werden vorrangig Ventile, Ventilinseln und Elektronik produziert. Das Leistungsportfolio des Unternehmens erstreckt sich von Katalogprodukten der pneumatischen, servopneumatischen und elektrischen Automatisierungstechnik über maßgeschneiderte Kundenlösungen bis hin zu industrienahen Qualifizierungslösungen und Industrie-Consulting.

Ressourceneffizienz

Ressourceneffizienz ist von unternehmensstrategischer Relevanz und daher ein Thema speziell in den Bereichen Produktentwicklung, Produktion und Gebäude. Der Neubau des Standorts Scharnhausen, in dem u. a. über 50 Vorschläge von Mitarbeitern zum Thema Ressourceneffizienz verwirklicht wurden, wurde u. a. mit dem Platin-Zertifikat der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen ausgezeichnet. Auch das Produktionssystem, Festo Value Production, unterstützt eine umweltschonende Ressourcenverwendung.

Die Chancen, die sich für Festo durch die Steigerung der Ressourceneffizienz ergeben, stellen sich in Form von Kosten-, Image- und Innovationsvorteilen dar. So trägt sie zum Image eines nachhaltig wirtschaftenden Unternehmens bei und kann als Alleinstellungsmerkmal für die Produkte von

Festo am Markt dienen und zur Sicherung des technologischen Vorsprungs beitragen.

Im Umgang mit Ressourceneffizienz fällt die Bandbreite an möglichen Ansatzpunkten auf. Erfahrungen bei der Umsetzung von Maßnahmen zeigen: Auch wenn die Unternehmensführung und die Mitarbeiter auf operativer Ebene die Relevanz des Themas erkannt haben, muss oft auf der mittleren Managementebene noch Überzeugungsarbeit geleistet werden.

Festo verfügt aus Überzeugung über ein Energiemanagement in Anlehnung an DIN EN ISO 50001. Obwohl es sich bei Festo nicht um ein energieintensives Unternehmen handelt und die Energiekosten nur einen geringen Anteil an den Gesamtkosten ausmachen, wird der Energiekonsum als relevant erachtet. Geäußerte Kundenanforderungen hinsichtlich Energieeffizienz beziehen sich auf die Produkte und Technologien von Festo. Meist werden konkrete Produkte angefragt, die selbst energieeffizient sind bzw. die Energieeffizienz von Anlagen steigern. Seltener interessieren CO₂-Bilanzdaten zu einzelnen Produkten oder Anwendungen.

Die Potenziale, die sich durch die Steigerung der Energieeffizienz im Unternehmen ergeben, werden auf ca. 20 % des Energiebedarfs geschätzt. Wieviel davon noch gehoben werden kann, hängt davon ab, wie hohe finanzielle Mittel zur Verfügung gestellt und welche Amortisationszeiten eingeräumt werden. Im Bereich der Materialersparnis werden ebenfalls Potenziale gesehen und diese werden auch etwa über die Produktentwicklung, das Value Management oder Umweltmanagement adressiert. Grundsätzlich sieht Festo die Materialeffizienz aufgrund der Themenkomplexität jedoch als schwieriger adressierbar an. Da bei den Produkten von Festo hauptsächlich Aluminium zum Einsatz kommt, welches gut recycelbar ist und generell je Produkt vergleichsweise wenig Material eingesetzt wird, wird hier kein großer Handlungsdruck gesehen.

Maßnahmen zur Senkung des Energieverbrauchs werden auf verschiedenen Ebenen des Unternehmens durchgeführt. Beispielsweise wurde eine Arbeitsanweisung entwickelt, die das Abschalten von Maschinen über das Wochenende regelt, um Energie zu sparen. In einer eigenen Lernfabrik werden Mitarbeiter zum Thema Energieeffizienz geschult, z. B. zum Ein-

fluss einer Druckluftleckage. Auf diese Weise soll für das Thema Energie sensibilisiert werden.

In einer Produktion geht immer auch Material durch Ausschuss und Verschnitt verloren. Bei Festo werden vor allem Aluminium, Stahl und Kunststoff eingesetzt. Es wurden bereits verschiedene konstruktive Maßnahmen umgesetzt, um den Materialbedarf in der Fertigung zu reduzieren, z. B. bevorzugte Verwendung von Gussteilen statt von zu zerspanendem Vollmaterial.

Anfallender Produktions- und Verpackungsabfall wird mit Hilfe eines Umweltcontrollings nach DIN EN ISO 14001 erfasst. Die Trennung bei der Betrachtung hängt von den gesetzlichen Vorgaben der einzelnen Produktionsstandorte ab, wobei meist zwischen Abfall zur Entsorgung und zur Beseitigung und dabei zwischen gefährlichen und ungefährlichen Stoffen unterschieden wird. In der Produktion werden Abfälle nach der Recyclingstrategie getrennt und diese auf die Produktions- und Verpackungsabfälle angewendet. Späne werden z. B. in einer speziellen Anlage brikettiert. Auf diese Weise wird der Kühlschmierstoff herausgepresst und kann wiederverwendet werden. Außerdem können die Briketts als nicht verunreinigter Abfall entsorgt werden.

Festo lässt die Identifizierung von ökotoxischen Stoffen und Emissionen in der Produktion von einem Dienstleister durchführen. Bei Einführung neuer Stoffe wird eine Substitutionsprüfung durchgeführt und sowohl das Umweltmanagement als auch der Betriebsarzt und die Arbeitssicherheit müssen der Einführung zustimmen.

Digitale Transformation

Festos Motivation sich mit der digitalen Transformation zu befassen, betrifft die Fragestellung, wie die Produktion in Mitteleuropa weiterhin konkurrenzfähig bleiben kann und wie Alleinstellungsmerkmale und Wettbewerbsvorteile geschaffen werden können. Das Ziel ist es somit, einerseits Festos eigene Produktionsbereiche, aber auch Festos Kunden dabei zu unterstützen, ihre Produktivität zu verbessern.

Die digitale Transformation bildet sich bei Festo in zahlreichen Maßnahmen ab, wobei zwischen Maßnahmen für Produkte und für die eigene Produktion unterschieden wird. Zum Beispiel wird derzeit ein Energietransparenzsystem aufgebaut, wofür Gebäude- und Maschinendaten verknüpft werden, um den gesamten Energieverbrauch, aber auch den Energieverbrauch pro produziertem Produkt zu ermitteln. Die erfassten Daten sollen in Zukunft auch mit Data-Mining-Verfahren analysiert werden, um z. B. optimale Lastverläufe auszulegen. Außerdem hat Festo energietransparente Maschinen im Einsatz, die Energiedaten für Strom und Druckluft sowie relevante Maschinendaten erfassen.

Digitalisierung wird bei Festo gemeinsam mit Kunden gestaltet. Dies beginnt bei dem Schaffen eines gemeinsamen Verständnisses von Digitalisierung und führt über die Entwicklung von Produkten in Forschungsprojekten hin zur Gestaltung neuer Geschäftsmodelle. Die Kunden erwarten v. a. einen konkreten Nutzen und stellen z. B. Anforderungen an Kommunikationsschnittstellen. Dabei interessieren sie sich auch dafür, wie sie die Energiedaten ihrer Anlagen transparent machen können.

Genutzte Software-Systeme

Das führende System ist ein ERP. Zusätzlich kommen ein MES, Betriebsdaten- und Maschinendatenerfassung (BDE, MDE), ein PPS sowie Computer-Aided Design bzw. Manufacturing (CAD bzw. CAM) zum Einsatz. Supply Chain Management (SCM) und PLM werden in Form von Organisationssystemen eingesetzt.

Digitales Produktgedächtnis

Derzeit wird ein sogenannter Product Key eingeführt, über den der Kunde ausgewählte Informationen abrufen kann. Innerhalb des Unternehmens wird dieses Format zur Speicherung von Produktinformationen und Prozessdaten genutzt. Diese Maßnahme wurde unter anderem durch Kundenanforderungen nach Traceability motiviert.

Vernetzung von Sensoren und Aktoren

Es findet zunehmend eine vertikale Integration von der Sensorik über die Steuerung bis hin zum Leitsystem statt. Dieser Anspruch wurde z. B. vor zwei Jahren bei der Anschaffung einer großen Automatisierungsanlage

umgesetzt. Somit konnten die Taktzeiten verringert und die Produktivität erhöht werden, allerdings besteht auch weiterhin noch Optimierungsbedarf. Seit Einführung dieser Maßnahme wurde der Automatisierungsgrad am Standort um 30 - 40 % gesteigert. Die vertikale Integration verbesserte auch die Verbindung der Wertschöpfungskette mit den Lieferanten bzw. anderen Festo-Werken, indem die Transparenz über die Produkt- und Prozessdaten deutlich erhöht wurde. Handlungsbedarf ergab sich aus dem Qualifizierungsanspruch der Mitarbeiter.

Dezentrale Steuerungen

Seit Jahren zeigt sich in der Produktion bei Festo ein Trend zu dezentralen Steuerungen, die auf Stationen verteilt sind und untereinander kommunizieren. Sie benötigen keine oder nur eine deutlich entlastete zentrale Steuerung.

Assistenzsysteme/Werkerunterstützung

Anlagen in der Produktion werden z. T. mit einem QR-Code ausgestattet, über den Informationen zur Maschine, wie z. B. Wartungsvideos, abgerufen werden können. Für die Bewertung der Energieeffizienz werden regelmäßige Energieeffizienzrundgänge in verschiedenen Organisationseinheiten durchgeführt. Hierfür wird dem Werker als Unterstützung bei der Erfassung der Daten eine Checkliste auf einem Tablet zur Verfügung gestellt. Weitere Systeme zur Unterstützung der Instandhaltung werden derzeit getestet.

Mobile Bediengeräte/Augmented Reality

In der Instandhaltung und für organisatorische Prozesse, wie Kennzahlenerfassung oder Rundgänge, kommen Tablets zum Einsatz. Außerdem sind Smart-Watches derzeit im Test und auch der Einsatz von Augmented-Reality-Brillen wurde zur Unterstützung von Fernwartung geprüft, zunächst aber nicht weiter umgesetzt.

Modularität/Plug and Produce

Festo hat in der eigenen Produktion eine modulare Montagelinie im Einsatz. Diese besteht aus mehreren Zellen, ist insgesamt 30 Meter lang und verfügt über eine eigene Steuerung je Modul, so dass sie autark betrieben

werden kann. Bei einer Verkopplung mehrerer Module wird ein Leitsystem für die Linie benötigt, das die Speicherung von Prozessdaten in Datenbanken sowie die Übermittlung von Informationen an die Anlage übernimmt. Weitere Forschung soll die Umrüstzeit von derzeit einem Tag reduzieren sowie eine Simulation der Produktionsprozesse und Plug and Produce („Einstecken und Produzieren“) ermöglichen.

Condition Monitoring/Predictive Maintenance

Sowohl in der eigenen Produktion als auch in prototypischen Produktlösungen setzt Festo seit 2010 Condition Monitoring etwa für Filter ein. Hierbei wird der aktuelle Zustand des Filters über eine Anzeige visualisiert und ermöglicht so ein optimales Warten. Auf diese Weise werden Stillstandzeiten reduziert sowie Material und Zeit eingespart. Die zentrale Abluftanlage der eigenen Produktion steht zudem in Verbindung mit dem Lieferanten, so dass dieser die Möglichkeit erhält, sich zuzuschalten und den Zustand der Filter zu prüfen. Grundsätzlich sind Condition Monitoring und Predictive Maintenance jedoch derzeit noch selten explizite Kundenanforderungen an Festo. In diesem Zusammenhang spielt auch Datensicherheit, die zu jeder Zeit gewährleistet sein muss, eine große Rolle.

Virtuelles Training

Festo hat neben diversen klassischen und innovativen Qualifizierungsangeboten wie einer Lernfabrik direkt in der Fabrik auch eine „Virtual Academy“, in der virtuelle Trainings angeboten werden. Jeder Mitarbeiter in der Produktion muss bei seinem Berufseinstieg z. B. das Qualitäts- und Umwelttraining absolvieren. Für Kunden stellt Festo Videos zur Inbetriebnahme und Reparatur von Produkten zur Verfügung.

Neue Fertigungsverfahren - 3D-Druck

Festo betreibt seit ca. acht Jahren die sogenannte „Fast Factory“, in der erste Erfahrungen mit generativen Fertigungsverfahren gesammelt wurden. Heute werden zwei Technologien (Stereolithographie und Selektives Lasersintern) vor allem zur Herstellung von Prototypen und Kleinserien eingesetzt. Insbesondere im Prototypenbau sollte die Produktentwicklungszeit sowie die Anzahl der Iterationsschleifen reduziert und Kundenfeedback früher eingeholt werden. Vor Einführung der Maßnahme wurden

Prototypen durch mechanische Bearbeitung manuell hergestellt. Auch heute wird die Technologie stetig weiterentwickelt, indem neue Materialien getestet und neue Geometrien realisierbar werden. Die Unternehmensvertreter sehen eine (Groß-)Serienfertigung mit Hilfe von additiven Verfahren zurzeit noch als unwirtschaftlich an.

Virtuelle Produktentwicklung

Seit ca. fünf Jahren werden in der Produktentwicklung Berechnungen und Simulationen durchgeführt, um Herstellkosten zu minimieren und letztendlich auch die Materialeffizienz zu steigern. Hierbei finden vor allem FEM-Programme sowie Thermo- und Strömungssimulationen Anwendung. Durch diese Maßnahme sollten gezielt Materialeinsparungen realisiert (weniger Prototypen zu Versuchszwecken) und der Einsatz günstigerer Materialien getestet werden. Zusätzlich wurden die Versuchszeiten deutlich verkürzt. Auch hier stellt der steigende Bedarf an qualifizierten Fachkräften eine Herausforderung für das Unternehmen dar.

Maßnahmen – Fazit

Festo hat bereits vielfältige Digitalisierungsmaßnahmen im Einsatz und weitere befinden sich in der Planung bzw. Erprobung. Es wird bei diesen Maßnahmen zum einen auf Kostenreduzierung, aber zum anderen auch auf Ressourceneffizienz abgezielt. Erfolgreiche Maßnahmen werden im Rahmen von Erfahrungsaustauschgruppen mit Festo-Werken weltweit geteilt. Eine der größten Herausforderungen im Zusammenhang mit Digitalisierungsmaßnahmen stellt für Festo die Mitarbeiterqualifizierung dar.

Wechselwirkungen zwischen digitaler Transformation und Ressourceneffizienz

Festo nutzt erfasste Daten zur Steigerung der Ressourceneffizienz, vor allem zur Steigerung der Energieeffizienz. Es werden hierbei insbesondere Energie- und Produktionsdaten über eine entsprechende Software erfasst und u. a. für ein gebäudeseitiges Energiemanagement genutzt. Für die Branche Automatisierungstechnik sehen die Unternehmensvertreter verglichen mit anderen Industrien eher geringe Ressourceneffizienzpotenziale, ausgenommen im Bereich der Energieeffizienz.

A9: Fallstudienporträt SMB Schwede Maschinenbau GmbH



Unternehmen

Das mittelständische Unternehmen SMB Schwede Maschinenbau GmbH (kurz: SMB) produziert am Standort Goldkronach in Bayern Umreifungsmaschinen zur Verarbeitung von Kunststoffbändern. Aufgrund eines modular aufgebauten Produktportfolios können Kunden unterschiedlichster Branchen, vor allem aber die grafische Industrie, Wellpappindustrie, Pharma- sowie Lebensmittelindustrie und Logistikindustrie, individuell bedient werden. Fokussiert wird dabei stets die Kundenperspektive, um nachhaltigen Mehrwert liefern und in allen Fragestellungen unterstützen zu können. Das Unternehmen beschäftigt 85 Mitarbeiter und erwirtschaftete im Jahr 2015 einen Umsatz von 13 Mio. Euro.

Ressourceneffizienz

Da in der Maschinenbaubranche die Produktkosten stark von Material- und Personalkosten geprägt sind, fokussieren Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Hause SMB eben diese Bereiche.

Hinsichtlich der Materialeffizienz werden durch die eigens entwickelte Strategie hauptsächlich zwei Säulen adressiert: Materialsubstitution und materialeffiziente Konstruktion. So kann durch die Einbindung alternativer Materialien bereits in der Entwicklung von Komponenten bzw. Maschinenbauteilen konstruktiv die spätere Verwendung leichterer oder nachhaltigerer Materialien beeinflusst werden. Dadurch werden bewegte Massen reduziert und der elektrische Energiebedarf der Umreifungsanlage im Betrieb minimiert. Im Vordergrund steht hierbei der Kundennutzen im Sinne niedriger Betriebskosten. Auch die Herstellung von Komponenten selbst wird durch diese Maßnahme beeinflusst. So werden Teile, die sonst aus Vollma-

terialien oder Halbzeugen hergestellt werden, auf Substitutionsmöglichkeiten und alternative, ressourceneffizientere Herstellung geprüft.

Zur Ressourceneffizienzsteigerung in der Endmontage entwickelte SMB ein an die Maschinenstückliste gekoppeltes System: Montagezeitanalyse („MonZA“). Im Sinne der Digitalisierung dient dieses System, basierend auf der Methode vorbestimmter Zeiten (Methods-Time Measurement - MTM), der Kapazitäten- und Mitarbeiterereinsatzplanung. Einerseits werden zur Transparenzsteigerung Zeiten für benötigte Arbeitsschritte, andererseits eine Montageanleitung bereitgestellt. So werden sowohl Mitarbeiter effizienter eingesetzt als auch die Arbeitsorganisation in der Montage hinsichtlich des Ressourceneinsatzes optimiert.

Zu Zwecken der Nachkalkulation in der Produktion bietet die Erfassung der Prozessdaten sowie deren Auswertung die Möglichkeit zur Verbesserung der Arbeitsabläufe. So werden etwaige Störungsfälle erfasst und in einer 8D-Fehlermeldungsdatenbank gesammelt. Zur Behebung werden Workflows bereitgestellt. Neben Störungsmeldungen werden auch Änderungsanträge erfasst.

Digitale Transformation

Die Datenlandschaft der SMB Schwede Maschinenbau GmbH besteht aus einem ERP-System, das die Funktionen verschiedener Subsysteme umfasst. Dies beinhaltet die Funktionalitäten eines Supply Chain Management Systems (SCM-Systems), eines PLM Systems, eines PPS sowie die Funktionen der Betriebsdatenerfassung (BDE). Des Weiteren sind durchgängig Computer Aided Design und Manufacturing (CAD/CAM) im Einsatz. Dieses wird zur anschaulichen visuellen Darstellung der Produkte selbst durch generierte Modelle im Sinne eines digitalen Zwillings abgebildet.

Aus Sicht des Unternehmens birgt die Digitalisierung insbesondere hinsichtlich des Produktportfolios Herausforderungen und Chancen. Neben der Anforderung einer hohen Verfügbarkeit von Maschinen seitens des Kunden steht die Anpassung des Produktportfolios im Fokus. Letztere wird in Form einer Modularisierung von mechanischen Baugruppen, elektronischen Baugruppen sowie Softwarepaketen vorangetrieben, wodurch eine Verbesserung der Wartung gewährleistet werden soll. Vorhandenes Wis-

sen und gewonnene Erkenntnisse zu Maschinen sowie zu dazugehörigen Untergruppen werden Kunden auf dem eigens entwickelten Portal „MySMB“ zur Verfügung gestellt. Hier werden alle Maschinen eines Kunden aufgelistet sowie folgende Daten digital bereitgestellt: Betriebsanleitungen, Ersatzteilkataloge, Verschleißteillisten, Programmnummern von SPS und HMI, Schaltplan und CE-Dokumente. Des Weiteren steht Kunden ein Zugang zu einem Onlineshop mit dem gesamten Artikelumfang eigener Maschinen zur Verfügung.

Intern wird ein Helpdesk zur Stützung des technischen Supports eingesetzt. Bei einem Wartungs- oder Serviceeinsatz kann seriennummernspezifisch auf alle Daten des Maschinenlebenszyklus zugegriffen werden. Neben Kundendaten, dem aktuellen Servicelevel der Maschine inklusive abgeschlossener und anstehender Servicemaßnahmen sowie deren Zeitpunkt wird auch die Maschinenstruktur mit Explosionszeichnungen bereitgestellt. Zudem werden Servicemitarbeitern typische Maschinenfehler sowie Abhilfemaßnahmen vorgeschlagen. An einen abgeschlossenen Serviceeinsatz anschließend wird ein digitaler Bericht erstellt, auf dessen Basis automatisch im ERP-System ein Abrechnungsdokument erstellt wird und alle Aufwände und Materialien verbucht werden.

Wechselwirkungen zwischen digitaler Transformation und Ressourceneffizienz

Wechselwirkungen zwischen der Digitalisierung und der Ressourceneffizienz werden seitens SMB positiv gesehen. Initialen Einmalaufwänden von Anwendungen der Digitalisierung hinsichtlich der Datenerfassung und -auswertung, steht eine Effizienzsteigerung von Routinearbeiten durch IT-gestützte Systeme entgegen. Dadurch können Arbeitsumfänge, die zuvor der Dokumentation galten, durch wertschöpfende Tätigkeiten ersetzt werden. Weiterhin ergeben sich Qualitätsverbesserungen sowie Effizienzsteigerungen im Servicebereich. Durch die Kopplung von ERP-System und Helpdesks zeigen sich als Kundennutzen eine gesteigerte Servicegeschwindigkeit, die Berichterstellung sowie unternehmensintern eine Beschleunigung der kaufmännischen Abläufe. Ausblickend erhofft sich SMB im Zuge der voranschreitenden Digitalisierung weiteren Kundennutzen durch bedarfsgerechte, vorbeugende Instandhaltung. Hier erscheint der Einsatz von Big-Data-Analysen als aussichtsreich.

A10: Fallstudienporträt Wetropa Kunststoffverarbeitung GmbH & Co. KG



Unternehmen

Die Firma Wetropa Kunststoffverarbeitung GmbH & Co. KG beschäftigt an ihrem Hauptsitz in Mörfelden, der in dieser Studie betrachtet wird, 85 der insgesamt 125 Mitarbeiter. Weitere Standorte befinden sich in Feldkirchen und Baidersdorf. Das Unternehmen ist seit 45 Jahren auf Schaumstoffverarbeitung spezialisiert und bietet Industrie und Handel Verpackungslösungen an. Die Produkte sind stark individualisiert auf die Verpackungsanforderungen der Kunden und können auch in sehr geringen Stückzahlen (Stückzahl 1) gefertigt werden. Im Jahr 2015 erwirtschaftete Wetropa einen Umsatz von ca. 15 Millionen €.

Ressourceneffizienz

Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz werden bei Wetropa in der Konstruktion, Produktion und in Form von Recycling umgesetzt. In der Konstruktion wird stets auf eine optimale Materialausnutzung geachtet, um den Verschchnitt so gering wie möglich zu halten. In der Produktion kommen Werkerassistenzsysteme zur Ausschussminimierung zum Einsatz, die später detaillierter beschrieben werden. Zudem werden sämtliche Abfälle getrennt, von einem Lieferanten recycelt und teilweise von diesem zurückgekauft. Für das Unternehmen ergeben sich dadurch Kosten- und Platzeinsparungen sowie eine Imageverbesserung. Es werden auch von Kunden Anforderungen hinsichtlich Ressourceneffizienz und Umweltfreundlichkeit an Wetropa gestellt. Das Unternehmen informiert seine Kunden deshalb regelmäßig in Form von Newslettern über ausschuss- und recyclingrelevante Zahlen. Energiekosten sind insbesondere auf Anlagenebene relevant, so dass organisatorische Maßnahmen, wie das Abschalten von Anlagen nach Schichtende zur Reduzierung des Stromverbrauchs, umgesetzt werden.

Der Unternehmensvertreter sieht im eigenen Unternehmen, aber auch in der kunststoffverarbeitenden Industrie, ein hohes Potenzial für Ressourceneffizienz.

Digitale Transformation

Die digitale Transformation stellt sich bei Wetropa hauptsächlich in Form von Werkerassistenzsystemen, einer durchgehenden Datenintegration und in der virtuellen Produktentwicklung in Form des sogenannten Foam Creators dar, mit Hilfe dessen Kunden automatisiert individuelle Schaumstoffeinlagen gestalten und bestellen können.

Genutzte Software-Systeme

Das Unternehmen verfügt über ein ERP-System, das ein WMS beinhaltet. Zusätzlich kommt ein MES mit PPS zum Einsatz und es werden sowohl Maschinen- als auch Betriebsdaten erfasst (MDE, BDE), die im MES gespeichert und verwaltet werden. In der Entwicklung bzw. Konstruktion wird ein CAD/CAM-System genutzt.

BDE Terminals

Seit zwei Jahren hat Wetropa sogenannte BDE-Terminals im Einsatz, um die Transparenz im Produktionsmanagement und die Planbarkeit der Produktion zu verbessern. Die BDE-Terminals wurden gleichzeitig mit dem MES eingeführt. Vorher gab es keine Datenerfassung auf Produktionsebene. Die BDE-Terminals ermöglichen eine bessere Überwachung der Aufträge und der Prozesszeiten. Nach der Durchführung eines Auftrags werden diese analysiert und mit den Vorgabezeiten verglichen, um deren Aktualität und somit auch die des angebotenen Preises sicherzustellen. Außerdem können die Mitarbeiter über die Terminals auf weitere Funktionen, wie die Urlaubsverwaltung, zugreifen. Probleme in der Produktion können ebenfalls gemeldet werden. Bei der Umsetzung stellte vor allem der Qualifikationsanspruch der Mitarbeiter eine Herausforderung dar.

Beamer zur Werkerunterstützung

Seit ca. dreieinhalb Jahren setzt Wetropa Beamer zur Werkerunterstützung an Zuschneidemaschinen für Schaumstoffplatten ein. Ziel war es, die Materialausnutzung beim Zuschneiden zu optimieren. Der Beamer projiziert

dabei das maschinenoptimierte Schnittmuster auf die Schaumstoffplatten, so dass der Werker sie bestmöglich ausrichten kann. Vor Einführung der Beamer wurde die Ausrichtung der Zuschnitte von den einzelnen Mitarbeitern festgelegt, dadurch war der Plattenverschnitt abhängig von der Erfahrung der einzelnen Mitarbeiter und variierte stark. Neben der Verschwendung von Materialressourcen stellte der schwankende Materialbedarf ein Problem für die Materialbeschaffung dar. Bei der Nutzung dieses Systems ist die optische Verzerrung, die durch die Position der Beamer und die schwankende Plattendicke entsteht, von den Mitarbeitern zu berücksichtigen.

Durchgehende Datenintegration

Zusätzlich zum ERP-System, das seit 2009 im Einsatz ist, wurde vor ca. zwei Jahren ein MES eingeführt. Das System wird im Bereich der Fertigungsplanung zur Erfassung von Kunden- und Auftragsdaten eingesetzt. Durch diese Maßnahme sollten Prozesse optimiert, die Rückverfolgbarkeit verbessert und die Liefertermintreue erhöht werden.

Vor Einführung des MES erfolgte die Fertigungsplanung manuell, was fehleranfällig und mit einem hohen administrativen Aufwand verbunden war. Dieser Aufwand konnte stark reduziert werden, so dass die Fertigungsplanung heute mit einem statt zwei Mitarbeitern durchgeführt werden kann.

Foam Creator

Das Unternehmen setzt seit April 2015 als virtuelle Produktentwicklung den selbst entwickelten Foam Creator ein. Vor Umsetzung der Maßnahme mussten Kundenobjekte vor Ort aufgenommen und in einem CAD-Programm nachmodelliert werden. Nach Optimierungen durch den Konstrukteur und Einholung des Kundenfeedbacks konnte die Schaumstoffeinlage gefertigt werden.

Ziel der Einführung des Foam Creators war es, dem Kunden zu ermöglichen, selbst und ohne Vorwissen im Bereich Konstruktion oder Schaumstoffverarbeitung seine Einlagen zu modellieren. Auf diese Weise sollten Kosten und Zeit sowohl für den Kunden als auch das Unternehmen eingespart werden.

Der Foam Creator kann sowohl als webbasierte Version am Computer oder als Applikation am Smartphone genutzt werden. Der Kunde nimmt Fotos seiner Objekte auf, lädt sie in den Foam Creator und wählt individuelle Einstellungen, wie Abstand zwischen den Objekten, Farbe und Art des Schaumstoffs, aus. Die Anwendung erstellt daraufhin automatisch ein Modell der Schaumstoffeinlage und stellt diese dem Kunden zur Bestätigung zur Verfügung. Nach Bestätigung erhält der Kunde einen Liefertermin und in der neuesten Version auch automatisch ein Angebot. Intern werden die Aufträge automatisch bestätigt und direkt in die digitale Fertigungsplanung übernommen.

Aus dieser Maßnahme heraus wurde das neue Dienstleistungsunternehmen My Foam.net GmbH gegründet, das den Foam Creator auch Wettbewerbern von Wetropa zugänglich macht und den Kunden den Service in Form eines Marktplatzes zur Verfügung stellt.

Die technischen Grenzen des Systems liegen zurzeit im optischen Bereich. Bei der Bildaufnahme muss ausreichend Kontrast zwischen dem Objekt und dem Hintergrund vorhanden sein und auch eine Bildgröße über DIN A4 darf nicht überschritten werden, da es zu Verzerrungen durch die Kameralinsen kommt. Probleme bei der Umsetzung der Maßnahme bereitete vor allem die Suche nach einem qualifizierten Dienstleister für die Entwicklung der Software.

Mit Hilfe des Foam Creators konnte der Entwicklungsaufwand für einfache Schaumstoffeinlagen auf null gesenkt werden.

Zukünftig geplante Maßnahmen

Wetropa plant zukünftig mit der Anschaffung neuer Anlagen eine Erweiterung der Maschinendatenerfassung. Erfasste Daten sollen u. a. dem Hersteller zur Verfügung gestellt werden, um Stillstandzeiten zu verringern und damit die Liefertermintreue zu verbessern. In Zukunft soll außerdem ein digitales Produktgedächtnis mit Hilfe von QR-Codes eingeführt werden.

Maßnahmen - Fazit

Wetropa sieht die Digitalisierung als Chance sich gegen Konkurrenten aus dem Ausland durchzusetzen, die bei der Qualität ihrer Produkte beständig

aufholen. Das Ziel des Unternehmens sind schlanke Prozesse, eine gleichbleibende Qualität und wenig Reklamationen. Auch im Hinblick auf eine Null-Fehler-Quote sieht der Unternehmensvertreter Wetropa z. B. in Form von digitalen Inspektionssystemen große Potenziale durch die Digitalisierung.

Wechselwirkungen zwischen digitaler Transformation und Ressourceneffizienz

Wetropa erkennt durch den Einsatz von Werkerassistenzsystemen und dem Foam Creator starke Wechselwirkungen zwischen der Digitalisierung und Ressourceneffizienz. Digitalisierung trägt zu Zeit-, Kosten- und Ressourcenersparnis bei, indem Prozesse verschlankt werden und z. B. im Fall des Foam Creators Versandkosten von Objekten oder Fahrtkosten zum Kunden entfallen.

ANHANG 2: RESSOURCENSELBSTEINSCHÄTZUNGSTOOL (RESET)

Im entwickelten Ressourcenselbsteinschätzungstool oder ReSET werden sechs betriebliche materielle Ressourcen wiederholt in sechs Entwicklungsstufen der Datenerfassung und -analyse gezeigt. Das Ergebnis gibt Abbildung 25 wieder.

Der Vorgang der Wiederholung geschah bewusst, ebenso wie die Aufzählung jeder Stufe für jede Ressource trotz offensichtlicher Similaritäten. ReSET ist eine Vorlage für Anwender. Es soll KMU helfen, ihren Digitalisierungsgrad in Bezug auf ihre Ressourceneffizienz einschätzen zu können und darin unterstützen, Ideen für Digitalisierungsmaßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz zu generieren. Zu diesem Zweck ist es wesentlich, dass sich der Anwender bewusst mit jeder Ressource individuell beschäftigt. Nachfolgend werden exemplarisch drei der sechs Ressourcenebenen im Detail beschrieben.

		Digitalisierung										
Betriebliche materielle Ressourcen												
Energie												
Elektrische Energie		Energiezähler wird durch Versorger abgelesen		Regelmäßige, unternehmensinterne Erfassung von Zählerständen		Auflösung von Energiedaten auf Prozess- oder Maschinenebene		Verknüpfung von Energiedaten mit Betriebsdaten		Automatisierte Ableitung von Maßnahmen		Automatisierte Regelung von Maschinen und Anlagen
	Thermische Energie		Wärmemenge wird von Versorger erfasst		Regelmäßige, unternehmensinterne Erfassung der Wärmemenge		Identifikation und Erfassung individueller Wärmequellen und -senken		Verknüpfung von Wärmedaten mit Betriebsdaten		Automatisierte Ableitung von Maßnahmen	
Material												
Rohstoffe		Rohstoffeinsatz wird nur aus Einkauf deutlich		Regelmäßige Erfassung von Rohstoffeinsatz und Abfällen zur Verwertung		Erfassung von Rohstoffeinsatz und Abfällen zur Verwertung auf Maschinenebene		Verknüpfung von Rohstoffdaten mit Betriebsdaten		Automatisierte Ableitung von Maßnahmen		Automatisierte Regelung von Maschinen und Anlagen
	Betriebsstoffe		Betriebsstoffeinsatz wird nur aus Einkauf deutlich		Regelmäßige Erfassung von eingesetzten Betriebsstoffen		Erfassung von Betriebsstoffeinsatz auf Maschinenebene		Verknüpfung von Betriebsstoffdaten mit Betriebsdaten		Automatisierte Ableitung von Maßnahmen	
Emission und Abfall												
Spezifische Emissionen		Keine Erfassung von spezifischen Emissionen		Regelmäßige Erfassung von spezifischen Emissionen		Maschinelle Erfassung spezifischer Emissionen		Verknüpfung von Emissionsdaten mit Betriebsdaten		Automatisierte Ableitung von Maßnahmen		Automatisierte Regelung von Maschinen und Anlagen
	Abfälle zur Beseitigung		Abfallanfall nur aus Entsorgungsböhen deutlich		Regelmäßige und strukturierte Erfassung der Abfälle zur Beseitigung		Abfälle zur Beseitigung werden auf Maschinenebene erfasst		Verknüpfung von Abfalldaten mit Betriebsdaten		Automatisierte Ableitung von Maßnahmen	

Abbildung 25: Detaillierte Ausführung des Ressourcenselbsteinschätzungstools (ReSET)

Elektrische Energie

In der ersten Entwicklungsstufe (Abbildung 26) werden die Energiezähler durch das Versorgungsunternehmen zu vorbestimmten Zeitpunkten abgelesen und der Verbrauch dementsprechend abgerechnet. Die Daten über die eingesetzte elektrische Energie im Abrechnungszeitraum liegen in der Unternehmensverwaltung in Form von Rechnungen vor. Diese können genutzt werden, um Vergleiche zwischen Abrechnungsperioden zu ziehen und einfache Trendanalysen zu erstellen. Entscheidend ist jedoch, dass die zeitliche Auflösung fremdbestimmt ist.

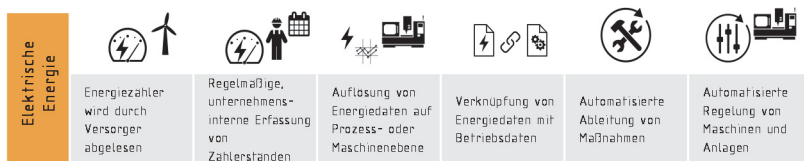


Abbildung 26: Entwicklungsstufen der betrieblich materiellen Ressource "Elektrische Energie"

In der zweiten Entwicklungsstufe erfolgt eine regelmäßige Erfassung der Zählerstände durch das Unternehmen selbst. Die Intervalle zwischen den Ablesezeitpunkten können selbst bestimmt und die Daten an einer geeigneten Stelle abgelegt werden. Dies ermöglicht die Erstellung von Jahresverbrauchskurven. Je nach gewähltem Intervall können saisonale, monatliche oder wöchentliche Unterschiede analysiert und hinterfragt werden.

Die dritte Entwicklungsstufe erfordert den Einsatz zusätzlicher Energiezähler auf Hallen-, Anlagen-, oder Maschinenebene. Hierdurch wird die örtliche Auflösung erhöht. Abhängig von der Anzahl der eingesetzten Zähler und dem gewähltem Ableseintervall ist es in dieser Stufe durchaus zielführend, die Erfassung und Verarbeitung der Daten sowie deren Analyse zu automatisieren. Auf Basis der Analysen lassen sich energieintensive Prozesse sowie Änderungen der Energieaufnahme identifizieren. Des Weiteren kann durch die neu gewonnenen Informationen die Untersuchung auf Energieeffizienzpotenziale priorisiert werden.

In der vierten Entwicklungsstufe erfolgt eine Verknüpfung der erfassten Energiedaten mit den entsprechenden Prozess- oder Maschinendaten. Korrelationen und Kausalitäten werden hervorgehoben. Die Identifikation

energieintensiver Bearbeitungsschritte wird möglich. Optimierungsmaßnahmen, wie z. B. die maschineninterne wie auch die maschinenübergreifende Lastspitzenglättung können präzise eingesetzt werden. Außerdem kann zwischen wertschöpfendem und nicht-wertschöpfendem Energieeinsatz unterschieden sowie weitere umfassende Optimierungspotenziale können aufgedeckt werden.

Durch die Einführung intelligenter Systeme werden in der fünften Entwicklungsstufe die zuvor beschriebenen Vorgänge automatisiert. Das System berechnet eigenständig Optimierungspotenziale und gibt diese auf geeigneter Ebene an einen Mitarbeiter aus. Weitere Optimierungsmaßnahmen sind ganzheitliche Optimierungsansätze unter Einbezug von Gebäude, Produktion, Maschinen, technischer Gebäudeausrüstung etc. Die sechste Entwicklungsstufe besteht darin, dem System zu ermöglichen und zu erlauben, die automatisiert abgeleiteten Optimierungsmaßnahmen autonom umzusetzen.

Roh- und Betriebsstoffe

Die Beschreibung der sechs Entwicklungsstufen geschieht nachfolgend für Rohstoffe und Betriebsstoffe (Abbildung 27 und Abbildung 28). Zur besseren Lesbarkeit wird, sofern keine Unterscheidung zu treffen ist, ausschließlich von Rohstoffen gesprochen, was jedoch in diesem Kontext jederzeit durch Betriebsstoffe substituiert werden kann. Die getrennte Aufführung in zwei Ebenen im Werkzeug ist jedoch unerlässlich, da Rohstoffe und Betriebsstoffe im Produktionskontext getrennt betrachtet werden sollen. Ebenfalls analysiert werden in diesem Abschnitt Abfälle zur Verwertung. Die Verwertung kann innerbetrieblich geschehen, wodurch sich eine Rückführung in den Zyklus als Rohstoff ergibt, oder durch Veräußerung des Abfalls kann die Systemgrenze des Unternehmens verlassen werden. Demgegenüber abzugrenzen sind Abfälle zur Beseitigung, die in einer eigenen Ebene unter Ökosystemleistungen beschrieben werden.



Abbildung 27: Entwicklungsstufen der betrieblich materiellen Ressource "Rohstoffe"

In der ersten Entwicklungsstufe werden Daten zum Rohstoffeinsatz nicht gezielt erfasst. Die eingesetzten Mengen werden lediglich aus dem Einkauf deutlich und müssen aus der entsprechenden Organisationseinheit des Unternehmens manuell für die Ressourceneffizienzbetrachtung extrahiert werden. Ist dies geschehen, lassen sich zeitliche Verläufe des Rohstoffeinsatzes visualisieren und eventuelle Schwankungen bewerten. Die Menge der Datenpunkte ist jedoch abhängig von der Häufigkeit der Bestellung des jeweiligen Rohstoffs.



Abbildung 28: Entwicklungsstufen der betrieblich materiellen Ressource "Betriebsstoffe"

Die nächste Entwicklungsstufe stellt eine regelmäßige Betrachtung des Rohstoffeinsatzes auf Unternehmens- bzw. Werksebene dar. Mit in die Betrachtung fallen die verwertbaren Abfälle. Wie bei den zuvor beschriebenen Ressourcen erlaubt eine vorsätzliche regelmäßige Erfassung von Daten zum Ressourceneinsatz die Festlegung der Abfragefrequenz, sei es täglich, wöchentlich oder monatlich, und erhöht somit die Datenqualität und deren Aussagekraft. Zudem wird ein Bewusstsein über den Ressourceneinsatz geschaffen sowie die Erstellung von Referenzzuständen als Basis für Effizienzsteigerungsbetrachtungen ermöglicht.

In der dritten Entwicklungsstufe wird die Datenerfassung zu eingesetzten Rohstoffen und anfallenden Abfällen zur Verwertung auf Maschinenebene aufgeschlüsselt. Die örtliche Auflösung wird abermals gesteigert. Eine Automatisierung der Datenerfassung sowie Verarbeitung an einer zentralen Stelle lässt ebenfalls eine Erhöhung der zeitlichen Auflösung zu. Produktionsprozesse, Maschinen oder Anlagen können nach Rohstoffeinsatz klassifiziert und im Hinblick auf die Untersuchung von Einsparpotenzialen priorisiert werden. Bei entsprechend kontinuierlicher Analyse und Visualisierung lassen sich auch Änderungen im Einsatz im laufenden Betrieb identifizieren. Insbesondere bei Betriebsstoffen kann ein erhöhter Einsatz auf Leckagen oder ähnliche Störungen hinweisen.

Eine Verknüpfung der Rohstoffdaten mit den Betriebsdaten stellt die vierte Entwicklungsstufe dar. Diese erlaubt die Ermittlung und Bewertung spezifischer Einsparpotenziale. Rohstoffverbräuche und anfallender Abfall zur Verwertung können Prozessschritten und Produkten unmittelbar zugeordnet werden. Durch das gesteigerte Verständnis über die jeweiligen Zusammenhänge lassen sich weitreichende Optimierungspotenzial realisieren.

In den Entwicklungsstufen fünf und sechs erkennen intelligente Systeme automatisch die Zusammenhänge zwischen Prozessen und Rohstoffeinsatz und leiten dahingehend eigenständig Maßnahmen ab bzw. passen, bei entsprechender Vernetzung, Prozessparameter an, um die abgeleiteten Maßnahmen autonom umzusetzen.

Mit Hilfe des detailliert beschriebenen Ressourcenselbsteinschätzungstools haben KMU die Möglichkeit, ihren eigenen Digitalisierungsgrad bei der Datenerfassung hinsichtlich der sechs betrachteten Ressourcen einzuschätzen. Auf die Identifikation der aktuellen Entwicklungsstufe folgen die Festlegung der gewünschten sowie die unternehmensspezifische Strategie zum Erreichen derselben. Der Vorgang kann für jede Ressource mehrfach wiederholt werden.

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)
Bertolt-Brecht-Platz 3
10117 Berlin
Tel. +49 30-2759506-0
Fax +49 30-2759506-30
zre-info@vdi.de
www.ressource-deutschland.de