

## VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 10



# Material- und Energieeffizienzpotenziale durch den Einsatz von Fertigungsdaten- erfassung und -verarbeitung

Februar 2015

Kurzanalyse Nr. 10: Material- und Energieeffizienzpotenziale durch den Einsatz von  
Fertigungsdatenerfassung und -verarbeitung

2. Auflage 2016

Die Kurzanalyse wurde im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative des Bundesministeriums  
für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit erstellt.

Die Kurzanalysen des VDI ZRE geben einen Überblick über aktuelle Entwicklungen des Themas  
Ressourceneffizienz in Forschung und industrieller Praxis. Sie enthalten eine Zusammenstellung  
relevanter Forschungsergebnisse, neuer Technologien und Prozesse sowie Gute-Praxis-Beispiele.  
Damit verschaffen die Kurzanalysen einem breiten Publikum aus Wirtschaft, Forschung und  
Verwaltung einen Einstieg in ausgewählte Themenfelder der Ressourceneffizienz.

Autoren:

R. Schmitt, C. Brecher, M. Nau-Hermes, T. Berners,  
Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

Fachlicher Ansprechpartner:

Manuel Weber, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH

Wir bedanken uns bei Herrn Dr.-Ing. Thomas Usländer, Leiter der Abteilung  
„Informationsmanagement und Leittechnik“ am Fraunhofer IOSB, für die  
fachliche Unterstützung bei der Entstehung dieser Kurzanalyse.

Redaktion:

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)

Bertolt-Brecht-Platz 3

10117 Berlin

Tel. +49 30-27 59 506-0

Fax +49 30-27 59 506-30

[zre-info@vdi.de](mailto:zre-info@vdi.de)

[www.ressource-deutschland.de](http://www.ressource-deutschland.de)

Satz und Gestaltung: Sebastian Kanzler

Titelbild: [www.blue-images.eu](http://www.blue-images.eu)

Druck: LASERLINE Druckzentrum Berlin KG, Scheringstraße 1, 13355 Berlin-Mitte

Gedruckt auf umweltfreundlichem Recyclingpapier.

# Material- und Energieeffizienzpotenziale durch den Einsatz von Fertigungsdaten- erfassung und -verarbeitung

Kurzanalyse Nr. 10



# Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	4
2. Ziel der Kurzstudie und Methodik	9
3. Grundlegendes zu Fertigungsdatenerfassung und -verarbeitung	11
3.1 Integrationsgrad der Messtechnik, Initial-, wiederholende und Echtzeitmessung	13
3.2 Softwaresysteme zur Produktionsunterstützung	19
4. Nutzungspotenziale von Fertigungsdaten für eine material- und energieeffiziente Produktion	22
4.1 Steigerung des Nutzungsgrades	23
4.2 Steigerung des Leistungsgrades	27
4.3 Ermittlung von Kennzahlen zur Bewertung der Ressourceneffizienz	33
5. Herausforderungen für Unternehmen bei der material- und energieeffizienten Produktionsgestaltung	38
6. Zusammenfassung	41
Literaturverzeichnis	43
Abbildungsverzeichnis	49

## 1. EINFÜHRUNG

Produzierende Unternehmen werden zunehmend mit der Herausforderung knapper werdender Ressourcen und damit verbundener Preissteigerungen sowie Volatilitäten konfrontiert. Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) stellt in der Energiestudie 2013 z. B. fest, dass die steigende Nachfrage für Erdöl in den kommenden Jahrzehnten wahrscheinlich nicht gedeckt werden kann und dass ein dauerhaft niedriges Niveau des Ölpreises nicht zu erwarten ist.<sup>1</sup> Auch die vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie veröffentlichten Daten zum internationalen Preisvergleich der Elektrizität für die Industrie (vgl. Abbildung 1) sowie für Erdgas (vgl. Abbildung 2) zeigen eine langfristige Erhöhung des Preisniveaus bis 2013 in allen betrachteten Ländern.<sup>2</sup>

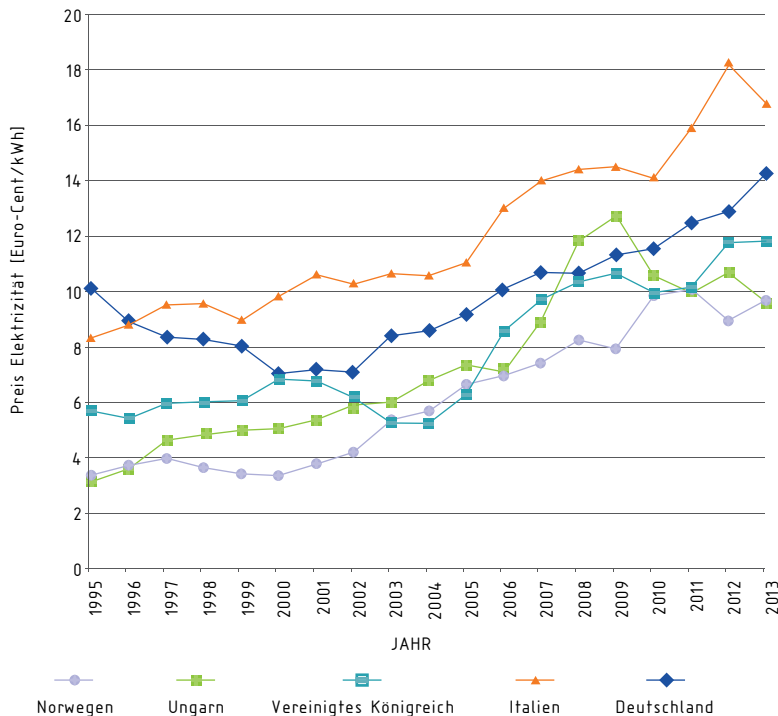
Ab Mitte 2014 ist der Rohölpreis, und damit auch die davon abhängigen Preise anderer Energiequellen, auf dem Weltmarkt zwar von 113,3 US \$/Barrel am 23.06.2014 auf 62,4 US \$/Barrel am 12.12.2014 gesunken<sup>3</sup>, Gründe dafür sieht die Verbraucherzentrale NRW allerdings in der sich abkühlenden Weltkonjunktur, dem derzeitigen Ölförderboom in den USA durch Fracking und dem Nicht-Gegensteuern der OPEC-Länder.<sup>4</sup> Somit ist nicht zu erwarten, dass der Ölpreis dauerhaft auf diesem Niveau bleibt.

<sup>1</sup> vgl. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2013)

<sup>2</sup> vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2013)

<sup>3</sup> vgl. TECSON (2014)

<sup>4</sup> vgl. Verbraucherzentrale NRW (2014)

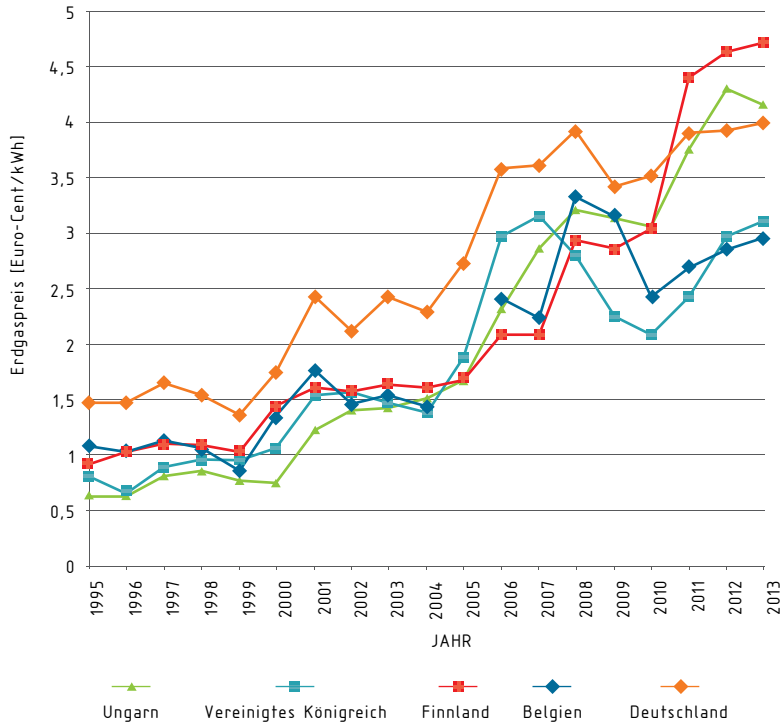


**Abbildung 1: Internationaler Preisvergleich der Elektrizität für die Industrie für einige beispielhafte Länder. Ab 2008 werden die Preise abhängig vom Verbrauch geführt, dargestellt sind Preise für einen Verbrauch zwischen 500 MWh und 2.000 MWh, basierend auf Energiedaten<sup>5</sup>**

Nach einer Erhebung des Statistischen Bundesamtes aus dem Jahr 2014 sind im verarbeitenden Gewerbe durchschnittlich lediglich 2 % des Bruttoproduktionswerts auf die Energiekosten zurückzuführen (vgl. Abbildung 3)<sup>6</sup>. Allein aufgrund der Energiekosten besteht daher für viele Unternehmen nur ein geringer Handlungsbedarf zur Senkung des Energieverbrauchs, im industriellen Umfeld wirken aber weitere Aspekte als Treiber für Energieeinsparungen. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ist z. B. für das Marketing ein „grünes“ Image zunehmend von Bedeutung. Politische Aspekte sind u. a. der europäische Emissionshandel sowie Steuervorteile durch die Anwendung von Umweltmanage-

<sup>5</sup> vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2013)

<sup>6</sup> vgl. Statistisches Bundesamt (2014)



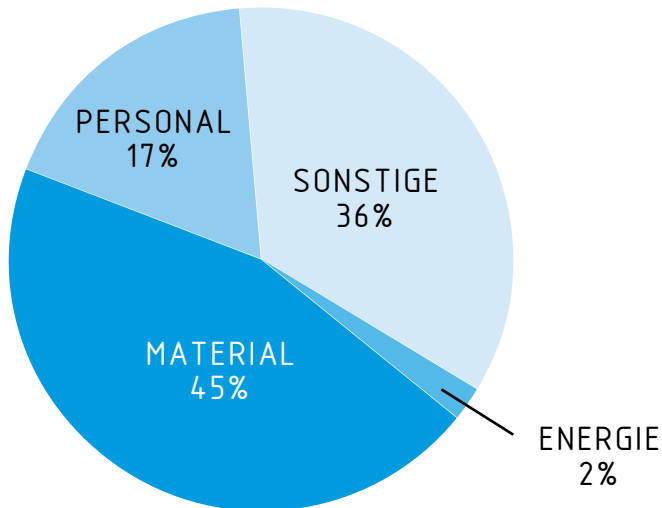
**Abbildung 2: Internationaler Preisvergleich für Erdgas in der Industrie für einige beispielhafte Länder – ab 2008 mit einem Verbrauch zwischen 100 TJ und 1.000 TJ, basierend auf Energiedaten<sup>7</sup>**

mentsystemen. Nicht zuletzt trägt die energieeffizienzgetriebene Technologieentwicklung zur Erschließung neuer Marktsegmente bei.

Neben einer optimalen Nutzung von Energie ist auch die möglichst effiziente Nutzung von Rohstoffen und Materialien für das verarbeitende Gewerbe von strategischer Bedeutung. Die Materialkosten haben dort mit 45 % den größten Anteil am Bruttoproduktionswert (vgl. Abbildung 3). Diese Kosten waren in den letzten Jahren starken Schwankungen unterworfen, wie am Beispiel des Aluminiumpreises zu sehen ist (vgl. Abbildung 4). Für Aluminium gibt der Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. (GDA) außerdem an,

<sup>7</sup> vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2013)





**Abbildung 3: Aufteilung des Bruttoproduktionswerts im verarbeitenden Gewerbe im Jahr 2012<sup>8</sup>**

dass der Bedarf jährlich steigt.<sup>9</sup> Ein Grund dafür ist, dass Aluminium heute bereits in vielen Wirtschaftszweigen von Verpackungen über Produkte im Bereich Mobilität bis hin zum Maschinen- und Anlagenbau eingesetzt wird. Durch die starken Schwankungen des Aluminiumpreises – allein im Jahr 2013 zwischen 626 € und 1617 € pro Tonne Rohaluminium – sind Unternehmen gezwungen, flexibel auf die Preissituation zu reagieren und effizient zu produzieren.

Aufgrund der zum Teil großen Schwankungen der Rohstoff- und Materialpreise sowie auch grundsätzlich steigender Kosten für Ressourcen wird es für produzierende Unternehmen immer wichtiger, keinen bzw. einen möglichst geringen Ausschuss zu produzieren und mit material- und energieeffizienten Produktionsprozessen wettbewerbsfähig zu bleiben (vgl. Abbildung 4).

<sup>8</sup> vgl. Statistisches Bundesamt (2014)

<sup>9</sup> vgl. Gesamtverband der Aluminiumindustrie (2014)

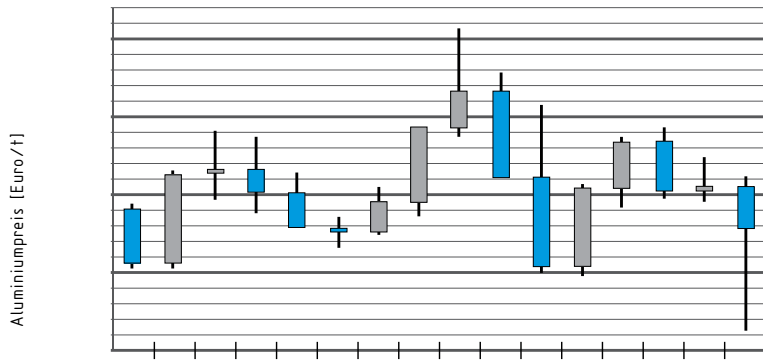


Abbildung 4: Preisvergleich von Aluminium bezüglich der Anfangs-, End-, Höchst- und Tiefstwerte zwischen den Jahren 1998 und 2013<sup>10</sup>

<sup>10</sup> vgl. Kurshistorie Aluminium (2014)

## 2 ZIEL DER KURZSTUDIE UND METHODIK

Das Ziel dieser Kurzstudie ist die Identifikation von Potenzialen für eine effizientere Nutzung von Material und Energie in Produktionsprozessen durch den Einsatz von Systemen zur Fertigungsdatenerfassung und -verarbeitung. Die Identifikation der Potenziale erfolgt in drei Schritten:

- Grundlage ist eine Literaturrecherche, die auch Forschungsansätze berücksichtigt.
- Darüber hinaus sind drei Experten aus unterschiedlichen Bereichen interviewt worden, um einerseits die Ergebnisse der Literaturrecherche zu ergänzen und andererseits die identifizierten Potenziale anhand von Beispielen zu veranschaulichen. Für ihre konstruktive Mitarbeit möchten wir uns ganz herzlich bei Herrn M. Steinhaus (Steinhaus Informationssysteme GmbH) sowie bei Herrn J. Heinz (Siemens AG, Bereich Condition Monitoring & Reliability) und Herrn Dr. S. Ihmels (Siemens AG, Bereich Energy & Environmental Services) bedanken.
- Um die Potenziale, die auf Basis der Literaturrecherche und der drei geführten Experteninterviews identifiziert wurden, auf eine etwas größere Basis zu stellen, ist eine kurze Online-Umfrage durchgeführt worden. An dieser haben sechs weitere Experten aus den Bereichen Produktion, Qualitätssicherung bzw. Energiemanagement aus unterschiedlichen Branchen teilgenommen, denen ebenfalls unser Dank gilt.

Bei der Darstellung grundlegender Aspekte zur Erfassung und Verarbeitung von Fertigungsdaten (vgl. Abschnitt 3) werden sowohl Initial- und wiederholende Messungen als auch die Messung von Daten in Echtzeit berücksichtigt. Identifizierte Potenziale der Fertigungsdatenerfassung und -verarbeitung werden anschließend erläutert und anhand von Beispielanwendungen veranschaulicht (Abschnitt 4).

Im Rahmen der Interviews sind alle Experten danach gefragt worden, welche Daten im jeweiligen Unternehmen in der Fertigung bzw. welche Daten durch das Produkt ihrer Firma in anderen Unternehmen erfasst werden. Eine weitere Frage adressiert die Nutzung der aufgenommenen Daten und ihre Aufbereitung zu Kennzahlen. Anschließend haben die Experten anhand von Beispielen erläutert, wie in ihrem Unternehmen die Material- und Energieeffizienz, basierend auf der Erfassung und Aufbereitung von Fertigungsdaten gesteigert wird bzw. wie ihr Softwareprodukt dazu beiträgt. Eine weitere Frage zielt auf die persönliche Einschätzung der Experten in Bezug auf die Bewertung der größten Potenziale sowie der Herausforderungen für Unternehmen bei der Umsetzung von Maßnahmen zur Steigerung der Material- und Energieeffizienz ab.

In der kurzen Online-Umfrage sind sechs weitere Experten nach der Datenerfassung im Unternehmen bzgl. der benötigten Energie und Ressourcen wie Strom, Druckluft, Kühlschmierstoff und Rohmaterial gefragt worden. Weiterhin gaben die Experten Auskunft, in welchen Intervallen die Datenerfassung geschieht und welche Kennzahlen im Unternehmen verwendet werden. Eine andere Frage zielt auch hier auf die persönliche Einschätzung der Experten bzgl. der größten Potenziale für die Material- und Energieeffizienz durch die Erfassung und Aufbereitung von Fertigungsdaten und die Bewertung dieser Potenziale für unterschiedliche Bereiche ab.

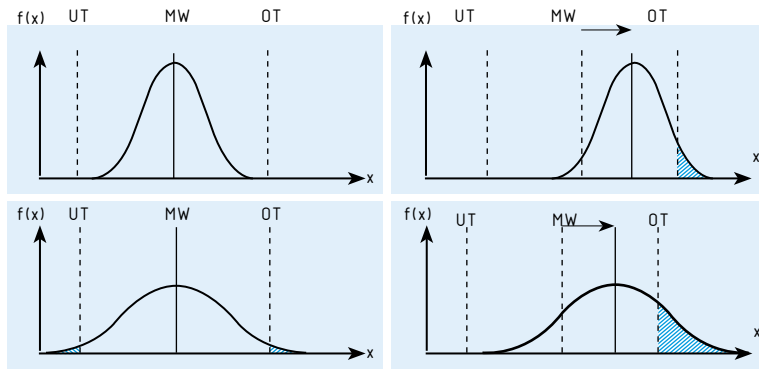
### 3 GRUNDLEGENDES ZU FERTIGUNGSDATENERFASSUNG UND -VERARBEITUNG

Grundvoraussetzung für geringen Ausschuss sind fähige Produktions- und Prüfprozesse. Der Produktionsprozess wird oftmals quantitativ mithilfe von Prozessfähigkeitsindizes ( $c_p$  bzw.  $c_{pk}$ ) beurteilt. Der Fähigkeitsindex  $c_p$  (nach DIN ISO 3534-2<sup>11</sup> und ISO 22514-1<sup>12</sup>) gibt das Verhältnis der Toleranzfeldbreite (Differenz aus oberer Toleranzgrenze OT und unterer Toleranzgrenze UT) zur Streuung des Produktionsprozesses an.

Der Index  $c_{pk}$  bezieht darüber hinaus die Zentrierung des Prozesses im Toleranzfeld mit ein. Für beide Indizes gilt: je höher der Wert für  $c_p$  bzw.  $c_{pk}$ , desto fähiger der Prozess. Je geringer der Produktionsprozess streut und je besser er zentriert ist, desto geringer wird die Ausschussmenge. Im Idealfall wird gar kein Ausschuss produziert, d.h. alle hergestellten Teile liegen innerhalb der oberen und unteren Toleranzgrenze (Abbildung 5, oben links). Sowohl eine zu große Streuung (Abbildung 5, unten links) als auch eine mangelnde Zentrierung des Produktionsprozesses (Abbildung 5, oben rechts) können zu Ausschuss, also zu Teilen außerhalb des Toleranzbereichs (schraffierte Flächen in Abbildung 5), führen. Eine Kombination aus mangelnder Zentrierung und zu großer Streuung führt in der Regel zu einem noch höheren Ausschuss (Abbildung 5, Seite 14). Aufgrund der Relevanz für Ausschuss, Material- und Energieeffizienz wird die Prozessfähigkeit in der Serienproduktion oftmals mittels statistischer Prozesskontrolle und Regelkarten überwacht.

<sup>11</sup> vgl. DIN EN ISO 3534-2:2013-12

<sup>12</sup> vgl. ISO 22514-1:2009-10



**Abbildung 5: Schematische Darstellung eines normalverteilten Produktionsprozesses mit Mittelwert (MW) sowie oberer und unterer Toleranzgrenze (OT bzw. UT) und Anteil fehlerhafter Teile (schraffierte Flächen) – o.l.: fähiger Prozess; o.r.: Prozess mit verschobenem Mittelwert; u.l.: zentrierter Prozess mit zu großer Streuung; u.r.: zu große Streuung und mangelnde Zentrierung des Prozesses**

Um die Fähigkeit des Produktionsprozesses zuverlässig beurteilen zu können und somit auch eine zuverlässige Aussage über den zu erwartenden Ausschuss treffen zu können, sind fähige Prüfprozesse notwendig. Die z. B. durch Probennahme beobachtete Prozessstreuung eines Produktionsprozesses ist immer eine Überlagerung der Streuung des Produktionsprozesses und der Unsicherheit des verwendeten Prüfmittels. Ein fähiger Prüfprozess bedeutet, dass das eingesetzte Prüfmittel geeignet ist, unter den herrschenden Randbedingungen das Prüfmerkmal hinreichend gut zu erfassen. Kennwerte, die die Eignung des Prüfprozesses beschreiben, variieren je nach Norm (z. B. ISO 22514-7<sup>13</sup>) oder Richtlinie (z. B. MSA<sup>14</sup> oder VDA Band 5<sup>15</sup>), auf deren Basis der Eignungsnachweis des Prüfprozesses erfolgt.

<sup>13</sup> vgl. ISO 22514-7:2010-12

<sup>14</sup> vgl. A.I.A.G. (2010)

<sup>15</sup> vgl. VDA (2010)

Neben Normen und Richtlinien zu Bewertung von Produktions- und Prüfprozessen gibt es auch immer mehr Normen, die direkt - auch im Rahmen von Umweltmanagementsystemen - Material- und Energieeffizienz Aspekte adressieren. Neben der DIN EN ISO 14031, einer Leitlinie zur Umweltleistungsbewertung von Unternehmen, adressieren andere Normen wie DIN EN ISO 14040 und 14044 speziell die Erstellung von Ökobilanzen. Um diese Normen weiter zu spezifizieren, hat die Europäische Kommission das „International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook“ herausgebracht, welches im JRC Reference Report von 2012 zusammengefasst ist. Auch wenn Ökobilanzen bzw. das „Life Cycle Assessment“ den gesamten Lebensweg eines Produkts betrachten - von der Entstehung über die Nutzung bis hin zur Entsorgung - können Daten aus der Fertigung zur Erstellung von Ökobilanzen beitragen und damit helfen, Produkte ressourceneffizienter zu gestalten.

### 3.1 INTEGRATIONSGRAD DER MESSTECHNIK, INITIAL-, WIEDERHOLENDE UND ECHTZEITMESSUNG

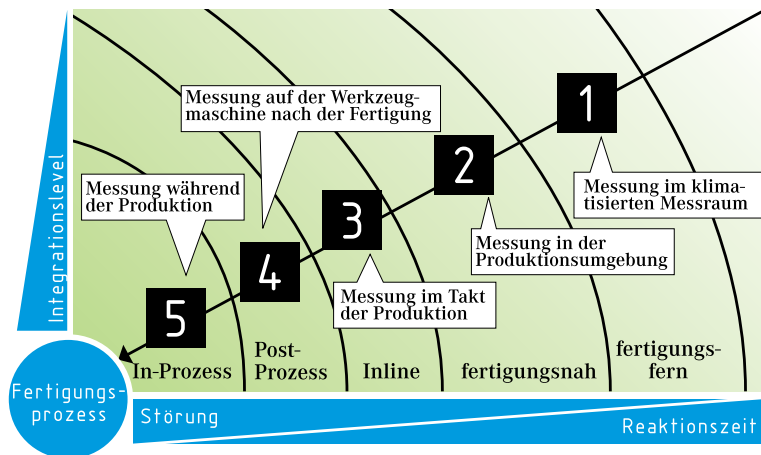
Während der Fertigung eines Produkts wird in vielen Firmen heute bereits eine große Menge an Daten aufgenommen. Eine konsequente Aufbereitung und Nutzung dieser Daten ist aber oftmals nicht sichergestellt. In einer Umfrage des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen von 2011 gaben 60 % der Befragten an, dass die Datennutzung im Unternehmen zu niedrig sei, und dass das aus Prüfprozessen gewonnene Wissen nicht ausreichend in andere Bereiche rückgekoppelt werde.<sup>16</sup>

Eine bewährte Methode, Daten zu bündeln und zu verknüpfen, ist das Bilden von Kennzahlen. Diese sind für Maßnahmen zur Steigerung des Nutzungs- und Leistungsgrades von Maschinen und Anlagen (Abschnitte 4.1 und 4.2) oft unabdingbar. Werden aufgenommene Daten zu Kennzahlen verarbeitet (vgl. Abschnitt 4.3) und als Entscheidungsgrundlage genutzt, bildet die Zuverlässigkeit dieser Daten

<sup>16</sup> vgl. Schmitt, R.; Lose, J. (2011)

einen entscheidenden Faktor, den es zu berücksichtigen gilt.

Generell ist jedes Datum mit einer Unsicherheit behaftet. Wie groß diese ist, hängt maßgeblich vom Prüf- bzw. Messprozess ab. Erst durch explizite Betrachtung und Ausweisung der Unsicherheiten werden die Daten zu nutzbaren Informationen. Mit zunehmendem Integrationsgrad in die Produktion steigen die Störeinflüsse auf den Prüfprozess an. Somit nimmt auch die Unsicherheit in der Regel zu, die Reaktionsdauer bei auftretenden Fehlern nimmt hingegen mit steigendem Integrationsgrad ab (vgl. Abbildung 6).<sup>17</sup> Sind Daten in Echtzeit bzw. Onlinedaten notwendig, um z. B. einen Fertigungsprozess zu regeln, müssen die Störeinflüsse auf den Messprozess in jedem Fall analysiert werden. Außerdem wird oftmals bei der Qualitätskontrolle von den Kunden ein Eignungsnachweis gefordert, der belegt, dass das eingesetzte Prüfsystem unter den gegebenen Randbedingungen hinreichend gut geeignet ist und die Anforderungen erfüllt.



**Abbildung 6: Integrationslevel der Messtechnik in die Produktion und der Einfluss auf Störungen und Reaktionszeit**<sup>18</sup>

<sup>17</sup> vgl. Damm, B.; Schmitt, R.; Rehbein, A.; Volk, R.; Warrikhoff, E.; Hanke, R.; Kasperl, S.; Funk, C.; Hiller, J.; Krumm, M.; Sukowski, F.; Uhlmann, N.; Behrendt, R. (2010)

<sup>18</sup> vgl. ebd.



Im Folgenden wird zwischen Initialmessungen, wiederholenden Messungen und Messungen in Echtzeit unterschieden. Unter Initialmessungen werden Messungen verstanden, die einmalig durchgeführt werden, zu Beginn einer Produktion oder aufgrund eines Auslösers. Auslöser für eine Messung können beispielsweise eine Verschlechterung der Qualität oder gestiegene Kosten sein. Durch die Messung besteht im Anschluss die Möglichkeit zur Optimierung der Maschinen und zur Sensibilisierung der Mitarbeiter für den Produktionsprozess. Eine Initialmessung kann z. B. die Ermittlung des Energieverbrauchs im Standby-Modus einer Maschine sein. Die Voraussetzung für sinnvolle Initialmessungen besteht darin, dass sich die gemessene Größe nicht mit der Zeit verändert bzw. eine solche Änderung vernachlässigbar klein ist. Wiederholende Messungen werden z. B. für die Kalibrierung von Maschinen und die Erfassung des Komponentenzustands eingesetzt. Aufgrund äußerer Einflüsse und Verschleiß kann sich der Zustand der Anlage mit der Zeit verändern. Dies geschieht aber in der Regel nicht so schnell, dass eine ständige Überwachung notwendig ist.

Messungen in Echtzeit sind dadurch gekennzeichnet, dass sie in der Regel in deutlich kürzeren Abständen durchgeführt werden als die wiederholende Messung. Außerdem sind sie oftmals stärker in den Fertigungsprozess integriert, sodass es sich – je nach Anforderung der Anwendung – um In-Prozess-, Post-Prozess- oder Inline-Messungen handelt. Neben externen Sensoren sind auch die Maschinen- bzw. Anlagensteuerung wichtige Lieferanten für Daten in Echtzeit. Die Aufnahme und Verarbeitung von Daten in Echtzeit ist begrifflich an die Definition der Echtzeit (oder im Englischen *real-time*) geknüpft. Nach ISO/IEC TR 18015<sup>19</sup> bezieht sich „weiche“ Echtzeit auf ein System, in dem die durchschnittliche Leistung und der Durchlauf bestimmte Ziele erfüllen müssen, aber noch eine Variation der Leistung einzelner Operationen zugelassen ist. „Harte“ Echtzeit bedeutet nach ISO/IEC TR 18015, dass jede Operation bestimmte zeitliche Limitationen erfüllen muss. Die Kernaspekte sind

<sup>19</sup> vgl. ISO/IEC TR 18015:2006-09

dabei die Erfüllung bestimmter definierter Ziele, welche abhängig von der Anwendung sind, bzw. die fest vorgegebene Zeitspanne zur Erfassung der Daten.

Onlinemessungen sind begrifflich als kontinuierliche und wiederholende Messungen mit hoher Messrate während des Prozesses zu verstehen, welche allerdings keine expliziten Anforderungen bezüglich der Echtzeitfähigkeit berücksichtigen. Ein einfaches Beispiel für weiche Echtzeitanforderungen sind Geschäftsprozesse, bei denen Fristen gesetzt sind, aber sich eine Verspätung nur wertmindernd auswirkt, die Prozesse dadurch aber ihren Wert nicht komplett verlieren. Anders verhält es sich beispielsweise mit technischen Steuerungs- und Regelungsaufgaben, welche sehr nah am physischen Fertigungsprozess sind. Dort ist das strikte Einhalten spezieller Takte Grundlage für den einwandfreien Fertigungsprozess.

Im Allgemeinen wird in diesem Zusammenhang angenommen, dass Signale außerhalb der Taktung wertlos sind. Verallgemeinert kann die Faustregel aufgestellt werden: Je prozessnäher eine Datenerfassung und -verarbeitung erfolgt, desto strikter sind die Echtzeitanforderungen einzuhalten, um schnelle Änderungen im Produktionsprozess zu erkennen. Zusätzlich muss dem Messsystem eine permanente Datenverarbeitung übergeordnet sein, sodass Änderungen direkt interpretiert werden können.

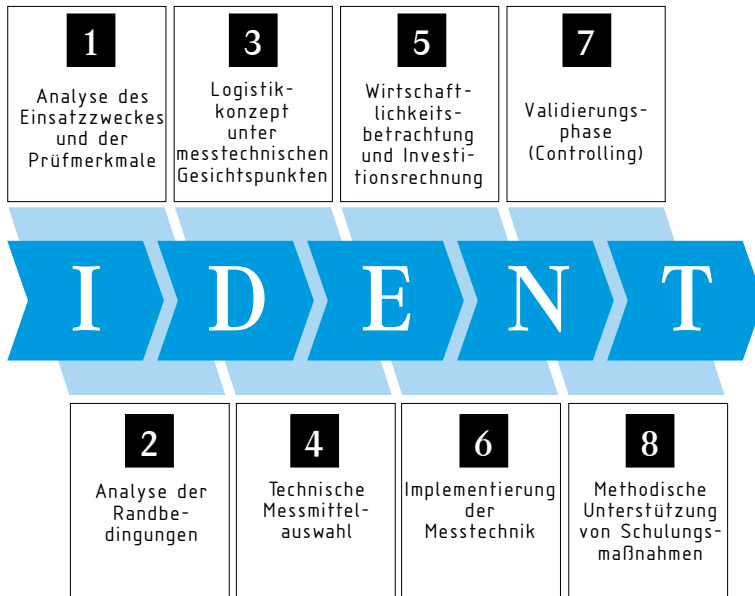
Der Nutzen einer Messung in Echtzeit besteht in der nahezu lückenlosen Prozesserfassung, die mit heutigen EDV-Systemen die Erfassung einer umfassenden Historie des Produktionsprozesses ermöglicht. Neben der betriebswirtschaftlich interessanten Auswertung der Historie mittels statistischer Werkzeuge besteht die technische Möglichkeit des Einsatzes von Planungs-, Regelungs- und Steuerungstechnik zur Verbesserung der Fertigungsqualität.<sup>20</sup>

<sup>20</sup> vgl. Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium (2014)

Die Datenerfassung ist bei einigen Maschinen oder Apparaten durch entsprechende Messtechnik bereits für Steuerungs- und Regelungsaufgaben integriert. Ist das nicht der Fall oder kann auf diese Messtechnik nicht von außen zugegriffen werden, ist der Einsatz externer Messtechnik unerlässlich. Die Anwendung externer Messtechnik zur Aufnahme von Prozessparametern online bzw. in Echtzeit ist immer individuell an den Prozess anzupassen. Daher ist es schwierig, allgemeingültige Aussagen zu treffen.

Gemeinsam ist solchen Anwendungen jedoch, dass die relevanten Prozessparameter zunächst identifiziert werden müssen, bevor eine Sensorauswahl und die Entscheidung bzgl. der Positionierung der Sensoren getroffen werden können. Werden bereits Prozessdaten aufgenommen, können diese hinsichtlich ihres Einflusses auf die Prozessqualität analysiert werden. Ist dies noch nicht der Fall, kann die Identifizierung relevanter Prozessparameter auf Basis des Vorwissens der Mitarbeiter, auf Grundlage von Literaturangaben oder von Vorversuchen erfolgen. Für einen Schleifprozess können z. B. Kraft und Geräuschemission relevante Parameter sein. Bei der Sensorauswahl werden zunächst die Randbedingungen festgelegt und verschiedene Sensorkonzepte analysiert. Die Auswahl erfolgt basierend auf technischen und wirtschaftlichen Aspekten. Für die systematische Auswahl eines geeigneten Messsystems kann z. B. die IDENT-Systematik hilfreich sein (Abbildung 7), wie von SCHMITT am Beispiel der optischen Prüfung von Landklappen aufgezeigt wird.<sup>21</sup>

<sup>21</sup> vgl. Schmitt, R.; Dietrich, B.; Lolling, A.; Zapf, C.; Chaineux D. (2007)



**Abbildung 7: Strategie-Tool „IDENT“ zur systematischen Auswahl von Messtechnik<sup>22</sup>**

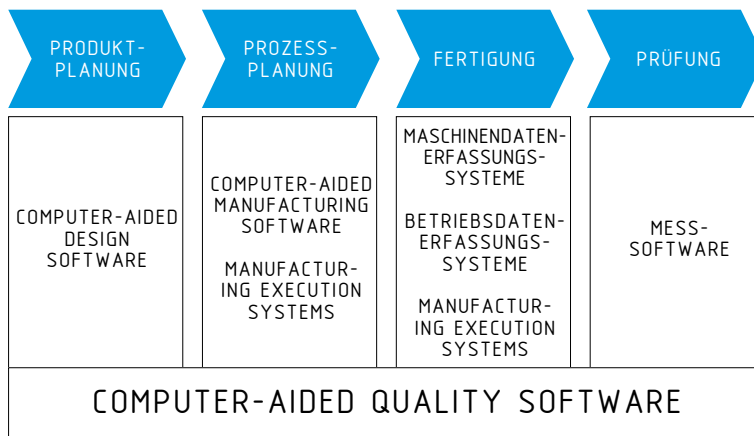
Der Einsatz von Messtechnik zur Aufnahme von Prozessparametern kann einerseits zur Prozessregelung verwendet werden, andererseits kann er auch mittel- bis langfristig zu einem besseren Prozessverständnis führen. Darauf basierend können unter anderem Folgeprozesse schneller und besser eingerichtet werden, was gerade in der Anlaufphase zu geringerem Ausschuss und somit zu einem niedrigeren Material- und Energieverbrauch führen kann. In den Bereichen Null-Fehler-Produktion und Anlaufmanagement werden aktuell zahlreiche Forschungsprojekte gefördert, sowohl von deutscher als auch von europäischer Seite<sup>23</sup>, so dass in Zukunft weitere Erkenntnisse in diesen Bereichen zu erwarten sind.

<sup>22</sup> vgl. Schmitt, R.; Dietrich, B.; Lolling, A.; Zapf, C.; Chaineux D. (2007)

<sup>23</sup> vgl. Zero-Defect manufacturing Clustering & Networking Initiative (2011)

### 3.2 SOFTWARESYSTEME ZUR PRODUKTIONSUNTERSTÜTZUNG

Die Speicherung und sinnvolle Aufbereitung von Daten gewinnt im Zuge der zunehmenden Digitalisierung und Vernetzung der Produktion immer mehr an Bedeutung. Daher steht einem Unternehmen auch eine Fülle an Softwarelösungen zur Verfügung, die sich auf unterschiedliche Aufgaben und Bereiche im Unternehmen beziehen (vgl. Abbildung 8). Hauptaufgaben dieser Systeme sind die Planung (des Produkts, des Produktionsprozesses, der Produktion) einerseits und die Überwachung bzw. Qualitätssicherung andererseits. Unterschieden werden unter anderem Maschinendatenerfassungssysteme (MDE) und Betriebsdatenerfassungssysteme (BDE) als Funktionen von Manufacturing Execution Systems (MES) sowie auf übergeordneter Ebene Enterprise Resource Planning Systeme (ERP). Bei der Produktentwicklung unterstützt darüber hinaus Computer-aided Design Software (CAD) und bei der Planung des Fertigungsprozesses Computer-aided Manufacturing Software (CAM).



**Abbildung 8: Auszug an Softwaresystemen für die Unterstützung des Produktentstehungsprozesses mit Fokus auf der Erfassung und Auswertung fertigungsrelevanter Daten**

Computer-aided Quality (CAQ) Software kann die gesamte Prozesskette – von der Planung des Produkts bis hin zur Endkontrolle – unterstützen. Einige zentrale Funktionen dieser Softwareprodukte und ihre möglichen Schnittstellen sind im Folgenden kurz beschrieben.

MDE-Systeme erfassen wesentliche Maschinendaten und können in der Regel auch auf die Maschinensteuerung zugreifen. Zu den erfassten Daten gehören unter anderem der Maschinenzustand (Hauptzeit, Nebenzeit und Instandhaltung), die Auslastung und der Energieverbrauch der Maschine. Neben den Daten der Maschine beinhalten BDE-Systeme auch Prozessdaten und Auftragsdaten wie z. B. Informationen zu Chargen- und Seriennummern sowie Fertigungszahlen (Gutteile, Ausschuss, Nacharbeit). Für das Management der Produktion können MES eingesetzt werden. Sie ermöglichen bzw. unterstützen die Produktionssteuerung und die Produktionsplanung und können über eine Schnittstelle direkt mit ERP-Systemen gekoppelt werden, welche gerade bei großen Unternehmen zur Unternehmenslenkung eingesetzt werden. MES beinhalten neben den Maschinen- und Betriebsdaten auch Qualitätsdaten und Personalzeitdaten, Produktdaten, logistische Daten sowie Fertigungsdaten, Feinplanungsdaten und Leistungsdaten.<sup>24</sup>

Aufgrund der Verknüpfung von MDE, BDE und MES bieten eine ganze Reihe Unternehmen diese Produkte aus einer Hand an. Um MES bis zu einem gewissen Grad zu standardisieren und die Auswertungen vergleichbar zu machen, hat der Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. die Richtlinie VDMA 66412-1<sup>25</sup> erarbeitet, in der von MES gebildete Kennzahlen standardisiert werden.

Ein weiteres Softwaresystem, das für die Planung des eigentlichen Fertigungsprozesses zum Einsatz kommen kann, ist das CAM-System. Basierend auf den CAD-Daten eines Bauteils erfolgt dabei die Bahnplanung der Maschine am

<sup>24</sup> vgl. VDMA (2009)

<sup>25</sup> vgl. VDMA (2009)

Computer. Dies ermöglicht auch die Simulation des Materialabtrags, basierend auf Modellen der Roh- und Fertigteile, sodass schon im Vorfeld der Teilefertigung der Materialverbrauch am Computer bestimmt werden kann. Softwaresysteme, die gerade im deutschsprachigen Raum sehr verbreitet sind, sind Computer-aided Quality (CAQ) Management Systeme. Ein CAQ-System ist modular aufgebaut und greift auf unterschiedliche Datenbanken und Systeme zu wie z. B. CAD, MES und ERP-Systeme.

#### 4 NUTZUNGSPOTENZIALE VON FERTIGUNGSDATEN FÜR EINE MATERIAL- UND ENERGIEEFFIZIENTE PRODUKTION

Zu den Daten, die ständig in der Fertigung anfallen, gehören u. a. Maschinen-, Prozess-, Produkt- und Auftragsdaten. Datenquellen sind neben der Maschinensteuerung weitere Sensoren und Zähler sowie Systeme der Auftragsdatenerfassung. Die Nutzung der Daten für die Gestaltung material- und energieeffizienter Prozesse ist möglich, wenn diese nicht nur entsprechend gespeichert, sondern auch miteinander verknüpft werden.

Die größten anhand der beschriebenen Vorgehensweise (vgl. Abschnitt 2) identifizierten Material- und Energieeffizienzpotenziale durch den Einsatz von Fertigungsdatenerfassung und -verarbeitung liegen in:

- der Steigerung des Nutzungsgrades z. B. durch die bedarfsgerechte Instandhaltung und Identifikation von Engpässen,
- der Steigerung des Leistungsgrades z. B. durch die Identifikation großer Verbraucher,
- der Ermittlung von Kennzahlen zur Bewertung der Ressourceneffizienz.

Daraus resultieren auch die wichtigsten Handlungsfelder für Unternehmen, um ihre Produktion material- und energieeffizienter zu gestalten. Wichtig für alle Handlungsfelder ist die umfassende und systematische Aufbereitung von Fertigungsdaten, welche heute ohne entsprechende Softwaresysteme (Abschnitt 3.2) undenkbar ist. Dieses begründet sich in der stetig steigenden Menge anfallender Daten aufgrund der sich erhöhenden Vernetzung der Produktion, u.a. ausgelöst durch die zunehmende Verbreitung von



cyber-physischen Systemen<sup>26</sup> (CPS). So ist es heutzutage möglich, jede Sekunde mehrere Hunderttausend Messstellen zu erfassen und die Daten über Jahre z. B. in skalierbaren, virtuellen Speichersystemen (Cloud-Systeme) hinweg zu speichern. Dies schafft die Grundlage für umfassende Datenanalysen. Jede dabei ermittelte Kennzahl kann allerdings nur so gut sein wie die zugrunde liegende Datenbasis, weshalb diese unabdingbar umfassend und valide sein muss. Nur so können zuverlässige Kennzahlen ermittelt und daraus auch zuverlässige Entscheidungen abgeleitet werden.

#### 4.1 STEIGERUNG DES NUTZUNGSGRADES

Allgemein wird unter dem Nutzungsgrad der Quotient aus dem erreichten Wert einer Größe und dem maximal möglichen Wert verstanden. Nach VDMA 66412-1 beschreibt der Nutzungsgrad für Werkzeugmaschinen und Anlagen den Quotienten aus Hauptnutzungszeit (der Zeit, in der die Maschine produziert) und Belegungszeit (der Zeit, in der die Produktionseinheit für die Ausführung eines Auftrags belegt wird). Eine Möglichkeit zur Steigerung des Nutzungsgrades von Produktionsmaschinen und -anlagen liegt in der Reduzierung von Störungen durch die Verbesserung des Fertigungsprozesses. Diese basiert auf dem Condition Monitoring, einer Aufnahme und Aufbereitung von Fertigungsdaten, welche hilft, ein besseres Prozessverständnis zu schaffen und eine bedarfsgerechte Instandhaltung ermöglicht.

In einem Beispiel zur Steigerung des Nutzungsgrades durch die kontinuierliche Verbesserung der Fertigung wird der Abfüllprozess von Flaschen in einer Brauerei betrachtet. In Flaschenabfülllinien werden vor und nach dem Füller Staustrecken eingebaut, um Kurzstopps von Anlagenteilen zu kompensieren. Kurzstopps sind störungsbedingte Unterbrechungen von weniger als fünf Minuten, welche nur

<sup>26</sup> Ein cyber-physisches System ist ein System, das reale (physische) Objekte und Prozesse mit informationsverarbeitenden (virtuellen) Objekten und Prozessen über offene, teilweise globale und jederzeit miteinander verbundene Informationsnetze verknüpft (laut Definition der VDI Fachausschüsse 7.20 und 7.21).

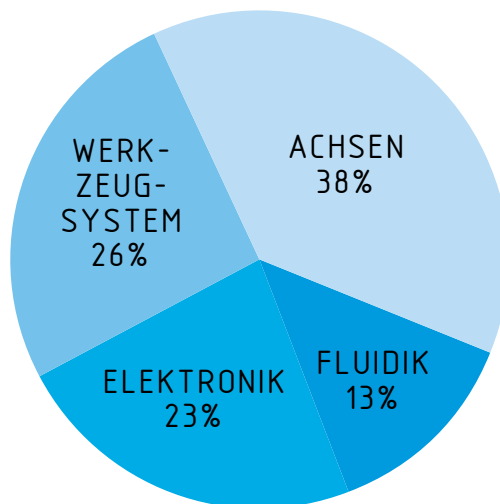
schwer vom betrieblichen Personal erfasst werden können. Durch den Einsatz von Messungen in Echtzeit können wiederkehrende Störungen analysiert, und um mehr als 10 % reduziert werden.<sup>27</sup> Dies führt zu einem besseren Nutzungsgrad der Anlage und zur Steigerung der Gesamtanlageneffizienz (OEE).

Erfasste Maschinen- und Anlagendaten können außerdem herangezogen werden, um die Notwendigkeit des Austauschs einzelner Komponenten oder der Wartung zu prognostizieren. Voraussetzung ist die Erfassung von Messwerten, die einen Rückschluss auf den Zustand einer Komponente bzw. Maschine oder Anlage zulassen. Die dafür herangezogenen Daten sind vielfältig. Sie können von der Laufzeitmessung einer Komponente, über die Erfassung von Schaltanzahlen bis hin zur Registrierung von Störungen und der Analyse verschiedener Prozessparameter in Kombination reichen. Hinweis auf den Ausfall einer Maschine kann die Dauer eines kritischen Maschinenzustands sein. Wird z. B. ein kritischer Temperaturbereich erreicht und über eine bestimmte Zeit nicht wieder verlassen, kann dies auf die Schädigung der entsprechenden Maschine bzw. einzelner Komponenten der Maschine hinweisen. Auch die Häufigkeit auftretender Störungen kann ein Hinweis auf die Notwendigkeit einer Wartung bzw. das Auswechseln einzelner Teile sein.

Das generelle Potenzial zur Einsparung von Material und Energie durch die frühzeitige Erkennung von Maschinen- bzw. Anlagenzuständen außerhalb des optimierten Bereichs wird von den Experten, die an der Online-Umfrage teilgenommen haben, unterschiedlich bewertet. Die Energie- und Materialeffizienzpotenziale werden von ihnen zum Teil als hoch bis sehr hoch eingeschätzt, zum Teil aber auch nur als mittelmäßig. Wie groß das Potenzial im Einzelfall ist, hängt vom Fertigungsprozess ab und ist vom Unternehmen zu bewerten.

<sup>27</sup> vgl. Steinhaus, H., Hofmann, L. (2010a)

Die Zustandsüberwachung der Maschinenkomponenten ist eine wichtige Anwendung von wiederholenden Messungen oder Messungen in Echtzeit. Ein Betreiben bis zum Ausfall der Komponenten ist für produzierende Unternehmen in der Regel nicht effizient, da Schäden zu unvorhergesehenen und zeitintensiven Instandsetzungen führen, was zwangsläufig mit einem Produktionsausfall verbunden ist. Fehlerhafte Komponenten führen oft wegen einer Nichteinhaltung der Spezifikationsgrenzen zu schlechter bis mangelhafter Qualität. Am Beispiel von Werkzeugmaschinen sind die Hauptausfallgruppen identifiziert worden.<sup>28</sup> Deutlich zu erkennen ist, dass in mehr als 50 Prozent der Fälle ein Ausfall der Maschine auf einen Ausfall der Achsen und des Werkzeugsystems zurückzuführen ist (Abbildung 9).



**Abbildung 9: Relative Ausfallwahrscheinlichkeit bezogen auf die Hauptausfallgruppen von Werkzeugmaschinen<sup>29</sup>**

Eine Methode, dem Ausfall der Werkzeugmaschine entgegenzuwirken, ist das Austauschen der Komponenten in festgelegten Intervallen ohne merklichen Grund. Die Intervalle

<sup>28</sup> vgl. Stockinger, M. (2011)

<sup>29</sup> vgl. ebd.

basieren dabei auf Ausfallstatistiken und Erfahrung des Betreibers oder Herstellers. Das vorzeitige Austauschen ist allerdings mit zwei Nachteilen verbunden: Zum einen sind die Austauschintervalle zwangsläufig deutlich zu kurz gewählt, da anderenfalls die Wahrscheinlichkeit eines vorzeitigen Versagens hoch ist. Zum anderen ist nach einem Austausch die Versagenswahrscheinlichkeit aufgrund von Montagefehlern höher. Bestenfalls wird eine Komponente daher erst kurz vor dem Versagen ausgetauscht. Eine Datenerfassung in Echtzeit ermöglicht dabei die Überwachung von Komponenten, so dass Rückschlüsse über den Zustand und somit über die Ausfallwahrscheinlichkeit gezogen werden können.<sup>30</sup> Bei mechanischen Bauteilen können so Materialermüdungen durch Schwingungen des Gesamtaufbaus registriert und durch eine permanente Datenerfassung visualisiert werden. Die auftretenden Schwingungen resultieren aus kleinsten Fehlern, welche die Maschine zum Schwingen anregen. Mittels geeigneter Messsysteme können diese Schwingungen gemessen werden, auf den aktuellen Komponentenzustand geschlossen werden kann.<sup>31</sup>

Ein weiteres Beispiel für die Erfassung eines Komponentenzustands, basierend auf Prozessparametern, ist der Verschmutzungsgrad eines Filters, der aus der Differenz der Drücke vor und hinter dem entsprechenden Filter ermittelt werden kann. Daraus kann die Notwendigkeit der Filterreinigung oder alternativ des Filteraustauschs abgeleitet und in den Betriebsablauf eingeplant werden. Die bedarfsgerechte Instandhaltung ist daher ein wichtiger Aspekt, der zur Steigerung des Nutzungsgrades beitragen kann, da Standzeiten für die Wartung gezielt eingeplant und Ausfallzeiten reduziert werden können.

Generell können beliebige Größen in der Fertigung überwacht werden. In der Praxis bietet sich hier die Möglichkeit, Standardgrößen wie Temperatur, Schwingung, Ist-Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung, Dehnung sowie

<sup>30</sup> vgl. Kolerus, J.; Wassermann, J. (2008)

<sup>31</sup> vgl. ebd.

Druck zu messen und in die Historie des Prozesses einzufügen. Durch diese Messungen ist es möglich, nicht nur Fehler frühzeitig zu erkennen, sondern auch den Material- und Energieverbrauch systematisch zu dokumentieren.

Ein weiteres Beispiel für die Steigerung des Nutzungsgrades einer Produktionsanlage ist die Anwendung eines externen Referenzsystems zur Regelung von Robotern. Mittels externer Messtechnik, welche Daten online zur Verfügung stellt, können aufwendige Teaching-Prozeduren deutlich verkürzt bzw. eliminiert werden. Dies kann insbesondere bei Großbauteilen nicht nur die Prozesszeit verkürzen, sondern auch Material einsparen, wenn durch die geregelte Interaktion von Robotern auf aufwendige produktspezifische Haltevorrichtungen verzichtet werden kann. Auch wenn dieses Thema weiterhin Inhalt der Forschung ist, finden sich bereits Anwendungen in der Industrie. So verwendet die Firma FFT Produktionssysteme GmbH & Co. KG beispielsweise Lasertracker für die roboterbasierte Stringerintegration in der Flugzeugmontage.<sup>32</sup>

## 4.2 STEIGERUNG DES LEISTUNGSGRADES

Der Leistungsgrad ist allgemein das Verhältnis aus der tatsächlich erbrachten Leistung zur Normalleistung bzw. zur geplanten Leistung. Der Leistungsgrad von Maschinen und Anlagen bzgl. der Material- und Energieeffizienz kann durch verschiedene Maßnahmen gesteigert werden. Dazu gehören die Implementierung von Standby-Mechanismen der gesamten Maschine bzw. einzelner Komponenten, die Identifikation großer Verbraucher und die Verbesserung der Produktionsplanung durch die Verknüpfung von Auftragsdaten mit Prozess- und Anlagendaten. Eine weitere Möglichkeit besteht, bezogen auf die Werkzeugmaschine, in der Verbesserung des Teillastverhaltens und in der Steigerung des Wirkungsgrads von Antrieben.

<sup>32</sup> vgl. Schmitt, R.; Böttcher, C.; Hüttemann, G.; Janßen, M.; Kartarius, B.; Lewerenz, T.; Ottong, A.; Peterek, M.; Wehn, M.; Wurl, S. (2014)

Ein Beispiel zur Steigerung des Leistungsgrades basiert auf der initialen Messung des Stromverbrauchs von Maschinen im Standby-Modus. Während der Betriebsferien bleiben die Maschinen längere Zeit ungenutzt, was zu nicht unerheblichen Kosten führen kann. Mit Hilfe von Leistungsmessungen kann ein Standby-Verbrauch ermittelt und eine Vergleichsrechnung durchgeführt werden. Aufgrund dieser Vergleichsrechnung kann objektiv entschieden werden, ob es günstiger ist, die Maschine im Standby-Modus zu lassen oder sie komplett auszuschalten. Ein Ausschalten hat den Nachteil, dass einige Maschinen eine gewisse Zeit brauchen, um wieder in den gewünschten Betriebszustand zu gelangen. Bis der Betriebszustand erreicht ist, verstreicht somit wertvolle Zeit, welche nicht produktiv genutzt werden kann. Zu evaluieren ist nun, ob es besser ist, wenige Mitarbeiter früher aus dem Urlaub zurückzuholen, um die Maschinen wieder anzufahren, als die Maschinen durchgehend im Betriebszustand zulassen.

Neben dem kompletten Abschalten einer Maschine besteht ein hohes Potenzial durch die Identifikation großer Verbraucher und die darauf aufbauende gezielte Verbesserung der technischen Systeme bzw. die gezielte Abschaltung dieser (Sub-)Systeme. Für die notwendige Datenerfassung und Auswertung der Anlagendaten bieten mehrere Dienstleister ein umfangreiches Energie- und Betriebsstoffmanagement an. Durch das Siemens eigene „Energy Analytics“ konnte z.B. eine Energieeinsparung im Werk Amberg von 200 MWh während der Weihnachtszeit (10 Tage) erzielt werden.<sup>33</sup> Dies wurde dadurch erreicht, dass auf Basis transparenter Informationen unnötiger Stromverbrauch identifiziert und verhindert werden konnte. Durch die ergriffenen Maßnahmen wurde der Stromverbrauch deutlich unter die Grundlast an produktionsfreien Wochenenden gesenkt.

Ein anderes Beispiel für die Steigerung des Leistungsgrades einer Anlage ist die Identifikation großer Verbraucher in Form von Leckagen in Druckluftsystemen. Druckluft-

<sup>33</sup> vgl. Ihmels, S. (2013)

systeme sind in Deutschland für ca. 7 % des industriellen Energiebedarfs verantwortlich.<sup>34</sup> Durch gezielte Messungen können Leitungen, Kupplungen und Ventile überprüft werden. Nach Studien des Fraunhofer Instituts für System- und Innovationsforschung ISI besteht in diesem Zusammenhang ein Optimierungspotenzial des Stromverbrauchs von bis zu 30 %.<sup>35</sup>

Ein weiteres Beispiel zur Reduzierung großer Verbraucher ist die Einsparung von 100.000 Liter flüssigem Stickstoff pro Jahr für eine Lötanlage<sup>36</sup> im Siemens Elektronikwerk in Amberg. Auf Basis der aufgenommenen Daten der Fertigung konnte ein unnötiger Stickstoffverbrauch der Anlage in produktionsfreien Zeiten identifiziert werden, welcher durch einfache betriebliche Maßnahmen unterbunden werden konnte.

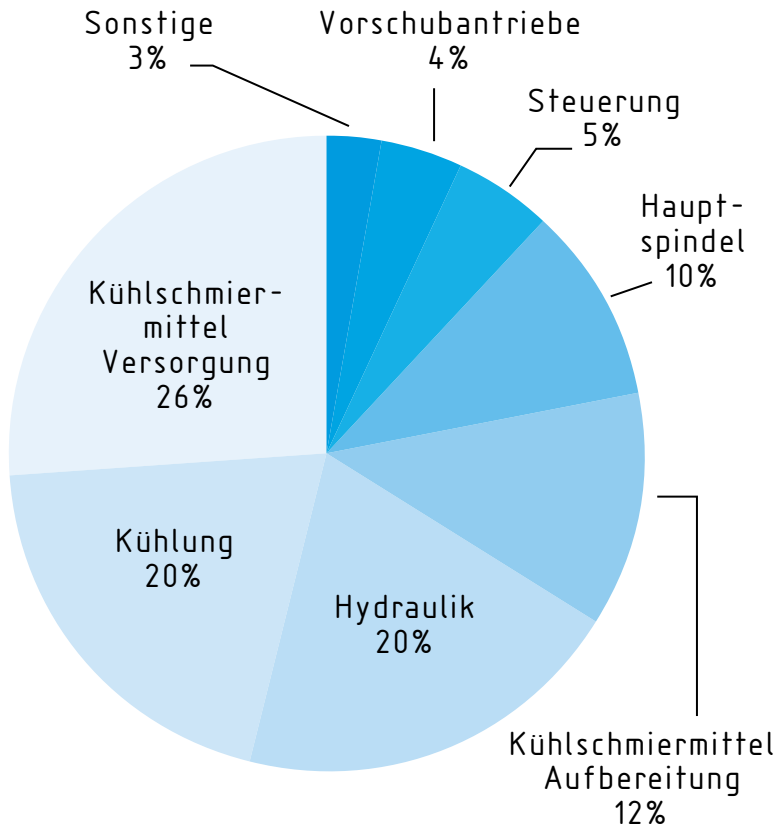
Der Energieverbrauch von Werkzeugmaschinen kann basierend auf Initial- und wiederholenden Messungen in Form von Stichproben verringert und somit ihr Leistungsgrad gesteigert werden. Im EWOTeK Projekt, das zwischen 2009 und 2012 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurde, ist dieser Energieverbrauch von Werkzeugmaschinen systematisch untersucht worden.<sup>37</sup> Bei der Darstellung des dort gemessenen Energieverbrauchs (vgl. Abbildung 10) fällt auf, dass die vier Komponenten Kühlschmiermittel-Versorgung, Aufbereitung des Kühlschmiermittels, Kühlung und Hydraulik zusammen bereits mehr als 75 % des Gesamtenergieverbrauchs ausmachen. In der Optimierung dieser vier Komponenten liegt somit auch das größte Potenzial zur Verbesserung der Energieeffizienz.

<sup>34</sup> vgl. Heyde, S. (2012)

<sup>35</sup> vgl. Blaustein, E.; Radgen, P. (2001)

<sup>36</sup> vgl. Ihmels, S. (2013)

<sup>37</sup> vgl. Brecher, C. (2012)



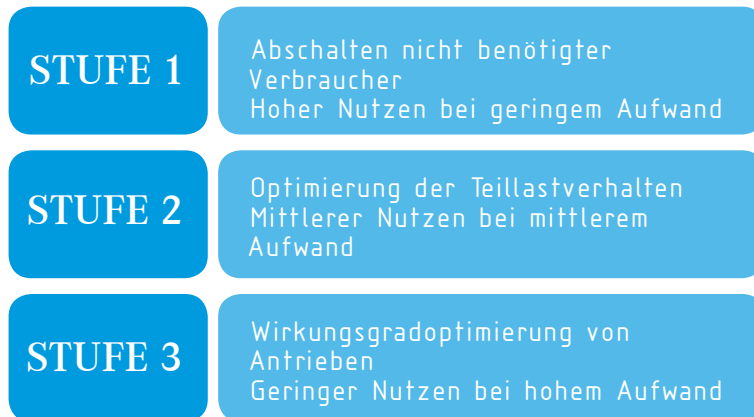
**Abbildung 10: Energieverteilung verschiedener Verbraucher am Demonstrator des EWOTeK-Projekts<sup>38</sup>**

Im Projekt ist dazu neben diversen technischen Lösungen eine Verbesserung in drei Stufen erarbeitet worden (vgl. Abbildung 11). In der ersten Stufe wird empfohlen, nicht benötigte Verbraucher abzuschalten. Der Nutzen der Maßnahme wird als hoch angesehen, wobei der Aufwand gering ist. Als zweite Stufe mit mittlerem Aufwand wird eine Optimierung des Teillastverhaltens durch drehzahlveränderbare Antriebe vorgeschlagen. Der Nutzen der zweiten Stufe fällt geringer aus als der der ersten Stufe, kann aber durch eine bedarfsorientierte Steuerung mit Visualisierung des

<sup>38</sup> vgl. Brecher, C. (2012)



Energieverbrauchs unterstützt werden. Die Visualisierung des Energieverbrauchs dient der Sensibilisierung des Nutzers, wobei der Verbrauch der gesamten Maschine erfasst werden muss. Zuletzt besteht in einer dritten Stufe die Möglichkeit zur Wirkungsgradoptimierung von Antrieben, was mit einem hohen Aufwand und verhältnismäßig geringem Nutzen verbunden ist.



**Abbildung 11: Potenzial zur Verbesserung des Energieverbrauchs an Werkzeugmaschinen<sup>39</sup>**

Der Leistungsgrad einer Maschine kann auch durch die geometrische Kalibrierung von Werkzeugen oder allgemein der produzierenden Maschine gesteigert werden. Die dadurch ermöglichte (online oder offline) Kompensation der ermittelten geometrischen Fehler der einzelnen Werkzeugmaschine resultiert in einer besseren Prozessfähigkeit. Dies führt auch zu einer Steigerung der Materialeffizienz, da der Ausschuss, also der Anteil fehlerhaft bearbeiteter Werkstoffe, gesenkt wird. Wichtige Aspekte sind dabei die Messunsicherheit, mit der die Geometriefehler der Achsen bestimmt werden können, sowie die Messzeit, da lange Messzeiten in der Regel auch zu teuren und unproduktiven Stillstandszeiten führen. Die Kalibrierung einer Maschine kann initial durchgeführt werden, sollte aber in regelmäßigen Abständen wiederholt werden.

<sup>39</sup> vgl. Brecher, C. (2013)

Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung des Leistungsgrades liegt in einer erhöhten Positioniergeschwindigkeit und einer Reduktion von Schwingungen in der mechanischen Struktur der Maschine durch eine geeignete Reglerwahl.<sup>40</sup> Dadurch erhöht sich die Fertigungsqualität bis hin zu wenigen Fehlteilen. Des Weiteren können regelungstechnische Maßnahmen helfen, die elektrische Verlustleistung der Antriebsströme zu minimieren.<sup>41</sup>

Bei der Einschätzung des Potenzials, den Fertigungsprozess auf Basis der Erfassung und Aufbereitung von Fertigungsdaten so verbessern zu können, dass dieser material- bzw. energieeffizienter gestaltet wird, gehen die Meinungen der online befragten Experten auseinander. Einige Befragte sehen in diesem Punkt ein hohes bzw. sehr hohes Potenzial, andere sehen die Material- und Energieeinsparungen durch die Verbesserung des Fertigungsprozesses als eher durchschnittlich bis geringer an, was wahrscheinlich durch die Branche mitbestimmt wird.

Einig sind sich die befragten Experten aber darin, dass sie die potenzielle Energieeinsparung durch die Behebung von Schwachstellen, basierend auf der Identifizierung großer Energieverbraucher als hoch bis sehr hoch einschätzen. Explizit genannt werden dabei auch hier die Implementierung von Standby-Mechanismen sowie die Identifikation und Beseitigung von Leckagen in Druckluftsystemen.

Mehrere Experten sehen zudem ein großes Potenzial in der Verknüpfung der Auftragsdaten mit Prozess- und Anlagendaten. Wird z. B. der Energieverbrauch einer Maschine für einzelne Prozessschritte erfasst, kann dieser bei der Planung weiterer Aufträge berücksichtigt werden. So ist es möglich, den Energieverbrauch für die Herstellung eines Produkts in Abhängigkeit von der Maschine und den notwendigen Fertigungsschritten zu prognostizieren und bei der Planung zu berücksichtigen. Eine hohe Relevanz

<sup>40</sup> vgl. Brecher, C. (2013)

<sup>41</sup> vgl. Heyers, C. (2013)

wird dem Bewusstsein im Unternehmen bezüglich der Nutzungsmöglichkeiten zugesprochen. Im Zusammenhang mit durchgängigen Systemlösungen, die Daten automatisch erfassen, speichern und auswerten, müssen zudem ein Bewusstsein und eine Akzeptanz gegenüber den Daten entstehen. Mit einer Ausnahme wird auch die Verbesserung der Produktionsplanung durch die Berücksichtigung von Maschinen- bzw. Anlagenzuständen in der Bedarfsmodellierung mit einem hohen Potenzial bzgl. der Steigerung der Material- und Energieeffizienz belegt.

#### 4.3 ERMITTLUNG VON KENNZAHLEN ZUR BEWERTUNG DER RESSOURCENEFFIZIENZ

Die regelmäßige Messung und Dokumentation von Prozessgrößen ist eine zentrale Anforderung an ein Energiemanagementsystem nach DIN EN ISO 50001.<sup>42</sup> Das Betreiben eines Energiemanagementsystems ist eine zentrale Bedingung zur Befreiung von der EEG-Umlage sowie zum Erlass oder zur Rückerstattung der Steuern aus Stromkosten. Hintergrund ist die Zielsetzung der Bundesregierung (Energiekonzept von 2010), den Primärenergieverbrauch bis zum Jahr 2020 um 20 % gegenüber dem Jahr 2008 zu senken. Die Maßnahmen sind Teil eines breiten Maßnahmenbündels, das u. a. darauf abzielt, Unternehmen in Deutschland zur kontinuierlichen Optimierung ihres Energieverbrauchs zu motivieren.

Grundsätzlich gilt, dass alle erfassten und gespeicherten Daten auf vielfältige Art und Weise aufbereitet und genutzt werden können entsprechend der Anforderungen des Kunden. Die rechnergestützte Analyse quantitativer Daten aus verschiedenen Perspektiven zur Identifikation von Mustern, ihre Kategorisierung und die Zusammenfassung potenzieller Beziehungen und Einflüsse werden auch unter dem Begriff „Data Mining“ zusammengefasst.<sup>43</sup> Unter diesem Überbegriff steht eine Vielzahl an Methoden zur Verfügung,

<sup>42</sup> vgl. DIN EN ISO 50001:2011-12

<sup>43</sup> vgl. ISO 16439:2014-04

wie z. B. die Kennwertbildung oder die Klassifikationsanalyse in Form von Entscheidungsbäumen.

Mithilfe gängiger auf dem Markt verfügbarer Softwaresysteme kann eine Vielzahl an Auswertungen erfolgen. Ein Standardkennwert, der in der Richtlinie VDMA 66412-1<sup>44</sup> definiert ist, ist die Overall Equipment Effectiveness (OEE) (1) oder auch Gesamtanlageneffizienz, ein Maß für den Wirkungsgrad. Die OEE berechnet sich als Produkt der Verfügbarkeit, Effektivität und Qualitätsrate:

$$\text{OEE} = \text{Verfügbarkeit} \cdot \text{Effektivität} \cdot \text{Qualitätsrate} \quad (1)$$

Der Kennwert OEE nimmt einen Wert zwischen 0 und 100 % an. Die Analyse kann bezogen auf eine Produktionseinheit, ein Produkt, einen Zeitraum oder eine Fehlerart durchgeführt werden. Die Verfügbarkeit (2) ist dabei definiert durch das Verhältnis der Hauptnutzungszeit (HNZ) zur Planbelegungszeit (PBZ), die Effektivität (3) als Produkt der Produktionszeit je Einheit (PEZ) und der produzierten Menge (PM) bezogen auf die Hauptnutzungszeit und die Qualitätsrate (4) als Quotient der Gutmenge (GM) und der produzierten Menge (PM):

$$\text{Verfügbarkeit} = \frac{\text{Hauptnutzungszeit}}{\text{Planbelegungszeit}} \quad (2)$$

$$\text{Effektivität} = \frac{\text{Produktionszeit je Einheit} \cdot \text{produzierte Menge}}{\text{Hauptnutzungszeit}} \quad (3)$$

$$\text{Qualitätsrate} = \frac{\text{Gutmenge}}{\text{produzierte Menge}} \quad (4)$$

Aus diesen Zusammenhängen ergeben sich für die Verbesserung der Overall Equipment Effectiveness mehrere Stellhebel: Die Hauptnutzungszeit kann z. B. durch eine bessere

<sup>44</sup> vgl. VDMA (2009)

Planung erhöht werden, was zu einem höheren Nutzungsgrad führen kann. Eine Verbesserung des Fertigungsprozesses kann darüber hinaus bewirken, dass mehr Produkte je Zeiteinheit gefertigt werden können, was die Effektivität erhöhen kann. Sie führt auch dazu, dass der Anteil der Gutmenge an der produzierten Menge steigt, sodass sich die Qualitätsrate erhöht. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass bereits eine standardisierte Kennzahl dazu beitragen kann, Stellhebel für eine effizientere Produktion zu identifizieren. Wie für alle Kennzahlen gilt aber, dass sie nur dann sinnvoll genutzt werden können, wenn eine entsprechende zuverlässige Datengrundlage existiert bzw. geschaffen wird.

Verbesserungspotenziale bzgl. des Leistungsgrades von Maschinen und Anlagen, bezogen auf ihren Energieverbrauch liegen außerdem in der Verbesserung der Fertigungsprozesse. Werden Parameter erfasst, die einen Rückschluss auf den Material- bzw. Energieverbrauch einzelner Prozessschritte zulassen, wie z. B. Wasserzähler, Stromzähler oder die Anzahl von Materialschüttungen, können daraus Kennzahlen gebildet werden, mit deren Hilfe die Prozesse bezüglich des Material- und Energieverbrauchs gezielt verbessert werden.

Ein Beispiel zur Stromersparnis ist die Visualisierung einer Druckluftkennzahl (elektr. Leistung/m<sup>3</sup>).<sup>45</sup> Durch diese kann dem Nutzer der Verbrauch dargestellt werden, woraus eine Sensibilisierung des Nutzers im Umgang mit der Maschine resultiert. Die Kennzahlen können prinzipiell beliebig an die gewünschten Ziele angepasst werden, wobei oft verwendete Kennzahlen der Strom pro umbauter Fläche, Wasser pro Prozessschritt und Energie pro Material sind. Die Merck KGaA konnte am Standort Darmstadt mithilfe gezielter Datenaufzeichnung und Onlineauswertung den Stromverbrauch einer Anlage um 20 % reduzieren.<sup>46</sup> Dazu wurde eine Druckluftkennzahl für Mitarbeiter online verfügbar gemacht, sodass diese auf Mengenänderungen im System mit entsprechenden

<sup>45</sup> vgl. Steinhaus, H.; Hofmann, L. (2010a)

<sup>46</sup> vgl. Schmeisser, R. (2009)

Schalthandlungen für Kompressoren reagieren können.

Auch die Darstellung des Energieverbrauchs über verschiedene Zeitintervalle oder Produktionseinheiten ist eine gängige Kennzahl. Wie bei allen Kennzahlen ist auch hier die Grundvoraussetzung, dass die für die Auswertung notwendigen Parameter zuvor erfasst wurden und in der Datenbasis vorhanden sind. Erfasst ein Unternehmen z. B. den Energieverbrauch einer Maschine über den Tag oder sogar bezogen auf einzelne Arbeitsschritte, kann dies mit entsprechenden Softwaresystemen ausgewertet werden. Hinterlegt das Unternehmen weiterhin einen Faktor je gebrauchte Energieeinheit, kann neben der verbrauchten Energiemenge auch die Darstellung der Kosten erfolgen. Es können für verschiedene Zielgruppen unterschiedliche Auswertungen hinterlegt werden. So kann es beispielsweise sinnvoll sein, Prozess- und Maschinenparameter grafisch aufzubereiten und dem Bediener in Echtzeit zur Verfügung zu stellen, damit dieser schnell auf Änderungen reagieren und ggf. korrigierend eingreifen kann. Für das Management sind hingegen die Prozessparameter einzelner Maschinen in der Regel nicht interessant. Dafür kann die Aufbereitung des Gesamtenergieverbrauchs nach Werk oder Produkt von Interesse sein.

Einen forschungsorientierten Lösungsansatz für die Berechnung ökologischer Indikatoren präsentiert das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik IPT mit der Software EcoIN.<sup>47</sup> In der Software stehen vordefinierte Indikatoren bspw. zu Material und Druckluft zur Verfügung. Darüber hinaus können Produktionsdaten über Schnittstellen zu ERP, MES etc. importiert und zur Kennzahlenbildung herangezogen werden. Die Analyseergebnisse können außerdem im nachfolgenden Schritt verwendet werden, um die Auswirkungen der Produktion auf die Umwelt zu bestimmen.<sup>48</sup> Grundsätzlich ist die Bildung von Kennzahlen fester Be-

<sup>47</sup> vgl. Schmitt, R.; Günther, S.; Niendorf, L.; Permin, E.; Plutz, M.; Vollmer, T. (2014)

<sup>48</sup> vgl. ebd.

standteil in den Unternehmen im Sinne eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KVP). So werden in allen im Rahmen dieser Studien befragten Unternehmen bereits aus den Fertigungsdaten Kennzahlen gebildet. Welche Kennzahlen dies sind, variiert von Unternehmen zu Unternehmen jedoch stark, genau wie die aufgenommenen Daten und die Häufigkeit, mit der diese erhoben werden. Die online befragten Experten stufen alle das Potenzial durchgängiger Systemlösungen, die Daten automatisch erfassen, speichern und auswerten als groß bis sehr groß ein.

## 5 HERAUSFORDERUNGEN FÜR UNTERNEHMEN BEI DER MATERIAL- UND ENERGIEEFFIZIENTEN PRODUKTIONSGESTALTUNG

Damit die material- und energieeffiziente Gestaltung der Produktionsprozesse gelingen kann, sind die Aufnahme und Aufbereitung von Fertigungsdaten Grundvoraussetzung. Dabei besteht eine Herausforderung in der Kombination aus technischen Daten und der Prozess Erfahrung der Mitarbeiter zur Identifikation relevanter Parameter, welche erfasst und bei der Auswertung berücksichtigt werden sollten. Wichtig ist es, die aufzunehmenden Parameter so zu wählen, dass für die Gestaltung material- und energieeffizienter Prozesse ein möglichst großer Nutzen aus den Daten gezogen werden kann. Bei der Auswahl der relevanten Parameter können beispielsweise Workshops helfen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt betrifft die Schaffung eines abteilungs- bzw. bereichsübergreifenden Bewusstseins für den Nutzen der Erfassung und Auswertung von Fertigungsdaten in Bezug auf die material- und energieeffiziente Gestaltung der Produktion. Diesem Punkt stimmen auch alle online befragten Experten zu. Dies gelingt in der Regel mit der Unterstützung des Managements besser, aber auch gezielte Schulungen der Mitarbeiter zu dem Thema können dazu beitragen, dass sich das Bewusstsein für die Material- und Energieeffizienzpotenziale durch die Erfassung und Aufbereitung von Fertigungsdaten verbreitet.

Eine Umfrage der KfW Bankengruppe von 2005 zeigt darüber hinaus, dass Unternehmen mit entsprechendem Energiefachpersonal Einsparpotenziale höher einschätzen und Energieeffizienzmaßnahmen häufiger umsetzen als Unternehmen, die nicht über entsprechendes Fachpersonal verfügen.<sup>49</sup> Von den dabei befragten Unternehmen gaben allerdings drei Viertel an, über kein spezielles Personal für Energieeffizienzfragen zu verfügen. Auch Kommunikationsstrukturen über Verantwortungsbereiche hinweg kön-

<sup>49</sup> vgl. KfW (2005), S.4



nen – abhängig von der Problemstellung – einen wichtigen Beitrag bei der Realisierung energie- und materialeffizienter Prozesse leisten. Stellt z. B. die Produktion fest, dass Merkmale an einem konstruierten Bauteil nur mit sehr energiereichen und zeitaufwendigen Fertigungsschritten produziert werden können, ist es in vielen Unternehmen schwierig, dies infrage zu stellen. Gleiches gilt für ggf. zu eng gewählte Toleranzen, die präzisere und damit oftmals energiereichere Fertigungsverfahren notwendig machen. Wird ein Unternehmen vor solche oder ähnliche Herausforderungen gestellt, ist die Unterstützung des Managements zwingend erforderlich, um die Implementierung energieeffizienter Fertigungsprozesse zu ermöglichen und eine bessere Verzahnung von Entwicklung, Planung und Produktion zu realisieren.

Eine ganz andere Herausforderung kann für Unternehmen auch in der Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Investitionen in Hard- und Softwarelösungen zur Erfassung und Auswertung von Fertigungsdaten liegen. Diese Investitionen beinhalten Kosten für die Anschaffung, Implementierung und Wartung bzw. regelmäßige Kalibrierung sowie für Schulungen der Mitarbeiter. Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Messtechnik gibt es in der Forschung Ansätze<sup>50</sup>. Aber auch die in dieser Studie aufgeführten Beispiele (vgl. Abschnitt 4) verdeutlichen, dass sich Investitionen in eine Fertigungsdatenerfassung und -auswertung lohnen können.

Einen Schub zur Investition in die Fertigungsdatenerfassung ist durch die zunehmende Digitalisierung der industriellen Produktion zu erwarten, wie sie in den Industrie 4.0<sup>51</sup> Umsetzungsempfehlungen beschrieben sind.<sup>52</sup> Die Unterstützung der zu betrachtenden Wertschöpfungsketten erfordert eine integrierte Datenerfassung, Datenauswertung

<sup>50</sup> z. B. Mersmann, C. (2012)

<sup>51</sup> Unter Industrie 4.0 werden die Verknüpfung von Fertigungsindustrie und Informationstechnik sowie damit verbundene Aktivitäten verstanden. Als einheitliche Basis für Industrie-4.0-Anwendungen hat der VDI/VDE GMA Fachausschuss 7.21 14.0-Komponenten, -Systeme und -Plattformen definiert.

<sup>52</sup> vgl. Plattform Industrie 4.0 (2014)

und Datenbereitstellung über den gesamten Lebenszyklus sowohl von Produkten als auch von Produktionsanlagen.<sup>53</sup> Dies ist nur möglich, wenn es eine abgestimmte Informations- und Dienstinfrastruktur gibt, die auf Standards der Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) basiert. Im Zuge der Umsetzung der Industrie 4.0-Ideen ist zu erwarten, dass hierbei Referenzmodell und Referenzarchitekturen entsprechende Vorgaben liefern werden.<sup>54</sup>

Je nach Produkt des Unternehmens kann auch die Einbeziehung von Lieferanten ein wichtiger Faktor in Richtung material- und energieeffizienter Fertigung sein. Gerade bei Firmen, die Gussrohlinge spanend zu einem Endprodukt verarbeiten, ist der Material- und Energieverbrauch stark davon abhängig, wie nah die Form des Rohlings bereits an der Kontur des Endprodukts ist. Können z. B. Hohlräume schon während des Gießprozesses angelegt werden, müssen diese später nicht erst gebohrt werden, wie das Beispiel zu Hohlräumen in Zylinderkopf und Motorblock im Umweltwirtschaftsbericht 2011 zeigt.<sup>55</sup>

Diese kurze, exemplarische Auflistung zeigt, dass die Herausforderungen bei der Realisierung material- und energieeffizienter Fertigungsprozesse sehr unterschiedlich sind und sowohl auf der technischen als auch auf der organisatorischen Ebene liegen können. Es reicht nicht, sie abstrakt und allgemein zu betrachten. Die Unternehmen müssen sich ihrer konkreten Herausforderungen bewusst werden, um diesen gezielt begegnen zu können.

<sup>53</sup> vgl. Epple, U. (2014)

<sup>54</sup> vgl. Usländer, T. (2014)

<sup>55</sup> vgl. Umweltbundesamt, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: (2011), S. 54

## 6 ZUSAMMENFASSUNG

Die wachsende Nachfrage und die daraus resultierende, teilweise temporäre Verknappung natürlicher Ressourcen am Markt führen zu steigenden und zum Teil auch stark schwankenden Preisen für Energie und Materialien für das verarbeitende Gewerbe. Neben ökonomischen Aspekten haben auch die politischen Rahmenbedingungen Einfluss auf unternehmerisches Handeln. Zu nennen sind hier z. B. der europäische Emissionshandel oder Steuervorteile durch die Anwendung von Energie- und Umweltmanagementsystemen. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ist für das Marketing ein „grünes“ Image zunehmend von Bedeutung. Schließlich findet der Umgang mit Ressourcen auch verstärkt in gängigen Standards und Normen Eingang. Im Ergebnis führen diese Aspekte dazu, dass eine material- und energieeffiziente Fertigung heute in vielen Unternehmen zur Steigerung der eigenen Wettbewerbsfähigkeit angestrebt wird. Die Nutzungspotenziale der IKT in einem Industrie-4.0-Umfeld – von der Sensorik über die Prozessdatenauswertung bis hin zur Mensch-Maschine-Schnittstelle – zeigt ein Beitrag des Fraunhofer Instituts für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung (IOSB).<sup>56</sup>

Für produzierende Unternehmen ergeben sich daraus folgende Handlungsfelder:

- Steigerung des Nutzungsgrades, z. B. durch die bedarfsgerechte Instandhaltung und Identifikation von Engpässen,
- Steigerung des Leistungsgrades, z. B. durch die Identifikation großer Verbraucher,
- Ermittlung von Kennzahlen zur Bewertung der Ressourceneffizienz.

<sup>56</sup> vgl. Frey, C.; Heizmann, M.; Jasperneite, J.; Niggemann, O.; Sauer, O.; Schleipen, M.; Usländer, T.; Voit, M. (2014)

Herausforderungen für Unternehmen bei der Adressierung dieser Handlungsfelder sind u. a.:

- die Schaffung eines abteilungs- und bereichsübergreifenden Bewusstseins für den Nutzen der Fertigungsdatenerfassung und -auswertung,
- Kommunikationsstrukturen auch über einzelne Verantwortungsbereiche hinweg, um z. B. eine bessere Verzahnung von Entwicklung, Planung und Produktion in Bezug auf eine material- und energieeffiziente Fertigung zu erreichen,
- die Wahrnehmung der essenziellen Bedeutung und Nutzung der Informations- und Kommunikationstechnik für die material- und energieeffiziente Produktion und Fertigung, und damit einhergehend, die zunehmende Bedeutung des Software-Engineerings in Entwicklung und Betrieb von Produktionsanlagen im Sinne der Industrie 4.0-Konzepte.

## LITERATURVERZEICHNIS

**A.I.A.G.:** Chrysler Corp., Ford Motor Co., General Motors Corp., Measurement Systems Analysis, Reference Manual, 4. Auflage, Michigan/USA, Juni 2010.

**Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium (Hrsg.):** Industrie 4.0 – Aachener Perspektiven, Tagungsband, Aachen 2014.

**Brecher, C. (Hrsg.):** Effizienzsteigerung von Werkzeugmaschinen durch Optimierung der Technologien zum Komponentenbetrieb – EWOTeK, Aachen 2012.

**Brecher, C.:** Schwingungsdämpfung in Werkzeugmaschinen. In: Wt Werkstatttechnik Online 5 (2013), S. 388–394.

**Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR):** Energiestudie 2013 – Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen (17), Hannover 2013, [www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Produkte/energiestudie2013\\_Zusammenfassung.html](http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Produkte/energiestudie2013_Zusammenfassung.html)

**Blaustein, E.; Radgen, P.:** Compressed Air Systems in the European Union, Stuttgart 2001.

**Bundesministerium für Wirtschaft und Energie:** Internationaler Energiepreisvergleich für Industrie, 2013, [www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/Energiedaten/energiepreise-energiekosten.html](http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/Energiedaten/energiepreise-energiekosten.html), abgerufen: 18.09.2014.

**Damm, B.; Schmitt, R.; Rehbein, A.; Volk, R.; Warrikhoff, E.; Hanke, R.; Kasperl, S.; Funk, C.; Hiller, J.; Krumm, M.; Sukowski, F.; Uhlmann, N.; Behrendt, R.:** Measurement of shafts in the production process based on x-rays, Optics, Photonics and Digital Technologies for Multimedia Applications, Proceeding of SPIE, Vol 7723 (2010).

- DIN EN ISO 14044:2006-10**, Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
- DIN EN ISO 14040:2009-11**, Deutsches Institut für Normung e.V.: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
- DIN EN ISO 50001:2011-12**, Energiemanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
- DIN EN ISO 14031:2013-12**, Umweltmanagement - Umweltleistungsbewertung - Leitlinien, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
- DIN EN ISO 3534-2:2013**, Statistik - Begriffe und Formelzeichen - Teil 2: Angewandte Statistik, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
- Epple, U. (Hrsg.):** Industrie 4.0 - Wertschöpfungsketten. VDI Statusreport. VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, Düsseldorf, April 2014, [www.vdi.de/industrie40](http://www.vdi.de/industrie40), abgerufen: 18.09.2014.
- Frey, C.; Heizmann, M.; Jasperneite, J.; Niggemann, O.; Sauer, O.; Schleipen, M.; Usländer, T.; Voit, M.:** IKT in der Fabrik der Zukunft - Beitrag der Industriellen Informations- und Kommunikationstechnik zu Industrie 4.0, atp edition 4/2014.
- Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V.:** Aluminiumindustrie, [www.aluinfo.de/index.php/aluminiumindustrie.html](http://www.aluinfo.de/index.php/aluminiumindustrie.html), abgerufen: 09.07.14.
- Heyde, S.:** Energieeffiziente Druckluftsysteme, Industrie und Handelskammer Hannover 2012.

- Heyers, C.:** Energieeffizienter Betrieb von Asynchron-Hauptspindelantrieben in Werkzeugmaschinen, Aachen 2013.
- Ihmels, S.:** Energiemanagement auch für kleinere Industrieunternehmen, BWK 65 (2013), Nr. 11/12, S. 2-4.
- ISO/IEC TR 18015:2006-09,** Information technology - Programming languages, their environments and system software interfaces - Technical Report on C++ Performance, ISO International Organization for Standardization, Genf/Schweiz.
- ISO 22514-1:2009-10,** Statistical methods in process management - Capability and performance - Part 1: General principles and concepts, ISO International Organization for Standardization, Genf/Schweiz.
- ISO 22514-7:2010-12,** Statistical methods in process management - Capability and performance - Part 7: Capability of measurement processes, ISO International Organization for Standardization, Genf/Schweiz.
- ISO 16439:2014-04,** Information and documentation. Methods and procedures for assessing the impact of libraries, ISO International Organization for Standardization, Genf/Schweiz.
- Joint Research Centre, European Commission:** JRC Reference Reports - The International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook 2012, publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/111111111/25589
- Kolerus, J.; Wassermann, J.:** Zustandsüberwachung von Maschinen, Renningen 2008.

**KfW:** KfW-Befragung zu den Hemmnissen und Erfolgsfaktoren von Energieeffizienz in Unternehmen, 2005, [www.kfw.de/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Sonderpublikationen/Sonderpublikation.pdf](http://www.kfw.de/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Sonderpublikationen/Sonderpublikation.pdf), abgerufen: 18.09.2014.

**Kurshistorie Aluminium (2014):** Kurshistorie Aluminium: [www.boerse.de/historische-kurse/Aluminium/XC0009677839](http://www.boerse.de/historische-kurse/Aluminium/XC0009677839), abgerufen: 18.09.2014, 10:38.

**Mersmann, C.:** Industrialisierende Machine-Vision-Integration im Faserverbundeleichtbau, Dissertation, Aachen 2012.

**Plattform Industrie 4.0:** Was Industrie 4.0 (für uns) ist. [www.plattform-i40.de/blog/was-industrie-40-für-uns-ist](http://www.plattform-i40.de/blog/was-industrie-40-für-uns-ist), abgerufen: 15.12.2014.

**Schmeisser, R.:** Energiemanagementsysteme der Energieversorgung, Merck Darmstadt, VIK Mitteilungen, 04/2009, [www.steinhaus-informationssysteme.de/fileadmin/Veroeffentlichungen/Artikel/Energie\\_und\\_Entsorgungswirtschaft/2009\\_04\\_VIK\\_SD\\_Mitt\\_Steinhaus.pdf](http://www.steinhaus-informationssysteme.de/fileadmin/Veroeffentlichungen/Artikel/Energie_und_Entsorgungswirtschaft/2009_04_VIK_SD_Mitt_Steinhaus.pdf), abgerufen: 18.09.2014.

**Schmitt, R.; Dietrich, B.; Lolling, A.; Zapf, C.; Chaineux D.:** Automatisierung der Oberflächenprüfung von Landeklappen, VDI-Z Integrierte Produktion, 149 (2007), Nr. 6, S. 67-70.

**Schmitt, R.; Lose, J.:** Umfrage Prüfprozessmanagement - Aktueller Umgang mit Prüfprozessen im Unternehmen, 2011, [www.wzl.rwth-aachen.de/de/d3cdf0d625b74a59c-1257b7a00433a9c/umfrage\\_pruefprozessmanagement.pdf](http://www.wzl.rwth-aachen.de/de/d3cdf0d625b74a59c-1257b7a00433a9c/umfrage_pruefprozessmanagement.pdf), abgerufen: 18.09.2014.



**Schmitt, R.; Böttcher, C.; Hüttemann, G.; Janßen, M.; Kartarius, B.; Lewerenz, T.; Ottong, A.; Peterek, M.; Wehn, M.; Wurl, S.:** Präzisionsfertigung und -montage von Großbauteilen, Tagungsband Aachener Werkzeugmaschinen Kolloquium, 22.-23.05.2014, Aachen 2014.

**Schmitt, R.; Günther, S.; Niendorf, L.; Permin, E.; Plutz, M.; Vollmer, T.:** Produktionsdaten nutzen – Prozesse nachhaltig verbessern, Tagungsband 18. Business Forum Qualität, 24.-25.09.2014, Aachen 2014.

**Statistisches Bundesamt:** Produzierendes Gewerbe – Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden, Wiesbaden 2014.

**Steinhaus, H.; Hofmann, L.:** Zukunftsfähig mit BDE (Teil 1), Brauwelt, Nr. 12-13 (2010), S. 355-357.

**Steinhaus, H.; Hofmann, L.:** Zukunftsfähig mit BDE (Teil 2), Brauwelt, Nr. 21-22 (2010) S. 632-634.

**Stockinger, M.:** Untersuchung von Methoden zur Zustandsüberwachung von Werkzeugmaschinenachsen mit Kugelgewindetrieb, Berichte aus dem Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik, Bd. 21, 1. Auflage, Aachen 2011.

**TECSON:** Infos Ölweltmarkt, [www.tecson.de/oelweltmarkt.html](http://www.tecson.de/oelweltmarkt.html), abgerufen:15.12.2014.

**Umweltbundesamt, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit:** Umweltwirtschaftsbericht 2011 – Daten und Fakten für Deutschland, Berlin 2011.

**Usländer, T. (Hrsg.):** Industrie 4.0 - Auf dem Weg zu einem Referenzmodell. VDI Statusreport. VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, Düsseldorf, Stand April 2014, [www.vdi.de/industrie40](http://www.vdi.de/industrie40), abgerufen: 15.12.2014.

**Verbraucherzentrale NRW:** Was beeinflusst die Energiepreise?, [www.vz-nrw.de/BWF4171A/link538801A.html](http://www.vz-nrw.de/BWF4171A/link538801A.html), Stand: 04.12.2014, abgerufen: 15.12.2014.

**Verband der Automobilindustrie e.V.:** VDA Band 5, Prüfprozesseignung, 2. Auflage, Berlin 2010.

**VDMA 66412-1:2009-10,** Manufacturing Execution Systems (MES) Kennzahlen, Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V., Frankfurt/Main.

**Zero-Defect manufacturing Clustering & Networking Initiative:** FoF.NMP.2011-5 [ifacom.ivt.ntnu.no/joomla/index.php/cluster-4zdm](http://ifacom.ivt.ntnu.no/joomla/index.php/cluster-4zdm), Stand 2011, abgerufen: 15.12.2014.

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

**Abbildung 1:** Internationaler Preisvergleich der Elektrizität für die Industrie für einige beispielhafte Länder  
**Seite 5**

**Abbildung 2:** Internationaler Preisvergleich für Erdgas in der Industrie für einige beispielhafte Länder  
**Seite 6**

**Abbildung 3:** Aufteilung des Bruttoproduktionswerts im verarbeitenden Gewerbe im Jahr 2012  
**Seite 7**

**Abbildung 4:** Preisvergleich von Aluminium bezüglich der Anfangs-, End-, Höchst- und Tiefstwerte zwischen den Jahren 1998 und 2013  
**Seite 8**

**Abbildung 5:** Schematische Darstellung eines normalverteilten Produktionsprozesses mit Mittelwert (MW) sowie oberer und unterer Toleranzgrenze (OT bzw. UT) und Anteil fehlerhafter Teile  
**Seite 12**

**Abbildung 6:** Integrationslevel der Messtechnik in die Produktion und der Einfluss auf Störungen und Reaktionszeit  
**Seite 14**

**Abbildung 7:** Strategie-Tool „IDENT“ zur systematischen Auswahl von Messtechnik  
**Seite 18**

**Abbildung 8:** Auszug an Softwaresystemen für die Unterstützung des Produktentstehungsprozesses mit Fokus auf der Erfassung und Auswertung fertigungsrelevanter Daten  
**Seite 19**

**Abbildung 9:** Relative Ausfallwahrscheinlichkeit bezogen auf die Hauptausfallgruppen von Werkzeugmaschinen  
**Seite 25**

**Abbildung 10:** Energieverteilung verschiedener Verbraucher am Demonstrator des EWOTeK-Projekts  
**Seite 30**

**Abbildung 11:** Potenzial zur Verbesserung des Energieverbrauchs an Werkzeugmaschinen  
**Seite 31**



VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)  
Bertolt-Brecht-Platz 3  
10117 Berlin  
Tel. +49 30-27 59 506-0  
Fax +49 30-27 59 506-30  
zre-info@vdi.de  
www.ressource-deutschland.de

Im Auftrag des



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz,  
Bau und Reaktorsicherheit



NATIONALE  
KLIMASCHUTZ  
INITIATIVE