



# Leitfaden Design für Industrie 4.0

Ressourcen schonen durch digitale  
Technologien

# Leitfaden Design für Industrie 4.0

## Ressourcen schonen durch digitale Technologien

1. Auflage, Juni 2024

### Autorin:

Antje Klemichen, VDI Zentrum Ressourceneffizienz

Wir danken M.A. Ina Peters, wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Wissensdynamik und Nachhaltigkeit in den Technikwissenschaften des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb der Technischen Universität Berlin, für die fachliche Unterstützung.

### Redaktion:

VDI Technologiezentrum GmbH  
VDI-Platz 1  
40468 Düsseldorf

Die Broschüre wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz erstellt.

Das VDI Zentrum Ressourceneffizienz ist bei der VDI Technologiezentrum GmbH angesiedelt.

Titelbild: © PantherMedia / phonlamai

ÜBER DIESEN LEITFADEN	4
DIGITALISIERUNG ALS TREIBER FÜR EFFIZIENZ UND INNOVATION	5
VOM TRADITIONELLEN HANDWERK ZU INTELLIGENTEN PRODUKTEN	6
CHANCEN DURCH DIE DIGITALISIERUNG	8
ZENTRALE INHALTE DER INDUSTRIE 4.0	11
Handlungsfelder der Industrie 4.0	13
Komponenten der Industrie 4.0	14
DESIGN FÜR RESSOURCENEFFIZIENZ 4.0	28
SCHRITT 1: ANALYSE	29
Via Roadmap zu Industrie 4.0	32
SCHRITT 2: IDEENPOOL	35
Digitale Produktentwicklung	35
Digitalisierung von Produkten und Anlagen	37
SCHRITT 3: IMPLEMENTIERUNG	40
Szenarioanalyse	40
Nutzwertanalyse	41
FAZIT	43
GLOSSAR	44
LITERATUR	46

## ÜBER DIESEN LEITFADEN

Industrie 4.0 umfasst die Digitalisierung und Vernetzung von Produkten und Produktionsprozessen, wobei Technologien wie das Internet der Dinge (IoT), künstliche Intelligenz (KI) und Big Data eine zentrale Rolle spielen.

Der vorliegende Leitfaden dient als praktische Unterstützung für Unternehmen, die sich mit den Möglichkeiten und Herausforderungen der Industrie 4.0 auseinandersetzen möchten.

Mit dem Leitfaden erhalten Sie einen kompakten Einblick in die Welt der Industrie 4.0 und praxisnahe Umsetzungshilfen für die digitale Zukunft. Sie erfahren insbesondere, wie Technologien dazu beitragen können, die betriebliche Ressourceneffizienz entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu steigern, indem natürliche Ressourcen effizienter genutzt und auf diese Weise Kosteneinsparungen erzielt werden. Darüber hinaus zeigt der Leitfaden, wie Klimaschutz durch moderne digitale Lösungen gefördert wird und warum Industrie 4.0 als wesentliche Stellschraube für eine nachhaltige und wirtschaftlich erfolgreiche Unternehmensstrategie gilt.

Anhand eines Anwendungsbeispiels wird verdeutlicht, wie Unternehmen die ersten Schritte in Richtung Industrie 4.0 gehen können. Dabei werden ausgewählte Methoden und Gute-Praxis-Beispiele präsentiert, die

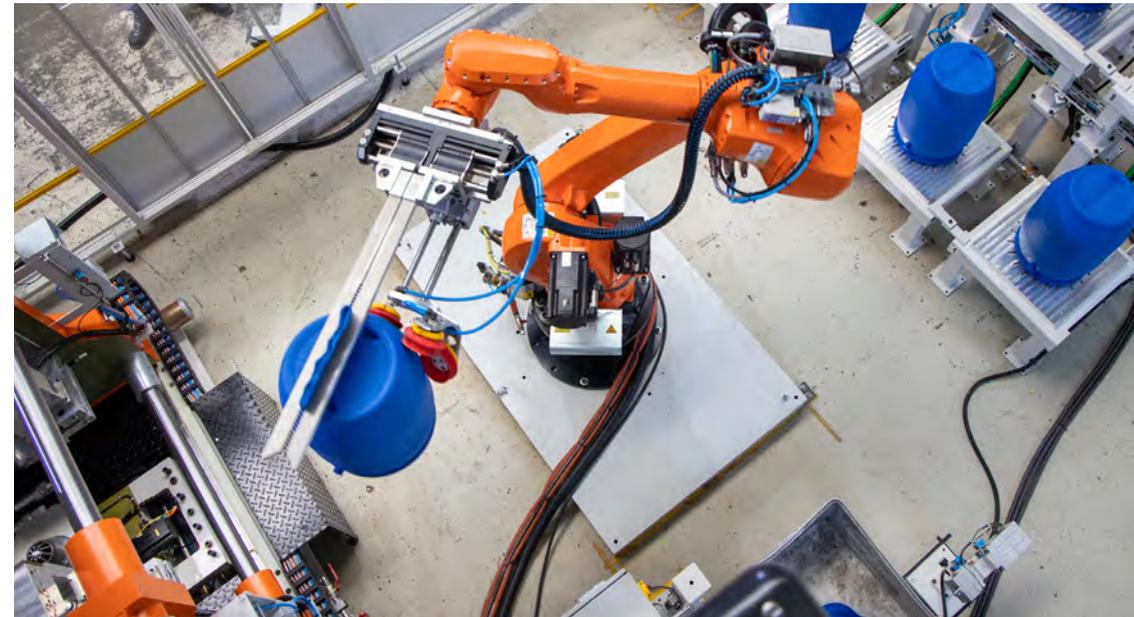
es Unternehmen ermöglichen, die Chancen der digitalen Transformation gezielt zu nutzen, Ressourcen einzusparen und ihre Wettbewerbsfähigkeit zu stärken.

Die in diesem Leitfaden vorgestellten Methoden sind Empfehlungen. Auf den jeweils verlinkten Internetseiten finden sich weiterführende Beschreibungen sowie Vorlagen zu den einzelnen Methoden. Bei der Auswahl sind die Erfahrungen der Unternehmen mit den jeweiligen Verfahren zu berücksichtigen.

## DIGITALISIERUNG ALS TREIBER FÜR EFFIZIENZ UND INNOVATION

Die Digitalisierung ist allgegenwärtig und steht für die zunehmende Durchsetzung von IT-Konzepten in bestehenden Produkten und Prozessen. Aufgrund vorhandener Informations- und Kommunikationstechnologien können Unternehmen bereits heute ihre Prozesse effizienter und effektiver gestalten. Gekoppelt mit innovativen Konzepten ermöglichen leistungsfähigere und kleinere Hardwarekomponenten neuartige Produkte und Dienstleistungen.

Dabei haben technologische Fortschritte in den Gebieten der künstlichen Intelligenz (KI), des Cloud Computing sowie in intelligenten Produkten sowohl im privaten als auch wirtschaftlichen Sektor an Popularität gewonnen. Mittels intelligenter Vernetzung der Systeme entfalten sich vielgestaltige Potenziale der Industrie 4.0. Sie dienen einer höheren Wertschöpfung und verhelfen zu Produktivitätsvorteilen bei steigenden Rohstoffpreisen.



© VDI ZRE

## VOM TRADITIONELLEN HANDWERK ZU INTELLIGENTEN PRODUKTEN

Die industrielle Entwicklung bis zum heutigen technologischen und gesellschaftlichen Stand kann in einzelne Entwicklungsstufen eingeordnet werden. Daher lohnt sich ein kurzer Blick in die Vergangenheit.

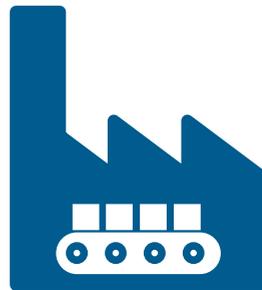
### Industrie 1.0: Mechanisierung



Mit Beginn der Industrialisierung (Ende des 18. Jahrhunderts) etablierten sich die ersten Maschinen, die durch **Wasser- und Dampfkraft** angetrieben wurden<sup>1</sup>.

Die Abwanderung der Arbeitskräfte aus der Landwirtschaft und dem Handwerk in die städtischen Fabriken veränderte die Arbeitswelt maßgeblich. Die erstmalige Nutzung mechanisierter Konzepte für industrielle Zwecke führte zu einer enormen Produktivitätssteigerung.

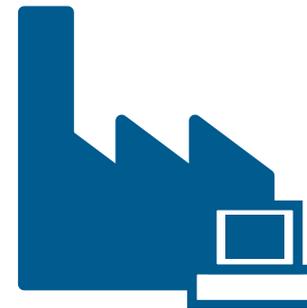
### Industrie 2.0: Massenproduktion



Die zweite industrielle Revolution (ab Ende des 19. Jahrhunderts) ist durch den Einsatz von **Elektrizität** anstelle von Wasser und Dampf gekennzeichnet. Auch die serienmäßige Massenproduktion (Erfindung des Fließbands) und die Telekommunikation lassen sich hier zeitlich zuordnen und gehen mit beschleunigten Arbeitsprozessen einher<sup>1</sup>.

Durch die Weiterentwicklung der Motoren veränderte sich ebenfalls die Logistik, sodass der Luft- und Schifffahrt globale Transporte über Kontinente hinweg ermöglicht wurden.

### Industrie 3.0: Automatisierung



Der Durchbruch der **Computertechnologie** gelang etwa ab den 1970er Jahren mit der Entwicklung des ersten funktionsfähigen Computers Z3 (frei programmierbar, voll-automatisch programmgesteuert).<sup>1</sup>

Diese Phase ist maßgeblich geprägt durch Informationstechnologien (IT) und die weitere Automatisierung durch Elektronik. Informationstechnologien sowie Elektronik und Speicher programmierbarer Steuerungen (SPS) trieben die weitere (Teil-)Automatisierung von Maschinen und Prozessen systematisch voran.

### Industrie 4.0: Digitalisierung



Die **ganzheitliche intelligente Vernetzung** unterschiedlicher Fertigungs-, Informations- und Kommunikationstechnologien sowie Organisationsaspekte im verarbeitenden Gewerbe wird unter Industrie 4.0 zusammengefasst.

In Deutschland wird das Thema seit 2011 intensiv diskutiert<sup>2</sup>, um die Relevanz für einen künftigen Paradigmenwechsel zu zeigen<sup>3</sup> und die Implementierung dieser Idee in die Unternehmenslandschaft voranzubringen<sup>4</sup>.

# CHANCEN DURCH DIE DIGITALISIERUNG

Die **digitale Transformation** ist in den Innovationsabteilungen größerer deutscher Unternehmen bereits fester Bestandteil zur Optimierung und Neugestaltung von Produktionsprozessen, Produkten und Geschäftsmodellen. Insbesondere die Rohstoffpreisentwicklung ist hierfür ein maßgeblicher Treiber. Gleichzeitig nimmt die **Nachhaltigkeitstransformation** Fahrt auf und wird in verschiedenen internationalen und nationalen Strategien sowie Regularien verpflichtend festgehalten (z. B. Ökodesignrichtlinie<sup>5</sup>, Agenda 2030<sup>6</sup>). So wird für das

2. Quartal 2024 eine weitere Novellierung der Ökodesign-Richtlinie erwartet. Ziel ist, die Kreislaufwirtschaft zu stärken und die Reparatur sowie Rückgewinnung von Rohstoffen zu fördern. Damit geht auch ein Verbot der Vernichtung von gebrauchsfähigen Produkten (u. a. Stahl und Aluminium) einher.

Die Hauptaufgabe für die Zukunft ist es somit, beide Pfade miteinander zu vereinen und die Industrie 4.0 als **Enabler** zur Schaffung ressourcenschonender innovativer Wertschöpfungsnetzwerke zu nutzen.

## Chance 1: Vorreiterrolle durch Innovation

Der Strukturwandel durch neue Technologien und Datentransparenz für innovative Geschäftsmodelle sichert die eigene Unternehmensposition im Wettbewerb.

Der Sprung von der reinen Automatisierung hin zur „disruptiven Prozessinnovation“<sup>7</sup> umfasst alle Komponenten (Maschinen, Produkte, Computer, logistische Systeme) des Wertschöpfungs-systems. Aus den Leuchtturmprojekten der Forschungslandschaften sind etablierte Technologien entstanden, die zunächst in größeren Unternehmen zu Innovationsschüben geführt haben<sup>8</sup>. Doch die Integration smarter Produkte und Dienstleistungen in ein digitalisiertes Ökosystem<sup>9</sup> birgt auch für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) zahlreiche nicht identifizierte Potenziale.

**„Industrie 4.0 hat in Deutschland [...] das Ziel, den Standort als Leitanbieter und Leitmarkt zu positionieren. Dies bietet auch besonders mittelständischen, exportorientierten Unternehmen aus dem Umfeld des Maschinen- und Anlagenbaus das Potential, sich als Vorreiter neuer innovativer Lösungen weltweit zu positionieren.“<sup>10</sup>**

## Chance 2: Einsparung von Ressourcen

Digitalisierung macht Ressourceneffizienz messbar und fördert die Umsetzung strategischer Maßnahmen durch z. B. den Einsatz von Echtzeit-Technologien.

Gemäß der Richtlinie VDI 4800 Blatt 1<sup>11</sup> bezeichnet Ressourceneffizienz die Fähigkeit, mit weniger Materialeinsatz (Input) bei vorgegebenen zu erzeugenden Output, wirtschaftliche und ökologische Werte zu schaffen.

In der genaueren Betrachtung umfasst der Begriff der „Ressource“ dabei die natürlichen Ressourcen, z. B. Energie und Material im Sinne von Roh-, Hilfs- sowie Betriebsstoffen.

Der Einsatz digitaler Technologien ermöglicht dabei nicht nur die Messbarkeit von Ressourceneffizienz, sondern befähigt Unternehmen gleichermaßen zur:

- Vermeidung von Fehlchargen durch die flexible Echtzeit-Steuerung von Prozessen in der Qualitätsüberwachung,
- Einsparung von Zeit und physischen Prototypen durch die zunehmende Digitalisierung der Produktentwicklung sowie
- Verbesserung der Transparenz von Produkten über ihren gesamten Lebensweg hinweg.

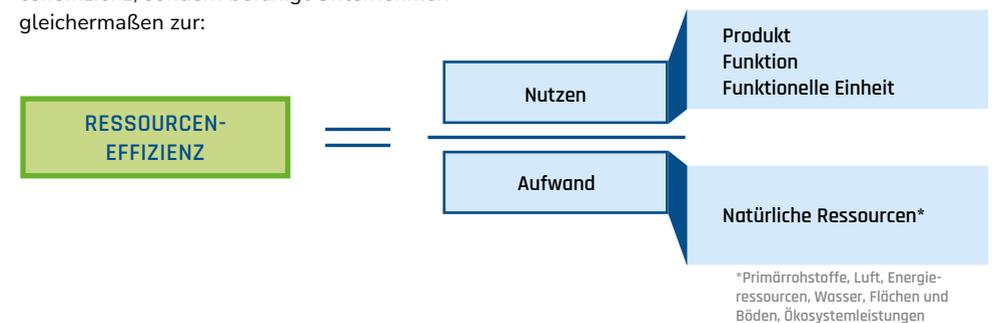


Abbildung 2: Ressourceneffizienz-Gleichung © VDI 4800 Blatt 1 Wiedergegeben mit Erlaubnis des Verein Deutscher Ingenieure e. V.<sup>11</sup>

### Chance 3: Stärkung durch Resilienz

Industrie 4.0 fördert neue Geschäftsmodelle in Kooperation mit Stakeholdern entlang der Wertschöpfungskette sowie eine flexiblere bedarfsorientierte Produktion bis Losgröße 1.

Zeichneten sich erfolgreiche Unternehmen in der Vergangenheit durch Robustheit aus, müssen sie heute schnell auf Änderungen der politischen Rahmenbedingungen, gesellschaftliche Forderungen oder Wirtschaftskrisen reagieren können<sup>12</sup>.

Somit stehen Resilienz und Effizienz vermeintlich in einem Zielkonflikt zueinander (z. B. erhöhte Lagerkapazitäten zur Bewältigung von Lieferkettenverzögerungen vs. Just-in-Time-Konzept<sup>13,14</sup>).

Adaptive und offene Wertschöpfungsketten aufgrund der „datentechnischen Integration aller industrieller Prozesse“<sup>12</sup> schaffen jedoch neue kooperative Geschäftsmodelle über den gesamten Produktlebenszyklus eines Produktes oder Produktsystems hinweg.

## ZENTRALE INHALTE DER INDUSTRIE 4.0

Die globale Wirtschaft zielt derzeit auf eine Neuorganisation und Steuerung der Wertschöpfungsketten. Entscheidend hierfür sind flexiblere bzw. individualisierte Produkt(system)e in enger Interaktion zwischen Unternehmen und Kundschaft<sup>15</sup>. Deutsche Unternehmen stoßen dabei auf digitale Ökosysteme und eine zunehmende Zahl an Industrie-4.0-Plattformen<sup>16</sup>.

Aus diesem Grund hat die deutsche **Plattform Industrie 4.0** einen Handlungsrahmen für die Verankerung des Leitgedankens Industrie 4.0 entworfen. Die **Handlungsfelder Interoperabilität, Nachhaltigkeit und Souveränität** dienen als Grundlage für ein gemeinsames Verständnis<sup>17</sup> (vgl. Abbildung 4). Auf dieser Basis wurde das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0) entwickelt und findet sich in der DIN-Norm und internationalen Vornorm (IEC PAS 63088) wieder<sup>18</sup>.



© PantherMedia / firefox

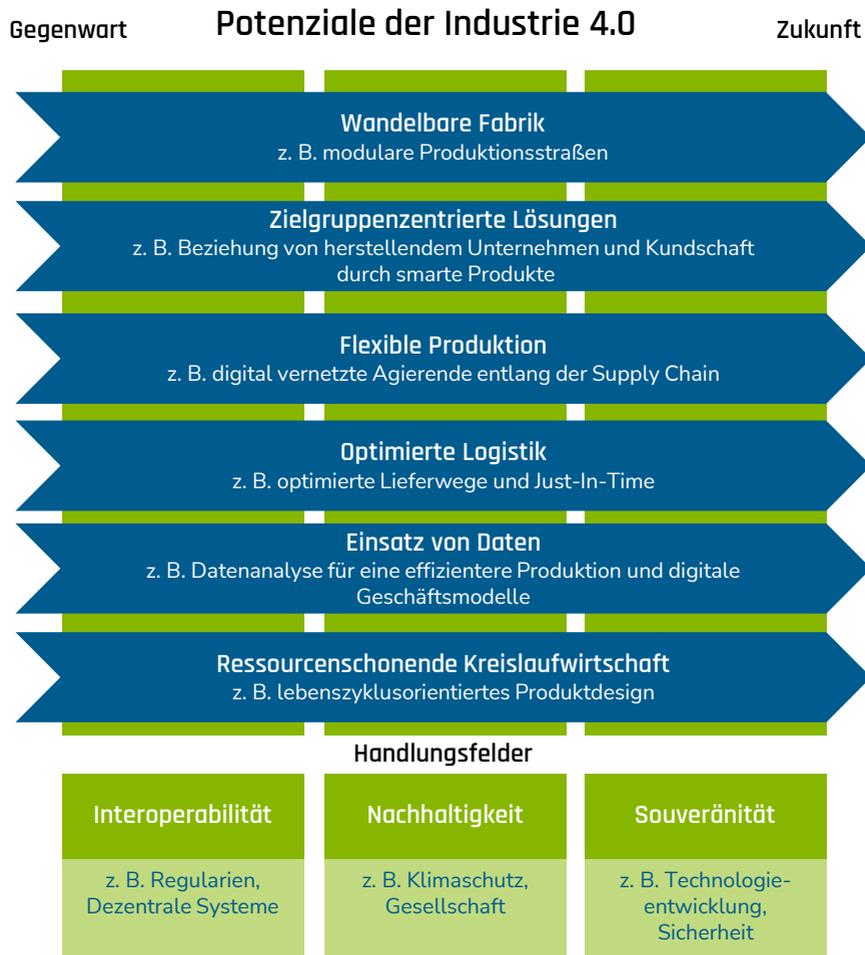


Abbildung 4: Handlungsfelder und Anwendungsgebiete der Industrie 4.0 © VDI ZRE unter Verwendung von Plattform Industrie 4.0<sup>19</sup>

### Handlungsfelder der Industrie 4.0

#### Interoperabilität

Durch den Maßstab der Interoperabilität soll eine „flexible Vernetzung unterschiedlicher Agierender zu agilen Wertschöpfungsnetzen“<sup>20</sup> erfolgen. Aufgrund des Einsatzes dezentraler Strukturen werden zunehmend Regularien für eine sichere und funktionierende Kommunikation der Anlagen und Geräte notwendig, u. a. in Form einheitlicher Standards.

#### Nachhaltigkeit

Dass technologische Innovationen einen gesellschaftlichen Wandel herbeiführen, haben die vorigen industriellen Revolutionen gezeigt. Daher ist eine gleichwertige Betrachtung ökologischer, sozialer und ökonomischer Belange grundlegend. Das Handlungsfeld Nachhaltigkeit beschreibt diese Anforderungen und Potenziale der Industrie 4.0 für gesellschaftliche Teilhabe, Bildung und Arbeit gleichwohl wie die Einhaltung der Klimaschutzziele<sup>21</sup>.

#### Souveränität

Das Handlungsfeld Souveränität umfasst das Verständnis einer offenen „leistungsstarken, souveränen Infrastruktur“. Der Wirtschaftsstandort Deutschland muss in diesem Zusammenhang gewährleisten, dass die innovativen Technologien auch in konventionelle Produktionsweisen integriert werden können. Eine Implementierung kann dabei nur unter Gewährleistung von Datenschutz, Informations- und IT-Sicherheit Erfolg haben.<sup>21</sup>



© VDI ZRE

### Komponenten der Industrie 4.0

Ein zentraler Baustein der Industrie 4.0 (vgl. Abbildung 6) ist das **Internet of Things (IoT)**. Die Verschmelzung von realer und virtueller Welt ist das Ergebnis des Einsatzes **Cyberphysischer Systeme (CPS)**. Aber auch ein besseres Verständnis für Produkte, Produktionssysteme sowie Geschäftsprozesse auf Basis von **Big Data** gehen damit einher.

Informationstechnologien mit höheren Prozessor- und Speicherleistungen unterstützen die Erfassung, Strukturierung und Auswertung großer Datenmengen und bilden die Grundlage zur Steuerung und Regelung zielgerichteter Prozesse<sup>22</sup>. Die Verwaltung von Echtzeit-Datenströmen wird von externen Cloud-Services übernommen, sodass der Betrieb von eigener Netzwerkinfrastruktur entfallen kann.

Im Zuge der digitalen Transformation sollen industrielle Prozesse, Produkte und Konsumgüter effizient und ressourcenschonend gestaltet werden. Wandlungsfähige Produktionsstraßen und additive Fertigungsverfahren können flexibel auf spezifische Zielgruppenwünsche reagieren.

Die intelligente Vernetzung von Anlagenkomponenten sowie **smarter Produkte** fördert den Datenaustausch zwischen den Agierenden entlang des Produktentstehungsprozesses und darüber hinaus. Der **Produktlebenszyklus** wird somit von der Herstellung bis zum Recycling transparenter, die Welt der Dinge wird „smart(er)“.

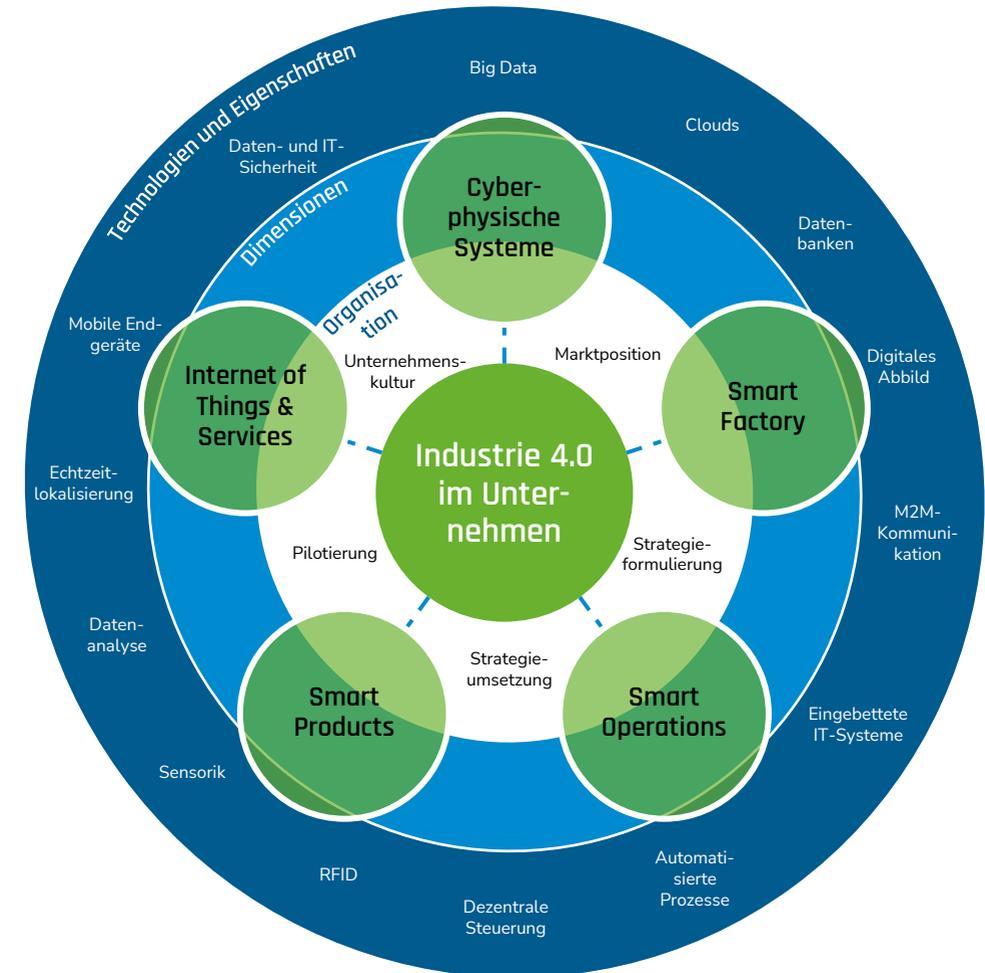


Abbildung 6: Dimensionen der Industrie 4.0 im digitalen Ökosystem © VDI ZRE unter Verwendung von IMPULS-Stiftung<sup>23</sup>

### Cyberphysische Systeme

Cyberphysische Systeme (CPS) bilden eine neue Generation von Systemen, die zunehmend im Alltag von Privatpersonen und insbesondere im industriellen Kontext genutzt werden.

Die Basistechnologie von CPS sind sog. **einbettete Systeme** (vgl. Abbildung 7). Auf physischer Ebene bestehen CPS aus Sensoren mit Rechenkernen, Aktoren, Benutzerschnittstellen sowie der assoziierenden digitalen Kommunikationstechnologie. Das System kann dabei Produktionsmaschinen, technische Gebäudeausrüstung und ganze Fabrikanlagen inklusive der Steuerungsparameter umfassen, die durch die Umwelt

beeinflusst werden. Auf Basis gesammelter Daten können diese Einflussfaktoren (z. B. Luftfeuchte, Temperatur) in Echtzeit erfasst, in Datenbankstrukturen gespeichert und verarbeitet werden. Auf logischer Ebene können über Kontroll- und Entscheidungsunterstützungsinformationen geeignete Maßnahmen abgeleitet werden, z. B. in Form von Analyse- und Prognoseansätzen – basierend auf Datamining oder Simulationsmethoden<sup>24</sup>.

CPS sind u. a. in der Umwelttechnik, Logistik und Industrieproduktion zu finden und können unterschiedliche Größendimensionen einnehmen<sup>25</sup>.

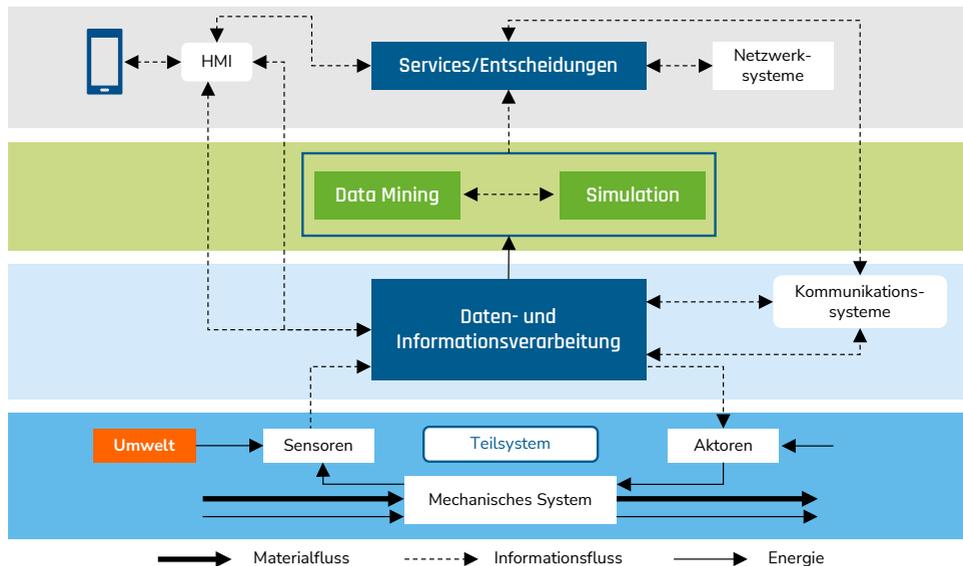


Abbildung 7: Schematischer Aufbau eines Cyberphysischen Systems © VDI ZRE in Anlehnung an Industrie 4.0 Österreich<sup>26</sup>

### Digitaler Zwilling

Digitale Zwillinge haben in den letzten Jahren vermehrt Aufmerksamkeit auf sich gezogen. Sie sind das digitale Abbild eines physischen Produkts, einer Anlage oder eines Services mit ausgewählten Merkmalen, Eigenschaften, Zuständen und Verhaltensweisen<sup>27,28</sup>. Die Daten hierfür stammen aus der integrierten Sensorik cyberphysischer Komponenten und Systeme.

Durch die digitale Repräsentation von physischen Objekten ermöglichen **Digitale Zwillinge** somit eine detaillierte Echtzeit-Überwachung und Optimierung von Ressourcenverbrauch, Energieeffizienz und Produktionsprozessen. So können sie bspw. bei der Umwandlung vorhandener Rohdaten von Anlagen in kontextualisierte Informationen durch die Zusammenführung aller Echtzeitdaten, Modelle und Analysen in der Cloud unterstützen.

#### Vorteile von digitalen Zwillingen im Lebenszyklus

- **Produktentwicklung:** digitales Testen und Simulieren sowie virtuelle Inbetriebnahme von Produkten und Optimierung mittels Betriebsdaten
- **Produktion:** Unterstützung bei der Planung, Überwachung und Optimierung der Produktionsprozesse sowie Abbildung einer digitalen Produktionsanlage zur Simulation von Prozessen
- **Nutzungsphase:** Mittels Digital Service Twins können reale Produkte im Betrieb begleitet und um Services wie Predictive oder Prescriptive Maintenance erweitert werden
- **Lebensende:** Zugriff auf Informationen und Erkenntnisse für die Weiternutzung, Wiederverwendung, Demontage sowie das Recycling von Produkten

### Architekturmodelle

Die Vernetzung von Produkten, Maschinen und ganzen Produktionsanlagen entlang des Lebenszyklus erfordert eine neue Art der Organisationsstruktur integrierter Komponenten. Durch die Bildung dynamischer Wertschöpfungsnetzwerke über die eigene Fabrikanlage hinaus (**horizontale Integration**) können Unternehmen beispielsweise auf Produktionsdaten zur bedarfsgerechten Abstimmung der Produktionsschritte zurückgreifen<sup>29</sup>.

Unter dem Begriff der **vertikalen Integration** wird die Vernetzung aller technologischen Komponenten und Dienstleistungen innerhalb des unternehmenseigenen Systems verstanden<sup>29</sup> (vgl. Abbildung 8).

Das hohe Maß an interner und externer Vernetzung sowie Kommunikation erfordert die Koordination über vereinheitlichte Kommunikationsstrukturen und eine gemeinsame branchenübergreifende Terminologie.

Eine Lösung für dieses Problem, bei der verschiedene Aspekte in einem gemeinsamen Modell zusammengeführt werden, bieten **Referenzarchitekturmodelle**.

Sie können als Grundlage dienen, um Standards und Schnittstellen zu definieren, die eine nahtlose Integration und Interoperabilität zwischen verschiedenen Systemen und Partnern ermöglichen (z. B. im Rahmen von Initiativen wie Catena X im Automobilbereich oder Manufacturing X in der Fertigungsindustrie).

Im Kontext von Industrie 4.0 haben sich zwei Referenzarchitekturmodelle etabliert, die zunehmend die klassische Automatisierungspyramide als Modell ergänzen. Die Automatisierungspyramide umfasst die verschiedenen Ebenen, angefangen bei der Maschinenüberwachung und Steuerung über die Lenkung von Personal, Maschinen und Material anhand von Manufacturing Execution Systemen (MES) bis hin zur grundlegenden Prozesssteuerung auf Unternehmensebene über Enterprise Resource Planning (ERP).

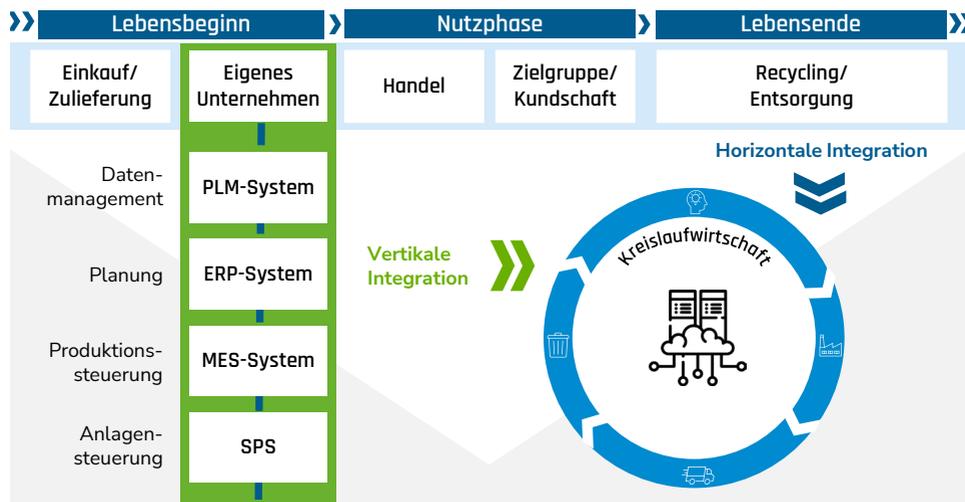


Abbildung 8: Prinzip der horizontalen und vertikalen Integration © VDI ZRE

### Referenzmodell und Referenzarchitektur

Ein **Referenzmodell** ist ein auf einen bestimmten Zweck ausgerichtetes Abbild der Realität. Es ist für einen definierten Anwendungsbereich einer Klasse von Unternehmen generalisiert (Allgemeingültigkeit). Referenzmodelle können als Informationsmodelle mit dem Ziel einer Empfehlung oder eines Verweises verstanden werden (Empfehlungscharakter). Die Eigenschaften eines Referenzmodells lassen sich für spezifische Anwendungsbereiche in einem Unternehmen erweitern.<sup>30</sup>

Eine **Referenzarchitektur** ist ein allgemeingültiges Modell für Produkte und Dienstleistungen aller Unternehmen eines Wertschöpfungsnetzwerks. Die Referenzarchitektur stellt eine Basis dar, auf der einheitliche Standards und Richtlinien zur Entwicklung und Implementierung von IT-Systemen und Geschäftsprozessen aufgebaut werden können.<sup>31</sup>

### Reference Architecture Model Industrie 4.0 – RAMI 4.0

Ein interdisziplinärer Ansatz zur strukturierten Herangehensweise wurde mit dem **Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0)**<sup>32</sup> von der Plattform Industrie 4.0 geschaffen und in der DIN SPEC 91345:2016-04<sup>32</sup> festgehalten.

In einer dreidimensionalen Landkarte werden grundlegende Aspekte der Industrie 4.0 in Form von Wertstrom sowie Hierarchie- und Integrationsebenen beschrieben.

### Life Cycle & Value Stream

Die linke horizontale Achse beschreibt den Lebenszyklus von Anlagen und Produkten, basierend auf der IEC 62890 für das Lebenszyklus-Management. Sie bildet Abhängigkeiten über den gesamten Lebenszyklus ab. Das Referenzarchitekturmodell unterscheidet zudem zwischen „Typen“ und „Instanzen“. Ein „Typ“ wird dabei zur „Instanz“, wenn Design und Prototyping abgeschlossen sind und das eigentliche Produkt hergestellt wird.<sup>33</sup>

### Hierarchy Levels

Auf der rechten horizontalen Achse sind die Hierarchieebenen gemäß IEC 62264 der internationalen Normenreihe für Unternehmens-IT- und Steuerungssysteme angegeben. Sie repräsentieren verschiedene Funktionalitäten innerhalb von Anlagen und Einrichtungen<sup>32</sup>. Produkte beeinflussen künftig selbst die eigene Fertigung und ergänzen den Betrachtungsraum ebenso wie intelligente Feldgeräte als Kommunikationsschnittstelle zwischen realer und virtueller Welt<sup>33</sup>. Klassische Hierarchien werden zugunsten eines umfassend vernetzten digitalen Ökosystems aufgelöst, in dem alle Beteiligten miteinander kommunizieren können (vgl. Abbildung 9)<sup>34</sup>.

### Layer

Die einzelnen Betrachtungsebenen einer Anlage bzw. Maschine finden sich auf der vertikalen Achse wieder. Jede Industrie-4.0-Komponente besteht aus einem sogenannten Asset – z. B. Wellen, Dokumente, Ideen – und einer zugehörigen Verwaltungsschale. Der Mensch ist über den Integrationslayer mit der virtuellen Welt verknüpft.

### Verwaltungsschale

Die Verwaltungsschale ist die informationstechnische Verbindung zur Industrie 4.0 (vgl. Abbildung 6) und neben einem Asset in jeder Industrie-4.0-Komponente zu finden. Da jede Anlage eine eigene Verwaltungsschale aufweist, können mehrere Anlagen eine Einheit mit einer gemeinsamen Verwaltungsschale für die Kommunikation und Verwaltung auf höherer Ebene bilden.

Einmal an das physische System angeschlossen, dient die Schale als standardisierte Kommunikationsschnittstelle des Netzwerks, um Daten und Informationen auszutauschen.

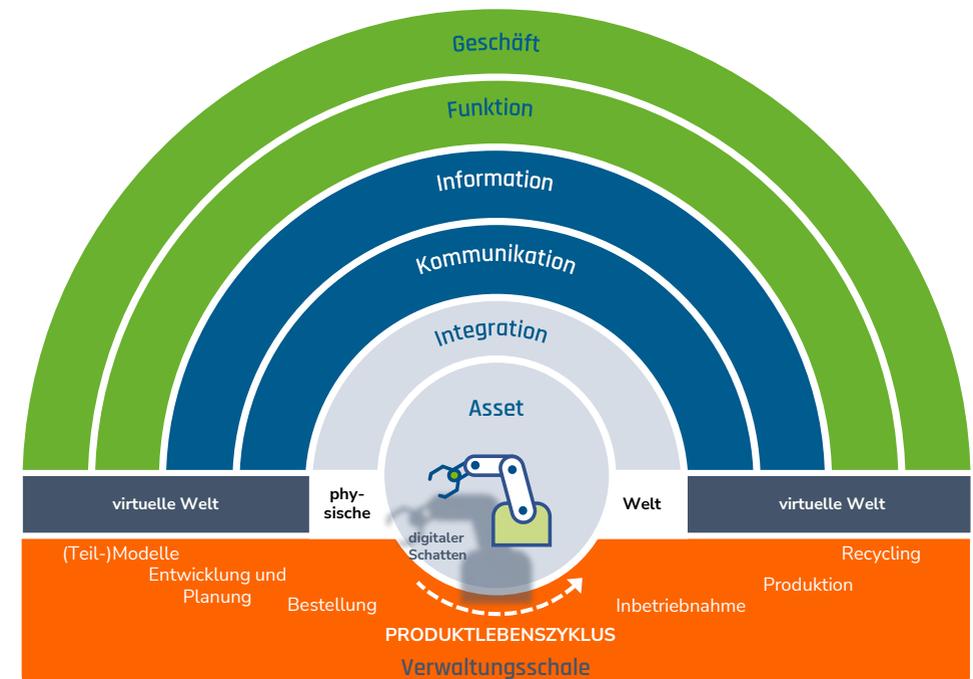


Abbildung 9: Verwaltungsschale einer Industrie-4.0-Komponente © VDI ZRE in Anlehnung an Standardization Council Industrie 4.0<sup>35</sup>

## Industrial Internet Reference Architecture – IIRA

Ein weiterer Architekturansatz entstand aus der Gründung des Industrial Internet Consortium aus CISCO, IBM, INTEL und General Electric heraus, im Zuge dessen 2015 die **Industrial Internet Reference Architecture (IIRA)** veröffentlicht wurde<sup>36</sup>.

Bei IIRA handelt es sich um eine offene, auf Standards beruhende Architektur für Systeme, die auf dem industriellen IoT basieren. Zur Unterstützung der intelligenten Industrie bietet IIRA eine generische Beschreibung und Darstellung auf hohem Abstraktionsniveau.

Die Grundlage bildet eine Reihe von Werkzeugen für die Systemkonzeption, die sogenannten „Viewpoints“. Sie ermöglichen es Architekt\*innen und Ingenieur\*innen, wichtige Entwurfsprobleme zu erkennen und zu lösen.

Die Viewpoints stellen eine Art Checkliste dar, die die Anforderungen an das Systemdesign in vier Kategorien unterteilt<sup>37</sup>:

- Business Viewpoint,
- Usage Viewpoint,
- Functional Viewpoint sowie
- Implementation Viewpoint.

### Business Viewpoint

In der **Geschäftsperspektive** werden die Stakeholder und ihre Geschäftsvision, Werte und Ziele bei der Implementierung eines IIoT-Systems identifiziert. Darüber hinaus wird ermittelt, wie das IIoT-System die erklärten Ziele erreicht, indem es den grundlegenden Systemfähigkeiten zugeordnet wird, z. B. über Benchmarks.

### Usage Viewpoint

Im Rahmen der **Nutzperspektive** wird die erwartete Nutzung des Systems betrachtet. Sie wird typischerweise als eine Abfolge von Aktivitäten dargestellt, an denen menschliche oder logische Nutzende (z. B. Systemnutzende oder Systemkomponenten) beteiligt sind. Außerdem stellen sie die beabsichtigte Funktionalität bereit, um die grundlegenden Systemfähigkeiten zu erreichen.

### Functional Viewpoint

Die **funktionale Perspektive** ist auf die funktionalen Komponenten in einem IIoT-System, ihre Struktur und Interaktionen, die Schnittstellen und Interaktionen zwischen ihnen sowie die Beziehungen und Interaktionen des Systems mit externen Elementen in der Umgebung ausgerichtet. Sie unterstützen die Verwendung und Aktivitäten des Gesamtsystems.

### Implementation Viewpoint

Die Implementierungsperspektive befasst sich mit der technischen Darstellung eines IIoT-Systems. Außerdem werden hier die Technologien und Systemkomponenten, die für die Umsetzung der in der Nutzungs- und Funktionsperspektive definierten Aktivitäten und Funktionen erforderlich sind, mit berücksichtigt. Hierzu zählen folgende Aspekte:

- Allgemeine Architektur eines IIoT-Systems (Struktur und Verteilung der Komponenten sowie die Topologie, durch die sie miteinander verbunden sind)
- Technische Beschreibung der Komponenten, inkl. Schnittstellen, Protokolle, Verhalten und andere Eigenschaften
- Implementierungskarte für die in der Nutzungssicht identifizierten Aktivitäten (zu den funktionalen Komponenten und zu den Implementierungskomponenten)
- Implementierungskarte für die Hauptmerkmale des Systems



© VDI ZRE

### Die Rolle der Daten

Die Frage nach einer gesteigerten betrieblichen Ressourceneffizienz kann nicht nur durch den Einsatz effektiverer Maschinen beantwortet werden. Im Kontext von Industrie 4.0 nehmen Daten, die über den gesamten Lebenszyklus eines Produktsystems oder einer Fabrikanlage generiert werden, einen enormen wertschöpfungsgenerierenden Stellenwert ein.

#### Datenanalyse und Data Mining

Daten können für die Beschreibung (Deskription), Erforschung (Exploration), Diagnose oder Prognose von Zuständen oder Prozessen eingesetzt werden.

Während die klassische Statistik von Modellen ausgeht, stehen mittels Sensordaten Datenmengen für eine systematische automatisierte Auswertung zur Verfügung (vgl. Abbildung 11).

Ziel dieses sogenannten **Data Minings** ist es, Datenmuster zu generieren sowie Zusammenhänge von Kategorien und Beziehungen aufzuzeigen, um auf dieser Basis Vorhersagen respektive Entscheidungen für die Zukunft zu treffen, Geschäftsprozesse zu optimieren usw.<sup>38</sup>

#### Edge Computing und Distributed Cloud

Viele IoT-Anwendungen zielen auf eine Echtzeit-Verarbeitung von Daten aus Produkten und Maschinenanlagen sowie Fabriken, weswegen das verfügbare Datenvolumen in den kommenden Jahren massiv zunehmen wird. Wird das jeweilige Netzwerk in Kernzeiten mit einem zu hohen Datenaufkommen belastet, kann das zu hohen Latenzzeiten für die Auswertung führen<sup>39</sup>. Eine Lösung bietet hier das sogenannte **Edge Computing**: Die Daten werden am Rand des Netzwerks – der Edge – verarbeitet und nur bei Bedarf an die Cloud geschickt. Eine **Distributed Cloud** bietet dabei dezentralisierte Cloud Services auf verschiedenen physischen Standorten an und kann somit die Performance steigern.<sup>40</sup> Auch wenn das Edge Computing noch nicht in alle Branchen vorgedrungen ist, lassen sich für KMU folgende Vorteile identifizieren<sup>41</sup>:

Das ist besonders für Predictive-Maintenance-Szenarios zur Berechnung der Restnutzungsdauer von kritischen Werkzeugmaschinenkomponenten von Relevanz: So setzt bspw. Siemens bei einer Leiterplattenschneidanlage auf eine prozessorientierte Datenanalyse mittels Edge Computing und Predictive-Maintenance-Funktion. Maschinenausfälle können auf diese Weise bis zu 36 Stunden im Voraus prognostiziert, Stillstandzeiten somit erheblich reduziert und jährliche Kosten von ca. 12.000 € pro Maschine eingespart werden.

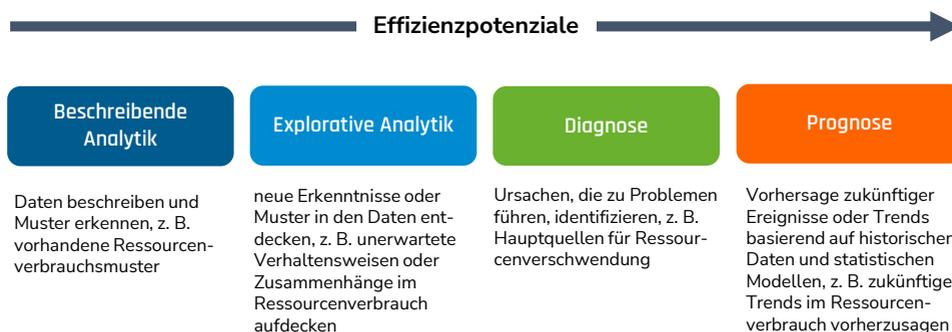


Abbildung 11: Ansätze der Datenanalyse © VDI ZRE in Anlehnung an Freitag et. al.<sup>38</sup>

- Reduzierung der zu verarbeitenden Datenmengen und Entlastung stationärer Server
- Optimierung der Daten- und Produktionsflüsse sowie Prozesse durch schnelle Datenanalyse und Rückkopplung
- Reduzierung der laufenden Kosten für die Datenübertragung in die Cloud
- Erhöhung der Datensicherheit durch dezentrale Server

### Künstliche Intelligenz

Künstliche Intelligenz (KI) ist allgegenwärtig. Entwicklungen im Bereich der KI-Technologie erweitern den Spielraum für ihren Einsatz nahezu täglich.<sup>42</sup> Daher birgt KI zahlreiche Potenziale auch für KMU: so z. B. zur Lösung vordefinierter Problemstellungen auf Grundlage bekannter Methodiken<sup>43</sup>.

Hierfür greift die KI auf vier essenzielle Fähigkeiten zurück: (1) Erkennen/Wahrnehmen, (2) Verarbeiten und Verstehen, (3) Handeln und Reagieren, (4) Kommunizieren<sup>44</sup>. Das Anwendungsspektrum zur Reduktion von z. B. Material- und Energieeinsätzen ist dabei sehr vielfältig:

- Vorausschauende Wartung,
- Planung und Optimierung der Prozesskette,
- Optische Fehlererkennung (Anomalien),
- Fehlervorhersagen,
- Produktoptimierung,
- Autonome Transportsysteme sowie
- Nachhaltigkeitsanalysen.

Zudem kann KI im Bereich des Gebäude- und Energiemanagements die Regelung von Kühl-, Heiz- und Lüftungssystemen optimieren. Im Zuge des Metallmanagements trägt KI außerdem dazu bei, Stoffkreisläufe zu schließen und den Einsatz von Primärrohstoffen und -materialien zu reduzieren.<sup>45</sup>

### Plattformen

Das Internet hat sich vom Web 1.0 (E-Commerce, Open Source Software usw.) zu einem Internet of Things<sup>46</sup> weiterentwickelt. Diese Entwicklung ist im B2B-Bereich von besonderer Bedeutung, da verschiedene Stakeholder in einem starken partnerschaftlichen Netzwerk über digitale Plattformen zusammenkommen.<sup>47,48</sup> Plattformen unterscheiden sich je nach Anwendungszweck und besitzen unterschiedliche Eigenschaften und Qualitäten. Für den Bereich des Maschinenbaus und des verarbeitenden Gewerbes sind verschiedene Konzepte von besonderer Relevanz (vgl. Tabelle 1).



Abbildung 12: Einbettung digitaler Plattformen in die künftige Plattformökonomie © VDI ZRE in Anlehnung an Trapp et al.<sup>49</sup>

Klassische Transaktionsplattformen ähneln Marktplätzen aus dem B2C-Bereich in Form vertikal strukturierter Plattformen. Die Kundenschaft kann hierüber Produkte, Zubehör, Ersatzteile und Services von Unternehmen kaufen. Zudem können aus dem Rohstoffsegment Logistikdienstleistungen o. ä. Angebote platziert werden. Je weiter sich bspw. Maschinenbauunternehmen in ein **digitales Ökosystem** mit anderen Schlüsselagierenden wagen, desto stärker können die Wertschöpfungspotenziale genutzt werden (vgl. Abbildung 12).<sup>50</sup>

Plattformen sind somit Dreh- und Angelpunkt der Industrie 4.0 und bringen folgende Vorteile<sup>51</sup>:

- Reduktion der Transaktionskosten: vereinfachte Geschäftsabwicklung
- Neue Services und Geschäftsmodelle: Pay-per-Use-Modelle, Predictive Maintenance
- Netzwerkeffekte

Tabelle 1: Plattformkonzepte und -charakteristika<sup>52,53</sup>

Beschreibung	Definition	Beispiele
<b>Transaktionsplattform</b>	Interaktion zwischen Mitgliedern verschiedener Kundenschaftsgruppen zur Wertgenerierung aller Teilnehmenden	Marktplätze (z. B. adamos, axoom, 360° farmnet), Sharing-Economy (B2B, C2C)
<b>Innovationsplattform</b>	Basis für unternehmenseigene Entwicklungen (Stichwort: Open Innovation)	SAP Cloud, APP-Entwicklung
<b>Integrierte Plattform</b>	Kombination aus Transaktions- und Innovationsplattform	Apple, Google
<b>Plattform als Laufzeitumgebung</b>	Plattform zur Verknüpfung der Automatisierungsebene	Siemens Mindsphere, Microsoft Azure Industrial IoT
<b>Analyse und Veredelung</b>	Plattform zur Analyse und Veredelung von Daten	IBM Watson, Microsoft Azure

## DESIGN FÜR RESSOURCENEFFIZIENZ 4.0

Die Transformation der globalen und nationalen Wirtschaft durch Industrie 4.0 setzt KMU unter enormen Anpassungsdruck. Insbesondere hohe Investitionskosten, neue teils noch unbekannte Technologien, fehlende Standards und eine unzureichende Expertise der Mitarbeitenden spielen dabei eine entscheidende Rolle<sup>10,54</sup>.

Neben produktionstechnischen Fragestellungen, die die Industrie 4.0 mit sich bringt (vgl. Studie „Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 – Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes“<sup>55</sup>), ergeben sich auch aus Produktsicht und anhand komplementärer Services Potenziale, durch zusätzliche produktbezogene Intelligenz natürliche Ressourcen einzusparen. Hierfür steht KMU bereits ein multiples Anwendungsspektrum zur Verfügung. Doch welche digitalen Strategien und Technologien sind für das jeweilige Unternehmensumfeld geeignet? Und wie lässt sich damit im Unternehmen eine gezielte ökonomische und ökologische Effizienzsteigerung einhergehend mit einem reduzierten Ressourceneinsatz erreichen?

Anhand des **Beispiels einer Industripumpe** sollen verschiedene Möglichkeiten zur Integration von Industrie-4.0-Konzepten und -Technologien entlang des Produktlebenszyklus nachvollziehbar veranschaulicht werden.



© PantherMedia / hramovnick

## SCHRITT 1: ANALYSE

Die Einführung von Industrie 4.0 in KMU ist unmittelbar und langfristig mit strukturverändernden Prozessinnovationen und personellen wie organisationsbezogene Umgestaltungen verbunden<sup>56</sup>. Zu einer schrittweisen Umsetzung von Industrie-4.0-Lösungen verhelfen die strategische Planung, das Festlegen von Visionen und Geschäftszielen des Unternehmens sowie das Vereinbaren von Meilensteinen. Durch die Vorab-Analyse des eigenen Unternehmens (vgl. Abbildung 14) können gezielte **Anwendungsbeispiele** mit einem konkreten Mehrwert herausgearbeitet und schrittweise durch Investitionen in Technologien und Weiterbildung umgesetzt

werden. Die Umstellung auf eine Smart Factory ist schließlich nicht für jedes Unternehmen sinnvoll.

Die **Transformation zu einer ressourceneinsparenden Industrie** durch den Einsatz digitaler Technologien erfordert einen Paradigmenwechsel in den Unternehmen.

Einer erfolgreichen Strategie liegt dabei oft eine **Vision** zugrunde, welche als **Triebfeder** für das Unternehmen dient.

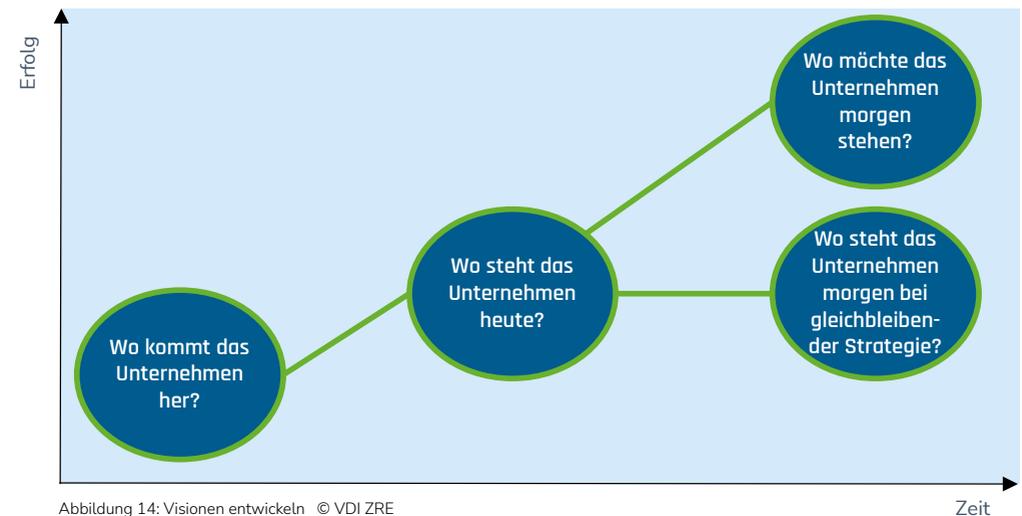


Abbildung 14: Visionen entwickeln © VDI ZRE

Zeit

### Umfeldanalyse

Mithilfe einer Umfeldanalyse können von Unternehmensseite spezifische externe Einflussfaktoren ermittelt werden, die einen direkten oder indirekten Einfluss auf das Unternehmen haben.

#### SWOT-Analyse

Die SWOT-Analyse schafft eine Grundlage für die Unternehmens- und Strategieplanung. Sie bewertet einerseits Unternehmensmerkmale als Stärken und Schwächen. Die externe Betrachtung des Unternehmensumfeldes, z. B. hinsichtlich Trends und Marktentwicklungen, wird andererseits als Chance oder potenzielle Bedrohung im Rahmen einer Risikobetrachtung bezeichnet (vgl. Abbildung 15).

#### PESTEL-Analyse

Die PESTEL-Analyse bietet eine Hilfestellung zur Bewertung von Makro-Umweltfaktoren (vgl. Abbildung 16).

Ein Beispiel: Politische Entwicklungen führen beispielsweise zu unterschiedlichen Ereignissen auf diversen Unternehmensebenen. So wirken sich z. B. die von den Vereinten Nationen verabschiedeten Nachhaltigkeitsziele langfristig auch auf die nationale Gesetzgebung und gesellschaftlichen Veränderungen aus.



Abbildung 16: PESTEL-Analyse in Anlehnung an Deltt<sup>57</sup>

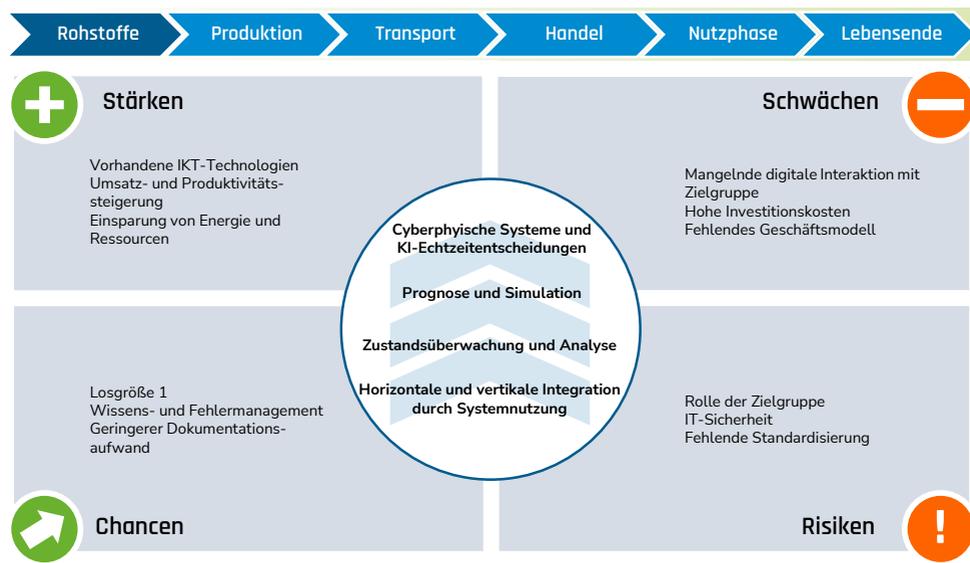


Abbildung 15: SWOT-Analyse in Abhängigkeit vom Digitalisierungsgrad © VDI ZRE

### Einschätzung des digitalen Reifegrades

Zu Beginn steht die Selbsteinschätzung des Unternehmens in Bezug auf den eigenen Industrie-4.0-Reifegrad innerhalb der verschiedenen Unternehmensdimensionen. Hierfür gibt es bereits eine Vielzahl an Reifegradmodellen, z. B. in Form von Stufen-, Trend- oder Roadmapmodellen<sup>58</sup>.

#### Online-Checklisten

Webbasierte Checklistenanwendungen liefern einen schnellen Einstieg und Überblick hinsichtlich Industrie-4.0-Aspekten. Reifegradmodelle bieten eine direkte Auswertung für die Unternehmen basierend auf spezifischen Fragestellungen entlang der wesentlichen Dimensionen. Diese unterscheiden sich in ihrem jeweiligen Detaillierungsgrad voneinander.

Im Anschluss können sich Unternehmen auf Basis ihres ermittelten Reifegrades einordnen.

#### ReSET 4.0

Mit dem interaktiven ReSET 4.0-Tool werden Unternehmen dabei unterstützt, die Themen Ressourceneffizienz und Digitalisierung bei der Maßnahmenplanung von Anfang an zusammenzudenken. Mit dem Tool können Betriebe analysieren, inwieweit die Themen bereits im Unternehmen verankert und welche Maßnahmen schon umgesetzt wurden. Der **Skill-Tree** stellt die Entwicklungspfade von Ressourceneffizienz und Digitalisierung dar. Zu den jeweiligen Ressourceneffizienzpotenzialen werden digitale Lösungen in Form konkreter Maßnahmen und Ansätze vorgeschlagen.

Via Roadmap zu Industrie 4.0

Reifegrad-Checks

→ Mittelstand-Digital Zentrum Kaiserslautern:

[www.digitalzentrum-kaiserslautern.de/unser-angebot/self-service/readiness-check](http://www.digitalzentrum-kaiserslautern.de/unser-angebot/self-service/readiness-check)

Betrachtung von fünf unternehmensrelevanten Dimensionen anhand allgemeiner Angaben und Vergleich mit anderen Wirtschaftsgagierenden

→ IMPULS-Stiftung des VDMA:

[www.industrie40-readiness.de/](http://www.industrie40-readiness.de/)

Selbsteinschätzungstool anhand eines sechsstufigen Modells mit festgelegten Mindestanforderungen

→ ReSET 4.0 des VDI ZRE:

[www.ressource-deutschland.de/werkzeuge/loesungsentwicklung/reset-40](http://www.ressource-deutschland.de/werkzeuge/loesungsentwicklung/reset-40)

Selbstbewertungstool, um den Fortschritt unternehmensbezogener Digitalisierungs- und Ressourceneffizienzmaßnahmen zu bewerten sowie Ideenpool für verschiedene Technologien zur Realisierung der Ressourceneffizienzpotenziale

Die Erkenntnisse aus den Analysen können strategisch und zielorientiert in eine Roadmap überführt werden. Für die identifizierten Handlungsfelder müssen spezifische Fragestellungen hinterlegt werden. So kann z. B. ermittelt werden, wie mit Hilfe digitaler Werkzeuge ein Unternehmen produkt- oder anlagenspezifisch Materialien und Energie einsparen kann und welche Produktfeatures oder Geschäftsmodelle langfristig damit assoziiert werden. Nicht alle Handlungsfelder sind dabei direkt relevant, können aber eine zentrale Rolle für zukünftige Maßnahmen spielen.

Industrie-4.0-Canvas

Nach einer **aktuellen Bitkom-Studie** nehmen Plattformen einen immer stärkeren Stellenwert für die deutsche Wirtschaft ein<sup>72</sup>. Doch scheitert die erfolgreiche Teilhabe an B2B-Plattformen derzeit noch am **Mangel an geeigneten Geschäftsmodellen** sowie Unternehmensstrategien<sup>54</sup>.

Mit dem Industrie-4.0-Canvas, gemeinsam entwickelt von der RWTH Aachen und dem VDI e. V., wurde eine die Unternehmen unterstützende Methodik zur agilen und interdisziplinären Entwicklung von Plattformgeschäftsmodellen entwickelt. Deren Fokus liegt auf der überbetrieblichen Zusammenarbeit verschiedener Stakeholder.<sup>59</sup>

Das Instrument basiert auf den folgenden vier wesentlichen Dimensionen (vgl. Abbildung 17):

- Wertbeitrag,
- Verlässlichkeit,
- Integration sowie
- Werttreiber.

Für jeden potenziellen Stakeholder kann ein solches Canvas ausgefüllt werden. Final werden alle Canvas mit Pfeilen (zur Visualisierung der Güter-, Geld- und Datenströme) verbunden, um die Gesamtheit des Wertschöpfungsnetzwerks abzubilden.



Abbildung 17: RWTH Aachen/VDI Industrie 4.0 Canvas Gülpen/Piller<sup>59</sup>

### Ressourcensprint 4.0

Mit dem Ressourcensprint 4.0 des VDI ZRE können in einem vier- bis fünfstündigen Workshopformat konkrete Ideen für relevante Handlungsfelder und -ebenen gesammelt werden.

Das Canvas dient einer schnellen Orientierung für die Erfassung von Ressourceneffizienzpotenzialen und den involvierten Abteilungen.

#### Roadmaps

→ **Industrie-4.0-Canvas:**

<http://publications.rwth-aachen.de/record/789434/?ln=de>

Entwicklung eines Wertschöpfungsnetzwerks für Fokalunternehmen als Plattformbetreibernde oder potenzielle Plattformteilnehmende

→ **Ressourcensprint 4.0 des VDI ZRE**

[www.ressource-deutschland.de/werkzeuge/loesungsentwicklung/ressourcensprint-40/](http://www.ressource-deutschland.de/werkzeuge/loesungsentwicklung/ressourcensprint-40/)

Zusammen mit dem VDI ZRE identifizieren Sie auf Anfrage Handlungsfelder, entwickeln Lösungen und planen erste Maßnahmen zur Umsetzung.

Der Workshop baut auf den folgenden vier Schritten auf (vgl. Abbildung 18):

1. Verständnis und Akzeptanz schaffen,
2. Handlungsfelder definieren,
3. Lösungsideen auf Basis der Relevanzbaumanalyse entwickeln,
4. Bewertung von Ideen mittels Nutzwertanalyse und Priorisierung.

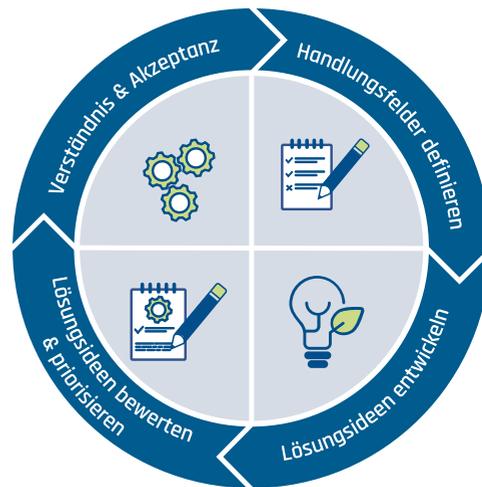


Abbildung 18: Modell des VDI ZRE-Workshopformats Ressourcensprint 4.0 © VDI ZRE

## SCHRITT 2: IDEENPOOL

### Digitale Produktentwicklung

Die Handlungsebenen hängen eng mit dem für das Unternehmen aufzuwendenden Risiko und Investitionsvolumen sowie dem steigenden Nutzen zusammen. Es ist daher von Seiten des Unternehmens abzuwägen, welche ressourcenschonenden Strategien künftig sowohl technologisch als auch ökonomisch und unter sozialen Gesichtspunkten umsetzbar sind.

In den frühen Phasen der Produktentwicklung werden die technologischen, wirtschaftlichen und kundenbasierten Anforderungen festgelegt. Durch die Digitalisierung wird der klassische Entwicklungsprozess mittels digitaler Tools sowie neuartiger Methoden abgelöst und stellt durch geeignete Managementsysteme Informationen transparent bereit (vgl. Abbildung 19).

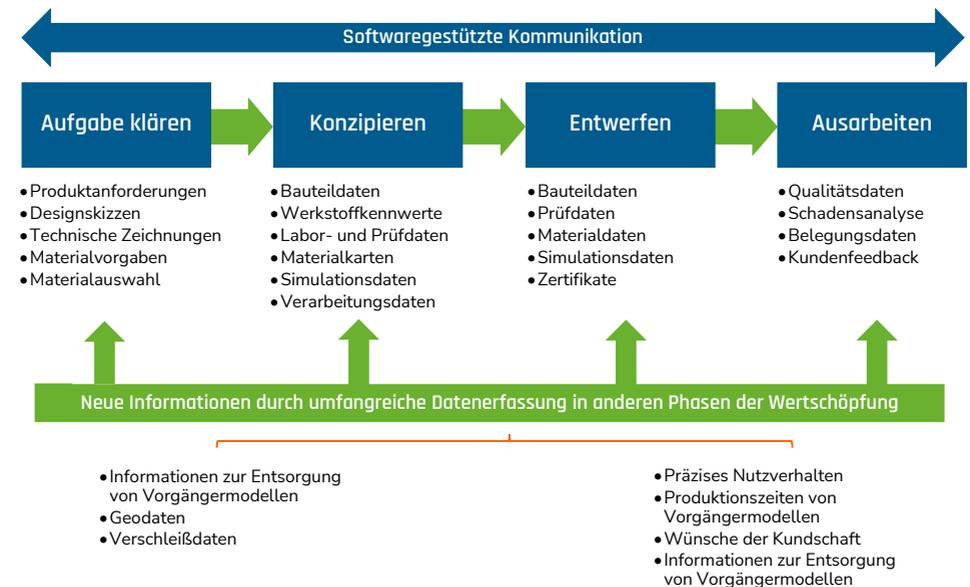


Abbildung 19: Softwaregestützte Produktentwicklung und Datengenerierung © VDI ZRE<sup>60</sup>

### Produktdaten- & Produktlebenszyklusmanagement

**Produktdatenmanagementsysteme (PDM)** geben Auskunft über sämtliche Daten, die im Produktentstehungsprozess anfallen (Daten aus CAx-Systemen, Textverarbeitung etc.)<sup>61</sup>. Das ermöglicht einen schnellen Zugriff auf bereits vorhandene Informationen. Aufgrund der Datendurchgängigkeit sind Prozesse und Fehlerquellen einfacher nachzuvollziehen und können nachfolgende Prozesse beschleunigen.

**Produktlebenszyklusmanagementsysteme (PLM)** hingegen betrachten den gesamten Lebenszyklus eines Produkts und decken einen viel größeren Bereich der Geschäftsprozesse ab – von der Konzeption bis zur Weiterverwendung bzw. Entsorgung eines Produktes (vgl. Abbildung 20).

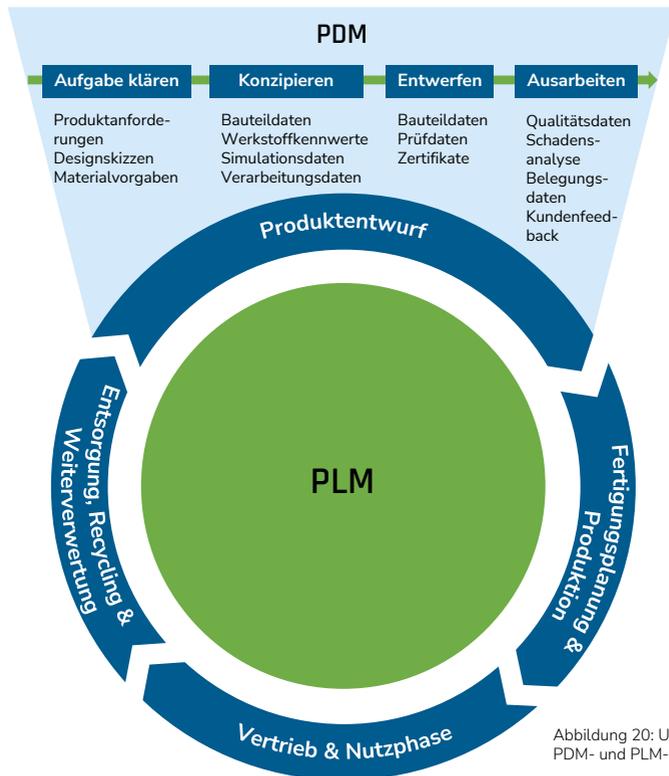


Abbildung 20: Unterschied zwischen PDM- und PLM-Systemen © VDI ZRE

### Digitalisierung von Produkten und Anlagen

#### Digitales Prototyping & Engineering

Die Nutzung digitaler Tools zur Erstellung von 3D-Modellen ist bereits in vielen Unternehmen Standard. Doch für die Erstellung von Prototypen zur Erprobung wesentlicher Funktionen und Eigenschaften wird in der Regel die virtuelle Welt wieder verlassen.

Digitalisierungstechnologien bieten hier die Chance, Produktentwicklungsprozesse effizienter und günstiger zu gestalten – insbesondere im Hinblick auf die Material- und Kosteneinsparung durch den Verzicht auf physische Prototypen.

Die Digitalisierung von Produkten und Anlagen hat eine transformative Wirkung auf nahezu alle Branchen. Durch die Integration von Sensoren, IoT-Technologien und Datenanalysen werden Produkte intelligenter und effizienter, während Anlagen optimiert und vorausschauend gewartet werden können. Diese Entwicklung prägt nicht nur die Fertigungsprozesse, sondern beeinflusst auch neue Geschäftsmodelle (vgl. Abbildung 21).

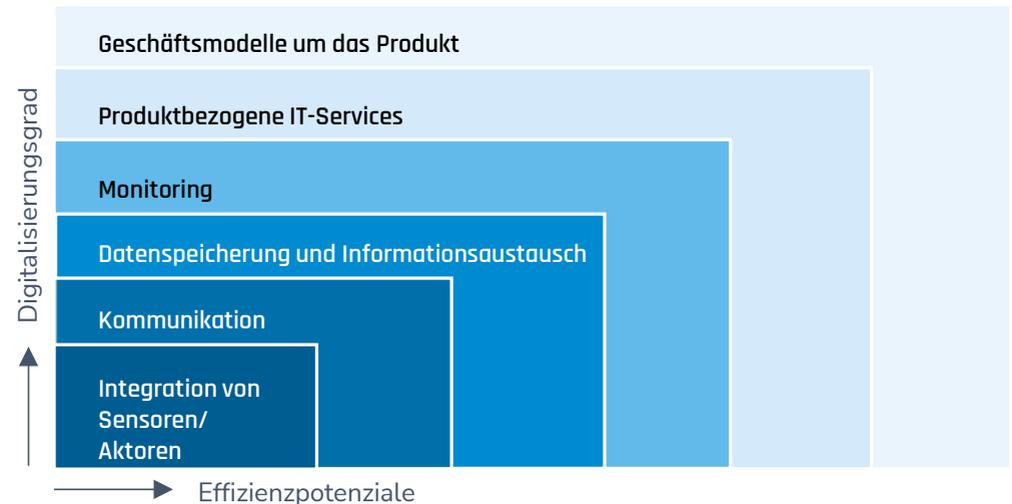


Abbildung 21: Einsparpotenziale in Bezug auf Digitalisierungsstufen © VDI ZRE in Anlehnung an Andert et. al. (2016)<sup>31</sup>

## Integration von Sensoren und Aktoren

### Allgemeine Beschreibung

Sensoren und Aktoren repräsentieren die Schnittstelle zwischen physischen Produkten und der digitalen Welt. Sie ermöglichen die Erfassung von Echtzeitdaten und deren Auswertung sowie eine intelligente Steuerung von Produkten und Prozessen.

### Ressourceneinsparpotenzial

Die Erhöhung der Transparenz entlang des Produktlebenszyklus mithilfe von Sensorik zur Überwachung fördert das Verständnis für das Produkt bzw. die Maschinenanlage. Hieraus lassen sich Potenziale und Maßnahmen zu Energie- und Materialeinsparungen ableiten.

### Am Beispiel: Industripumpe

Sensoren messen den tatsächlichen Bedarf an Flüssigkeit oder Druck, während Aktoren die Pumpe entsprechend steuern, um den Energiebedarf zu minimieren.

## Kommunikation und Informationsaustausch

### Allgemeine Beschreibung

Für den Austausch von Daten zwischen einzelnen Elementen der Wertschöpfungskette werden Kommunikationsschnittstellen benötigt. Diese können sowohl kabelgebunden (USB-Standards o. Ä.) als auch kabellos sein (Bluetooth, RFID oder WiFi). Die Wahl der jeweils passenden Schnittstelle wird dabei in Abhängigkeit von der Entfernung, Datenmenge und Zugänglichkeit getroffen.

### Ressourceneinsparpotenzial

Der Datenaustausch zwischen Agierenden der Wertschöpfungskette ermöglicht es, auf Informationen reagieren zu können, die an anderer Stelle im Wertschöpfungsprozess erfasst werden. Zudem bietet geräteübergreifende Kommunikation einen niedrigschwelligen Zugang zu gewonnenen Daten aus Sensoren und der Steuerung von Aktoren.

### Am Beispiel: Industripumpe

Über eine drahtlose Kommunikationstechnologie ist es möglich, mehrere Einzelpumpen in Parallelschaltung miteinander zu verbinden. Hierdurch können die Pumpen in den verschiedenen Betriebsmodi Kaskadenregelung, Wechselbetrieb oder im Betriebs-/Stand-by-Modus geregelt werden. Mithilfe von RFID-Chips können zudem verkaufte Einheiten direkt dem jeweiligen herstellenden Unternehmen zugeordnet werden.

## Monitoring und Analyse

### Allgemeine Beschreibung

Mittels Monitoring ist es möglich, die für den jeweiligen Prozess relevanten Werte zu kontrollieren und auszuwerten, wie z. B. die Stückzahl und Qualität eines zu fertigenden Produktes oder der Zustand der am Prozess beteiligten Maschinen. Die Ergebnisse dieser Überwachung werden anschließend an einem zentralen Ort zusammengeführt.

### Ressourceneinsparpotenzial

Die Auswertung von (Echtzeit-)Daten ermöglicht es, auftretende Ineffizienzen frühzeitig zu erkennen und zu beseitigen. Eine kontinuierliche Zustandsüberwachung hilft wiederum, die Lebensdauer von Maschinen und verbauten Teilen vollständig auszunutzen und Prozesse wie geplant durchzuführen.

### Am Beispiel: Industripumpe

Die Verwendung von Sensoren unterstützt dabei, Abnutzungserscheinungen an der Pumpe zu erkennen, bevor sie zu schwerwiegenden Schäden führen. Auf diese Weise können Wartungs- und Reparaturarbeiten rechtzeitig durchgeführt werden, um wiederum die Lebensdauer der Pumpe zu verlängern.

## Produktbezogene IT-Services und Geschäftsmodelle

### Allgemeine Beschreibung

Ganzheitliche Dienstleistungen zu einem Produkt werden durch die beschriebenen Enabler der Industrie 4.0 umfassend möglich. Sie sorgen u. a. für eine größere wirtschaftliche Planbarkeit und gesteigerte Agilität der Unternehmen. In der Folge steht nun nicht mehr das Produkt selbst im Vordergrund des Geschäftsmodells, sondern seine umliegenden Funktionen.

### Ressourceneinsparpotenzial

Durch das Angebot von Dienstleistungen werden die Produkte auf eine längere Lebensdauer ausgelegt. Gleichzeitig werden durch die bessere Planbarkeit und den effizienteren und effektiveren Einsatz von Material- und Energieressourcen Verschwendungen minimiert.

### Am Beispiel: Industripumpe

Pumpenherstellende Unternehmen verkaufen nicht mehr ausschließlich die Industripumpe als Verkaufseinheit. Das Geschäftsmodell kann auch auf den Verkauf der Funktionseinheit, z. B. Volumenströme, ausgelegt und um weitere produktbezogene Services und Funktionen erweitert werden.

## SCHRITT 3: IMPLEMENTIERUNG

Den Erfolg einer geplanten Digitalisierungsstrategie vorherzusagen, ist in der Regel schwierig. Dennoch gibt es Methoden, um die potenzielle Wirtschaftlichkeit eines Vorhabens zu beschreiben und zu bewerten. Nachfolgend werden zwei Methoden vorgestellt.

### Szenarioanalyse

Um potenzielle Entwicklungen und Szenarien zu erkunden, die sich aus der Einführung von digitalen Technologien und Prozessen für das Unternehmen ergeben können, eignet sich die Szenarioanalyse. Die Durchführung einer solchen Analyse hilft, Chancen und Risiken zu identifizieren, fundierte Entscheidungen zu treffen und die Umsetzungsstrategie auf eine robuste Grundlage zu stellen.

Dabei sollte folgendermaßen vorgegangen werden:

1. In Zusammenarbeit mit dem Team, das in die Entscheidung mit einbezogen wird, gilt es im ersten Schritt, Ziele und zeitliche Rahmen der Digitalisierungsstrategie zu definieren.
2. Anschließend werden grundlegende Informationen zum aktuellen Stand der Digitalisierung, Markttrends, Technologieentwicklungen und relevante Einflussfaktoren gesammelt.

3. Im nächsten Schritt erfolgt die Identifikation relevanter Schlüsselfaktoren, die die Strategie beeinflussen könnten (wie Innovationen, Wettbewerbsumfeld, Kundenchaftsverhalten, Regularien etc.). Diese Faktoren können in einer **Auswirkungs-Ressourceneinsparpotenzial-Matrix** wiedergegeben werden (vgl. Abbildung 22).

4. Der vierte Schritt umfasst die Entwicklung verschiedener Szenarien hinsichtlich ihrer Wahrscheinlichkeit und potenziellen Auswirkung auf das Unternehmen. Hierfür eignen sich Personas, Umfrageergebnisse, Marktanalysen sowie interne und externe Erfahrungswerte<sup>62</sup>. Die Prognosen sollten klar verständlich sein.

5. Aus den identifizierten Szenarien können geeignete strategische Maßnahmen abgeleitet werden. Es hilft, verschiedene Szenarien durchzuspielen, um sich vor Augen zu führen, was im besten und im schlimmsten Falle passieren kann, und anschließend Handlungsalternativen zu erarbeiten.

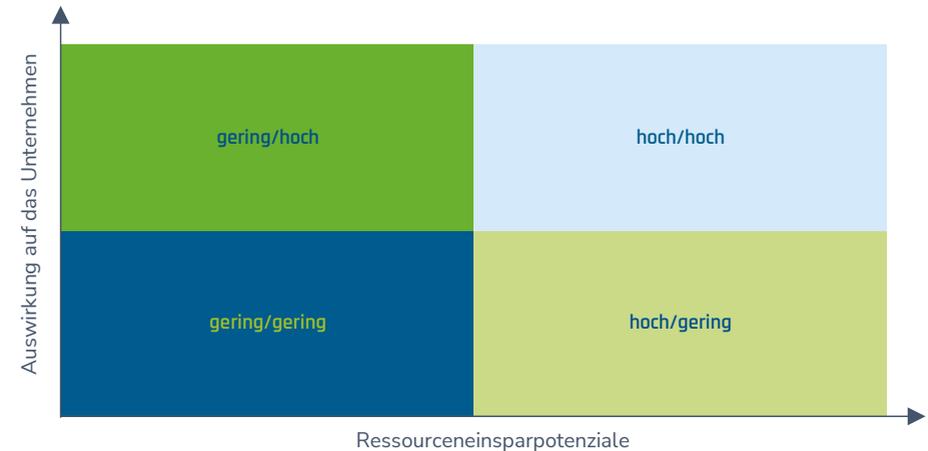


Abbildung 22: Auswirkungs-Einsparpotenzial-Matrix © VDI ZRE

### Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse ist ein einfaches Instrument zur konkreten Bewertung verschiedener Lösungsalternativen. Im ersten Schritt werden zunächst alle zur Verfügung stehenden Alternativen definiert, die für das Unternehmen in Frage kommen. Sinnvoll ist eine Auswahl von maximal fünf Alternativen (vgl. hierzu auch Tabelle 2).

Hierauf folgt die Festlegung aller messbaren (z. B. Kosten, THG-Emissionen) und nicht messbaren (z. B. Design, Handhabung) Bewertungs-

kriterien, die für die jeweilige Entscheidung relevant sind. Zudem können in diesem Schritt K.-o.-Kriterien festgelegt werden, die zum sofortigen Ausschluss von Lösungsvarianten führen.

Die Kriterien haben eine unterschiedliche Gewichtung für die Entscheidung. Daher erfolgt im dritten Schritt die Gewichtung in Prozentsumme. Die Gesamtsumme der Einzelgewichtungen muss am Ende 100 % betragen.

Tabelle 2: Beispiele für Bewertungskriterien der Nutzwertanalyse

Zielbereich	Bewertungskriterium
A	Qualifikation des Dienstleistungsunternehmens <ul style="list-style-type: none"> <li>Eignung für die Zukunft</li> <li>Finanzkraft</li> <li>Breite der Produktpalette</li> </ul>
B	Zufriedenheit der Mitarbeitenden im Kontext der Anwendung <ul style="list-style-type: none"> <li>Mitarbeitenden-Expertise</li> <li>Einbindung der Mitarbeitenden</li> </ul>
C	Wirtschaftlichkeit <ul style="list-style-type: none"> <li>Durchschnittlicher Produktpreis</li> <li>Total Costs of Ownership</li> <li>Kostensteigerung</li> <li>Betriebskosten</li> <li>Investitionsbedarf</li> </ul>
D	Funktionstauglichkeit für Kundenservice <ul style="list-style-type: none"> <li>Kommunikationsschnittstellen</li> <li>Bereitstellung und Handhabung von zusätzlicher Software</li> </ul>
E	Beziehung zur Kundschaft/Zielgruppe <ul style="list-style-type: none"> <li>Stärkung der Beziehung</li> <li>Produkt als Markenbotschafter</li> <li>Bereitschaft der Kundschaft</li> <li>Wertversprechen</li> </ul>
F	Nachhaltigkeit <ul style="list-style-type: none"> <li>Einsparung von THG-Emissionen</li> <li>Einsparung von Materialkosten</li> <li>Einsparung von Energiekosten</li> </ul>

Der wichtigste Schritt der Nutzwertanalyse ist die Bewertung der einzelnen Kriterien. Hier empfiehlt sich der Einsatz eines Punktesystems (z. B. von 1 – schlecht bis 10 – sehr gut).

Zur Vermeidung subjektiver Entscheidungen sollten die Bewertungen innerhalb eines Teams mit der Geschäftsführung, den Entscheidungstragenden aus den Technologieteams usw. durchgeführt werden.

Im letzten Schritt werden die vorab vergebenen Punkte mit den jeweiligen Gewichtungsfaktoren multipliziert und final addiert.

Das Ergebnis ist der sogenannte Nutzwert. Das höchste Ergebnis repräsentiert somit die Variante mit dem größten Gesamtnutzen.

## FAZIT

Die Umsetzung von Digitalisierungsmaßnahmen bedeutet in der Regel Veränderungen für das gesamte Unternehmen. Die Einführung der Industrie-4.0-Anwendungen kann hier ein Weichensteller zur effektiven und effizienten Erreichung von Unternehmenszielen in ökologischer und ökonomischer Sicht sein.

Für KMU, die erste Digitalisierungsmaßnahmen umsetzen, ist es jedoch nicht nur relevant, diese finanzieren zu können. Entscheidend ist eine ganzheitliche und in das Unternehmen integrierte Digitalisierungsstrategie von der Planung und Umsetzung bis zur Weiterentwicklung. Hierzu gehören:

1. die Ermittlung des Status quo im Unternehmen in Hinsicht auf Organisation, technische und Dateninfrastruktur, Geschäftsmodelle,
2. das Identifizieren und Festlegen von Zielen der unternehmenseigenen Digitalisierung, z. B. Automatisierung von Prozessen, Datenerfassung zum Ressourcenverbrauch,
3. die Bestimmung von zusätzlichen personellen, technologischen und finanziellen Bedarfen sowie
4. der Aufbau einer Umsetzungsstrategie im Unternehmen mit Blick auf die betroffenen Unternehmensebenen.

Digitale Technologien, wie z. B. der Einsatz von KI, das Internet der Dinge oder Virtual Reality, können dabei unterstützen, den Material- und Energieeinsatz entlang der gesamten Wertschöpfungskette erheblich zu senken (vgl. Abbildung 23).

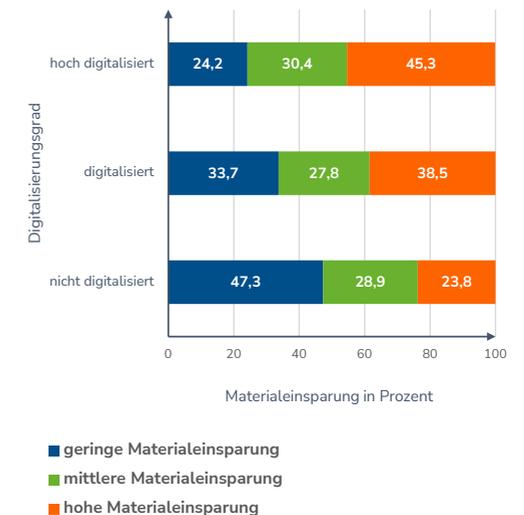


Abbildung 23: Ressourceneinsparpotenziale durch Digitalisierung in Unternehmen © VDI ZRE unter Verwendung von Neligan et al. (2021)<sup>63</sup>

Ressourceneffizienz wird durch die Verfügbarkeit von (Echtzeit-)Informationen über Produkte und Prozesse quantifizierbar und unterstützt die Ausschöpfung von Einsparpotenzialen.

## GLOSSAR

Begriff	Erklärung
<b>Asset</b>	beschreibt Architektur von technischen Komponenten in Referenzarchitektur
<b>Big Data</b>	große, schnelllebige oder komplexe Datenmengen, bedürfen einer sehr anspruchsvollen Verarbeitung und Analyse
<b>Cloud Computing</b>	Bereitstellung von IT-Infrastruktur und IT-Diensten (Speicherplatz etc.) über die Cloud bzw. das Internet
<b>Cyberphysische Systeme</b>	Verbindung von informations- und softwaretechnischen Systemen mit mechanischen Komponenten
<b>Data Mining</b>	systematische Anwendung statistischer Methoden auf große Datenmengen, um Zusammenhänge herzustellen und Erkenntnisse zu gewinnen
<b>Digitales Ökosystem</b>	sozio-technisches System, das Anbieter und Konsumenten von Assets zum gegenseitigen Nutzen miteinander verbindet; basiert auf der Bereitstellung von Services mittels digitaler Plattformen (ermöglichen Skalierung und Nutzung positiver Netzwerkeffekte) <sup>48</sup>
<b>Disruptive Prozessinnovation</b>	radikale Neuerung
<b>Distributed Cloud</b>	über verschiedene Standorte verteilte Computerressourcen; arbeiten wie zusammenhängende Plattform zusammen; Daten und Anwendungen überall verfügbar
<b>Edge Computing</b>	Form der Datenverarbeitung; findet direkt oder in der Nähe einer bestimmten Datenquelle statt; minimiert Bedarf an Datenverarbeitung in entferntem Rechenzentrum
<b>Human-Machine-Interface (HMI)</b>	Teil der Maschine, mit dem Nutzende interagieren (z. B. via Computer)

Begriff	Erklärung
<b>Industrial Ethernet</b>	auch: Echtzeit-Ethernet; Weiterentwicklung des Ethernets; Ziel: Möglichkeiten von Ethernet auf Geräte in industrieller Fertigung und Steuerung übertragen
<b>Industrie 4.0</b>	digitale Transformation industrieller Unternehmen durch Vernetzung und Automatisierung mittels Technologien wie IoT, KI, Robotik
<b>Internet der Dinge (IoT), Industrial Internet of Things (IIoT)</b>	Netzwerk physikalischer Gegenstände („Dinge“), die mit Sensoren, Software und anderen Technologien ausgestattet sind; ermöglicht Vernetzung über Internet mit anderen Geräten und Systemen zum Datenaustausch
<b>Künstliche Intelligenz (KI)</b>	Teilgebiet der Informatik; bezeichnet Computerprogramme, mit menschenähnlichen Problemlösungsfähigkeiten; KI-Systeme lernen aus Daten, erkennen Muster, treffen Entscheidungen oder lösen Probleme; anwendbar in zahlreichen Bereichen (Bildererkennung, Sprachverarbeitung, autonome Fahrzeuge etc.)
<b>Predictive Maintenance (PM)</b>	Bezeichnung für vorausschauenden Wartungsvorgang; basiert auf Auswertung von Prozess- und Maschinendaten
<b>Produktdaten-Management-Systeme (PDM)</b>	ermöglichen Speicherung und Verwaltung von produktdefinierenden Daten aus Produktentwicklung; werden nachgelagerten Prozessen zur Verfügung gestellt
<b>Produktlebenszyklus-Management-Systeme (PLM)</b>	verwalten gesamten Lebenszyklus eines Produkts von Konzeption bis Lebensende; erleichtern Zusammenarbeit, verbessern Effizienz und ermöglichen Verfolgung von Produktdaten in jeder Lebenszyklusphase
<b>Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)</b>	Steuerungssystem; erfasst, analysiert und visualisiert Daten von Industrieanlagen

## LITERATUR

- [1] Frick, T. W. (2017): Industrie 1.0 bis 4.0 – Industrie im Wandel der Zeit [online][abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: <https://industrie-wegweiser.de/von-industrie-1-0-bis-4-0-industrie-im-wandel-der-zeit/>
- [2] Acatech (2021): Industrie 4.0 feiert 10-jähriges Jubiläum – die erste Halbzeit ist geschafft [online][abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: <https://www.acatech.de/allgemein/industrie-4-0-feiert-10-jaehrigen-jubilaem-die-erste-halbzeit-ist-geschafft/>
- [3] Schwab, K. (2016): Die Vierte Industrielle Revolution, Pantheon, München, ISBN 9783570553459.
- [4] Plattform Industrie 4.0 (2022): Hintergrund [online][abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Plattform/Hintergrund/hintergrund.html>
- [5] Umweltbundesamt (2022): Ökodesign-Richtlinie [online][abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/oekodesign/oekodesign-richtlinie#grundkonzept-der-okodesign-richtlinie>
- [6] Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (2022): Agenda 2030 [online][abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: <https://www.bmz.de/de/agenda-2030>
- [7] Hirsch-Kreinsen, H. (2014a): Wandel von Produktionsarbeit – „Industrie 4.0“ [online][abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: <https://www.wsi.de/de/wsi-mitteilungen-wandel-von-produktionsarbeit-industrie-40-13091.htm>
- [8] Hirsch-Kreinsen, H. (2016): Industrie 4.0 als Technologieversprechen [online] – Soziologisches Arbeitspapier Nr. 46/2016. Technische Universität Dortmund, [abgerufen am: 18.10.2023] verfügbar unter: [https://eldorado.tu-dortmund.de/bitstream/2003/35117/1/Hirsch-Kreinsen\\_2016\\_Industrie%204.0%20als%20Technologieversprechen.pdf](https://eldorado.tu-dortmund.de/bitstream/2003/35117/1/Hirsch-Kreinsen_2016_Industrie%204.0%20als%20Technologieversprechen.pdf)
- [9] Seidenstricker, S.; Rauch, E. und Dallasega, P. (2017): Industrie-4.0 – Geschäftsmodellinnovation für KMU. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 112 (9), S. 616 – 620. ISSN 0947-0085. doi:10.3139/104.111776
- [10] Pokorni, B.; Mack, J.; Hall, R. und Schumacher, S. (2022): Industrie 4.0 konkret – Eine internationale Kurzstudie zu erfolgreichen Anwendungsfällen und Praktiken. Allianz Industrie 4.0 Baden-Württemberg, Stuttgart [online][abgerufen am: 05.08.2023], verfügbar unter: <https://www.ipa.fraunhofer.de/de/Publikationen/studien/industrie-40-konkret.html>
- [11] VDI 4800 Blatt 1:2023-08 (Entwurf): Verein Deutscher Ingenieure e.V., Ressourceneffizienz und Ressourcenschonung – Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [12] Plattform Industrie 4.0 (2022): Resilienz im Kontext von Industrie 4.0 – Whitepaper. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Berlin [online][abgerufen am: 02.08.2023], verfügbar unter: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Resilienz.html>
- [13] Luks, F. (2022): Effizienz in Unternehmen kann auch gefährlich sein [online]. Der Standard, 24.03.2022 [abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: <https://www.derstandard.de/story/2000134222428/effizienz-in-unternehmen-kann-auch-gefaehrlich-sei>
- [14] Thieß, P. (2020): Globale Lieferketten zwischen Effizienz und Resilienz. In: ifo Schnelldienst, 73 (5), S. 7 – 10 [online][abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: <https://www.ifo.de/publikationen/2020/zeitschrift-einzelheft/ifo-schnelldienst-052020>
- [15] Bollhöfer, E.; Buschak, D.; Lerch, C. und Gotsch, M. (2015): Interaktive Wertschöpfung durch Dienstleistungen – B2B-Dienstleistungen im Kontext von Industrie 4.0 – Neue Formen der Interaktion im Maschinen- und Anlagenbau, Springer Gabler Wiesbaden, Wiesbaden, ISBN 978-3-658-08518-6.
- [16] Kagermann, H.; Anderl, R.; Gausemeier, J.; Schuh, G.; Wahlster, W. und Winter, J. (2016): Industrie 4.0 in a Global Context – Strategies for Cooperating with International Partners (acatech STUDY), Herbert Utz Verlag, München, ISBN 2192-6174.
- [17] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022): Leitbild 2030 für Industrie 4.0 [online]. 25.07.2022 [abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Industrie40/Leitbild2030/leitbild-2030.html>
- [18] IEC PAS 63088:2017: International Electrotechnical Commission, Smart manufacturing – Reference architecture model industry 4.0 (RA-MI4.0), VDE Verlag GmbH, Berlin.
- [19] Plattform Industrie 4.0 (2022): Was ist Industrie 4.0? [online][abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html>
- [20] VDE IEC PAS 63088:2017: Smart manufacturing – Reference architecture model industry 4.0 (RAMI4.0).
- [21] Plattform Industrie 4.0 (2020): Nachhaltige Produktion: Mit Industrie 4.0 die Ökologische Transformation aktiv gestalten – Impulspapier der Task Force Nachhaltigkeit. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin [online][abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Nachhaltige-Produktion.html>
- [22] Schröder, C. (2016): Herausforderungen von Industrie 4.0 für den Mittelstand. Friedrich-Ebert-Stiftung, Abteilung Wirtschafts- und Sozialpolitik, Bonn [online][abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: <http://library.fes.de/pdf-files/wiso/12277.pdf>
- [23] IMPULS-Stiftung für den Maschinenbau- den Anlagenbau und die Informationstechnik (2022): Industrie 4.0-Readiness, Online-Selbst-Check für Unternehmen, 31.08.2022 [abgerufen am: 31.08.2022], verfügbar unter: <https://www.industrie40-readiness.de/?lang=de>

- [24] **Schröder, C. (2016):** Herausforderungen von Industrie 4.0 für den Mittelstand. Friedrich-Ebert-Stiftung, Abteilung Wirtschafts- und Sozialpolitik, Bonn [online][abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: <http://library.fes.de/pdf-files/wiso/12277.pdf>
- [25] **Westermann, T.; Anacker, H.; Dumitrescu, R. und Czaja, A. (2016):** Reference architecture and maturity levels for cyber-physical systems in the mechanical engineering industry. 2016 IEEE International Symposium on Systems Engineering, Edinburgh [online][abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7753153>
- [26] **Industrie 4.0 Österreich (2020):** Cyber-Physische Systeme [online]. Verein Industrie 4.0 Österreich – die Plattform für intelligente Produktion, 2020 [online][abgerufen am: 05.08.2023], verfügbar unter: <https://plattformindustrie40.at/forschung-entwicklung-innovation/cyber-physische-systeme/>
- [27] **Stark, R. und Damerau, T. (2019):** Digital Twin. In: Chatti, S.; Laperrrière, L.; Reinhart, G. und Tolio, T., Hg. CIRP Encyclopedia of pro-duction engineering, Springer, Heidelberg. ISBN 9783662531198.
- [28] **Reynolds, S. (2023):** Nachhaltigkeits-Reporting – Auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität mit dem Digitale Zwilling. Vogel Communications Group GmbH & Co. KG, 18.04.2023 [online [abgerufen am: 26.07.2023], verfügbar unter: <https://www.process.vogel.de/auf-dem-weg-zur-treibhausgasneutralitaet-mit-dem-digitale-zwilling-a-fca6478e1b821205004edb6c2f202124/>
- [29] **Adolphs, P.; Bedenbender, H.; Dirzus, D.; Ehrlich, M.; Epp-le, U.; Hankel, M.; Heidel, M.; Hoffmeister, M.; Huhle, H.; Kärcher, B.; Koziolok, H.; Pichler, H.; Pollmeier, R.; Schewe, F.; Walter, A.; Waser, B. und Wollschlaeger, M. (2015):** Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0) [online] [abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: <https://www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/referenzarchitekturmodell-industrie-40-rami40>
- [30] **vom Brocke, J. (2015):** Referenzmodellierung – Gestaltung und Verteilung von Konstruktionsprozessen. 2. Auflage. Logos Verlag, Berlin, Advances in information systems and management science, Band 4 [online][abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: [https://www.researchgate.net/publication/295549962\\_Referenzmodellierung\\_Gestaltung\\_und\\_Verteilung\\_von\\_Konstruktionsprozessen\\_2\\_Auflage](https://www.researchgate.net/publication/295549962_Referenzmodellierung_Gestaltung_und_Verteilung_von_Konstruktionsprozessen_2_Auflage)
- [31] **Anderl, R.; Deuse, J.; Doering, M. und Funk, H. (2016):** Softwarearchitekturen für Industrie 4.0 – RAMI und IIRA aus Sicht der Projekte im Technologieprogramm AUTONOMIK für Industrie 4.0. VDI/VDE Institut für Innovation und Technik, Berlin [online][abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: [https://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/autonomik-softwarearchitekturen%20studie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/autonomik-softwarearchitekturen%20studie.pdf?__blob=publicationFile&v=1)
- [32] **DIN SPEC 91345:2016-04:** Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0), Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [33] **Hankel, M. (2015):** Das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0). ZVEI e.V., Frankfurt am Main [online][abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: [https://www.zvei.org/fileadmin/user\\_upload/Presse\\_und\\_Medien/Publikationen/2015/april/Das\\_Referenzarchitekturmodell\\_Industrie\\_4.0\\_\\_RAMI\\_4.0\\_/Faktenblatt-Industrie4\\_0-RAMI-4\\_0.pdf](https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2015/april/Das_Referenzarchitekturmodell_Industrie_4.0__RAMI_4.0_/Faktenblatt-Industrie4_0-RAMI-4_0.pdf)
- [34] **Heidel, R.; Hoffmeister, M.; Hankel, M. und Döbrich, U. (2017):** Industrie 4.0 – Basiswissen RAMI4.0. Referenzarchitekturmodell mit Industrie 4.0 Komponente, Beuth Verlag GmbH, Berlin, ISBN 978-3-410-26482-8. S. 44.
- [35] **Standardization Council Industrie 4.0 (2022):** Industrie 4.0 Komponente und das Konzept der Verwaltungsschale. VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., 2022 [online] [abgerufen am: 11.08.2023], verfügbar unter: <https://www.sci40.com/themenfelder/verwaltungsschale/>
- [36] **Stock, D. (2016):** Industrie 4.0 versus IIC – Zwei Architekturansätze für das industrielle Internet. Vogel Communications Group GmbH & Co. KG, 22.08.2016 [online][abgerufen am: 11.08.2023], verfügbar unter: <https://www.elektronikpraxis.vogel.de/zwei-architekturansaeetze-fuer-das-industrielle-internet-a-547502/>
- [37] **Heidrich, M. und Jesse, J. L. (2016):** Whitepaper: Industrial Internet of things: Referenzarchitektur für die Kommunikation. Fraunhofer ESK, München [online][abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: <https://www.iks.fraunhofer.de/de/publikationen/whitepaper-studien/whitepaper-internet-of-things.html>
- [38] **Freitag, M.; Kück, M.; Ait Alla, A. und Lütjen, M. (2015):** Potenziale von Data Science in Produktion und Logistik: Teil 1 - Eine Einführung in aktuelle Ansätze der Data Science. In: Industrie 4.0 Management, 31, S. 22 – 26.
- [39] **Martins, F. und Kobylinska, A. (2019):** Was bedeutet Edge Computing? – IoT-Basics. Vogel Communications Group GmbH & Co. KG, 25.01.2019 [online][abgerufen am: 04.08.2023], verfügbar unter: <https://www.industry-of-things.de/was-bedeutet-edge-computing-a-678225/>
- [40] **Luber, S. (2019):** Was ist eine Distributed Cloud? Vogel Communications Group GmbH & Co. KG, 20.05.2019 [online][abgerufen am: 04.08.2023], verfügbar unter: <https://www.cloudcomputing-insider.de/was-ist-eine-distributed-cloud-a-824511/>
- [41] **Der Maschinenbau (2020):** Warum Edge Computing wichtig ist - Der Maschinenbau. TeDo Verlag GmbH [online][abgerufen am: 04.08.2023], verfügbar unter: <https://der-maschinenbau.de/konstruktion-planung/warum-edge-computing-wichtig-ist/>

- [42] **DIN/DKE (2020)**: Deutsche Normungsroadmap – Künstliche Intelligenz. DIN e.V. / DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik, Berlin / Frankfurt am Main [online][abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: <https://www.din.de/resource/blob/772438/6b5ac6680543eff9fe372603514be3e6/normungsroadmap-ki-data.pdf>
- [43] **VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2021)**: Potenziale der schwachen künstlichen Intelligenz für die betriebliche Ressourceneffizienz – Studie [online][abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: <https://www.ressource-deutschland.de/service/publikationen/detailseite/studie-kuenstliche-intelligenz/>
- [44] **Schmid, T.; Hildesheim, W.; Holoyad, T. und Schumacher, K. (2021)**: The AI Methods, Capabilities and Criticality Grid – A Three-Dimensional Classification Scheme for Artificial Intelligence Applications. In: KI - Künstliche Intelligenz, 35, S. 425 – 440 [online][abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s13218-021-00736-4>
- [45] **Wuppertal Institut (2017)**: MetalKIDD – Design eines zirkulären Metallmanagements mittels Metallstrategie und KI-Unterstützung für ein digitales Deutschland. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, 26.07.2023 [online][abgerufen am: 26.07.2023], verfügbar unter: <https://wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/1951>
- [46] **Fleisch, E.; Weinberger, M. und Wortmann, F. (2014)**: Geschäftsmodelle im Internet der Dinge. In: HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik, 51 (6), S. 812 – 826. ISSN 2198-2775. doi:10.1365/s40702-014-0083-3
- [47] **Plattform Industrie 4.0 (2021)**: Digitale Ökosysteme in der Industrie – Typologie, Beispiele und zukünftige Entwicklung – Ergebnispapier. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin [online][abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: [https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Digitale\\_Oekosysteme.html](https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Digitale_Oekosysteme.html)
- [48] **Koch, M.; Bartels, N. A.; Rauch, B.; Polst, S.; Storck, S. und Jeswein, T. (2022)**: Digitale Ökosysteme und Plattformökonomie [online]. Fraunhofer IESE, 2022 [online][abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: <https://www.iese.fraunhofer.de/de/leistungen/digitale-oekosysteme.html#Was-sind-Digitale-oekosysteme>
- [49] **Trapp, M.; Naab, M.; Rost, D.; Nass, C.; Koch, M. und Rauch, B. (2020)**: Digitale Ökosysteme und Plattformökonomie: Was ist das und was sind die Chancen? [online]. Informatik Aktuell, 23.06.2023 [abgerufen am: 04.08.2023], verfügbar unter: <https://www.informatik-aktuell.de/management-und-recht/digitalisierung/digitale-oekosysteme-und-plattformoekonomie.html>

- [50] **Boehm, C.; Duwe, J.; Humbeck, P. und Löwen, U. (2019)**: Whitepaper Plattformökonomie im Maschinenbau – Praktische Tipps und Erfahrungen von Anwendern. VDMA Informatik, Frankfurt am Main [abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: [https://www.researchgate.net/publication/337103905\\_Whitepaper\\_Plattformoekonomie\\_im\\_Maschinenbau\\_-\\_Praktische\\_Tipps\\_und\\_Erfahrungen\\_von\\_Anwendern](https://www.researchgate.net/publication/337103905_Whitepaper_Plattformoekonomie_im_Maschinenbau_-_Praktische_Tipps_und_Erfahrungen_von_Anwendern)
- [51] **Schmidt, H. (2018)**: VDMA: "Plattformökonomie gehört im Maschinen- und Anlagenbau zwingend auf Vorstandsebene, 13.02.2019 [online][abgerufen am: 04.08.2023], verfügbar unter: <https://www.netzoeconom.de/2018/02/09/vdma-plattformoekonomie-gehört-im-maschinen-und-anlagenbau-zwingend-auf-vorstandsebene/>
- [52] **Obermaier, R. und Mosch, P. (2019)**: Digitale Plattformen – Klassifizierung, ökonomische Wirkungslage und Anwendungsfälle in einer Industrie 4.0. In: Obermaier, R., Hg. Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation, Springer Gabler, Wiesbaden, S. 379 – 417. ISBN 978-3-658-24576-4.
- [53] **Boehm, C.; Duwe, J.; Humbeck, P. und Löwen, U. (2019)**: Whitepaper Plattformökonomie im Maschinenbau – Praktische Tipps und Erfahrungen von Anwendern. VDMA Informatik, Frankfurt am Main [online][abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: [https://www.researchgate.net/publication/337103905\\_Whitepaper\\_Plattformoekonomie\\_im\\_Maschinenbau\\_-\\_Praktische\\_Tipps\\_und\\_Erfahrungen\\_von\\_Anwendern](https://www.researchgate.net/publication/337103905_Whitepaper_Plattformoekonomie_im_Maschinenbau_-_Praktische_Tipps_und_Erfahrungen_von_Anwendern)
- [54] **Nietan, M. A.; Streim, A. und Gentemann, L. (2020)**: Chartbericht: Digitale Plattformen. Bitkom e.V., Berlin [online][abgerufen am: 03.08.2023], verfügbar unter: <https://www.bitkom.org/Bitkom/Publikationen/Chartbericht-Digitale-Plattformen-2020>
- [55] **VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2017)**: Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 – Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Berlin [online][abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: <https://www.ressource-deutschland.de/service/publikationen/detailseite/studie-industrie-40/>
- [56] **Hirsch-Kreinsen, H. (2014b)**: Wandel von Produktionsarbeit – „Industrie 4.0“. In: WSI-Mitteilungen, 67 (6), S. 421 – 429 [online][abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: <https://www.wsi.de/de/wsi-mitteilungen-wandel-von-produktionsarbeit-industrie-40-13091.htm>
- [57] **Dettl, J. (2016)**: PESTEL Analyse – Auswirkungen von externen Effekten auf das eigene Unternehmen. ACRASIO GmbH, 28.03.2023 [online][abgerufen am: 05.09.2023], verfügbar unter: <https://www.strategische-wettbewerbsbeobachtung.com/pestel-analyse/>
- [58] **Waidelich, L.; Richter, A.; Buthmann, P.; Wirth, J. und Kölmel, B. (2019)**: Digitalisierungsreifegrad-Modelle für KMU. In: ERP Management, 2019 (3), S. 28 – 31. ISSN 18606725. doi:10.30844/ERP19-3-28-31

- [59] **Gülpen, Christian; Piller, Frank Thomas (2019):** RWTH/VDI Industrie 4.0 Canvas : Konzeption und Analyse von Wertschöpfungsnetzwerken. In: Das Geschäftsmodell-Toolbook für digitale Ökosysteme [online][abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: <https://publications.rwth-aachen.de/record/789434/files/789434.pdf>
- [60] **VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2022):** Kurzanalyse Nr. 31: Digitale Technologien für die Entwicklung ressourceneffizienter Produkte und Services, Kurzanalyse 31 [online][abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: <https://www.ressource-deutschland.de/service/publikationen/detailseite/ka-31-digitalisierung-produktentwicklung/>
- [61] **VDI 2219:2016-09:** Verein Deutscher Ingenieure e.V., Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [62] **Plogmaker, H. (2021):** Die Szenarioanalyse nutzen [online]. Digitalradar Münsterland, 07.07.2021 [online][abgerufen am: 18.10.2023], verfügbar unter: <https://www.digitalradar-muensterland.de/die-szenarioanalyse-nutzen/>
- [63] **Neligan, A.; Engels, B.; Schaefer, T.; Schleicher, C.; Fritsch, M.; Schmitz, E.; Wiegand, R. (2021):** Digitalisierung als Enabler für Ressourceneffizienz in Unternehmen [online][abgerufen am: 29.02.2024], Gutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, Berlin, verfügbar unter: [https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user\\_upload/Studien/Gutachten/PDF/2021/Ressourceneffizienz\\_4.0\\_Hauptbericht.pdf](https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Gutachten/PDF/2021/Ressourceneffizienz_4.0_Hauptbericht.pdf)



**VDI Zentrum Ressourceneffizienz (VDI ZRE)**

**Bülowstraße 78**

**10783 Berlin**

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

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

Diese Broschüre wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz erstellt.