

Friedrich Peschke
Carsten Eckardt

Praxisreihe
Qualität



Flexible Produktion durch Digitalisierung

Entwicklung von Use Cases

HANSER

Peschke / Eckardt

Flexible Produktion durch Digitalisierung



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Herausgeber der Praxisreihe Qualität (vormals Praxisreihe Qualitätswissen):
von 1991 (Gründungsjahr) bis 2016 Franz J. Brunner; seit 2016 Kurt Matyas.

In der Praxisreihe Qualität sind bereits erschienen:

Jörg Brenner

Lean Production

Praktische Umsetzung zur Erhöhung der Wertschöpfung
3., überarbeitete Auflage
ISBN 978-3-446-45664-8

Jörg Brenner

Lean Administration

Verschwendung erkennen, analysieren, beseitigen
ISBN 978-3-446-45472-9

Franz J. Brunner

Japanische Erfolgskonzepte

Kaizen, KVP, Lean Production Management, Total Productive Maintenance, Shopfloor Management, Toyota Production Management, GD3 – Lean Development
4., überarbeitete Auflage
ISBN 978-3-446-45428-6

Franz J. Brunner

Qualität im Service

Wege zur besseren Dienstleistung
ISBN 978-3-446-42241-4

Franz J. Brunner, Karl W. Wagner

Mitarbeit: Peter H. Osanna, Kurt Matyas, Peter Kuhlmann

Qualitätsmanagement

Leitfaden für Studium und Praxis
6., überarbeitete Auflage
ISBN 978-3-446-44712-7

Werner Friedrichs

Das Fitnessprogramm für KMU

Methoden für mehr Effizienz im Automobil-, Anlagen- und Sondermaschinenbau
ISBN 978-3-446-45341-8

Werner Friedrichs

Ressourcenmanagement in KMU

ISBN 978-3-446-45766-9

Menderes Güneş, Marwan Hamdan, Mirko Klug

Gewährleistungsmanagement

ISBN 978-3-446-44795-0

Marco Einhaus, Florian Lugauer, Christina Häußinger

Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik

Der Schnelleinstieg für (angehende) Führungskräfte:
Basiswissen, Haftung, Gefährdungen, Rechtslage
ISBN 978-3-446-45474-3

René Kiem

Qualität 4.0

QM, MES und CAQ in digitalen Geschäftsprozessen der Industrie 4.0
ISBN 978-3-446-44736-3

Wilhelm Kleppmann

Versuchsplanung

Produkte und Prozesse optimieren
9., überarbeitete Auflage
ISBN 978-3-446-44716-5

Veit Kohnhauser, Markus Pollhamer

Entwicklungsqualität

ISBN 978-3-446-42796-9

Karl Koltze, Valeri Souchkov

Systematische Innovation

TRIZ-Anwendung in der Produkt- und Prozessentwicklung
2., überarbeitete Auflage
ISBN 978-3-446-45127-8

Kurt Matyas

Instandhaltungslogistik

Qualität und Produktivität steigern
7., erweiterte Auflage
ISBN 978-3-446-45762-1

Arno Meyna, Bernhard Pauli

Zuverlässigkeitstechnik

Quantitative Bewertungsverfahren
2., überarbeitete und erweiterte Auflage
ISBN 978-3-446-41966-7

Markus Schneider

Lean und Industrie 4.0

Eine Digitalisierungsstrategie mit der Wertstrommethode und Information Flow Design
ISBN: 978-3-446-45917-5

Wilfried Sihn, Alexander Sunk, Tanja Nemeth, Peter Kuhlmann, Kurt Matyas

Produktion und Qualität

Organisation, Management, Prozesse
ISBN 978-3-446-44735-6

Stephan Sommer

Taschenbuch automatisierte Montage- und Prüfsysteme

Qualitätstechniken zur fehlerfreien Produktion
ISBN 978-3-446-41466-2

Konrad Wälder, Olga Wälder

Statistische Methoden der Qualitätssicherung

Praktische Anwendung mit MINITAB und JMP
ISBN 978-3-446-43217-8

Johann Wappis

Null-Fehler-Management

Umsetzung von Six Sigma
ISBN 978-3-446-45875-8

Friedrich Peschke
Carsten Eckardt

Flexible Produktion durch Digitalisierung

Entwicklung von Use Cases

Mit 153 Bildern und 12 Tabellen

Praxisreihe Qualität
Herausgegeben von Kurt Matyas

HANSER

Die Autoren:

Dr. Friedrich Peschke ist als Unternehmensberater für die Automobil- und Maschinenbauindustrie mit den Schwerpunkten globale Produktentwicklung und Industrie 4.0 tätig. Er ist sowohl zertifizierter Industrie 4.0-Professional als auch zertifizierter Assessor für Unternehmensqualität und Qualitätsmanagement. Darüber hinaus ist Dr. Peschke als Projektkoordinator in Forschungsprojekten mit der Pilotfabrik der TU Wien aktiv.

Carsten Eckardt, ist seit zehn Jahren als Berater im Bereich Manufacturing Operations Management aktiv. In seiner aktuellen Tätigkeit widmet er sich dem Thema Digitalisierung in der Produktion und berät darüber hinaus Unternehmen im Bereich Produktstrategie mit Bezug auf Zukunftsszenarien von Industrie 4.0.



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Herausgeber, Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso wenig übernehmen Herausgeber, Autoren und Verlag die Gewähr dafür, dass beschriebene Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2019 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Volker Herzberg

Herstellung: Björn Gallinge

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Titelmotiv: © Sebastian Völkel, unter Verwendung von Grafiken von © stock.adobe.com/industrieblick

Coverrealisation: Max Kostopoulos

Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell

Druck und Bindung: Hubert & Co. GmbH & Co. KG BuchPartner, Göttingen

Printed in Germany

Print-ISBN: 978-3-446-45746-1

E-Book-ISBN: 978-3-446-46058-4

Inhalt

Vorwort	IX
1 Einleitung	1
1.1 Von CIM zur digitalen Fabrik	5
1.2 Das digitale Abbild	12
1.3 Serviceorientierung und operations model	20
1.4 Überblick zu Initiativen und Standards zu Industrie 4.0	21
1.4.1 Die Entstehung der Initiative „Industrie 4.0“	21
1.4.2 Die Plattform Industrie 4.0	22
1.4.3 BITKOM	24
1.4.4 ZVEI	25
1.4.5 VDMA	26
1.4.6 SCI – deutsche Normungsroadmap Industrie 4.0	26
1.4.7 OPC Unified Architecture	28
1.4.8 ADAMOS – ein Standard im Maschinen- und Anlagenbau ..	28
1.4.9 PLCopen	29
1.4.10 PLCnext	30
1.4.11 VDW-Initiative „UMATI“	32
2 Herausforderungen im Zusammenhang mit Digitalisierung	37
2.1 Digitalisierung der Organisation	45
2.1.1 Unternehmensgröße	48
2.1.1.1 Großunternehmen	49
2.1.1.2 Mittelstand	55
2.1.1.3 Klein- und Kleinstunternehmen	57
2.1.2 Herangehensweise	58
2.1.3 Industriesektor/Branche	61
2.1.4 Fazit	62
2.2 Digitalisierung und Geschäftsprozesse	63

2.3	Digitalisierung der Applikationen (IT)	72
2.4	Digitalisierung der Produktions-Infrastruktur	81
2.4.1	Produktionsanlagen	81
2.4.2	Operations Technology (OT)-Architektur	87
2.5	Interoperabilität und Sicherheit	90
2.5.1	Kommunikation im industriellen Umfeld	91
2.5.2	Informations- und Datensicherheit	102
3	Lösungsansätze zur Entwicklung von Digitalisierungs-Use Cases	105
3.1	Lösungsansätze am Produkt	110
3.2	Lösungsansätze am Produktionsprozess	124
3.2.1	Ansätze der Planung	133
3.2.1.1	Kundenbedarfe und Bedarfsplanung	134
3.2.1.2	Kapazitätsplanung und Ressourcenmanagement	135
3.2.1.3	Dynamische Feinplanung	137
3.2.2	Ansätze der Ausführung (Execution)	139
3.2.2.1	Fertigungstypologie	142
3.2.2.2	Dynamische Arbeitspläne	146
3.2.3	Ansätze der Überwachung (Monitoring)	147
3.2.3.1	Transparenz in der Produktion	147
3.2.3.2	Nachverfolgbarkeit	149
3.2.3.3	Data Analytics	152
3.2.4	Ansätze für Prognose und Verbesserung	153
3.2.5	Fallbeispiele	154
3.3	Lösungsansätze in der Produktionsinfrastruktur	156
3.3.1	Die Produktionseinheit	160
3.3.2	Die Fertigungslinie	162
3.3.3	Die hybride Fertigung	164
3.3.4	Die Montage	165
3.3.5	Unterstützende Methoden und Komponenten	172
4	Vorgehensmodell zur Entwicklung und Bewertung von Digitalisierungs-Use Cases	177
4.1	Elemente des Vorgehensmodells	178
4.2	Das SCOR®-Referenzprozessmodell	180
4.2.1	SCOR®-Prozesse	184
4.2.1.1	Subprozesse für die Planung (plan, sP3)	185
4.2.1.2	Subprozesse für die Produktion (make, sM3)	187
4.2.1.3	Subprozesse für Support (enable, sE)	190

4.2.2	SCOR®-Practices	193
4.3	Standard zur Integration von Unternehmens- und Betriebsleitebene, ISA95 (DIN EN 62264)	195
4.4	Technology Enabler	204
4.5	Vorgehensmodell zur Entwicklung und Bewertung von Digitalisierungs- Use Cases	206
4.5.1	Schritt 1 – Scoping (Umfangsdefinition)	209
4.5.2	Schritt 2 – Assessment (Bewertung)	211
4.5.3	Schritt 3 – Identification (Identifikation)	212
4.5.4	Schritt 4 – Selection (Auswahl)	215
4.6	Anwendungsbeispiel „Maschinendatenerfassung (MDE)“	222
4.6.1	Schritt 1 – Scoping MDE	222
4.6.2	Schritt 2 – Assessment MDE	223
4.6.3	Schritt 3 – Identification MDE	224
4.6.4	Schritt 4 – Definition MDE	225
4.6.5	Fazit zum Anwendungsbeispiel	228
4.7	Erfahrungswerte und Use Cases aus der Literatur	230
4.7.1	Use Cases aus einer Studie zu Industrie 4.0 für den österreichischen Mittelstand	231
4.7.2	Use Cases für Werkzeugmaschinen aus UMATI	231
4.7.3	Use Cases aus dem Kooperationsprojekt Enterprise 4.0	232
5	Zusammenfassung und Ausblick	235
5.1	Motivation	235
5.2	Vorliegendes Ergebnis	236
5.3	Handlungsbedarf und Ausblick	238
6	Quellenverzeichnis	241
Index	247

Vorwort

Die Flexibilisierung der Produktion im Sinne von dynamischer Anpassungsfähigkeit eines Produktionssystems an volatile Rahmenbedingungen ist sicher eine der Hauptherausforderungen für die Industrie angesichts der immer kürzer werdenden Produktlebenszyklen und des stark steigenden Individualisierungsgrades von Produkten. Die Vision von Industrie 4.0 und *Cyber-Physischen Produktionssystemen (CPPS)* adressiert insbesondere diesen Themenkomplex. Auch wenn viele grundsätzliche Konzepte und Überlegungen zu flexiblen Produktionssystemen und zur Realisierung der sogenannten „Losgröße 1“ nicht neu sind und im Rahmen von *Computer Integrated Manufacturing (CIM)* bereits vor längerer Zeit entwickelt wurden, führt der rapide technologische Fortschritt der letzten Jahre dazu, dass auch die Umsetzung in greifbare Nähe rückt. Die Omnipräsenz von Internet und Cloud Services, die Verfügbarkeit einer schnellen Dateninfrastruktur und leistungsfähige Kleinstrechner haben das *Internet of Things (IoT)* möglich gemacht. Methoden der künstlichen Intelligenz und des maschinellen Lernens ermöglichen heute die softwaretechnische Umsetzung von Lösungen, die vor 20 Jahren noch nicht realisierbar waren. Ebenso hat sich eine Reihe von Standards auf unterschiedlichen Ebenen entwickelt und verbreitet, die für ein Miteinander unterschiedlicher Systemkomponenten unabdingbar sind. Es reift offenbar die Erkenntnis seitens der Softwarehersteller, dass geschlossene Ökosysteme und proprietäre Schnittstellen in eine Sackgasse führen.

Im Vergleich zu früher sind also die technologischen Voraussetzungen vorhanden. Das Thema Industrie 4.0 ist breit in der Öffentlichkeit angekommen und die Bedeutung der Produktion für die Gesellschaft ist weit verbreitet anerkannt. Was sind also die Hürden bei der Umsetzung von Industrie 4.0? Sie sind vielschichtig. Industrie 4.0 wird stark aus der „Vogelperspektive“ heraus diskutiert. Themenfelder wie operative Exzellenz in der Produktion im Sinne einer graduellen Weiterentwicklung der Automatisierungstechnik hin zu Systemen mit autonomen und selbstoptimierenden Eigenschaften werden vermischt mit der Erschließung neuer und disruptiver Geschäftsmodelle auf Basis von IoT. Software- und Systemhäuser sowie Industrieausrüster bieten hervorragende Lösungen und Software-Pakete mit weit-

reichendem Funktionsumfang, aber die Komplexität und der Integrationsaufwand im speziellen betrieblichen Umfeld sind doch oft erheblich. Vor allem mangelt es bei vielen Industrieunternehmen jedoch an der notwendigen Reife im Hinblick auf Prozess- und Datenqualität. Vieles geschieht auf Zuruf bzw. mit informeller Kommunikation; „U-Boot“-Applikationen und persönliche „Arbeitsformate“ (MS Excel) sind schwierig zu eliminieren und damit wird der zu tätige Sprung für eine erfolgreiche Implementierung oft zu groß. Auch an die persönlichen Qualifikationen werden enorm hohe und interdisziplinäre Anforderungen gestellt, sowohl auf Seiten der Industrieunternehmen als auch auf Seiten der Lösungsanbieter. Der einmalige Wissensaufbau z. B. durch eine akademische Bildung reicht nicht aus, zukünftig ist die kontinuierliche Kompetenzerweiterung ein Muss, um die digitale Transformation in den Unternehmen Realität werden zu lassen. Der Mangel an Personalkapazität, welche mit den erforderlichen Kompetenzen ausgestattet ist, stellt ein wesentliches Umsetzungs- und damit Wachstumshemmnis dar und muss beseitigt werden.

Es sind unterschiedliche IT-Systeme wie PDM, ERP und MES mit unterschiedlichen inhaltlichen Anwendungsschwerpunkten, aber auch funktionalen Überlappungen im Einsatz, um das erforderliche Informationsmanagement über den gesamten Produktlebenszyklus abzudecken. Der Produktlebenszyklus ist jedoch nicht so eindimensional, wie er oft dargestellt wird. In den Unternehmen werden viele Produkte gleichzeitig entwickelt. Gleiche Komponenten werden in unterschiedlichen Produkten oder Produktvarianten verwendet. Was für den *Original Equipment Manufacturer (OEM)* eine Komponente ist, ist für den Zulieferer das Endprodukt. Das gleiche Produkt wird in unterschiedlichen Werken gefertigt mit unterschiedlichen Komponenten, die von lokalen Zulieferern kommen. Dementsprechend gibt es unterschiedliche Klassen von Informationen, die auf verschiedenartige Weise verarbeitet werden müssen. Im Engineering stehen oft modellhafte Beschreibungen von Artefakten im Vordergrund. In der Produktion werden auftragsbezogene Daten sowie Zeitreihendaten aus dem Produktionsprozess, teilweise im Millisekundenbereich, aufgenommen und verarbeitet. Diese werden entweder direkt zur Optimierung des Produktionsprozesses oder als Basisinformation für vor- und nachgelagerte Prozesse (z. B. Qualitätsdaten) herangezogen. In der Betriebsphase eines Produktes interessieren vor allem die Informationen, welche für Wartungs- und Serviceaktivitäten relevant sind. In diese fließt der individuelle Kontext bzw. die Umgebungsbedingungen, unter denen ein Produkt betrieben wird, mit ein. Sie gelten also nicht oder nur bedingt für eine Produktklasse, sondern nur für eine bestimmte Instanz eines Produktes. Oft verschwimmend dargestellt ist die Tatsache, dass ein Produktionssystem letztendlich auch ein komplexes Produkt ist, welches selbst entwickelt und produziert werden muss und in seiner Betriebsphase dazu dient, andere Produkte zu produzieren. Die Informationsverarbeitung im industriellen Umfeld bezogen auf Produktentwicklung, -herstellung und -betrieb

verschmilzt also einerseits, andererseits muss für die Umsetzung bzw. Implementierung von Industrie 4.0-Lösungen schon das komplexe Informationsgeflecht entwirrt werden, um jede Teilfunktion und jeden Teilprozessschritt zufriedenstellend zu realisieren.

Es gibt also keine generelle Industrie 4.0-Lösung für bestimmte Branchen oder Unternehmenstypen. Selbst Best Practices sind schwierig bzw. nur für überschaubare Ausschnitte zu identifizieren. Daraus und aus der oben beschriebenen Komplexität resultieren jeweils eine individuelle IT-Bebauung und eine Vielzahl unternehmensspezifischer Konzepte. Dessen muss man sich bewusst sein und es daher in die gestalterischen Aufgaben eines Unternehmens aktiv einbeziehen.

Das Buch trägt dazu bei, Klarheit in das skizzierte komplexe Themenfeld der digitalen Produktion zu bringen, und hilft daher Verantwortungs- und Entscheidungsträgern in den Bereichen Digitalisierung, IT, Operations, Automatisierung, Produktion und Engineering, Orientierung zu erlangen, um entsprechende Digitalisierungsanwendungsfälle zu identifizieren und die Grundlage für eine zielgerichtete Umsetzung zu schaffen.

Wien, im März 2019

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Gerhard

Dekan der Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften an der Technischen Universität Wien

Leiter des Forschungsbereichs Maschinenbauinformatik und Virtuelle Produktentwicklung und der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0

1

Einleitung

Die industrielle Fertigung ist trotz des zunehmenden Wandels zur Dienstleistungsgesellschaft ein wesentlicher Eckpfeiler der europäischen Wirtschaft. Diese wird neben den politischen, ökonomischen und ökologischen auch von technologischen Treibern beeinflusst. Ökologisch werden Umwelt und Nachhaltigkeit immer bedeutender. Technologie soll diesen Aspekten entsprechen und darüber hinaus Innovation und Wachstum gewährleisten.

Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) wirken dabei sowohl als „Innovatoren“ als auch als „Integratoren“ und ermöglichen damit eine Konvergenz von Technologien aus unterschiedlichen Branchen. Dennoch kann nicht davon ausgegangen werden, dass sich damit für alle Branchen ein vergleichbares Nutzenpotenzial ergibt. Zu stark unterscheiden sich die Anwendungsfelder und die technologische Marktdurchdringung.

Viele der neuen Technologien stellen neue oder, im Vergleich zu vorhandenen, verbesserte Lösungen für die Digitalisierung der Produktion bereit. Dabei handelt es sich um Lösungen zur Informationsaufnahme, -verarbeitung und zu deren Austausch zwischen dem Produkt, dem Fertigungssystem und dessen Anwendern.

Die wesentlichen Technologiefelder, welche im Zusammenhang mit der Digitalisierung anzuführen sind, lauten: echtzeitfähige Kommunikation, Vernetzung, Cloud Computing, Data Analytics, Machine Learning, Informationssicherheit und daraus abgeleitet „smarte“ Produkte, Maschinen und Anlagen. Diese werden mit Hilfe von Software vernetzt, tauschen Informationen aus und stimmen automatisiert ihre Arbeitsschritte miteinander ab. Als *Cyber Physical Systems (CPS)* bezeichnet, ermöglichen diese eine tiefergehende Integration der Maschine in den Informations- und Anwendungsprozess, die Nutzung von Plattformservices und die Option des dynamischen Eingriffs und der Optimierung des Wertschöpfungsprozesses.

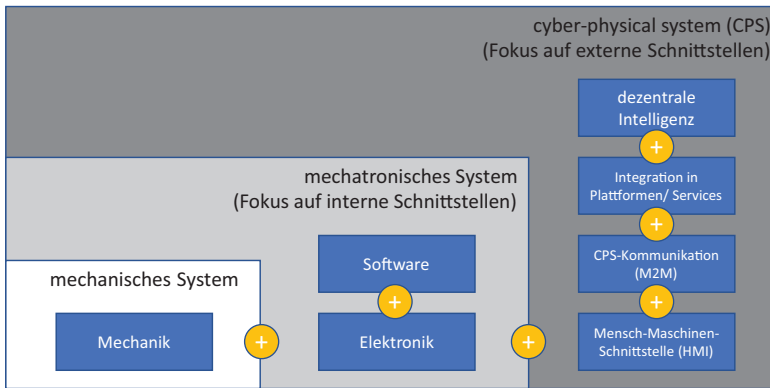


Bild 1.1 Vom embedded zum Cyber Physical System (CPS) [Mueller 2016]

Laut Bild 1.1 lassen sich CPS in Schritten entwickeln und zeichnen sich unter anderem durch folgende Fähigkeiten aus:

- Aufnahme von Echtzeitdaten unter Anwendung von Sensoren
 - Nutzung von Daten- und Internetservices, dezentrale Logik
 - Vernetzung unter Anwendung von digitalen Kommunikationstechnologien, wie z. B. Machine-To-Machine (M2M), Human Machine Interface (HMI)
 - Wirkung bzw. Betrieb in der physischen Welt durch Anwendung von Aktuatoren
- Voraussetzungen dafür sind die *Vernetzung* aller Akteure und die *Kompatibilität* von Kommunikationsformaten, ermöglicht durch standardisierte Schnittstellen. In Abhängigkeit des betrachteten Wertschöpfungsabschnitts wird diese Vernetzung einerseits intern über Geschäftsbereiche und Standorte und andererseits über die gesamte Wertschöpfungskette inklusive Kunden und Lieferanten hergestellt.

Als ein möglicher Ort für die Datenspeicherung, für die Bereitstellung von funktionalen Diensten und Rechenkapazitäten dient in diesem Szenario „das Internet“. Produkte, Funktionen und Daten werden als *Service* definiert und über Plattformen aus der Cloud bereitgestellt. Intelligente Aktuatoren und Sensoren integriert mit der Robotik und Automatisierung ermöglichen die Erfassung der Arbeitsumgebung und die zeitnahe Datenverarbeitung. Unter Einsatz von *Human Machine Interfaces (HMI)* werden Mitarbeiter mittels Assistenzwerkzeugen interaktiv in den Fertigungs- bzw. Montageprozess eingebunden.

Durch die breite Auswahl und den zielgerichteten Einsatz von neuen Lösungen zur Planung, Steuerung und Automatisierung des Fertigungsprozesses können der Aufbau und der Betrieb eines Produktionssystems neu gestaltet und die Vision von *Industrie 4.0* realisiert werden.

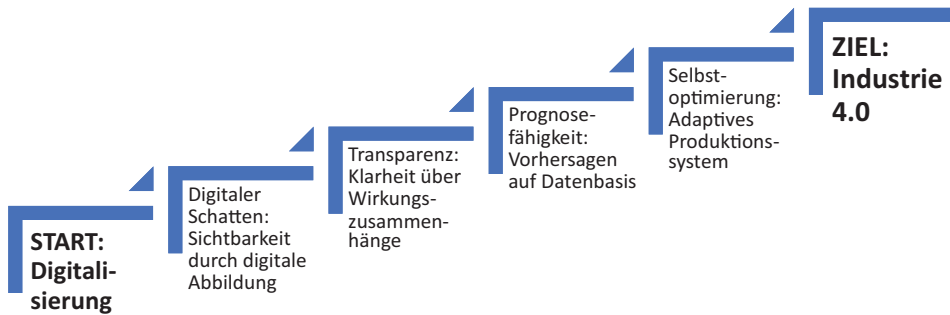


Bild 1.2 Transformationspfad Industrie 4.0 [in Anlehnung an O.Gassmann 2016]

Eine verbesserte Konnektivität durch die Computerisierung bildet dabei die Grundlage für Industrie 4.0. Ausgehend von der Strategiedefinition kann, wie in Bild 1.2 dargestellt, das Ziel durch das Realisieren folgender Teilziele (Etappen) erreicht werden:

1. Digitales Abbild entwickeln:
 - Fokus auf erfolgskritische Informationen
 - Ansätze zur Gestaltung eines digitalen Abbildes; als iterativer Prozess realisiert, ist dabei eine geeignete Detaillierung anzuwenden
2. Wirkungszusammenhänge verstehen:
 - Der digitale Schatten der Anlagen bildet die Basis für Transparenz in der Produktion
 - Big Data Analytics, Fokus auf Informationsqualität, nicht auf -quantität
 - Bedarfsgerechte Visualisierung
 - Erzeugung von Kunden- und Anwendernutzen
3. Vorausschau, Vorhersage etablieren:
 - Ereignisse prognostizieren und Auswirkungen bewerten; Datenmuster erkennen und analysieren; realitätsnahe Simulationsmodelle entwickeln
 - Qualität entscheidet über Akzeptanz und Nutzen
4. Selbstoptimierung etablieren:
 - Prozessuale, organisatorische und technologische Flexibilität herbeiführen; PDCA-Zyklus etablieren

Dieses Stufenmodell ist zur Anwendung an die Ausgangssituation und Zielsetzung des betrachteten Unternehmens anzupassen. Für jedes Teilziel sind die Erwartungshaltungen zu definieren und eine Kosten-Nutzen-Betrachtung anzustellen.

In [Hempfen 2018] werden fünf Aspekte für eine *smarte Fabrik* wie folgt zusammengefasst:

- **Feldsignal-/Sensor-Integration:** Adaption des Produktionsprozesses durch Sensorik, Erfassung von bisher passiven Komponenten, wie z.B. Lagerbehältern, Transportsystemen oder herzustellenden Produkten

- Horizontale Integration: Integration sowohl von Produktionseinheiten/-inseln (M2M), der Intralogistik, als auch der Interlogistik
- Vertikale Integration: lokale Fertigungssysteme stellen Daten über (IoT)-Plattformen für Cloud-Services bereit; dazu werden für interne und externe Kommunikation unterschiedliche Protokolle (OPC UA, MQTT etc.) angeboten
- IT-Security: Controller werden über verschlüsselte Verbindungen (VPN) mit erforderlicher Authentifizierung (openVPN, IPsec etc.) an Maschinen angebunden
- Modularisierung: die Wandlungsfähigkeit des Produktionsprozesses durch Modularisierung von Fertigungs- und Automatisierungseinheiten

Ein weiteres Beispiel eines Transformationspfads zur digitalen Fabrik liefert [Lünendonk® 2016]. Darin werden folgende IKT-basierende Entwicklungsstufen unterschieden.

Tabelle 1.1 Realisierungsstufen der digitalen Fabrik [in Anlehnung an Lünendonk® 2016]

	Digitale Fabrik	Smarte Fabrik	Virtuelles Produktionsnetzwerk
Zweck	Digitales Vorab-Design für Produkte, Fabrik- und Montageplanung	Automation und autonome Steuerung der Produktion	Automation und autonome Steuerung der Supply Chain
Realisierung	Software für digitale Abbildung von Produktion und Produktionsverfahren vor der physischen Herstellung	Integrierte IKT-Service-Architektur und Fabrikinfrastruktur, CPS	Integrierte Logistik-Services, verteiltes/dynamisches Portfolio- und Kapazitätsmanagement
Zu erwartender Produktivitätszugewinn	Design- und Layout-Produktivität	Fertigungsproduktivität (Anlagen, Mitarbeiter)	Supply Chain-, Wertschöpfungs-Produktivität

Ausgehend von der *digitalen Fabrik* mit dem Fokus auf Prozesstransparenz stehen bei der *smarten Fabrik* die echtzeitfähige, intelligente, horizontale und vertikale Integration von Menschen, Maschinen, Produkten auf Basis von IKT zum dynamischen Management von komplexen Produktionssystemen im Mittelpunkt. Dabei kann die Eigenschaft *smart* als (technisch-wirtschaftlich) geeignete Kombination von intelligent und vollständig automatisiert verstanden werden. Fähigkeiten zur Ergebnis-/Ereignisprognose und zur selbständigen Systemanpassung eines Produktionsgegenstandes werden dafür entwickelt.

Ein *virtuelles Produktionsnetzwerk* besteht aus einer Mehrzahl von smarten Fabriken, welche durch intelligente Logistik miteinander vernetzt sind und den Ansatz des dynamischen Auftrags- und Kapazitätsmanagements unter Berücksichtigung der Lieferkette ermöglichen. Der von H. Kagermann bereits 2011 [Kagermann,

Lukas, Wahlster 2011] geprägte Begriff bezeichnet eine Industriezukunft, in welcher nicht Produktionsketten, sondern echtzeitoptimierte Wertschöpfungsnetzwerke das zentrale Konzept darstellen. Industrie 4.0 löse so den Widerspruch zwischen individueller Produktion und Effizienzgewinnen (aus Skalierungseffekten) auf. Die *Smart Factories* verschmelzen die virtuelle Welt mit der physischen Produktion und können so in Echtzeit auf Schwankungen betreffend Angebot, Nachfrage und Lieferketten reagieren.

Damit soll durch die Digitalisierung die Produktion schneller, flexibler, transparenter und kostengünstiger werden. Im Vergleich zur Ausgangssituation soll dadurch eine größere Anzahl an hoch individualisierten Produktvarianten ohne Produktivitätsabfall hergestellt werden können.

Für organisch gewachsene Unternehmen stellt die Notwendigkeit der Einführung neuer Technologien in Hinblick auf Organisation, Prozesse und IKT eine nicht zu unterschätzende Herausforderung dar. Neben der Euphorie gegenüber Innovationen sei auf Beispiele hingewiesen, welche von wenig erfolgreichen Versuchen bei der Einführung von neuen Technologien berichten.

■ 1.1 Von CIM zur digitalen Fabrik

Mit dem Ende des 19. Jahrhunderts entwickelte sich in der europäischen Industrie die arbeitsteilige Massenproduktion als etabliertes Organisationsmodell für industriell gefertigte Serienprodukte. Mit dem Anfang der 70er-Jahre des 20. Jahrhunderts wurden durch den Einsatz von Automaten und Robotern zahlreiche Abläufe in der Produktion automatisiert. Dafür waren Entwicklungen in der Mikroelektronik, welche die speicherprogrammierbare Steuerung von Maschinen und Anlagen ermöglichte, erforderlich.

Der Ansatz des *Computer Integrated Manufacturing (CIM)* bildete das dafür notwendige Integrationskonzept der betriebswirtschaftlichen und technischen Prozessketten, Bild 1.3.

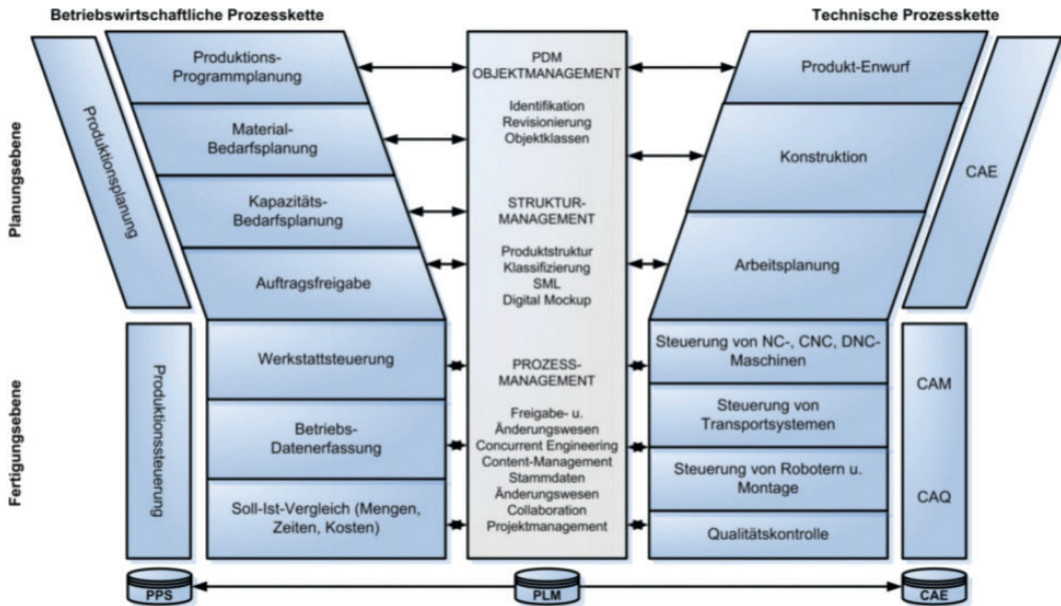


Bild 1.3 CIM-Modell nach W. Scheer

Dabei wurden die beiden Prozessketten ausgehend von der Planungsebene hin bis zur Fertigungsebene mit Hilfe des neu geschaffenen Integrationsansatzes *Product Lifecycle Management (PLM)* zusammengeführt. Mit der Einführung und Automatisierung von IT-Systemen wurde das Ziel der digitalisierten Produkterstellung nach folgender Definition des *Ausschusses für wirtschaftliche Fertigung (AWF)* aus dem Jahre 1984 angestrebt:



„CIM umfasst das informationstechnische Zusammenwirken der computerunterstützten Applikationen CAD (Design), CAP (Planning), CAM (Manufacturing), CAQ (Quality) und Produktionsplanung/-steuerung (PPS). Hierbei soll die Integration der technischen und organisatorischen Funktionen zur Produkterstellung erreicht werden. Dies bedingt die gemeinsame Nutzung aller Daten eines EDV-Systems, auch Datenbasis genannt.“

Aus der langjährigen Umsetzungsphase des CIM-Ansatzes konnten folgende Erkenntnisse abgeleitet werden, welche in Bezug auf den Ansatz von Industrie 4.0 relevant sind, [Kittl 2018]:

- *Fehlende Schnittstellenstandards* führten zu einem erheblichen Integrationsaufwand. Dies betraf nicht nur die CAD/CAM-Schnittstelle, sondern auch die Schnittstelle zwischen ERP und dem Fertigungsmanagement bzw. den Maschinen.

- Da zu dieser Zeit noch keine Manufacturing Execution Systems (MES) existierten, waren als Ergänzung der PPS/ERP-Applikationen bereits Systeme für das Fertigungsmanagement, sog. Fertigungsleitsysteme, verfügbar. Diese unterstützten bei der Feinplanung, beim Management der Fertigungshilfsmittel oder bei der Maschinen- und Auftragsdatenerfassung. Die *Integration dieser Systeme* mit ERP/PPS auf der einen Seite und den Fertigungsanlagen auf der anderen Seite stellte die Unternehmen vor große Herausforderungen.
- Viele Unternehmen setzten auf die Einführung von PPS-Systemen und vertrauten darauf, dass sich damit alle Integrationsprobleme in der Fertigung auflösen würden. Die am Markt verfügbaren Systeme waren nur begrenzt leistungsfähig, schwer an unternehmensspezifische Gegebenheiten anzupassen und *geeignete Schnittstellen* zu CAX-Systemen waren nicht verfügbar. Die im Rahmen des Fertigungsmanagements durchzuführenden manuellen Aufgaben wurden EDV-technisch kaum unterstützt und weiterhin mittels Belegen abgewickelt.
- Andere Unternehmen setzten CIM mit Automatisierung gleich. Man folgte der Vision der *menschenleeren „factory of the future“*, anstatt die Flexibilität und Dispositionsfähigkeit des Menschen zu nutzen. Man versuchte diesen durch die Computersteuerung von Fertigungs(leit)systemen zu ersetzen.
- Weiterhin wurden Möglichkeiten zur *Anpassung der Organisation* durch technologische Entwicklungen nicht genutzt.

Ein weiteres Hindernis bei der erfolgreichen Umsetzung der CIM-Idee war vermutlich die Reduzierung auf die Formel

$$\text{CIM} = \text{PPS} + \text{CAX}$$

Dieses *Denken in IT-Applikationsumfängen* stand der Integration aus mehreren Gründen entgegen. Die einzelnen CAX-Komponenten spiegelten bestehende Organisationseinheiten wider und stellten in sich geschlossene Anwendungen mit eigener Datenhaltung dar. Dies erschwerte die Datenverwaltung und -verteilung sowie die Sicherstellung der Datenkonsistenz und Integrität einer daraus aufgebauten Systemarchitektur.

- Die *Zusammenführung der Informationsströme* aus der PPS- und der CAD/CAM-Schiene wurde zwar im CIM-Modell dargestellt, mehrfach kopiert, aber nicht vollständig realisiert. Heutige MES-Systeme waren nicht verfügbar, die Fertigungsplanung PPS erfolgte meist auf Basis unvollständiger und nicht aktueller Rückmeldungen. Vorgelagerte Aktivitäten, wie z. B. die Anpassungskonstruktion oder die Arbeitsplan- und NC-Programmerstellung, wurden dabei nicht erfasst.
- CIM wurde von vielen Unternehmen auch *als Fertigungsstrategie angesehen*, war jedoch nicht in der Lage, die angeführten Zielsetzungen wie die Reduzierung der Lagerbestände, die Erhöhung der Maschinennutzung oder die Verkürzung der Durchlaufzeiten zu realisieren.

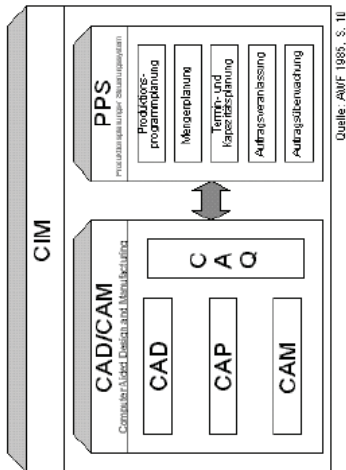
- Die wichtigste Voraussetzung für eine erfolgreiche CIM-Einführung wurde oft vernachlässigt, und zwar die Definition der mit der Einführung zu erreichenden Ziele. Diese sollten, abgeleitet von den langfristigen Unternehmensvisionen und -zielen unter *Berücksichtigung von kritischen Erfolgsfaktoren* und der daraus resultierenden Unternehmensstrategie, festgelegt werden.

Betrachtet man die Zielsetzung und Inhalte der beiden Ansätze CIM und Industrie 4.0, weisen diese bei Gegenüberstellung wesentliche Unterschiede auf.

Nach [Gerhard 2018] stellt das Konzept von Industrie 4.0 keine *Renaissance* von CIM dar, vielmehr ist es ein Modell der interaktiven Kollaboration von Akteuren in einem integrierten Wertschöpfungsnetzwerk. Dabei werden Informationen, Funktionen, Werkzeuge und Methoden bedarfsorientiert in einem Netzwerk (Internet) in Form von Services bereitgestellt und vom Nutzer akquiriert. Jeder befugte und befähigte Akteur kann zu jedem Zeitpunkt einen aktuellen Informationsstand herstellen und ausgehend vom Serviceangebot seine Bedarfe bedienen.

Das auf die applikationsorientierte Integration von Prozessketten ausgerichtete CIM-Konzept kann als Ausgangspunkt für Industrie 4.0-Konzepte verstanden werden, welche unterschiedliche Domänen mit dem Ziel intelligenter, verteilter, interagierender Systeme adressieren. Durch die Verfügbarkeit neuer Technologien und Integrationsstandards wird ein *serviceorientiertes Architekturmodell (SOA)* der Fabrik ermöglicht und die hierarchische Struktur der traditionellen „Automatisierungspyramide“ aufgelöst.

Technik



Technologie – Mensch – Organisation

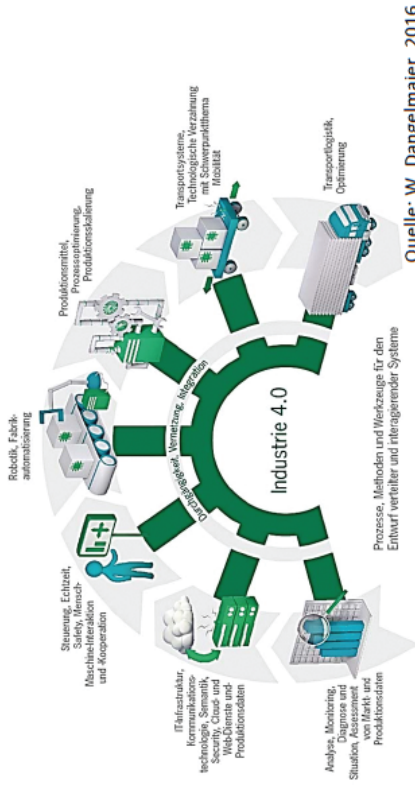


Bild 1.4 Gegenüberstellung CIM vs. Industrie 4.0 [Gerhard 2018]

In [Brandt 2017] wird eine detaillierte Gegenüberstellung der beiden Ansätze geliefert. In *Tabelle 1.2* sind diese nach den Kategorien EDV/IT, Konzept/Leitbild und Rolle des Staates bzw. Datenschutz zusammengestellt:

Tabelle 1.2 Unterschiede zwischen CIM und Industrie 4.0

Unterschiede/Divergenzen	
CIM	Industrie 4.0
EDV	IT
Großrechner dominieren die Szene	Dezentrale Computernetze, Internet, Cloud, jeder und jede hat PC und Smartphone
Domäne weniger Spezialisten	Alle gehen damit um
KI nimmt niemand ernst	Manche sagen, dass die Computer bald intelligenter sein werden als die Menschen
Konzept, Leitbild	Konzept, Leitbild (zumindest in den Papieren der Vordenker)
Zentralistisch-deterministisch	Dezentral, situationsangepasst
Menschenleere Fabrik	Soziotechnische Systeme, Mensch im Mittelpunkt
Rolle des Staates	Rolle des Staates
Legalitätsprinzip gilt als akzeptiert	Können Weltkonzerne aufgrund nationaler Gesetze zu irgendetwas gezwungen werden?
Datenschutz	Datenschutz
Volkszählung 1984 wird boykottiert	Wir alle liefern freiwillig Daten an Google & Co.
Massive Konflikte in Betrieben um den „gläsernen Menschen“	BDSG wird oft als nicht mehr zeitgemäß bezeichnet (Zweckbindung, Datensparsamkeit)
	Ist Big Data stärker?

Neben technischen Innovationen sind es vor allem aktuelle Trends, wie jene der Globalisierung, der Dezentralisierung und der Verfügbarkeit von bzw. neue Möglichkeiten zur Verwertung von Daten, welche einen Unterschied zwischen den Ansätzen aufzeigen.

Darüber hinaus lassen sich zwischen den Ansätzen folgende Ähnlichkeiten feststellen:

- Die digitale Fabrik wird vom Computer (IT) gedacht bzw. definiert
- Der Mensch gilt als Sicherheitsrisiko bzw. Störfaktor für optimale/fehlerfreie Prozesse; seine Fähigkeiten zur Innovation, Problemlösung, Kreativität, Verantwortung und Erfahrung verlieren an Bedeutung
- Übertriebene Hoffnungen bzw. Ängste und unzureichende Standards erschweren eine konsequente Potenzialbewertung und Umsetzung

- Die erzielbare virtuelle Abbildung durch IT (IT-Realität) erfasst die Realität nur (noch) unzureichend

Auf Basis der dargestellten Vergleiche lassen sich aus einer Auswahl von Gründen für das Scheitern von CIM mögliche Risiken für Industrie 4.0 ableiten:

Tabelle 1.3 Gründe des Scheiterns von CIM, Risiken für Industrie 4.0

Gründe des Scheiterns/Risiken	
CIM	Industrie 4.0
Vergleichsweise primitive Modelle der Realität führen zu absurden Entscheidungen	Gilt auf einem deutlich höheren Niveau immer noch
Boykott durch Arbeitnehmer	Hacker, Datenklau
	IPv6 (oder 7 oder 8) scheitert an Überkomplexität
Überheben bei Investitionen	Überheben bei Investitionen
Machtverschiebung im Wertschöpfungsnetz	Machtverschiebung im Wertschöpfungsnetz
	Machtverschiebung zu Ungunsten von Arbeitenden (z. B. Crowdfunding)
	Verlust von Leistungsfähigkeit durch Auflösung von Betrieben

Die abgeleiteten Risiken lassen sich aus unterschiedlichen Sichten diskutieren und auf Basis heute verfügbarer Technologien bewerten.

- Aus der Sicht der *Technik/Technologie* steht heute eine große Auswahl an Systemen zur Verfügung, welche noch nicht umfassend für den industriellen Einsatz erprobt sind. Eine fundierte Kosten-Nutzen-Betrachtung fehlt. Roboter werden heute mit dem Ziel programmiert, sich ähnlich wie Menschen zu verhalten – CIM: menschenlose Fertigung. Im Gegenzug dazu verändern sich die Qualifikationsanforderungen an Mitarbeiter rasant, wozu heutige Ausbildungsprogramme noch keine geeigneten Antworten liefern.
- Die *strategische Orientierung* bei betrieblichen Digitalisierungsvorhaben folgt unterschiedlichen Postulaten. Unternehmen sehen sich gezwungen, auf den „Technologiezug“ aufzuspringen, ohne das theoretisch realisierbare Nutzenpotenzial abschätzen zu können. Man sucht nach neuen, *disruptiven* Geschäftsmodellen.
- *Übertragbarkeit von Methoden, Ansätzen und Technologien*: Im Zuge der Digitalisierung werden viele Methoden und Standards aus dem Bereich IT/Software in weitere Fachbereiche übernommen. Das daraus ableitbare Nutzenpotenzial wird durch neu zu entwickelnde Kernkompetenzen, ein angepasstes Produktportfolio und Geschäftsmodell bestimmt.

Zusammenfassend kann man folgende Empfehlungen für Digitalisierungsvorhaben ableiten, [Brandt 2017]:



- Grundlage einer Planung für die „digitale Transformation“ eines jeden Unternehmens sollte die eigene betriebliche strategische Orientierung sein.
- Industrie 4.0 heißt Gestaltung soziotechnischer Systeme: IT und lebendige Arbeit zwischen Mensch und Maschine werden synchron und im Zusammenhang weiterentwickelt. Dazu bedarf es eines angemessenen, wirksamen und zügigen Beteiligungsverfahrens.
- Zur Strukturierung und Organisation des Veränderungsprozesses sind in Bezug auf die Unternehmenskultur geeignete Methoden zu entwickeln. Die Bedarfe, Möglichkeiten und Fähigkeiten eines Unternehmens bestimmen die Inhalte und das Tempo der Veränderung.
- Unternehmen, welche sich mit der Aufgabenstellung strukturiert beschäftigen, haben gute Aussichten auf die Entwicklung einer Entscheidungskompetenz als Voraussetzung einer nutzenstiftenden Umsetzung.

Für das Konzept der digitalen Produktion gilt es digitale Modelle der neuen Systeme zu entwickeln, anhand derer Fragestellungen über Machbarkeit, Nutzenpotenzial und Realisierungsaufwand beantwortet werden müssen.

■ 1.2 Das digitale Abbild

Ein Betrachtungsmodell und zugleich einen Anwendungsfall der digitalen Fabrik stellt das digitale Abbild, der digitale Zwilling (*Digital Twin*) dar. Dabei werden alle Elemente einer Produktion virtuell abgebildet und mit relevanten Stammdaten versorgt, um betriebsrelevante Anwendungsfälle zu unterstützen. Darüber hinaus können damit Anwendungsfälle für Test, Schulung und Optimierung bereitgestellt werden.

Betreffend der Abbildungscharakteristik unterscheidet man dabei zwischen dem statischen Abbild (Schatten/Shadow) und dem dynamischen Abbild (Zwilling/Twin), was zu unterschiedlichen Anwendungsfällen (Use Cases) und Komplexitäten führt.

- Der *Digital Shadow* stellt ausgehend von einem freigegebenen Entwicklungsstand die digitale Abbildung eines Produkts oder einer Anlage dar. Dazu werden alle erforderlichen Informationen aus der Produktdefinition bis zum fertigen Gegenstand digital abgespeichert. Änderungen an der realen Anlage müssen manuell in den ursprünglichen Informationsstand eingepflegt werden.
- Beim *Digital Twin* wird die dynamische Synchronizität zum realen Prozess bzw. Produkt angestrebt. Man schafft damit die Grundlage, um alle in Betrieb befindlichen Produkte/Systeme zu erfassen, deren Verhalten unter realen Bedingungen zu überwachen bzw. vorherzusagen und erforderliche Anpassungen zur Erfül-

lung bestimmter Zielsetzungen, wie Qualität, Instandhaltung, Service etc., vor dem Eintritt eines unerwünschten Zustandes vorzunehmen. Die dafür erforderliche daten- und prozesstechnische Integration von Produkten mit IT-Systemen erfolgt durch den Einsatz von Sensoren und Konnektoren.

Anbieter von Automatisierungs- oder Produktionssystemen bieten dazu unterschiedliche Modelle an:

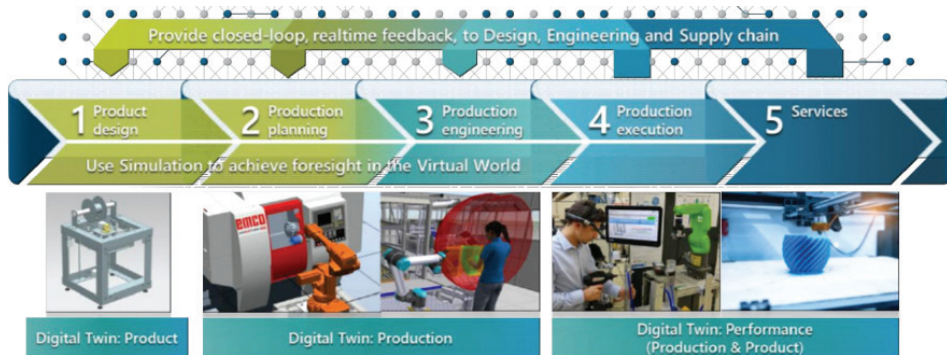


Bild 1.5 Sichten des Digital Twin [Siemens Industry Software 2018]

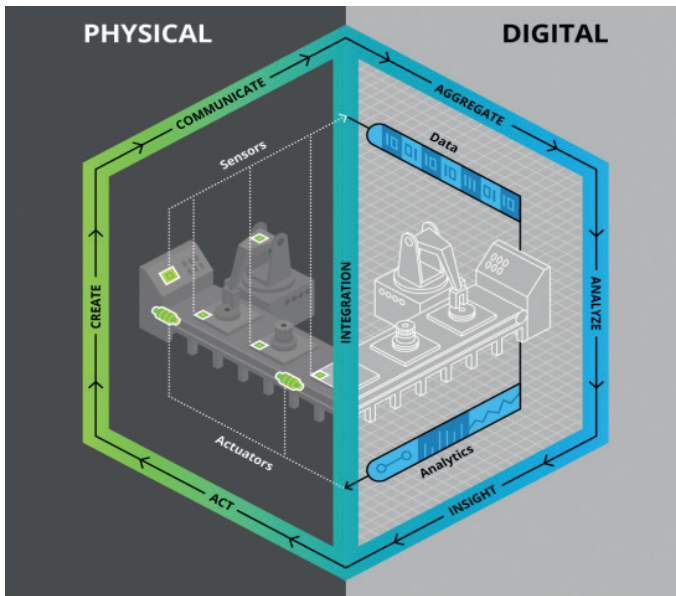
Der Industriedienstleister Siemens unterscheidet dazu heute drei Sichten, welche untereinander verschränkt werden können:

- *Product Twin*: Dies ist ein Abbild des Produkts in der Entwicklungsphase mit allen zur Entwicklung notwendigen Informationen wie 3D-Modellen, Stammdaten, Zeichnungen, Prüfmerkmalen und Simulationsdaten.
- *Production Twin*: Dies ist die Anreicherung des Produktzwillings um Daten, welche die Interaktion mit seiner Umgebung darstellen, wie z. B. Geometrien weiterer Maschinen und Vorrichtungen, Werkzeuge, Programme etc. Damit wird das digitale Abbild des Herstellungsprozesses erstellt.
- *Performance Twin*: Dieser Zwilling hält Daten zur Erfassung der „Performance“ von Produkt und/oder Anlage während des Betriebs (Herstellung oder Einsatz) fest, wie z. B. Durchlaufzeit, Qualität, Störungen etc.

Mit Hilfe dieser virtuellen Sichten werden digitale Soll-Ist-Vergleiche zu technischen, wirtschaftlichen und operativen Entscheidungen ermöglicht und die Grundlage für dynamische Eingriffe/Korrekturen und Optimierungen am realen Prozess geschaffen.

Um die Potenziale durch die Anwendung des Konzepts des digitalen Abbilds nutzen zu können, muss der Schritt von der statischen Datenerfassung hin zu einer dynamischen, echtzeitfähigen Erfassung von relevanten Produkt-, Prozess- und Umgebungsinformationen getan werden. Erst damit können ungeplante Ereignisse zuverlässig erfasst, analysiert und klassifiziert, behoben bzw. vorhergesagt werden.

Bild 1.6 stellt die wichtigsten Grundbausteine zur Verbindung der digitalen und realen Welt dar.



Source: Deloitte University Press.

Deloitte University Press | dupress.deloitte.com

Bild 1.6 Grundelemente Digital Twin [Deloitte 2018]

Die Abbildung zeigt das Zusammenspiel der physischen Maschine mit ihren Sensoren und Aktuatoren, die über einen Kommunikationskanal dem digitalen Abbild kontinuierlich Daten liefert. Der digitale Zwilling aggregiert und analysiert die Daten, der Betreiber bekommt dadurch einen detaillierten Einblick in die Abläufe und Systemzustände und kann darauf basierend die physikalische Maschine entsprechend steuern/nachjustieren (kurzfristige Aktion) bzw. diese Daten dem Entwicklungsteam zur Verfügung stellen, um auf deren Basis Produktverbesserungen abzuleiten.

Abschließend wird das Beispiel des digitalen Produktionsmodells von [Mueller 2016] angeführt.

Bild 1.7 stellt den Lifecycle zur Entwicklung eines „echzeitnahen“ Produktionsmodells dar. Dieses adressiert die Anwendungsfälle (Use Cases) Fabrikplanung, Betrieb und Wartung mit der Zielsetzung des Supports von Mensch und Maschine.

Dazu werden für die Produktionsobjekte ausgewählte Kontextinformationen definiert und im digitalen Modell abgebildet. Anhand des Modells soll die Simulation von Anwendungsfällen mit dem Ziel „Losgröße 1“ ermöglicht werden.