

VDI

Zentrum
Ressourceneffizienz

Im Auftrag des:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit
und Verbraucherschutz

VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 31

Digitale Technologien für die Entwicklung ressourceneffizienter Produkte und Services



© PantherMedia/Gorodenkoff (bearbeitet)

VDI ZRE Kurzanalyse Nr. 31: Digitale Technologien für die Entwicklung ressourceneffizienter Produkte und Services

Autor:

Jakob Rothmeier, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH

Wir danken Herrn Prof. Dr.- Ing. Rainer Stark, Fachgebietsleiter Industrielle Informationstechnik am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF), Fakultät für Verkehrs- und Maschinensysteme der Technischen Universität Berlin, für seine fachliche Unterstützung.

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

Redaktion:

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)

Bülöwstraße 78

10783 Berlin

Tel. +49 30-27 59 506-0

zre-info@vdi.de

www.ressource-deutschland.de

Titelbild: © PantherMedia / Gorodenkoff (bearbeitet)

Gedruckt auf umweltfreundlichem Recyclingpapier.

VDI ZRE Publikationen:
Kurzanalyse Nr. 31

Digitale Technologien für die Entwicklung
ressourceneffizienter Produkte und Services

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	5
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	7
1 EINLEITUNG	9
2 RESSOURCENEFFIZIENTE PRODUKT- UND SERVICE- ENTWICKLUNG	11
2.1 Grundlagen der ressourceneffizienten Produkt- und Serviceentwicklung	12
2.2 Produktentwicklung in der Industrie 4.0	16
3 PRODUKTENTWICKLUNG MITTELS DIGITALER TECHNOLOGIEN	24
3.1 PDM-Systeme in der Produktentwicklung	25
3.2 Digitales Prototyping	30
3.3 Digitaler Zwilling	35
3.4 KI in der Produktentwicklung	42
3.5 Agile Produktentwicklungstools	47
4 ENTWICKLUNG VON PRODUKT-SERVICE-SYSTEMEN	52
5 FAZIT	59
6 AUSBLICK	61
6.1 PLM-Systeme	61
6.2 Digitaler Produktpass	65
LITERATURVERZEICHNIS	67
ANHANG	76

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: T-Modell: Lebensweg eines Produkts und wichtige Richtlinien in den einzelnen Abschnitten	13
Abbildung 2: Phasen des integrierten Produktentwicklungsprozesses	14
Abbildung 3: Elemente der integrierten Produktentwicklung	15
Abbildung 4: Vision der Produkt- und Servicewelt (eigene Darstellung nach Unity Consulting)	18
Abbildung 5: Wandel der Industrie und damit einhergehende wichtige Begrifflichkeiten	20
Abbildung 6: Auswahl wichtiger notwendiger Daten in der Produktentwicklung (eigene Darstellung)	22
Abbildung 7: PDM-Systemtypen	26
Abbildung 8: Mögliche Einführungsstufen von PDM	27
Abbildung 9: Festlegung, tatsächliche Entstehung und Beeinflussung von Kosten über den kompletten Produktlebensweg	28
Abbildung 10: Digitales Prototyping und damit verbundene Themenfelder (eigene Darstellung)	33
Abbildung 11: Einsatz eines digitalen Zwillings in verschiedenen Branchen	38
Abbildung 12: Digitaler Zwilling in der Produktentwicklung und damit verbundene Themenfelder (eigene Darstellung)	40
Abbildung 13: Künstliche Intelligenz in der Produktentwicklung und damit verbundene Themenfelder (eigene Darstellung)	45
Abbildung 14: Agile Produktentwicklungstools und damit verbundene Themenfelder (eigene Darstellung)	49

6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 15: Das V-Modell als PSS-Entwicklungsmodell	54
Abbildung 16: Produkt-Service-Systeme und damit verbundene Themenfelder (eigene Darstellung)	57
Abbildung 17: Einordnung von PLM in den Produktlebenszyklus und die Unternehmens-IT-Landschaft	62
Abbildung 18: Konzept eines digitalen Produktpasses	65

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AR	Augmented Reality
CAD	Computer-Aided Design
CAX	Computer-Aided x
CO₂	Kohlenstoffdioxid
CPS	Cyberphysische Systeme
ERP	Enterprise-Resource-Planning
FEM	Finite-Elemente-Methode
HiL	Hardware in the Loop
HPC	High Performance Computing
IoT	Internet of Things (Internet der Dinge)
IT	Informationstechnik
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KRA	Kumulierter Rohstoffaufwand
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LCA	Life Cycle Assessment
PDM	Produktdatenmanagement
PLM	Product Lifecycle Management
PPS	Produktionsplanungssystem
PSS	Produkt-Service-System
PVC	Polyvinylchlorid

PWC	PricewaterhouseCoopers
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDI ZRE	VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH
VR	Virtual Reality
VPC	Virtual Product Creation

1 EINLEITUNG

Die Vernetzung von Objekten und Menschen im Umfeld der Industrie 4.0 birgt vielfältige Chancen, erzeugt und fordert aber auch große Mengen an Informationen. Ingenieurinnen und Ingenieure stehen somit bei der Entwicklung neuer Produkte und Dienstleistungen häufig Daten zur Verfügung, die mit Hilfe digitaler Technologien in Echtzeit erfasst und weiterverarbeitet werden können, Rückschlüsse über zukünftiges Verhalten ermöglichen oder bereits vorhandene Datenbanken um wichtige Zusatzinformationen erweitern und ergänzen. Das dadurch hervorgerufene Effizienzpotenzial für Produkte, Prozesse und Services ist grundsätzlich sehr groß und daher für die Steigerung der Ressourceneffizienz in der Produkt- und Serviceentwicklung von Bedeutung. Mit der ständigen Zunahme an Informationen und Optimierungsmöglichkeiten geht allerdings auch eine Komplexität einher, in der es sich zunächst zurechtzufinden gilt.

Als digitale Technologien können dabei solche Technologien verstanden werden, die auf (Computer-)Hardware, Software und Vernetzung beruhen und sich von den klassischen Technologien durch Flexibilität und eine hohe Verfügbarkeit abgrenzen¹. Die häufig ökonomisch getriebenen Effizienzbestrebungen durch neue digitale Technologien bergen dabei das Potenzial, beispielsweise aufgrund der schnelleren Bestimmung der bestmöglichen Lösung oder erwartbarer Qualitätsverbesserungen, die natürlichen Ressourcen zu schonen und damit zur Ressourceneffizienz beizutragen. Mit Ressourceneffizienz ist gemäß VDI-Richtlinie 4800 (Blatt 1) das Verhältnis eines bestimmten Nutzens oder Ergebnisses zum dafür nötigen Ressourceneinsatz gemeint.² Ein Unternehmen handelt also dann ressourceneffizient, wenn Materialien beziehungsweise Energie im Produktlebensweg eingespart werden oder der Nutzen im Verhältnis zum Einsatz gesteigert werden kann. Im Idealfall werden Produkte daher so entwickelt, dass möglichst wenig Rohstoffe und Energieressourcen für den vorgesehenen Nutzen benötigt werden und zudem eine gute Reparier- und Wiederverwendbarkeit gewährleistet ist.

¹ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2021), S. 8.

² Vgl. VDI 4800 Blatt 1:2016-02.

Da die Inanspruchnahme von Ressourcen immer auch mit Treibhausgasemissionen verbunden ist, leisten Maßnahmen zur Ressourceneffizienz zudem einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz.

Ziel der Kurzanalyse ist es, digitale Technologien und damit verbundene Methoden in der Produktentwicklung zu identifizieren und im Sinne der Ressourceneffizienz zu bewerten. Darüber hinaus sollen auch die Voraussetzungen ihrer Umsetzbarkeit herausgearbeitet und in einem Ordnungsrahmen dargestellt werden. Eine Auswahl an praktischen Beispielen zeigt außerdem, wie andere Unternehmen bereits heute Aspekte der Ressourceneffizienz bei der Produktentwicklung berücksichtigen.

Um die Ressourceneffizienz im Kontext der Produktentwicklung und der Industrie 4.0 besser einordnen zu können, dient das nachfolgende Kapitel als Einführung in die Grundlagen und wichtigen Begrifflichkeiten. Im Kapitel 3 werden anschließend digitale Technologien vorgestellt, die eine ressourceneffiziente Produkt- und Serviceentwicklung begünstigen können. Das Kapitel 4 wiederum stellt eine Methodik vor, wie die Entwicklung von Produkt-Service-Systemen (PSS) auch aus Sicht der Ressourceneffizienz vorangetrieben werden kann. Das auf das Fazit folgende Kapitel 6 bietet abschließend einen Ausblick über mögliche Technologien, bei denen zukünftig die ressourceneffiziente Produktentwicklung eine wichtige Rolle spielen wird.

2 RESSOURCENEFFIZIENTE PRODUKT- UND SERVICEENTWICKLUNG

Die Anpassung oder Neuentwicklung von Produkten und Dienstleistungen resultiert häufig aus unternehmensinternen Veränderungen, geänderten Rahmenbedingungen wie neuen Gesetzen und Technologien oder veränderten Kundenansprüchen.³ Neben der fortschreitenden Digitalisierung ist somit erwartbar, dass gesetzliche Vorgaben wie das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG), aber auch der gesellschaftliche Wunsch nach neuen Funktionalitäten und umweltfreundlicheren Produkten, die Neu- und Weiterentwicklung von ressourceneffizienten Produkten und Services vorantreiben.

Für die Produkt- und Serviceentwicklung ergeben sich durch die Vernetzung und Kommunikation von Menschen und Maschinen neue Möglichkeiten. Während die Weitergabe von Informationen lange Zeit gleichgerichtet mit den Schritten der Wertschöpfung erfolgte und eine spätere Anpassung der Produkte mit hohen Kosten verbunden war, unterstützt die Vernetzung von immer mehr Komponenten nun eine vor- wie rückwärtsgerichtete Kommunikation und Anpassung in allen Schritten der Wertschöpfung.

Zudem begünstigt eine tiefere Vernetzung in der Wertschöpfung auch die Entwicklung von sogenannten PSS und produktnahen Services.⁴ Unter PSS werden der Verkauf und die Verknüpfungen von Dienstleistungen an gekoppelte Produkte verstanden. Die Ausprägungen reichen von produktorientierten Services wie ergänzenden Schulungsangeboten, über nutzungsorientierte PSS wie Leasingangebote bis hin zu ergebnisorientierten PSS, bei denen lediglich das Ergebnis und nicht mehr das dafür notwendige Produkt angeboten wird.⁵ Da Unternehmen mit der Entwicklung von PSS häufig ein neues und flexibles Erlösmodell schaffen können, ist in Zukunft mit einer Zunahme dieser Angebote zu rechnen. Auch produktnahe Dienstleistungen werden durch die engere Vernetzung der Unternehmensorganisationen begünstigt. Aus diesem Grund sind beispielsweise die Aufbereitung, Analyse

³ Vgl. Scholz, U.; Pastoors, S.; Becker, J. H.; Hofmann, D. und van Dun, R. (2018), (Vorwort).

⁴ Im industriellen Kontext wird auch von Industriellen Produkt-Service-Systemen (IPSS) gesprochen.

⁵ Vgl. Herzog, M.; Köster, M.; Sadek, T. und Bender, B. (2017), S. 8.

und Weitergabe anfallender Daten vor allem durch die Zunahme an Informationen in allen Unternehmensorganisationen attraktiv und sollten auch aus Sicht einer ressourceneffizienten Produktentwicklung berücksichtigt werden.

In der Kurzanalyse werden sowohl die Produktentwicklung als auch die Entwicklung produktnaher Services und PSS betrachtet. Da es sich bei Services im weiteren Sinne ebenfalls um Produkte handelt, deckt der Begriff "Produkt" - sofern nicht anders dargestellt - in der vorliegenden Kurzanalyse alle drei Bereiche ab.

2.1 Grundlagen der ressourceneffizienten Produkt- und Serviceentwicklung

Eine Produktentwicklung in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) sowie in großen Unternehmen unterscheidet sich - im Vergleich zum Handwerk - durch die stärkere Vernetzung interner und externer Beteiligter. Aufgrund der Vielzahl an Schnittstellen mit anderen Bereichen (z. B. Marketing, Produktion oder Logistik) weist die Produktentwicklung unter allen Abteilungen den höchsten Vernetzungsgrad auf.⁶ Deshalb können nahezu alle Informationen aus anderen Bereichen eines Unternehmens direkt oder indirekt zur effizienteren Entwicklung von Produkten und Dienstleistungen beitragen. Beispiele hierfür sind:

- Verknüpfung zur Produktion: Problemstellen in der Produktion, wie überdurchschnittliche Bearbeitungszeiten, werden durch die Erfassung der Produktionszeiten erkannt und anschließend durch die Anpassungen der Produkte behoben.
- Verknüpfung zum Kundenmanagement: Analytierte Kundenwünsche führen schneller zur Entwicklung zufriedenstellender Produkte mit weniger Anpassungsschleifen.

⁶ Vgl. Kirchner, E. (2020), S. 6.

- Verknüpfung zur Infrastruktur und Logistik: Vorhandene Maschinen, Verpackungsarten und Transportmöglichkeiten bilden eine logistische Grenze bei der Entwicklung neuer Produkte.

Um die Ressourceneffizienz in der Produktentwicklung zu fördern, können im ersten Schritt Richtlinien und Normen in der Produktentwicklung wichtige Leitlinien bilden (vgl. Abbildung 1). Des Weiteren ist die Betrachtung methodischer Herangehensweisen in der Produktentwicklung und bei der Bestimmung des Ressourceneinsatzes sinnvoll.

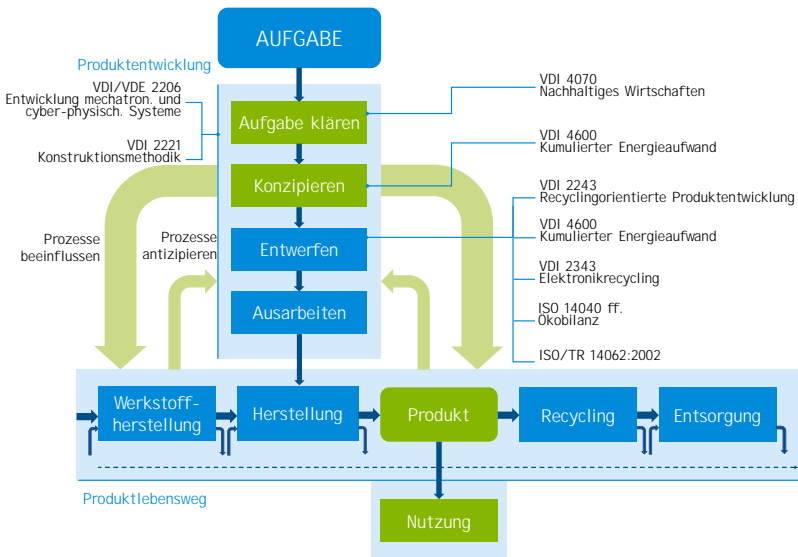


Abbildung 1: T-Modell: Lebensweg eines Produkts sowie ausgewählte Richtlinien und Normen in den einzelnen Abschnitten⁷

Viele Produkte setzen sich aus mechanischen, elektrischen, elektronischen, hydraulischen und/oder pneumatischen Teilkomponenten zusammen und bieten darüber hinaus immaterielle Servicedienstleistungen in Form von PSS an. Aus diesem Grund werden die in Abbildung 1 dargestellten Phasen der Produktentwicklung (senkrechte Schritte) unter dem Begriff der "integrierten Produktentwicklung" zunächst genauer betrachtet. Die integrierte

⁷ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2022).

Produktentwicklung ist eine zielorientierte Vorgehensweise, die organisatorische, methodische und technische Maßnahmen berücksichtigt.⁸ Die in der nachfolgenden Abbildung dargestellten "Sprünge" zwischen den einzelnen Phasen verdeutlichen, dass die Produktentwicklung durch die beschriebene Kombination von Objekten und Services an Komplexität zunimmt.

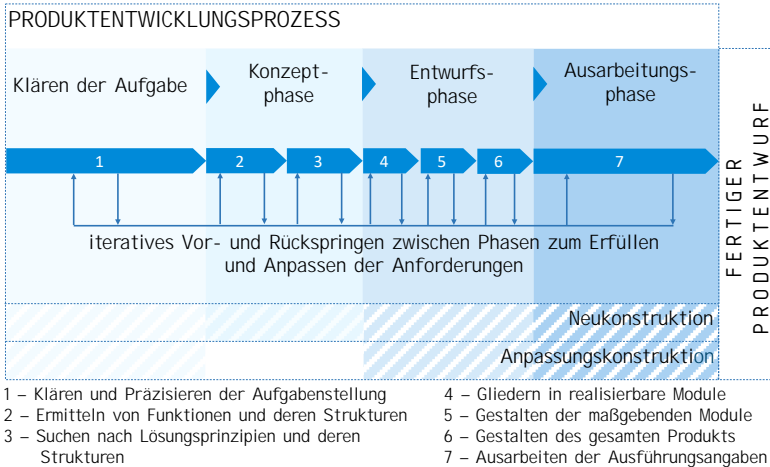


Abbildung 2: Phasen des integrierten Produktentwicklungsprozesses⁹

Eine Möglichkeit, dieser Herausforderung gerecht zu werden, ist das sogenannte Simultaneous Engineering. Dabei wird die Produktentwicklungszeit verkürzt, indem einzelne Phasen des Entwicklungsprozesses zeitlich parallel bzw. überlappend bearbeitet werden. Auf diese Weise können Anpassungsschleifen verbessert werden. Eine gute Abstimmung der Projektteams in den einzelnen Stufen ist hierfür grundlegend.

Um den Ablauf der integrierten Produktentwicklung zu fördern, gibt es eine Vielzahl an Methoden und digitalen Hilfsmitteln, die in Kapitel 3 genauer beschrieben werden. Allgemein tragen folgende Faktoren zum Gelingen einer integrierten Produktentwicklung bei (vgl. Abbildung 3):

⁸ Vgl. Lange, U. und Oberender, C. (2017), S. 13 – 14.

⁹ Eigene Darstellung nach Lange, U. und Oberender, C. (2017), S. 14.



Abbildung 3: Elemente der integrierten Produktentwicklung¹⁰

Ein weiterer wichtiger Faktor in der integrierten Produktentwicklung sind interdisziplinäre Teams. Durch verschiedene Fachrichtungen der Teammitglieder wird eine umfassende Sicht auf die Entwicklung eines Produkts wahrscheinlicher. Personen an der Schnittstelle zu Zuliefernden oder der Materialwirtschaft können beispielsweise mögliche Potenziale für die Kreislaufwirtschaft leichter erkennen, wohingegen Expertinnen und Experten aus der Fertigungsvorbereitung frühzeitig Optimierungspotenziale bei der anschließenden Produktion identifizieren können.¹¹

Um den Ressourceneinsatz in den einzelnen Phasen der Produktentwicklung (und in anderen Phasen der Wertschöpfung) zu bestimmen und anschließend Rückschlüsse auf die Ressourceneffizienz zu ziehen, müssen die

¹⁰ Eigene Darstellung nach Lange, U. und Oberender, C. (2017), S. 15.

¹¹ Vgl. Lange, U. und Oberender, C. (2017), S. 15.

aufgewendeten Rohstoffe und Energieressourcen ermittelt werden. So ermöglichen beispielsweise der Kumulierte Rohstoffaufwand (KRA) und der Kumulierte Energieaufwand (KEA) die Berechnung des Ressourceneinsatzes im gesamten Lebensweg.¹² Gängiger ist jedoch die Methode des Life Cycle Assessment (LCA). Dazu werden die In- und Outputs eines Prozesses oder Produktes über den kompletten Lebensweg gesammelt und mittels Software in vergleichbare Indikatoren umgerechnet. Aktuell wird häufig der CO₂-Fußabdruck als Indikator für LCA verwendet.¹³ Im Bereich der Produktentwicklung kann so bestimmt werden, wie hoch die Material- und Energieeinsätze bis zur tatsächlichen Entwicklung waren. Diese Sachbilanz kann anschließend zur Bestimmung der Ressourceneffizienz herangezogen werden: Stellt ein Unternehmen beispielsweise fest, dass bestimmte Maßnahmen, wie z. B. der Einsatz digitaler Technologien, bis zur Entwicklung des gewünschten Produkts einen geringeren Material- und Energieaufwand erforderten, können diese Maßnahme sowohl aus ökonomischer als auch aus Sicht der Ressourceneffizienz sinnvoll sein.

Damit die Entwicklung ressourceneffizienter Produkte gelingen kann, empfiehlt es sich, Maßnahmen der Produktentwicklung und damit verbundene Normen und Richtlinien sowie Methoden wie LCA, KRA oder KEA zu berücksichtigen. Durch Bilanzierungsmethoden können ressourcenintensive Abschnitte in der Wertschöpfung identifiziert und bei der Neu- oder Weiterentwicklung von Produkten im Sinne der Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit verbessert werden.

2.2 Produktentwicklung in der Industrie 4.0

Die Industrie 4.0 zielt darauf ab, ganze Unternehmen und damit verbundene Netzwerke digital zu steuern und zu leiten. Dieser Anspruch erfordert allerdings eine vollständige Digitalisierung der industriellen Prozesse. Eine Industrie 4.0 ist letztlich nicht mehr nur die digitale Steuerung von Maschinen und Produktionslinien, sondern soll ein effektives Zusammenspiel aller wert-

¹² Mehr Informationen in der VDI ZRE Kurzanalyse Nr. 20.

¹³ Vgl. Scholz, U.; Pastoors, S.; Becker, J. H.; Hofmann, D. und van Dun, R. (2018), S. 27.

schöpfungsrelevanten Prozesse, Aktivitäten und Dienstleistungen darstellen.¹⁴ Um dieser zunehmenden Vernetzung und Komplexität aus Sicht der Produkt- und Serviceentwicklung gerecht zu werden, müssen insbesondere die Veränderungen in der auf die Entwicklung folgenden Produktion berücksichtigt werden. Zukünftig ist zu erwarten, dass datengesteuerte Produktionsprozesse zu mehr dynamischen und individuellen Umplanungen von Produktaufträgen und Baureihenfolgen führen können (beispielsweise bei Materialverfügbarkeiten oder Chargenprüfungen).¹⁵ Für die Produktentwicklung bedeutet dies wiederum, die Aspekte der Modularisierung – also die Aufgliederung einzelner Komponenten und Objekte – in den zukünftigen Produkten stärker zu berücksichtigen, um den Flexibilitätsanforderungen in der Produktion gerecht zu werden.

Durch die zunehmende Vernetzung können Produkte zukünftig in der Wertschöpfung eines Unternehmens eine Teilkomponente darstellen, deren Wert erst im gesamten System erkennbar wird. Die nachfolgende Darstellung zeigt beispielhaft, wie sich die Entwicklung von Produkten im Zuge der Digitalisierung und der allgemeinen Vernetzung weiterentwickeln kann (vgl. Abbildung 4). Produkte sind gegenwärtig immer häufiger mit digitalen Komponenten wie Sensoren, Aktoren und Rechnern ausgestattet und können so untereinander und mit anderen digitalen Endgeräten kommunizieren. Die zukünftigen Potenziale einer solchen fortschreitenden Vernetzung lassen sich beispielsweise bereits heute in der Mobilitätsbranche erkennen. Während Finanzierungs- oder Sharing-Angebote längst wichtige Teilkomponenten der Mobilitätsbranche sind, ist zu erwarten, dass zukünftig komplette industrielle digitale Plattformen und vernetzte Systeme mit einer Vielzahl an Informationen entstehen werden. Schnittstellen zur urbanen Mobilität oder zum Energiemanagement könnten dann z. B. Kundinnen und Kunden dabei unterstützen, Staus zu vermeiden oder das Laden der Batterien besser zu koordinieren.

¹⁴ Vgl. Stark, R. (2022), S. 509.

¹⁵ Vgl. Stark, R. (2022), S. 510.

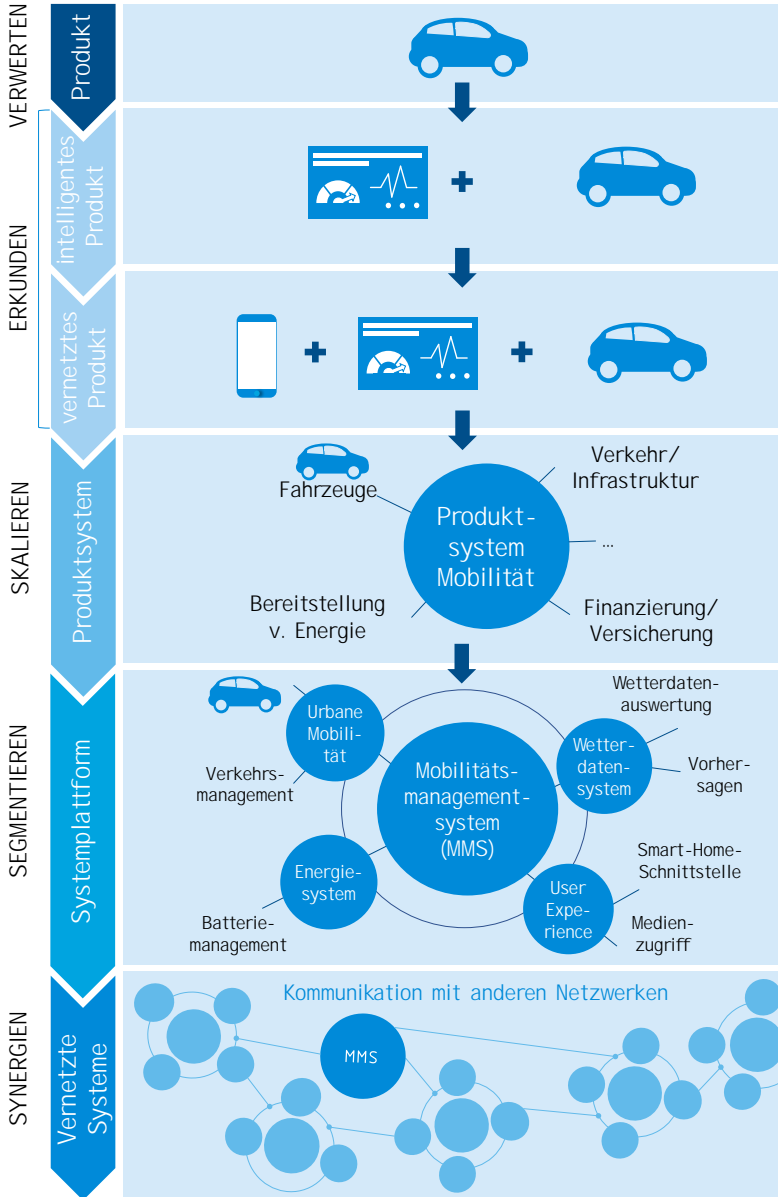


Abbildung 4: Vision der Produkt- und Servicewelt (eigene Darstellung nach Unity Consulting¹⁶⁾)

Die Vernetzung und die daraus resultierenden Möglichkeiten, große Datenmengen zu erfassen, zu analysieren und im Sinne der Effizienzsteigerung einzusetzen, machen somit eine der Hauptbestrebungen der Industrie 4.0 aus. Folgende technische Errungenschaften beziehungsweise Begrifflichkeiten sind dabei auch für die Produktentwicklung essenziell¹⁷:

Retrofitting

Unter dem Ansatz des Retrofittings (auch "digitales Retrofit") werden die Nachrüstung und Modernisierung bestehender Industrieanlagen verstanden. Anstatt Maschinen komplett zu wechseln, soll durch die nachträgliche Ergänzung insbesondere von Sensorik und Kommunikationstechnik der Anschluss an das Internet der Dinge (siehe nächster Abschnitt) umsetzbar werden. Neben möglichen Kosteneinsparungen werden durch die längere Nutzungsdauer und die Option von ergänzenden Dienstleistungen wie dem Predictive Maintenance auch Ressourcen geschont und die Ressourceneffizienz gesteigert.¹⁸ Entwicklerinnen und Entwicklern zeigt das Retrofitting zudem, dass nicht nur die Konzeption neuer Produkte Chancen für die Ressourceneffizienz mit sich bringt, sondern auch die Weiterentwicklung bereits vorhandener Produkte (Ressourceneffizienz-)Potenziale birgt.

Cyberphysische Systeme (CPS) und Internet der Dinge (IoT)

CPS bauen auf mechatronischen bzw. smarten Objekten auf und bestehen aus Sensoren, Aktoren, einer Benutzerschnittstelle und Funktionen, die alle Aufgaben der Datenaufnahme, -verarbeitung und -ausgabe ausführen.¹⁹ Sie bilden dadurch eine Hauptkomponente der Industrie 4.0. CPS können als Weiterentwicklung von programmierbaren mechatronischen Systemen verstanden werden (vgl. Abbildung 5), wobei sie maßgeblich durch die Vernetzung mit dem Internet der Dinge (IoT) und andere Dienste gekennzeichnet sind.²⁰

¹⁶ Vgl. UNITY Consulting & Innovation (2020).

¹⁷ Weitere Begrifflichkeiten, die im Zuge der digitalen Produktentwicklung wichtig sein können, sind im Anhang aufgelistet.

¹⁸ Vgl. Luber, S. (2018).

¹⁹ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2017), S. 28.

²⁰ Vgl. VDI/VDE 2206:2021-11, S. 14.

Unter dem Begriff IoT wird ein Netzwerk von computergestützten Objekten verstanden, die in der Lage sind, miteinander zu kommunizieren. Der Austauschprozess kann dabei teilweise ohne den Faktor Mensch geschehen. Der Begriff "computergestützt" bedeutet wiederum, dass die verbundenen Geräte selbst keine Computer sein müssen, sondern eine andere Hauptfunktion haben.²¹

CPS und IoT als übergeordnete Technologien sind auch für die Produktentwicklung von großer Bedeutung. So lassen sich durch die aus der Herstellungs- und Nutzungsphase erhobenen Daten sowie die Möglichkeit der Weitergabe Erkenntnisse für die Produktentwicklung ableiten - beispielsweise durch präzises Ermitteln von Fehlerquellen der Vorgängerprodukte. Allerdings müssen neue Produkte mit den notwendigen Sensoren, Aktoren und Rechnern ausgestattet sein, um die Möglichkeiten und Potenziale der Industrie 4.0 überhaupt umsetzen zu können.

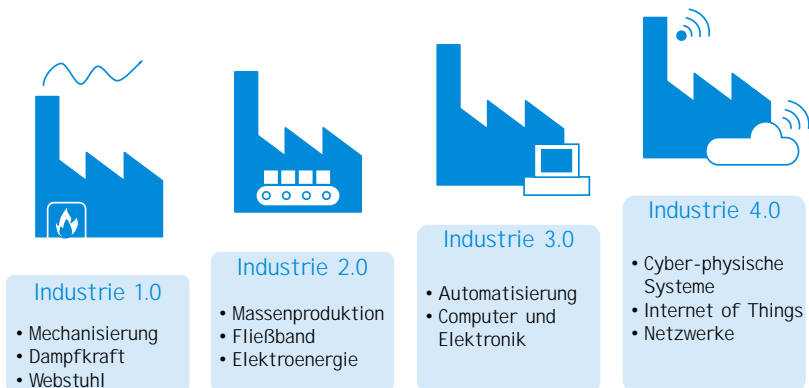


Abbildung 5: Wandel der Industrie und damit einhergehende wichtige Begrifflichkeiten²²

²¹ Vgl. Stark, R. (2022), S. 532.

²² Eigene Darstellung nach Stark, R. (2022), S. 509.

Big Data und Smart Data

Durch die Vernetzung von Mensch und Maschine entstehen riesige Mengen an Daten, häufig in Echtzeit. Unter dem Begriff "Big Data" werden die Sammlung und Anwendung von qualitativ und quantitativ vielfältigen Informationen zusammengefasst. Im industriellen Umfeld handelt es sich häufig um (Echtzeit-)Daten zu Prozessen, Qualitätsmerkmalen, Produkten und Beschäftigten sowie deren Umfeld, mit dem Ziel einer Prozess- und Qualitätsverbesserung. Im Zuge der richtigen Aufbereitung von "Big Data" wird auch von sogenannter "Smart Data" gesprochen. Smart-Data-Analysen unterstützen beispielsweise eine effizientere Produktionsplanung, aber auch genauere Wartungsplanungen (sogenannte Predictive Maintenance).²³

Wie in der nachfolgenden Abbildung beschrieben, sind im Produktentwicklungsprozess eine Vielzahl an Informationen, z. B. über Produkt- und Produktionsanforderungen, notwendig (vgl. Abbildung 6). Das große Potenzial für Entwicklerinnen und Entwickler liegt hier zum einen in der Präzisierung der für den Entwicklungsprozess relevanten Daten, zum anderen in der Erweiterung der Sammlung um Informationen, die bislang schwer bzw. nicht messbar waren. Ein Beispiel hierfür ist die Auswertung von Nutzungsdaten in der Automobilbranche: Ursprünglich erhielten Ingenieurinnen und Ingenieure Informationen über die durchschnittliche Lebensdauer ihrer Autos – gemessen in Jahren oder gefahrenen Kilometern. Durch nun messbare Echtzeitdaten wie das Bremsverhalten, Standzeiten, Durchschnittsgeschwindigkeiten oder Geokoordinaten lassen sich zukünftige Produkte oder Komponenten deutlich effizienter an die geforderten Ansprüche anpassen. Auf diese Weise lässt sich sukzessive die Lebensdauer der Fahrzeuge erhöhen, was sich wiederum positiv auf die Ressourceneffizienz auswirkt.

²³ Vgl. Rank, R. (2017).

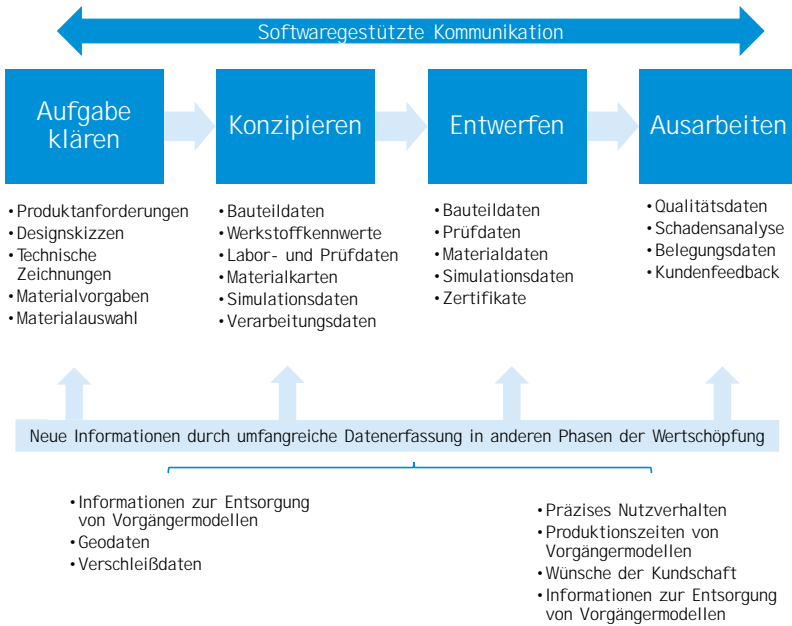


Abbildung 6: Auswahl wichtiger notwendiger Daten in der Produktentwicklung (eigene Darstellung)

High Performance Computing (HPC)

Aufgrund der großen Datenmengen in der Industrie 4.0 kommt dem sogenannten High Performance Computing (HPC) ebenfalls eine Schlüsselrolle zu. Diese Hochleistungsrechner ermöglichen die parallele und effiziente Simulation, die Analyse komplexer Modelle sowie das Finden und Implementieren softwarebasierter Lösungen. Durch die weitere Vernetzung und das damit verbundene Datenwachstum stoßen gegenwärtige Standardrechner immer häufiger an ihre Grenzen. Die Bedeutung dieser Technologie wird deshalb unweigerlich in Zukunft zunehmen.²⁴ Im Zuge des HPC sind auch das sogenannte Cloud Computing und Edge Computing zu nennen. Unter Cloud Computing wird der Echtzeitzugriff auf einen Rechner über das Netz verstanden, wobei durch die Zentralisierung der Verwaltungsaufwand und die Interaktion mit Dienstleistungsunternehmen auf ein Minimum reduziert

²⁴ Vgl. Baden-Württemberg Stiftung gGmbH (2020).

werden können. Gleichzeitig wird eine große Rechenleistung bereitgestellt.²⁵ Aufgrund der weiter zunehmenden Datenmengen und Transfers stößt auch das Cloud Computing immer häufiger an Grenzen, sodass aufgrund von Latenzen insbesondere der für die Technologie so wichtige Echtzeitfaktor zunehmend öfter beeinträchtigt wird. Das Edge Computing kann deshalb als Zwischenebene zwischen Sensoren an Endgeräten und den zentralen Rechnern oder Rechenzentren verstanden werden. Vereinfacht dargestellt, werden mithilfe von Edge Computing relevante Daten an den Orten, wo sie entstehen (beispielsweise an Maschinen mit Sensoren), gesammelt und gefiltert und lediglich wichtige Daten an einen zentralen Rechner geliefert.²⁶

Die Potenziale, die sich daraus für die Produktentwicklung ergeben, sind vielfältig. Durch die präzise Bereitstellung nutzbarer Daten (Smart Data) aus nachgelagerten Wertschöpfungsketten können beispielsweise Problemstellungen in der Produktion, dem Nutzungsverhalten oder hinsichtlich der Wünsche von Kundinnen und Kunden passgenauer berücksichtigt werden. Zugleich bietet das HPC komplexe Berechnungen und Simulationen (vgl. Abschnitt 3.2), wodurch schnelle und präzise Simulationen möglich sind. Aus Sicht der Ressourceneffizienz lassen sich daraus vielfältige positive Effekte schließen, wie z. B. die Vermeidung von Fehlern und weniger Test- und Anpassungsschleifen.

²⁵ Vgl. Stark, R. (2022), S. 540.

²⁶ Vgl. Stark, R. (2022), S. 543.

3 PRODUKTENTWICKLUNG MITTELS DIGITALER TECHNOLOGIEN

Die Spannbreite an Technologien, die die Digitalisierung hervorgebracht bzw. der sie zum Erfolg verholfen hat, ist groß. Im Zuge der engeren Vernetzung einzelner Unternehmensorganisationen (und darüber hinaus) bieten viele digitale Technologien Problemlösungen an, die nicht klar einem Unternehmensbereich - und somit auch nicht der Produktentwicklung - zuzuordnen sind. Gleichwohl versprechen alle Technologien den Nutzerinnen und Nutzern effiziente Lösungen bei betrieblichen Herausforderungen, wodurch sich auch Chancen für die Ressourceneffizienz ergeben.

Aufgrund des breiten Spektrums werden in den nachfolgenden Kapiteln digitale Technologien vorgestellt, die gegenwärtig und perspektivisch eine wichtige Rolle in der ressourceneffizienten Produkt- und Serviceentwicklung einnehmen können. Die vorgestellten Technologien sind als übergeordnetes Themengebiet zu verstehen. Mögliche Ausprägungen und verwandte Themenbereiche werden in den jeweiligen Organigrammen an den Enden der Kapitel erwähnt und wichtige Begrifflichkeiten im Anhang genauer erklärt. Die in Abschnitt 3 beschriebenen digitalen Technologien fokussieren sich auf die Entwicklung physischer Produkte, haben aber insbesondere auch durch die Relevanz der Datenerhebung, Analyse und Auswertungen für die Serviceentwicklung eine wichtige Bedeutung.

Folgende Fragestellungen sollen in diesem Kapitel beantwortet werden:

- Welche digitalen Technologien unterstützen die effiziente Produktentwicklung und eine Entwicklung ressourceneffizienter Produkte?
- Welche Methoden und Herangehensweisen der Produktentwicklung stehen im Zusammenhang mit den vorgestellten digitalen Technologien?
- Welche Daten und Informationen sind bei der Umsetzung der digitalen Technologien besonders relevant?

Die in diesem Kapitel vorgestellten digitalen Technologien machen außerdem deutlich, dass der Dienstleistungscharakter mit seinen typischen Eigenschaften wie der Immaterialität oder häufigen Synchronität von Herstellung

und Verbrauch von Services auch im Engineering zunimmt. Aus diesem Grund bilden die nachfolgenden Technologien die Grundlage für die in Kapitel 4 und Kapitel 6 vorgestellten Themen.

3.1 PDM-Systeme in der Produktentwicklung

Wer digitale Technologien bei der Produkt- und Serviceentwicklung verwenden möchte, benötigt eine Vielzahl unterschiedlicher Daten, mit denen er arbeitet. Das sogenannte Produktdatenmanagement (PDM) als zentrales "Verwaltungsorgan" kann als Grundlage angesehen werden, um die in den anderen Abschnitten vorgestellten Potenziale der digitalen Technologien voll auszuschöpfen. Mittels PDM können produktspezifische Daten, die in der Produktentwicklung anfallen, erfasst, verwaltet und archiviert und anschließend nachgelagerten Phasen des Produktlebenswegs zur Verfügung gestellt werden. Insofern bietet sich das PDM an, die zunehmende Komplexität der Daten effizient zu organisieren. Der Ansatzpunkt von PDM ist die Schaffung einer konsistenten und in allen Unternehmensbereichen gleichmäßig nutzbaren Datenhaltung. Hierfür werden Metadaten, also Dokumente, Dateien oder Datenbanken, im PDM-System verwaltet und Verknüpfungen zu Primärdaten in den Erzeugersystemen hergestellt.²⁷ Die derzeit auf dem Markt angebotenen PDM-Systeme teilen sich in folgende Bereiche auf:²⁸

- Klassisches PDM-System mit Fokus auf Produktstruktur und Lifecycle Management
- CAD (Computer-Aided Design)-orientiertes PDM-System mit Fokus auf dem CAD-Modellmanagement für Projektteams und Integration mit CAD/Digital Mock-up
- Dokumentenorientierte PDM-Systeme mit Fokus auf der Integration unternehmensübergreifender Dokumente und Archivmanagement
- PPS/ERP-orientiertes PDM-System mit dem Fokus auf der Integration kommerzieller Produktdaten

²⁷ Vgl. Syska, A. (2006), S. 104.

²⁸ Vgl. VDI 2219:2016-09, S. 15.

Grundlegend muss festgehalten werden, dass PDM-Lösungen immer firmenspezifisch sind. Die Integration im Unternehmen konzentriert sich dabei auf Verbindungen zu den im Betrieb eingesetzten Autorensystemen (CAx-System und Textverarbeitungssystem) und zu den Enterprise-Resource-Planning-Systemen (ERP-Systemen). Eine Integration mit ERP-Systemen fokussiert sich vor allem auf die Bereiche Arbeitsplanung, Beschaffung, Einkauf und Fertigungsplanung.²⁹ Die nachfolgende Abbildung (Abbildung 7) liefert einen Überblick über mögliche Entscheidungsfragen, die sich Unternehmen bei der Implementierung von PDM-Systemen stellen sollten.

Typ	Schlüsselfertiges PDM-System	PDM-Toolbox	Konfigurierbare Toolbox
Standard-angepasste Anteile	<div style="background-color: #0070C0; color: white; padding: 5px; text-align: center;">Anpassung</div> <div style="background-color: #ADD8E6; padding: 5px; text-align: center;">Standard-Funktionen</div>	<div style="background-color: #0070C0; color: white; padding: 5px; text-align: center;">Anpassung</div> <div style="background-color: #ADD8E6; padding: 5px; text-align: center;">Standard-Funktionen</div>	<div style="background-color: #0070C0; color: white; padding: 5px; text-align: center;">Anpassung</div> <div style="background-color: #ADD8E6; padding: 5px; text-align: center;">Standard-Funktionen</div>
Merkmale	<ul style="list-style-type: none"> • großer Anteil von Standard <ul style="list-style-type: none"> – Funktionen – Basisobjekten – Prozessen • konfigurierbare Anwendungsmodule 	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklungsumgebung für kundenspezifische PDM-Lösungen • objektorientierte Werkzeuge und Basis-Klassenbibliotheken 	<ul style="list-style-type: none"> • branchenspezifische Lösungen auf der Basis einer PDM-Toolbox • in der Regel von externen Partnern der Toolboxentwickler angeboten
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • geringe Kosten • kurzfristige Nutzung 	<ul style="list-style-type: none"> • höhere Flexibilität • bessere Anpassungsmöglichkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> • mittlere Flexibilität
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • teilweise Anpassung der Unternehmensorganisation an die PDM-Systemstrukturen 	<ul style="list-style-type: none"> • sehr hohe Kosten • hoher Entwicklungsaufwand • lange Vorbereitung 	<ul style="list-style-type: none"> • mittlere Kosten

Abbildung 7: PDM-Systemtypen³⁰

²⁹ Vgl. VDI 2219:2016-09, S. 16 – 17.

³⁰ Eigene Darstellung nach VDI 2219:2016-09, S. 16.

Neben der jeweiligen Entscheidung bezüglich eines PDM-Systemtypens empfehlen sich eine schrittweise Erweiterung und Implementierung mit anderen im Unternehmen genutzten Systemen und Organisationen (vgl. Abbildung 8).

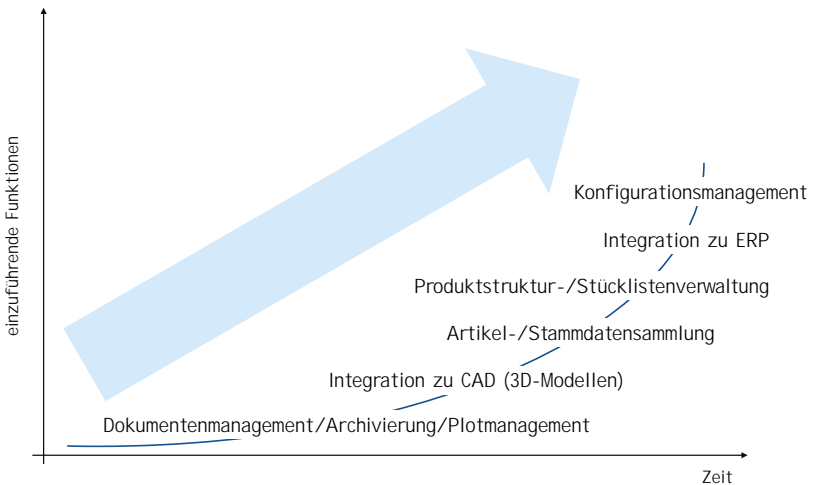


Abbildung 8: Mögliche Einführungsstufen von PDM³¹

Die Einführung von PDM-Systemen birgt das Potenzial, Arbeitsschritte und Änderungen für alle beteiligten Personengruppen in einem Unternehmen ersichtlich zu gestalten. Da das System dafür sorgt, dass die erzeugten Daten aktuell gehalten werden, müssen beispielsweise Entwicklerteams keine Zeit mit der Suche und dem Abgleich von bereits vorhandener Information wie alten CAD-Zeichnungen oder überholten Anforderungen verschwenden. Gleichzeitig fungiert das PDM-System als Wissensdatenbank für zukünftige Produktentwicklungen und andere Bereiche der Unternehmensorganisation.

Die Potenziale für Ressourceneffizienz zeigen sich vor allem bei der Betrachtung der Kostenstruktur von Produkten über den kompletten Lebensweg (vgl. Abbildung 9) hinweg. Dabei wird ersichtlich, dass beim Entwerfen und Entwickeln eines Produktes der Einfluss und die Festlegung der Kosten am

³¹ Eigene Darstellung nach VDI 2219:2016-09, S. 34.

höchsten sind. Mit etwa 42 % der Gesamtkosten bilden Materialien im Unternehmen weiterhin den größten Kostenpunkt.³²

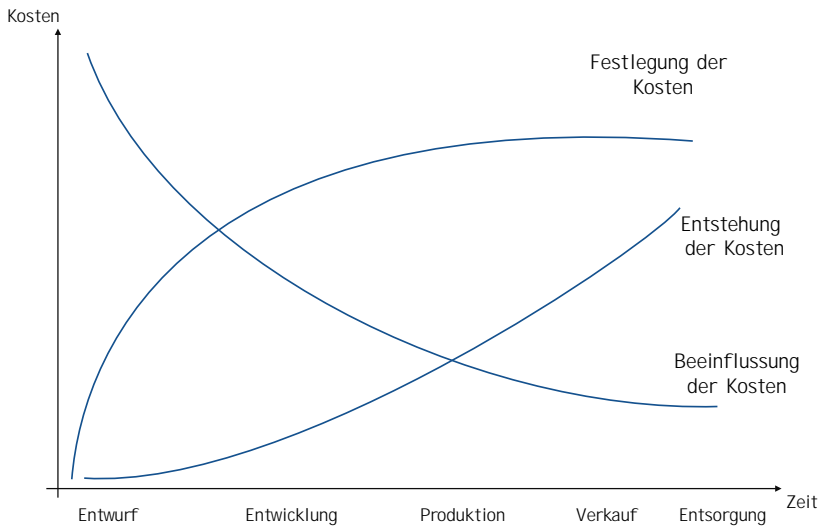


Abbildung 9: Festlegung, tatsächliche Entstehung und Beeinflussung von Kosten über den kompletten Produktlebensweg³³

Maßnahmen zur Ressourceneffizienz wie Fehlermanagement und die Effizienzsteigerung von Prozessen erreichen somit in den ersten Phasen die größte Wirkung, machen sich allerdings (teilweise) erst in den anschließenden Phasen wie der eigentlichen Produktion oder dem Verkauf bemerkbar. Können Ingenieurinnen und Ingenieure bei der Produktentwicklung auf ein PDM-System zugreifen, ist es beispielsweise möglich, potenzielle Fehlerquellen und Problemstellungen frühzeitig zu erkennen und anzupassen. Des Weiteren kann durch die konsistente Datenstruktur eine effiziente Abwicklung von Freigabeprozessen, Revisionen u. Ä. gewährleistet werden.

³² Vgl. Statistisches Bundesamt (2019).

³³ Eigene Darstellung nach Brecht, U. (2005), S. 105.

Praxisbeispiel: Drexler Automotive GmbH aus Salzweg

Die Drexler Automotive GmbH entwickelt und fertigt Antriebskomponenten für Sport- und Rennfahrzeuge. Bei der Entwicklung der Produkte fallen in jedem Abschnitt große Mengen an Daten an. Das Datenaufkommen wird stetig größer und bei unzureichender Verwaltung unübersichtlich. Um Misskommunikationen bei Revisionen und Freigaben, doppelte Arbeit in der Konstruktion und die lange Suche nach notwendigen Zeichnungen und Modellen zu vermeiden, etablierte das mittelständische Unternehmen eine durchgängige Lösung aus 3D-CAD, PDM und ERP. Dafür investierte Drexler Automotive in ein PDM- sowie ein ERP-System, das speziell für KMU der Fertigungsindustrie vorgesehen ist. Ein 3D-CAD-System wurde bereits 2006 eingeführt. Das PDM-System ermöglicht ein strukturiertes Arbeiten mit aktuellen Daten. Veraltete Zeichnungen und Modelle gibt es nicht mehr. Daten werden bei Änderungen synchron gehalten, sodass die Fehlerrate erheblich reduziert und Ressourcen eingespart werden konnten. Eine bessere Zusammenarbeit der Teams sowie eine schnellere Konstruktion der Produkte ließen sich zusätzlich beobachten. Der entscheidende Erfolgsfaktor für das Unternehmen war die digitale Durchgängigkeit der Daten, um Konstruktionsprozesse und Änderungen vollständig nachzuvollziehen.³⁴

Praxisbeispiel: Otto Zimmermann GmbH aus Saarbrücken

Die Otto Zimmermann GmbH mit ca. 45 Mitarbeitenden hat sich auf Maschinen und Aggregate für Hydraulik, Pneumatik und Elektronik spezialisiert. Allein bei der Entwicklung und Fertigung von Hydraulikanlagen stehen den Angestellten der Konstruktion mehr als 5.000 Bauteile zur Verfügung. Dabei erwies sich die bisherige Datenverwaltung als nicht besonders effizient und fehleranfällig. Zwar wurden die entsprechenden CAD-Daten auf dem Server gespeichert, jedoch mussten kaufmännische Informationen, wie Artikelnummer, Preise, Lieferantinnen und Lieferanten und Lagerbestände der benötigten Teile bei jedem Zugriff über einen

³⁴ Vgl. Tosse, T. (2020), S. 45 ff.

Explorer gesucht werden. Daher entschied sich das Unternehmen für die Implementierung eines PDM-Systems, das die Konstruktionsdaten mit einem ERP-System verbindet. Dabei stand auch eine benutzerfreundliche Oberfläche der Datenbankverwaltung im Fokus. Mit dem nun verwendeten System lassen sich relevante Produktdaten strukturiert ablegen und suchen. Abgespeicherte Bauteile können schnell wiederverwendet werden. Der Austausch zwischen Artikeldaten und Stücklisten erfolgt dadurch einfach und mühelos. Anstatt die Bestandsdaten automatisch zu übernehmen, hatte sich das Unternehmen entschieden, die Bauteile Stück für Stück anzulegen, um die Datenbank zu aktualisieren. Veraltete oder falsche Daten werden im Zuge dessen entfernt, um Fehler bei künftigen Produktentwicklungen zu vermeiden und Ressourcen zu schonen. Neue Bauteile können einfach und schnell auf Basis bestehender Teile oder Vorlagen in der Datenbank erfasst werden. Mit der Umsetzung des PDM-Systems ist die Otto Zimmermann GmbH zuversichtlich, ihre Arbeitgeschwindigkeit um das Dreifache zu erhöhen.³⁵

3.2 Digitales Prototyping

Das Prototyping ist die ausführende Aktivität, die zur Erstellung eines Prototyps führt.³⁶ In digitaler Form kann es als Teilbereich des sogenannten Virtual Product Creation (VPC) verstanden werden. Das VPC umfasst alle Prozessschritte und Engineering-Aktivitäten, die aus digitalen Anwendungen, IT-Tool-Funktionen, Software, Algorithmen, Arbeitsmethoden und Beurteilungs- sowie Entscheidungsfähigkeiten bestehen.³⁷ Je nach Entwicklungsstadium kann es einzelne oder alle geplanten Funktionen eines Produkts darstellen. So können Prototypen in der frühen Phase der Produktentwicklung dabei helfen, ein allgemeines Verständnis und ein Gefühl für das Produkt zu erlangen.³⁸ Ziel ist es, Ideen so weit zu entwickeln, dass sie direkt in die Realität umgesetzt werden können. Dabei wird grundsätzlich zwischen physischem und digitalem Prototyping unterschieden. Digitale Proto-

³⁵ Vgl. Menke, R. (2020), S. 50 – 51.

³⁶ Vgl. Exner, K. (2019), S. 55.

³⁷ Vgl. Stark, R. (2022), S. 48.

³⁸ Vgl. Kirchner, E. (2020), S. 371.

typen basieren in der Regel auf CAD-Modellen, Berechnungen und Simulationen, die am Computer erstellt werden und auch nur dort existieren.³⁹ Gegenüber physischen Modellen bietet digitales Prototyping folgende Vorteile:⁴⁰

- Geringere Entwicklungskosten
- Beliebig viele und parallele Untersuchungen von Prototypvarianten
- Einbindung anderer Abteilungen, der Kundschaft und Lieferunternehmen in den Produktentwicklungsprozess
- Schnelle Anpassungen und Optimierung der Prototypen sowie frühzeitige Erkennung von Fehlern
- Anschauliche Darstellung des zukünftigen Produkts bei zukünftigen Kundinnen und Kunden sowie Investierenden

Aufgrund der kontinuierlichen Zunahme der Rechnerleistung sowie Angebote von Cloud-Technologien, Open-Source-Plattformen und Community-Software reicht das digitale Prototyping heute weit über die bloße digitale Abbildung von Entwürfen hinaus. Die Finite-Elemente-Methode (FEM) beispielsweise ist ein Verfahren, das im Rahmen von Simulationen zur Strukturanalyse und -optimierung verwendet wird. Bei der FEM werden Bereiche von Bauteilen dazu genutzt, das physikalische Verhalten des Bauteils zu untersuchen.⁴¹ Virtuelle Modelle begünstigen und ergänzen außerdem das sogenannte Rapid Prototyping (schneller Modellbau), wenn CAD-Modelle und Simulation auf den Einsatz von additiver Fertigung bzw. 3D-Druckern treffen.⁴²

Für die Ressourceneffizienz ergeben sich – neben der Einsparung von physischen Prototypen und damit verbundenen Materialeinsätzen – durch das digitale Prototyping Erkenntnisse zu überschüssigem Materialeinsatz,

³⁹ Vgl. Kirchner, E. (2020), S. 377 – 378.

⁴⁰ Vgl. Scholz, U.; Pastoors, S.; Becker, J. H.; Hofmann, D. und van Dun, R. (2018), S. 199.

⁴¹ Vgl. Zwettler, M. (2020).

⁴² Vgl. Kirchner, E. (2020), S. 379.

wodurch im Weiteren Gewicht reduziert und damit Rohstoffe eingespart werden können. Das ist beispielsweise dann der Fall, wenn durch die FEM-Methode Bereiche in Bauteilen identifiziert werden, die auch bei geringerem Materialeinsatz weiterhin die geforderten Belastungsansprüche erfüllen. Außerdem können potenzielle Fehlerquellen frühzeitig erkannt werden, was eine spätere notwendige Anpassung unwahrscheinlicher macht.

Zu den Herausforderungen zählt neben den Investitionskosten auch die richtige Schulung des für das digitale Prototyping eingesetzten Personals. Neben der fachlichen Expertise sollten deshalb auch die Analyseziele und die dafür benötigten Daten genau definiert werden.

Das digitale Prototyping endet nicht bei der Entwicklung neuer Produkte, sondern kann auch im Bereich der Fertigung und Produktion eingesetzt werden. So können beispielsweise ebenso Abläufe in digital abgebildeten Fabriken simuliert und verbessert werden.

Digitales Prototyping

Relevante Technologien und Methoden	
<ul style="list-style-type: none">▪ Computer-Aided Design (CAD)▪ Computer-Aided Engineering (CAE)▪ Finite-Elemente-Methode (FEM)▪ Strömungssimulation▪ Augmented und Virtual Reality (AR und VR)	<ul style="list-style-type: none">▪ Cloud Computing▪ High Performance Computing▪ Rapid Prototyping▪ Digital Mock-up▪ Simulationsmodelle
Wichtige Daten und Informationen	
<ul style="list-style-type: none">▪ Produktanforderungen▪ Technische Zeichnungen▪ Materialdaten▪ Bauteildaten	<ul style="list-style-type: none">▪ Werkstoffkennwerte▪ Labor- und Prüfdaten
Mögliche Beiträge zur Ressourceneffizienz	
<ul style="list-style-type: none">▪ Reduzierung der Fehlerraten▪ Einsparung von physischen Produkten und Musterwerkzeugen	<ul style="list-style-type: none">▪ Schneller Substitutionstest von nachhaltigen Materialien▪ Energieeinsparungen durch Verringerung von Transportaufwendungen

Abbildung 10: Digitales Prototyping und damit verbundene Themenfelder (eigene Darstellung)

Obige Abbildung (Abbildung 10) stellt einen Überblick wichtiger Technologien und Methoden des digitalen Prototypings in der Produktentwicklung dar. Darüber hinaus wird gezeigt, welche Daten für die Integration in die Produktentwicklung besonders wichtig sind und welchen Beitrag das digitale Prototyping zur Ressourceneffizienz liefern kann. Die Begrifflichkeiten werden außerdem im Anhang genauer erklärt.

Praxisbeispiel: Ottobahn GmbH aus München

Das 2019 gegründete Unternehmen Ottobahn GmbH entwickelt ein emissionsfreies und autonomes Transportsystem. Das System besteht aus einer schienengebundenen Gondelbahn, die sich auf fünf bis zehn Meter Höhe oberhalb der Straßen fortbewegt. Schon während der Produktentwicklung setzten die Ottobahn-Ingenieure auf Datenanalyse-, Simulations- sowie HPC-Lösungen, um das optimale Fahrwerkskonzept zu ermitteln. Dafür wurden zunächst verschiedene Konzeptmodelle in Bezug auf die Fahrdynamik und auftretenden Kräfte entwickelt und mittels Simulationen verglichen. Zur Unterstützung griff das Unternehmen auf das Altair-Start-up-Programm zurück, das verschiedene und maßgeschneiderte Technologiepakete einschließlich fachlicher Beratung anbietet. Um das Verhalten beim Gleiswechsel zu untersuchen, wurden unterschiedliche Mehrkörpersimulationen durchgeführt. Damit ließen sich die jeweiligen Mechaniken der virtuellen Prototypen in kürzester Zeit untersuchen, so dass nach einer Woche bereits erste Ergebnisse zu den besten Fahrwerkzeugmodellen präsentiert werden konnten. Durch den frühzeitigen Einsatz von Simulationen in der Entwicklungsphase entfielen nicht nur physische Prototypen, Konstrukteurinnen und Konstrukteure erhielten auch ein tiefgreifendes Verständnis der Systemdynamiken. So konnten bereits im frühen Entwicklungsprozess exakte Entscheidungen getroffen werden. Zudem ermöglicht der Einsatz externer HPC-Lösungen die Durchführung von hochkomplexen Simulationen und Berechnungen mit hoher Geschwindigkeit. Die Basis dafür bieten Cloud-Services, die eine fast unbeschränkt skalierbare Rechenkapazität mit sich bringen, ohne dass eine ei-

gene High-Performance-IT-Infrastruktur vorausgesetzt wird. In Kombination mit Data Analytics können aus den verarbeiteten Daten wertvolle Informationen gewonnen werden. Zusätzlich erlauben prädiktive Analysen, die Abnutzung von Bauteilen sowie ein Maschinenversagen vorherzusagen. Damit lassen sich bestmögliche Wartungsintervalle bestimmen und Ressourcen einsparen.

Durch die Verknüpfung aller drei Technologien wurde nicht nur die Entwicklungszeit verkürzt, vielmehr konnten damit die Produkte bzw. Systeme kosteneffizienter und nachhaltiger bzw. ressourceneffizienter entwickelt werden.⁴³

Praxisbeispiel: Sensitec GmbH aus Wetzlar

Ein Hersteller von magnetoresistiver Sensortechnologie ist die Sensitec GmbH. Seit über 15 Jahren ist das virtuelle Prototyping in dem mittelständischen Unternehmen Grundbestandteil der Entwicklungsphase. Mussten zuvor mehrere physische Prototypen hergestellt werden, bis die gewünschten Kundenanforderungen erfüllt waren, entfällt dieser Schritt mit der virtuellen Produktsimulation. Heute werden die benötigten Produktmuster der Sensoren mittels Simulationssoftware, wie CAD und CAE, digital entwickelt und simuliert. Vor der Fertigung des Produktmusters können Änderungswünsche seitens der Kundschaft jederzeit in die Simulation integriert werden. Damit lässt sich die Anzahl der Prototypen reduzieren – das spart nicht nur Zeit, sondern auch Material- und Energieressourcen. Zur Verwaltung von Produktionsdaten (u. a. CAD-Daten) implementierte das Unternehmen ein PDM/PLM-System. Das ermöglicht zudem den digitalen Datenaustausch mit Kundinnen und Kunden sowie Zuliefernden, wodurch potenzielle Fehlerraten durch Übertragungsfehler oder Medienbrüche vermieden werden können.⁴⁴

⁴³ Vgl. Schneider, M. (2021), S. 36.

⁴⁴ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2017), S. 110 ff.

3.3 Digitaler Zwilling

Ein vermehrter Einsatz von CPS und die Integration der Produktentwicklung und Produktion im IoT (vgl. Kapitel 2.2) haben das Potenzial, die Forderung nach einer steigenden Produktivität, Flexibilität und Konfigurierbarkeit in der Industrie zu erfüllen. Das Versprechen einer adaptiven und intelligenten Überwachung, Steuerung und Beeinflussung der physischen Welt ist aber gleichzeitig mit einer hohen Komplexität und erheblichen Herausforderungen verbunden. Einen Ansatz stellt die Automatisierung der kontinuierlichen Synchronisation der verschiedenen digitalen Komponenten mit dem realen Gegenstück dar. Die digitalen Komponenten von CPS, die das beschriebene Verhalten aufweisen, werden als digitaler Zwilling bezeichnet.⁴⁵

Vereinfacht ausgedrückt, ist ein digitaler Zwilling die digitale Repräsentation einer Produktinstanz (reale Geräte, Objekte, Maschinen oder immaterielle Güter) mit ausgewählten Merkmalen, Zuständen und Verhalten, die mit realen Daten "gefüttert" wird.⁴⁶ Allerdings wird sowohl in der Praxis als auch in der Wissenschaft der Begriff des "digitalen Zwillings" unterschiedlich verstanden. Eine genauere Differenzierung findet beispielsweise durch die Verwendung der Begriffe "digitaler Master" und "digitaler Schatten" statt. Erst beide Konzepte gemeinsam ergeben einen digitalen Zwilling. Unter dem digitalen Master versteht man die zu Beginn einer Entwicklung erstellten digitalen Geometriemodelle oder Stammdaten. Der digitale Schatten wiederum beschreibt die über den Lebenszyklus eines Produkts gewonnenen und verwerteten Daten.⁴⁷ Im Sinne der vereinfachten Darstellung werden in der vorliegenden Kurzanalyse die Begrifflichkeiten nicht explizit differenziert.

Speziell im Bereich der Produktentwicklung überschneiden sich die Beschreibungen vom digitalen Zwilling mit denen des digitalen Prototypings (vgl. Kapitel 3.1). Ein zentraler Unterschied zeigt sich beispielsweise darin, dass ein digitaler Zwilling die Existenz eines realen Objekts voraussetzt. Dar-

⁴⁵ Vgl. Klein, M.; Maschler, B.; Zeller, A.; Ashtari Talkhestan, B.; Jazid, N.; Rosen, R. und Weyrich, M. (2019), S. 90 – 91.

⁴⁶ Vgl. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung (2020), S. 1.

⁴⁷ Vgl. T-Systems International GmbH (2018).

über hinaus kann ein digitaler Zwilling in allen Produktlebensphasen eingesetzt und auch nachträglich für bereits vorhandene Produkte entwickelt werden. Mögliche weitere Anwendungsfelder eines digitalen Zwillings sind:⁴⁸

- **In der Produktentwicklung:** digitales Testen und Simulieren der Produkte. Idealerweise kann der digitale Zwilling das komplette physische Testen substituieren, wodurch Entwicklungs- und Einführungszeiten gesenkt werden können. In diesem Fall kann die Technologie mit der des digitalen Prototypings übereinstimmen. Ein digitaler Zwilling kann außerdem als Schnittstelle zur Kundschaft dienen, beispielsweise in Form einer Austausch- und Testplattform für zukünftige Funktionen.
- **Bei der Produktion und Lieferketten:** Simulation und Verbesserung von Produktions- und Lieferprozessen. Im Idealfall können Prozesse in Echtzeit oder vorausschauend simuliert und berechnet werden. Neben der digitalen Abbildung eines Produkts ist es dann sinnvoll, auch das Produktionsumfeld in Form einer digitalen Fabrik abzubilden. So können potenzielle Fehlerquellen oder Störungen in realen Prozessen frühzeitig erkannt werden, wodurch Qualitäts- und Effizienzsteigerungen möglich werden und sich strategische Entscheidungen ableiten lassen.
- **Bei der Instandhaltung und Entsorgung:** Als Nachbildung eines echten Produkts erleichtert der digitale Zwilling das Monitoring und die Wartung. Im Idealfall kann der Status eines Produkts (Lage, Zustand, Leistung etc.) in Echtzeit dargestellt werden. Diese Informationen können dann z. B. zum Ende der Nutzungsphase verwendet werden, um Informationen über die Entsorgung oder wiederverwendbare Komponenten zu erhalten. Ein digitaler Zwilling in der Nutzungs- und Entsorgungsphase kann somit auch die Grundlage eines PSS sein.

Die Erstellung eines vollumfänglichen digitalen Zwillings erfolgt am besten parallel zur Entwicklung des physischen Produkts. Speziell bei bereits vor-

⁴⁸ Vgl. PricewaterhouseCoopers GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft (2019), S. 26.

handenen Vorgängermodellen kann die digitale Abbildung aber auch auf reale Daten von installierten Sensoren bei der durchgängigen Analyse beruhen.⁴⁹

In einer 2019 von PricewaterhouseCoopers (PwC) erstellten Studie konnte festgehalten werden, dass der Einsatz eines digitalen Zwillings vor allem in den Bereichen der Produktentwicklung und der Produktion liegt. Während 75 % der sogenannten Digitalen Champions in der untersuchten Gruppe bereits einen digitalen Zwilling einsetzen, liegt bei den sogenannten Digitalen Novizen der Anteil bei 38 % (vgl. Abbildung 11). Weiter wurde erwartet, dass 2021 knapp 60 % aller befragten Unternehmen digitale Zwillinge im Unternehmen einsetzen werden.⁵⁰

⁴⁹ Vgl. Grösser, S. (2018).

⁵⁰ Vgl. PricewaterhouseCoopers GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft (2019), S. 21.

Digitaler Zwilling

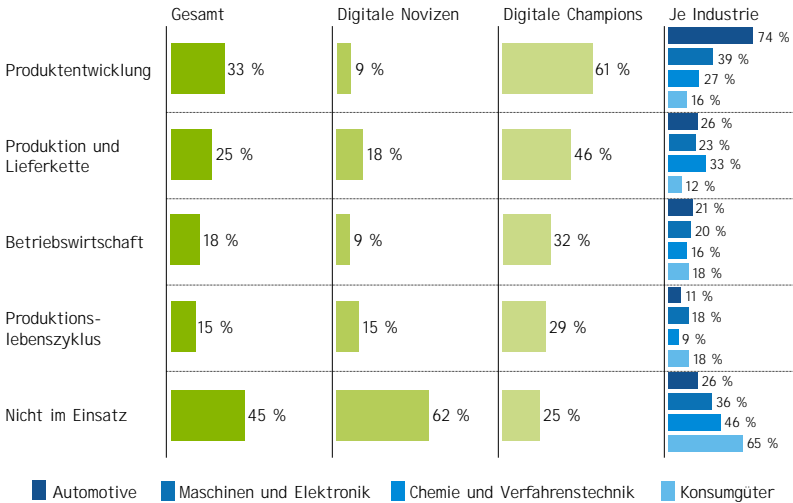


Abbildung 11: Einsatz eines digitalen Zwillings in verschiedenen Branchen⁵¹

Aus Sicht der Ressourceneffizienz überschneiden sich die Vorteile in der Produktentwicklung häufig mit denen des digitalen Prototypings (Kapitel 3.1). Grund dafür ist die sukzessive Transformation von bisher mit Materialeinsatz verbundenen Abläufen in digitale Prozesse. Ein Unterschied zum digitalen Prototyping liegt derweil darin, dass sich digitale Zwillinge die Anwesenheit eines physischen Modells zu Nutze machen können. Als mögliche Ausprägung in der Produktentwicklung ist das Hardware-in-the-Loop-Verfahren (HiL) zu nennen. Beim HiL werden Bauteilkomponenten in eine gemeinsame Simulationsumgebung mit Systemmodellen integriert. So kann beispielsweise ein gesamtes Fahrzeug simuliert werden, während lediglich die Steuerelemente real angebunden sind. Auf diese Weise lassen sich aufwendige und komplizierte Tests am gesamten physischen Produkt reduzieren.⁵² Ressourceneffizienzpotenziale entstehen so einerseits durch den ge-

⁵¹ Eigene Darstellung nach PricewaterhouseCoopers GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft (2019), S. 28.

⁵² Vgl. Fraunhofer ITWM (2022).

ringeren Bedarf an physischen Prototypen und den damit verbundenen Materialeinsätzen, andererseits lassen sich zukünftige Verhaltensweisen im Betrieb, bei der Alterung oder bei bestimmten Materialzusammensetzungen simulieren, sodass Qualitätsverbesserungen oder Einsparpotenziale schnell identifizierbar sind und Ressourcen geschont werden.

Weitere Ressourceneffizienzpotenziale haben ebenfalls ihren Ursprung in digitalen Abbildungen im Zuge der Produktentwicklung, machen sich allerdings erst in späteren Phasen der Wertschöpfung bemerkbar. Dadurch, dass im Idealfall ein digitaler Zwilling ein physisches Produkt über den kompletten Lebensweg begleitet, wird auch die Produktverbesserung nach der eigentlichen Produktentwicklung erleichtert. Die virtuelle Begleitung und Simulation eines physischen Produkts erlauben z. B. neben einer rascheren Inbetriebnahme eine schnellere Konfiguration an bereits vorhandenen Systemen.⁵³ Außerdem kann eine fortlaufende Berechnung von Schwachstellen und Optimierungspotenzialen in der Nutzungsphase rückwirkend wichtige Erkenntnisse für Nachfolgeprodukte und Produktionsprozesse liefern. Diese "vererbten" Erkenntnisse helfen nicht nur den Entwicklungsteams, sondern können auch Nutzerinnen und Nutzern Hinweise auf notwendige Wartungen geben, wodurch sich die Produktlebensdauer erhöhen lässt und Ressourcen geschont werden können.

Speziell komplexere Simulationen und Berechnungen von digitalen Zwillingen erfordern dabei große Mengen an (Echtzeit-)Informationen. Aus diesem Grund spielt die künstliche Intelligenz (KI) beim Einsatz digitaler Zwillinge eine wichtige Rolle – und ist gleichzeitig die größte Herausforderung für die Umsetzung. Unternehmen benötigen nicht nur die technische Infrastruktur mitsamt umfassender Vernetzung, Rechenleistung und konsistentem Datenmanagement (vgl. Kapitel 3.1), sondern auch fachlich ausgebildetes Personal, um die Potenziale ausschöpfen zu können. Auf die Rolle der KI in der Produktentwicklung wird im nächsten Abschnitt genauer eingegangen (Kapitel 3.4).

⁵³ Vgl. Klein, M.; Maschler, B.; Zeller, A.; Ashtari Talkhestan, B.; Jazid, N.; Rosen, R. und Weyrich, M. (2019), S. 91.

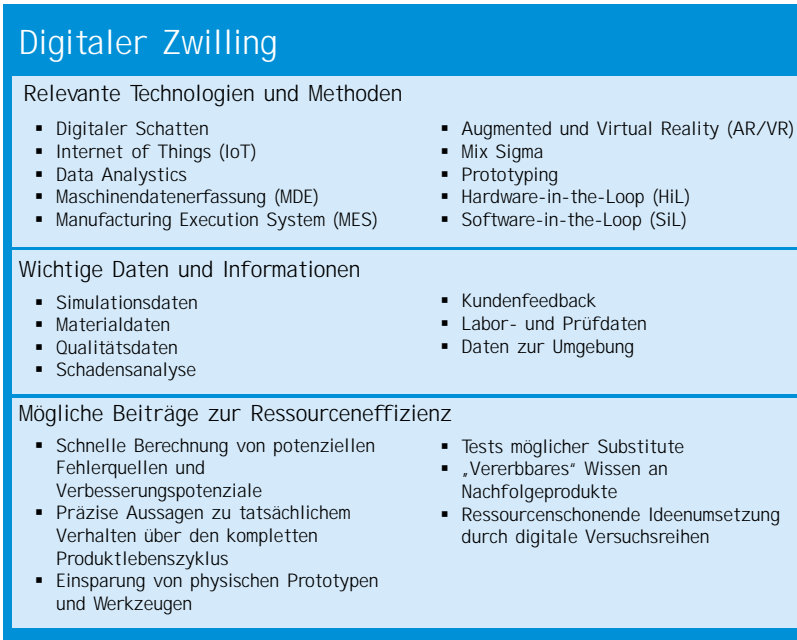


Abbildung 12: Digitaler Zwilling in der Produktentwicklung und damit verbundene Themenfelder (eigene Darstellung)

Die vorangegangene Abbildung gibt einen Überblick über wichtige technische Ausprägungen und die mit einem digitalen Zwilling verbundenen Methoden. Darüber hinaus soll dargestellt werden, welche Daten für die Integration in die Produktentwicklung wichtig sind und welchen Beitrag ein digitaler Zwilling zur Ressourceneffizienz leisten kann. Die Begrifflichkeiten werden im Anhang genauer erklärt.

Praxisbeispiel: Veka AG aus Sendenhorst

Das in Nordrhein-Westfalen ansässige Unternehmen Veka AG stellt Kunststoffprofile aus PVC für Fenster- und Türsysteme her. Bevor ein neues Profil produziert werden kann, muss dafür ein geeignetes Werkzeug konstruiert werden. Dabei sind herkömmliche Entwicklungsmethoden für die Werkzeugformen mit sehr viel Zeit und Ressourcen verbunden. Für die Entwicklung optimaler Profile mit gewünschter Qualität müssen die physisch hergestellten Werkzeugköpfe mehrfach getestet werden. Im Zuge der Testphasen werden dabei bis zu zehn Tonnen PVC verbraucht. Diese werden zwar recycelt, dennoch ist der Recyclingprozess energieintensiv. Durch den Einsatz digitaler Modelle in Form eines digitalen Masters kann hier Abhilfe geleistet werden. Die Werkzeugköpfe werden dafür mithilfe von CAD-Daten des realen Werkzeugs virtuell dargestellt. Anhand digitaler Prototypen lassen sich auch neue Konzepte und Ideen wahlweise validieren und Prozessfunktionen besser verstehen. Zudem werden aufwendige Testphasen abgelöst, da die Optimierung des Produkts am Rechner mittels Simulationen erfolgt. Damit spart das Unternehmen 50 % seines Materialeinsatzes und jährlich 1.000 kWh elektrischer Energie. Das entspricht 408 kg CO₂-Äquivalenten.⁵⁴

Praxisbeispiel: Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge GmbH aus München

Die Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge GmbH, ein weltweiter Anbieter von Bremssystemen für Schienen- und Nutzfahrzeuge, hat sich die Potenziale der Industrie 4.0 bereits zu Nutze gemacht. Das Unternehmen simuliert mit virtuellen Tests genau das, was sonst auf den Prüfständen im Münchner Entwicklungszentrum des Unternehmens passiert - mit einem entscheidenden Unterschied: Die Computeranalyse erfolgt mithilfe eines digitalen Zwillings. Dieser ist ein wesentlicher Bestandteil, um Fehlerquellen sowie Energie- und Materialeinsparpotenziale in der Entwicklungsphase frühzeitig zu erkennen. Außerdem reduziert die

⁵⁴ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2021a).

virtuelle Prüfung mit einem digitalen Zwilling die Anzahl der Tests, die ein Produkt auf einem Prüfstand durchlaufen muss, erheblich. Die Produktoptimierung erlaubt den Einsatz leichterer Bauteile, was wiederum Kosten und Material einspart.⁵⁵

3.4 KI in der Produktentwicklung

Die beschriebene Vernetzung in der Industrie 4.0 durch die Implementierung von Sensoren und Aktoren in neue und bereits vorhandene Produkte (vgl. Kapitel 2) ermöglicht das Sammeln großer Mengen an Daten – und das häufig in Echtzeit. Diese Datenmengen sind auch unter dem Begriff "Big Data" bekannt. Big Data kann als Rohstoff verstanden werden, den es automatisiert aufzubereiten gilt, damit nutzbringende, abgesicherte und hochwertige "smarte" Daten entstehen. In Deutschland und weltweit ist die Nutzung von Big Data weiter auf dem Vormarsch: 2017 verwendeten bereits ein Fünftel der deutschen Unternehmen Big Data in mindestens einem Unternehmensbereich. Außerdem wird erwartet, dass Smart-Data-Lösungen weltweit bis 2025 einen Umsatz von 85 Milliarden Euro erwirtschaften.⁵⁶

Die Eigenschaften von Big Data, nämlich Volumen, Geschwindigkeit und Diversität, bringen klassische Analysemöglichkeiten schnell an deren Grenzen. In diesem Bereich kommt die sogenannte künstliche Intelligenz (KI) ins Spiel: Mittels KI können Anwendungsprobleme durch Computerprogramme gelöst werden, wobei die Systeme der KI durch Algorithmen und Daten zur Selbstoptimierung fähig sind. Typische Aufgabenfelder umfassen die Klassifikation, Segmentierung und Regression. Dadurch können Anwendungsfelder, wie die Ursachenanalyse oder das Text- und Bildverständnis, automatisiert werden. KI bietet so auch das Potenzial, bestimmte Problemstellungen zu lösen, die erst durch die Bereitstellung sehr großer Datenmengen möglich geworden sind.⁵⁷ Typische Beispiele hierfür sind Gesichts-, Objekt- oder Spracherkennung.

Die Implementierung einer künstlichen Intelligenz in der Industrie kann als eine der großen Aufgaben der Gegenwart verstanden werden und wird von

⁵⁵ Vgl. PricewaterhouseCoopers GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft (2019), S. 36.

⁵⁶ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2017), S. 3.

⁵⁷ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2021b), S. 15.

dem Netzwerk Mittelstand Digital bzw. dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz im Rahmen unterschiedlicher Projekte gefördert. Auch wenn die Umsetzungsmaßnahmen den jeweiligen Umständen in den Unternehmen angepasst werden müssen, gibt es grundsätzliche Handlungsempfehlungen, die bei der Anwendung von KI nützlich sein können.⁵⁸

- Existenz einer Datenbasis und von Datenverarbeitungssystemen (vgl. Kapitel 3.1)
- Nutzung bereits vorhandener KI-Lösungen
- Ausbau der IT-Infrastruktur
- Demos oder Pilotprojekte zum Aufbau von Akzeptanz und Know-how
- Nutzung von standardisierten Schnittstellen und Open-Source-Lösungen
- Durchführung einer Machbarkeitsstudie
- Entwicklung einer Strategie/Roadmap zur Einführung

In der Studie „Potenziale der schwachen künstlichen Intelligenz für die betriebliche Ressourceneffizienz“ des VDI ZRE konnte festgestellt werden, dass Unternehmen, die KI bereits verwenden, vor allem Vorteile in den Bereichen "Fehlererkennung und -vorhersage" (41,9 % der Befragten), "Prozessoptimierung Produktion" (38,7 %), "Prozessoptimierung Produktentwicklung" (38,7 %) und "Produktoptimierung" (35,5 %) sehen.⁵⁹ Als Motivation berufen sich die befragten Unternehmen auf die Senkung von Kosten (25,7 %), die Qualitätsverbesserung (22,9 %) und den Anreiz, Abläufe zeiteffizienter zu gestalten (20 %). Die Steigerung der Ressourceneffizienz wird oftmals als ein positiver Sekundäreffekt wahrgenommen.⁶⁰

Mit dem Einsatz künstlicher Intelligenz in der Produktentwicklung steigt zudem das Potenzial, Material- und Energieressourcen effektiver und nachhal-

⁵⁸ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2021b), S. 144-145.

⁵⁹ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2021b), S. 48.

⁶⁰ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2021b), S. 59.

tiger zu nutzen und die Entwicklungszeiten der Produkte zu verringern. Hieraus resultiert zumeist eine gesteigerte Ressourceneffizienz. Eine in die Produktentwicklung integrierte KI kann beispielsweise mithilfe digitaler Zwillinge oder Prototypen Daten erhalten und anschließend Berechnungen und Simulation durchführen. Das große Potenzial für neue und effizientere Produkte entsteht unter anderem durch die schnelle und simultan ablaufende Berechnung von Szenarien und daraus resultierenden Handlungsempfehlungen. Aus diesem Grund sind die Chancen für die Ressourceneffizienz durch digitales Prototyping (Kapitel 3.2) und digitale Zwillinge (Kapitel 3.3) eng verbunden mit den Potenzialen durch KI und beziehen sich vor allem auf Fehlervermeidungen und schnelle Entscheidungsfindungen durch Simulation.

Durch die zu erwartende Zunahme der KI in allen Bereichen der Wertschöpfung werden auch die Ressourceneffizienzpotenziale in der Produktentwicklung weiter steigen. Folgende weitere Chancen sind durch eine Implementierung von KI zu erwarten und können ebenso Auswirkungen auf die Produktentwicklung haben:

- **KI in der Kommunikation:** KI hat das Potenzial, Kundenbedürfnisse automatisiert zu erfassen und daraus Rückschlüsse zu ziehen. Entwicklungsteams können Informationen aus der Nutzungsphase verwenden, um Nachfolgeprodukten schneller zur Marktreife zu verhelfen oder nachträgliche Anpassungen vorzunehmen. Potenziale für die Ressourceneffizienz entstehen so beispielsweise durch kürzere Entwicklungszeiten, kürzere Testschleifen oder im Falle von Produkthanpassungen durch längere Nutzungsphasen, da die (An-)Forderungen der Kundschaft präziser umgesetzt werden können.
- **KI und menschliche Intelligenz:** Langfristig ist zu erwarten, dass die KI aufgrund der Lernfähigkeit immer detaillierteres menschliches Verhalten berechnen und imitieren kann. Für die Produktentwicklung ergeben sich dadurch insbesondere im Bereich der Testphasen neue Chancen. Notwendige Sicherheitstests in Bezug auf menschliches Verhalten könnten so in Zukunft in verschiedenen Szenarien digital berechnet werden, noch bevor

tatsächliche Prototypen zum Einsatz kämen. Potenziale für die Ressourceneffizienz wären so z. B. durch die Entmaterialisierung und schnellere Fehleranpassung gegeben.

- **KI in der Produktion und Logistik:** Effizienzpotenziale durch KI wie automatisierte Produktionsschritte, Anpassungen oder Lieferungen erfordern Schnittstellen von Sensoren, Aktoren und Rechnern. Die daraus resultierenden Chancen für die Ressourceneffizienz, z. B. durch die Reduktion von Fehlern, stehen daher ebenfalls intensiv in Verbindung mit der Produktentwicklung. So wird in dieser Phase entschieden, in welcher Form und mit welchen Schnittstellen neue Produkte im digitalen Netzwerk der Dinge (Internet of Things) interagieren.

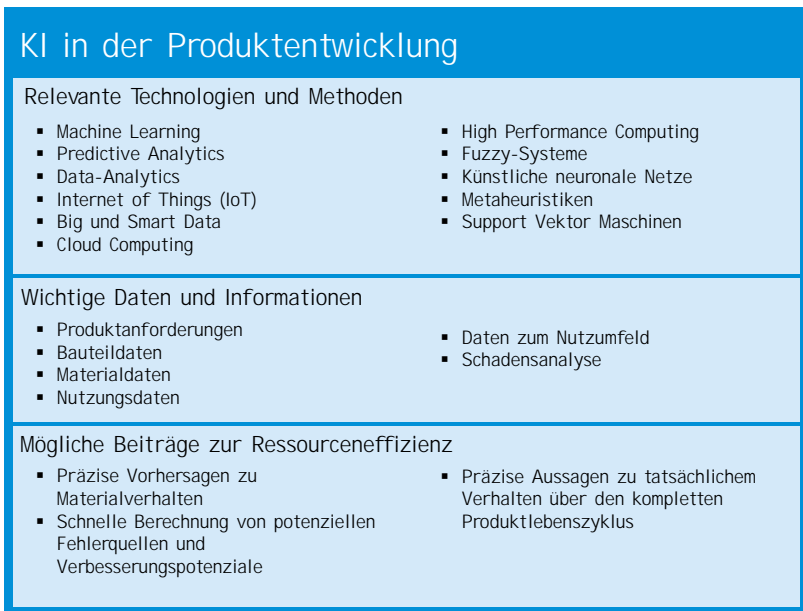


Abbildung 13: Künstliche Intelligenz in der Produktentwicklung und damit verbundene Themenfelder (eigene Darstellung)

Die vorangegangene Abbildung (Abbildung 13) stellt einen Überblick wichtiger technischer Voraussetzungen und Methoden der künstlichen Intelligenz in der Produktentwicklung dar. Darüber hinaus soll sie veranschaulichen, welche Daten für die Implementierung in die Produktentwicklung

wichtig sind und welchen Beitrag die KI zur Ressourceneffizienz liefern kann.⁶¹ Die Begrifflichkeiten werden außerdem im Anhang genauer erklärt.

Praxisbeispiel: BBM Maschinenbau und Vertrieb GmbH aus Langenberg

Das mittelständische Unternehmen BBM Maschinenbau und Vertrieb GmbH produziert Extrusionsblasformmaschinen, mit denen verschiedene Kunststoff-Hohlkörper wie Kanister, Fässer oder auch Teile für die Automobilindustrie hergestellt werden. Um das Kunststoffrecycling zu erhöhen, werden die Extrusionsanlagen jeweils so konzipiert, dass ein hoher Rezyklateinsatz möglich ist. Hierfür nutzt das Unternehmen die Vorteile der künstlichen Intelligenz gekoppelt mit einem digitalen Zwilling. Mit Hilfe eines IT-Unternehmens wird der Wendelverteiler – das Werkzeug, das recycelten und neuen Kunststoff miteinander vermischt – zunächst mit einem digitalen Zwilling simuliert. Die Optimierung erfolgt mittels künstlicher Intelligenz nach dem evolutionären Prinzip "survival of the fittest". Dafür entwirft die KI-Software im ersten Schritt unterschiedliche Varianten von Wendelverteilern. Anschließend wird der Herstellungsprozess mit jedem Individuum simuliert. Dabei werden 30 % der besten Individuen, bei denen am meisten recyceltes Material eingesetzt werden kann, ausgewählt. Diese bilden dann die "neue Generation". Die KI-Software untersucht deren Konstruktion und versucht dabei Gesetzmäßigkeiten zu finden, warum es sich hierbei um die Besten handelt. Anhand dessen werden neue digitale Zwillinge von Wendelverteilern erstellt. Der Prozess wird so lange wiederholt, bis (in der Regel nach etwa zehn Generationen) der optimale Wendelverteiler entwickelt ist und in die Praxis umgesetzt werden kann. Nach diesem Prinzip gelang es dem Unternehmen, den Rezyklatanteil in der Entwicklung neuer Kunststoff-Fässer auf bis zu 85 % zu steigern.⁶²

⁶¹ Grundlegende Informationen zu KI und Ressourceneffizienz sind in der Studie "Potenziale der schwachen künstlichen Intelligenz für die betriebliche Ressourceneffizienz" zu finden. Die Studie kann unter folgendem Link abgerufen werden: <https://www.ressourcendeutschland.de/publikationen/studien/>

⁶² Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2021a).

Praxisbeispiel: Technologienetzwerk it's OWL aus Ostwestfalen-Lippe

Das Problem von künstlicher Intelligenz ist, dass mangelnde Ressourcen und fehlende Expertise die Umsetzung von KI in produzierenden Unternehmen einschränken. Lösungsanbietern wiederum fehlen der Kundenzugang sowie das benötigte spezifische Wissen. Vor diesem Hintergrund entwickelte das Technologie-Netzwerk it's OWL den sogenannten KI-Marktplatz – eine digitale Plattform, auf der die Kundschaft, Lösungsanbieter und Fachkundige neue KI-Lösungen entwickeln und sich austauschen können. Auch individuelle Herausforderungen können gemeinsam mit passenden Lösungsprovidern gelöst werden. Ziel des KI-Marktplatzes ist es, insbesondere mittelständische Unternehmen zu unterstützen, die KI in der Produktentstehung für sich profitabel einzusetzen. So untersucht beispielsweise ein Landmaschinenhersteller mithilfe der digitalen Plattform die Möglichkeit, künstliche Intelligenz in CAD-Anwendungen zu integrieren – mit dem Ziel, die Produktentwicklung effizienter zu gestalten. Das Projekt wird durch das Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen gefördert.⁶³

3.5 Agile Produktentwicklungstools

Agilität in der Produktentwicklung bedeutet eine Abkehr von linearen Prozessen hin zu mehr Flexibilität sowie proaktiven und antizipativen Handlungen. Aus wissenschaftlicher Sicht ist das Ziel der agilen Produktentwicklung die Veränderung bestehender Organisationen im Sinne der Wettbewerbsfähigkeit. Der ursprünglich in der Softwareentwicklung entstandene Ansatz etabliert sich im Zuge der Digitalisierung auch sukzessive in der Fertigungsindustrie. Speziell durch PSS (vgl. Kapitel 4) werden langlebigere physische Produkte immer häufiger durch Apps oder Software ergänzt, die es in kürzeren Abständen anzupassen gilt.⁶⁴ Auch die Fortschritte im Bereich der Kommunikation mit Kundinnen und Kunden, in der ebenso die KI- oder VR-Technologien eine wichtigere Rolle einnehmen, führen dazu, dass die Kundschaft bereits früher

⁶³ Vgl. it's OWL Clustermanagement GmbH (2021).

⁶⁴ Vgl. Welte, O. (2020), S. 50.

und tiefer in den Entwicklungsprozess eingreifen kann. Agile Tools bieten sich daher in diesem Fall an, um den Austausch und Entwicklungsprozess effizient zu steuern.

Die grundsätzliche Herausforderung beinhaltet das Neudenken und Verändern bestehender Strukturen, Denkmodelle und Systeme bei agilen Produktentwicklungen. Folgende Erkenntnisse lassen sich für diese Herangehensweise festhalten:⁶⁵

- Aspekte wie Qualität, Einkauf und Management müssen sich für eine erfolgreiche Organisation dem Entwicklungsprozess unterordnen.
- Die Produktentwicklung unterliegt diversen Unsicherheiten und ist nicht vollumfänglich planbar. Transparenz und eine frühzeitige Fehlermeldung sind Grundlage der agilen Produktentwicklung.
- Innovationen gehen vom Menschen aus, weshalb sich Prozesse nach den Menschen richten müssen. Die kontinuierliche Verbesserung der Abläufe erzeugt den Wettbewerbsvorteil.

Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass sich eine schrittweise Einführung in die agile Produktentwicklung als sinnvoll erweist. Es empfiehlt sich daher, anfangs Projekte auszuwählen, die sich von den eigentlichen Strukturen und Hierarchien abkapseln lassen. Dem zuständigen Team sollten weitreichende Kompetenzen zustehen, um das Projekt ab der Produktplanung bis hin zur Vermarktung des Produkts umzusetzen. Agilen Entwicklungsprojekten geht eine Wertstromanalyse voraus: Dabei kommt der bisherige Entwicklungsprozess auf den Prüfstand. Alle Prozessschritte werden auf ihre Notwendigkeiten und Zeitbedarfe hin untersucht, um die gängigen Wartezeiten zu minimieren. Ziel ist es, dass das agile Team schneller als bisher einen ersten nutzbaren Prototyp erstellt.⁶⁶

Ressourceneffizienzpotenziale ergeben sich bei der agilen Produktentwicklung vor allem indirekt. So verspricht die agile Produktentwicklung Chancen

⁶⁵ Vgl. Pfeffer, J. (2019), S. 30.

⁶⁶ Vgl. Welte, O. (2020), S. 50.

durch die schnellere Zielfindung und Risikominimierung. Werden gewünschte Endresultate früher erzielt, dann kann dies beispielsweise zu Einsparungen von Ressourcen führen, da mögliche Test- und Anpassungsschleifen kürzer ausfallen können. Der interaktive Ansatz kann außerdem das Risiko minimieren, an dem Vertrieb und der Kundschaft "vorbei zu entwickeln". Kosten- und ressourcenintensive Anpassungen am Endprodukt können so ebenfalls vermieden werden.⁶⁷ Eine schnelle und kontinuierliche Weiterentwicklung und Anpassung von Software an bestehende Objekte weisen außerdem das Potenzial auf, die Nutzungsdauer zu erhöhen und so ebenfalls Ressourcen einzusparen. Können beispielsweise Anforderungen, die erst später in der Nutzungsphase entstanden sind, durch Softwareupdates erfüllt werden, ist der Austausch von Objekten oder Komponenten seltener notwendig.



Abbildung 14: Agile Produktentwicklungstools und damit verbundene Themenfelder (eigene Darstellung)

⁶⁷ Vgl. Stüdemann, J. (2020).

Abbildung 14 fasst wichtige Aspekte der agilen Produktentwicklung zusammen und zeigt, wie diese positiv zur Ressourceneffizienz beitragen können. Die Begrifflichkeiten werden außerdem im Anhang genauer erklärt.

Praxisbeispiel: Agile Transformation bei Landmaschinenbauern

Die Entwicklung von Landmaschinen ist aus technischer wie organisatorischer Sicht komplex. Aufgrund negativer Erfahrungen bei vorherigen Produktentwicklungen stieg ein Unternehmen für Landmaschinen daher bei der Entwicklung einer neuen Pflanzmaschine auf die agile Methodik Scrum um. Gemeinsam mit einem Beratungsunternehmen wurde dafür in einem ersten Schritt ein „Agile Awareness Day“ im Unternehmen durchgeführt, um ein Bewusstsein zu schaffen, welche Konsequenzen das Pilotprojekt für Unternehmen und Topmanagement haben wird. Anschließend wurden Projektteams gebildet, die mit der iterativen Vorgehensweise bei Scrum vertraut gemacht wurden. Die Komplexität des Projekts wurde in einem weiteren Schritt durch Module und funktionale Baugruppen reduziert. Da die Entwicklung wenig Zeit für andere Aufgaben der Beteiligten zuließ, wurde außerdem ein Kommunikationskonzept entwickelt. Im Endergebnis musste der ursprünglich angesetzte Termin für die Fertigstellung um lediglich ein halbes Jahr verschoben werden. Darüber hinaus konnte das Unternehmen feststellen, dass sich die beteiligten Personen durch die agile Zusammenarbeit deutlich mehr mit dem Projekt und der neuen Produktentstehungsweise identifizierten als zuvor. Zukünftig plant das Unternehmen deshalb, weiterhin auf agile Methoden und hybride Strukturen zurückzugreifen.⁶⁸ Anhand der geringen Abweichung vom eigentlichen Terminende des Entwicklungsprojekts werden auch die Potenziale für die Ressourceneffizienz ersichtlich. So ist zu erwarten, dass insbesondere die Projektkommunikation und die Modularisierung im vorgestellten Beispiel zu präziseren Arbeitsanweisungen geführt haben, wodurch Fehler vermieden werden konnten. Speziell die Reduktion von Test- und Anpassungsschleifen im Zuge der Entwicklung weist dabei aus Sicht der Ressourceneffizienz hohe Einsparpotenziale auf.

⁶⁸ Vgl. Rosenkranz, C. (2021).

Praxisbeispiel: KION Group aus Frankfurt am Main

Die KION Group bietet Flurfahrzeuge und dazugehörige Dienstleistungen an. Um nach neuen Denk- und Arbeitsweisen für innovative digitale Lösungen zu suchen, eröffnete das Unternehmen einen Digital Campus in Frankfurt am Main. Hier arbeiten fachübergreifende Teams zusammen und kombinieren agile Entwicklungsmethoden wie Design Thinking und digitale Technologien. Neben dem bestmöglichen Nutzen für Kundinnen und Kunden stand auch die Nachhaltigkeit der digitalen Lösungen im Fokus. Agile Lösungsansätze ermöglichen dem Unternehmen eine hohe Anpassungsfähigkeit - besonders in Zeiten des stetigen Wandels. Datenwissenschaftlerinnen und -wissenschaftler, Produktmanager und -managerinnen sowie Ingenieurinnen und Ingenieure analysieren dafür große Mengen an Konfigurationsdaten der Produkte mithilfe von Data Analytics, das entscheidende Vorteile in der Produktentwicklung mit sich bringt: Entscheidungen können schon frühzeitig in der Entwicklungsphase getroffen und der Bedarf exakt ermittelt werden, wodurch der Aufwand unnötiger Ressourceneinsätze verringert und die Ressourceneffizienz gesteigert wird. Die Entwicklerinnen und Entwickler gehen dabei noch einen Schritt weiter und nutzen moderne Big-Data- und Analytics-Technologien, um die Betriebskosten für geleaste Produkte unter Berücksichtigung von Varianteneigenschaften und Umweltauswirkungen vorherzusagen.

Zu den ersten entwickelten digitalen Lösungen gehört eine Chatbot-App für Servicetechnikpersonal, unter deren Zuhilfenahme Fehlerursachen schneller und effizienter identifiziert werden können. Mit den erfassten Fehlerdaten lassen sich wiederum neue Produkte optimieren und Prozesse effizienter gestalten.⁶⁹.

⁶⁹ Vgl. PricewaterhouseCoopers GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft (2019), S. 36.

4 ENTWICKLUNG VON PRODUKT-SERVICE-SYSTEMEN

Produkt-Service-Systeme (PSS) vereinen physische Produkte und Dienstleistungen (vgl. Kapitel 2). Durch diese Kombination ist es für Unternehmen möglich, das eigene Portfolio zu erweitern und somit auch auf Trends wie kürzere Produktlebenszyklen zu reagieren. In ein Produkt integrierte Dienstleistungen können nicht nur in der späteren Nutzungsphase den gewünschten Mehrwert für Kundinnen und Kunden bringen, sondern auch als Kommunikationstool zwischen Entwicklerteams und Kundschaft agieren. Digitale Technologien wie VR-Brillen oder digitale Prototypen ermöglichen außerdem eine frühzeitige Einbindung der Kundschaft in den Entwicklungsprozess, wodurch Wünsche und Verbesserungsvorschläge kostengünstiger als zu späteren Zeitpunkten eingebracht und umgesetzt werden können. Aus Sicht der Ressourceneffizienz ermöglicht der präzisere Austausch eine klarere Definition und bessere Umsetzung solcher Wünsche in der Produktentwicklung, sodass spätere ressourcenintensive Anpassungen vermieden werden können.

Alle in Kapitel 3 vorgestellten digitalen Technologien benötigen und erzeugen Informationen und können außerdem als Basis oder Bestandteil eines Zusammenspiels mit weiteren Technologien und Tools dienen. Dienstleistungen im industriellen Bereich sind häufig zum einen mit der Analyse und Auswertung der in der Wertschöpfung anfallenden Daten verbunden, zum anderen mit der Kommunikation von Unternehmensorganisation mit Kundinnen und Kunden. Die dafür verwendbaren digitalen Technologien kommen deshalb häufig aus den Bereichen der Datenanalyse oder es handelt sich um (Projekt-)Kommunikationstools. Die große Nachfrage an Informationstechnik in Unternehmen spiegelt sich auch in den Wachstumsraten wider: Zwischen 2010 und 2021 stieg der Umsatz allein in Deutschland von 69 Milliarden Euro (2010) auf 101,8 Milliarden Euro.⁷⁰

Um Kundinnen und Kunden Produkte anbieten zu können, bei denen ergänzende Dienstleistungen einen Teil der Wertschöpfung bilden, müssen Entwicklungsteams physische Produkte schaffen, die informations- und soft-

⁷⁰ Vgl. Statista GmbH (2021).

waretechnische Technologien mit mechanischen Komponenten kombinieren. Mögliche ergänzende Dienstleistungen sind beispielsweise Angebote zur Fernwartung oder einfach umsetzbare Nutzerwechsel-/zuordnungen von Objekten (Sharing-Angebote). Die Entwicklung von PSS weist deshalb viele Parallelen zur Entwicklung cyber-physischer Systeme auf (vgl. Kapitel 2.2), weshalb Vorlagen zur Entwicklung von CPS u. U. als Vorlagen von PSS dienen können. Die VDI/VDE-Richtlinie 2206 beschreibt unter anderem die systematische Entwicklung von CPS. Sie soll nachfolgend schemenhaft vorgestellt und um Potenziale für die Ressourceneffizienz ergänzt werden.

Durch die Verschmelzung verschiedener Disziplinen ist die Entwicklung von CPS bzw. PSS komplex. In der Richtlinie wird ein V-Modell (vgl. Abbildung 15) vorgestellt, das durch den ganzheitlichen methodischen Ansatz die interdisziplinäre Zusammenarbeit unterstützen kann. Die Kernidee des V-Modells beinhaltet die Zerlegung des Systems in einzelne Funktionen und die anschließende schrittweise Integration von Subsystemen und Elementen unter ständiger Validierung (Frage: "Haben wir das Richtige entwickelt?") und Verifizierung (Frage: "Haben wir richtig entwickelt?"). Die Richtlinie repräsentiert keine digitale Technologie, kann allerdings als Entwicklungsmethodik dienen, um die Agierenden der Produktentwicklung und damit auch die eingesetzten digitalen Technologien besser zu koordinieren. Ziel der Richtlinie ist es vielmehr, eine Anleitung zu bilden, um individuelle Ansätze für eine reale Aufgabenstellung abzuleiten.

Das in Abbildung 15 dargestellte V-Modell durchläuft dabei drei Stränge. Der äußere Strang stellt die parallel zu den Kernaufgaben der Entwicklung verlaufende Modellbildung und Systementwicklung dar. Der mittlere Strang beschreibt die Kernaufgaben der Systementwicklung und der innere Strang die Anforderungsentwicklung. Ausgangspunkt der Abfolge ist ein Kundenbedürfnis beziehungsweise das daraus resultierende Geschäftsmodell oder der Entwicklungsauftrag. Nach den Prozessen der Dekomposition (linke Seite), Implementierung (Boden) und Integration (rechte Seite) endet die Systementwicklung mit einer Übergabe. Die sechs Kontrollpunkte in der Abbildung repräsentieren den Fortschritt des zu entwickelnden Systems und helfen den Entwicklungsteams bei der Reflexion des Entwicklungsstandes.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Kontrollpunkte keine Meilensteine oder Zeitpunkte in der Freigabe darstellen sollen.⁷¹

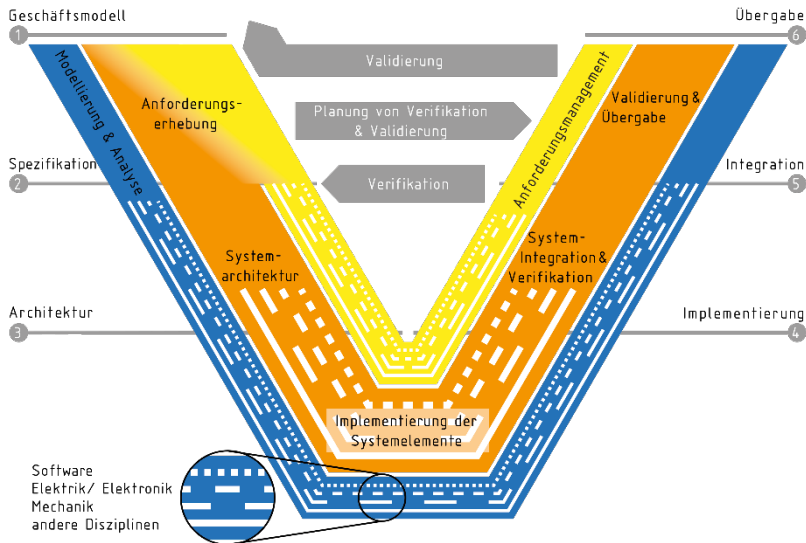


Abbildung 15: Das V-Modell als PSS-Entwicklungsmodell⁷²

Nachfolgend sind wichtige Inhalte der Kontrollpunkte des V-Modells zusammengefasst. Dabei können in den einzelnen Bereichen auch die Aspekte der Ressourceneffizienz berücksichtigt werden.

- (1) **Geschäftsmodell:** Die Schaffung neuer Werte erfordert den Einbezug aller Unternehmensorganisationen. Für Entwicklungsteams soll deshalb im ersten Kontrollpunkt die Anbindung an die strategische Planung sowie an vor- und nachgelagerte Ketten analysiert werden.⁷³ Aus Sicht der Ressourceneffizienz kann so beispielsweise geprüft werden, ob recycelte Stoffe oder Komponenten aus dem Remanufacturing für das zu entwickelnde Produkt verwendet werden können.

⁷¹ Vgl. VDI/VDE 2206:2021-11, S. 24.

⁷² VDI/VDE 2206:2021-11, S. 22. Wiedergegeben mit Erlaubnis des Vereins Deutscher Ingenieure e. V.

⁷³ Vgl. VDI/VDE 2206:2021-11, S. 24.

- (2) **Spezifikation:** Gütekriterien einer Spezifikation sind Eindeutigkeit, Richtigkeit, Vollständigkeit und Widerspruchsfreiheit. Im Bereich der Spezifikation sollen Entwicklungsteams prüfen, ob alle Anforderungen eindeutig formuliert, messbar und vollständig sind.⁷⁴ Durch die genaue Spezifikation können auch Richtlinien zur Ressourceneffizienz (z. B. nach VDI 4800 Blatt 1) und andere ökologische Aspekte klar definiert und kommuniziert werden.
- (3) **Architektur:** Durch diesen Punkt sollen Anwendende bei der Überprüfung des Entwicklungsstandes unterstützt werden. Wesentliche Fragestellungen beziehen sich deshalb auf die Schnittstellen und die spätere Vernetzung im Internet der Dinge.⁷⁵ Die Potenziale für die Ressourceneffizienz ergeben sich in diesem Bereich vor allem hinsichtlich der Vernetzung. Durch strategisch richtige Schnittstellen in dem Internet der Dinge (IoT) kann ein zukünftiges Objekt beispielsweise Fehler richtig erkennen und kommunizieren, wodurch Ausfallzeiten minimiert und Ressourcen geschont werden.
- (4) **Implementierung:** Die Fragestellungen beziehen sich auf die richtige Implementierung der Systemelemente. Relevanz haben dabei auch Aspekte wie die Sicherheit von IT-Systemen oder die Standardisierung von Austauschprotokollen.⁷⁶ Die in Kapitel 3 vorgestellten digitalen Technologien können grundsätzlich dem Bereich der Implementierung zugeordnet werden.
- (5) **Integration:** In diesem Kontrollpunkt sollen die technische Realisierung und Qualität des Systems beurteilt werden. Beispiele sind Fragen nach konkreten Umsetzungen und zu durchgeführten Tests in den Systemebenen.⁷⁷ Fragestellungen und Kommunikation zum Thema der Fehlervermeidung und Qualität können so auch zur Ressourceneffizienz beitragen.

⁷⁴ Vgl. VDI/VDE 2206:2021-11, S. 26.

⁷⁵ Vgl. VDI/VDE 2206:2021-11, S. 30.

⁷⁶ Vgl. VDI/VDE 2206:2021-11, S. 32.

⁷⁷ Vgl. VDI/VDE 2206:2021-11, S. 34.

- (6) **Übergabe:** Hier wird sichergestellt, dass das Gesamtsystem vollständig dokumentiert wurde und eine fehlerfreie Übergabe gewährleistet werden kann. Die vollständige Dokumentation kann gleichzeitig die Basis für Schulungsangebote sein, um die spätere richtige Nutzung zu sichern. Das führt wiederum zur Vermeidung von Fehlern und schont Ressourcen.

Weitere Ressourceneffizienzpotenziale können bei PSS im Laufe der kompletten Wertschöpfungskette entstehen. Während Angebote von Wartungen bis hin zu Sharing Potenziale für eine längere Nutzungsdauer darstellen, bieten sich für Ingenieurinnen und Ingenieure vor allem Chancen durch eine klare Rückführungsstruktur am Ende der Nutzungsphase. Geht ein Objekt nach der Nutzung an die Herstellenden zurück, ohne durch die Nutzenden entsorgt werden zu müssen, dann ist mit einer großen Menge an artgleichen entsorgten Objekten zu rechnen. Sowohl Recyclingprozesse als auch die Wiederaufarbeitung von Komponenten wird dadurch erleichtert. Aus Sicht der Produktentwicklung kann die garantierte Rückführung von Objekten beispielsweise genutzt werden, um alte Komponenten in neuen Produkten zu berücksichtigen und sukzessive zu verbauen. Schließlich haben bereits verwendete Komponenten ihre Tauglichkeit in der Praxis bewiesen, woraus bei deren erneuten Implementierung ggf. die Durchführung von weniger Testschleifen resultiert. Auf diese Weise können PSS auch eine Kreislaufwirtschaft begünstigen.

Die nachfolgende Darstellung (Abbildung 16) gibt einen Überblick über wichtige Technologien und Methoden für die Entwicklung von PSS sowie relevante Daten und leistet einen möglichen Beitrag von PSS zur Ressourceneffizienz. Weitere Entwicklungsansätze und Informationen zu PSS sind außerdem auf der Website des VDI ZRE zu finden.⁷⁸ Die Begrifflichkeiten werden außerdem im Anhang genauer erklärt.

⁷⁸ Weitere Informationen zum Thema PSS unter: <https://www.ressourcen-deutschland.de/themen/pss/>

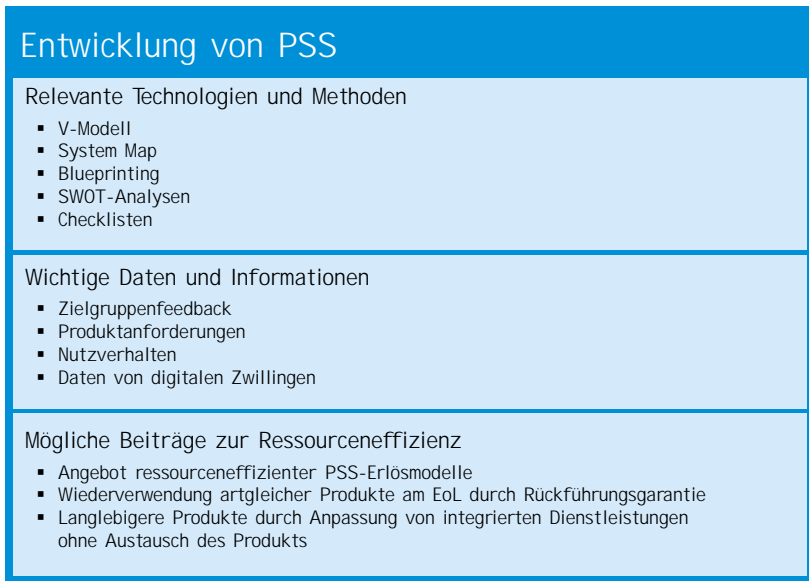


Abbildung 16: Produkt-Service-Systeme und damit verbundene Themenfelder (eigene Darstellung)

Praxisbeispiel: Walther Flender GmbH aus Düsseldorf

Neben ergänzenden Dienstleistungen, die in der Nutzungsphase angeboten werden, können Services auch die Produktentwicklung verbessern. Dies ist beispielweise dann der Fall, wenn Kundinnen und Kunden tiefer in den Entwicklungsprozess eingebunden werden.

Die Walther Flender GmbH, spezialisiert auf Antriebstechnik, verfügt über ein umfassendes Portfolio von Motoren, Getrieben, Kupplungen, Riemenantrieben und Maschinenverkleidungen. Zusätzlich bietet das Unternehmen Services über die gesamte Produktentwicklung an. So werden beispielweise bei der Auslegung von Zahnriemenantrieben kundenspezifische Prototypen erstellt. Dabei kann die Kundschaft auch über die Art des Prototyps - von einfachen Anschauungsmustern bis hin zu Funktionsmustern unter Berücksichtigung von Toleranzen - entscheiden. Des Weiteren wird online auf der Homepage ein Zahnscheiben-Online-Konfigurator angeboten, mit dem Antriebsriemen individuell gestaltet werden können. Dazu steht eine vielseitige Palette an wichtigen Parametern wie Profil, Teilung, Zähnezahl, Breite, Werkstoff, Bohrungen usw. zur Verfügung. Das fertige 3D-CAD-Modell sowie das dazugehörige Produktdatenblatt können heruntergeladen und anschließend als Anfragezeichnung genutzt werden. All diese Maßnahmen führen dazu, dass aufwendige und materielle Test-Prototypen entfallen, wodurch der Verbrauch an Ressourcen reduziert und die Effizienz gesteigert wird.⁷⁹

⁷⁹ Vgl. Hochschule Pforzheim (2021), S. 6.

5 FAZIT

Die Digitalisierung und die damit einhergehende Vernetzung von Maschinen, Menschen und Unternehmensorganisationen werden in den kommenden Jahren weiter zunehmen. Die dadurch erwartbare wachsende Komplexität verbunden mit gesellschaftlichen Forderungen nach ökologischen Produkten und Wertschöpfungsketten sowie einem hohen Innovationsdruck stellen Entwicklerinnen und Entwickler vor große Herausforderungen. Digitale Technologien bieten dabei das Potenzial, diesen Herausforderungen gerecht zu werden und darüber hinaus auch die Ressourceneffizienz (ebenso wie die Effizienz im allgemeinen Sinne) in der Produktentwicklung zu steigern.

Unterschiedliche Fortschritte bei der Digitalisierung führen zu einer vielfältigen Ausgangslage, wodurch ebenso die einsetzbaren digitalen Technologien sehr divers sind. Die durch die Digitalisierung gewachsenen Effizienzpotenziale sind ökonomisch getrieben, können aber auch positive ökologische Auswirkungen haben. Die großen Chancen für die Ressourceneffizienz entstehen vor allem durch die bessere Datenerfassung und Aufbereitung in allen Phasen der Wertschöpfung. So können Entwicklerinnen und Entwickler in Zukunft beispielsweise auf präzisere Nutzverhalten zurückgreifen und diese Erkenntnisse für die Entstehung neuer Produkte heranziehen, wenn Objekte über das Internet of Things miteinander verbunden sind. Auch während der Produktentwicklung anfallende Daten und Informationen können dank Technologien wie digitaler Zwillinge dazu verwendet werden, durch komplexe Simulationen schneller gewünschte Resultate zu erzielen. Weniger materielle Testschleifen, Fehlervermeidung und präzisere Berechnungen zu Einsparungen sind somit die größten ökologischen Chancen.

Neben den Potenzialen, die konkret der Produktentwicklung zuzuordnen sind, gibt es vor allem im Bereich der Dienstleistungen Technologien, deren ökologischen Auswirkungen in der ganzen Wertschöpfungskette bemerkbar werden. Sogenannte PSS ergänzen physische Produkte um Dienstleistungen und können so für längere Nutzungsphasen und höhere Rückführungsquoten sorgen. PSS sind jedoch nicht nur aus ökologischer Sicht interessant, sondern können auch Erlösmodelle von Unternehmen erweitern. Durch si-

cherere Rückführungsquoten haben Entwicklungsteams außerdem die Möglichkeit, bewährte Bauteile in neuen Produkten einzusetzen, woraus auch Chancen für die Kreislaufwirtschaft erwachsen. Aufgrund des komplexen Zusammenspiels von unterschiedlichen Technologien und Entwickelnden bei der Erstellung von PSS können Richtlinien wie die VDI/VDE 2206 sinnvolle Hilfestellungen bieten.

Bei der Implementierung digitaler Technologien in der Produkt- und Serviceentwicklung ist eine schrittweise Herangehensweise für Unternehmen empfehlenswert. Zu Beginn sollten Firmen klar definieren, welche Ziele durch die Umsetzung digitaler Technologien erfüllt werden können. Dabei ist es auch wichtig zu prüfen, welche personellen und infrastrukturellen Voraussetzungen geschaffen werden müssen. Aus ökonomischer und ökologischer Sicht ist es für Unternehmen deshalb in einem ersten Schritt erstrebenswert, sämtliche in der Wertschöpfung anfallenden Daten möglichst präzise zu sammeln, zu archivieren und zu verwalten. Diese PDM-Systeme sind nicht nur für die anderen vorgestellten Technologien eine hilfreiche Basis, sondern können auch als Grundlage eines zukünftig angestrebten und ökologisch sinnvollen digitalen Produktpasses oder PLM-Systems (vgl. Kapitel 6.1) dienen.

Neben einem konsistenten Datenmanagement ist mit der zunehmenden Datenerfassung und der Heterogenität der Daten ebenso die Datensicherheit zu beachten. Kooperationen mit externen Gruppen aus Expertinnen und Experten können nicht nur in Bezug auf Sicherheitsfragen vorteilhaft sein, sondern auch bei der Analyse und Auswertung anfallender Daten. Erst im Zusammenspiel von notwendiger Infrastruktur und vorhandenem Wissen können die vorgestellten digitalen Technologien gleichfalls im Sinne der Ressourceneffizienz eingesetzt werden.

6 AUSBLICK

Wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben, wird sich die Vernetzung der Produkt- und Serviceentwicklung durch die Digitalisierung weiter erhöhen. Die Zunahme an potenziell beteiligten Gruppen und Unternehmensorganisationen steigert auch die Komplexität, wobei das Versprechen sämtlicher neu entwickelter Technologien immer auch ein Effizienzversprechen beinhaltet und so ebenso für die Ressourceneffizienz von Interesse ist. Die in der Kurzanalyse vorgestellten digitalen Technologien sind im seltensten Fall einzeln zu betrachten, sondern bilden häufig Teilkomponenten⁸⁰ eines Netzwerks an Technologien mit dem Ziel, Entwicklerinnen und Entwickler bei der Anpassung und Neuentwicklung zu unterstützen.

Im Zuge der fortschreitenden Digitalisierung und zunehmenden Relevanz der Umweltthematik gibt es auch Bestrebungen, das gesamte System eines Unternehmens und daraus resultierende Produkte effizienter im Sinne der Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz zu gestalten. Abschließend sollen daher zwei Beispiele (PLM-Systeme und der digitale Produktpass) vorgestellt werden, deren Bedeutung für Entwicklerinnen und Entwickler relevant sein kann.

6.1 PLM-Systeme

Verkürzte Produktlebenszyklen und sich ständig wandelnde Marktsituationen führen zu einem konstanten Veränderungsdruck. Das sogenannte Product Lifecycle Management (PLM) ist ein unternehmensweiter Managementansatz zur Steuerung von Prozessen, Geschäftssystemen, Produktdaten und beteiligten Personen im gesamten Produktlebenszyklus. Ziel des Ansatzes ist eine zentrale und konsistente Verwaltung sowie Bereitstellung aller anfallenden Informationen. Die Umsetzung erfolgt mittels IT-Lösungen, sogenannter PLM-Systeme (vgl. Abbildung 17).⁸¹

Die Idee des PLM-Ansatzes besteht darin, jede Information im gesamten Produktlebenszyklus nur einmal in das System einzugeben und sämtliche bere-

⁸⁰ Weitere nützliche digitale Technologien sind beispielsweise Tools zur effizienteren Kommunikation oder zum Projektmanagement.

⁸¹ Vgl. Stark, J. (2015), S. 1.

chenbaren Informationen automatisch zu erstellen. Die Vision eines vollständigen PLM-Systems ist deshalb in der Praxis mit erheblichen Hürden verbunden. Eine Vernetzung aller bereits im Unternehmen verwendeten Tools - von ERP-Systemen über CAD bis hin zu PDM - führt zu einem exponentiellen Anstieg der Verknüpfungen und ist schnell nicht mehr praktikabel. Ein realistisches Ziel kann es daher sein, die eigene PLM-Landschaft schrittweise zu etablieren, um sich so dem Idealzustand anzunähern. Zu Beginn der Teileinführung eines PLMs gilt es, ein erstes operatives Ziel zu formulieren. Folgende Ziele können hilfreich sein:⁸²

- Implementierung eines datenbankbasierten Anforderungsmanagements
- Einführung eines Dokumentenmanagementsystems
- Schaffung von offenen standardisierten Schnittstellen wichtiger Tools
- Implementierung eines zentralen CAD-Datenverwaltungssystems

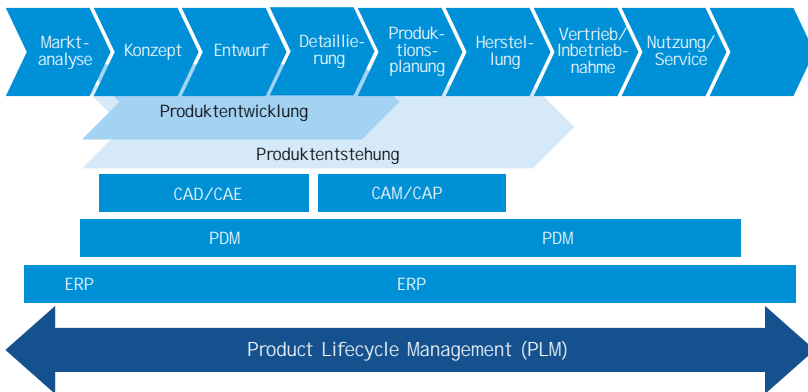


Abbildung 17: Einordnung von PLM in den Produktlebenszyklus und die Unternehmens-IT-Landschaft⁸³

Im Zuge der Zielumsetzung ergeben sich im Idealfall bereits neue Umsetzungsbereiche. Bei den vier genannten Beispielen kann das die Erweiterung

⁸² Vgl. Digitized (2021).

⁸³ Eigene Darstellung nach VDI 2219:2016-09, S. 10.

des zentralen CAD-Datenverwaltungssystems um ein Konfigurationsmanagement sein.

Grundsätzlich muss festgehalten werden, dass die Etablierung eines PLM-Systems ähnlich dem der Entwicklung von PDM (vgl. Kapitel 3.1) mit den jeweiligen Umständen in Unternehmen im Einklang stehen muss. Da eine vollständige Umsetzung in der Praxis sehr aufwendig ist, kann auch der mögliche Beitrag zur Ressourceneffizienz nur beschreibend erfolgen. Mögliche messbare Chancen für eine ressourceneffiziente Produktentwicklung hängen stark von den jeweiligen verbundenen digitalen Tools im PLM-System ab. Werden beispielsweise Informationen aus dem LCA, wie CO₂-Emissionen bestimmter Objekte und Prozesse, im ganzen System bereitgestellt, so kann die Berücksichtigung ökologischer Faktoren auch in der Produktentwicklung erleichtert werden. Durch den Grundsatz, alle Informationen im System nur einmal bereitzustellen und sämtliche Akteure miteinander zu vernetzen, verspricht die Einführung von PLM-Systemen auch Effizienzsteigerungen durch die in den vorherigen Kapiteln beschriebene Vermeidung von Fehlern und mangelhaften Abstimmungen von Projektteams und Unternehmensorganisationen. Auch dadurch ist zu erwarten, dass der Einsatz von Rohstoffen durch eine bessere Abstimmung zielgerichtet und effizient erfolgen kann.

Praxisbeispiel: PLM-Ansätze bei dem schwedischen Unternehmen Electrolux

Electrolux ist ein weltweit agierendes Hausgeräteunternehmen. Die Entwicklung von Produkten ist durch die unterschiedlichen Bedürfnisse der Kundschaft auf den über 150 globalen Märkten nicht immer einfach. Mittels verschiedener Produktentwicklungstools stellt sich das Unternehmen diesen Herausforderungen. Durch die Implementierung eines umfassenden PLM-Tools im gesamten Unternehmen konnte Electrolux die Effizienz in der Produktentwicklung deutlich steigern. Ingenieurinnen und Ingenieure können nun an allen Electrolux-Standorten Informationen austauschen, die für die Entwicklung von Produkten relevant sind - von der technischen Dokumentation über Spezifikationen, Artikelabnahmen, technische Änderungen und vieles mehr.

Dieses technische Grundgerüst mit globalen und modularen Plattformen hilft dem Unternehmen, erfolgreiche Produkteinführungen von einem Markt auf den anderen zu übertragen – mit jeweiligen Anpassungen an lokale Präferenzen. Lokale Ingenieurinnen und Ingenieure in jedem Land können auf digitale Abbildungen der Electrolux-Produktmodelle zugreifen und diese in spezifische Modelle umwandeln. Dabei geben die digitalen Abbildungen nicht nur alle Informationen über die physischen Eigenschaften des Produkts wieder, sondern enthalten ebenso jegliche Software, die in das Produkt integriert wurde. Auch die Zuliefernden können über die Plattform angebunden werden, sodass sie sofort die neuesten Informationen über alle technischen Änderungen erhalten und so immer auf dem neuesten Stand sind.

Electrolux arbeitet außerdem daran, diese Möglichkeiten weiterzuentwickeln. Zusätzlich zu den bestehenden Modellen für den Produktstamm entwickelt das Unternehmen einen Prototyp für ein System, das einen "Konfigurator"-Ansatz verwendet und ein robustes digitales Abbild schafft, das automatisch jede Lagereinheit repliziert. Dieser "Superzwilling" kann somit eine "Überlast"- oder "150%-Stückliste" erstellen, die alle möglichen Produktvarianten widerspiegelt und direkt in die Materialbedarfsplanung eingespeist werden kann.

Da die beschriebenen Produktabbildungen dasselbe PLM-System verwenden wie die digitalen Zwillinge der Electrolux-Fertigungsstätten, können sie nahtlos mit den digitalen Zwillingen verbunden werden. Diese enge Integration erhöht die Effizienz in der Produktentwicklung sowie in der Produktion und hilft dem Unternehmen, Kosten zu sparen und gleichzeitig Ressourcen zu schonen.

Nach eigener Schätzung kann durch die globalen und modularen Plattformen die Zeit von der Produktentwicklung bis zur Markteinführung eines neuen Produkts um 20 - 30 % verkürzt werden. Darüber hinaus sind 15 - 20 % geringere Investitionskosten nötig. Electrolux ist der Ansicht, dass modulare Konstruktionen Flexibilität ermöglichen, indem sie Design-

schaffenden sowie Ingenieurinnen und Ingenieuren die Option geben, Produkte mit einer begrenzten Anzahl von Standardkomponenten individuell zu gestalten.⁸⁴

6.2 Digitaler Produktpass

Der digitale Produktpass ist Teil der umweltpolitischen Digitalagenda und soll als "digitaler Lebenslauf" von Produkten dienen. Grundsätzlich ist geplant, den digitalen Produktpass für alle Produkte und Dienstleistungen zu erstellen, wobei der Schwerpunkt zunächst auf ressourcen- und energieintensiven Gütern wie Batterien liegt. Ziel ist es, einen Datensatz zu jedem physischen Produkt zu schaffen, der die Komponenten, Materialien und chemischen Substanzen sowie Informationen zu Reparierbarkeit, Ersatzteilen oder fachgerechter Entsorgung für ein Produkt zusammenfasst. Dafür müssen – wie im PLM-System – Daten aus allen Abschnitten der Lebensphase gesammelt werden, um sie bei Bedarf abzurufen (vgl. **Abbildung 18**).

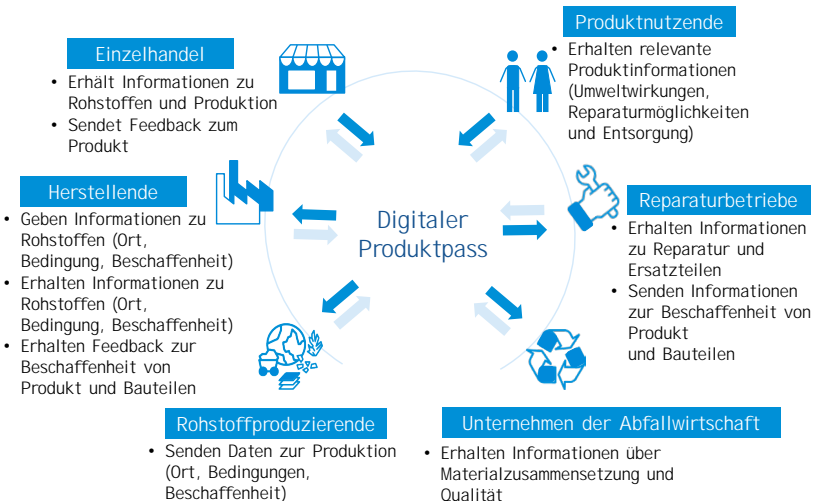


Abbildung 18: Konzept eines digitalen Produktpasses⁸⁵

⁸⁴ Vgl. PricewaterhouseCoopers GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft (2019), S. 25.

⁸⁵ Eigene Darstellung nach Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2020).

Eine Strukturierung umweltrelevanter Daten in einem standardisierten, vergleichbaren Format soll zukünftig alle Agierenden in der Wertschöpfungskette dabei unterstützen, die Kreislaufwirtschaft voranzutreiben. Durch die geschaffene Transparenz soll außerdem eine nachhaltige Kaufentscheidung begünstigt werden.^{86,87}

Durch die Berücksichtigung wichtiger Schnittstellen zum Informationsaustausch durch Sensoren, Rechner und den Anschluss zum IoT können zukünftige Produkte wichtige Voraussetzungen erfüllen, um einen digitalen Produktpass zu etablieren. Auch aus Sicht einer nachhaltigen Produktentwicklung ist es deshalb wichtig, das zukünftige Potenzial und die Bedeutung des digitalen Produktpasses zu kennen.

⁸⁶ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2020).

⁸⁷ Mehr Informationen zum digitalen Produktpass können unter folgendem Link aufgerufen werden:
<https://www.bmu.de/faqs/umweltpolitische-digitalagenda-digitaler-produktpass>

LITERATURVERZEICHNIS

Baden-Württemberg Stiftung gGmbH (2020): High Performance Computing (HPC) - Kurzbeschreibung [abgerufen am: 07.12.2021], verfügbar unter: <https://www.bwstiftung.de/de/programm/high-performance-computing-ii>

Brecht, U. (2005): Kostenmanagement – Neue Tools für die Praxis, Gabler Verlag, Wiesbaden.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2020): Umweltpolitische Digitalagenda: Digitaler Produktpass [abgerufen am: 09.12.2021], verfügbar unter: <https://www.bmu.de/FQ143>

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2017): Smart Data – Innovationen aus Daten [abgerufen am: 08.12.2021], verfügbar unter: https://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/2017-20-11_smartdata_ergebnisbroschuere.pdf;jsessionid=1944810226F61C73D524979A518758C3?__blob=publicationFile&v=8

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2021): Digitalisierung der Wirtschaft in Deutschland [online] – Technologie- und Trendradar [abgerufen am: 10.03.2022], verfügbar unter: https://www.de.digital/DIGITAL/Redaktion/DE/Digitalisierungsindex/Publikationen/publikation-download-technologie-trendradar-2021.pdf?__blob=publicationFile&v=3

Dahler, J. (2019): Kanban: Mehr als nur eine To-do-Liste. Verlag Dashöfer GmbH [abgerufen am: 27.04.2022], verfügbar unter: <https://www.dashoefer.de/newsletter/artikel/kanban-mehr-als-nur-eine-to-do-liste.html>

Deutsche Gesellschaft für Qualität (2018): Es geht auch anders: mit „Mix Sigma“ die Möglichkeiten von Industrie 4.0 nutzen! [online]. Deutsche Gesellschaft für Qualität [abgerufen am: 04.03.2019], verfügbar unter: <https://www.dgq.de/fachbeitraege/mit-mix-sigma-die-moeglichkeiten-von-industrie-4-0-nutzen/>

Digitized (2021): PLM-Einführung: Best Practise mit Beispielen [abgerufen am: 09.12.2021], verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=8bfUuSMtGDg>

Existenzgründungsportal des BMWK (2022): Business Model Canvas [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: <https://www.existenzgruender.de/DE/Gruendung-vorbereiten/Businessplan/Business-Model-Canvas/inhalt.html>

Exner, K. (2019): Prototyping von Produkt-Service Systemen und Smart Services in der Konzeptphase des Entwicklungsprozesses, Fraunhofer Verlag, Stuttgart, Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin,

Finanzen.net (2022a): Blueprinting - Definition [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: <https://www.finanzen.net/wirtschaftslexikon/blueprinting>

Finanzen.net (2022b): CAx-Systeme - Definition [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: <https://www.finanzen.net/wirtschaftslexikon/cax-systeme>

Fraunhofer ITWM (2022): Hardware-in-the-Loop-Validierung elektronischer Steuereinheiten [abgerufen am: 10.03.2022], verfügbar unter: <https://www.itwm.fraunhofer.de/de/abteilungen/sys/maschinenmonitoring-und-regelung/hardware-in-the-loop.html>

Gabler Wirtschaftslexikon (2022a): ABC-Analyse [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/abc-analyse-28775>

Gabler Wirtschaftslexikon (2022b): Advanced Analytics [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/advanced-analytics-53185>

Gabler Wirtschaftslexikon (2022c): Augmented Reality [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/augmented-reality-53628>

Gabler Wirtschaftslexikon (2022d): Chatbot [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/chatbot-54248>

Gabler Wirtschaftslexikon (2022e): Co-Creation [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/co-creation-54454>

Gabler Wirtschaftslexikon (2022f): Customer Relationship Management (CRM) [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/customer-relationship-management-crm-30809?redirectedfrom=27197>

Gabler Wirtschaftslexikon (2022g): Customer-Journey-Prozess [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/customer-journey-prozess-100259>

Gabler Wirtschaftslexikon (2022h): Cyberphysische Systeme [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/cyberphysische-systeme-54077>

Gabler Wirtschaftslexikon (2022i): Design Thinking [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/design-thinking-54120>

Gabler Wirtschaftslexikon (2022j): ERP [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/erp-32375>

Gabler Wirtschaftslexikon (2022k): Machine Learning [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/machine-learning-120982>

Gabler Wirtschaftslexikon (2022l): Open Innovation [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/open-innovation-51786>

Gabler Wirtschaftslexikon (2022m): Predictive Analytics [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/predictive-analytics-54501>

Gabler Wirtschaftslexikon (2022n): SWOT-Analyse [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/swot-analyse-52664>

Gabler Wirtschaftslexikon (2022o): Virtuelle Realität [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/virtuelle-realitaet-54243>

GPOS mbH (2022): Prozessoptimierung und Effizienzsteigerung mit Hilfe einer passgenauen Maschinendatenerfassung [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: <https://www.gfos.com/mes/maschinendatenerfassung-mde.html>

Grösser, S. (2018): Definition: Was ist "Digitaler Zwilling"? [abgerufen am: 08.12.2021], verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/digitaler-zwilling-54371/version-277410>

Herzog, M.; Köster, M.; Sadek, T. und Bender, B. (2017): Die frühen Phasen der IPSS-Entwicklung - Charakteristische Herausforderungen und methodische Unterstützung (1). In: Meier, H. und Uhlmann, E., Hg. Industrielle Produkt-Service Systeme. *Entwicklung, Betrieb und Management*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S. 69-94.

Hochschule Pforzheim (2021): INDUSTRIELLE PRODUKTSERVICE-SYSTEME (IPSS) Industrielle Produkt-Service-Systeme (IPSS) personalisierte Produkte für produzierende Unternehmen [abgerufen am: 09.12.2021], verfügbar unter: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewjIv-gv9b0AhU0iv0HHS3ID08QFnoECAQQAQ&url=https%3A%2F%2Fdigitalhub-nordschwarzwald.de%2Fwp-content%2Fuploads%2F2021%2F03%2FThe-menschwerpunkt-IPSS.pdf&usg=AOvVaw2el281phVTO2d_HKVJG3YC

it's OWL Clustermanagement GmbH (2021): Unsere Vision - Durch den Einsatz Künstlicher Intelligenz können die Qualität und Effizienz von Produktentstehungsprozessen deutlich gesteigert werden. [abgerufen am: 10.12.2021], verfügbar unter: <https://ki-marktplatz.com/vision/>

Kirchner, E. (2020): Werkzeuge und Methoden der Produktentwicklung, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

Klein, M.; Maschler, B.; Zeller, A.; Ashtari Talkhestan, B.; Jazid, N.; Rosen, R. und Weyrich, M. (2019): Architektur und Technologiekomponenten eines digitalen Zwillings, Baden-Baden [abgerufen am: 07.12.2021], verfügbar unter: <https://www.ias.uni-stuttgart.de/dokumente/publikationen/>

2019_Architektur_und_Technologiekomponenten_eines_digitalen_Zwilling.pdf

Lange, U. und Oberender, C. (2017): VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 20: Ressourceneffizienz durch Maßnahmen in der Produktentwicklung. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Berlin, verfügbar unter: https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/VDI-ZRE_Kurzanalyse_Nr._20_Produktentwicklung_bf.pdf

Lexikon der Nachhaltigkeit (2015): EcoDesign [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/ecodesign_1758.htm

Luber, S. (2018): Was ist Retrofit? [online]. BigData-Insider, 13.11.2018 [abgerufen am: 19.02.2021], verfügbar unter: <https://www.bigdata-insider.de/was-ist-retrofit-a-775551/>

MB CAD GmbH (2020): Digital Mock-up [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: <https://www.mbcad.de/glossar/digital-mock-up/>

Menke, R. (2020): So geht's wie geschmiert [abgerufen am: 07.12.2021], verfügbar unter: <https://www.digital-engineering-magazin.de/wp-content/uploads/digital-engineering-magazin-ausgabe-8-2020.pdf>

Pfeffer, J. (2019): Grundlagen der agilen Produktentwicklung – Basiswissen zu Scrum, Kanban, Lean Development [abgerufen am: 08.12.2021], verfügbar unter: <http://joachim-pfeffer.com/agile-systementwicklung-buchdownload/>

PricewaterhouseCoopers GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft (2019): Digital Product Development 2025 – Agile, Collaborative, AI Driven and Customer Centric [abgerufen am: 12.10.2021], verfügbar unter: <https://www.pwc.de/de/digitale-transformation/pwc-studie-digital-product-development-2025.pdf>

Rank, R. (2017): Unterschied Big Data – Smart Data [abgerufen am: 07.12.2021], verfügbar unter: <https://www.stuttgart.ihk24.de/fuer-unternehmen/innovation/digitale-wirtschaft/digitale-technologien/big-data-smart-data-3411998>

REFA AG (2022): Lean Development [abgerufen am: 27.04.2022], verfügbar unter: <https://www.refa.de/service/refa-lexikon/lean-development>

Rosenkranz, C. (2021): Produktentwicklung nachhaltig optimieren mit Scrum [abgerufen am: 10.03.2022], verfügbar unter: https://www.co-improve.com/media/digital_engineering_03_2021_co-improve_fa_agile_entwicklung_landmaschine_nach_scrum.pdf

Schneider, M. (2021): Freie Bahn dank Simulation [abgerufen am: 08.12.2021], verfügbar unter: <https://www.digital-engineering-magazin.de/printmagazine/digital-engineering-magazin-04-2021/>

Scholz, U.; Pastoors, S.; Becker, J. H.; Hofmann, D. und van Dun, R. (2018): Praxishandbuch Nachhaltige Produktentwicklung, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

scikit-learn developers (2022): Support Vector Machines [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: <https://scikit-learn.org/stable/modules/svm.html>

ServiceDesignTools.org (2007): System Map - Visualise all the actors and components involved in a service delivery [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: <https://servicedesigntools.org/tools/system-map>

Siemens.com (2022a): CAE-Anwendungen [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/de/our-story/glossary/computer-aided-engineering-cae/13112>

Siemens.com (2022b): Configuration to Order (CTO) [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/de/our-story/glossary/configure-to-order/25212>

Siemens.com (2022c): Manufacturing Execution Systems (MES) [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/de/our-story/glossary/manufacturing-execution-systems-mes/38072>

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH (1995): Neuronale Fuzzy-Systeme [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: <https://www.spektrum.de/magazin/neuronale-fuzzy-systeme/822339>

Stark, J., Hg. (2015): Product Lifecycle Management, Springer International Publishing, Basel.

Stark, R. (2022): Virtual Product Creation in Industry - The Difficult Transformation from IT Enabler Technology to Core Engineering Competence, Springer-Verlag GmbH Germany, Berlin.

Statista GmbH (2021): Umsatz mit Informationstechnik in Deutschland von 2007 bis 2021 [abgerufen am: 04.01.2022], verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/189877/umfrage/marktvolumen-im-bereich-informationstechnik-in-deutschland-seit-2007/>

Statistisches Bundesamt (2019): Produzierendes Gewerbe - Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden. Statistisches Bundesamt, Fachserie 4, 4.3 [abgerufen am: 10.03.2022], verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/Publikationen/Downloads-Struktur/kostenstruktur-2040430177004.html>

Stickel, M. (2006): Planung und Steuerung von Crossdocking-Zentren [abgerufen am: 27.04.2022], verfügbar unter: publikationen.bibliothek.kit.edu/1000005312/2730

Stüdemann, J. (2020): Potenziale kennen und nutzen: agile Prozesse in der Produktentwicklung [abgerufen am: 08.12.2021], verfügbar unter: <https://dmexco.com/de/stories/potenziale-kennen-und-nutzen-agile-prozesse-in-der-produktentwicklung/>

Syska, A. (2006): Produktionsmanagement - Das A - Z wichtiger Methoden und Konzepte für die Produktion von heute, Gabler Verlag, Wiesbaden.

Tosse, T. (2020): IT-Lösungen auf Rennsportniveau [abgerufen am: 07.12.2021], verfügbar unter: <https://www.digital-engineering-magazin.de/printmagazine/digital-engineering-magazin-01-2020/>

T-Systems International GmbH (2018): Spiegelbild mit Potenzial - Digitale Zwillinge versprechen viele Möglichkeiten und kommen doch noch kaum zum Einsatz. [abgerufen am: 10.03.2022], verfügbar unter: https://www.t-systems.com/resource/blob/193878/204406bcefefea9d59906c20c834e588/DL_Best-Practices_Potenzial.pdf

TWI Ltd (2022): Was ist Rapid Prototyping? [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: <https://www.twi-global.com/locations/deutschland/was-wir-tun/haeufig-gestellte-fragen/was-ist-rapid-prototyping>

VDI 2219:2016-09: Verein Deutscher Ingenieure e. V., Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 4800 Blatt 1:2016-02: Verein Deutscher Ingenieure e. V., Ressourceneffizienz - Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2017): Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Berlin.

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2021a): Kunststoffrecycling 4.0: Künstliche Intelligenz und digitaler Zwilling spart Ressourcen. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH [abgerufen am: 08.12.2021], verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=LxafPcpqOf4>

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2021b): Potenziale der schwachen künstlichen Intelligenz für die betriebliche Ressourceneffizienz, Berlin [abgerufen am: 12.10.2021], verfügbar unter: https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/studien/VDI-ZRE_Studie_KI-betriebliche-Ressourceneffizienz_Web_bf.pdf

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2022): VDI-Richtlinien, Normen und Verordnungen mit Bezug zur Ressourceneffizienz. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH [abgerufen am: 03.05.2022], verfügbar unter: <https://www.ressource-deutschland.de/instrumente/normen-und-richtlinien/>

VDI/VDE 2206:2021-11: VDI/VDE-Fachbereich Autonome Systeme & Mechatronik, Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme, Beuth Verlag GmbH,

Vogel Communications Group (2020): Was ist Enterprise Mobility Management? [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: <https://www.security-insider.de/was-ist-enterprise-mobility-management-a-959936/>

Vogel Communications Group: Was ist eigentlich FEM? [abgerufen am: 16.05.2022], verfügbar unter: <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/was-ist-eigentlich-fem-a-969326/>

Welte, O. (2020): Agile Entwicklungsmethoden in der Fertigungsindustrie [abgerufen am: 08.12.2021], verfügbar unter: <https://www.springerprofessional.de/content/pdfld/17757778/10.1007/s35726-019-0056-5>

Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung (2020): WiGeP-Positionspapier zum Thema "Digitaler Zwilling" [abgerufen am: 10.03.2022], verfügbar unter: http://www.wigep.de/fileadmin/Positions-_und_Impulspapiere/Final_WiGeP_Positionspapier_Digital_Twin.pdf

Wuttke, L.: Künstliche Neuronale Netzwerke: Definition, Einführung, Arten und Funktion. Datasolut [abgerufen am: 27.04.2022], verfügbar unter: <https://datasolut.com/neuronale-netzwerke-einfuehrung>

Zwettler, M. (2020): Was ist eigentlich FEM? [abgerufen am: 07.12.2021], verfügbar unter: <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/was-ist-eigentlich-fem-a-969326/>

ANHANG

Begriffe	Beschreibung
ABC-Analyse	Die ABC-Analyse bildet eine Methode zur Entscheidungsfindung durch die Einteilung in die Klassen "wichtig", "weniger wichtig" und "unwichtig". Ziel ist es, den Blick auf die wesentlichen Punkte zu richten, um Schwerpunkte für das weitere Vorgehen zu setzen. ⁸⁸
Advanced Analytics	Advanced Analytics umfasst eine Vielzahl an Tools der Datenverarbeitung, die eine Vorhersage über zukünftige Ereignisse ermöglichen. Mit Advanced Analytics lassen sich sowohl strukturierte als auch unstrukturierte Daten automatisiert auswerten und Prognosen auf der Grundlage der Daten modellieren. Advanced Analytics erlaubt Nutzenden, präzisere Entscheidungen zu treffen und fördert proaktives Handeln. Dazu gehören Tools wie z. B. Predictive Analytics und Machine Learning. ⁸⁹
Augmented Reality (AR)	Unter Augmented Reality (AR) versteht man die computergestützte Darstellung, bei der die physische Realität weiterhin wahrgenommen, allerdings durch computergenerierte virtuelle Elemente ergänzt wird. Dadurch nehmen Nutzende eine "erweiterte Realität" wahr. AR lässt sich entweder mit einem Smartphone, Tablet, Head-up-Display, Holografie-System oder einer Augmented-Reality-Brille erleben. ⁹⁰
Blueprinting	Das Konzept Service Blueprint ist eine auf Dienstleistungen ausgelegte Methode und dient der Analyse, Visualisierung und Optimierung von Dienstleistungsprozessen. Ziel ist es, die Effizienz im Unternehmen zu steigern, indem es die zu erbringende Dienstleistung aus Sicht der Kundschaft beschreibt, Optimierungsbedarfe erkennt oder die kundschaftsorientierten Gestaltungen von neuen Prozessen ermöglicht. Beim Service Blueprinting handelt es sich um ein Prozessdiagramm, das Anweisungen für die Interaktion zwischen Kundschaft, Mitarbeitenden und Kontaktstellen beinhaltet. ⁹¹
Business Model Canvas	Das Business Model Canvas, kurz BMC, ist eine Vorlage für die Visualisierung und Strukturierung von Geschäftsmodellen. Es hilft dabei, das eigene Geschäftsmodell kompakt auf ein Blatt Papier zu bringen, indem es die verschiedenen Aufgabenbereiche in einem Geschäftsmodell darstellt und jeweils wichtige Fragestellungen benennt. ⁹²
Computer-Aided x (CAx)	Computer-Aided x (CAx) ist eine Sammelbezeichnung für Softwareanwendungen, die für unterschiedliche ingenieurtechnische Aufgaben wie z. B. die Modellierung, Berechnung und Simulation in der Produktentwicklung genutzt werden. Dabei steht die englische Abkürzung „CA“ für „Computer-Aided“ (rechnerunterstützt) und „x“ als Platzhalter für verschiedene Buchstaben, die bestimmte Tätigkeitsfelder spezifizieren. ⁹³
Computer-Aided Engineering (CAE)	Computer-Aided Engineering (CAE) bezeichnet die Verwendung von Software zur Berechnung, Analyse und Simulationen von Produkten. ⁹⁴

⁸⁸ Vgl. Gabler Wirtschaftslexikon (2022a).⁸⁹ Vgl. Gabler Wirtschaftslexikon (2022b).⁹⁰ Vgl. Gabler Wirtschaftslexikon (2022c).⁹¹ Vgl. Finanzen.net (2022a).⁹² Vgl. Existenzgründungsportal des BMWK (2022).⁹³ Vgl. Finanzen.net (2022b).⁹⁴ Vgl. Siemens.com (2022a).

Configuration to Order (CTO)	CTO ist eine Konstruktionsmethode, bei der durch eine Auswahl an vorgegebenen Optionen konfiguriert wird. Somit werden Produkte nicht mehr komplett auftragsspezifisch entwickelt, sondern mit allen theoretisch möglichen Bauteilen oder Optionen durchkonfiguriert. ⁹⁵
Chatbot	Ein "Chatbot" ist ein digitales Dialogsystem, das in der Lage ist, Text und Sprachnachrichten zu erkennen und darauf zu reagieren. Durch eigenständige Suchen in Datenbanken oder im Internet soll ein Chatbot passende Antworten finden oder auf die richtige Kontaktstelle im Unternehmen verweisen. ⁹⁶
Co-Creation	Unter Co-Creation wird die Integration der Kundschaft in die Produktentwicklung bzw. -entstehung verstanden. ⁹⁷
Customer Journey Map	Eine Customer Journey (dt. Kundenreise) oder auch User Journey beschreibt den visualisierten Weg der Kundschaft zu seinem gewünschten Ziel - mit allen direkten und indirekten Interaktionspunkten mit dem Unternehmen. Das "Customer Journey Mapping" legt wiederum den Dokumentationsprozess, den ein Unternehmen durchläuft, dar, um diese Reise zu visualisieren. Ziel ist es, so ein Verständnis für die Wünsche der Kundschaft zu entwickeln. ⁹⁸
Customer-Relationship-Management (CRM)	Customer-Relationship-Management (CRM) bezeichnet einen umfassenden und systematischen Ansatz zur Planung, Verwaltung und Durchführung aller interaktiven Prozesse mit der Kundschaft, um eine optimale Zielgruppenorientierung zu erreichen. ⁹⁹
Design Thinking	Das Design Thinking ist ein Konzept der kreativen Problemlösung. Ziel ist es, unterschiedliche Erfahrungen, Meinungen und Perspektiven zur Lösungsfindung hinzuzuziehen. In einem ersten Schritt werden Daten über eine Zielgruppe gesammelt. Ziel ist es, dass aus diesen Daten Ideen generiert werden, aus denen wiederum schnell Prototypen erstellt und getestet werden sollen. Der Fokus liegt anfangs weniger auf der perfekten Ausarbeitung als vielmehr auf dem Experimentieren, um neue Einsichten zu sammeln. ¹⁰⁰
Digital Mock-up	Ein Digital Mock-up (DMU) ist der Aufbau eines virtuellen Prototyps im CAD-System, mit dem verschiedene Tests, Simulationen oder Animationen durchgeführt werden. ¹⁰¹
Eco Design	Eco Design (Ökodesign) ist ein Gestaltungsansatz, um durch ein optimiertes Produktdesign Umweltbelastungen eines Produkts über den gesamten Lebensweg zu mindern. ¹⁰²
Enterprise Mobility Management (EMM)	Das Enterprise Mobility Management (EMM) dient zur Verwaltung von Mobilgeräten und mobilen Anwendungen im gesamten Unternehmen. Ziel ist es, den Endnutzenden unabhängig von Ort und Gerät produktiver in Geschäftsprozesse einzubinden. ¹⁰³

⁹⁵ Vgl. Siemens.com (2022b).

⁹⁶ Vgl. Gabler Wirtschaftslexikon (2022d).

⁹⁷ Vgl. Gabler Wirtschaftslexikon (2022e).

⁹⁸ Vgl. Gabler Wirtschaftslexikon (2022g).

⁹⁹ Vgl. Gabler Wirtschaftslexikon (2022f).

¹⁰⁰ Vgl. Gabler Wirtschaftslexikon (2022i).

¹⁰¹ Vgl. MB CAD GmbH (2020).

¹⁰² Vgl. Lexikon der Nachhaltigkeit (2015).

¹⁰³ Vgl. Vogel Communications Group (2020).

Enterprise-Resource-Planning (ERP)	Das Enterprise-Resource-Planning-System (ERP-System) ist eine interdisziplinäre Softwarelösung, mit der sämtliche Geschäftsprozesse in einem Unternehmen - von der Beschaffung, Materialbedarfsplanung, Produktion, dem Vertrieb, der Entwicklung, Anlagenwirtschaft, dem Personalwesen bis zum Rechnungswesen und Controlling - effizient gesteuert und geplant werden können. ¹⁰⁴
Finite-Element-Methode (FEM)	Die Finite-Element-Methode (FEM) ist ein computergestütztes Verfahren, das die physikalische Struktur und das Verhalten von Objekten numerisch berechnet. Hierbei wird das Objekt in endlich große und mathematisch bestimmbare Elemente bzw. Formen aufgeteilt. Dadurch können auch komplex aufgebaute Körper beliebig genau approximiert werden. Den Elementen, die über Knotenpunkte miteinander verbunden sind, werden bestimmte Eigenschaften (physikalische Parameter) für die Analyse zugewiesen. Damit lässt sich das Verhalten der Objekte unter verschiedenen Belastungszuständen und Randbedingungen simulieren. Die FEM wird u. a. für Spannungs- und Verformungsuntersuchungen von Festkörpern eingesetzt. ¹⁰⁵
Fuzzy-Systeme	Die Grundidee der Fuzzy-Systeme besteht darin, die klassische zweitwertige Modellierung von Konzepten und Eigenschaften wie 'groß', 'schnell' oder 'alt' im Sinne gradueller Erfüllung zu erweitern. Konkret bedeutet das, dass etwa eine Person nicht mehr als groß oder nicht groß angesehen wird, sondern dass ihr die Eigenschaft groß zu einem gewissen Grad zwischen 0 und 1 zugeschrieben werden kann. Während man früher vage, impräzise oder unsichere Informationen negativ wertete und daher den Versuch unternahm, nach Möglichkeit solche Informationen nicht in eine Modellierung einzubeziehen, wird bei Fuzzy-Systemen bewusst von diesen Informationen Gebrauch gemacht, was im Allgemeinen zu einer einfacheren, leichter handhabbaren und dem menschlichen Denken vertrauenswürdigeren Modellierung führt. ¹⁰⁶
Cyber-physische Systeme (CPS)	CPS bauen auf mechatronischen bzw. smarten Objekten auf und bestehen aus Sensoren, Aktoren, einer Benutzerschnittstelle und Funktionen, die alle Aufgaben der Datenaufnahme, -verarbeitung und -ausgabe ausführen. Sie bilden somit eine Hauptkomponente der Industrie 4.0. Für die Produktentwicklung ergeben sich durch die Möglichkeiten der (Echtzeit-)Datenerfassung in der Herstellungs- oder Nutzungsphase Erkenntnisse über Anpassungspotenziale nachfolgender Produkte, beispielsweise durch die Analyse von Problemstellen oder konkretem Nutzerverhalten. ¹⁰⁷
Kanban	Kanban ist eine agile Arbeitsmethode, die vom Automobilkonzern Toyota entwickelt wurde. Es soll einen gleichmäßigen Rhythmus für den Fertigungsprozess gewährleisten. Kanban soll vor allem dabei helfen, den Überblick über viele teils parallellaufende Aufgaben zu behalten. Dies wird durch seine Spaltenform erreicht, von der es in der Ursprungsform drei gab: To-do (Aufgabe), Work in Progress (Bearbeitung) und Done (erledigt). ¹⁰⁸

¹⁰⁴Vgl. Gabler Wirtschaftslexikon (2022j).

¹⁰⁵Vgl. Vogel Communications Group .

¹⁰⁶Vgl. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH (1995).

¹⁰⁷Vgl. Gabler Wirtschaftslexikon (2022h).

¹⁰⁸Vgl. Dahler, J. (2019).

Künstliches Neuronales Netzwerk	„Künstliche Neuronale Netze sind Algorithmen, die dem menschlichen Gehirn nachempfunden sind. Dieses abstrahierte Modell von verbundenen künstlichen Neuronen ermöglicht es, komplexe Aufgaben aus den Bereichen Statistik, Informatik und Wirtschaft durch Computer zu lösen. Neuronale Netze sind ein sehr aktives Forschungsgebiet und gelten als Grundlage für die künstliche Intelligenz.“ ¹⁰⁹
Lean Development	Lean Development (auch Lean Product Development) ist die Anwendung der Lean-Prinzipien (Zielgruppenmehrwert definieren, Wertstrom identifizieren (Prozessoptimierung), Flussprinzip umsetzen (ConWIP), Pull-Prinzip einführen, Perfektion anstreben (Kaizen bzw. kontinuierlicher Verbesserungsprozess (KVP)) auf die Produktentwicklung als Vorstufe der Lean Production (siehe auch Toyota Produktionssystem). Lean Development betrifft damit den der Produktion direkt vorgelagerten Produktentstehungsprozess (PEP). ¹¹⁰
Machine Learning	Machine Learning stellt ein Teilgebiet der künstlichen Intelligenz (KI) dar. Es ermöglicht IT-Systemen, auf Grundlage vorhandener Datenbanken und Algorithmen Muster und Zusammenhänge zu identifizieren sowie geeignete Lösungen zu entwickeln. Dabei wird automatisch "künstliches Wissen" aus Erfahrungen (Daten) generiert. Die aus den Daten gewonnenen Erkenntnisse lassen sich auf neue, unbekannte Datensätze anwenden, um so Prognosen zu treffen und Prozesse zu optimieren. ¹¹¹
Manufacturing Execution System (MES)	Als Manufacturing Execution System wird ein am technischen Produktionsprozess operierendes IT-System bezeichnet. Es zeichnet sich gegenüber ähnlich wirksamen Systemen zur Produktionsplanung (sogenannte Enterprise-Resource-Planning-Systeme) durch die direkte Anbindung an die verteilten Systeme des Prozessleitsystems aus und ermöglicht die Führung, Lenkung, Steuerung und Kontrolle der Produktion in Echtzeit. Dazu gehören klassische Datenerfassungen und Aufbereitungen wie Betriebsdaten-, Maschinendaten- und Personaldatenerfassung, aber auch alle anderen Prozesse, die eine zeitnahe Auswirkung auf den technischen Produktionsprozess haben. ¹¹²
Maschinendatenerfassung (MDE)	Mit der Maschinendatenerfassung (MDE) werden Produkt- sowie Prozessdaten einer Produktionsmaschine automatisch registriert. Die erfassten Informationen können durch ERP-, Controlling- oder andere Systeme weiterverarbeitet werden. ¹¹³

¹⁰⁹Wuttke, L. (2022).

¹¹⁰REFA AG (2022).

¹¹¹Vgl. Gabler Wirtschaftslexikon (2022k).

¹¹²Vgl. Siemens.com (2022c).

¹¹³Vgl. GFOS mbH (2022).

Metaheuristik	„Metaheuristiken sind allgemeine, d.h. problemunabhängige Verfahrenskonzepte, die sich bei der Suche nach nahezu optimalen Lösungen im Lösungsraum eines gegebenen Problems untergeordneter problemspezifischer Heuristiken bedienen, die sie nach intelligenten Prinzipien steuern.“ Das Attribut "intelligent" ist dabei so zu verstehen, dass das Verfahren während der Suche Informationen über den Lösungsraum gewinnt und das so erworbene Wissen bei der weiteren Suche ausbeutet. Mit dem Einsatz von Metaheuristiken verfolgt man die Absicht, die Schwächen herkömmlicher Heuristiken, z. B. das Festlaufen in lokalen Optima, zu überwinden. Eine Metaheuristik liefert hierfür allerdings zunächst nur ein problemunabhängiges Rahmenverfahren, das zur Anwendung auf eine bestimmte Klasse von Optimierungsproblemen durch Einbettung problemspezifischer Komponenten konkretisiert werden muss. ¹¹⁴
Mix Sigma	Mix Sigma ist eine innovative Methode, die statistische Prozessanalysen mit neuen Technologien der Datenverarbeitung und Rückverfolgung kombiniert. Ziel dabei ist es, sämtliche Daten über die genaue Beschaffenheit einzelner Bauteile zur Verfügung zu stellen und somit eine komplementäre Zuordnung eines passenden Gegenstückes zu gewährleisten. Damit lassen sich Prozessschritte optimieren und Produktionskosten reduzieren. ¹¹⁵
Open Innovation	Mit Open Innovation wird die „Öffnung des Innovationsprozesses“ in der Produktentwicklung durch die Zusammenarbeit zwischen Unternehmen und Zielgruppe bezeichnet. Dabei sieht die Open Innovation vor, die Kundenschaft bei der Ideengenerierung und Entwicklung von Prototypen miteinzubeziehen. ¹¹⁶
Predictive Analytics	Predictive Analytics ist eine vorausschauende Analysemethode, die anhand historischer Daten in Kombination mit statistischen Modellen Prognosen über zukünftige Ereignisse trifft. Diese erlaubt es Unternehmen, Chancen und Risiken in zukünftigen Geschäftsentscheidungen zu erkennen. ¹¹⁷
Rapid Prototyping	Das Rapid Prototyping überführt Objekte aus dem CAX-System mittels additiver Fertigung in physische Objekte. Wichtigste Verfahren sind: Stereolithographie, Laminated Object Manufacturing, 3D-Printing, Fused Filament Fabrication, Selective Laser Sintering. ¹¹⁸
Support Vector Machine	Eine Support Vector Machine (SVM) ist eine mathematische Methode aus dem Umfeld des maschinellen Lernens. Mittels linearer und nichtlinearer Objektklassifizierung erlaubt die SVM eine schnelle Analyse großer Datenmengen. Typische Anwendung ist die Musterkennung in maschinellen Lernvorgängen von Computerprogrammen. ¹¹⁹

¹¹⁴Vgl. Stickele, M. (2006), S. 63.

¹¹⁵Vgl. Deutsche Gesellschaft für Qualität (2018).

¹¹⁶Vgl. Gabler Wirtschaftslexikon (2022l).

¹¹⁷Vgl. Gabler Wirtschaftslexikon (2022m).

¹¹⁸Vgl. TWI Ltd (2022).

¹¹⁹Vgl. scikit-learn developers (2022).

SWOT-Analysen	SWOT, Abkürzung für <i>Analysis of strengths, weakness, opportunities and threats</i> , ist eine Analyse der eigenen Aktivitäten. Zunächst werden die Ergebnisse in Form eines Chancen-Risiken-Katalogs zusammengestellt und anschließend dem Stärken-Schwächen-Profil der internen Analyse gegenübergestellt. ¹²⁰
System Map	Eine System Map (deutsch: Systemlandkarte) stellt alle verschiedenen, an einer Leistungserbringung beteiligten Agierenden und ihre gegenseitigen Verbindungen (z. B. Material-, Energie-, Informations-, Geld-, Dokumentenflüsse usw.) dar. Sie verdeutlicht, wie die verschiedenen Servicekomponenten und Rollen miteinander verbunden sind, und hebt wichtige Werte hervor. ¹²¹
Virtual Reality	Eine Virtual Reality (VR) ermöglicht eine computergenerierte und interaktive virtuelle Umgebung in Echtzeit, die beispielsweise durch eine VR-Brille oder andere digitale Endgeräte erlebbar gemacht wird. ¹²²

¹²⁰Vgl. Gabler Wirtschaftslexikon (2022n).

¹²¹Vgl. Servicedesigntools.org (2007).

¹²²Vgl. Gabler Wirtschaftslexikon (2022o).

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)
Bulowstraße 78
10783 Berlin
Tel. +49 30-2759506-0
zre-info@vdi.de
www.ressource-deutschland.de

