

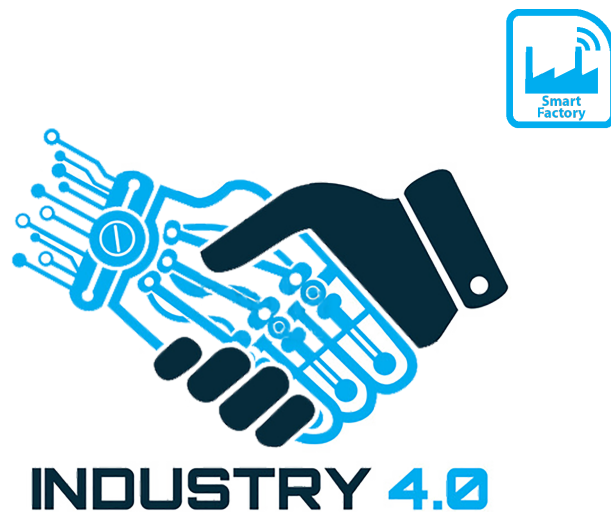
- Skript -

Industrie 4.0 - Smart Factory TWIE24

Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen

Prof. Dr.-Ing. Stephan Sauter

Q4 2026



Inhaltsverzeichnis

Vorwort	2
1 Smart Factory - Motivation und Begriffsabgrenzung	3
1.1 Ziele von Smart Factory	4
1.2 Internet of Things	5
1.3 Cyber-physische Systeme	7
1.4 Cyber-physische Produktionssysteme	9
1.5 Smart Factory als Cyber-physisches (Produktions-)System	10
1.6 Zusammenfassung	12
2 Entwicklung der Automatisierung	13
2.1 Historische Entwicklung	14
2.2 Automatisierungspyramide	16
2.3 Vernetzte, dezentrale Organisation der Produktion	17
2.4 Fünf zentrale Paradigmen der Industrie 4.0	19
2.5 Zukünftige Herausforderungen	20
2.6 Zusammenfassung	21
3 Technologische Grundlagen und Standards	22
3.1 Identifizierung physikalischer Objekte	22
3.2 Formale Beschreibungssprachen und Ontologien	23
3.3 Digitales Objektgedächtnis	25
3.4 Physikalische Situationserkennung	26
3.5 (Teil-)autonomes Handeln und Kooperieren	27
3.6 Mensch-Maschine-Interaktion	28
3.7 Maschine-Maschine-Kommunikation	30
3.8 Zusammenfassung	31
4 Grundkonzepte einer Smart Factory	32
4.1 Auftragsgesteuerte Produktion	32
4.2 Bündelung von Maschinen- und Produktionsdaten	33
4.3 Unterstützung des Menschen in der Produktion	34
4.4 Intelligente Produkte und Betriebsmittel	36
4.5 Smart Services	37
4.6 Zusammenfassung	38
5 Referenzarchitekturen	39
5.1 Zweck und Eigenschaften von Referenzarchitekturen	40
5.2 Überblick über Normungsinitiativen	41
5.3 RAMI 4.0 (DIN SPEC 91345)	42
5.4 Zusammenfassung	44

6	Smart Factory Engineering	45
6.1	Klassifikation verschiedener Engineering-Werkzeuge	46
6.2	Virtual Engineering	47
6.3	User-Centered Design	48
6.4	Requirements Engineering	49
6.5	Modellierung	50
6.6	Integration klassischer und smarterer Komponenten	51
6.7	Zusammenfassung	53
7	Digitaler Zwilling	54
7.1	Geschichte	55
7.2	Funktion	56
7.3	Aufbau und Optimierung	57
7.4	Schlüsselmerkmale	59
7.5	Herausforderungen und Risiken	59
7.6	Chancen	60
7.7	Beispiele in der Anwendung	61
7.8	Zukunft des digitalen Zwillings	63
7.9	Zusammenfassung	64
8	Sicherheitsrisiken in der Smart Factory	65
8.1	IT-Sicherheit	66
8.2	Datenschutz	67
8.3	Organisatorische Risiken	67
8.4	Wirtschaftliche Risiken	68
8.5	Industrielle IT-Sicherheit nach IEC 62443 und ISO 27001	69
8.6	Handlungsvorschläge des BMWi	71
8.7	VDMA-Handlungsleitfaden nach IEC 62443	71
8.8	Zusammenfassung	72
9	Nachhaltigkeit in der Produktion	74
9.1	Nachhaltigkeit	74
9.2	Nachhaltigkeit auf Unternehmensebene	75
9.3	Arten von Nachhaltigkeit	76
9.4	Chancen und Vorteile nachhaltiger Produktpolitik	77
9.5	Ziele einer nachhaltigen Produktion	78
9.6	Konzepte und Methoden	78
9.6.1	Nachhaltiges Supply Chain Management	78
9.6.2	Kreislaufwirtschaft	80
9.6.3	Stoffstrommanagement und -analysen	81
9.6.4	Product Carbon Footprint	83
9.7	Siemens als Vorreiter einer nachhaltigen Produktion	84
9.8	Zusammenfassung	87
10	Smart Logistics	88
10.1	Zukünftige Herausforderungen und Trends	89
10.2	Predictive Analytics in der Logistik	89
10.3	Prescriptive Analytics in der Logistik	90
10.4	Extralogistik	92
10.5	Intralogistik	96
10.6	Zusammenfassung	102
11	IO-Link	103
11.1	Automatisierungssysteme und deren Anforderungen	104

11.2	Konsortium und Marke	105
11.3	Wer stellt IO-Link Devices und Master her?	106
11.4	Wie funktioniert IO-Link?	106
11.5	IODD	108
11.6	Vorteile von IO-Link	109
11.7	Zusammenfassung	111
12	Predictive Maintenance	112
12.1	Instandhaltungsstrategien im Überblick	113
12.2	Definition und Zielsetzung von Predictive Maintenance und Smart Factory	114
12.3	Technische Grundlagen	115
12.4	Predictive Maintenance in der Smart Factory	116
12.5	Prognosekonzepte und Remaining Useful Life	118
12.6	Zusammenfassung	120
13	Machine Learning in der Industrie	121
13.1	Was ist Machine Learning?	122
13.2	Der Lernprozess	122
13.3	Lernarten	123
13.4	Modelle im Machine Learning	125
13.5	Daten als Grundlage	126
13.6	Multimodale Daten und Information Fusion	127
13.7	Anwendungen in der Industrie	128
13.8	Grenzen und Herausforderungen	129
13.9	Zusammenfassung	130
14	Halbleiter-Industrie	131
14.1	Relevanz von Halbleitern in der Industrie 4.0	132
14.2	Grundlagen der Halbleitertechnik	133
14.3	Lithografie als Schlüsselprozess der Halbleiterfertigung	135
14.4	Strukturierung und Dotierung von Halbleitern	136
14.5	Halbleitertechnologie in der Smart Factory	137
14.6	Lieferketten, Produktion und Logistik von Halbleitern	139
14.7	Herausforderungen und Trends	140
14.8	Zusammenfassung	141
15	Robotik in der Smart Factory	142
15.1	Entwicklung und Begriffsbestimmung	142
15.2	Grundlagen Robotik	143
15.3	Einsatzgebiete von Robotern in der Industrie	144
15.4	Roboterarten in der Industrie	144
15.5	Humanoide Roboter	146
15.6	Internet of Robotic Things	148
15.7	Losgröße 1 in der Industrie 4.0	151
15.8	Zusammenfassung	151
	Literaturverzeichnis	154

Vorwort

Das vorliegende Skript soll vorlesungsbegleitend dem Hörer helfen, die Vorlesung neben der Onlineveranstaltung auch im Selbststudium zu absolvieren. Die Klausur wird ausschließlich Fragen zu ausgewählten Kapiteln des Skripts enthalten. Die angegebene Literatur soll zum tieferen Verständnis dienen. Online Wissensabfragen bieten parallel die Möglichkeit der Kenntnisüberprüfung.

Vorlesungsinhalt:

Nach der Teilnahme an dieser Vorlesung sollen die Studierenden den Begriff Smart Factory kennen und in den Kontext Industrie 4.0 einsortieren können. Sie sollen befähigt sein, die Entwicklung der Automatisierung bis zur vollautonomen, dezentral organisierten Produktionsanlage nachzuvollziehen.

Es werden die grundlegenden Technologien und Standards vorgestellt, die für den Entwurf und Betrieb einer Smart Factory eingesetzt werden. Die Studierenden lernen die wesentlichen Konzepte einer Smart Factory kennen und können die einzelnen Elemente anhand verschiedener Referenzarchitekturen identifizieren und voneinander abgrenzen.

Die besonderen Engineering-Herausforderungen werden beleuchtet, spezielle sicherheitstechnische Risiken digitalisierter und vernetzter Produktionsanlagen werden vorgestellt und jeweils konkrete Handlungsempfehlungen zugeordnet.

Basis Literatur:

- Westkämper, E., Spath, D. et al (2013): Digitale Produktion. Springer, Stuttgart [1]
- Bauernhansl (2014): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Springer [2]
- Handbuch Industrie 4.0 Bd. 1-4 (2023), Springer Nature [3]



Links:

- <https://www.plattform-i40.de>
- www.freiwilligschlauwerden.de

KAPITEL 1

Smart Factory - Motivation und Begriffsabgrenzung

Lernziele

Nach der Bearbeitung dieses Kapitels werden Sie wissen, ...

- ... was mit Smart Factory gemeint ist.
- ... was es mit Industrie 4.0 auf sich hat.
- ... was die »digitale Transformation« bedeutet.
- ... welche Chancen und Herausforderungen die Smart Factory bietet.
- ... wie das Ziel Smart Factory erreicht werden kann.

Einführung

Der Begriff smarte Produktion bzw. »Smart Factory« ist nicht eindeutig definiert. Als Teil der (ebenso wenig eindeutig definierten) Forschungsinitiative **Industrie 4.0**¹ und der umfassenden Umstellung der Produktion auf digitale Technologien, nimmt die Smart Factory eine zentrale Stellung für die zukünftige Entwicklung der industriellen Produktion ein.

Um im immer komplexeren Marktumfeld zu bestehen, müssen sich Unternehmen ihre Wettbewerbsfähigkeit bewahren und zu Maßnahmen greifen, die die Produktion und die Unternehmensorganisation nachhaltig verändern wird.

Beispiele für große einst marktbeherrschende Unternehmen, die die technologischen Umbrüche verpasst haben, sind Kodak (Fotobranche, Digitalisierung), Yahoo (Suchmaschinen-Technologie) oder Nokia (Mobiltelefone).

Es bieten sich durch die neuen Möglichkeiten für mittlere, kleine oder sogar Kleinunternehmen (KMU) Chancen zu ganz neuen Geschäftsfeldern, in denen sie sogar eine marktbeherrschende Position erreichen können (z. B. die App Viv für Spracherkennung, heute Bixby Voice)



¹ Mit **Industrie 4.0** wird ein Zukunftsprojekt zur umfassenden Digitalisierung der industriellen Produktion bezeichnet, um sie für die Zukunft besser zu rüsten.

1.1 Ziele von Smart Factory

Die Smart Factory (deutsch »intelligente Fabrik«) steht im Zentrum der von der deutschen Bundesregierung im Jahr 2012 auf den Weg gebrachten Zukunftsinitiative **Industrie 4.0**. Das Ziel ist die Bereitstellung einer Produktionsumgebung, die sich durch die massive Nutzung des Internets und der Digitalisierung von technischen Prozessen und Geschäftsprozessen im Idealfall selbst organisiert.

Die Smart Factory besteht aus Fertigungsanlagen und Logistiksystemen, deren Kernkomponenten **Cyber-Physische Systeme (CPS)** sind, die auf intelligente Weise untereinander vernetzt sind. Der Mensch muss im Idealfall in den eigentlichen Produktionsprozess nicht mehr eingreifen.

Die Smart Factory bietet im Vergleich zu früheren Produktionsmethoden vielfältige Vorteile und Möglichkeiten:

Drei Hauptziele und Chancen der Smart Factory sind unter anderem:

1. Individualisierung:

- Berücksichtigung von kurzfristigen Kundenwünschen bei Planung, Design und Produktion;
- Produktion von Individualprodukten (Losgröße 1) zu Preisen von Massenprodukten.

2. Flexibilisierung:

- höhere Flexibilität in der Produktion (z. B. durch digitales Engineering, 3D-Druck für Prototypen)
- schnelle Umsetzung von Innovationen
- kürzere Markteinführungszeiten für neue Produkte
- verbrauchsgesteuerte Versorgung der Produktion
- schnelle Anpassung an neue oder veränderte Produkthanforderungen

3. Produktivitätssteigerung:

- geringere Produktionskosten (z. B. durch Optimierung der Ressourcen- und Energieeffizienz)
- predictive Maintenance (Vorrausschauende Wartung & Service)
- kürzere Produktionszeiten
- automatisierte, effiziente und transparente Bestellprozesse [4]

Um diese Ziele zu erreichen, müssen allerdings vielfältige Herausforderungen gemeistert werden. Durch das Ansteigen der Anforderungen des Marktumfeldes, der wachsenden Leistungsfähigkeit der Produktionssysteme und deren Vielfalt müssen die Lieferfähigkeit und Verfügbarkeit dabei zunehmen.

Die voranschreitende »**digitale Transformation**«¹, also die Einführung digitaler Technologien in allen Bereichen der Produktion, soll diesen gesteigerten Anforderungen gerecht werden.

¹ Mit der **digitalen Transformation** bzw. dem digitalen Wandel wird der Übergang von analogen Prozessen hin zu digitalisierten Vorgängen hauptsächlich in der Industrie bezeichnet.

1.2 Internet of Things

Im **Internet of Things (IoT)** Dinge (deutsch: »Internet der Dinge«) können Objekte miteinander kommunizieren und Befehle geben oder entgegennehmen. Es ist mit dem Internet der Dinge also möglich, Aufgaben und Anwendungen automatisiert ohne äußere Steuerung durchführen zu lassen.

Da es keine allgemeingültige Definition des Internet of Things gibt, können sich die Beschreibungen des IoT erheblich voneinander unterscheiden. Je nach Anwendungsgebiet und der Technologie die das Netzwerk verwendet, sind unterschiedliche Auffassungen möglich. Im Allgemeinen wird der Begriff »Internet of Things« für die Vernetzung über das Internet von Objekten des Alltags oder von Produktionsanlagen im produzierenden Gewerbe verwendet.

Generell kann man die Bereiche »private Nutzung« und »industrielle Anwendungen« unterscheiden. Im Gegensatz zur privaten Nutzung, wo der Komfort und Unterhaltung von intelligent vernetzten Alltagsgegenständen im Vordergrund steht, ist im industriellen Bereich die Sicherheit und Ertragssteigerung wesentlich. Anwendungen des IoT sind z. B. intelligente Gebäudeautomatisierungen, oder Geräte, die bei bestimmten Ereignissen über das Internet mit dem Nutzer in Kontakt treten.

Alle im Netz miteinander verbundenen Geräte erhalten eine eindeutige Identität im Netzwerk (Adresse). Durch die eingebettete elektronische Intelligenz, können die teilnehmenden Geräte miteinander in Kontakt treten und Aufgaben vollautomatisiert ausführen. Deshalb werden diese Objekte auch **Smart Devices** genannt.

Die technischen Grundlagen des Internet of Things

Das Internet wächst durch die stark anwachsende Anzahl von teilnehmenden Geräten weiter an. Der Grund dafür liegt in immer günstigeren, kleineren und leistungstärkeren Mikrocomputern. Mit wenig Aufwand lassen sich so Gegenstände mit intelligenter Elektronik aufwerten und in das Internet entweder kabelgebunden oder sogar drahtlos mit eigener Adresse einbinden.

Eine Grundvoraussetzung um den exponentiell anwachsenden Bedarf an eindeutigen Adressen für jedes einzelne Objekt zu bewerkstelligen, ist das 1999 eingeführte Internet Protocol Version 6 (**IPv6**), welches die Version 4 (**IPv4**) abgelöst hat.

IPv6 verwendet 128 Bits lange Adressen (IPv4: 32 Bits, 4,3 Mrd. Adressen), wodurch sich eine unvorstellbar große Menge an Adressen ergibt. Insgesamt sind es 2^{128} mögliche Adressen, was einer 3 mit 38 Nullen entspricht.

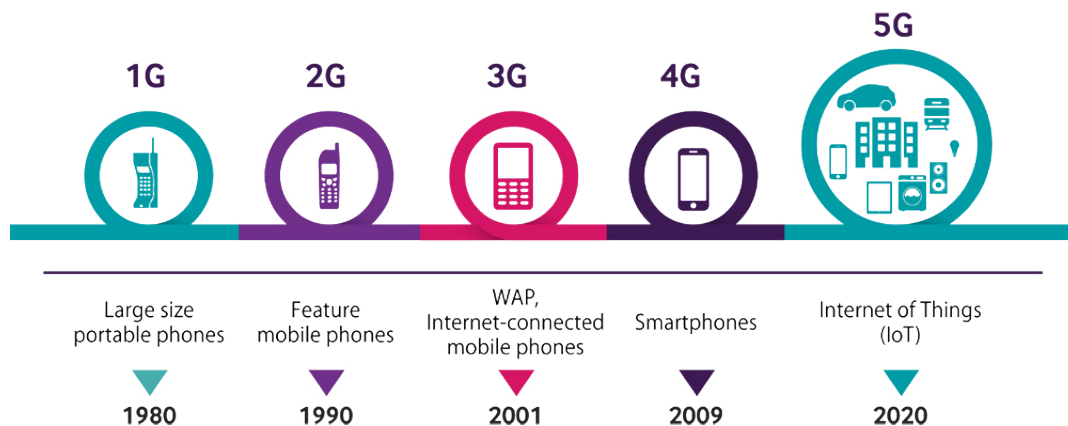
	Internet Protocol version 4 (IPv4)	Internet Protocol version 6 (IPv6)
Deployed	1981	1999
Address Size	32-bit number	128-bit number
Address Format	Dotted Decimal Notation: 192.149.252.76	Hexadecimal Notation: 3FFE:F200:0234:AB00: 0123:4567:8901:ABCD
Prefix Notation	192.149.0.0/24	3FFE:F200:0234::/48
Number of Addresses	$2^{32} = \sim 4,294,967,296$	$2^{128} = \sim 340,282,366,920,938,463,463,374,607,431,768,211,456$

Vergleich von IPv4 zu IPv6

Das generelle Konzept ist bei IPv4 und IPv6 gleich: Jedes Gerät (Computer, Tablet, Smartphone, Router etc.) hat eine Routing-Tabelle, anhand derer es entscheidet, wie ein IP Paket weitergesendet werden soll. Große Vorteile bietet die erhöhte Sicherheit bei IPv6, die eine integrierte Sicherheitsfunktion beinhaltet (IPsec).

Über diese Protokolle senden oder empfangen die angebundenen Geräte ihre Daten und Befehle. Neben diesen Protokollen existieren auch drahtlose Kommunikationstechniken wie beispielsweise WLAN, Bluetooth oder Mobilfunkstandards wie UMTS (3G) und LTE (4G).

Der 5G-Standard, der das LTE-Netz 2020 abgelöst hat, ist etwa 10mal schneller und auf Video-, Streamingdienste und Echtzeitanwendungen optimiert und damit prädestiniert für Industrie 4.0-Anwendungen [5].



Das 6G-Netz, die sechste Generation des Mobilfunks, soll nach dem Bundesministerium für Bildung und Forschung ab ca. 2030 in Deutschland die Nachfolge des 5G-Netzes antreten mit nochmals 100mal höheren Übertragungsraten von bis zu 1000 GBit/s.

	INTRODUCTION YEAR	TOP DOWNLOAD SPEED	TIME TO DOWNLOAD A 3GB MOVIE
1G	1980	2 Kbps	6 days
2G	1990	100 Kbps	2.5 hours
3G	2001	8 Mbps	2 minutes
4G	2009	150 Mbps	20 seconds
5G	2020	10 Gbps	300 milliseconds
6G	2030	1 Tbps	3 milliseconds

Dem Chip-Hersteller Qualcomm zufolge werden von 6G vor allem KI-Anwendungen profitieren. Als Beispiel nennt Qualcomm etwa autonomes Fahren, indem viele Daten in Echtzeit zwischen den Fahrzeugen und der Infrastruktur ausgetauscht werden und hohe Geschwindigkeiten daher von Vorteil sind. Das Fraunhofer-Institut spricht zudem von Fortschritten in der Medizin, da Sensoren Gesundheitsdaten innerhalb kürzester Zeit auswerten könnten.

Anwendungen des Internets der Dinge in der Smart Factory

Für Industrieunternehmen ist IoT das optimale Mittel, Kosten zu verringern, die Effizienz zu steigern und durch neue Geschäftsmodelle zusätzliche Einkünfte einzufahren. Während die Hersteller schon seit Langem zu den Daten, die in der Produktion gesammelt werden Zugang haben, waren die Daten in den eigenen, geschlossenen Softwaresilos der Fertigung unzugänglich. Dies schränkt die Möglichkeit, diese Daten zur Entscheidungsfindung zu nutzen ein.

IoT ermöglicht es, große Mengen an Fertigungsdaten nicht nur in einer einzigen Fabrik, sondern über mehrere Produktionsstätten hinweg in der Cloud zu sammeln und zu verwalten. Werden diese Daten mit Analytics verbunden und ausgewertet, erhalten Unternehmen einen viel besseren Einblick in ihre Prozesse, sodass sie ihre Betriebsabläufe optimieren, Qualitätsmängel reduzieren und eine vorbeugende Instandhaltung implementieren können.

1.3 Cyber-physische Systeme

Die Informationstechnik erlebt durch die immer schnellere Steigerung der Leistungsfähigkeit von Mikroprozessoren einen rasanten Fortschritt. In komplexen Systemen, die in Gebäude, Produkte und Produktionsanlagen integriert werden, kommen immer mehr intelligente software-intensive Lösungen zur Anwendung.

Diese sogenannten eingebetteten Systeme (**embedded systems**)¹ sind in der Lage durch gegenseitige Vernetzung miteinander zu kommunizieren. Es können damit Daten und Dienste intelligent über das Internet verknüpft werden. Die physikalische Welt wird mit der Softwarewelt verbunden und es entstehen smarte Lösungen, bei denen der Mensch nur noch über Interaktion mit Softwareplattformen überwachend und steuernd einwirkt.

Die Kernkomponenten die diese Lösungen ermöglichen, bezeichnet man als Cyber-Physische Systeme (CPS). CPS ist ein Begriff aus den USA, der zu einem allgegenwärtigen Begriff bei zukünftigen, technischen und industriellen Trends und Herausforderungen geworden ist.

Durch den Einsatz dieser Cyber-Physischen Systeme wird das Internet „**real world aware**“ (**RWA**)² und ist in der Lage direkt aus der physikalischen Realität einzuwirken. Durch die Möglichkeit der Interaktion, können physikalische Wirklichkeit und der virtuelle Raum (**Cyberspace**)³ zu einer Einheit zusammenwachsen.

Cyber-Physische Systeme sind die Grundlage der Smart Factory und der intelligenten Vernetzung von Maschinen und Produkten. Dadurch, dass die Produkte mit CPS ausgestattet sind, können sie alle relevanten Informationen der intelligenten Fabrik bereitstellen. Aufgrund dieser Daten kann dann die Steuerung der einzelnen Produktionsschritte durchgängig automatisiert erfolgen.

CPS beinhalten eingebettete Systeme, Produktions-, Logistik-, Engineering-, Koordinations- und Managementprozesse sowie Internetdienste [6].

$$\text{CPS} = \text{Eingebettetes System} + \text{intelligente Vernetzung}$$

Ein Cyber-Physisches System besteht aus einem Teil in der physischen Realität und einem Teil im digitalen bzw. virtuellen Raum:

- In der physischen Welt besteht das CPS aus Sensoren (Messen), Aktoren (Agieren), Benutzerschnittstellen sowie der verknüpfenden digitalen Kommunikationstechnologie (Kommunizieren).
- Auf logischer Ebene bewerkstelligen intelligente Funktionen die Erfassung, Transport, Verarbeitung und Bereitstellung der Informationen (Berechnen + Kommunizieren).

1 Ein **embedded system** ist ein elektronischer Rechner oder auch Computer, der in einen technischen Kontext eingebunden (eingebettet) ist.

2 **RWA, Real World Awareness** bedeutet eine zeitnahe Abbildung der realen Welt in IT-Systemen.

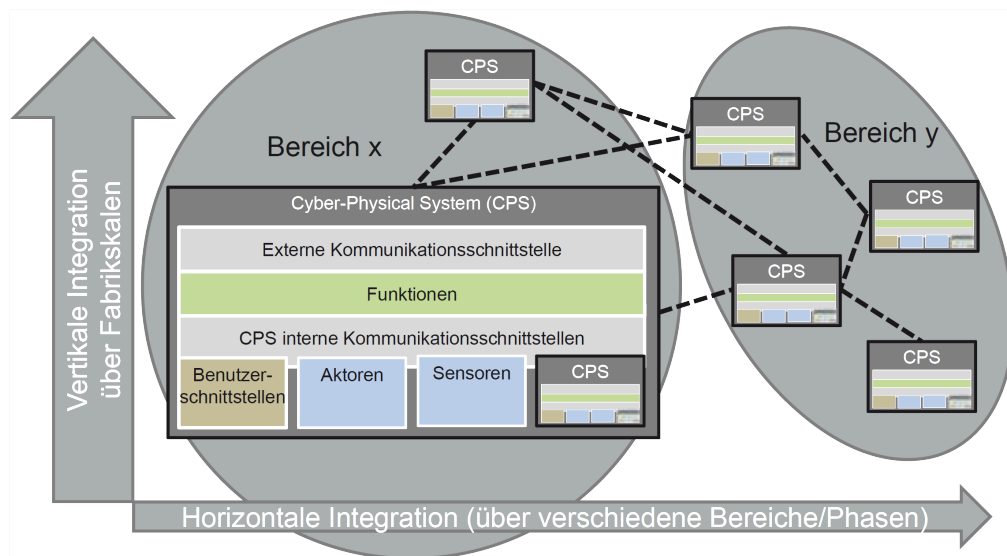


Verschiedene Ebenen Cyber-Physischer Systeme

Neue Lösungen sind möglich, indem die konsequente Anwendung von IP-Kommunikationstechnologien, Software Services sowie globalen, offenen Standards Verwendung bei mechatronischen Systemen finden. Durch die Vernetzung ist die Interaktion in zwei Richtungen möglich, was die Voraussetzung zum Empfangen und Senden von Befehlen ist.

Die Art der Vernetzung innerhalb einer Smart Factory kann in zwei Bereiche unterteilt werden:

- Vertikale Vernetzung zwischen den unterschiedlichen Ebenen der Fabrik, ausgehend vom technischen Prozess innerhalb einer Produktionsanlage, Arbeitsplätzen, Fertigungsinseln bis zum gesamten Produktionsnetzwerk.
- Horizontale Vernetzung zwischen unterschiedlichen CPS der gleichen Ebene oder Organisationseinheiten, wie z. B. zwischen zwei Fertigungsprozessen oder der Produktion und Produktentwicklung.



Aufbau eines cyber-physischen Systems

Es gibt verschiedene Charakteristiken von CPS, die sich durch den räumlichen Verteilungsgrad einordnen lassen:

- räumlich in einem Gehäuse, alle Funktionen eines CPS integriert. Beispiel: „Smart Device“
- die Funktionen sind auf viele IT-Systeme auf der ganzen Welt verteilt (hochverteilte Anwendung). Beispiel: Vernetzte Fabriken eines Unternehmens in verschiedenen Ländern.

1.4 Cyber-physische Produktionssysteme

Der Einsatz von CPS in ganzen Produktionsanlagen wird als **Cyber Physical Production Systems (CPPS)**¹ bezeichnet.

Übersetzt bedeutet CPPS: System intelligenter CPS-Produkte und CPS-Betriebsmittel. Damit ist die konsequente Integration von CPS in Produktionsanlagen, Warenlagersysteme und Produktionsmittel gemeint, die ständig gegenseitig Informationen austauschen und verarbeiten. Es entstehen dadurch intelligent vernetzte Fabriken und ganz neue Wertschöpfungsnetzwerke.

Diesen Wertschöpfungsnetzwerken liegt die gemeinsame Fähigkeit zugrunde, durch ihre Bestandteile miteinander zu kommunizieren. Möglich machen dies Komponenten wie Sensoren, die in den Systemen der Fertigungsanlagen integriert sind. Beispielsweise können **RFID-Chips**² mit diesen Anlagen Daten von Betriebsmitteln und dem Transportsystem Informationen austauschen.

Es werden Netzwerke möglich, die in Echtzeit diese Daten verwenden, um sich selbst zu steuern und zu organisieren.

”Die Fertigung ist damit durchgängig transparent” [4]. Die eingebetteten CPS entfalten vor allem in Verbindung mit dem Internet ihre ganze Leistungsfähigkeit. Cyber-Physische Produktionssysteme sind gekennzeichnet durch:

- Erfassung physikalischer Daten durch Sensoren in Echtzeit;
- Nutzung von weltweit vorhandener Daten und Dienste;
- Speicherung und Analysieren der Daten;
- Vernetzung über digitale Kommunikation (lokal/global);
- Einflussnahme auf reale Objekte durch Aktoren;
- Nutzung von Mensch-Maschine-Schnittstellen [7]

CPPS bestimmen die zukünftige Produktion und Logistik durch:

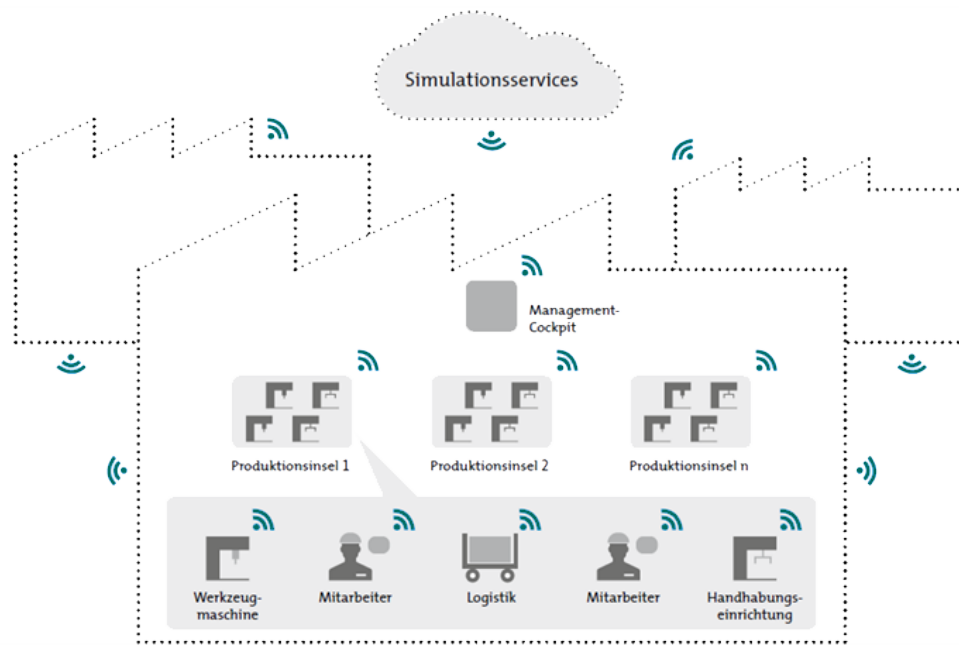
- smarte Produkte sowie
- smarte Produktions- bzw. Betriebsmittel.

CPPS sorgen für eine dezentrale, flexible Produktions- und Logistiksteuerung. Die verstärkte Verwendung dezentral vorhandener Daten von Sensoren und lokalen Regelkreisen führen damit zu situationsbedingten Entscheidungsalternativen z. B. mithilfe virtueller Modelle, die die physikalische Welt abbilden.

Alle Bereiche der Fabrik sind somit miteinander vernetzt und können in beide Richtungen kommunizieren und über Simulationsservices Entscheidungsmöglichkeiten (z. B. für das Management Cockpit) bereitstellen.

1 Bei **CPPS** handelt es sich um ein System intelligenter CPS-Produkte und CPS-Betriebsmittel.

2 **RFID-Chip** bedeutet Radio Frequency Identification Chip, auf deutsch Elektronischer Radiofrequenz-Identifikations-Baustein

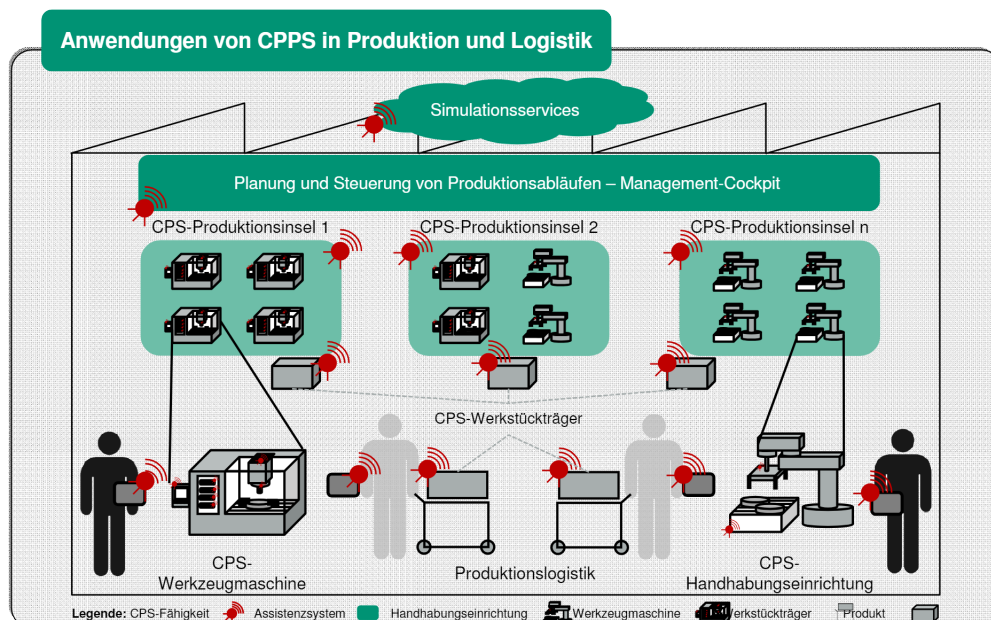


Cyber-Physisches Produktionssystem (CPPS)

1.5 Smart Factory als Cyber-physisches (Produktions-)System

Die sogenannte Smart Factory entsteht durch die autonome und dezentrale Vernetzung der einzelnen Cyber-Physischen Systeme. Im Zusammenspiel mit dem Menschen können diese Netzwerke eigenständig Probleme lösen.

Ein zentrales Merkmal ist dabei, dass die Informationen aus der Fabrik in Echtzeit zur Verfügung stehen und sich damit die physische mit der virtuellen Welt vereint.



CPPS, Cyber-Physisches (Produktions-)System

Die Basis einer intelligenten Fabrik bilden sogenannte aktive Werkstückträger, auf denen ein oder mehrere Werkstücke bzw. Produkte angebracht sind, um sie von einem Beförderungsmechanismus

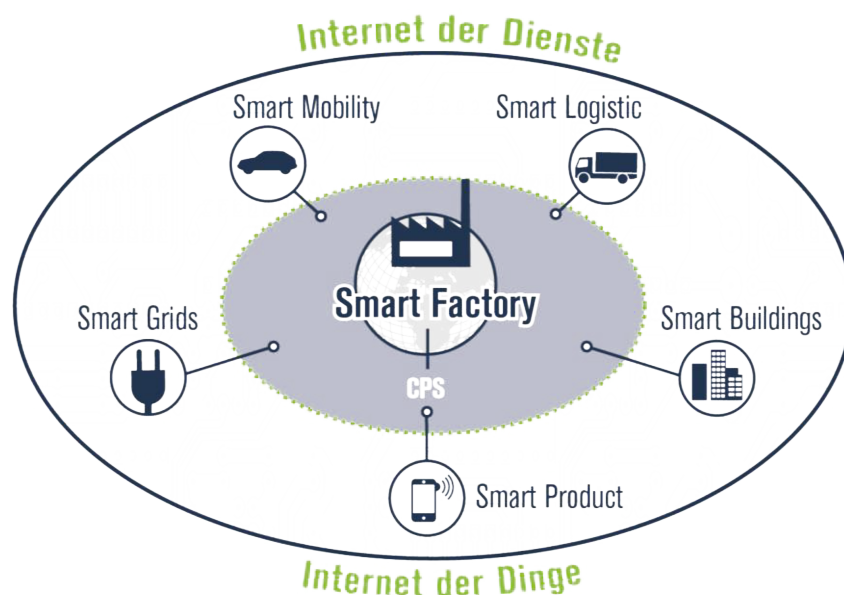
entlang einer Fertigungslinie durch zum Teil mehreren Fertigungsstationen zu transportieren. Diese Werkstückträger können als CPPS aufgefasst werden.

Die Vorteile solcher aktiver Werkstückträger, die als CPPS fungieren sind:

- größere Flexibilität;
- Werkstückträger übernimmt Funktionalität aus der Produktionslinie;
- Sensorik, Logik und Aktorik werden modular aufgebaut;
- normierte Schnittstellen ermöglichen die Rückverfolgung;
- ständige Erfassung der Daten in der gesamten Produktion;
- effizientere Produktionsprozesse;
- Durchlaufzeiten werden durch aktive CPS-Nutzung verringert [7]

Durch CPS und der Verwendung von intelligenten Verfahren und Prozesse wird damit das Hauptaugenmerk auf die Produktion gelenkt. Zusätzlich unterstützen intelligente Produkte dabei den Produktionsprozess aktiv.

An den Schnittstellen wird die Smart Factory somit zum Gegenstand einer umfassenden intelligenten Infrastruktur.



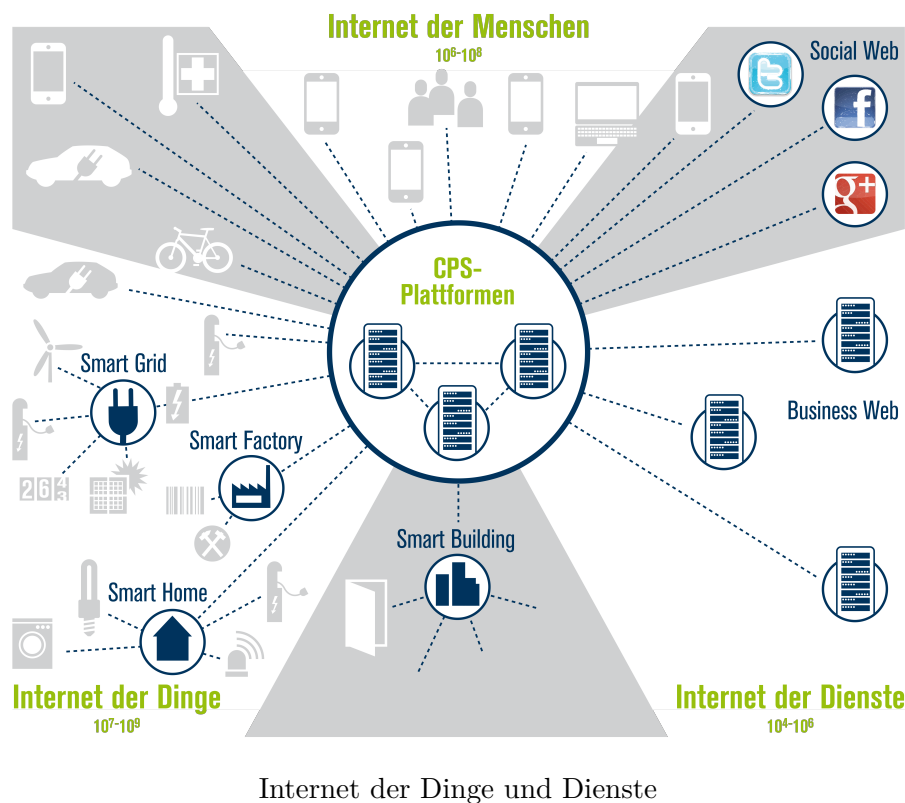
Cyber-Physische Systeme ermöglichen die intelligente Fabrik

Es werden in Zukunft CPS-Plattformen entstehen, die weit über ein Unternehmen hinaus Menschen, Objekte und Systeme durch Anwendungen und Dienste miteinander vernetzen.

Die CPS-Plattformen bilden die Grundlage, um die verschiedenen Netzwerke miteinander zu verknüpfen: Das Internet der Menschen mit dem Internet der Dinge und dem Internet der Dienste.

„Mit dem zunehmenden Einsatz des Internets der Dinge und Dienste in der Produktion werden sich in Kombination von Smart Production, Smart Logistic, Smart Grids und Smart Products die Wertschöpfungsketten verändern und neue Geschäftsmodelle etablieren.

Durch das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 werden die vorhandenen technologischen und marktwirtschaftlichen Potenziale gehoben werden. Industrie 4.0 eröffnet neue Geschäftsperspektiven und neue innovative soziale Infrastrukturen für die Arbeit. [4]



1.6 Zusammenfassung

Die Smart Factory ist ein Teilgebiet der Industrie 4.0 Initiative und steht idealerweise am Ende der immer weiter fortschreitenden Digitalisierung der Produktion. Die grundsätzlichen Ziele sind die Erhaltung der Konkurrenzfähigkeit der Betriebe durch Kostensenkung, Eintritt in neue Märkte und damit verbunden die Erschaffung von neuen Produkten und Dienstleistungen. Um diese Ziele zu erreichen, sind vielfältige Veränderungen notwendig, zu deren Grundlage die umfassende Digitalisierung der Produktion und der Steuerung zählt.

Digitale Technologien wie das Internet der Dinge (IoT), Cyber-Physische Systeme (CPS) und deren Integration in den Produktionsablauf sind hier die entscheidenden Punkte um im Idealfall eine vollkommen autonome Fabrik zu schaffen.

In Zukunft soll die Smart Factory sich als Cyber-Physisches (Produktions-)System (CPPS) selbst und in Echtzeit steuern können. Das Internet der Dinge muss hierfür z. B. sehr viel mehr Geräte und Produkte adressieren können. Außerdem müssen auch die mobilen Netze die steigende Anzahl von Teilnehmern, Datenmengen und die Geschwindigkeit (Echtzeit) ausgebaut werden.

Ebenfalls wird es notwendig sein, dass sich die verschiedenen Netze (Internet der Dinge, Internet der Dienste, Soziale Netzwerke) auf sogenannten CPS-Plattformen verknüpfen.

KAPITEL 2

Entwicklung der Automatisierung

Lernziele

Nach der Bearbeitung dieses Kapitels werden Sie wissen, ...

- ... wie die Automatisierung sich historisch entwickelt hat.
- ... was die Automatisierungspyramide ist.
- ... wie die zukünftige Produktion organisiert wird.
- ... wie der Übergang zur Smart Factory gelingen kann.
- ... welche Herausforderungen und Ziele zu meistern sind.
- ... wie diese Ziele erreicht werden können.

Einführung

Die Wirtschaftlichkeit von Produktionsabläufen verschlechtert sich oft durch die Notwendigkeit der manuellen Aufbereitung von digitalen Produktionsdaten und der manuellen Anpassung von Daten an individuelle Bauteilgeometrien bei der bauteilindividuellen Produktion. Die Vernetzung der Produktionssysteme wie Fertigungs- oder Messmaschinen und der Planungs- und Simulationssysteme führt zu einer deutlichen Beschleunigung der Vorbereitungs- und Anpassungsvorgänge.

Die geplanten Ziele sind die Erhöhung der Produktivität und die Verbesserung der Flexibilität der Fertigung durch die Digitalisierung und Vernetzung in der Produktion.

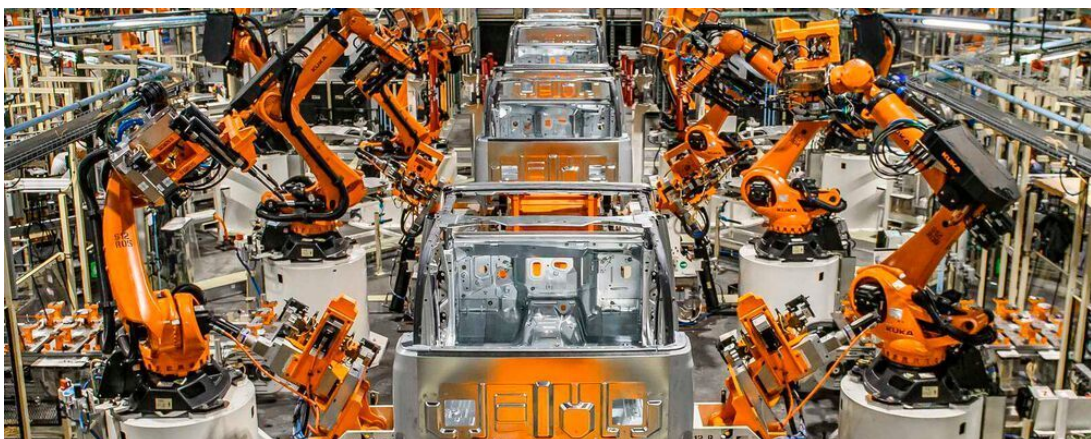


Bild 2.1: Automatisierung in der Fahrzeugproduktion

2.1 Historische Entwicklung

Ein Prozess oder eine Einrichtung wird als automatisch bezeichnet, wenn er/sie unter festgelegten Bedingungen ohne menschliches eingreifen abläuft oder arbeitet. Die Automatisierung beschreibt also nur, ob ein Prozess selbstständig und ohne aktives Einwirken von Lebewesen stattfindet. Von Industrie 4.0 wird erst gesprochen, sobald cyber-physische Systeme zusammenhängend betrieben werden. So wird Industrie 4.0 als die vierte Stufe der Automatisierung verstanden, in der intelligente und (teil-)autonome Größen interagieren.

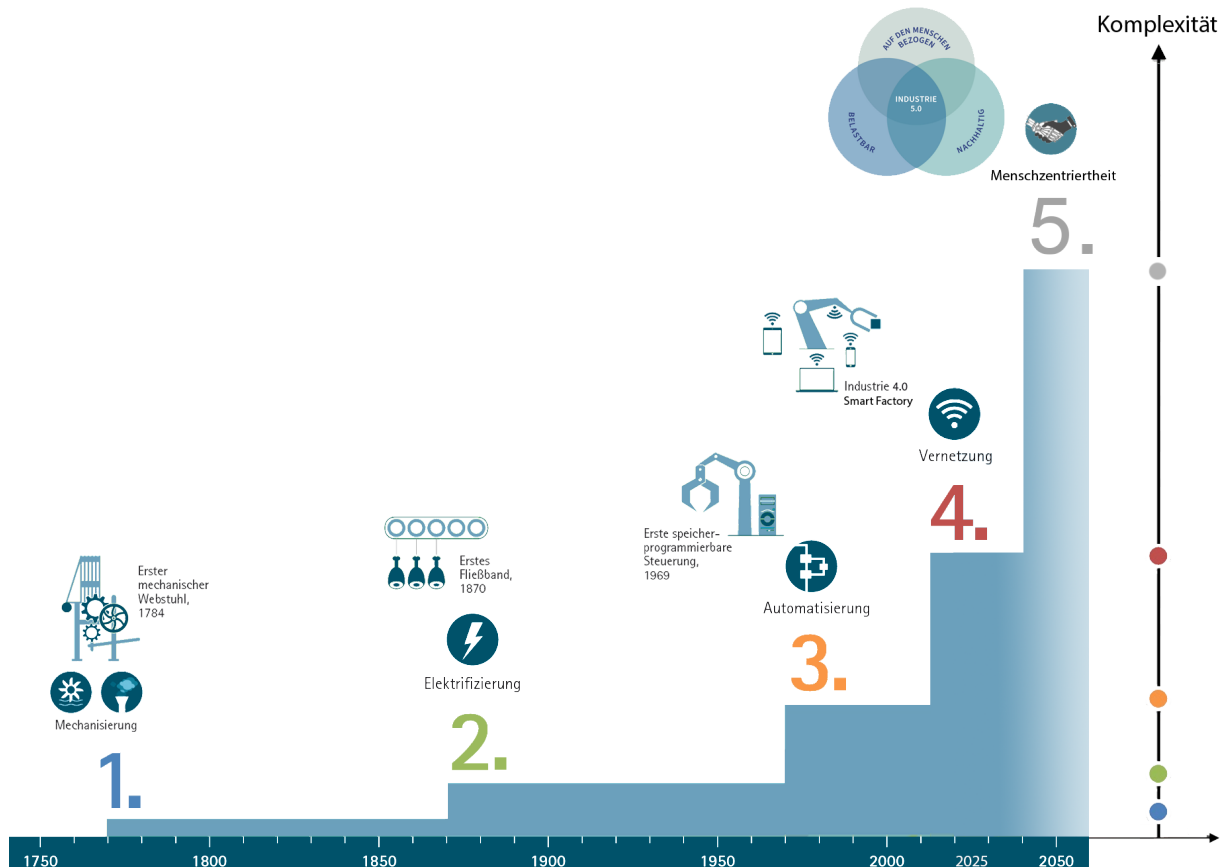


Bild 2.2: Industrielle Revolution – Industrie 1.0 - 5.0

- Bis in die Mitte des 18. Jahrhunderts hinein wurde jegliche Produktion durch die Muskelkraft von Mensch und Tier bewerkstelligt. Die Erfindung der Dampfmaschine leitete ab diesem Zeitpunkt die **erste industrielle Revolution** ein.

In dieser Zeit wurde Muskelkraft durch Wasser- und Dampfkraft zu ersetzt und damit die Mechanisierung vorangetrieben. Produkte konnten plötzlich schneller und in größerer Stückzahl gefertigt werden und dauerte in etwa 100 Jahre bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts.

- Die **zweite industrielle Revolution** löste diese ab, indem mit Hilfe elektrischer Energie und Fließbändern die Massenfertigung eingeleitet wurde. Auch diese Zeitspanne betrug noch immer ungefähr 100 Jahre.
- In der **dritten, auch digitale Revolution** genannt, hat man ab ca. 1970 begonnen Informationstechnologien zu nutzen, um die Produktion zu automatisieren. Nun konnten Arbeitsschritte von Maschinen übernommen werden, die vorher nur von Hand zu bewerkstelligen waren. Hier befinden wir uns nach etwa 50 Jahren auch heute noch - jedoch an der Schwelle zur vierten (und fünften) industriellen Revolution.

- Der Begriff **Industrie 4.0** wurde das erste Mal im Jahre 2011 auf der Hannovermesse veröffentlicht. Am 8. April 2013 hat der Arbeitskreis Industrie 4.0 unter Vorsitz von Siegfried Dais (Robert Bosch GmbH) und Henning Kagermann (acatech) auf der Hannovermesse ihren Abschlussbericht übergeben. Seither hat die Plattform Industrie 4.0 ihre Arbeit aufgenommen. Hier koordinieren die drei Branchenverbände Bitkom, VDMA und ZVEI die zukünftigen Aktivitäten.

	Gestern - klassisch (3. industrielle Revolution)	Heute - Industrie 4.0 (4. industrielle Revolution)
Produktionssteuerung	Zentral	Dezentral (CPS, Cloud)
Steuerungstechnik	Monolith	Offener Standard im Netz (Cloud)
Datenverarbeitung und -bereitstellung	Zeitversetzt	Echtzeit-Informationen
Nutzungsrechte (Softwarekosten)	Lizenz(-kosten)	Pay-per-use
Softwareverwaltung	Software-Suite	Cloud-Apps (SaaS)

Bild 2.3: Industrielle Revolution – gestern und heute

Momentan befinden wir uns in vielen Branchen und KMUs immer noch im Übergang von der klassischen Industrie hin zur Industrie 4.0. Wie in jeglichen Unternehmen und Prozessen zu erkennen ist, stellen hier die Dezentralisierung, Vernetzung und Digitalisierung die entscheidenden Veränderungen dar. Ein genauer Zeitpunkt, wann der Wandel hin zur Industrie 4.0 endgültig vollzogen ist, kann nicht genannt werden, da durch die fortschreitende Digitalisierung immer neue Möglichkeiten zur Vernetzung, Dezentralisierung und Datenverarbeitung (KI) entstehen.

- **Industrie 5.0** befindet sich, anders als das inzwischen etablierte Industrie 4.0-Leitbild, noch in einer frühen, sich stetig weiterentwickelnden Phase. Es ist davon auszugehen, dass sich in den kommenden Jahren zunehmend konkrete Umsetzungshilfen - Normen, Reifegradmodelle, Förderprogramme und Best-Practice-Sammlungen - herausbilden werden.

Die drei "neuen" Aspekte/Dimensionen **Nachhaltigkeit**, **Resilienz (Belastbarkeit)** und **Menschenzentrierung**, welche die Kernelemente für den Schritt zur Industrie 5.0 darstellen, wird die Komplexität weiter erheblich erhöht. Ob die **KI** als Enabler Technologie für eine fünfte industrielle Revolution einen ausreichend disruptiven Charakter besitzt, um den Nummernsprung zu rechtfertigen, ist in Fachkreisen eine andauernde Diskussion (<https://www.acatech.de/die-vierte-industrielle-revolution-und-industrie-5-0-eine-kritik/>, Noha M. Galal, 2025, A Review of the Industry 4.0 to 5.0 Transition).

Die Transformation zu Industrie 5.0 wird allerdings von dem Trend getragen, Weiterentwicklungen vollkommen **technologie- und plattformunabhängig** zu gestalten.

Absehbar ist zudem eine engere Verzahnung von Industrie 5.0 mit angrenzenden regulatorischen Entwicklungen, insbesondere mit dem europäischen Rechtsrahmen für künstliche Intelligenz (KI-Verordnung) sowie mit Berichtspflichten zu Nachhaltigkeit und Lieferkettenverantwortung. Für produzierende Unternehmen bedeutet dies, dass menschenzentrierte, resiliente und nachhaltige Gestaltung zunehmend nicht mehr nur freiwilliges Engagement, sondern regulatorisch erwartete Praxis werden dürfte.

Für die betriebliche Praxis ergibt sich daraus die Empfehlung, den Übergang von Industrie 4.0 zu Industrie 5.0 nicht als abrupten Bruch, sondern als **evolutionäre Erweiterung** bestehender Digitalisierungsstrategien zu verstehen: Bereits vorhandene Industrie 4.0-Infrastruktur - Vernetzung, Datenanalyse, Automatisierung - bildet dabei die technische Basis, auf der Menschenzentrierung, Resilienz und Nachhaltigkeit gezielt aufgesetzt werden können.

2.2 Automatisierungspyramide

Automatisierung kann auf allen Ebenen eines Unternehmens stattfinden. Dies verdeutlicht die Automatisierungspyramide, welche Kommunikationsmethoden innerhalb eines Unternehmens veranschaulicht und in nachfolgender Abbildung dargestellt ist. Dabei werden die folgenden Ebenen in einem Unternehmen unterschieden [8]:

- **Unternehmensleitebene:** Sie fällt strategische Entscheidungen, die das Unternehmen als Ganzes betreffen. Aufgaben wie Marktanalyse, Unternehmensführung, strategische Personal-, Investitions- und Produktionsplanung werden hier realisiert. In dieser Ebene werden Systeme wie Enterprise Resource Planning (ERP) oder SAP-Produkte verwendet.
- **Betriebsleitebene:** Sie beschäftigt sich mit der Planung und Durchführung von konkreten Aufträgen, Terminüberwachung sowie Kostenanalysen. Hier werden Softwarelösungen wie das Manufacturing Execution System (MES) verwendet.
- **Produktionsleitebene:** Diese Ebene verwaltet die kurzfristige Produktionsplanung wie die Einsatzplanung von Maschinen, Anlagen und Personal. Softwarelösungen hierfür sind sogenannte Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)-Systeme.
- **Prozessleitebene:** je nach Anlagengröße kann die Prozessleitebene in die weiteren Ebenen Anlagen-, Gruppen- und Einzellebene untergliedert werden. Da die Prozesse innerhalb eines Fertigungsbereiches (Zelle) ablaufen, wird diese Ebene aus Sicht der Fertigungseinrichtungen auch Zellebene genannt.
- **Feldebene:** Sie umfasst einzelne Aktoren, Sensoren sowie Anzeigegeräte. In der Feldebene werden die Daten aufbereitet und Reaktionen entsprechende Reaktionen angeregt. Sie verbinden den Prozess und mit den übergeordneten Steuerungen. Zur Anbindung an die übergeordneten Systeme ist es wichtig, dass die Datenmengen mit kurzen Reaktionszeiten übertragen werden.

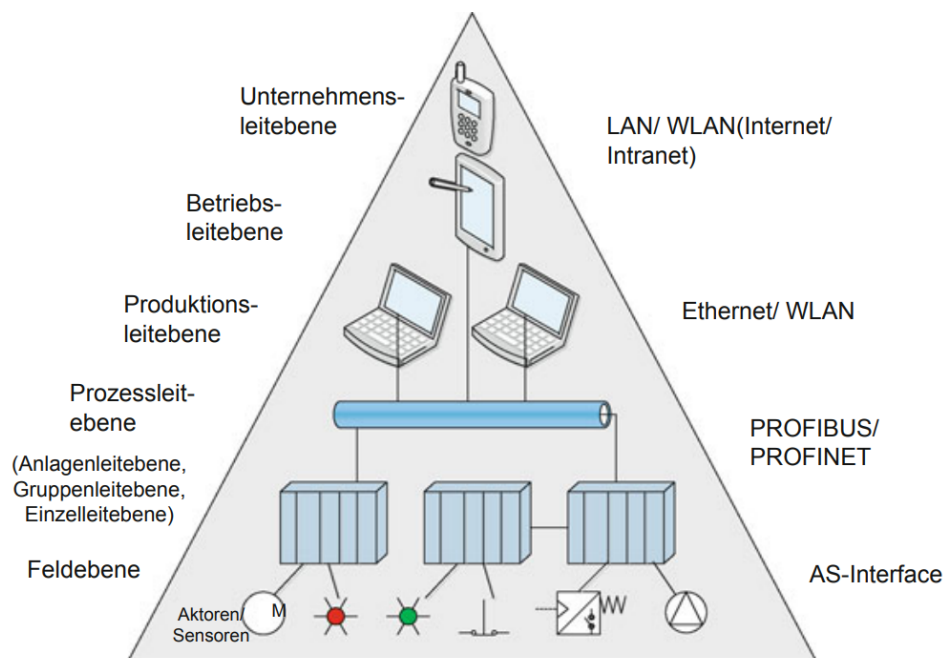


Bild 2.4: Die Automatisierungspyramide

Entsprechend nimmt der Detaillierungsgrad in der Automatisierungspyramide von oben nach unten zu und der Abstraktionsgrad ab. Je nach Hierarchie in der Automatisierungspyramide werden unterschiedliche Kommunikationswerkzeuge genutzt. In den oberen Ebenen befinden sich komplexe Rechnersysteme in Netzen mit großer Ausdehnung und vielen Teilnehmern. Die Verarbeitungszeiten sind hier nicht von entscheidender Bedeutung, da die hier errechneten Daten für langfristige Planungen verwendet werden. In den unteren Ebenen im Gegenzug sind die Reaktionszeiten von hoher Bedeutung, da hier Echtzeitdaten verarbeitet und sofortige Reaktionen geplant werden.

Während auf Unternehmensleitebene und Betriebsleitebene sowohl LAN- als auch WLAN-Technologien genutzt werden, sind es auf der Produktionsleitebene Ethernet/WLAN-typische Kommunikationstechniken. Die Prozessleitebene nutzt PROFIBUS/PROFINET und die Feldebene AS-Interface-Technologien. Entsprechend kann gefolgert werden, dass die Hierarchie der Automatisierungspyramide sich ebenfalls in der Wahl der Technologien zum Austausch von Informationen widerspiegelt.

2.3 Vernetzte, dezentrale Organisation der Produktion

Bei der bisherigen deterministischen zentralen Planung der Produktion, wird von einem gemeinsamen und optimierten Produktionsplan ausgegangen. Bisher war gängige Praxis, die Aufgaben in der Produktion wie z. B. Beschaffung von Ressourcen zentral festzulegen und zeitlich abzustimmen. Die Ergebnisse waren oft nur wenig zufriedenstellend. Mit steigender Komplexität der verschiedenen Prozesse in den einzelnen Bereichen sind neue, **dezentrale Ansätze** notwendig.

Dezentrale Steuerungen sind darauf ausgelegt, Aufgaben und Prioritäten lokal zu optimieren. Gegenüber der zentralen Steuerung wird das Augenmerk auf einen limitierten und überschaubaren Gegenstandsbereich eingegrenzt. Es ist daher sehr viel einfacher möglich, durch lokale Optimierungen sich auf kurzfristig ändernde Anforderungen flexibel einzustellen. Bei dezentraler Planung kann außerdem die ausführende Ebene direkt einbezogen werden und somit können kurzfristige Ziele (z. B. Freigeben von Produktionskapazitäten) viel effizienter umgesetzt werden.

Dezentrale und meist kurzfristige Steuerung durch intelligente und vernetzte Technologien setzt wiederkehrende Situationen voraus, um von der Software automatisch erkannt zu werden. Durch die dezentrale Steuerung ist es dann auch möglich durch Delegation auf die Ausführungsebene, Standardisierungen einfacher zu implementieren, da hier "nur" die Schnittstellen vereinheitlicht werden müssen. Durch dezentrale Steuerungsmaßnahmen werden von intelligenten Assistenten die Routineentscheidungen standardisiert.

Die dezentrale Steuerung gibt Antworten auf das sich rasant verändernde, immer komplexer werdende Umfeld der Unternehmen:

Reduktion der Planungskapazität

Der entscheidende Vorteil der dezentralen Planung und Steuerung liegt in der **Reduktion der Planungskapazität**. Da die externe Komplexität durch z. B. flexiblere Kundenwünsche weiter ansteigt, muss auch die interne Komplexität in der Produktion bzw. im Unternehmen zunehmen, um diese Bedürfnisse bedienen zu können.

Steigende äußere Komplexität

Die äußere Marksicht wird als externe Komplexität bezeichnet und beinhaltet den Wandel des Marktes (demografischer Wandel, Digitalisierung etc.) sowie steigende Flexibilität (Variantenvielfalt...) und die eigentlichen Produkte (Preis, Funktionalität, Vielfalt).

Steigende innere Komplexität

Aus Unternehmenssicht (interne Komplexität) muss auf die gesteigerten äußeren Anforderungen ebenfalls mit gesteigerter Komplexität geantwortet werden. Dies ist nur damit zu bewerkstelligen, wenn die Planungs- und Steuerungsmechanismen in die einzelnen Bereiche des Unternehmens ausgegliedert, also dezentral verankert werden.

Da nicht alle Steuerungsmechanismen sofort dezentral umgestellt werden können (z. B. fest verankerte IT-Systeme), muss ein ausgewogener effektiver und effizienter Mittelweg gefunden werden. Es ist durch die Dezentralisierung und die Vernetzung, hoher Aktualität und durchgängiger Informationsbereitstellung somit "nur" noch ein kleiner Schritt zur autonomen und selbstständig organisierenden Produktion.

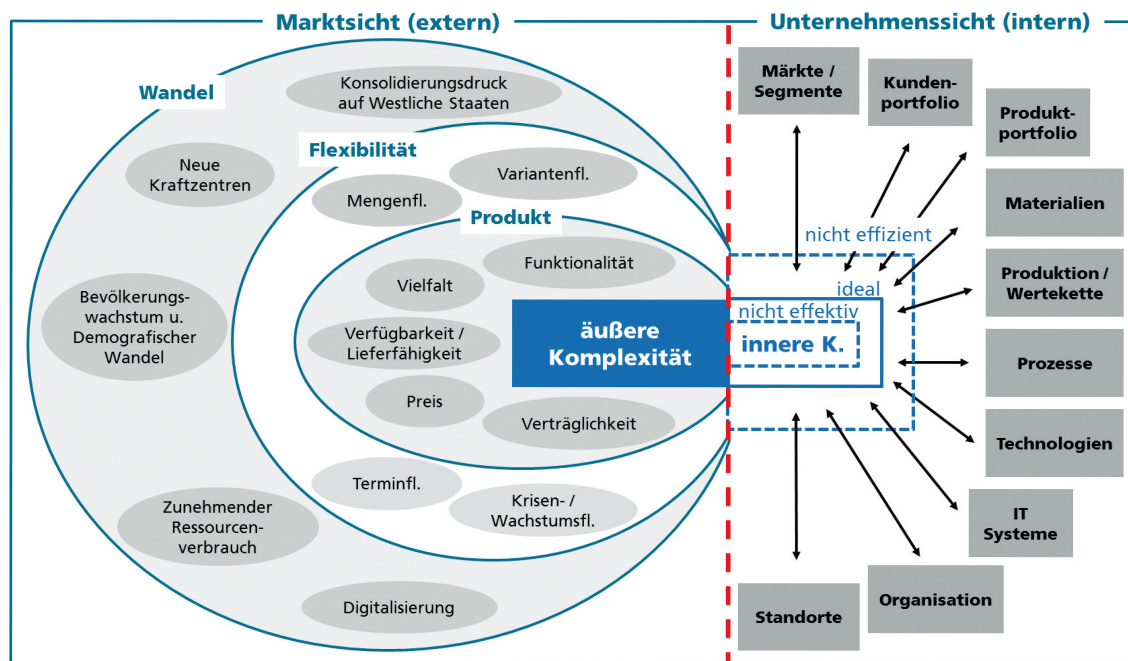


Bild 2.5: Die interne Komplexität muss der externen Komplexität entsprechen. Herausforderung für das Unternehmen ist die jeweils optimale Komplexität

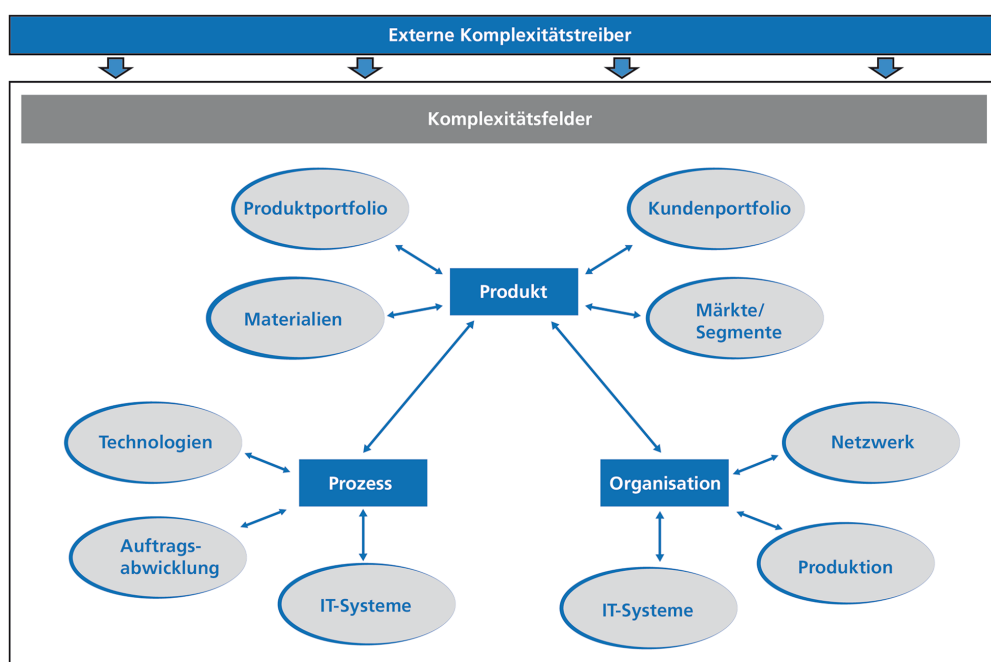


Bild 2.6: Dezentrale Steuerung und damit Ausgliederung der Komplexität auf die Arbeitsfelder

2.4 Fünf zentrale Paradigmen der Industrie 4.0

Der Begriff "Industrie 4.0" wird oft bloß auf den Einsatz neuartiger Technologien bezogen. Auch wenn die einzelnen Technologien einen wichtigen Anteil an der Wende hin zur Industrie 4.0 haben, sind sie oft nicht wirklich neuartig. So haben beispielsweise Intelligente Systeme und Breitband-Internetzugänge maßgebliche rollen in der Industrie 4.0, auch wenn diese grundlegend keine technologischen Neuheiten darstellen. Vielmehr ist die Zusammenführung all dieser Systeme die Neuheit und Innovation bei der Industrie 4.0. Die 5 nachfolgenden Paradigmen beschreiben die veränderten Denkweisen im Vergleich zu traditionellen Produktionsansätzen.

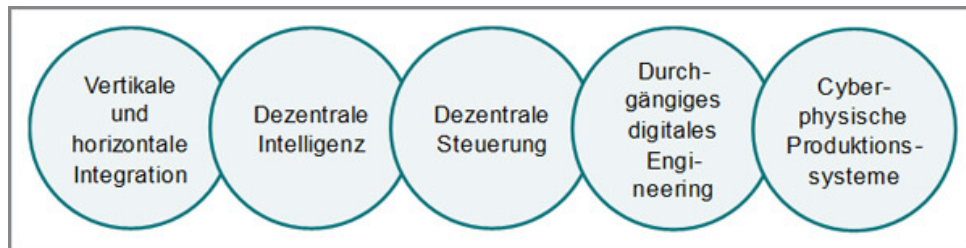


Bild 2.7: Neuartige Paradigmen der industriellen Fertigung

- **Vertikale und horizontale Integration:** Eine effiziente Datenerhebung kann nur durch vertikale Integration der relevanten Systeme gewährleistet werden. Dies bedeutet, dass alle Systeme hierarchisch eingeordnet und durch passende Schnittstellen verbunden sein müssen. Nur so kann ein geordneter Datenfluss gewährleistet werden und Informationen effizient ausgetauscht werden. Dies wird durch die Automatisierungspyramide beschrieben. Die horizontale Integration beschreibt die Einbindung von Systemen der Kunden, Lieferanten etc. in die eigene vertikale Systemlandschaft. Dies ermöglicht den Austausch von unternehmensinternen und -externen Daten, um den Materialfluss und somit die Effizienz maximieren zu können.
- **Dezentrale Intelligenz:** Dezentrale Intelligenz ist eine Voraussetzung für eine dezentrale Steuerung und beschreibt die Fähigkeit von Produktionsmitteln und -anlagen individuell und ortsunabhängig relevante Informationen an ein dezentrales Steuerungssystem weitergeben zu können. Verwendet werden hierzu Technologien wie das Internet der Dinge und Dienste, da diese Systeme Daten flexibel weitergeben und aufarbeiten können.
- **Dezentrale Steuerung:** Bei der dezentralen Steuerung gibt es keine zentralen Entscheidungsmechanismen und starre Grenzen. Durch eine dezentrale Steuerung wird eine dynamische Anpassung und Skalierung der benötigten Rechenleistung möglich. Für den Zugriff auf die Produktionssteuerung ist hier auch kein direkter bzw. ortsgebundener Zugriff auf eine zentrale Recheneinheit nötig. Dieser erfolgt nun lediglich über ein internetfähiges Endgerät.
- **Durchgängiges digitales Engineering:** Das durchgängige digitale Engineering bezeichnet die digitale Abbildung eines kompletten physischen Produktionsprozesses. Die physische und virtuelle Welt greifen nahtlos ineinander und alle Prozesse können in Echtzeit visualisiert und bearbeitet werden. Hierdurch können reale Anwendungen digital simuliert und analysiert werden.
- **Cyber-physische Produktionssysteme:** Ein Cyber-physische Produktionssystem beschreibt eine Produktion, welche die 4 vorher genannten Paradigmen erfüllt. Wenn all diese Bedingungen gegeben sind, spricht man auch von einem kooperierenden Gesamtsystem.

2.5 Zukünftige Herausforderungen

Wertschöpfung im Allgemeinen findet zukünftig in komplexen Prozesslandschaften statt. Um in diesem Umfeld wettbewerbsfähig zu bleiben, müssen die Unternehmen auf allen Ebenen Schritt halten und ihre Wertschöpfungsprozesse digitalisieren und automatisieren. Dabei sollten die Vorteile, die sich daraus ergeben nicht darüber hinwegtäuschen, dass damit auch große Risiken verbunden sind. Auf diese Herausforderungen müssen bereits jetzt Antworten gefunden werden.

Auf folgende Herausforderungen müssen die Produktionsbetriebe Antworten finden:

- **Kontrollverlust über die eigenen Produktionsprozesse:** Die unternehmerischen Spielräume bei Entscheidungen werden durch die Automation und Vernetzung der Produktions- und Unternehmensabläufe verkleinert. Das kann dazu führen, dass in bestimmte Prozesse nicht mehr eingegriffen werden kann.
- **Sicherheit und digitale Angriffe:** Durch die Vernetzung über das öffentliche Netz sind die Unternehmen digitalen Angriffen ausgesetzt, die sich über die ganze Wertschöpfungskette ausbreiten können. Um Manipulationen und Spionage zu verhindern, sind die IT-Systeme entsprechend mit Sicherheitsarchitekturen abzusichern.
- **Abhängigkeit von großen Technologieanbietern:** Die Gestaltungsspielräume können durch die Verwendung von Plattformen einiger großer Technologieunternehmen extrem eingeschränkt werden.
- **Produktionsausfall:** Durch die Vernetzung aller Produktionsanlagen können bereits kleine Zwischenfälle zu einem gesamten Ausfall der Produktionslinie führen.
- **Investitionen:** Die Einführung neuer Technologien erfordert Investitionen auf allen Ebenen. Oberste Prämisse muss die ökonomische Rentabilität sein, dass z. B. nur in marktreife Technologien investiert wird.
- **Automatisierung bedroht Arbeitsplätze:** Die fortschreitende Digitalisierung und Automatisierung führt zwangsläufig zum Ersetzen von Tätigkeiten der Mitarbeiter durch Maschinen und Computer. Die Mitarbeiter müssen bereits frühzeitig in den Wandel einbezogen werden. Durch Weiterbildung und der entsprechenden Umgestaltung der Arbeitsorganisation kann dem begegnet werden.
- **Gesellschaftlicher Wandel:** Mit den technologischen Trends ist zudem auch ein politischer und gesellschaftlicher Wandel verbunden. Es ist notwendig, die Vorteile des digitalen Wandels für die breite Masse der Gesellschaft nutzbar zu machen. Das betrifft die Datensicherheit, die Entstehung neuer ökonomischer Abhängigkeiten, Verteilung der Vermögen, die Gestaltung der Arbeit von morgen oder auch rechtliche Fragen wie die Haftung von autonom agierenden Maschinen [9].

Diese Punkte scheinen eine große Bedrohung für die gesamte Gesellschaft, als auch für das Individuum zu sein. Tatsächlich stehen diesen Risiken aber große Vorteile und positive Entwicklungen gegenüber: Der digitale Wandel bietet sehr viele Möglichkeiten für die Menschen, sich auf andere Tätigkeiten einzustellen. Vor allem die Tätigkeiten, bei denen der Mensch den Maschinen (noch) überlegen ist, wie Empathie und Kreativität, also Dinge, die den Menschen ausmachen.

Im weiteren Sinne wird der technologische Wandel zu einer neuen Definition von Arbeit einhergehen und die körperliche Arbeit wird gegenüber der geistigen Tätigkeit immer weiter zurückgestellt werden.

Beispiel sind Tätigkeiten in der Pflege, pädagogische Tätigkeiten und neue kreative Berufe, die an Bedeutung zunehmen werden. "Durch den materiellen Wohlstand werden diese Tätigkeiten nicht

nur ideell, sondern auch finanziell an Wertschätzung gewinnen. Dies ist bereits eine Entwicklung der vergangenen 50 Jahre - wenn man beispielsweise die zunehmende Anzahl der Künstler betrachtet - die sich in den nächsten 30 Jahren nochmals beschleunigen wird.

Der technologische Wandel wird also nicht nur Arbeitsplätze kosten, sondern für viele Menschen neue Chancen eröffnen. Damit möglichst alle an der Arbeitswelt teilhaben können, muss die Politik noch viele Weichen stellen - im Bildungsbereich ebenso wie bei Steuerfragen also der Umverteilung von Vermögen [10].

2.6 Zusammenfassung

Die Entwicklung der Automatisierung schreitet kontinuierlich voran. Grundlage für die Darstellung der einzelnen Handlungs-Ebenen bildet die Automatisierungspyramide. Die einzelnen Ebenen werden durch verschiedene Kommunikationstechniken miteinander verbunden und sind Ziel der Optimierung in der Smart Factory. Um die zukünftigen Herausforderungen zu meistern, sind technologische Grundlagen und Standards zu beschreiben und festzulegen.

Grundlegend für den zukünftigen digitalen Wandel ist die Abkehr von einer einheitlichen globalen Steuerung zu einer dezentralen Planung und Organisation in der Fertigung. Dies spiegelt sich auch in den 5 Paradigmen wieder, welche die 5 Grundprinzipien der Industrie 4.0 darstellen. Der Wandel ist notwendig, da sich die Komplexität im Umfeld der Unternehmen immer weiter erhöhen wird und mit einer dezentralen Steuerung dieser Komplexität in lokale Lösungen entgegengehalten werden kann.

Die wichtigste zukünftige Herausforderung besteht darin, die noch vergleichsweise abstrakten Prinzipien Menschzentrierung, Resilienz und Nachhaltigkeit in messbare, unternehmerisch handhabbare Konzepte zu überführen und dabei den fließenden Übergang von bestehender Industrie-4.0-Infrastruktur zu einer erweiterten Industrie-5.0-Praxis aktiv zu gestalten.

Offene Fragen bleiben bezüglich der Sicherheit, der Haftung von autonom handelnden Maschinen und den damit einhergehenden Folgen sowie der demografische Wandel und die politischen Veränderungen, die sich aus der fortschreitenden Technologisierung ergeben.

KAPITEL 3

Technologische Grundlagen und Standards

Lernziele

Nach der Bearbeitung dieses Kapitels werden Sie wissen, ...

- ... welche Möglichkeiten es zur Identifizierung von Objekten gibt.
- ... welche Beschreibungssprachen es gibt.
- ... was Ontologien sind und wie man sie einsetzt.
- ... was ein digitales Objektgedächtnis ist.
- ... welche Arten der Mensch-Maschine-Kommunikation bestehen.

Einführung

In der Automatisierungsbranche wächst die Forderung nach optimierten Produktionsabläufen und Transparenz. Deshalb wird das Know-how im Bereich der Automatisierungs- und Prozesstechnik mit der Entwicklung standardisierter, intelligenter Software-Produkte kombiniert. Das ermöglicht optimierte und transparente Fertigungsprozesse, die für eine hohe Qualität in der Produktion sorgen. Die Verknüpfung von Hard- und Software erzeugt dabei neue Synergien im Fertigungsprozess.

3.1 Identifizierung physikalischer Objekte

Um eine Vernetzung in Echtzeit der physikalischen Objekte wie Waren und Güter sicherzustellen, müssen diese in logistischen Abläufen zur Verfolgung eindeutig identifiziert werden. Dies wird durch automatische Identifikationsverfahren (Auto-)ID-Technologien sichergestellt.

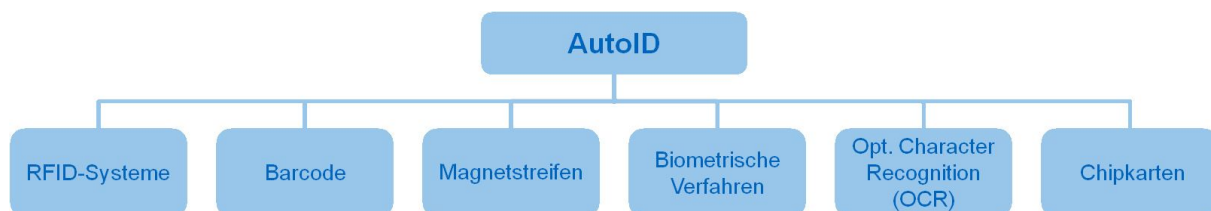


Bild 3.1: Automatische Identifikationsverfahren (Auto-)ID-Technologien

Hierbei spielen vor allem die **RFID-Technik** (Radio-Frequency Identification) und die Barcode-Technik eine wichtige Rolle in einer Smart Factory.

”Radio-Frequency Identification ist ein automatisches Identifikationsverfahren. Durch den Einsatz von Funkwellen im Radiofrequenzbereich speichert oder liest es mittels elektromagnetischer oder elektrostatischer Kopplung eines Schreib-/Lesegerätes und eines mobilen Datenträgers Informationen (meist eine ID-Nummer) dieses Datenträgers” [11].

Die RFID-Systeme sind aus **Transpondern**¹ und vernetzten Lesegeräten aufgebaut. Der Transponder ist hier ein Funketikett, das am Objekt platziert wird. Mit dem Lesegerät kann dieser Gegenstand dann drahtlos erkannt und ausgelesen werden. Das Lesegerät sendet die erfassten Daten anschließend über das Internet zur Weiterverarbeitung weiter.

Ein alternatives AutoID-Verfahren ist die Barcode-Technik. Der Barcode besteht aus einem Binärcode, der aus nebeneinander angeordneten Strichen (engl. Bars) und Lücken in unterschiedlicher Breite zusammengesetzt ist. Laserstrahlen tasten diesen Code ab, wobei durch die unterschiedlichen Reflexionen der Lichtstrahlen das Muster erkannt wird. Barcodes können als 1D-Code (Strichcode) oder 2D-Codes, z.B. einer Data Matrix bzw. sogenannten QR-Codes ausgeführt werden.



Bild 3.2: Barcode-Beispiele als 1D und 2D Ausführung

3.2 Formale Beschreibungssprachen und Ontologien

Sprache im Allgemeinen ist die Menge an Dingen und Regeln, die den entsprechenden Systemen der gegenseitigen Verständigung dient. Hauptsächlich beinhalten diese Systeme Alphabete, Regeln über den Aufbau von Ausdrücken, Vokabelmengen, Regeln über den Aufbau von Phrasen etc.

”**Ontologien** sind durch eine Sprache ausgedrückte formale Beschreibungen von Beziehungen zwischen Begriffen” [12]. In den Ontologien werden die Begriffe definiert, die zur Beschreibung von Wissen aus einem bestimmten Bereich verwendet wird. Neben maschinell interpretierbaren Begriffsdefinitionen werden darin die grundlegende Konzepte und Beziehungen zwischen den Inhalten hinterlegt.

Wenn komplexe Prozesse für den Menschen erfassbar werden sollen, muss auf strukturierte und graphische Elemente (z.B. Flussdiagramme) zur Modellierung zurückgegriffen werden. Die Herausforderung für die Beschreibung einer Smart Factory besteht darin, die notwendige Modellierung und Darstellung standardisiert umzusetzen. Dies wird z.B. durch die **Object Management Group (OMG)**² festgelegt.

Als Beispiel wurde das **Business Process Model und Notation (BPMN)**³ eingeführt, das die Darstellung mit einfachen Piktogrammen komplexe Geschäftsprozesse ermöglicht und für den Fabriklebenszyklus (FLZ) entworfen wurde.

-
- 1 **Transponder** ist ein Funk-Kommunikationsgerät, das eingehende Signale aufnimmt und automatisch beantwortet bzw. weiterleitet. Der Begriff Transponder ist ein zusammen-gesetzter Begriff aus Transmitter und Responder.
 - 2 **Object Management Group (OMG)** ist ein 1989 gegründetes Konsortium, das sich mit der Entwicklung von Standards für die hersteller-unabhängige Programmierung beschäftigt.
 - 3 **Business Process Model and Notation (BPMN)** ist ein Industriestandard der Object Management Group (OMG) und dient der grafischen Darstellung und Modellierung von Geschäftsprozessen.

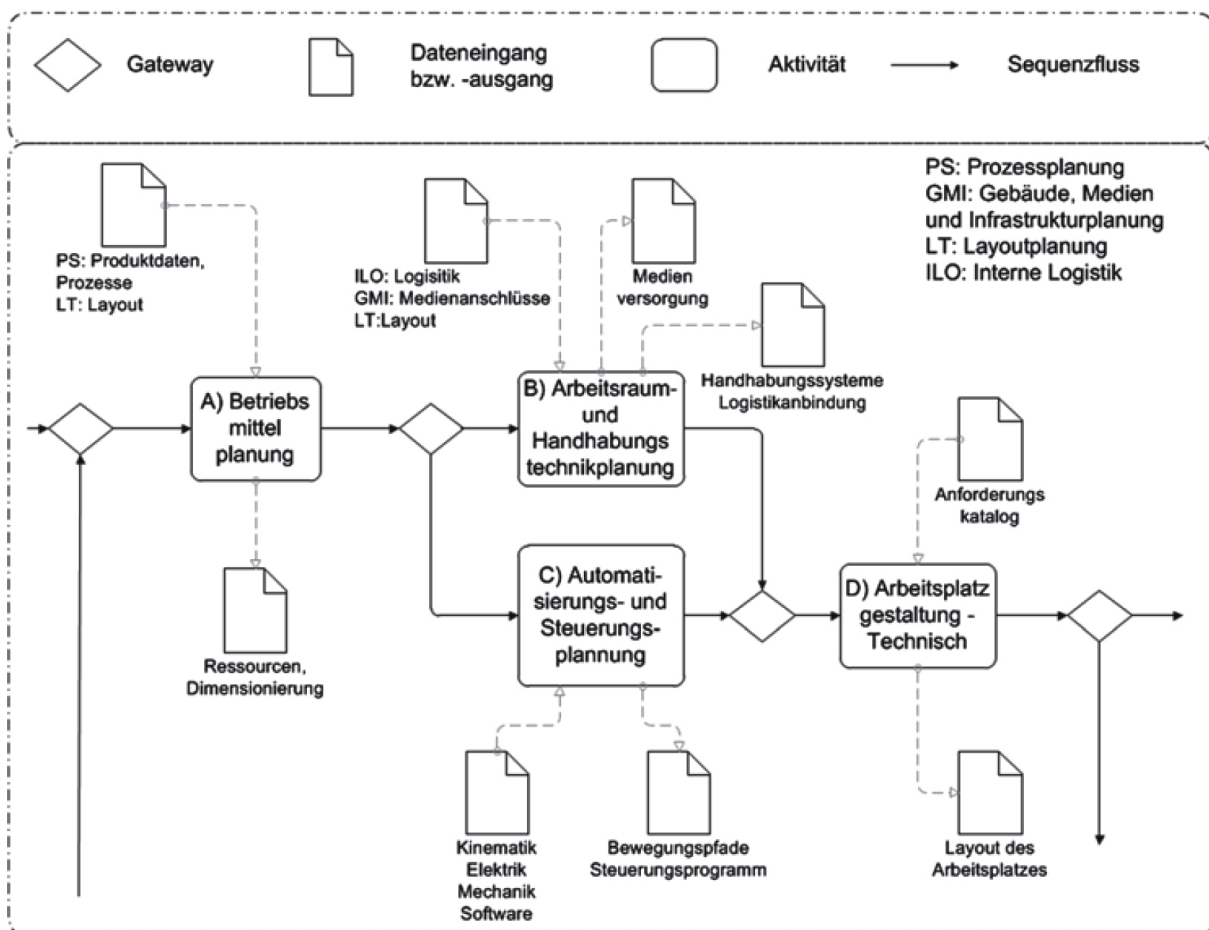


Bild 3.3: Modell einer Anlagenplanung mit grafischen Elementen nach BPMN

Eine weitere unabhängige Vereinigung ist das **World Wide Web Consortium (W3C)**. Es beschäftigt sich unter anderem mit der Standardisierung und Entwicklung geeigneter Beschreibungssprachen für sogenannte Fabrikdatenreferenzmodellen (z. B. für das Datenmanagement). Neben maschinell interpretierbaren Begriffsdefinitionen werden grundlegende Konzepte und Beziehungen hinterlegt.

Als Beispiel dienen drei Möglichkeiten zum Umgang mit Modellierungen, die **Unified Modelling Language (UML)**, **SysML (Systems Modeling Language)** oder auch **Web Ontology Language (OWL)**. UML ist Mitte der 90er Jahre mit dem Ziel entwickelt worden, die Vielzahl an bestehenden objektorientierten Methoden zu vereinheitlichen. Angestrebt wird ein ganzheitliches Modell dessen zentralen Bausteine strukturierende Modelle und das Datenmanagement sind.

Die Komplexität eines Produktionsunternehmens lässt sich wesentlich besser beherrschen, wenn ein ganzheitliches Modell zugrunde gelegt wird. Planung und ständige Anpassung aller beteiligten Strukturen und Prozesse werden durch die ganzheitliche Betrachtung wesentlich erleichtert. Durch die Unterteilung in sinnvolle Abschnitte kann der Lebenszyklus der Fabrik modularisiert und skaliert werden und damit eine Bereitstellung von Daten für den Nutzer anwendungsgerecht erfolgen.

Sind UML und SysML Modellierungssprachen denen eine grafische Programmierumgebung zugrunde liegt, ist OWL hauptsächlich als klassische Programmiersprache für die semantische Betrachtung im World Wide Web gedacht, die aus verschiedenen Klassen, Eigenschaften und Instanzen besteht.

3.3 Digitales Objektgedächtnis

Ein **digitales Objektgedächtnis (DOME)**¹ eines realen Gegenstandes ist ein digitaler Speicher, der alle relevanten Informationen die während seiner Lebensdauer ermittelt wurden, dauerhaft speichert und behält.

Die digitalen Gedächtnisse führen die Idee des Internets der Dinge im Bereich der Informationstechnologie, physische Objekte mit einer Internet-basierten virtuellen Identität auszustatten fort. Dabei fungieren mobile cyber-physische Systeme als Basis für solche Objektgedächtnisse, die in der Regel reale Gegenstände mit Sensorik und Verarbeitungskapazität ausstatten.

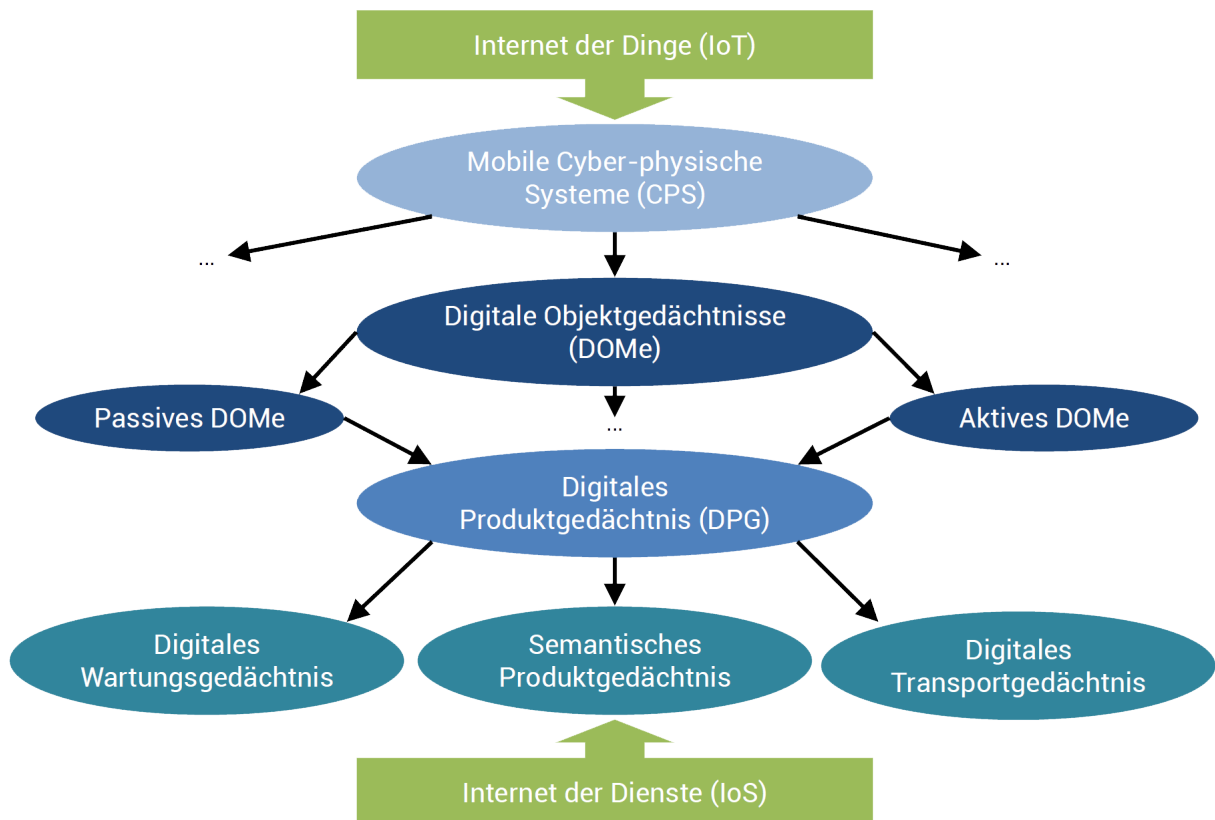


Bild 3.4: Objektgedächtnisse

Die Objektgedächtnisse lassen sich je nach Art der Ausstattung in passive oder aktive Gedächtnisse unterscheiden.

- Bei passiven Gedächtnissen ist die Identifizierung nur am physikalischen Objekt durch zusätzliche Sensorik und Auslesen in direkter Umgebung möglich.
- Von aktiven Gedächtnissen spricht man, wenn die Messungen und das Auslesen direkt am Objekt passiert.

Grundsätzlich können diese Objektgedächtnisse für beliebige Objekte genutzt werden, zum Beispiel für natürlich vorkommende Objekte oder auch bei Benutzertagebüchern.

Digitale Produktgedächtnisse (DPG) stellen eine Unterklasse der Objektgedächtnisse dar, die extra für bereits gefertigte Produkte definiert wurde deren Aufgabe es ist, die Daten eines

¹ Ein **digitales Objektgedächtnis** (DOME für Digital Object Memory) ist ein Datenspeicher, in dem fortlaufend alle relevanten Informationen zu einem konkreten physischen Objekt gesammelt werden.

Produktes während des typischen Produkt-Lebenszyklus von Beschreibung und Entwicklung über Produktion bis zum Recyceln abzubilden.

Die DPG lassen sich weiter unterteilen in **Digitale Wartungsgedächtnisse**, die die Aufgabe haben die Wartungsintervalle bzw. die zyklischen Sicherheitsüberprüfungen zu dokumentieren. Bisher wurde dies in Papierform an den entsprechenden Objekten bzw. Produktionsmaschinen hinterlegt. Modernes digitales Dokumentenmanagement wird diese Aufgabe nach und nach ersetzen.

Semantische Produktgedächtnisse sind eine weitere Spezialisierung die nicht nur maschinenlesbare, sondern auch semantische, also maschinen-verstehbare Informationen enthalten. Beispiele sind Kennzeichnungen von Produkten durch Prüfzeichen oder Prüfsiegel.

Digitale Transportgedächtnisse beinhalten alle relevanten Daten die zur Beförderung des Objektes notwendig sind. Zum Beispiel werden die zeitliche und örtliche Stationen der Produkte auf dem Produktionsweg durch die Fabrik zur späteren Nachverfolgung bei Qualitätsproblemen gespeichert. Außerdem werden diese Daten auch zur Materialbeschaffung oder Synchronisation mit den Produktionsmaschinen benötigt.

Durch die Speicherung der Objektdaten können die Informationen von jeder Anwendung genutzt werden die Zugriff auf die dazugehörigen Beschreibungen der entsprechenden Ontologien hat. Diese Informationen können dann noch zusätzlich mit Funktionen aus dem Internet der Dienste wie z.B. Wartungsdienstleistungen kombiniert werden.

3.4 Physikalische Situationserkennung

Der Begriff »Situation« ist als die Gesamtheit der Umstände in dem jeweiligen Moment aufzufassen. Durch die Erkennung dieser Situation sind Maschinen bzw. Roboter in der Lage bestimmte Verhaltensmuster zu verstehen und darauf entsprechend zu reagieren. Dazu ist es notwendig, dass Situationen durch Erfassung der Umwelt (Erfassen von Objekten der realen Welt, **Physical Awareness**) zur Analyse erfasst werden. Die heute üblichen Technologien dafür sind Sensorfusion, Mustererkennung und Situationserkennung mit Hilfe von Situationskarten [13].

Sensorfusion

Mit Sensorfusion werden mehrere unterschiedliche Sensoren verknüpft um mit ihren Daten zum einen eine Redundanz zu erhalten, zum anderen die Messdaten in der Qualität zu steigern. Somit können fehlerhafte Sensoren bzw. Signale erkannt werden und entweder korrigiert, oder zumindest Rückschlüsse auf den Systemzustand gewonnen werden.

Besonders bei sicherheitskritischen Systemen ist die Verwendung mehrerer unabhängigen Sensoren notwendig um Fehlentscheidungen zu vermeiden, die aufgrund fehlerhaften Messwerten zustande kamen. Außerdem können bestimmte Situationen nur mit der Verknüpfung verschiedenster Sensoren überhaupt erkannt werden. Als Beispiel dienen Sensoren zum autonomen Fahren, wo z.B. Kameras und Radarsensoren nur gemeinsam ein sicheres Überholmanöver durch deren Zusammenspiel ermöglichen können.

Mustererkennung

Die Mustererkennung (**Pattern Recognition**) beinhaltet Algorithmen und Systeme um aus vorhandenen Daten Muster zu erkennen. Dazu werden eingehende Daten mit bereits vorhandenen Mustern verglichen, erkannt und dann zu Muster Klassen zugeordnet. Die Mustererkennung ist für die physikalische Welt unerlässlich, da (ähnlich beim Menschen) Situationen nur durch die Verarbeitung von ungeordneten Datenmengen (Messwerten) hin zu Bedeutungserkennung erkannt werden können und somit eine Basis für eine umfassende Situationsbewertung schafft. Schwierigkeiten ergeben sich beispielsweise bei der Merkmalsauswahl (**»Feature Selection«**)

wo von Experten die Muster Klassen mittels Mustererkennungsalgorithmen mühsam eingestellt werden müssen um korrekt Situationen klassifizieren zu können.

Ein noch ungelöstes Problem bei der Mustererkennung ist die Verschiebung von bestimmten Muster Klassen bei längeren Betriebszeiten mit der Zeit (**»Drift«**).

Situationserkennung durch Situationskarten

Die Informationen für die physikalische Wirklichkeit, die von den Sensoren geliefert werden können in einer sogenannten »mentalen Karte« zur physikalischen Situation zusammengeführt werden. Es entsteht damit ein physikalisches und zeitliches Abbild der Realität in dem die erkannten Objekte und Umgebungseinflüsse als dynamische Belegungskarte abgelegt sind. In einer Smart Factory sollen alle Produkte und deren Aufenthaltsorte bekannt sein. Herausforderung hierbei ist z.B. die Objektzuordnung über die Zeit und die Veränderung der Klassenzuordnung, die bis heute nur über Approximation möglich ist.

3.5 (Teil-)autonomes Handeln und Kooperieren

Cyber-physische Systeme müssen miteinander kooperieren, um vorgegebene Ziele zu erreichen. Das Ziel der physikalischen Situationserkennung ist eine ganz oder teilweise autonom handelnde Produktionsstätte. Kooperierende Cyber-Physical-Systems sind in der Lage, aus den erkannten Situationen Handlungsstrategien auszuhandeln und selbständig umzusetzen. Technologien müssen zu kooperativen Erkennung, Bewertung und Abstimmung von Situationen beziehungsweise dem Aushandeln von Handlungsstrategien fähig sein. Unter Anderem müssen hier z.B. die Situationen notwendigerweise in Echtzeit durch entsprechende Technologien erkannt werden.

Diese Technologien bedienen sich hauptsächlich der Verfahren, Algorithmen und Ansätzen der **multikriteriellen Situationsbewertung** und der **Künstlichen Intelligenz (KI)**. Hauptsächlich sind dies die Bereiche Entscheiden, Planen und Prognose.

Da die Ziele oft unklar oder widersprüchlich sind, besteht eine besondere Herausforderung der Künstlichen Intelligenz im Rahmen eines autonomen Handelns, dass sie von einer umfassenden Folgenabschätzung begleitet wird (z.B. Gesellschaftseinfluss).

Folgende maschinenverarbeitende **Basistechnologien** sind entscheidend für das autonome Handeln:

Domänenmodell und Ontologien

Das relevante Wissen, um autonomes Handeln zu ermöglichen muss in Domänenmodellen beschrieben werden. Alle in einer **Domäne** vorhandenen Informationen werden in standardisierten Ontologien von Experten in hierarchischer Form erfasst und können übergreifend ausgetauscht werden. Weiteres Domänenwissen kann kontinuierlich in die Modelle eingebracht werden um die Systeme zu erweitern. Probleme bestehen bei unscharf formulierten Konzepten bei denen die Entscheidungen bzw. Ziele nur teilweise erfüllbar sind.

Sensor- und Aktortechnologie

Sensoren und Aktoren dienen der Beobachtung und Beeinflussung der physikalischen Umwelt der CPS.

Sensoren erfassen die physikalischen oder chemischen Eigenschaften ihrer Umgebung wie Temperatur, Feuchtigkeit, Schall oder die stoffliche Beschaffenheit qualitativ oder quantitativ und wandeln die erhaltenen Messwerte in digitale Form um.

Aktoren setzen digitale Stellwerte in mechanische Bewegung oder andere physikalische Größen wie Druck oder Temperatur um und beeinflussen so die Umgebung. Herausforderungen bestehen in

der Sicherstellung der Funktionalität, Skalierbarkeit und selbstkonfigurierende Regelungskonzepte der Sensoren und Aktoren

Kommunikationsinfrastruktur und - Plattform

Die steigende Verbreitung von CPS macht eine heterogene und hierarchisch organisierte Kommunikationsinfrastruktur notwendig. Die Kommunikationsnetze können unterschieden werden zwischen Persönliche Netze (Personal Area Networks, PAN), lokale Netze (Local Area Networks, LAN) und Weitverkehrsnetze (WAN). Diese Netze müssen durchgängig miteinander kommunizieren können.

In Verbindung mit den Mobilfunkstandards (3G, 4G, 5G, 6G) ist vor allem der aktuelle Standard 5G dafür entworfen echtzeitkritische Dienste und spontane Kommunikationsverbindungen zu unterstützen. Um die zuverlässige und durchgängige Kommunikation zwischen den Netzen zu gewährleisten werden die Netze ständig überwacht. Das Konzept der Selbstorganisierenden Netze (Self-organising Networks, SON) könnte eine Lösung dieser Probleme sein.

Effiziente parallele Verarbeitungseinheiten

Die immer weiter fortschreitende Integration von Systemen und damit Funktionen auf einzelnen Mikrochips bieten durch die Parallelisierung immer schnellere und komplexere Möglichkeiten. Allerdings werden zunehmend energiesparende, platzsparende und kostenoptimierte Lösungen benötigt. Weitere Herausforderungen sind dadurch die entstehenden komplexen Sicherheitsaspekte (IT-Sicherheit) sowie die Sicherstellung der Funktionen (z.B. bei Multicore-Prozessor-Systemen).

Verteilte stabile Regelungen

Verteilte Regelungen sind Regelkreise die auf unabhängigen komplexen Komponenten aufgebaut sind und hierarchisch und/oder örtlich verteilt sein können. Die Herausforderung ist es, diese Regelkreise stabil zu regeln und Verbindungsausfälle zu vermeiden oder zu erkennen und korrigieren. Als Beispiel dient im Automobil das dezentral gesteuerte Elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) das mit verschiedenen Sensoren ein Regelnetzwerk bildet.

Neben den technischen Fragestellungen nach einheitlichen Kommunikations-Schnittstellen und Protokollstandards muss noch betrachtet werden, ab wann ein System autonom oder intelligent handelt bzw. für wen sich juristischen Konsequenzen aus einem solchen Handeln ableiten. Hieraus ergeben sich weitere wissenschaftliche Fragestellungen für andere Fachbereiche, z.B. den Rechtswissenschaften, die gesondert betrachtet werden müssen.

3.6 Mensch-Maschine-Interaktion

Bei der **Mensch-Maschine-Interaktion (MMI)** geht es darum, wie Menschen und automatisierte Systeme miteinander interagieren und kommunizieren. Es handelt sich dabei längst nicht mehr nur um klassische Maschinen in der Industrie, sondern um Computer, digitale Systeme oder Geräte für das Internet of Things (IoT). Immer mehr Geräte sind vernetzt und führen Aufgaben automatisch aus. Die Bedienung all dieser Maschinen, Systeme und Geräte muss möglichst intuitiv erfolgen und darf den Nutzer nicht überfordern.

Cyber-Physical Systems unterstützen Menschen in ihren Handlungen und Absichten, übernehmen Aufgaben und bringen dadurch einen sehr hohen Nutzwert. Gleichzeitig entscheiden und handeln sie teilweise autonom und bestimmen dadurch menschliches Verhalten und soziale Prozesse mit. Diese Fähigkeiten bergen zwar ein großes Nutzenpotenzial; allerdings steht die Beherrschung der akzeptablen Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion noch weitgehend aus.

Damit die Kommunikation zwischen Mensch und Maschine reibungslos funktioniert, muss es Schnittstellen geben. Gemeint ist damit die Stelle oder Handlung, an der ein Nutzer mit der Maschine in Kontakt tritt. Einfache Beispiele sind Lichtschalter oder Pedale und Lenkrad im Auto: Wenn ein Schalter berührt, das Lenkrad gedreht oder ein Pedal getreten wird, wird eine Aktion ausgelöst. Ein System kann aber auch über Texteingabe via Tasten, eine Maus, Touchscreens, Sprache oder Gesten gesteuert werden.

Gesteuert werden die Geräte entweder direkt: Nutzer tippen dazu auf den Touchscreen des Smartphones oder geben mit der Stimme einen Befehl. Oder die Systeme erfassen ein Bedürfnis der Menschen automatisch: Ampeln schalten von selbst um, wenn ein Fahrzeug die Kontaktschleife auf der Straße überfährt. Bei anderen Technologien geht es weniger um die Steuerung; sie ergänzen Sinnesorgane des Menschen. Ein Beispiel dafür sind Virtual-Reality-Brillen. Darüber hinaus gibt es sogenannten digitale Assistenten: **Chatbots** etwa antworten automatisch auf Kundenanfragen.

Die Verwendung von Daten aus unterschiedlichen Quellen führt zwar zu einer Informationsgewinnung, für eine geeignete Unterstützung des Betriebspersonals sind allerdings folgende Herausforderung in der Mensch-Maschine-Schnittstelle zu bewältigen:

- Generierung der nutzbringenden Informationen aus der großen Datenmenge für die verschiedenen Rollen in einem Unternehmen,
- Darstellung der neu gewonnenen Informationen, um die Vorgänge für den Menschen transparent und nachvollziehbar zu gestalten,
- Aufbereitung der Informationen für verschiedene Displaygrößen (Smartphone, Tablet, Monitor)
- Bereitstellung für unterschiedliche Betriebssysteme (Plattformunabhängigkeit).

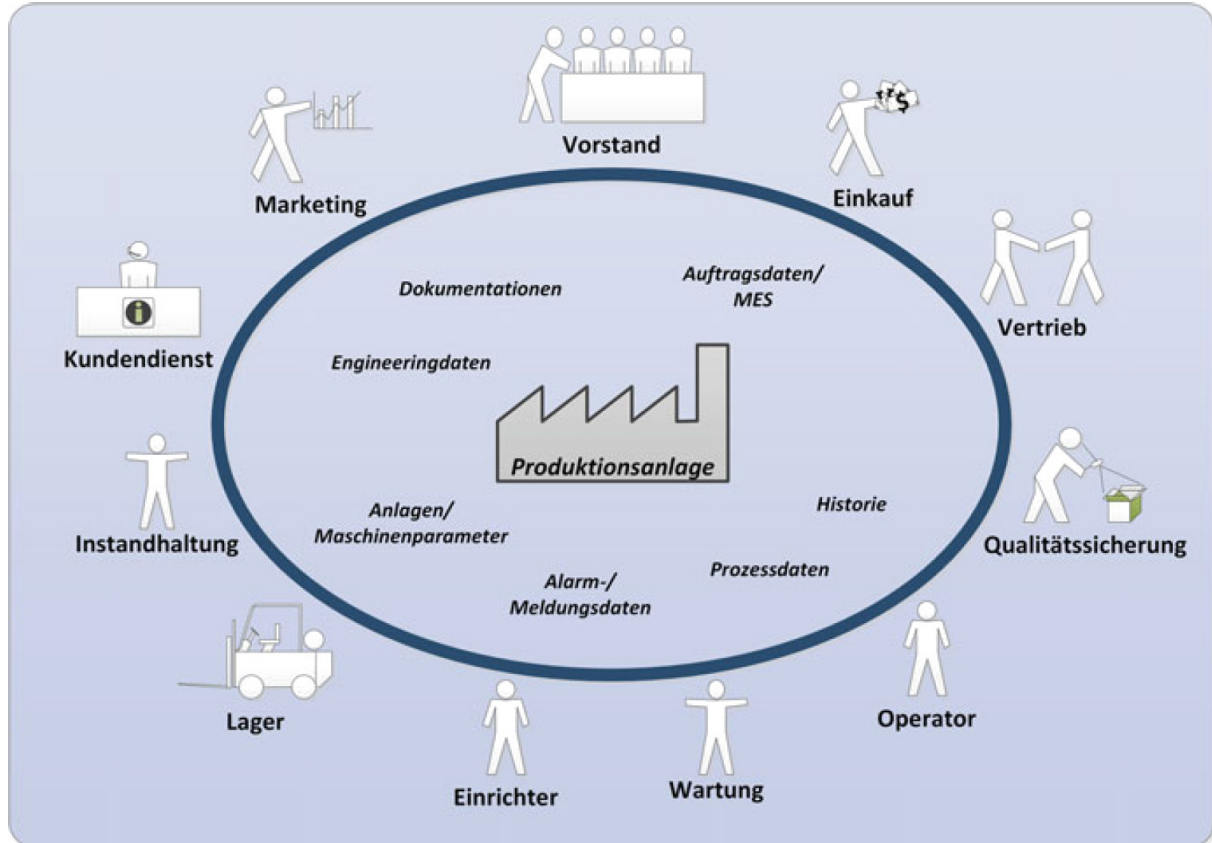


Bild 3.5: Rollen und Datenklassen in einer Produktionsanlage

Technologien

- Sprach- und Gestensteuerung
- Augmented Reality (AR)
- Social Networks/Informationssysteme (Chatbots)

Die Mensch-Maschine-Interaktion ist mit Sprach- und Gestensteuerung sowie Virtual, Augmented und Mixed Reality längst nicht am Ende ihrer Möglichkeiten. In Zukunft werden immer mehr Daten mit verschiedener Sensoren kombiniert (Sensor Fusion), um auch komplexe Vorgänge zu erfassen und zu steuern.

Gleichzeitig wird es immer weniger der bislang üblichen Eingabegeräte, wie Fernbedienungen, Computertastaturen oder Ein- und Ausschalter geben. Wenn Computersysteme, Geräte und Maschinen ständig hinzulernen und Zugriff auf mehr Daten bekommen, werden sie dem Menschen auch immer ähnlicher:

Sie können dann die Aufgabe von Sinnesorganen übernehmen. Eine Kamera ermöglicht das Sehen, ein Mikrofon das Hören, mit Sensoren ausgerüstete Kleidung ermöglicht das Fühlen.

3.7 Maschine-Maschine-Kommunikation

Um Informationsaustausch ohne menschlichen Eingriff zwischen Maschinen zu ermöglichen, ist eine Maschine-zu-Maschine-Infrastruktur (M2M) notwendig. Im engen Zusammenhang steht M2M mit IoT, Industrie 4.0 und dem Internet of Everything. Anwendungsgebiete erstrecken sich über alle Branchen und Bereiche wie Logistik, Verwaltung, Produktion, Sicherheit und alle Arten von Fernzugriffen.

Möglich macht dies die Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT), wobei aktuell noch nicht alle Geräteplattformen standardisiert sind, sondern viele M2M-Systeme für ihre spezifischen Anforderungen entworfen werden. Schlüssel-Komponenten bilden ein Netzwerk von Sensoren, RFIDs, kabelgebundene und vor allem mobile Funknetzwerke wie WLAN und G5.

Damit die beteiligten Geräte selbständig miteinander kommunizieren können, muss gewährleistet sein, dass nicht nur ein gemeinsames Vokabular vorhanden ist, sondern dass diese auch semantisch verknüpft sind. Erst diese Verknüpfung der Begriffe macht das Verstehen zwischen den teilnehmenden Objekten möglich. In der Vergangenheit haben Hersteller, um sich gegenüber der Konkurrenz den Markt abzusichern, eigene lokale Lösungen und Kommunikations-Protokolle ihrer Endgeräte entwickelt. Diese Abschottung hat zum Nachteil, dass die Geräte untereinander nur sehr schwer bis gar nicht zu vernetzen sind.

Verschiedenen Standardisierungsorganisationen entwickeln deshalb übergreifende Plattformen, um eine einheitliche Kommunikation zwischen den stark anwachsenden Endgeräten zu ermöglichen.

Als Beispiel für ein aktuelles Standard-Kommunikations-Protokoll ist die **OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture)**¹

Dieses Protokoll wird seit 2006 von der OPC Foundation, den 600 führenden Automatisierungsherstellern wie z.B. Siemens, Rockwell und Mitsubishi Electric entwickelt. Aktuell ist die Version 13 (IEC 62541-13, OPC Unified Architecture - Part 13) veröffentlicht und hat zum Ziel, die Kommunikation von der Feldebene bis in die Cloud zu vereinheitlichen. Außerdem sind bereits semantische Verknüpfungen und Sicherheitsaspekte bereits auf Feldebene vorgesehen.

Die Basis von OPC UA besteht aus vielen Unterstandards wie dem zeitoptimierten Ethernet (TSN, Time-Sensitive Networking) und wird seit 2018 auch als OPC UA over TSN bezeichnet, wobei hier der Fokus auf Echtzeitübertragungen liegt.

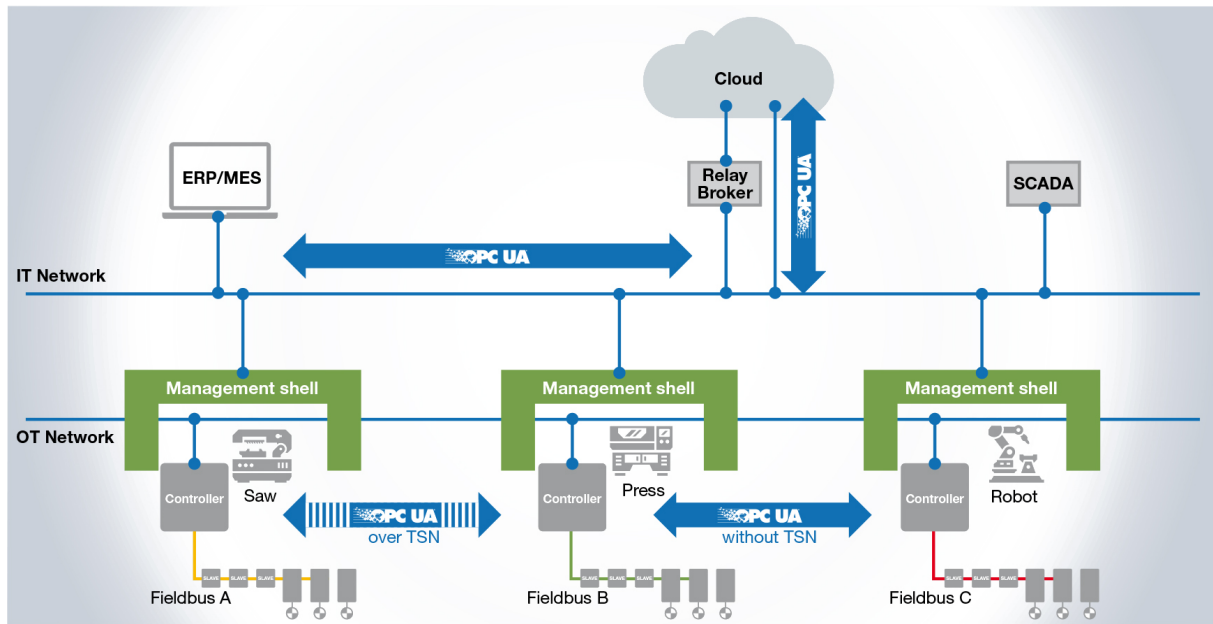


Bild 3.6: OPC UA, M2M Standardisierung von der Feldebene bis zur Cloud

3.8 Zusammenfassung

Zu den technologischen Grundlagen und den Standards, auf denen eine Smart Factory basiert, zählen die Identifizierung von Objekten, die Beschreibungssprachen, digitale Objektgedächtnisse und das Erkennen von Situationen. Basierend auf diesen Technologien ist damit teilautonomes Handeln und in Zukunft auch durchgängig selbständiges Agieren der einzelnen Systeme in der Produktion möglich.

Die Folgen des autonomen Handelns werfen weitere Fragen z.B. in Bereichen der Gesellschaft sowie juristischer Natur auf. Da die Vorgänge immer komplexer werden, gewinnen auch Technologien zur Kommunikation zwischen Mensch-Maschine und Maschine-Maschine Interaktion immer mehr an Bedeutung.

Hierbei ist von entscheidender Bedeutung, dass nicht nur ein gemeinsames Vokabular besteht, sondern die Begriffe auch semantisch verknüpft werden, und Verstehen ermöglicht wird. Zum Beispiel wird das World Wide Web aktuell in diese Richtung weiterentwickelt.

¹ **OPC UA** steht für »Open Platform Communications Unified Architecture« und beschreibt eine Sammlung von Spezifikationen, die die Kommunikation im Umfeld der Industrieautomation und der M2M-Kommunikation standardisieren.

KAPITEL 4

Grundkonzepte einer Smart Factory

Lernziele

Nach der Bearbeitung dieses Kapitels werden Sie wissen, ...

- ... wie eine auftragsgesteuerte Produktion aussieht.
- ... wie die Menschen in der Produktion unterstützt werden können.
- ... wie Produkte immer intelligenter werden und neue Dienstleistungen entstehen.

4.1 Auftragsgesteuerte Produktion

Die Marktanforderungen steigen durch schnellere Innovations- und Produktzyklen immer weiter an. Nicht nur Produkte, sondern auch Produktionsmittel verändern sich immer schneller. Die Unternehmen reagieren auf die steigenden Marktanforderungen mit einer **auftragsgesteuerten Produktion (AGP)**. Der Auftrag wird in den Mittelunkt gestellt und es gilt, die Produktionsressourcen optimal und dynamisch zusammenzustellen.

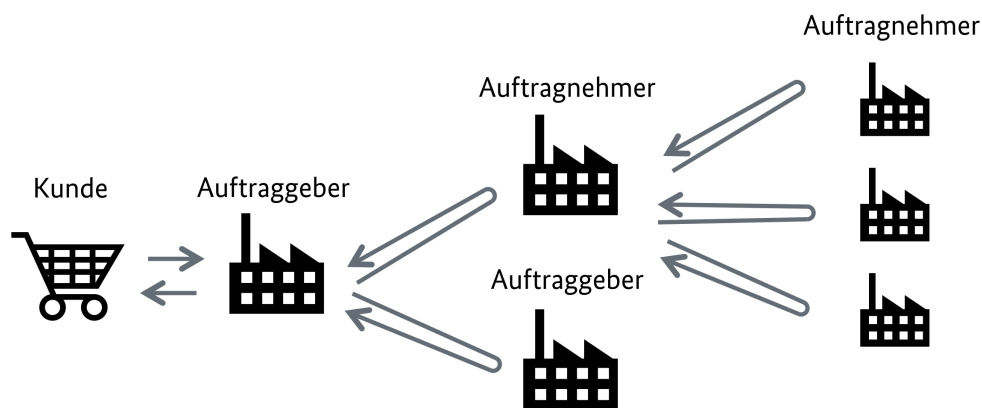


Bild 4.1: Auftragsgesteuerte Produktion (AGP)

Dies wird dadurch erreicht, indem die Produktion immer mehr vernetzt wird (auch über den Produktionsstandort hinaus) und somit flexibel auf sich verändernde Markt- und Auftragsbedingungen reagiert werden kann. Außerdem sind die Unternehmen damit in der Lage die Reaktionszeiten zu verbessern und die Fertigungsketten in Bezug auf Kosten und Zeit zu optimieren.

Die auftragsgesteuerte Produktion ist dabei auf die Standardisierung aller Prozesse und die Selbstbeschreibung der Produktionsmittel angewiesen. Das Ziel ist die automatisierte Auftragsplanung, -vergabe und -steuerung um alle notwendigen Fertigungsschritte und Produktionsmittel miteinander zu kombinieren.

Zum Beispiel können Unternehmen eigene, freie Fertigungskapazitäten anderen Produktionsunternehmen anbieten um Maschinenstillstände zu vermeiden und die Auslastung des eigenen Maschinenparks zu gewährleisten. Auftragsschwankungen können so beiderseits aufgefangen werden. Es sollte das Ziel sein, dass die Produktionskapazitäten möglichst einfach eingebunden werden und der Produktionsablauf der beiden Standorte autonom abläuft um Verzögerungen an den Schnittstellen zu vermeiden. Speziell die Auftragsvergabe sollte weitestgehend automatisiert ablaufen.

Unerwartete Auswirkung auf die Wertschöpfungsketten ergeben sich bezüglich der Wettbewerbssituation am Markt. Durch die gegenseitigen Verflechtungen und Rollen in der Produktion (Kunde/Lieferant), können sich gegenseitige Konkurrenzsituationen ergeben die man beachten muss. Außerdem sinken die Märkte der Maschinenlieferanten, da die Auslastung der Maschinenparks der Kunden steigen wird.

Diesen eher negativen Auswirkungen stehen die flexiblen Möglichkeiten Produktionskapazitäten umzuschichten entgegen. Außerdem werden Investitionsmittel nicht gebunden, da auf externe Produktionsmodule kurzfristig zurückgegriffen werden kann und die Kapazitätsauslastung können optimiert werden.

4.2 Bündelung von Maschinen- und Produktionsdaten

In der Smart Factory werden von virtuellen Plattformen Maschinen- und Produktionsdaten gespeichert und gebündelt. Durch intelligentes Zusammenführen dieser Daten ergeben sich Erkenntnisse für neue Dienste für die Kunden oder decken Optimierungsmöglichkeiten in der Produktion auf.

Datengetriebene Services (value based services, VBS)

Im zunehmend vernetzten industriellen Umfeld gewinnen neue Serviceangebote immer mehr an Bedeutung und verdrängen altbewährte Wertschöpfungsprozesse. Beispiele findet man im Endkundenbereich, wo Streamingdienste die CD- und DVD-basierte Medienindustrie immer weiter verdrängen werden. Auch bieten z.B. Navigationsgeräte nicht mehr nur Routenplanung, sondern auch Zusatzdienstleistungen wie Stauberichte in Echtzeit, die durch die vorhandenen Nutzerdaten ermöglicht werden.

Im Mittelpunkt stehen IT-Plattformen, die ausgehend von der Nutzung der Produkte/Maschinen, anfallende Daten sammeln, analysieren, aufbereiten und dadurch neue individuelle und nutzergerichte Dienste ermöglichen. Diese neuen Dienste können zum Beispiel für die interne Produktion wichtig sein:

- Wartungstermine zum optimalen Zeitpunkt
- Rechtzeitige Bereitstellung der Prozessparameter am Fertigungsplatz

Das Ziel ist, dass man die anfallenden Daten im Produktionsprozess durchgängig verwendet um die Produktion weiter zu optimieren und auf die sich verändernden Einflüsse (Rohstoffe, Fertigungsbauteile) schnell und flexibel am besten autonom einstellen kann. Es werden dadurch nicht nur die Produktionsprozesse optimiert, sondern im besten Fall auch neue Wertschöpfungselemente erzeugt.

Im industriellen Umfeld agieren hauptsächlich zwei Akteure die mehr oder weniger zusammenarbeiten:

- Produktprovider (Hersteller von Produktionsanlagen / Service Provider)
- Kunde (Produktnutzer, Betreiber von Produktionsanlagen)

Durch die Einführung von »value based services« tritt in der klassischen Wertschöpfungskette ein neuer Akteur auf und besetzt den Platz zwischen Kunde und Produktprovider. Dieser neue Akteur, der ein eigenständiges Unternehmen, als auch der Produkt-Provider sein kann, betreibt die IT-Plattform die die anfallenden Daten bereitstellt (Plattform-Provider). Diese bereitgestellten Daten werden als

Rohstoff an den Service Provider weitergereicht, die damit neue Dienstleistungen den Kunden anbieten können.

Der Service-Provider besetzt somit die Schnittstelle zwischen Endkunden und dem Produkt-Provider was dazu führen kann, dass die Wertschöpfungsanteile teils beträchtlich verschoben werden können. Aus dieser Sichtweise ist es für die Produkt-Provider essentiell hier am Wertschöpfungsprozess teilzuhaben und entsprechende Plattformen zu nutzen und basierend auf diesen, eigene Services anzubieten.

Durch die neuen Akteure werden für alle Beteiligten Mehrwerte geschaffen. Die Kunden erhalten z.B. durch optimierte Anpassung des Produktes bessere Wartungsmöglichkeiten und Einsatzmöglichkeiten. Die Produkt-Provider erhalten bessere Einblicke in die Produktbenutzung der Kunden und kann als Betreiber der Plattform neue Dienstleistungen anbieten sowie die Kundenbindung steigern, was dazu führt, dass der Anteil der Wertschöpfung steigt.

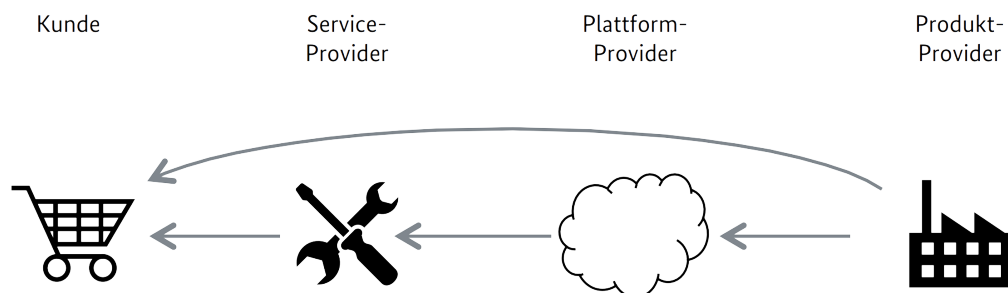


Bild 4.2: Datengetriebene Services (value based services, VBS)

4.3 Unterstützung des Menschen in der Produktion

Durch die Digitalisierung sind immer mehr Menschen in der Lage die komplexer werdenden Situationen durch Informationsaufbereitung zu bewältigen. Im Fokus steht dabei die Mensch-Technik-Interaktion (MTI). Dabei helfen z.B. die persönlichen Assistenten in Form von Smartphones oder Tablets mit ihren Apps, indem die Termine auf die Verkehrslage automatisch angepasst werden, zur nächsten Tankstelle hingewiesen wird, Restaurants vorgeschlagen werden, Fremdsprachen Übersetzt werden und vieles mehr.

Auch in der industriellen Produktion führt die Digitalisierung dazu, dass die Menschen im Unternehmen immer mehr bei komplexen und schwierigen Situationen unterstützt werden und damit sicherer und schneller zu Bewertungen kommen. Der sichere Umgang mit persönlichen Daten spielt hierbei immer die entscheidende Rolle.

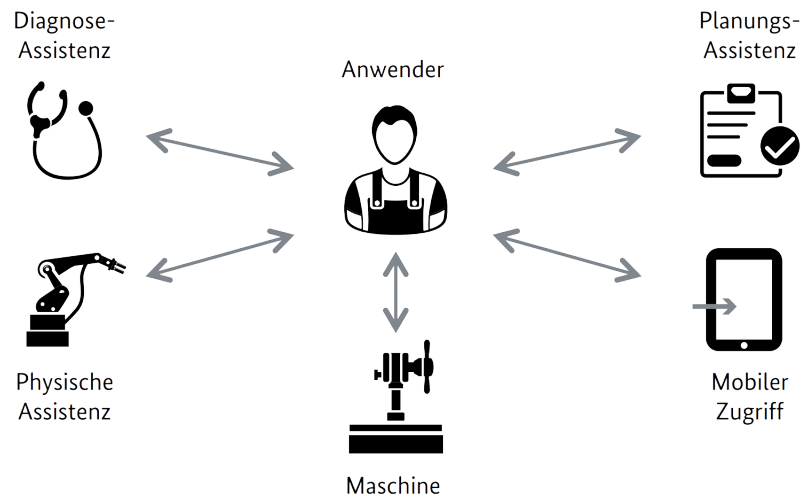


Bild 4.3: Mensch-Technik-Interaktion in der Produktion

Je nach Rolle des Menschen im Unternehmen bzw. in der Produktion unterstützt die Technik an unterschiedlichster Stelle. Zum Beispiel werden Menschen bei schwerer und komplexer körperlicher Arbeit unterstützt (Fähigkeitsverstärker). Außerdem kann die Technologie bei der Analyse und Bewertung zur Entscheidungsfindung beitragen (Assistenzfunktion). Es kann z.B. örtlich unabhängig unterstützt werden oder auch mit spezielle Situationen angepasste Lernsystemen unterstützt werden.

Mit den immer flexibleren und intelligenter werdenden Systemen kann sich der Mensch weiter um übergeordnete Aufgabenstellungen ausrichten. Körperlich anstrengende, monoton sich wiederholende Aufgaben sowie sehr komplexe Aufgabenstellungen können von Maschinen übernommen werden und schaffen so Freiräume die für Arbeitsinhalte und hochwertigeren Tätigkeiten wie z.B. im Qualitätsmanagement oder im Sicherheitsbereich vorbehalten sind. Dabei wird zudem die Motivation der Mitarbeiter gestärkt.

Zusätzlich entstehen z.B. durch individuelle ergonomische und sprachliche Anpassung zunehmend attraktivere Arbeitsplätze für die Menschen in der Produktion. Die Motivation wird z.B. durch individuelle Lernmaßnahmen für neue Arbeitsmethoden gesteigert und Frust bei der Weiterbildung vermieden. Weitere Unterstützung ergeben sich durch Einsatz von Augmented Reality in verschiedensten Situationen von Wartung bis Qualitätsmanagement oder Remote-Zugänge für Experten an unterschiedlichsten Orten.

Die fortschreitende Technologisierung in der Produktion führt zu veränderten Arbeitsinhalten auf der gesamten Wertschöpfungskette und damit zu einer neuen Arbeitsorganisation. Voraussetzung dieses Wandels ist, dass alle Mitarbeiter im Unternehmen transparent und umfassend über die Veränderungen informiert und über Chancen und Risiken aufgeklärt werden. Gerade die Weiterqualifizierung der Mitarbeiter in Bezug auf IT-basierten Entscheidungsunterstützung wird für jeden einzelnen Mitarbeiter immer wichtiger und ermöglichen diesen vielfältigere und auf allen Hierarchiestufen höhere Entscheidungsfreiheiten.

Da die Technologien zunehmend Komplexität verbergen und zur Entscheidungsfindung maßgeblich die Menschen beeinflussen, wird immer mehr auch der Fokus auf die Folgen dieser Entscheidungen ins Zentrum rücken. Die Diskussion um Veränderung der Arbeitsinhalte muss deshalb auch um die Aufteilung der Verantwortung erweitert werden.

Prinzipiell eröffnen sich für den Arbeitgeber durch die Digitalisierung eine Flexibilisierung des Personalwesens indem Mitarbeiter ohne lange Einarbeitungszeit durch flachere Strukturen eingesetzt werden können. Durch Telearbeit können Reisekosten und Reisezeiten trotz voranschreitender Globalisierung eingespart werden. Unternehmen profitieren direkt durch die

Attraktivität des Arbeitsplatzes und können dadurch leichter gut ausgebildete Mitarbeiter finden.

4.4 Intelligente Produkte und Betriebsmittel

Um eine Smart Factory betreiben zu können, werden neben mittels CPS die Produkte selbst und die Betriebsmittel wie Maschinen mit Intelligenz versehen. Ein intelligentes oder auch smartes Objekt im Allgemeinen ist ein Objekt, das durch die Integration von Informationstechniken über die eigentliche Bestimmung des Objektes hinausgeht und weitere Funktionen und damit Einsatzmöglichkeiten erlaubt.

Intelligente Produkte werden künftig gleich aus sensorischen Materialien hergestellt. Deren Vorprodukte enthalten ebenfalls sensorische Eigenschaften und sind miteinander über verteilte Netzwerke verknüpft. Durch die Erfassung der vielfältigen Daten beim Herstellungsprozess sind Störungen bereits dann zu erkennen bevor Auswirkungen auf die Produktion stattfinden können (predictive maintenance). Daten die bei den Betriebsmitteln anfallen können auf die intelligenten Produkte übernommen werden um dessen Eigenschaften zu präzisieren.

Die implementierte Intelligenz wirkt als Intelligenzverstärker und hat so entscheidenden Einfluss auf Engineering, Produktion, Wartung und Logistik. Vom Funktionsumfang kann man bei diesen smarten Objekten nach Wikipedia zwischen 5 Bereichen unterscheiden:

- Identifikation und Datenspeicherung
- Sensorik zur Erfassung der Umwelt
- Aktoren zur Beeinflussung der Umwelt
- Elektronische Datenverarbeitung und Entscheidungsunterstützung
- Kommunikation und Netzwerkfähigkeit

Im industriellen Umfeld wird noch nach drei weitere Kategorien unterschieden. Dazu ist mehr oder weniger eingebettete Informationstechnologie notwendig. Im Einzelnen sind dies:

- Echtzeiterfassung
- Dezentrale Datenerfassung
- Vernetzung

Vor allem die Vernetzung der Produkte und Betriebsmittel ermöglicht den Datenaustausch zwischen den beteiligten Objekten. Dadurch ist es möglich, die Produktion und deren Betriebsmittel zeitnah zu planen, steuern und alle entsprechenden Prozesse zu optimieren. Die Kommunikation zwischen Produkt und Betriebsmittel führt z.B. dazu, dass die Produkte den Betriebsmitteln, also den Maschinen mitteilen welche Programme eine CNC-Maschine bereitstellen soll.

Hauptsächlich wird dies vor allem in der Logistik ausgenutzt, um z.B. die Produkte selbständig zu ihren Produktionsmaschinen durch die Fabrik zu navigieren. Intelligente Produkte können durch die eingebettete Intelligenz natürlich auch im späteren Endkundengeschäft weiter Daten sammeln und für Smart Services verwendet werden.



Bild 4.4: Intelligente Produkte

4.5 Smart Services

Smart Services sind eine direkte Folge der konsequenten Digitalisierung und damit Funktions-Erweiterung der Produkte durch intelligente Informations- bzw. Kommunikationstechnik. Das Konzept ist sehr eng mit dem sogenannten Internet der Dinge (IoT) vernetzt. Produkte, die bereits während der Entstehungsphase in der Smart Factory mit eingebetteter Intelligenz versehen wurden, können natürlich auch nach Verlassen der Produktion beim Kunden weiter Daten aufnehmen, verarbeiten, versenden und empfangen. Dadurch, dass die Produkte über das IoT über Plattformen kommunizieren können, werden völlig neuartige Dienstleistungen möglich, die bisher allein aus Kostengründen schon nicht denkbar waren.

Die Produkte sammeln im Einsatz beim Kunden permanent Daten und werten diese aus. Riesige Datenmengen entstehen z.B. durch Aufnehmen von Umgebungseinflüssen und Nutzerverhalten. Aus diesen sogenannten Big Data entstehen durch Algorithmik, Mustererkennung und Datenfusion neues Wissen. Basierend auf diesen „Smart Data“ können nun die Daten aller Kunden auf einer Plattform zusammengeführt werden. Daraus lassen sich wissensbasierte Dienstleistungen („Smart Services“) generieren. Man kann Schlüsse aus dem Verhalten der Nutzer ziehen (Echtzeit-Staumelder) und diese den Kunden als zusätzliche Dienstleistungen anbieten. Die Geschäftsmodelle werden somit über IoT Plattformen erweitert und es können erweiterte Wertschöpfungs- und Beschäftigungspotentiale erschlossen werden.

In Zukunft wird ein riesiges „Online-Dienste-Universum“ entstehen, indem über Aktoren bei den Kunden direkt Einfluss auf die Umwelt genommen werden kann. Beispiele sind Apps die die Gebäudetechnik vollautomatisch steuern wie Heizung, Klimaanlage und Licht (z.B. das Herablassen von Jalousien). Alle Bereiche des täglichen Lebens werden mit diesen neuen intelligenten Diensten durchdrungen (Business, Freizeit, Kultur, Bildung, etc.).

Das Resultat wird eine Renaissance der Online-Marktplätze bewirken [4]. Zu verdanken ist dies hauptsächlich der sich neu entwickelnden semantischen Technologie und des Cloud-Computing, also den IT-Plattformen. Die Verarbeitung der riesigen Datenmengen als Informationsüberfluss hin zu einem präzisen Antwortverhalten ist der Schlüssel zum Erfolg. Die semantisch beschriebenen Dienste können wiederverwendet werden, zu Mehrwertdiensten kombiniert und flexibel erweitert werden. Dadurch, dass diese Daten und Dienste auf einer offenen Plattform allen Marktteilnehmern offen stehen ist es ihnen damit sehr einfach möglich neue webbasierte Anwendungen,

Dienstleistungen und Geschäftsmodelle zu entwickeln.

Die Entwicklung der Smart Services führt dazu, dass es den Unternehmen und Verbrauchern ermöglicht jederzeit und von überall aus auf diesen Datenpool von Dienstleistungen, Inhalte und Wissen zuzugreifen. Es ermöglicht auch kleinen Unternehmen wie Startups und Ich-AGs enorme Entwicklungspotentiale, die mit innovativen Servicemodulen auch großen Unternehmen Konkurrenz machen und schnelles Wachstum erzielen können.

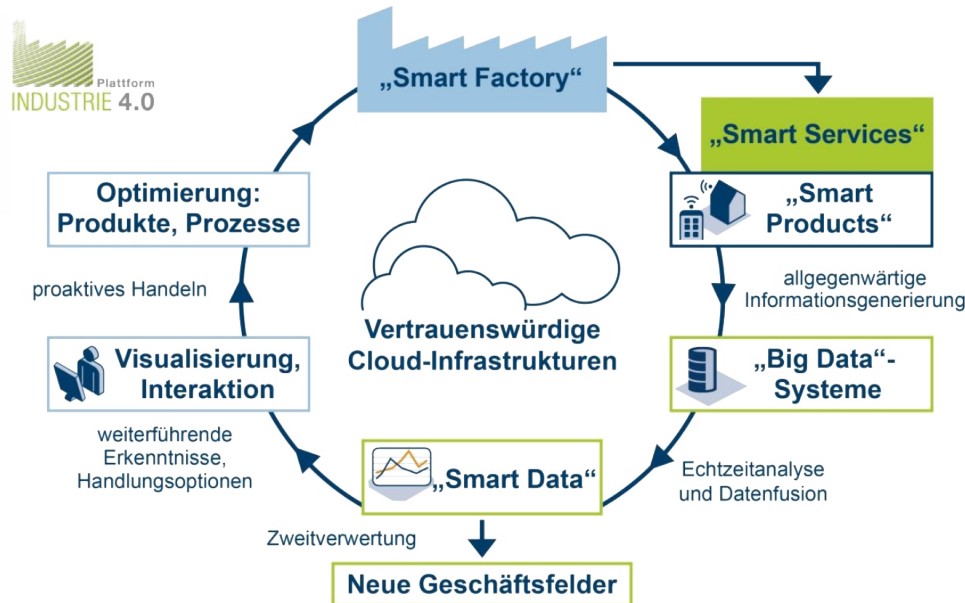


Bild 4.5: Smart Services

4.6 Zusammenfassung

In Zukunft werden Unternehmen die Aufträge in den Mittelpunkt setzen und damit autonom handelnde Produktionsstätten schaffen, die auf Markt- und Auftragsschwankungen flexibel und schnell reagieren können. Virtuelle Plattformen bündeln Maschinen- und Produktionsdaten. Werden diese Daten intelligent zusammengeführt, eröffnen sie Erkenntnisse für neue Services für den Kunden oder zeigen dem Unternehmer Optimierungsmöglichkeiten seiner Produktion auf.

Für den Menschen in der Produktion bedeutet dies permanente Weiterbildung und das Erkennen von Chancen und Risiken, die die neuen Technologien bieten. Intelligente Produkte und Betriebsmittel haben als Ziel die autonome Fabrik und werden durch neue Dienstleistungen, die Smart Services weiter auf den Markt drängen. Gerade die neuen Smart Services bieten durch den einfachen Zugang über IT-Plattformen zu Daten und Datendiensten enormes Wachstumspotential auch für kleinere Unternehmen.

KAPITEL 5

Referenzarchitekturen

Lernziele

Nach der Bearbeitung dieser Lektion werden Sie wissen, ...

- ... was Referenzarchitekturen sind.
- ... welche Zweck Referenzarchitekturen haben.
- ... welche unterschiedlichen Normungsaktivitäten existieren.
- ... wie Konsortien aus Wirtschaft und Wissenschaft zur Normung beitragen.
- ... was die RAMI4.0 Referenzarchitektur bedeutet

Einführung

Referenzarchitekturen werden in der Industrie mit unternehmenseigenen Lösungen den Kunden (Anlagenbauer und Gerätehersteller) zur Verfügung gestellt. Damit wird z.B. die RAMI 4.0-Integration der Referenzarchitekturebenen, Kommunikation und der Informationsfluss beim Kunden unterstützt und vereinfacht. Gerätehersteller können mit dieser Implementierung die Daten und Informationen sehr einfach von der Steuerungsebene der Feldgeräte auf höhere Ebenen weiterleiten.

Durch sogenannte EDGE-Gateways ist es den Kunden damit möglich eine durchgängige Vernetzung der Maschinen und Anlagen bis zur Cloud zu erreichen. Vorteile sind die Skalierbarkeit und durch die offene und plattformunabhängige Lösung eine an zukünftige Anforderungen anpassbare Architektur.

Ein weiterer Vorteil für die Kunden besteht in der unveränderten Weiterverwendung der kunden-eigenen Systeme auf Feldbus-Ebene wie z.B. eigene SPS-Steuerungen und das vertraute und kostengünstige IT-Netzwerk. Möglich ist dies, indem die Diagnosedaten vom Edge-Gateway aus den Feldgeräten der untersten Ebene ausgelesen werden und durch Browser oder App aufbereitet, auf die Endgeräte wie Tablets oder Smartphones übertragen werden.

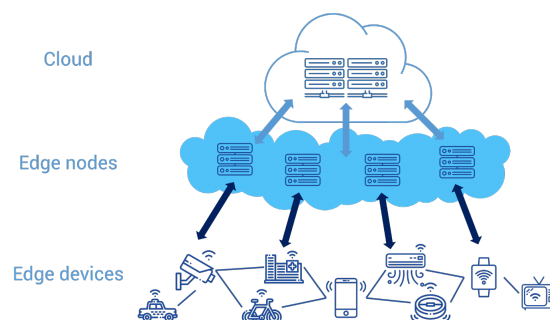


Bild 5.1: EDGE-Gateways

5.1 Zweck und Eigenschaften von Referenzarchitekturen

Als **Referenzarchitektur** wird im Allgemeinen in der Informatik ein idealtypisches Modell bezeichnet, das die Basis für alle weiteren Anwendungen und Spezialfälle als Grundlage dient und für die Klasse von zu modellierenden Modellen und Architekturen steht.

Erforderlich sind allgemeine Referenzarchitekturen, die die Anforderungen verschiedener Hersteller vereinigt. »Die Referenzarchitekturen sind unabhängig von konkreten Technologien und Produkten gehalten um die technisch und wirtschaftlich optimale Lösung zu erhalten« [14].

Jedoch schränkt eine zu frühe Festlegung auf eine Architektur und Funktionen eines Herstellers den Handlungsspielraum beim Entwurf des Gesamtsystems stark ein.

Die Umsetzung der Digitalen Fabrik erfordert ein hohes Maß an einer durchgängigen Integration und Standardisierung von Methoden und Werkzeuge und deren Schnittstellen. Basis bilden die **Referenzmodelle** bzw. die untergeordneten Referenzarchitekturen, die die Aspekte eines Systems in sich schlüssig beschreiben.

Es werden hierbei die grundlegenden Strukturen bestimmt und beschrieben, die als Grundlage für das gemeinsame Verständnis in den Fachkreisen dienen. Es ist nicht zwingend erforderlich, dass sich für ein und dieselbe Anwendung gleiche Lösungen ergeben, allerdings sollte es das Bestreben sein auf einen Konsens zu kommen.

Eine Harmonisierung und Erweiterung der Modelle und Architekturen kann hierbei durch Erweiterungen und domänenübergreifenden Maßnahmen erzielt werden. Primäres Ziel ist allerdings, eine klare und eindeutige Beschreibung eines Sachverhaltes firmenübergreifend zu erreichen. Idealerweise ergibt sich für die betreffenden Bereiche sogar ein weltweiter Standard, der jedoch nicht immer erreicht werden kann. Unterschiedliche Lösungen für die gleichen Probleme sind die Folge.

Um diese gemeinsame Basis zu erreichen ist es entscheidend, eine einheitliche Kommunikation (**Schnittstellenmanagement**) entlang des Produktionsprozesses zu installieren und einheitliches und redundanzfreies Datenmanagement zu verwenden. Dies kann nur gelingen, wenn alle Beteiligten dieselben Kommunikationsstrukturen und Schnittstellen-Protokolle verwenden, also gemeinsame Architekturen.

Um all dies sicherzustellen, gibt es vielfältige Bestrebungen z.B. der Bundesregierung, Fachverbänden (z.B. VDE/VDI) aber auch andere nationalen und internationalen Kooperationen bei den Unternehmen selbst eine gemeinsame Basis für diese Kommunikationsstrukturen zu schaffen.

Im Einzelnen betreffen Referenzarchitekturen folgende Bereiche im Produktionsprozess für Produkte, Fabriken und Prozesse:

- Modellierung
- Simulation
- Optimierung
- Visualisierung
- Verteilung und Vernetzung der Daten

5.2 Überblick über Normungsinitiativen

Die Referenzmodelle und Architekturen für die intelligente Fabrik sind wesentlicher Bestandteil der übergeordneten Initiative Industrie 4.0. Hier gibt es das große Bestreben einheitliche Strukturen und Referenzarchitekturen in allen Bereichen von Industrie 4.0 zu etablieren, um die deutsche und europäische Spitzenqualität in der Produktion zu verteidigen und auszubauen. Dies ist nur möglich, indem alle Beteiligten an einem Strang ziehen und Regeln für diese Architekturen gemeinsam aufstellen und diese auch konsequent verfolgen und umsetzen.

Grundlegendes Ziel und Basis für die Normungsinitiativen sieht die deutsche Normungs-Roadmap »Industrie 4.0« in der »Nutzbarmachung der in den Informations- und Kommunikationstechnologien erreichten und in der nahen Zukunft zu erwartenden Fortschritte der produktionstechnischen Unternehmen« (VDE: Die Deutsche Normungs-Roadmap »Industrie 4.0«. Version 5.0, Stand Januar 2023).

Normung und Standardisierung sind somit die Innovationstreiber im industriellen Umfeld und dem Konzept von Industrie 4.0 und erfordert eine enge Kooperation von Industrie, Forschung und Normung. Innovationen werden so geschaffen durch

- Methodische Fundierung und Funktionalität
- Stabilität und Investitionssicherheit
- Praxistauglichkeit und Marktrelevanz

Der Normungsprozess besteht hauptsächlich im Erarbeiten eines anerkannten Dokuments, welches Festlegungen für allgemeine und wiederkehrende Anwendungen enthält und auf die Zustimmung aller Parteien gründet. Die Entwicklung von Normen und Standards findet auf nationalen, europäischen und internationalen Ebenen statt.

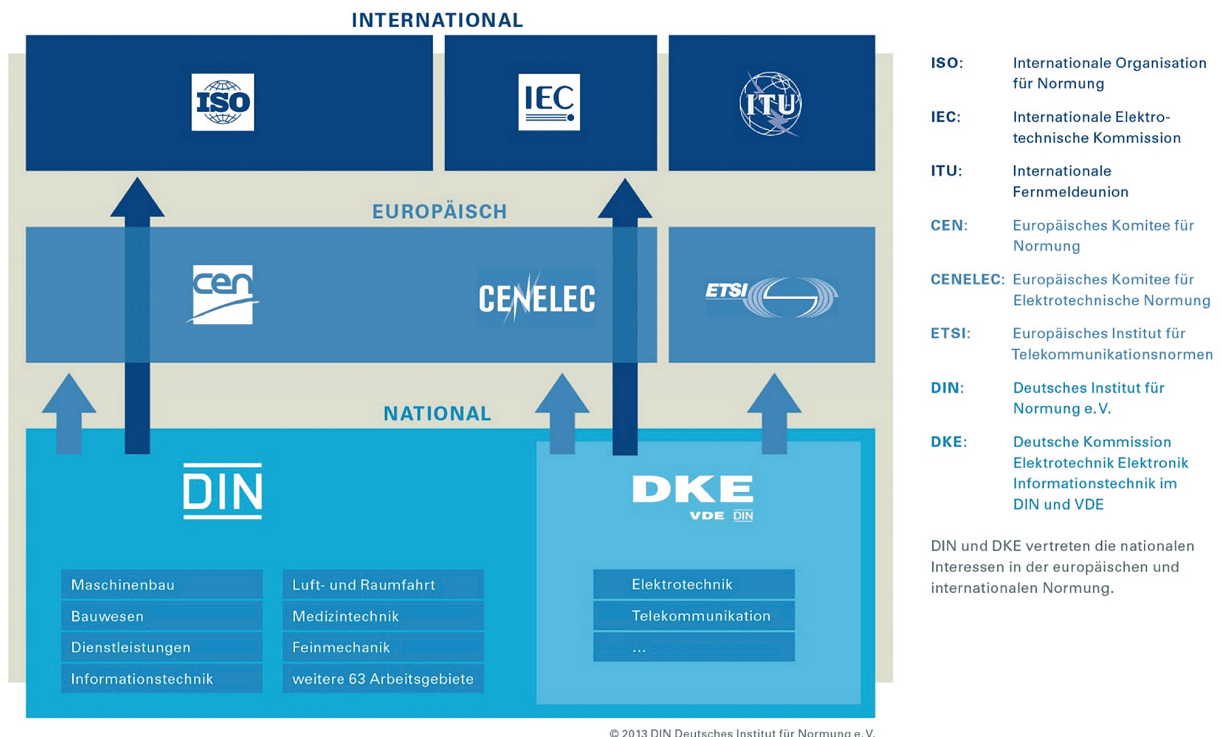


Bild 5.2: Normungsinitiativen

Die zuständige Normungsorganisation der Bundesrepublik Deutschland ist das **DIN** (Deutsches Institut für Normung e. V.). Es vertritt die deutschen Interessen als Mitglied bei **CEN** (Comité Européen de Normalisation, Europäische Organisation für Normung) und **ISO** (International Organization for Standardization, Internationale Organisation für Normung) in der europäischen und internationalen Normung.

Die **DKE** (Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE) nimmt die Interessen der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik auf dem Gebiet der internationalen und regionalen elektrotechnischen Normungsarbeit wahr und wird vom **VDI** (Verein Deutscher Ingenieure) getragen. Der VDE hat aktuell ca. 36.000 Mitglieder die durch persönliche und kooperative Mitglieder in Fachgesellschaften, Landesvertretungen und Bezirksvereinen aktiv sind. Die Gesellschaft vertritt die deutschen Interessen sowohl bei der **CENELEC** als auch in der **IEC**.

Der **VDMA** (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau) ist Europas größter Industrieverband und wirkt im DIN-Normenausschuss Maschinenbau (NAM) mit. Darüber hinaus ist er Herausgeber der VDMA-Einheitsblätter, dem Standardisierungsverfahren des Maschinenbaus.

Normungsaktivitäten finden heute zu beinahe 90% auf europäischer und internationaler Ebene statt. DIN und DKE sind hier federführend bei der deutschen Beteiligung und übernehmen die Organisation der jeweiligen nationalen Gremien.

Es existieren noch weitere Organisationen und Konsortien weltweit, die sich mit den zukünftigen Standards und Vorschlägen beschäftigen. Sehr oft fließen diese "**Quasi-Standards**" später in die finalen DIN SPEC ein und können als Normierungs-Vorstufen bezeichnet werden.

5.3 RAMI 4.0 (DIN SPEC 91345)

Im Rahmen von Normen, Standards und konkreten Anwendungsfällen (Use-Cases), ist es unabdingbar, gemeinsame und einheitliche Modelle zur Beschreibung der zukünftigen Anforderungen zu entwickeln. Dies setzt voraus, dass ein gemeinsames Verständnis für Kommunikation an den Schnittstellen zwischen den einzelnen Schichten mit den jeweiligen Funktionalitäten geschaffen wird. Daraus entstand das Referenzarchitekturmodell 4.0 (**RAMI 4.0**¹).

Um ganzheitlich und doch übersichtlich zu bleiben, erfordert RAMI 4.0 eine Darstellung, die komplexe Zusammenhänge verständlich visualisiert. Verwendet man ein sogenanntes Smart Grid Architecture Model (**SGAM**), können solche Zusammenhänge und Details in 3-D Darstellung relativ leicht diskutiert werden. Als Ergebnis wird RAMI 4.0 als DIN SPEC 91345 als Standard aufgenommen.

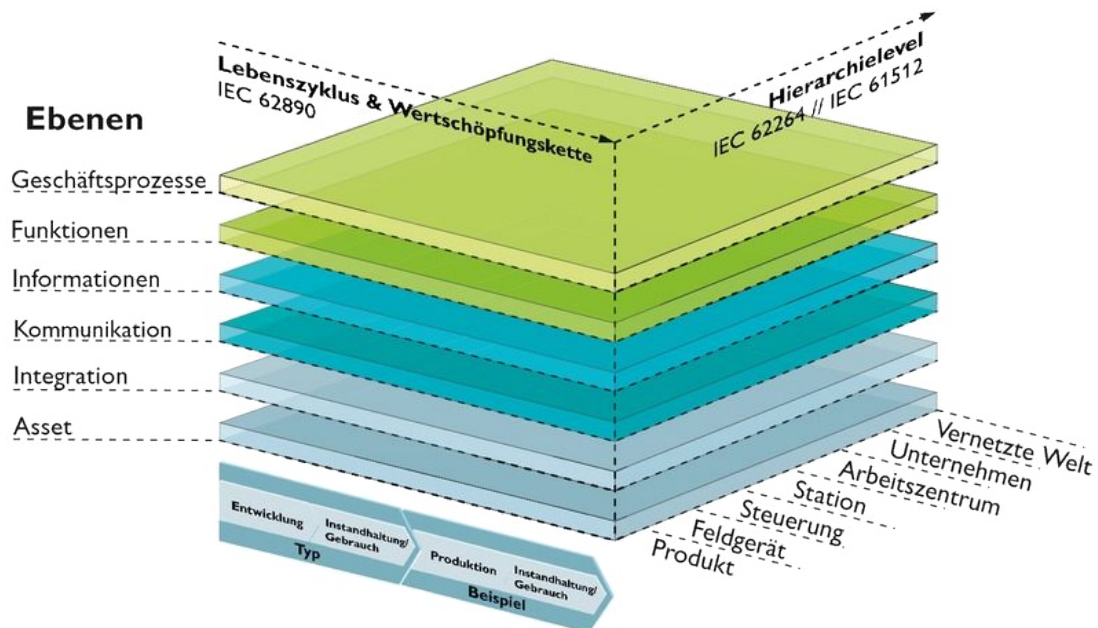
Basierend auf drei Achsen, werden die Hierarchiestufen einer vernetzten Fertigungsanlage (senkrecht), der Lebenszyklus der Anlagen und Produkten (waagrecht) sowie die IT-Repräsentanz (diagonal) einer Industrie-4.0-Komponente beschrieben. Im Wesentlichen gleichen die Hierarchiestufen der Automatisierungspyramide.

Senkrechte Achse (Ebenen): Es werden Ebenen/Schichten für die unterschiedlichen Sichtweisen, wie Datenabbild, funktionale Beschreibung, Kommunikationsverhalten, Hardware/Assets oder auch Geschäftsprozesse, der Fertigungsanlage verwendet.

¹ **RAMI4.0** = ist eine dreidimensionale Landkarte, die beschreibt, wie man das Thema Industrie 4.0 strukturieren kann. RAMI 4.0 stellt sicher, dass sich alle Teilnehmer von Industrie 4.0 verstehen können.

Waagrechte Achse (Lebenszyklus): Hier wird der Produktlebenszyklus¹ mit dessen Wertschöpfungsketten dargestellt. Damit können Abhängigkeiten gut erkannt werden, z. B. die durchgängige Datenerfassung über den gesamten Lebenszyklus.

Diagonale Achse (Hierarchielevel): Funktionalitäten und Verantwortlichkeiten werden innerhalb der Fabriken/Anlagen aufgeteilt. Es geht dabei um die funktionale Hierarchie.



Quelle: Plattform Industrie 4.0

Bild 5.3: Smart Grid Architecture Model (SGAM), Referenzarchitekturmodell RAMI 4.0 in 3D.

Einige **Ziele** der RAMI 4.0 Architektur werden in [15], Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0) beschreiben:

- anschauliches Modell als die Referenz
- Verwendung von vorhandenen Normen und Standards
- Erkennen und Schließen von Lücken in Normen
- Erkennen von Überschneidungen
- Minimierung von Normen
- Einordnen von Beziehungen
- Ableiten von Regeln

Grundbaustein ist eine I4.0-Komponente, die aus einem realen Teil (Asset/Maschine) und einem virtuellem/digitalem Teil (Verwaltungsschale) besteht und die Schnittstelle zu den oberen Architekturschichten ermöglicht.

Das Rami 4.0-Modell bietet viele Vorteile. Die Architektur ist serviceorientiert ausgelegt. Alle Elemente und IT-relevanten Komponenten sind in einem Schichten- und Lebenszyklus-Modell zusammengefasst und somit können die komplexen Abläufe in überschaubare Pakete aufgeteilt werden.

¹ **Produktlebenszyklus (PLZ)** = ein Konzept der Betriebswirtschaftslehre, das den Prozess von der Markteinführung bzw. Fertigstellung eines marktfähigen Produktes bis zu seiner Herausnahme aus dem Markt beschreibt.

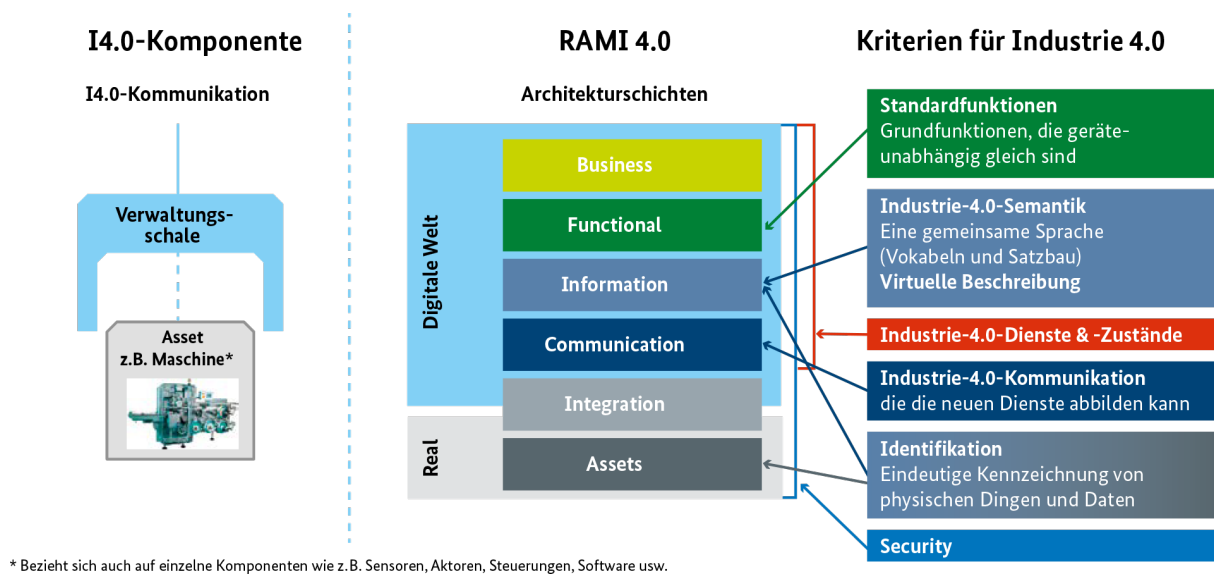


Bild 5.4: Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0)

5.4 Zusammenfassung

Referenzarchitekturen sind die Basis für Normung und Standardisierung im industriellen Umfeld und des Konzeptes Industrie 4.0. Um ein gemeinsames nationales wie internationales Verständnis für die Vernetzung und damit der Kommunikation der eingesetzten CPS zu erhalten werden gemeinsame Modelle und Architekturen benötigt.

Zu diesem Zweck gibt es Normungsinitiativen auf allen Ebenen, die sich aufgrund vielfältiger Anwendungsszenarien und Use Cases diesen mit Normen und Standardisierungen diesen Problemen stellen und Lösungen anbieten.

Das Ziel ist immer einen gemeinschaftlichen Konsens zu erarbeiten um Standards und Normen z.B. in der Kommunikation und IT-Landschaft auch unternehmensübergreifend zu etablieren. Höhere Flexibilisierung und Qualitätssteigerungen sind ohne Normen nicht denkbar.

Als Beispiel dient die Industrie 4.0 Referenzarchitektur Rami4.0, die eine sehr übersichtliche Darstellung als Smart Grid Modell (SGM) ermöglicht und alle Facetten und Hierarchieebenen beschreibt.

KAPITEL 6

Smart Factory Engineering

Lernziele

Nach der Bearbeitung dieser Lektion werden Sie wissen, ...

- ... wie geeignete Methoden und Werkzeuge die Produktivität steigern.
- ... was User-Centered Design bedeutet.
- ... was man unter Requirements & Virtual Engineering versteht.
- ... welche Rolle der Digitale Zwilling hat.
- ... wie man klassische und smarte Komponenten vereint.

Einführung

Heutige Produktionsprozesse sind geprägt von steigender Variantenvielfalt und verkürzten Produktlebenszyklen. Um auch zukünftig den hohen Anforderungen z.B. in Hinblick auf Reaktionszeiten (»Just-in-time-production«), Flexibilität und Rekonfigurierbarkeit gerecht zu werden, birgt der Ansatz der produktzentrierten Steuerung ein großes Potential. Produktionsmittel sind durch Informationsmodelle semantisch beschrieben, sodass ausschließlich durch Modellierung des zu produzierenden Produktes im Engineering neue Varianten auf Produktionsebene realisiert werden können. Die Parametrierung auf Betriebsmittelebene erfolgt vollständig über den virtuellen Zwilling. Die Inbetriebnahme neuer Varianten und Prozesse wird so signifikant verkürzt!

Das Produkt bestimmt seinen Prozess! Ein eigenes entwickeltes Leitsystem mappt die im Produktmodell gemäß IEC 62264 definierten Anforderungen auf die vorhandenen Produktionszellen und bestimmt so die logistische Reihenfolge. Für die Zuordnung wird die Heterogenität und Komplexität der (konventionellen) Zellenebene mittels einer entwickelten OPC UA Middleware gekapselt - alle Funktionen werden dem Leitsystem (MES) als Dienst angeboten. Lokal greifen die Prozessstationen im Smart Automation Lab per AutoID (RF)D auf das zugeordnete Produktmodell - den virtuellen Zwilling - zu. Dieser integriert alle für den Produktionsprozess notwendigen Informationen, z. B. Druckbild, Montageposition oder Auftragszuordnung. Darüber hinaus werden cloudbasierte Technologien, Methoden der digitalen Bildverarbeitung zur optischen Lagekorrektur oder Ansätze zur Mensch-Roboter-Kooperation verfolgt.

6.1 Klassifikation verschiedener Engineering-Werkzeuge

Ein Werkzeug (tool) ist im Rahmen der Smart Factory ein rechnergestütztes Hilfsmittel für die Entwicklung von Software, auch **CASE** (Computer Aided Software Engineering). Engineering Tools entlasten die Ingenieure bei Routineaufgaben, bei der Verarbeitung von Daten und Informationen. Der Einsatz von Methoden unterstützt und vereinfacht Änderungen.

Allerdings sind Werkzeuge keine Wunderwaffen, wie es gerne von den Tool-Herstellern propagiert wird. Engineering-Werkzeuge können die Produktivität nicht um Größenordnungen verbessern, eigenes Denken und sorgfältiges Arbeiten nicht ersetzen und machen das Qualitätsmanagement nicht überflüssig. Man kann die Gesamtheit der Engineering-Werkzeuge (integrated CASE-Tools) in Upper CASE und Lower CASE-Tools klassifizieren:

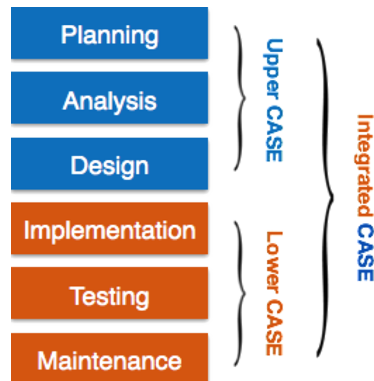


Bild 6.1: Klassifikation von CASE-Tools

Beispiele für Upper CASE-Tools sind:

- Spezifikations- und Entwurfssysteme
- Programm-Entwurfssysteme
- Programm-Generatoren
- Analyse Tools

Beispiele für Lower CASE-Tools sind:

- Editoren
- Compiler, Browser und Programmierumgebungen
- Mess- und Test-Werkzeuge
- Datenverwaltungs-Systeme

Durch den Einsatz dieser Werkzeuge kann ein Produktivitätsgewinn realisiert werden. Werden allerdings neue Werkzeuge eingesetzt, kommt es zunächst zu einem Sinken der Produktivität bei der Einführung. Der Grund liegt an den notwendigen Schulungen, Eingewöhnung und Verlagerungen von Aufwendungen. Der eigentliche Nutzen bzw. die Gewinnzone werden erst mittelfristig erreicht. Die Werkzeug-Einführung stellt eine Investition dar.

Die großen Themen beim Engineering im Kontext von Industrie 4.0 sind:

- neue technische Methoden (agile¹ Entwicklungsmethoden)
- rechtliche Fragen
- neue Wertschöpfungsketten und Nachhaltigkeit

Um nachhaltige Effizienzsteigerungen in Engineering und IT zu erreichen, müssen passende Prozesse und abgestimmte Werkzeuge Verwendung finden. Der Schlüssel zum Erfolg ist die Kombination von schlanken und einfachen Prozessen mit einer systematischen Methodik.

Prozesse bringen Effizienz, Transparenz und Disziplin. Methodik schafft Systematik und Unterstützung, Werkzeuge sichern beides nachhaltig ab. Werkzeuge helfen dabei, Anforderungen systematisch zu spezifizieren und im Verlauf des Projekts diszipliniert zu pflegen.

6.2 Virtual Engineering

Der Begriff Engineering wird als die kreative Anwendung von wissenschaftlichen Erkenntnissen und mathematischen Methoden für die Entwicklung und Herstellung von technischen Artefakten definiert (International Association of Engineers (IAENG) 2018). Das Engineering wird oft als synonym zum Begriff Produktentwicklung genutzt.

Der Ansatz von Virtual Engineering zielt hauptsächlich auf die Vernetzung realer und virtueller Welten. Ursprünglich ging die Unterstützung des Produktentwicklungsprozesses auf digitale (dreidimensionaler) Modelle zurück. Schwerpunkte können sowohl Produktentwicklungsprozesse, das Industrial Engineering als auch sonstige Entwicklungsprozesse technischer Objekte (wie etwa von Bauwerken) und selbst von Dienstleistungen sein. Virtual-Engineering-Methoden lassen sich branchenübergreifend einsetzen.

Grundlage für diese neuen Engineering-Methoden sind Techniken wie AR (Augmented Reality) und VR (Virtual Reality). Durch die grafische Darstellung von Produkten in der frühen Entwicklungsphase, können Verbesserungen mit iterativen Entwicklungszyklen erreicht werden, ohne eine zeit- und kostenintensive Fertigung von Prototypen.

Außer in den klassischen Entwicklungsumgebungen, können AR und VR auch zur Weiterbildung von Mitarbeitern, für die Präsentation von Prototypen beim Kunden oder der virtuellen Inbetriebnahme von ganzen Fabriken und Anlagen verwendet werden. Dabei ist es zum Beispiel möglich, durch Simulation Schwachstellen bei Logistik- und Montageprozessen ausfindig zu machen, bevor die Produktionsanlagen vor Ort installiert und aufgebaut werden.

¹ **Agile Entwicklungsmethoden** = Ansätze, vor allem in der Softwareentwicklung, die die Transparenz und Flexibilität erhöhen und zu einem schnelleren Einsatz der entwickelten Systeme führen sollen. Agile Softwareentwicklung zeichnet sich durch selbstorganisierende Teams, sowie eine iterative und inkrementelle Vorgehensweise aus..

Ziele des virtual Engineering sind:

- Ermöglichung von schnellen Entwicklungszyklen
- Erhalten von frühem Ergebnisfeedback
- Stärkung von frühen Entwicklungsphasen
- Entwicklung von alternativen Produktkonzepten
- Entscheidungshilfe bei der Spezifikation des Produktes

6.3 User-Centered Design

Unter User-Centered-Design (**UCD**) versteht man eine nutzerorientierte Gestaltung von interaktiven Produkten. UCD hat zum Ziel, die Gebrauchstauglichkeit (**Usability**) von Produkten zu erhöhen. Damit dies gelingt, muss der Endnutzer in den Mittelpunkt bei der Produkt-Entwicklung gerückt werden. Somit stehen die Anforderungen und Ziele des Kunden im Zentrum. Seit etwa 1990 wird der Begriff User-Centered Design dafür verwendet und verdrängte den Begriff Usability Engineering.

Viele Dinge des täglichen Lebens sind nicht intuitiv zu nutzen und lassen die Anwender frustriert zurück. Um die Gestaltung der Produkte nutzerfreundlich zu machen binden Hersteller ihre Kunden bereits sehr früh in die Produktentwicklung ein und sammeln Erfahrungen während des ganzen Entwicklungszyklus.

Erschwerend kommt hinzu, dass nicht nur der Endnutzer mit dem Produkt einfach umgehen soll, es kommt oft vor, dass auch Personen z.B. in übergeordneten Positionen sich schnell zurechtfinden müssen.

Vier grundlegende Vorschläge wie ein Produkt gestaltet werden sollte:

- So einfach wie mögliches Design um zu jedem Moment eingreifen zu können
- Die Dinge sichtbar machen (Konzept des Systems, alternative Funktionen, Auswirkung auf Eingaben)
- Einfache Gestaltung um den aktuellen Status des Systems zu erkennen
- Auf die natürlichen Zuordnungen achten, zwischen Intention und notwendigen Eingaben; zwischen Eingaben und Resultat; und zwischen der sichtbaren Information und die Interpretation des Systems

Diese Vorgaben stellen den Endnutzer in das Zentrum des Entwicklungsprozesses. Es reicht leider nicht aus den Entwicklungsingenieuren vorzugeben, dass sie die Produkte intuitiv bedienbar gestalten sollen. Es werden Design-Vorgaben benötigt die den Entwicklungsprozess leiten sollen.

Nach Norman [16] werden folgende **sieben konkrete Prinzipien** vorgeschlagen wie man ein Produkt nutzerfreundlich gestalten sollte:

1. Nutzung von eigenem Wissen und von Quellen von außerhalb, um Benutzerhandbücher zu schreiben die einfach zu verstehen sind und vor allem geschrieben werden bevor das Design implementiert wurde.
2. Die einzelnen Teilaufgaben vereinfachen. Das Kurzzeit- und das Langzeit-Gedächtnis der Nutzer sollte nicht überstrapaziert werden. Im Durchschnitt kann sich ein Nutzer nur 5 Dinge auf einmal merken. Der Nutzer muss immer die Kontrolle über den Vorgang haben.

3. Die Dinge sichtbar machen. Der Nutzer sollte in der Lage sein den Nutzen eines Objektes zu erkennen, indem er die richtigen Schalter oder Buttons für die Ausführung einer Eingabe leicht erkennen kann.
4. Die Verwendung von Übersichtsgrafiken erhöhen das Verständnis erheblich.
5. Power of Constraints
6. Berücksichtigung von allen möglichen Anwenderfehlern damit der Benutzer die Fehler zurücknehmen kann.
7. Falls alles nichts bringt sollte man sich zumindest an etablierten Standards halten.

Vor allem für mittlere bis große Projekte eignet sich UCD. Sie sollten über eine gewisse inhaltliche und organisatorische Komplexität verfügen um die ganzen Möglichkeiten ausschöpfen zu können. Ein Projekt, das konsequent mit UCD ausgeführt verursacht weniger Kosten als ein Projekt mit anderen Software-Entwicklungsmethoden.

Es ist allerdings mehr Aufwand in den frühen Projektphasen nötig, da die Anforderungen und Bedürfnisse viel detaillierter erhoben und beschrieben werden. Dafür nehmen die Kosten gegen Ende des Projekts ab und die Wahrscheinlichkeit von Change Requests wird minimiert, sowohl während dem laufenden Projekt als auch bei der Benutzung nach der Markteinführung.

6.4 Requirements Engineering

»Requirements Engineering (**Anforderungstechnik**) ist das systematische, disziplinierte und quantitativ erfassbare Vorgehen beim Spezifizieren (d.h. Erfassen, Beschreiben und Prüfen) sowie beim Verwalten von Anforderungen an ein System« (Martin Glinz, Requirements Engineering, Uni Zürich).

Mit einfachen Worten, es geht bei der Produktentwicklung zentral um das Verstehen und Beschreiben, was die Kunden wünschen oder benötigen.

»Der begleitende Prozess, der Änderungen von Anforderungen verfolgt, Anforderungsdokumente über ihren gesamten Lebenszyklus verwaltet und die Kernaktivitäten des Requirements Engineering plant, organisiert und kontrolliert, heißt Requirements Management«.

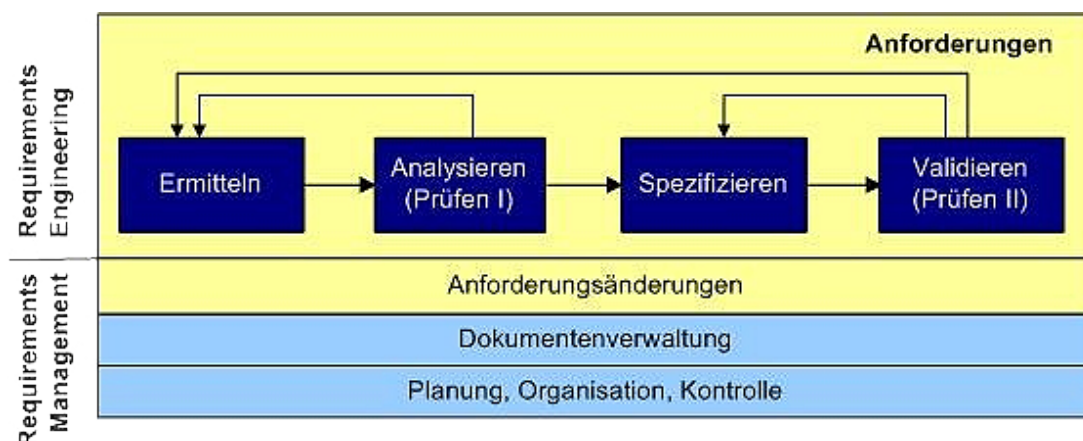


Bild 6.2: Requirements Engineering

Um die Kunden zufriedenzustellen ist es notwendig eine menschenzentrierte Sicht auf das Produkt einzunehmen, bevor mit der eigentlichen Entwicklung begonnen wird. Es kommt oft genug vor, dass ein System entwickelt wird das dem Kunden nicht nützt oder nicht gefällt. Um dieses Risiko zu minimieren werden die Spezifikationen und Anforderungen verwaltet.

Von zentraler Bedeutung ist das Bestreben die Anforderungen der Kunden zu spezifizieren. Dazu ist es notwendig, sich zu Beginn eines Projektes mit den Akteuren im Umfeld des geplanten Systems auseinanderzusetzen und deren Ziele, Handlungen und Interaktionen zur Erreichung dieser Ziele auseinanderzusetzen. Aus diesen Informationen kann dann der Systemzusammenhang gewonnen werden um z.B. Aufgaben zu delegieren, dem System weitere Informationen zukommen lassen oder um weitere Informationen zum geplanten System zu erhalten. Es folgt darauf die eigentliche Spezifikation der Anforderungen.

Dem erhöhten Aufwand der systematischen Erfassung dieser Anforderungen stehen folgende Vorteile gegenüber:

Kosten werden reduziert:

- Geringe Herstellkosten (durch senken der Kosten aufgrund von Fehlern)
- Weniger Reklamationen und Nachbesserungen
- Geringere Pflegekosten Verkleinern der Risiken:
- Kundenwünsche werden besser erfüllt
- Prognosen für Termine und Kosten werden zuverlässiger

Die Merkmale einer guten Spezifikation werden in einem sogenannten **Pflichtenheft** geführt, das die Anforderungsspezifikation, den Lösungsüberblick und die Elemente der Projektabwicklung enthalten soll und folgende

Qualitätsmerkmale beinhalten:

- **Adäquat** - beschreibt das, was der Kunde will bzw. braucht
- **Vollständig** - beschreibt alles, was der Kunde will bzw. braucht
- **Widerspruchsfrei** - sonst ist die Spezifikation nicht realisierbar
- **Verständlich** - für alle Beteiligten, Kunden wie Informatiker
- **Eindeutig** - vermeidet Fehler durch Fehlinterpretationen
- **Prüfbar** - feststellen können, ob das realisierte System die Anforderungen erfüllt
- **Risikogerecht** - Umfang umgekehrt proportional zum Risiko, das man eingehen will

Ein guter Spezifikationsprozesses sollte kundenorientiert sein, mit geeigneten Mitteln methodisch und zielgerecht erfolgen und die Erstellung und Prüfung Anforderungen in den Produktionsprozess integrieren.

6.5 Modellierung

Unter Modellierung versteht man die Schaffung eines virtuellen Abbilds eines realen bzw. physischen Systems. Oft spricht man auch vom **digitalen Zwilling (digital Twin)**. Es wird durch den digitalen Zwilling eine Verknüpfung der physischen und virtuellen Welt geschaffen. Dieses digitale Abbild eines realen Objektes beinhaltet alle möglichen Ein- und Ausgabekanäle sowie die gesamte spezifizierte Funktionalität.

Durch Verändern der Modell-Parameter, kann das System sehr einfach vor Inbetriebnahme auf Funktionalität und Robustheit getestet bzw. virtuell simuliert werden. Außerdem kann durch die Erhebung von Messdaten und Weiterleitung dieser Daten eine Rückkopplung vom virtuellen Modell zurück auf das reale Objekt erreicht werden. Durch Aktoren können dann Veränderungen in der Realität bewirkt werden.

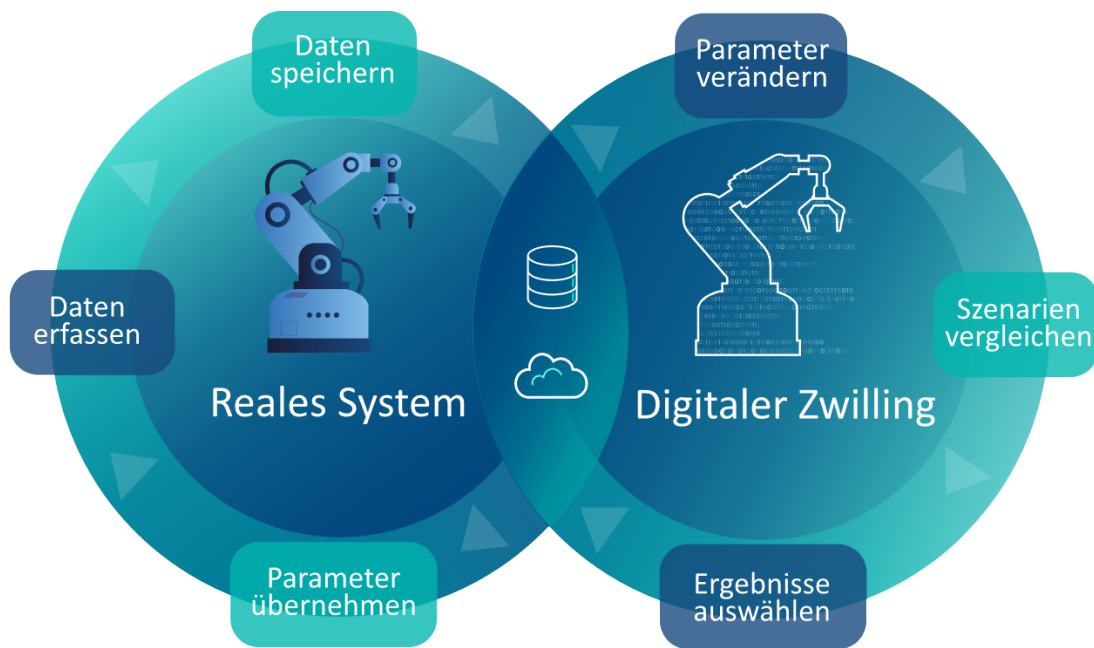


Bild 6.3: Digitaler Zwilling (Digital Twin)

Die virtuelle Simulation von Funktionsstrukturen ermöglicht außerdem zielgerichtete Aussagen über das Nutzungsverhalten eines smarten Produktes bevor das Produkt überhaupt am Markt eingeführt wurde.

Modellbibliotheken

Ein großer Vorteil bei der Modellierung ergibt sich durch die implementierten sogenannter Modulbibliotheken. Hier können sehr komplexe Systeme hierarchisch auf kleinste Funktionsblöcke bzw. Funktionsmodelle aufgebaut werden. Diese können sehr einfach in neue Systeme eingefügt und wiederverwertet werden. Eine Verkürzung des Entwicklungsprozesses ist die Folge.

Unvollständige Funktionsstrukturen

Großer Handlungsbedarf besteht bei der Wahl der Methoden für die Definition unvollständiger Funktionsstrukturen. Hauptsächlich sind dies Beschreibungen von Funktionen, die sowohl im Verlauf des Entwicklungsprozesses als auch in den nachfolgenden Produktlebenszyklusphasen dynamisch veränderbar sind. Um auch dynamischen Kundenanforderungen gerecht zu werden, beinhaltet dies auch die Aufnahme von Prozesse der Kunden in Funktionsentwicklungsprozesse sowie deren Modellierung.

6.6 Integration klassischer und smarter Komponenten

Die Verknüpfung von klassischen und smarten Komponenten und Systeme führt zu intelligenten Objekten, den »Cyber-physischen Systeme (CPS)«. Die klassischen Komponenten werden um intelligente, Internet-basierte Dienste, sogenannte **smarte Services**, ergänzt.

Ein Beispiel für ein smartes Produkt ist ein intelligentes Fahrzeug, das über ein Car-Sharing-Geschäftsmodell von den Anwendern genutzt werden kann. Hinsichtlich ihrer Komplexität können smarte Produkte Einzelprodukte (Smart Car), vernetzte Produktsysteme (mehrere vernetzte Autos über eine Service-Plattform) oder sehr komplexe, übergreifende Produktsysteme (gesamte Mobilitätssysteme), sogenannte Systems of Systems, sein. Es entstehen also durch die intelligenten und vernetzen Produkte völlig neu sortierte Wettbewerbsbedingungen und sogar neue Märkte.

Die neu generierten Funktionen dieser kombinierten Produkte können sich in vier auf sich aufbauende Bereiche einteilen lassen:

- Überwachung
- Steuerung
- Optimierung
- Automatisierung

Die neu geschaffenen intelligenten Produkte können je nach Anwendung alle diese vier Bereiche abdecken. Jede Funktionsstufe kann entweder eigenständig als Grundlage für neue Funktionen dienen, als auch als Voraussetzung für die nächste Stufe eines Funktionsbereichs verwendet werden.

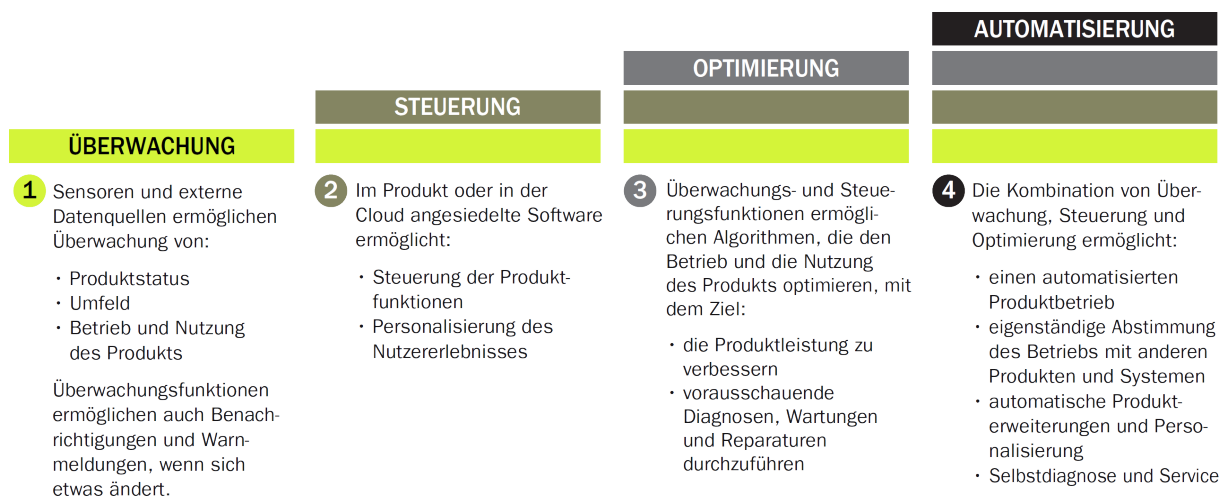


Bild 6.4: Verwendungsmöglichkeiten von smarten Produkten

Vernetzte Produkte werden nicht nur den Wettbewerb auf den Märkten verändern, sondern auch das Wesen, die Arbeit und die Strukturen der Fertigungsunternehmen.

Die neuartigen Produktlösungen, die eine bisher nicht gekannte, enge und direkte sowie zeitlich unbegrenzte Beziehung zum Kunden herstellen, werden in drei Kernelementen definiert:

- Physische Komponenten mit mechanischen oder elektrischen Bauteilen
- Intelligente Komponenten, wie Sensoren, Aktoren, Mikroprozessoren, Datenspeicher, Software/Betriebssystem und eine digitale Bedienoberfläche
- Vernetzungskomponenten, z.B. Schnittstellen, Antennen und Netzwerke, die die Kommunikation zwischen Produkt und Cloud sicherstellen.

Die Cloud wird in vielen vernetzten Produktlösungen ein zentrales Element für die Software/das Produkt-’Betriebssystem’ sein, die z.B. ein Big-Data-Datenbanksystem, eine Regel-/Analyse-Engine oder intelligente Produktanwendungen, die die Funktionen des Produktes überwachen, steuern und optimieren, beheimatet.

6.7 Zusammenfassung

Smart Factory Engineering ist der Ausgangspunkt für die intelligenten Produkte der Zukunft. Durch geeignete Methoden und Werkzeuge können schnellere Entwicklungszeiten und höhere Qualität geschaffen werden. Allerdings auf Kosten von Erhöhten Anfangsaufwendungen, die sich allerdings im Laufe des Projektes sich amortisieren. Vor allem bei mittleren und bei Großprojekten wirken sich die Vorteile von Virtual Engineering aus, bei dem konsequent auf durchgängige digitale Produktentwicklung gesetzt wird.

Zunehmend wird auch mehr Augenmerk auf den späteren Endnutzer der Produkte gelegt. Auch hier ist erhöhter Aufwand bei der Erkennung und Dokumentation der Kundenwünsche notwendig. Werden die Anforderungen und die Spezifikation allerdings systematisch und gründlich vorbereitet wird die Fehleranfälligkeit und der Kundennutzen wesentlich verbessert. All dies wird mit dem sogenannten Requirements Engineering noch weiter in der Systematik fokussiert und das Augenmerk auf frühe Entwicklungsphasen gelenkt.

Die Modellierung von digitalen Systemen stellt die Verbindung zur physischen Welt dar. Durch Verwendung von Modulbibliotheken kann z.B. die Effektivität durch Wiederverwendung einzelner Module zu schnelleren Entwicklungszeiten und flexibleren Entwicklungsprozessen führen. Durch die Kombination von klassischen Produkten mit smarten, vernetzten Technologien entstehen völlig neu sortierte Märkte und sogar komplett neue Geschäftsfelder auf die sich jedes Unternehmen einstellen muss um wettbewerbsfähig zu bleiben.

KAPITEL 7

Digitaler Zwilling

Lernziele

Nach der Bearbeitung dieses Kapitels werden Sie wissen, ...

- ... was ein „Digitaler Zwilling“ ist
- ... welche Schlüsselmerkmale ein digitaler Zwilling hat
- ... wie sich die Technologie entwickelt hat
- ... in welchen Bereichen digitale Zwillinge eingesetzt werden können
- ... welche Chancen und Risiken bestehen

Begriffsdefinition

Ein digitaler Zwilling (engl. „**digital twin**“), ist eine digitale oder virtuelle Kopie von Anlagen, Prozessen, Produkten oder Dienstleistungen unserer physischen Welt. Dieser sogenannte „**digitale Avatar**“ verwendet reale Daten und rekonstruiert diese auf eine virtuellen Ebene. Um einen digitalen Zwilling zu erstellen, muss das physische Objekt nicht in seiner entgültigen Version existieren.

Ziel der Schaffung eines digitalen Zwillings ist dabei das Erlangen von neuen Erkenntnissen um Abläufe zu verbessern, die Effizienz zu steigern oder ein Problem zu entdecken, bevor es in der realen Welt auftritt. Die aus dem digitalen Zwilling gezogenen Lehren können dann mit weniger Risiko und mehr Rendite auf das ursprüngliche System übertragen werden. All das ist durch das **Internet der Dinge (IoT)** möglich, welches Daten aus der physischen Welt sammelt und an Maschinen zur Rekonstruktion übermittelt.



Bild 7.1: Digitaler Zwilling - Porsche Taycan.

7.1 Geschichte

Die Konzeption von „Zwillings“ in der Industrie gibt es seit 2002, als die **NASA** zwei identische Raumfahrzeuge für die Apollo Mission entwickelte. Dabei sollte das Zwilling-Raumfahrzeug vor der Mission zur Vorbereitung der Astronauten dienen und während der Mission, die Reparatur oder die Wartung der Raumfahrzeuge erleichtern, welche sich außerhalb des physischen Überwachungsbereichs bewegten.

Diese „Zwillings“-Systeme haben es Ingenieuren und Astronauten ermöglicht, Lösungen für Probleme an der Apollo-13-Mission zu erarbeiten und das Raumschiff und die Besatzung sicher zur Erde zurück zu bringen. Auch dank dieser Entwicklung setzt die NASA heute digitale Zwillingssysteme ein, um Daten zu sammeln, Empfehlungen an die Besatzungsmitglieder zu geben und die Bedürfnisse zukünftiger Flugzeuge zu planen. Der Begriff digitaler Zwilling wurde dabei erstmals 2010 aufgegriffen [17].

Heutzutage hat sich die Verwendung von digitalen Zwillingen auch in weitere Anwendungsbereiche ausgebreitet und sich als neue Technologie etabliert.

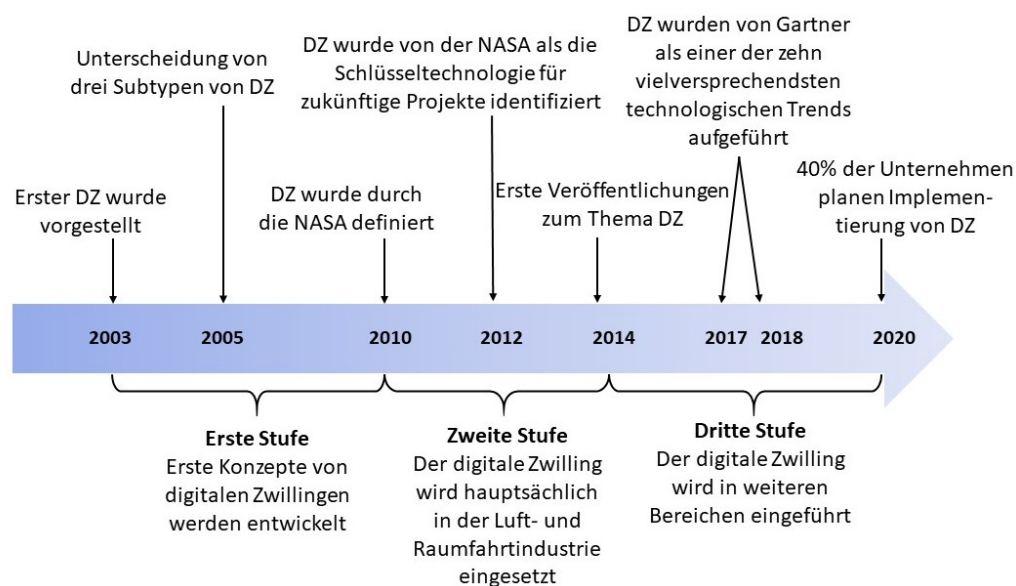


Bild 7.2: Geschichte des digitalen Zwillings [18].

Wie in Abbildung 9.2 zu erkennen ist, kann der Verlauf der Entwicklung von digitalen Zwillingen in drei Stufen unterteilt werden.

Stufe 1:

In der ersten Stufe wurde das Konzept des digitalen Zwillings lt. M. Grieves 2003 vorgeschlagen. Grieves, der auch Vorreiter des **Produktlebenszyklus-Managements (PLM)** ist, definierte dieses Konzept in drei Dimensionen:

- physische Einheit
- digitales Gegenstück der physischen Einheit
- Verbindung, die die beiden Teile miteinander verknüpft

Im Jahr 2005 brachte Grieves eine weitere Idee vor, dass der digitale Zwilling in drei Untertypen klassifiziert werden könnte:

- digitaler Zwillingsprototyp
- digitale Zwillingsinstanz
- digitaler Zwillingsgesamtkörper

In den darauffolgenden fünf Jahren hat sich die Technik weiterentwickelt und die Grundlage für die heutigen digitalen Zwillinge gelegt.

Stufe 2:

Im Jahr 2010 veröffentlichte die NASA eine Definition sowie Begriffserklärung für digitale Zwillinge im Bereich Luft- und Raumfahrt. 2012 folgte dann die Bekanntgabe, dass digitale Zwillinge die neue Schlüsseltechnologie für zukünftige Raumfahrzeuge wird. Daraufhin stiegen Studien und Forschungsarbeiten stetig an. Bis im Jahr 2014 das erste „**Whitepaper**“¹ veröffentlicht wurde. Mit diesem Schritt wurde die „Zwillings“-Technologie auch in weitere Anwendungsbereiche eingeführt. [18].

Stufe 3:

In den letzten Jahren haben viele etablierte Organisationen dem digitalen Zwilling große Bedeutung beigelegt. Sowohl 2017 als auch 2018 betrachtete Gartner den digitalen Zwilling als einen der 10 vielversprechendsten technologischen Trends des nächsten Jahrzehnts. So ist aufgrund des aktuellen Trends zu erwarten, dass der digitale Zwilling in den nächsten Jahren eine rasante Entwicklung erfahren wird. Nach dem **Digitalisierungsindex**² haben heutzutage sogar bereits 42% der Betriebe Transformationen ihres Unternehmens hin zur Einführung von digitalen Zwillingen in ihrer Strategie verankert bzw. arbeiten bereits mit dieser Technologie.

7.2 Funktion

Digitale Zwillinge können heutzutage in vielen verschiedenen Branchen und Bereichen eingesetzt werden, wie zum Beispiel in der Automobilindustrie, im Bau- oder auch im Gesundheitswesen. Dabei kann der komplette Produktlebenszyklus von der Entwicklung, über die Produktion bis hin zum Aftersales abgebildet werden. Objekte, die mit dem Internet der Dinge verbunden sind, werden aus der realen Welt digital und virtuell nachgebildet und ermöglichen Simulationen, Tests, Modellierung und Überwachung auf der Grundlage der von IoT-Sensoren gesammelten Daten.

Diese in **Echtzeit** gesammelten Daten werden entweder lokal dezentralisiert oder zentral in der Cloud gespeichert. Die Gewinnung von Daten ist der primäre Antrieb und die wertvollste Aufgabe von digitalen Zwillingen. Dabei wird letztendlich die Verwendung der realen Anlagen und Produkte optimiert, sowie die Fähigkeit gegeben mit ihnen zu interagieren und „Was-wäre-wenn“-Szenarien zu bewerten.

In der Anwendung haben sich vor allem zwei wesentliche Konzepte zur Nutzung etabliert [17]:

1. Verwendung eines digitalen Zwillings zur Unterstützung der Entwicklung von Produkten um Designentscheidungen zu treffen, Eigenschaften zu verbessern oder Schadenswahrscheinlichkeiten bereits im Vorfeld zu verringern.
2. Nutzung des digitalen Zwillings zur Optimierung nach der Implementierung, um Wartungsintervalle, Bauteile oder Prozesse durch die Simulation von Daten zu verbessern.

1 Ein **Whitepaper** (dt. Weißbuch) ist eine Übersicht oder Sammlung an Empfehlungen zu einem bestimmten Vorgehen, Standards, Fallstudien oder Forschungsergebnissen.

2 Der **Digitalisierungsindex** ist die Erhebung des Digitalisierungsstandes von kleinen und mittelständischen Unternehmen. Er gibt Auskunft darüber, wie weit die digitale Transformation in verschiedenen Branchen ist.

Zwischen den verschiedenen Konzepten wird noch zwischen unterschiedlichen Typen unterschieden:

Digitaler Produktzwilling

Der Digitale Produktzwilling wird in der Produktentwicklung eingesetzt um ein Produkt virtuell in Betrieb zu nehmen, bevor die Fertigung beginnt. Die während dieses simulierten Vorgangs gesammelten Daten helfen jeden Aspekt des Produkts zu verbessern, wie zum Beispiel 3D-/CAD-Modelle, Testeigenschaften oder Produkteigenschaften. Dies ist der weitverbreitetste Typ. Er wird meist gleich zu Beginn der Datenerfassung eingesetzt und liefert Ergebnisse, die die Grundlage für nachfolgende Anwendungen bilden.

Digitaler Produktionszwilling

Der digitale Produktionszwilling wird bei der Planung von Fabriken, Maschinen, Anlagen, Werkzeugen und Testprogrammen eingesetzt. Diese Art vom digitalen Zwilling unterstützt, überwacht und optimiert Produktionsprozesse.

Digitaler Zwilling der Performance

Der digitale Zwilling der Performance ist das digitalisierte Gedächtnis eines Produktes. Er beinhaltet Produktionszahlen und Informationen über Durchlaufzeiten, die Einhaltung von vorgegebenen Lieferzeiten und die Produktqualität.

Digitaler Zwilling der Organisation

Der digitale Zwilling der Organisation ermöglicht eine optimierte, umfassende Planung aller Prozesse in einem Unternehmen und erhöht die Datensicherheit und den Datenschutz [19].



Bild 7.3: Typen des digitalen Zwillings und ihre Verbindung zum realen Produkt [20].

7.3 Aufbau und Optimierung

Modelle, die Produkte sowie Prozesse aus der **realen** Welt auf eine **virtuelle** Ebene übertragen, zählen längst zum Standard der heutigen Industrieunternehmen. Jedoch kommen sie meist nur im Vorfeld der eigentlichen Nutzung des Produkts zum Einsatz und geraten nach der Implementierung eher in Vergessenheit.

Schaut man sich hingegen das Konzept eines digitalen Zwillings an, geht dieses über die Implementierung hinaus. Der digitale Zwilling begleitet das Produkt über den gesamten Lebenszyklus hinweg. Außerdem besteht er aus drei Bestandteilen: dem realen Produkt an sich, einem digitalen Abbild und der Vernetzung beider Bereiche. Für das Zusammenspiel und die Optimierung vom realen Produkt und seinem digitalen Abbild werden die in Abb. 7.4 beschriebenen Schritte nacheinander durchgeführt.

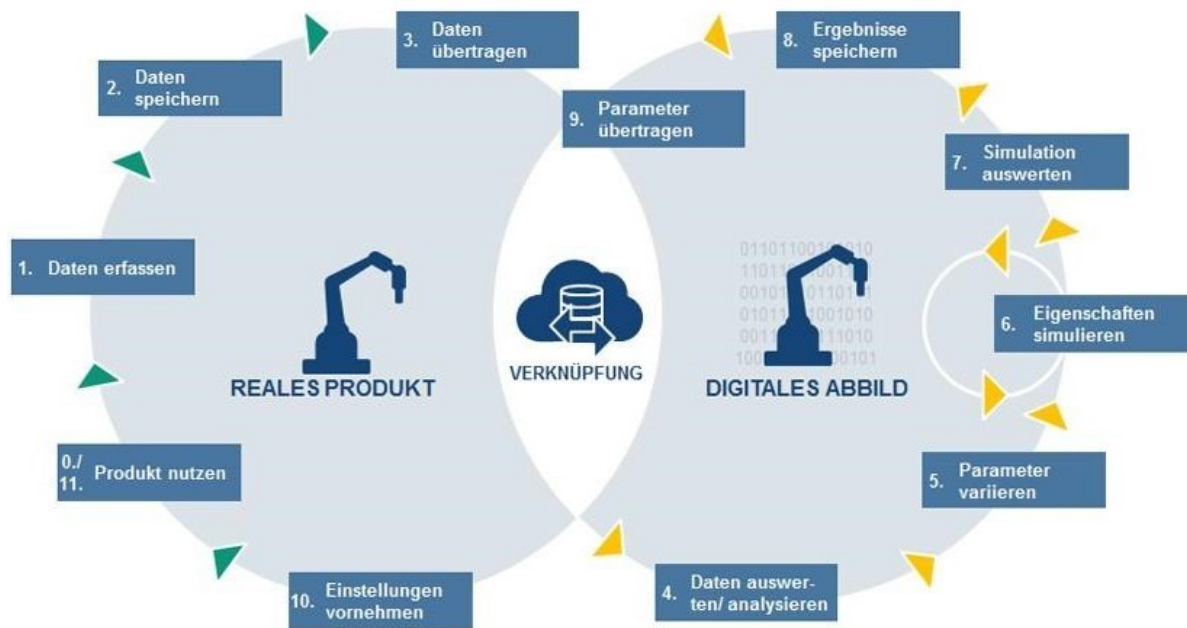


Bild 7.4: Etablierung von digitalen Zwillingen [21].

1. Ausgangspunkt sind grundsätzlich die bereits vorhandenen Daten, welche z.B. durch die Nutzung des Produktes erfasst werden können.
2. Diese Daten zum Nutzungsverhalten des Produktes, der Maschine, der Linie oder der gesamten Produktion werden in Echtzeit in einen Datenraum gespeichert.
3. Sollte es sich dabei um einen lokalen Speicherort handeln, wird eine Übertragung auf eine zentrale Stelle notwendig, wie z.B. einer Cloud.
4. Die gesammelten Daten werden anschließend analysiert und miteinander durch Variablen verknüpft um sie für das digitale Modell anzupassen.
5. Die aus der realen Welt erfassten Daten werden in einem Parameterraum eingeordnet, welcher durch Freiheitsgrade Handlungsspielraum zur Optimierung ermöglicht.
6. Anschließend werden die Daten durch die Anpassung von ausgewählten Parametern so verändert, dass sich z.B. neue Produkteigenschaften ergeben.
7. Die Produkteigenschaften werden wiederum ausgewertet, anschließend bewertet und eine Empfehlung für das reale Produkt ausgesprochen. Dies kann so lange wiederholt werden bis die gewünschte Optimierung erreicht ist.
8. Die neu generierten Produkteigenschaften werden, wie die realen Daten, im digitalen Datenraum gespeichert.
9. Diese „neuen“, Daten werden durch die Verknüpfung zwischen digitalem Abbild und realem Produkt letztendlich in die reale Welt übertragen.
10. Anpassen der Daten, dass die gewünschten Änderungen erzielt werden.
11. Nun kann das Produkt mit optimierten Funktion genutzt werden.

Der gesamte Zyklus wird kontinuierlich durchgeführt und ermöglicht dadurch eine stetige Verbesserung der Eigenschaften und eine Steigerung der zu erbringenden Leistung. Viele Schritte können dabei automatisiert werden.

7.4 Schlüsselmerkmale

Ein digitaler Zwilling zeichnet sich durch die folgenden fünf Merkmale aus:

Identität

Ein digitaler Zwilling repräsentiert einen individuellen physikalischen Wert. Der digitale Zwilling kann während der Entwicklung simuliert werden und besteht bis sein reales Gegenstück außer Betrieb genommen wird. Durch die gespeicherten Daten bleiben die Informationen jedoch bestehen auch wenn das reale Abbild bereits nicht mehr existiert.

Darstellung

Der digitale Zwilling erfasst die wesentlichen Merkmale des realen Gegenstücks in einem virtuellen Format wie CAD oder MES. Je genauer der digitale Zwilling dem realen Abbild gleichen soll, umso mehr Daten müssen aus unterschiedlichen Quellen bereitgestellt und verknüpft werden.

Status und Alarmierung

Der digitale Zwilling spiegelt den aktuellen Zustand des realen Objekts in Echtzeit wieder. Beispielsweise sind das Eigenschaften wie Standort, Prozessstatus oder Geschwindigkeit. Dies ermöglicht es dem Digitalen Zwilling, bei Problemen Warnungen und Alarme im Namen des Objekts auszulösen.

Kontext

Die Beschreibung des Betriebskontextes um das reale Abbild kann ebenfalls angezeigt werden. Dazu gehören z.B. Informationen über die Installation, die beteiligten Personen, Eigentümer und Geschäftspartner sowie Meldungen zu Wartung und Reparaturen am Objekt.

Interaktion

Die Kommunikation zwischen dem Digitalen Zwilling und dem realen Objekt erfolgt kontinuierlich über die Verknüpfung der beiden Welten. Nur wenn diese Interaktion sicher bereitgestellt werden kann, ist die Nutzung der Vorteile des digitalen Zwillings möglich [22].

7.5 Herausforderungen und Risiken

Durch die Verwendung eines Digitalen Zwillings bieten sich Chancen und Möglichkeiten wie auch Herausforderungen und Risiken die bewältigt werden müssen. Je nach Ausführung, Art und Einsatz des virtuellen Objekts wirken sich diese unterschiedlich stark aus.

Bei der Erstellung von **digitalen Avataren** sowie deren Nutzung müssen bestimmte Grundvoraussetzungen beachtet werden. So ist es wichtig, dass alle Informationen die ein digitaler Zwilling verarbeiten soll, in einer einheitlichen IT-Landschaft zusammengefügt werden. Dazu müssen in erster Linie Produktdesignern, Produktionsplanern und Anwendungstechniker ein **gemeinsames Verständnis** entwickeln um anschließend mit einem einheitlichen Konzept an einem Ziel arbeiten zu können. Alle Systeme die in den unterschiedlichen Phasen des Produktlebenszykluses benötigt werden, wie z.B. SAP, Business Portal, Windchill, verschiedene CAD-Programme und Datenbanken müssen auf einen einzigen Zugriffspunkt gebündelt werden, um die Daten sinnvoll verarbeiten zu können.

In jeder einzelnen Phase des Produktentstehungsprozesses gibt es **unterschiedliche Randbedingungen** und Konzepte zur Optimierung. Jede dieser Bedingungen muss für die einzelne Phase betrachtet werden um anschließend alle Phasen zusammen zu führen. Gefahr dabei ist die Unwissenheit wie sich diese Auswirkungen mit früheren oder nachfolgenden Aktivitäten vertragen [23].

Nachteilig ist ebenfalls die **unnötige Ausweitung der Komplexität** von bestimmten Prozessen. Nicht für jedes Produkt bzw. Projekt wird ein digitaler Zwilling benötigt. Teilweise würde dieser durch den zunehmenden Aufwand die Time-to-Market sogar in die Länge ziehen. Im Vorfeld ist zu klären, inwieweit der Detaillierungsgrad für das Projekt und den zugehörigen digitalen Zwilling notwendig ist, um daraufhin die notwendigen Ressourcen für den Entwurf einplanen.

Die Konzeptionierung von digitalen Zwillingen muss gut durchdacht sein. Ein **methodisches Vorgehen ist notwendig**, bei dem Schritt für Schritt nach agilen Vorgehensmustern eine virtuelle Kopie aus der realen Welt entsteht. Dabei ist es ebenfalls notwendig, den ganzheitlichen Einsatz des digitalen Zwillings in der gesamten Produktentwicklung zu betrachten. So müssen z.B. im Vorfeld Schnittstellen, Standardisierungen sowie der Informationsfluss definiert werden.

Um digitale Zwillinge überhaupt in Unternehmen nutzen zu können werden **Datenexperten** benötigt. Ganz ohne menschliche Intelligenz geht es noch nicht. Diese Data Scientists sind notwendig es, um eine Arbeitsumgebung zu erstellen und herauszufiltern welche Daten, Sensoren und Informationen für die Erstellung eines Digital Twins überhaupt notwendig sind. Auch um die Verbindung zu anderen unternehmensinternen Aufgaben im Bereich Industrie 4.0 zu erkennen und eine Brücke zu ihnen aufzubauen.

Eine weitere Herausforderung ist die **Koordinierung und Sicherung der riesigen Datenmenge**, die für den Betrieb eines digitalen Zwillings erforderlich ist. Digitale Zwillinge haben in der Regel mehrere Stakeholder, die jeweils nur auf bestimmte Daten zugreifen sollten. Dies birgt Risiken für geschützte Informationen, den Datenschutz und die Einhaltung von Vorschriften. Es muss sehr sorgfältig darauf geachtet werden, dass die richtigen Informationen in die richtigen Hände gelangen.

7.6 Chancen

Durch das virtuelle Modell eines Produktes wird die **Simulation und Validierung von Produkteigenschaften** ermöglicht. Dadurch lassen sich Merkmale und Besonderheiten sowie das Verhalten des Erzeugnisses in bestimmten Situationen herausfinden, welche zuvor nur durch aufwendige Tests ausfindig gemacht werden konnten. Ist z.B. der Motor in einem Einsatzbereich über 4000m ü.NN immernoch voll funktionsfähig? Solche Fragestellungen können durch einen digitalen Zwilling im Vorfeld getestet und optimiert werden [24].

Baugruppen, ganze Maschinen und Fertigungsstraßen lassen sich in einer virtuellen Umgebung so abbilden, dass **Fehler- und Störquellen** schon vor dem Betriebsstart ausfindig gemacht und **eliminiert werden können**. Dabei hat der digitale Zwilling das Potenzial, Methoden und Werkzeuge in jeder Phase einzugreifen und Änderungen vorzunehmen. Das spart Zeit und Kosten, um hochkomplexe Projekte in der realen Welt effizient mit geringem Ressourceneinsatz abzuschließen [24].

Fortlaufende Optimierungen werden durch den kontinuierliche Austausch zwischen digitalem Zwilling und Daten aus dem realen Betrieb erreicht. Sollte sich eine Verbesserung der aktuellen Situation ergeben, kann direkt am Bauteil eine Änderung vorgenommen werden. Das geht so weit, dass das Produkt hinsichtlich der Nutzung so verbessert werden kann, dass es perfekt auf den Kunden zugeschnitten ist.

Durch die Verwendung von digitalen Zwillingen ergibt sich eine **schnellere und effizientere Produktentwicklung**. Es kann immer mehr auf den Bau von realen Prototypen verzichtet werden. Das ermöglicht eine frühere Time-to-Market, was letztendlich den Vorteil zur **Zeit- und Kosteneinsparung** mit sich bringt.

Die Kosteneinsparung lässt sich ebenfalls auf die **frühzeitige Erkennung von Produktüberholungen und Wartungsfristen** anwenden. Durch das Sammeln von Daten aus der realen Anwendung kann der digitale Zwilling beispielsweise den durchschnittlichen Verschleiß einer Maschine berechnen und ein optimales Zeitfenster für eine Überholung anbieten. Dadurch werden unvorhersehbare Maschinenausfälle reduziert und eine erhöhte Verfügbarkeit der Anlage generiert.

Durch den Zusammenschluss von mehreren Anlagen und ihren virtuellen Abbildungen, lassen sich ganze Ökosysteme bilden die untereinander kommunizieren können und eine Verbesserungen des kompletten Lebenszyklus von Produkt und Maschine ermöglichen. Alles in allem führt die Nutzung von digitalen Zwillingen zu einer **nachhaltig gesteigerten Wettbewerbsfähigkeit**.

7.7 Beispiele in der Anwendung

Die Einsatzmöglichkeit von digitalen Zwillingen kann auf viele Branchen angewendet werden. Die Technologie wird bisher überwiegend in der Fertigung und Produktion eingesetzt, aber sie hat ebenfalls Auswirkungen auf eine Reihe von weiteren Branchen, welche im Folgenden durch Beispiele genannt werden.

Beispiel Gesundheitswesen

Digitale Zwillinge können sowohl den Krankenhausbetrieb als auch die Versorgung der Patienten revolutionieren. Die Schaffung eines vernetzten Systems von digitalen Zwillingen, welche ein ganzes Krankenhaus und alle darin enthaltenen Maschinen repräsentiert, kann den Operationsteams helfen, eine sichere Umgebung mit einer schnelleren Patientenversorgung zu schaffen. Unternehmen sind bereits so weit, dass die Herstellung von digitalen Zwillingen von Menschen und Organen möglich ist. Das ermöglicht eine vollständige Simulationen und Testdurchführung bevor Operationen an der Person durchgeführt werden. Dies senkt das Potenzial sowie die Sterblichkeitsrate und hilft die Ergebnisse der Patienten zu verbessern.

Die Ingenieure von General Electric arbeiten daran, Sensoren in Miniaturgröße zu entwickeln, die die lebenswichtigen Informationen einer Person wie Herzfrequenz, Blutdruck und Sauerstoffgehalt überwachen könnten. All diese medizinischen Daten würden dann gesammelt und mit einem digitalen Zwilling verbunden werden. Dieser entwickelt daraus ein mehr oder weniger exaktes Modell des Körpers der Person. Die medizinischen Informationen könnten anschließend von einer Software analysiert werden, die wiederum die Ärzte auf Anomalien aufmerksam machen. Mit der Integration künstlicher Intelligenz könnte die Software sogar beginnen, diagnostische Empfehlungen zu geben. Dies könnte die Versorgung in Krankenhäusern verbessern, aber auch den Ärzten Einblick in das Wohlbefinden ihrer Patienten geben, wenn diese nicht im Krankenhaus sind.

Beispiel Automobilbereich

Es wird vorhergesagt, dass sich bis ins Jahr 2050 12,4 Millionen Fahrzeuge mit Autobahnpilot auf der Straße befinden werden [25]. Das Aufkommen autonomer Fahrzeuge bedeutet eine Vermehrung neuer, miteinander verbundener Technologien. Die Automobilhersteller können einen digitalen Zwilling jedes einzelnen verkauften autonomen Fahrzeugs erstellen. Dadurch kann außerdem analysiert werden, wie sich ein Auto in seiner physischen Umgebung verhält. Auch die Verfolgung der Fertigung, Produktion bis hin zur Verschrottung kann ohne weiteres nachverfolgt werden.

Ein großer Teil der Sensorinfrastruktur ist bereits in neu auf den Markt gebrachten Fahrzeugen vorhanden die ständig die kritischen Systeme eines Autos kontrollieren. Wenn Autobesitzer in die Werkstatt gehen und ein Mechaniker eine Diagnose durchführt, sind es diese Sensordaten, die ihm sagen, was repariert werden muss. Der nächste Schritt besteht

darin, Systeme einzurichten, die diese Daten automatisch an den Hersteller zurücksenden, diese Daten zu analysieren und eine vorausschauende Analyse durchzuführen, die dazu beitragen kann das Fahrerlebnis für die Autobesitzer intelligenter und sicherer zu machen.



Bild 7.5: Schaffung von vernetzten Systemen im Automobilbereich [26].

Beispiel anhand von Städtischen Infrastrukturen

Um die Transport- und Reisesysteme in New York City zu verbessern, beschloss die Regierung, eine digitale Nachbildung der Stadt zu erschaffen. Durch den Aufbau einer ganzen Stadt auf einer digitalen Plattform sind die Ingenieure nun in der Lage, digitale Straßensysteme unterirdisch zu entwickeln und genau vorherzusagen, wie sich dieses neue Verkehrssystem mit den normalen Straßen von New York City verbinden wird. Schließlich können sie anhand von Daten über die durchschnittliche Verschlechterungsrate einer Straße in einer der verkehrsreichsten Straßen der Stadt sichere Vorhersagen darüber treffen, wie oft die neuen unterirdischen Straßen ersetzt werden müssen, um die Sicherheit des neuen Straßensystems zu gewährleisten. Durch die Überwachung der Nutzung dieser Verkehrswege könnte wiederum die optimale Zeit für Wartungsarbeiten herausgefunden werden, um die Verbesserung durchzuführen [27].

Beispiel im Bereich Luft- und Raumfahrt

Im Bereich Luft- und Raumfahrt ist die Vermeidung jedes potentiellen Risikos oberste Priorität. Doch wie kann die durchschnittliche Lebensdauer eines Düsentriebwerks vorhergesagt werden und woher weiß man wie sich das Risiko verhält wenn Flugzeugtriebwerke nicht Vorschriftsgemäß ausgetauscht werden?

Durch die Erstellung eines digitalen Zwillings des Flugzeugtriebwerks können Piloten den Zustand des Triebwerks überwachen, um zu sehen, ob ein potenzielles Risiko eines tödlichen Triebwerksausfalls in naher Zukunft besteht. Das gleiche Konzept gilt für alle anderen Teile eines Flugzeugs. Positiv ist dabei, dass durch die Simulation bevorstehende Ergebnisse Vorhersagen für die Zukunft getroffen werden können, ohne dass diese eintreten werden. Dabei gilt: Je größer die Menge an gesammelten Daten, umso genauer die sich ergebenden Vorhersagen. Die U.S. Air Force setzt durch digitale Zwillinge heutzutage Warnregeln ein, welche ungewöhnlichen Verschleiß oder unvorhergesehene Schadensentwicklung von Triebwerken erkennen und Empfehlungen bezüglich der weiteren Nutzung und Fehlerbehebung aussprechen.

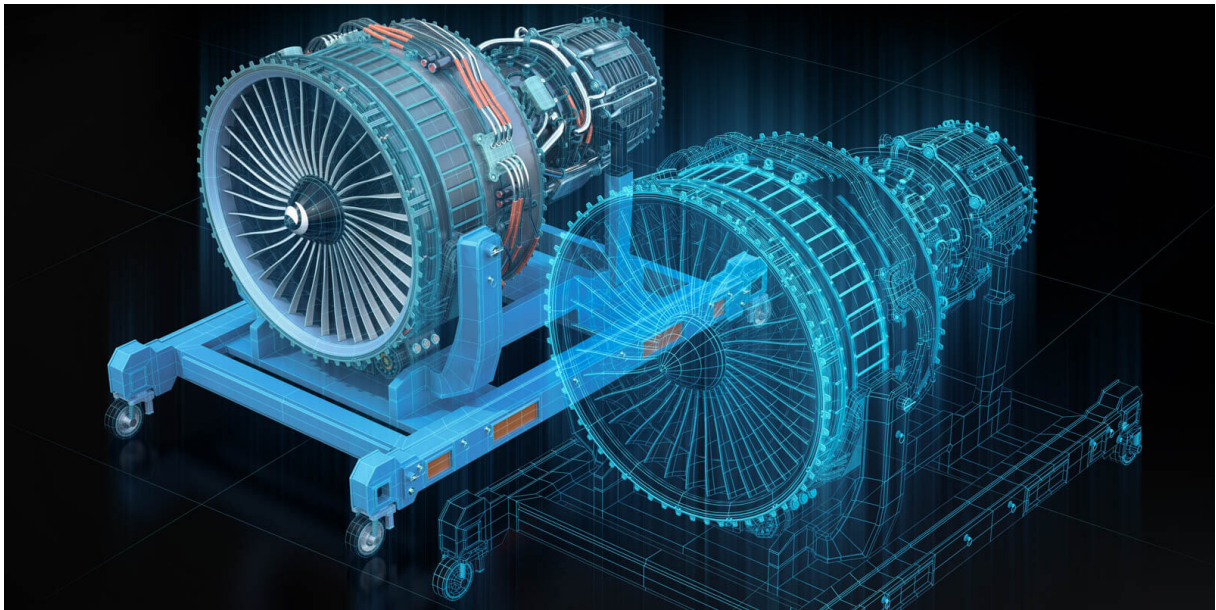


Bild 7.6: Digitaler Zwilling eines Flugzeugtriebwerks [28].

7.8 Zukunft des digitalen Zwillings

Aktuell befindet sich die Technologie um den digitalen Zwilling noch immer im Anfangsstadium. Doch durch die fortlaufende Digitalisierung und der immer größer werdenden **Vernetztheit**, wird diese Technologie sich in alle Bereiche unseres Lebens ausbreiten. Dabei sind es vor allem die unermesslichen Möglichkeiten, die die Entwicklung immer weiter voran treiben wird. Denn fast alles was man sich vorstellen kann, wird in Zukunft reproduzierbar und digitalisierbar sein.

Da die Technologie des digitalen Zwillings nun auf den Märkten angekommen ist, können die Entwickler jedes physische Objekt einfach und genau virtuell darstellen, indem sie spezielle **Kontrollgeräte/Sensoren** anbringen, die das Objekt oder Produkt scannen und die Modellerstellung für sie durchführen - dies spart Zeit und macht alles zehnmal effizienter. Ebenfalls werden digitale Zwillinge den Einblick in die Daten und der **Entscheidungsfindung** verbessern und schließlich bei der Entwicklung neuer Geschäftsmodelle helfen.

Beispielsweise könnten Automobilingenieure digitale Zwillinge in Verbindung mit einem Analyse-Tool verwenden, um zu analysieren, wie ein bestimmtes Auto gefahren wird, um neue Funktionen zur **Reduzierung von Unfällen** vorzuschlagen. Wieder andere Modelle könnten sich auf potenzielle neue Marktplätze für digitale Zwillinge, Schnittstellen und entsprechend sanierte Datensätze von digitalen Zwillingen konzentrieren [29].

Letztendlich wird es den Beteiligten ermöglichen, die Gesamteffizienz und die Kosten der Unternehmen zu verbessern und viele Aspekte der Arbeit auch für die Mitarbeiter zu verändern. Dieses Potenzial wird die Wirtschaft und die Industrie in ihrem heutigen Dasein früher oder später umschlagen und letztendlich revolutionieren.

7.9 Zusammenfassung

Die ersten Schritte im Bereich Industrie 4.0 sowie die damit verbundene Automatisierung wird nach und nach in unsere heutige Welt eingeführt. Diese entstehende digitale Welt kann durch unterschiedliche Varianten umgesetzt werden, eine davon wäre die Einführung von digitalen Zwillingen.

Digitale Zwillinge bieten große Möglichkeiten in verschiedenen Bereichen z.B. im Produktentstehungsprozesses. Die vorgestellten Beispiele zeigen dabei erste Ansätze für die Integration von Produktionswissen oder Produktzwillingen in den jeweiligen Bereichen. Die kontinuierliche Verknüpfung von digitalen Zwillingen ist der Schlüssel zur weiteren Verbesserung der operativen Exzellenz und zur Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit innerhalb der Industrie.

Die wichtigste zukünftige Herausforderung besteht darin, einen konsistenten Rahmen für den ganzheitlichen Einsatz von digitalen Zwillingen im gesamten Produktentwicklungsprozess zu definieren. Dieser sollte die Themen, gemeinsames Verständnis von Schnittstellen und Standardisierung sowie effizienter Informationsfluss betrachten. Dies erfordert insbesondere die Integration von Produktdesignern und Produktionsplanern, um neue Konzepte in der zukünftigen Forschung zu meistern.

KAPITEL 8

Sicherheitsrisiken in der Smart Factory

Lernziele

Nach der Bearbeitung dieser Lektion werden Sie wissen, ...

- ... wie sie die Sicherheitsrisiken einer Smart Factory einzuschätzen haben
- ... welche Handlungsempfehlungen es für eine sichere intelligente Fabrik gibt
- ... welche Handlungsleitfaden der VDMA vorgeschlägt

Einführung

Die rasante Entwicklung von Hard- und Software im Bereich der industriellen Steuerungssysteme (**ICS**) und von Operational Technology (**OT**) hat zu immer stärker vernetzten Produktionsumgebungen in der Industrie geführt.

Die Unternehmen nutzen im Zuge der digitalen Transformation und Industrie 4.0 zahlreiche, aus unserem Alltag bekannte Basistechnologien des digitalen Zeitalters für eine verbesserte und effizientere Produktion: Cloud-Computing, mobile Apps, Big Data, Machine Learning, künstliche Intelligenz und viele mehr. Dabei sollten sie jedoch die Cyberrisiken dieser neuen Technologien stets kritisch im Auge behalten.

Vor allem in Unternehmen, die eine direkte Auswirkung auf gesundheitliche Aspekte haben wie z.B. die Ernährungsindustrie, Pharmaindustrie oder Medizintechnik spielt die Sicherheit sogar die zentrale Rolle.

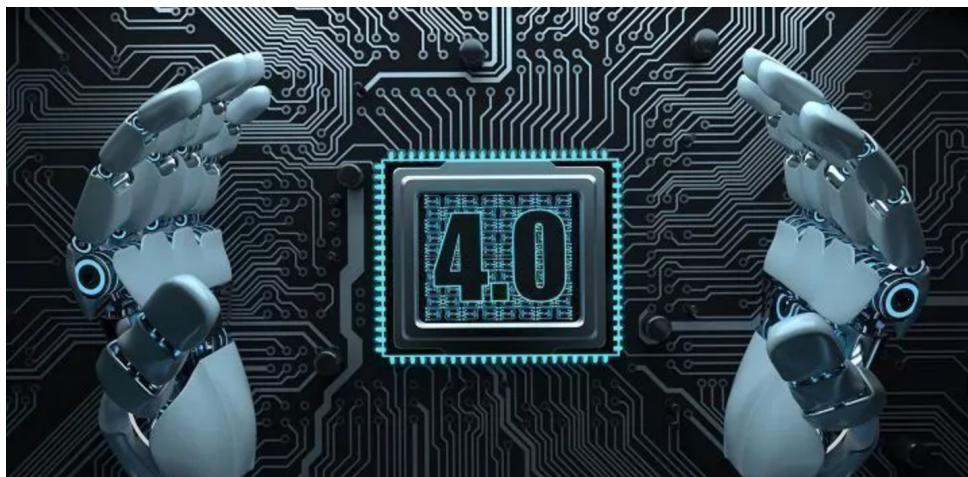


Bild 8.1: Sicherheit und Industrie 4.0

Die Tendenz der vollständigen Verschmelzung der Geräte im Internet führt zu den grundsätzlichen Gefahren von Angriffen von außen oder der unbefugten Nutzung. Es sind Missbrauchsszenarien denkbar die vom unbefugten Auslesen und Ausspionieren persönlicher Daten, über das Ausführen von unerwünschten Aktionen bis hin zur Sabotage und Zerstörung von ganzen Industrieanlagen reichen.

Diese neuen Risiken, die durch die Vernetzung geschaffen wurden, sollen mit entsprechenden Sicherheitsmaßnahmen verringert werden. Hauptsächlich wird das Augenmerk dieser Maßnahmen auf technische sowie organisatorische IT-Sicherheitsmaßnahmen gerichtet. Diese Risiken lassen sich bei der Smart Factory in die Aspekte **Informationssicherheit** (Spionage, Angriffssicherheit) und **Betriebssicherheit** (Sabotage, Safety) einteilen.

8.1 IT-Sicherheit

Eines der größten technischen Risiken innerhalb einer Smart Factory stellt die „IT-Sicherheit“ dar. In den letzten Jahren nahmen die Cyber-Attacken gegen Unternehmen sowie auch gegen Privatpersonen stetig zu. Aufgrund des mangelnden Ausbaus von Datenschutz und Datensicherheit entstehen durch **Cyber-Attacken** hohe finanzielle Schäden.

Auch die Ausbreitung neuer Geschäftsmodelle und der Einsatz von Cloud-Lösungen werden durch die aufkommenden Gefahren gehemmt. Mittels der CPSbasierten Produktionssysteme entstehen neue Sicherheitsanforderungen, da sie einen hohen Vernetzungsgrad aufweisen. Sie sind vernetzt mit einer Vielzahl an beteiligten Maschinen, IT-Systemen und Automatisierungskomponenten.

Die technischen Systemkomponenten agieren teilweise autonom mit einem zeitkritischen Daten- und Informationsaustausch, wobei zugleich mehrere Akteure entlang der Wertschöpfungskette beteiligt sind.

Man kann in produzierenden Unternehmen eine Unterteilung von der sogenannten **Office-IT-Umgebung** und der **Produktions-IT-Umgebung** unterscheiden. Wobei bei den klassischen Office-Anwendungen der IT-Bereich meist mit aktuell gepflegten Firewalls gegen Hacker Angriffe und unberechtigten Zugängen zu den Systemen geschützt ist, werden die Produktionsanlagen und Maschinen hauptsächlich mit älteren IT-Systemen gesteuert und IT-sicherheitstechnisch vernachlässigt. Der Grund für die zum nicht auf den neuesten Stand der IT-Sicherheit befindlichen Produktionssysteme sind die alles überstrahlende Vorgabe der Verfügbarkeit. Mit anderen Worten, eine Produktionsanlage darf nicht stillstehen.

Es ist deshalb in den Unternehmen gängige Praxis, eine einmal installierte Produktionsanlage nicht mehr zu verändern (**„never touch a running system“**). Oft werden auch von den Lieferanten der Produktionssysteme nach Installierung keine sicherheitstechnischen Wartungen der Steuerungssysteme mehr angeboten. In vielen Unternehmen führt das dazu, dass z.B. nicht mehr auf die neuesten Betriebssysteme umgestiegen wird und über die Sicherheitslücken die Anlagen für Angriffe über das Netzwerk in erheblichem Ausmaß anfällig sind. Die Probleme mit zwar lauffähigen, aber veralteten Systemen sind auch unter dem Begriff **„Legacy“** bekannt.

Oft werden bei den Produktionsanlagen auch die Verwendung von Zugangsberechtigungen und Passwortabfragen vernachlässigt, um die Produktion nicht von einzelnen Mitarbeitern abhängig zu machen.

Um die Risiken in Smart Factories zu minimieren, muss sichergestellt werden, dass die Kommunikation innerhalb der Produktionsanlagen so abgesichert werden, dass es zu keinen Störungen kommen kann und Manipulationen ausgeschlossen werden. Gleichzeitig müssen die erzeugten Daten

vor Diebstahl und Missbrauch geschützt werden. Deshalb müssen die einzelnen Systeme und Komponenten gegen Angriffe wie Denial-of-Service-Attacks (**DoS-Attacks**¹) oder Schadsoftware geschützt werden.

Notwendig sind folgende Sicherheits-Maßnahmen die alle Komponenten des IoT betreffen:

- Leistungsfähiges Identitäts- und Zugriffsmanagement
- Verschlüsselung aller Daten die über das öffentliche Internet übertragen werden
- Einrichtung von Firewalls
- Robuste Systeme zur Verhinderung von Angriffen
- Software- und Patchmanagement zum Beheben erkannter Sicherheitsmängel

8.2 Datenschutz

Neben den Risiken im Bereich IT-Sicherheit, also Computersicherheit, Datensicherheit, Datenspeicherung (Backups etc.) ist das Feld Datenschutz ebenfalls relevant. Hier geht es nicht um den Schutz von allgemeinen Daten vor Schäden, sondern um den Schutz personenbezogener Daten vor Missbrauch (»Datenschutz ist Personenschutz«). »Der Schutz personenbezogener Daten stützt sich auf das Prinzip der **informationellen Selbstbestimmung**. Geschützt werden muss dabei die Privatsphäre, d. h. Persönlichkeitsdaten bzw. Anonymität müssen gewahrt bleiben.

Jedes Unternehmen ist verpflichtet den Gesetzen nachzukommen, die im deutschen Bundesdatenschutzgesetz (BDSG) in § 1, ausschließlich Anforderungen für den Umgang mit personenbezogenen Daten festgeschrieben sind.

Für Europa gilt die Europäische Datenschutzkonvention und wurde bereits 1981 vereinbart. Dies ist ein völkerrechtlicher Vertrag der beteiligten Staaten, der den Schutz und den grenzüberschreitenden Austausch personenbezogener Daten regelt. Die offizielle Bezeichnung lautet »Übereinkommen zum Schutz des Menschen bei der automatischen Verarbeitung personenbezogener Daten (Konvention Nr. 108)«.

Es besteht natürlich immer die Gefahr, dass Mitarbeiter, die selbst legalen Zugriff auf wichtige Daten haben, diese missbrauchen. Dies zu unterbinden, ist extrem schwer und lässt sich mit technischen Mitteln eigentlich nicht verhindern. Ein gesundes Betriebsklima und respektvoller Umgang mit den Mitarbeitern sollte hier die oberste Prämisse sein, und zwar nicht nur um Missbrauch durch unzufriedene Mitarbeiter zu vermeiden.

8.3 Organisatorische Risiken

Im Allgemeinen reduziert sich der Bereich der Smart Factory fast ausschließlich auf die Einführung neuer Technologien. Dennoch müssen organisatorische Risiken abgewogen werden. Wird dies nicht getan, besteht die Gefahr, dass die durch die Industrie 4.0 herbeigeführten Veränderungen zu erheblichen Problemen, fallendem Potential und Verzögerungen in der Implementierung von Industrie 4.0 führen.

Die Aufbauorganisation eines Unternehmens spielt besonders in seiner höchsten Hierarchieebene eine signifikante Rolle. Hier muss das Management eine klare Strategie und einen Plan zur

1 **Denial of Service** = (DoS; engl. für "Verweigerung des Dienstes") bezeichnet in der Informationstechnik die Nichtverfügbarkeit eines Internetdienstes, der eigentlich verfügbar sein sollte. Sehr oft verursacht durch Überlastung des Datennetzes (auch mutwillig).

Digitalisierung definieren, um das Verständnis für die IT und die Prozesse aufzuzeigen. Organisationsmodelle müssen außerdem Kooperationen ebenso wie die Kommunikation zwischen allen Teilnehmern (Menschen und Maschinen) ohne Hierarchiehürden ermöglichen. Um die Mitarbeiter entsprechend auf die neuen Aufgaben in einer Smart Factory einstellen zu können, muss das Management ein Change-Team bzw. eine Change-Abteilung aufstellen – in der Realität wird dies oftmals nicht umgesetzt. Dies hat eine Art Neophobie zur Folge, wobei die neuen Aufgabenbereiche zunächst sehr kritisch betrachtet werden. Außerdem ist häufig eine sinkende Zufriedenheit der Mitarbeiter zu beobachten. Aus diesem Grund muss das Change-Team dafür sorgen, dass Kompetenzen ebenso wie die Qualifizierung der Angestellten des Unternehmens gegeben ist.

Die neuen Technologien von Industrie 4.0 ändern sowohl die Arbeitsabläufe und -anforderungen der Ausbildungsplätze als auch das Berufsbild der einzelnen Tätigkeiten als solches. In der Produktion wird weitaus mehr Fachpersonal benötigt, gleichzeitig sinkt der Anteil der Mitarbeiter mit geringeren Qualifikationen, was auf die Digitalisierung zurückzuführen ist. Aktuell haben Unternehmen das Problem, dass viele ihrer Angestellten nicht in der Lage sind die neuen Technologien anzuwenden, da sie die neuen Prozesse nicht verstehen. „Lifelong learning“, Veränderungen in der Arbeitsorganisation, Teamzusammensetzung und Wissensmanagement werden auch noch in der Zukunft eine signifikante Rolle spielen.

8.4 Wirtschaftliche Risiken

Zusätzlich zu den technischen und organisatorischen Risiken müssen auch die wirtschaftlichen Risiken abgewogen werden. Die erste Herausforderung ist der **fehlende Wille zu investieren** – obwohl Investitionen in Industrie 4.0 im Moment relativ kostengünstig sind.

Das größte Problem stellt jedoch die **fehlende Transparenz des wirtschaftlichen Mehrwerts** dar. So müssen Unternehmen in der Maschinenbau- und Anlagenindustrie schon heute zum Zeitpunkt der Investition die Anforderungen erwägen, die Produkte in der Zukunft haben werden. Grundsätzlich lässt sich allerdings feststellen, dass die Unternehmen die Relevanz von Investitionen in Industrie 4.0 in allen Sektoren schon lange erkannt und wahrgenommen haben.

Unternehmen müssen die notwendigen Mittel für Investitionen und Ressourcen bereitstellen, damit eine Smart Factory umgesetzt werden kann. Studien zeigen, dass in Deutschland aktuell 2025 jährlich **50-70 Milliarden** Euro in Industrie 4.0-Anwendungen investiert werden ([Bitkom Studie-Industrie-40.pdf, 2025](#)).

Ein weiteres Risiko ist der **Verlust von Arbeitsplätzen** innerhalb einer Smart Factory, da einfache Produktionsarbeiten durch die Digitalisierung ersetzt werden. Ziel der Einführung einer Smart Factory sollte es jedoch sein, die Automatisierung zu erhöhen und die Kosten zu senken und nicht, die Zahl der Arbeitsplätze zu reduzieren. Die Einführung einer Smart Factory verlangt den flexiblen Einsatz von Personal. Es gibt bereits starke Schwankungen im Personalbedarf.

In Zukunft werden diese Schwankungen noch größer sein. Auch die Anforderungen an den Produktionsmitarbeiter in Bezug auf die Qualifikation ändern sich. Akademischen Berufe wie Mathematiker, Informatiker, Berufe im Bereich der Naturwissenschaften und Technik müssen ebenso wie die nicht-akademischen Berufe der Mechatronik und Automatisierungstechnik weiter gefördert werden, um die hohe Nachfrage in der Wirtschaft zu befriedigen. Die Ausbilder müssen die Fähigkeiten der Auszubildenden in den Bereichen der Industrie 4.0-Technologien steigern. Durch interne Aus- und Weiterbildung wird sichergestellt, dass die Mitarbeiter in der Produktion auf dem neuesten Stand der Technik sind.

Die Einführung der Smart Factory ermutigt die Mitarbeiter, sich selbst zu organisieren und damit **mehr Eigenverantwortung** zu übernehmen. Folglich kann der Verlust einiger Geschäftsbereiche als ein wirtschaftliches Risiko bezeichnet werden. Die neuen Marktteilnehmer verdrängen etablierte Hersteller wie Buchhandlungen und Verlage während Startups den Herstellern neue Wege öffnen.

Zudem ist die mangelnde Unterstützung der Forschung ein großes Hindernis. Deutschland investiert gut in Forschung und Finanzierung, jedoch investieren Länder wie China und Japan durch ihre höhere Investitionsbereitschaft besser im selben Bereich.

Die festgestellten wirtschaftlichen Risiken deuten darauf hin, dass ohne Berücksichtigung dieser Fragen keine wettbewerbsfähige und vernetzte Produktionsumgebung entstehen kann.

8.5 Industrielle IT-Sicherheit nach IEC 62443 und ISO 27001

Mit der fortschreitenden vertikalen und horizontalen Vernetzung der Smart Factory (Verschmelzung von IT und OT reicht klassische Office-IT-Sicherheit nicht mehr aus.

Während in der Office-IT die Vertraulichkeit von Daten an erster Stelle steht, gilt in der Produktion die Priorität der Verfügbarkeit und Integrität von Echtzeitprozessen. Ein Produktionsstillstand oder die Manipulation von Prozessdaten kann verheerende wirtschaftliche und physische Schäden verursachen.

Bildet die ISO 27001 das übergeordnete, organisatorische Managementsystem für die gesamte IT- und Informationssicherheit eines Unternehmens definiert, regelt die IEC 62443 die konkreten technischen und operativen Sicherheitsanforderungen für die Steuerungssysteme in der Produktion (OT). Zusammen bilden sie eine lückenlose Sicherheitsstrategie, bei der die ISO 27001 den strategischen Rahmen vorgibt und die IEC 62443 die Maschinenhalle vor Cyber-Angriffen schützt

IEC 62443 und ISO 27001

IEC 62443 und ISO 27001 sind komplementäre Standards für Informations- und Betriebssicherheit:

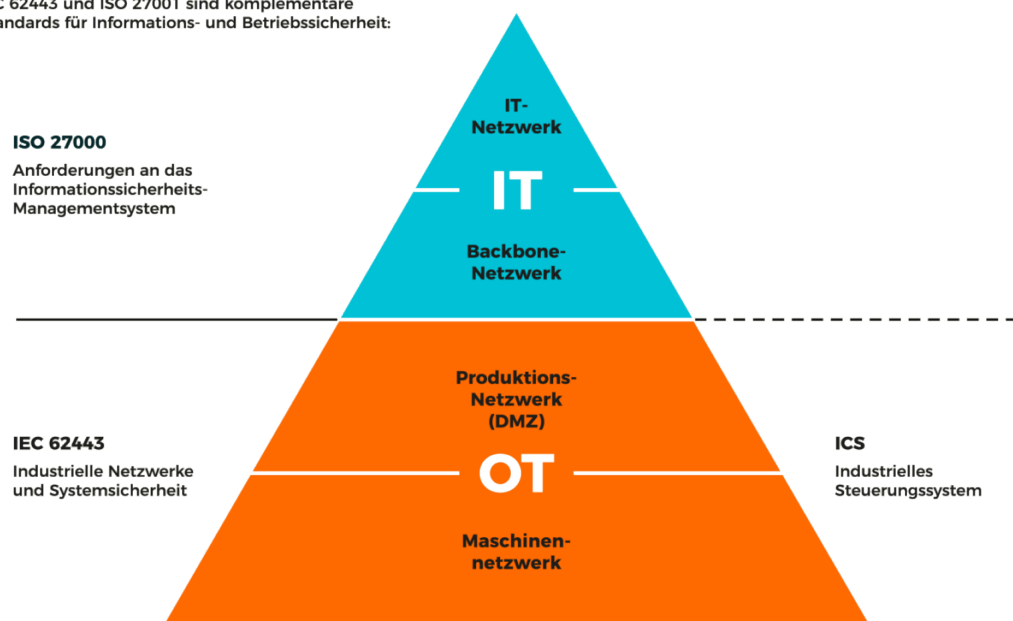


Bild 8.2: Industrielle IT-Sicherheit nach IEC 62443 und ISO 27001

Der Goldstandard: **Die Normreihe IEC 62443**

Die internationale Normreihe IEC 62443 („Industrielle Kommunikationsnetze – IT-Sicherheit für Netze und Systeme“) ist der weltweit führende Standard zur Absicherung von Automatisierungslösungen (IACS - Industrial Automation and Control Systems). Sie richtet sich gleichermaßen an drei Schlüsselakteure der Smart Factory:

1. Betreiber (Asset Owner): Müssen Sicherheitsrichtlinien und Prozesse definieren.
2. Systemintegratoren: Müssen sichere Gesamtanlagen konzipieren und inbetriebnehmen.
3. Gerätehersteller (Component Product Supplier): Müssen „Security-by-Design“ in Hardware- und Softwarekomponenten (z. B. Steuerungen) integrieren.

Das Architektorkonzept: Defense-In-Depth (tiefengestaffelte Verteidigung) Da es keine hundertprozentige Einzelsicherheit gibt, fordert die IEC 62443 einen mehrschichtigen Sicherheitsansatz. Fällt eine Verteidigungslinie, greift die nächste. Das Konzept gliedert sich in drei Hauptsäulen:

1. Physische Sicherheit (Physical Security):
 - Zutrittskontrollen zu Serverräumen, Schaltschränken und Produktionszellen.
 - Deaktivierung ungenutzter physischer Schnittstellen (z. B. USB-Ports an IPCs), um Schadsoftware-Einschleppung vor Ort zu verhindern.
2. Netzwerksicherheit (Network Security & Zonenmodell):
 - Segmentierung der Fabrik in logische „Zonen“ mit gleichem Sicherheitsbedürfnis (z. B. Trennung von Feldebene, Leitebene und Cloud-Anbindung).
 - Definition von streng kontrollierten Schnittstellen („Conduits“) zwischen den Zonen. Jeglicher Datenverkehr (z. B. via OPC UA) muss Firewalls und tiefe Paketinspektionen (DPI) passieren.
3. Systemsicherheit (System Integrity):
 - Härtung von Betriebssystemen der Maschinensteuerungen (Abschalten ungenutzter Dienste).
 - Kontinuierliches Patch-Management und der Einsatz von Intrusion Detection Systemen (IDS), die im OT-Netzwerk Anomalien und unbefugte Zugriffe in Echtzeit erkennen.

Zentrales Schlüsselkonzept: Security Levels (SL) Die Norm definiert vier Sicherheitsstufen (Security Levels), gegen die Komponenten und Systeme zertifiziert werden können:

- **SL 1:** Schutz gegen die unbeabsichtigte oder zufällige Verletzung der Sicherheit.
- **SL 2:** Schutz gegen die vorsätzliche Verletzung mit einfachen Mitteln (Hobby-Hacker).
- **SL 3:** Schutz gegen vorsätzliche Verletzung mit hochentwickelten Mitteln (organisierte Kriminalität).
- **SL 4:** Schutz gegen vorsätzliche Verletzung mit hochentwickelten Mitteln und spezifischem Branchenwissen (staatlich finanzierte Angreifer/Sabotage).

8.6 Handlungsvorschläge des BMWi

Das damalige BMWi, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (heute BMWK, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz) hat sich zur Prämisse gemacht, die deutsche Wirtschaft bei Fragen der Sicherheit und der Abwehr von nationalen und internationalen Angriffen zu unterstützen.

Darüber hinaus existieren in der Wirtschaft Einrichtungen, deren Beeinträchtigung Gefahren für das Leben oder die Gesundheit der Bevölkerung, für die öffentliche Sicherheit oder Ordnung sowie für die Verteidigungsbereitschaft der Bundeswehr hervorrufen können. Eine besondere Gefahr kann dabei zudem immer auch von Personen ausgehen, die in diesen Einrichtungen tätig sind.

Das BMWi hat die Initiative »IT-Sicherheit in der Wirtschaft« eingerichtet. Mit der Initiative sollen Unternehmen für das Thema IT-Sicherheit sensibilisiert und dabei unterstützt werden, ihr IT-Sicherheitsniveau zu verbessern. Gemeinsam mit IT-Sicherheitsexperten aus Wirtschaft, Wissenschaft und Verwaltung wurden die zehn wichtigsten Punkte zusammengestellt.

1. Die IT-Systeme, mobile Geräte und Dienste sollen stets aktuell sein und regelmäßig auf Viren geprüft werden.
2. Sicherheitsrichtlinien und IT-System-Notfallpläne sollen gut verständlich erstellt werden.
3. Verwendung von qualifizierter elektronischer Signatur, Verschlüsseln bei sensiblen Daten und Achtsamkeit beim Versicken und Speichern.
4. Verwendung eines eindeutigen und qualifizierten Berechtigungssystems
5. Regelmäßige räumlich getrennte Datensicherung mit Hinblick auf jederzeitige Verfügbarkeit.
6. Kooperation nur mit vertrauenswürdige IT-Dienstleister oder Softwareanbieter die nach europäischen Datenschutzstandards arbeiten.
7. Unternehmenskritische Daten in der Cloud nur in Organisationsformen (z.B. Private Cloud) die erhöhte Sicherheit inkl. Verschlüsselung bieten.
8. Bei IT-Geräten stets verschlüsselte Übertragungswege wie **VPN**¹ und Proxy-Server, die keine Nutzerdaten speichern verwenden.
9. Den Mitarbeiter Richtlinien im Umgang mit sozialen Netzwerken vorgeben.
10. Die Belegschaft regelmäßig für das Thema IT-Sicherheit schulen und aufmerksam machen.

Weitere Informationen und kostenlose Angebote zu dem Thema IT-Sicherheit findet man auf der Internetseite www.it-sicherheit-in-der-wirtschaft.de.

8.7 VDMA-Handungsleitfaden nach IEC 62443

Der Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer e. V. (VDMA) mit seinen gut 3.200 Mitgliedern ist die größte Netzwerkorganisation und wichtiges Sprachrohr des Maschinenbaus in Deutschland und Europa. Er bietet seinen Mitgliedern und den Unternehmen Unterstützung u.a. auf den Gebieten Beruf und Bildung, Forschung, Innovation, Recht, Normung und allgemein bei Fragen zu Gesellschafts- und Wirtschaftspolitik.

¹ **VPN** = (engl. für Virtual Private Network), virtuelles privates Kommunikationsnetz

Aus der Vereinigung hat sich das VDMA-Forum Industrie 4.0 gebildet das aus einem interdisziplinären Team von VDMA-Experten, die sich als Partner und Dienstleister verstehen gegründet. Sie unterstützen die Mitgliedsunternehmen in den für Industrie 4.0 maßgeblichen Handlungsfeldern.

Die IT-Sicherheit ist für die Betriebe in Hinsicht von Industrie 4.0 für die Fertigungsprozesse überlebenswichtig. Vor allem der selbständig ablaufende Datenaustausch muss sicher und zuverlässig gewährleistet sein. Dabei müssen die Akteure kontrolliert identifiziert und sämtliches Wissen über Produkte, Maschinen und Anlagen geschützt werden.

Da klassische IT-Sicherheitskonzepte in der Produktion versagen, hat der VDMA seinen praxisnahen Sicherheitsleitfaden modernisiert. Der Fokus liegt heute auf der Implementierung der internationalen Normenreihe IEC 62443.

Der VDMA-Leitfaden bricht die komplexe Norm für den Maschinenbau in praxisnahe Schritte auf:

1. **Rollenverteilung definieren:**

Der Leitfaden regelt die klare Verantwortung zwischen dem Maschinenhersteller (Sicherstellung von Security-by-Design), dem Systemintegrator (sichere Vernetzung der Gesamtanlage) und dem Fabrikbetreiber (Definition von Sicherheitsprozessen im Betrieb).

2. **Risikobeurteilung und Zonenmodell:**

Anlagen müssen gemäß IEC 62443 in logische Sicherheitszonen unterteilt werden. Kritische Steuerungen der Feldebene werden strikt von administrativen Netzen oder Cloud-Anbindungen isoliert. Die Verbindungskanäle (Conduits) zwischen diesen Zonen werden durch Firewalls mit Deep Packet Inspection (DPI) geschützt.

3. **Cyber-Sicherheit im Produktlebenszyklus verankern:**

Sicherheitsfunktionen müssen von der Entwicklung über die Inbetriebnahme bis hin zur jahrzehntelangen Wartung der Maschine aktiv gepflegt werden. Dazu gehört auch die Härtung von Systemen durch das Deaktivieren ungenutzter Dienste und physischer Schnittstellen (wie USB-Ports an Maschinen).

8.8 Zusammenfassung

Im Bereich Sicherheit bei der Smart Factory sind viele Bereiche von möglichen Angriffen und Risiken betroffen. Vor allem durch die Anbindung an das öffentliche Internet wird es immer wieder vorkommen, dass Spionage und Sabotage von außen zum Problem wird. Außerdem sind natürlich immer wieder auch interne Mitarbeiter an kriminellen Handlungen beteiligt. Das damalige BMWi (heute BMWK) hat sich zur Prämisse gemacht, deutsche Unternehmen bei der Sicherheit ihrer IT- und Kommunikationsumgebungen zu unterstützen.

Das Resultat sind konkrete Handlungsvorschläge, die die Unternehmen umsetzen sollten, um die Risiken von Spionage und Sabotage zu minimieren. Der Verein Deutscher Maschinen und Anlagebauer bietet einen sehr detaillierten Handlungsleitfaden zur schnellen Umsetzung von Industrie 4.0 - Ideen an.

Hier werden den Unternehmen Werkzeuge in die Hand gegeben, wie im Unternehmen durch interdisziplinäre Workshops die Ideenfindung für innovative Produkte sowie für verbesserte Produktionsumgebungen vorangetrieben werden kann. Die Umsetzung kann anschließend sofort in Projekten vor Ort durchgeführt werden.

Die Absicherung einer Smart Factory erfordert ein Umdenken weg von rein punktuellen IT-Schutzmaßnahmen hin zu einer tiefengestaffelten Verteidigung (Defense-in-Depth). Während

die ISO 27001 die organisatorischen Rahmenbedingungen für das gesamte Unternehmen vorgibt, liefert der modernisierte VDMA-Leitfaden auf Basis der IEC 62443 die konkrete, technische Richtschnur für die Betriebstechnologie (OT) im modernen Maschinen- und Anlagenbau. Die Handlungsempfehlungen des BMWK bieten hierfür das übergeordnete politische Fundament.

Die Implementierung von Industrie 4.0 gelingt nicht einzig durch die Hilfe der Bundesregierung, sondern erfordert auch die Unterstützung der Unternehmen. Es ist notwendig, dass die Unternehmen und ihr Management für das Thema Smart Factory und Digitalisierung sensibilisiert werden und die Dringlichkeit einer Veränderung in der Produktion wahrnehmen. Wenn dies von den deutschen Unternehmen nicht berücksichtigt wird, wird sich diese Nichtbeachtung in den kommenden Jahren negativ auf die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands auswirken.

KAPITEL 9

Nachhaltigkeit in der Produktion

Lernziele

Nach der Bearbeitung dieses Kapitels werden Sie wissen, ...

- ... wie der Begriff Nachhaltigkeit definiert wird
- ... welche verschiedenen Arten von Nachhaltigkeit es gibt
- ... was die Chancen, Vorteile und Ziele einer nachhaltigen Produktion sind
- ... welche Konzepte und Methoden für nachhaltiges Produzieren existieren
- ... wieso Siemens der Vorreiter für viele Unternehmen sein sollte

9.1 Nachhaltigkeit

Der Ursprung des Begriffs „Nachhaltigkeit“ (engl. „**sustainability**“) lässt sich auf eine Denk- und Handlungsweise in der Forstwirtschaft zurückführen. Die Zukunftsperspektive folgender Generationen soll demnach nicht durch das Handeln aktueller Generationen verschlechtert werden.

Nachhaltigkeit beschreibt darüber hinaus aus gesellschaftlicher Sicht eine Politik, deren Ziel die gleichwertige und gleichberechtigte **Sicherstellung** und **Verbesserung** von ökologischer, ökonomischer und sozialer Leistungsfähigkeit ist. Sie wird maßgeblich durch die verfügbaren und eingesetzten Technologien beeinflusst. Insofern bildet Technologie bzw. Technik eine entscheidende Einflussgröße.

Durch Anwendung des Nachhaltigkeitsprinzips sollen negative Ereignisse, wie beispielsweise Klimawandel, Wirtschaftskrisen oder sozialer Unfrieden vermieden bzw. deren Ausmaß reduziert werden. Ziele auf gesellschaftlicher Ebene sind: [\[30\]](#)

- Erhaltung der ökologischen Lebensgrundlage und natürlichen Ressourcen
- Sicherung und Ausbau des Wohlstands,
- Erhaltung des sozialen Friedens und der Gesundheit.

Verpasster Nachhaltigkeitsgedanke

Bei Betrachtung der untenstehenden Abbildung 9.1, ist zu sehen, dass bereits 2015 rechnerisch 1,6 Erden nötig waren, um den Bedarf nachhaltig zu decken. Die Menschheit hatte in diesem Jahr bereits am 13. August sämtliche Ressourcen für das Jahr aufgebraucht. 1987 lag der Earth Overshoot Day vergleichsweise noch am 19. Dezember. Bis 2050 soll sich der Bedarf sogar bis auf ein **Dreifaches** erhöhen. Der Mensch verbraucht mehr als nachwächst oder sich regeneriert. Dabei steigt der Konsum weiter, die globale Mittelschicht wächst, Schwellenländer holen auf.

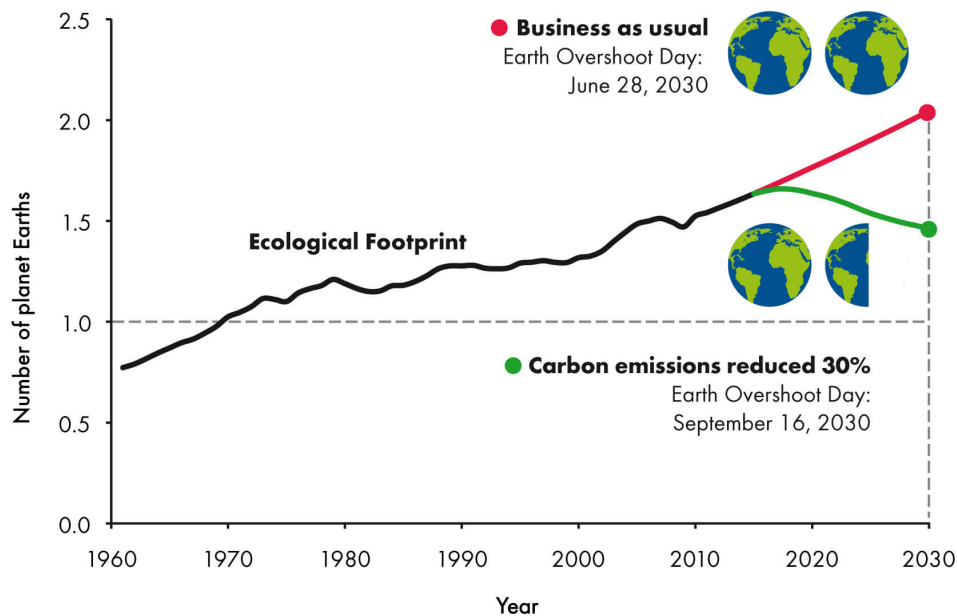


Bild 9.1: Der Bedarf an Erden über die Jahre hinweg

Die Übernutzung der Erde bleibt nicht ohne Folgen. **Die Atmosphäre heizt sich auf, Meere sind überfischt, Trinkwasser und fruchtbare Böden werden rar. Arten sind vom Aussterben bedroht.** Dies zeigen auch die Umweltberichte des UN-Umweltprogramms. Auch die industrielle Technik und die Herstellung von Produkten ist immer mit der Gewinnung und dem Verbrauch von Rohstoffen aus der Natur und der Nutzung von Flächen verbunden.

So weiter machen wie bisher kann die Menschheit nicht, Wissenschaftler und Politiker weltweit denken um. Sie wollen Ökologie und Soziales mit der Wirtschaft verknüpfen, heißt: eine **nachhaltige Entwicklung**. Aus diesem Grund wurde 2015 im Zuge des Pariser Klima-Abkommen die Agenda 2030 abgeschlossen. Es bietet die große Chance, den Wandel hin zu nachhaltigen und emissionsarmen Lebens- und Wirtschaftsweisen weltweit zu schaffen. Die Ziele der Agenda 2030 können nur durch eine intensive Zusammenarbeit im Rahmen einer neuen globalen Partnerschaft erreicht werden [31].

9.2 Nachhaltigkeit auf Unternehmensebene

Wird die Beschreibung von Nachhaltigkeit auf die Unternehmensebene übertragen, so beschreibt der Begriff „Nachhaltigkeit“ dort die Unternehmenssituation bereits heute zu verbessern, ohne die **langfristigen Zukunftsperspektiven** für Unternehmen, Inhaber, Beschäftigte, Kunden und Lieferanten zu verschlechtern. Dazu müssen die Situation und Handlungsfolgen in den Dimensionen Umwelt, Wirtschaft, Soziales und Technik gleichrangig betrachtet werden. Die Nachhaltigkeit von Unternehmen zeigt sich in dem Leitbild (Vision, Grundsätze), konkreten Zielen

und Strategien sowie der Gestaltung und den Eigenschaften von Produkten, Dienstleistungen, Unternehmensprozessen, Anlagen und Gebäuden (Siehe Abbildung 9.2).

Die Notwendigkeit für nachhaltiges Wirtschaften von Unternehmen ergibt sich aus den Anforderungen von Politik, Gesellschaft, Gesetzgebung, Mitarbeitern und Kunden. Unternehmen, die diese Anforderungen nicht erfüllen, gefährden dadurch unter Umständen ihre **wirtschaftliche Existenz und ihr Fortbestehen**. Ziele und Nutzen eines nachhaltigen Wirtschaftens von Unternehmen sind:

- Erhaltung der betrieblichen Existenzgrundlage und Ressourcen,
- Sicherung und Verbesserung des wirtschaftlichen Betriebserfolgs,
- Wohlergehen und Zufriedenheit von unternehmensrelevanten Interessengruppen.

Eine Verbesserung der Nachhaltigkeit bietet Unternehmen eine Reihe von Chancen. So können beispielsweise **höhere Umsätze und Wettbewerbsvorteile** durch nachhaltige Geschäftsmodelle, Produkte und Dienstleistungen oder Kosteneinsparungen durch ressourcenschonendere Leistungserstellungsprozesse generiert werden. Durch staatliche Anreize können unter Umständen zudem Steuern gespart sowie Fördergelder oder vergünstigte Kredite für Maßnahmen erlangt werden, die der Verbesserung der Nachhaltigkeit von Unternehmen dienen [30].

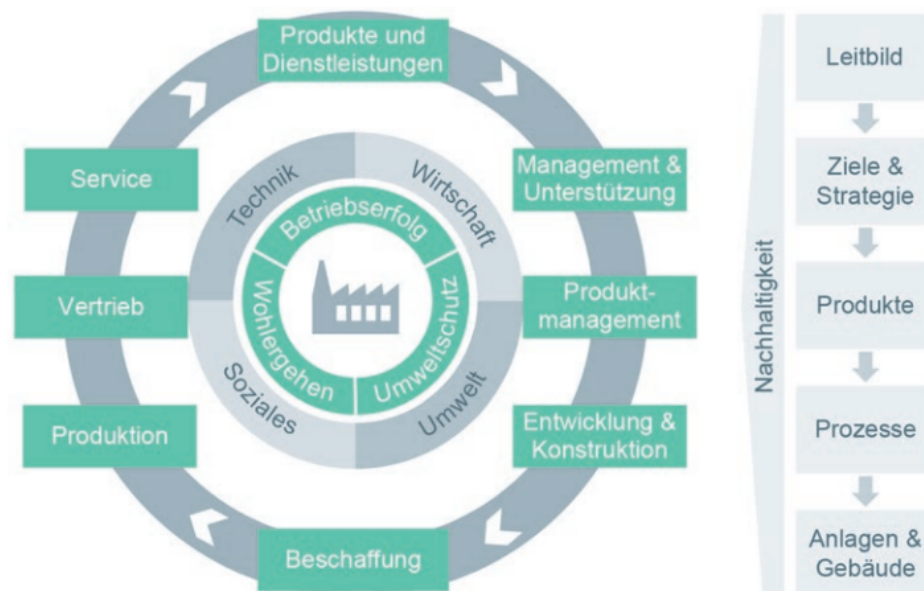


Bild 9.2: Bedeutung Nachhaltigkeit in Unternehmen

9.3 Arten von Nachhaltigkeit

Ökologische Nachhaltigkeit (Umwelt)

Die ökologische Nachhaltigkeit von Unternehmen zeigt sich unter anderem in dem Verbrauch von Energie und Material sowie erzeugten Abfallmengen und CO₂-Emissionen. Nachhaltige Unternehmen streben möglichst ressourcenschonende Produkte und Prozesse an und vermeiden schädliche Auswirkungen der Betriebstätigkeit auf Menschen und Natur.

Ökonomische Nachhaltigkeit (Wirtschaft)

Unternehmen können nur dann langfristig am Markt existieren, wenn sie wirtschaftlich wettbewerbsfähig sind und Gewinne erzielen. Die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit von Unternehmen

zeigt sich vor allem in Umsätzen, Bilanzen und Produktivitätskennzahlen. Nachhaltige Unternehmen streben nicht nur nach einer kurzfristigen Gewinnmaximierung, sondern nach einem auf Dauer angelegten wirtschaftlichen Unternehmenserfolg.

Soziale Nachhaltigkeit (Soziales)

Unternehmen stellen ein soziales System aus interagierenden Menschen dar. Für den Fortbestand eines Unternehmens müssen die Interessen von Kunden, Beschäftigten, Lieferanten und Inhabern gleichermaßen beachtet werden. Nachhaltige Unternehmen streben langfristige, vertrauensvolle Beziehungen zu Kunden, Lieferanten und Beschäftigten sowie den Schutz der Gesundheit und Existenz aller Beteiligten an.

Technologische Nachhaltigkeit (Technik)

In einer industriellen Gesellschaft ist der Einsatz von Technik unabdingbar. Damit Unternehmen langfristig bestehen können, müssen sie auf dem Stand der Technik bleiben. Nachhaltige Unternehmen erkennen frühzeitig Chancen neuer Technologien und nutzen diese für eine Verbesserung ihrer ökologischen, ökonomischen und sozialen Leistungsfähigkeit [30].

9.4 Chancen und Vorteile nachhaltiger Produktpolitik

Nachhaltige Produktpolitik bietet für Unternehmen eine Vielzahl von Chancen und Vorteilen:

- Kostensenkung durch verbesserte Material- und Energieeffizienz
- Anpassung an verändertes Konsumverhalten der Verbraucher
- Steigerung der Attraktivität für Fachkräfte
- Nachhaltige Produkte sichern den langfristigen Erfolg des Unternehmens!

Nachhaltige Unternehmen machen mehr Marge

Eine nachhaltige Ausrichtung kann für Unternehmen auf vielerlei Weise vorteilhaft sein: Dabei geht es um mehr Effizienz, die Steigerung des Unternehmensimages, Mitarbeiterzufriedenheit und auch um größere Chancen bei der Rekrutierung junger Mitarbeiter. Zudem macht sich Nachhaltigkeit auch bei den klassischen wirtschaftlichen Kennzahlen positiv bemerkbar: Nachhaltig agierende Unternehmen der Konsum- und Handelsbranche steigern ihre EBIT-Marge. Sie ist im Durchschnitt 6 Prozentpunkte höher als bei den weniger nachhaltig operierenden Wettbewerbern.

Nachhaltigkeit wird zum Wettbewerbsvorteil

Ein Beispiel hierfür ist das Unternehmen Weleda. Für das 1921 gegründete Unternehmen ist Nachhaltigkeit von Anfang an oberstes Unternehmensziel. Und um das zu erreichen, geht Weleda auch bei der Bilanzierung seines wirtschaftlichen Erfolgs neue Wege. So betrachtet das Unternehmen im Geschäftsbericht mittlerweile nicht mehr nur das klassische Betriebsergebnis, sondern zeigt zudem genauer auf, wie diese Wertschöpfung verteilt wird.

Nachhaltigkeit – ein Trend auch bei der Geldanlage

Nachhaltigkeit ist auch bei Investoren ein großes Thema, die Nachfrage nach entsprechenden Investments steigt seit Jahren stetig. Mehr als die Hälfte der institutionellen Anleger berücksichtigen in unterschiedlichem Umfang soziale und ökologische Aspekte sowie auf eine gute Unternehmensführung bezogene Kriterien bei der Anlageentscheidung [32].

9.5 Ziele einer nachhaltigen Produktion

Ziel einer nachhaltigen Produktion ist es, dass die Herstellung von Gütern ressourcenschonend erfolgt und die Regenerationsfähigkeit der Umwelt erhalten bleibt. Dies sichert die natürlichen Lebensgrundlagen für zukünftige Generationen. Eine umweltverträgliche Produktion verfolgt mehrere einander bedingende Einzelziele:

- Vermeidung von schädlichen Emissionen in die Umwelt
- effiziente Nutzung von Energie und Ressourcen
- Umstieg auf erneuerbare Energien
- Nutzung von nachhaltig produzierten Ressourcen
- Abfallvermeidung und Schaffung von Stoffkreisläufen und Recycling
- Wiederherstellung und Erhalt der biologischen Vielfalt der Ökosysteme

Alternativen durch Umwelt- und Effizienztechnologien

Die Erreichung der Nachhaltigkeitsziele erfordert eine allumfassende Modernisierung der Produktionssysteme und des gesamten Wirtschaftens. Neue Umwelt- und Effizienztechnologien spielen dabei eine Schlüsselrolle. Im Folgenden finden Sie einige Beispiele: [33]

- Elektro- und Brennstoffzellenantriebe
- elektrochemische und thermische Speicherung von Energie
- Kraft-Wärme-Kopplung
- Biokunststoffe und Verbundwerkstoffe
- Digitale Vernetzung der Systeme und Lieferketten

9.6 Konzepte und Methoden

Um eine nachhaltige Produktion zu schaffen, reicht es nicht aus, nur die Herstellungsphase des Produkts zu betrachten. Vielmehr muss der **gesamte Lebenszyklus** in die Analyse und Bewertung einbezogen werden (Siehe Abbildung 9.3).

In der Literatur sowie in der Praxis existieren diverse Konzepte, Methoden und Instrumente um den Lebenszyklus von Gütern umweltfreundlicher zu gestalten. Diese zielen zumeist auf eine Verbesserung der Material- und Energieeffizienz, eine Reduzierung der Umweltbelastung und nachhaltigere bzw. verantwortungsbewusstere Lieferketten ab [34].

9.6.1 Nachhaltiges Supply Chain Management

Nachhaltiges Supply Chain Management (SCM) ist ein strategischer Ansatz, der darauf abzielt, ökologische, soziale und ökonomische Nachhaltigkeit in den verschiedenen Phasen einer Lieferkette zu fördern. Es geht darum, umweltfreundliche Praktiken, soziale Verantwortung und wirtschaftliche Effizienz miteinander zu verbinden, um eine nachhaltigere und verantwortungsbewusstere Lieferkette zu schaffen (Siehe Abbildung 9.4).

Ein zentraler Aspekt des nachhaltigen SCM ist die **umweltfreundliche Beschaffung**. Unternehmen müssen sicherstellen, dass die von ihnen beschafften Materialien und Produkte umweltverträglich hergestellt und geliefert werden. Dies kann beispielsweise durch die Auswahl



Bild 9.3: Veranschaulichung Produktlebenszyklus

von Lieferanten mit umweltfreundlichen Produktionsmethoden und Zertifizierungen erreicht werden.

Die **Reduzierung von Treibhausgasemissionen** entlang der Lieferkette ist ein weiteres wichtiges Ziel des nachhaltigen SCM. Unternehmen sollten Maßnahmen ergreifen, um den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen bei der Produktion, dem Transport und der Lagerung von Waren zu minimieren. Dies kann beispielsweise durch den Einsatz energieeffizienter Transportmittel, die Optimierung von Routen und die Nutzung erneuerbarer Energien erreicht werden.

Nachhaltiges SCM beinhaltet auch die Förderung von sozialer Verantwortung in der Lieferkette. Unternehmen sollten sicherstellen, dass ihre Lieferanten **faire Arbeitsbedingungen bieten, die Einhaltung von Menschenrechten gewährleisten und Kinderarbeit vermeiden**. Dies erfordert eine aktive Überwachung der Lieferkette und gegebenenfalls die Umstellung auf Lieferanten, die sich zu sozialer Verantwortung bekennen. Darüber hinaus wird eine enge Zusammenarbeit und Koordination zwischen den verschiedenen Akteuren in der Lieferkette benötigt. Unternehmen müssen mit Lieferanten, Kunden und anderen relevanten Partnern zusammenarbeiten, um gemeinsame Nachhaltigkeitsziele zu definieren und umzusetzen. Durch die Zusammenarbeit können Best Practices ausgetauscht, Ressourcen geteilt und Effizienzgewinne erzielt werden [35].

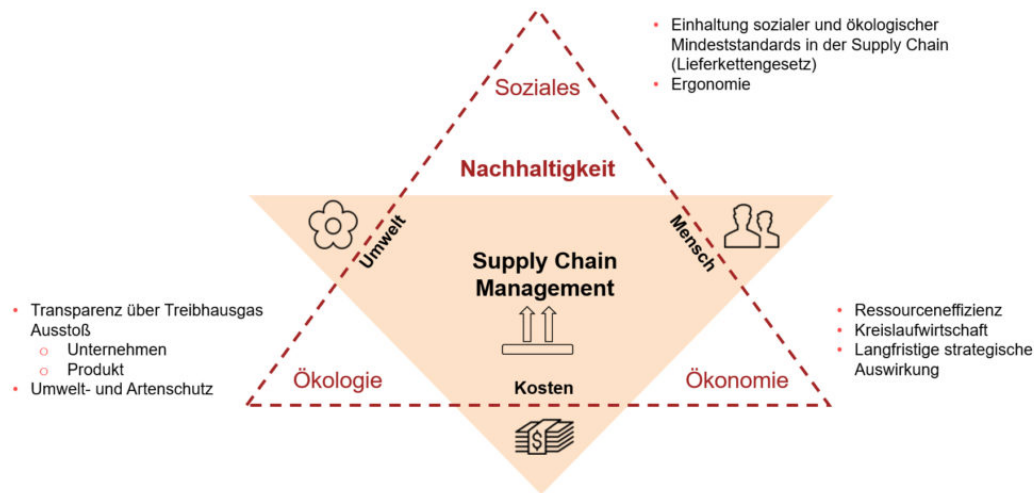


Bild 9.4: Die verschiedenen Einflüsse im nachhaltigen SCM

9.6.2 Kreislaufwirtschaft

Die Kreislaufwirtschaft ist ein Modell der Produktion und des Verbrauchs, bei dem bestehende Materialien und Produkte so lange wie möglich **geteilt, geleast, wiederverwendet, repariert, aufgearbeitet und recycelt** werden. Auf diese Weise wird der Lebenszyklus der Produkte verlängert. In der Praxis bedeutet dies, dass Abfälle auf ein Minimum reduziert werden. Nachdem ein Produkt das Ende seiner Lebensdauer erreicht hat, verbleiben die Ressourcen und Materialien so weit wie möglich in der Wirtschaft. Sie werden also immer wieder produktiv weiterverwendet, um weiterhin Wertschöpfung zu generieren (Siehe Abbildung 9.5).

Nachfolgend werden Vorteile einer Kreislaufwirtschaft aufgezählt:

1. Umweltschutz

Die Wiederverwendung und das Recycling von Produkten verlangsamt die Nutzung natürlicher Ressourcen, verringert die Zerstörung von Landschaften und Lebensräumen und trägt dazu bei, den Verlust der biologischen Vielfalt zu begrenzen.

Die Schaffung effizienterer und nachhaltigerer Produkte von Anfang an würde dazu beitragen, den Energie- und Ressourcenverbrauch zu reduzieren, da schätzungsweise über **80 Prozent der Umweltauswirkungen** eines Produkts während der Designphase bestimmt werden.

Eine Umstellung auf zuverlässigere Produkte, die wiederverwendet, aufgerüstet und repariert werden können, würde die Abfallmenge reduzieren. Verpackungen sind ein wachsendes Problem und durchschnittlich erzeugt jeder Europäer fast 180 kg Verpackungsabfall pro Jahr. Ziel ist es, übermäßige Verpackungen zu bekämpfen und ihr Design zu verbessern, um Wiederverwendung und Recycling zu fördern.

2. Rohstoffabhängigkeit reduzieren

Ressourcen werden knapp. Eine Reihe wichtiger Rohstoffe ist nur begrenzt verfügbar und da die Weltbevölkerung wächst, steigt auch die Nachfrage nach Rohstoffen. Endliche Vorräte bedeuten auch, dass einige EU-Mitgliedstaaten bei der Versorgung mit Rohstoffen von anderen Ländern abhängig sind.



Bild 9.5: Beispieldarstellung einer Kreislaufwirtschaft

Das Recycling von Rohstoffen mindert Versorgungsrisiken wie Preisschwankungen, Verfügbarkeit und Importabhängigkeit. Dies gilt insbesondere für kritische Rohstoffe, die für die Herstellung von Technologien benötigt werden, die für die Verwirklichung der Klimaziele entscheidend sind, wie Batterien und Elektromotoren.

3. Mehr Arbeitsplätze und weniger Kosten für Verbraucher

Der Übergang zu einer stärker kreislaforientierten Wirtschaft könnte die Wettbewerbsfähigkeit steigern, Innovationen anregen, das Wirtschaftswachstum ankurbeln und Arbeitsplätze schaffen. Die Neugestaltung von Materialien und Produkten für die Kreislaufnutzung würde auch die Innovation in verschiedenen Wirtschaftssektoren fördern. Verbraucher erhalten langlebigere und innovativere Produkte, die die Lebensqualität steigern und langfristig Geld sparen [36].

9.6.3 Stoffstrommanagement und -analysen

Stoffstrommanagement ist das zielorientierte, verantwortliche, ganzheitliche und effiziente Beeinflussen von Stoffströmen oder Stoffsystemen, wobei die Zielvorgaben aus dem ökologischen und ökonomischen Bereich kommen. Dadurch wird erreicht:

- Optimierung der Produktionsprozesse
- Steigerung der Energie- und Materialeffizienz
- Senkung der betrieblichen Kosten
- Vermeiden und Verringern von Emissionen und Abfällen

Die Ziele des Stoffstrommanagements liegen sowohl im ökonomischen Profit als auch im Umweltschutz. Sie können auf nationaler, regionaler und betrieblicher Ebene formuliert werden. Nachfolgend wird ausschließlich auf das betriebliche Stoffstrommanagement eingegangen. Dort

liegen die Ziele in erster Linie bei der **Quantifizierung von Material- und Energieströmen** und darauf basierend einer **Optimierung von Produktionsprozessen sowie der Steigerung von Energie- und Materialeffizienz**. Damit zusammenhängende Ziele umfassen die Senkung betrieblicher Kosten und das Vermeiden beziehungsweise Verringern von Emissionen und Abfällen sowie das Erhöhen von Recyclingquoten. Im Rahmen der Stoffstromanalyse werden diese Ziele innerhalb des Betriebs weiter konkretisiert und priorisiert. Nachfolgend wird das Fließbild einer Stoffstromanalyse schrittweise erläutert:

1. Grobanalyse auf Betriebsebene

Der erste Schritt besteht üblicherweise in der Grobanalyse. Sie stellt die Frage, wie effizient Energie und Material im Betrieb genutzt werden. Mithilfe von Daten aus allen betreffenden Abteilungen werden dabei die **Input- und Outputmengen** sowie die entsprechenden Kosten ermittelt. So lässt sich der Wert der eingesetzten Ressourcen mit den entstehenden Produkten und Abfallströmen direkt vergleichen. Als Input berücksichtigt werden hier üblicherweise die verwendeten **Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe und die notwendige Energie**. Der Output umfasst das Produkt an sich sowie die Reststoffe, den Ausschuss und die entstehenden Emissionen. Die Input-Daten lassen sich in erster Näherung häufig aus dem Controlling bestimmen, die Output-Daten mithilfe von Produktionsstatistiken und Rechnungen ermitteln. Emissionsdaten können anhand von Abgas- oder Abwasseranalysen ermittelt werden, Abwärme über den Wirkungsgrad.

2. Festlegung des Untersuchungsrahmens

Als Nächstes wird der Bilanzraum der Stoffstromanalyse festgelegt. Für eine betriebliche Stoffstromanalyse sollte nicht der gesamte Betrieb, sondern es sollten nur ausgewählte Prozessabläufe betrachtet werden. Der Bilanzraum der Analyse wird entsprechend eingegrenzt. Auch der Bilanzzeitraum muss abgegrenzt werden. Häufig wird für den betrachteten Zeitraum ein Bilanzjahr gewählt, da die Daten aus der Betriebsbilanz verwendet werden können. Der Bilanzzeitraum lässt sich weiter konkretisieren bis hin zu einzelnen Produktionsmonaten oder Produktchargen.

3. Benennung und Erfassung der Produktionsschritte

Es folgt die Erfassung und Benennung der Produktionsschritte. Der Produktionsprozess wird dabei in alle relevanten Produktionsschritte untergliedert. Als Basis können vorhandene Prozessbeschreibungen, Anlagenverzeichnisse oder Kostenstellenpläne verwendet werden. Jeder Produktionsschritt wird anschließend auf einem Plan einem Darstellungselement (einer Mengenstelle) zugeordnet.

4. Erstellen des Fließbildes

Im nächsten Schritt wird ein Fließbild erstellt. In diesem werden die Input- und Outputströme für die erfassten Produktionsschritte qualitativ erfasst. In einem sogenannten Sankey-Diagramm können Stoff- und Energieströme mit mengenproportional breiten Pfeilen dargestellt werden (siehe Abbildung 9.6) [37].

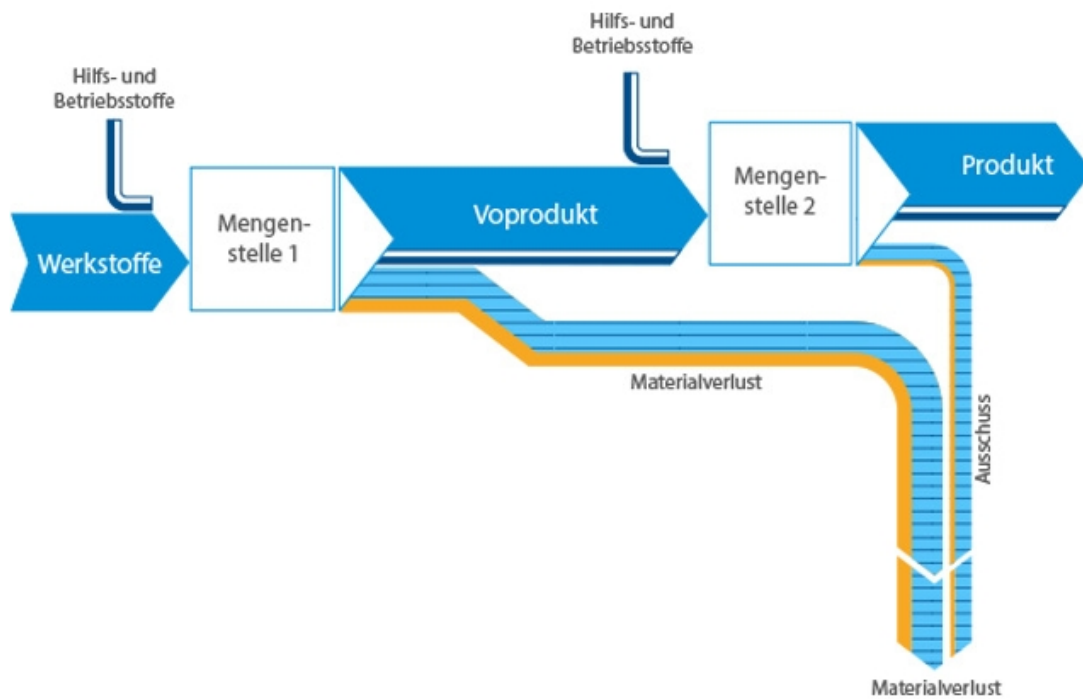


Bild 9.6: Beispiel eines Fließbilds in der Stoffstromanalyse

9.6.4 Product Carbon Footprint

Der Product Carbon Footprint (PCF) ist die etablierteste Methode zur Ermittlung der Klimawirkung eines Produkts. Während des gesamten Lebenszyklus eines Produkts - von der Rohstoffgewinnung bis zum Recycling oder der Entsorgung - entstehen klimarelevante Auswirkungen in Form von Treibhausgasemissionen. Der **Product Carbon Footprint** hilft, diese Auswirkungen zu identifizieren, zu analysieren und mit den richtigen Maßnahmen zu reduzieren oder (im Idealfall) ganz zu vermeiden.

Die globalen Klimaziele bis 2050 zielen auf eine dekarbonisierte Welt ab, weshalb alle Produkte und Dienstleistungen hinsichtlich ihrer Klimawirkung bewertet werden müssen. Dadurch gewinnt der PCF zunehmend an Bedeutung.

Bei der Berechnung des Product Carbon Footprints wird zudem zwischen **direkten und indirekten Emissionen** (Scope 1-3) unterschieden: Scope 1 betrachtet alle Emissionen, die direkt durch das Unternehmen verursacht werden (Verbrennung fossiler Brennstoffe, Emissionen aus chemischen und physikalischen Prozessen etc.). Scope 2 analysiert die indirekten Emissionen, die durch externe Anbieter von Strom, Wärme, Kälte oder Dampf entstehen. Alle anderen indirekten Emissionen, die entweder in der vorgelagerten Lieferkette oder bei der Produktnutzung entstehen, werden durch Scope 3 abgedeckt (z. B. der Einkauf von Produkten). In Abbildung 9.7 sind die einzelnen Scopes und die darunter fallenden Kategorien dargestellt [33].

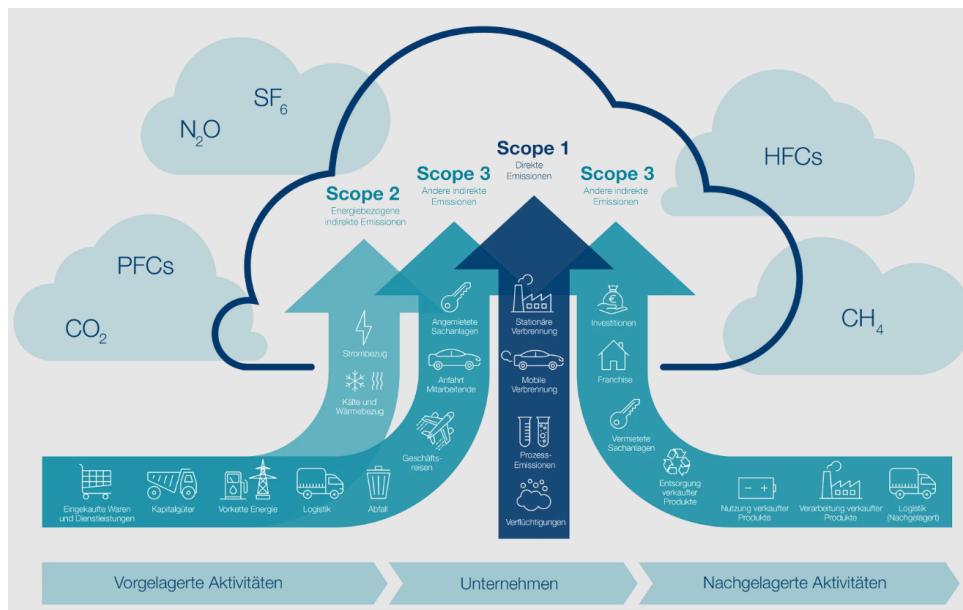


Bild 9.7: Darstellung der einzelnen Scopes im Product Carbon Footprint

9.7 Siemens als Vorreiter einer nachhaltigen Produktion

Bei Siemens besteht die feste Überzeugung, dass Unternehmenswert und die Schaffung einer besseren Zukunft für die Gesellschaft in Einklang gebracht werden können. Nachhaltigkeit nimmt eine **zentrale Position in sämtlichen Unternehmensbereichen** ein, angefangen vom Portfolio bis hin zu den Geschäftstätigkeiten und der Unternehmensführung - sie ist integraler Bestandteil der Unternehmensidentität.

Siemens verfügt bereits heute über innovative Technologien und Lösungen, die dazu beitragen können, die dringendsten gegenwärtigen und zukünftigen Herausforderungen anzugehen und Kunden sowie Gesellschaften bei der Erreichung anspruchsvoller Produktivitäts- und Nachhaltigkeitsziele zu unterstützen. Nachhaltigkeit stellt dabei keine Ergänzung des Geschäfts dar, sondern ist von **grundlegender geschäftlicher Notwendigkeit**. Das Ziel besteht darin, Kunden und der Gesellschaft dabei zu helfen, mehr mit weniger zu erreichen und den Alltag der Menschen heute neu zu erfinden, um eine verbesserte Welt von morgen zu gestalten.

Die Bemühungen zeigen Positives: Siemens hat sich bereits im Jahr 2015 als eines der ersten großen Industrieunternehmen verpflichtet, bis 2030 eine Netto-Null-Emission in seinen eigenen Betrieben zu erreichen. Tatsächlich wurden die CO_2 -Emissionen bereits um mehr als die Hälfte reduziert, wobei allein seit 2019 der CO_2 -Fußabdruck der eigenen Betriebe um etwa 46 Prozent verringert wurde [38].

Folgende Maßnahmen wurden getroffen:

- Einsatz grüner Energie
- Installation von Solarpanelen
- Reduzierung des Erdgasverbrauchs
- Implementierung einer nachhaltigen Fuhrparkpolitik
- Vor allem Einsatz eigener innovativer Technologien im Bereich der Digitalisierung und Automatisierung

Durch solche Technologien, wie beispielsweise digitale Zwillinge, kann die Produktion flexibler gestaltet und schnell an sich ändernde Anforderungen und Nachfrage angepasst werden. Darüber hinaus kann der Ressourcenverbrauch minimiert werden, indem komplexe Abläufe in der virtuellen Welt simuliert, analysiert und optimiert werden.

Paradebeispiel Lighthouse Factory Amberg

In ihrem hochmodernen Elektronikwerk in Amberg, das vom World Economic Forum als Lighthouse Factory anerkannt wurde, haben Siemens' Experten im Bereich Fertigung einen großen Schritt weiter gemacht. Sie haben eine digitale Lösung namens **SiGREEN** entwickelt, um den gesamten CO₂-Fußabdruck eines spezifischen Produkts zu ermitteln.

Es nutzt moderne Kryptotechnologie auf Basis einer Low-Energy-Blockchain, um einen vertrauenswürdigen Austausch von verifizierbaren Daten zu ermöglichen, die an den Orten erfasst werden, an denen Emissionen entstehen. Interessanterweise entfallen bis zu 90 Prozent dieser Emissionen nicht direkt auf die eigene Produktion, sondern auf die **vorgelagerte Lieferkette**.

Aus diesem Grund macht Siemens die Lieferkette zu einem integralen Bestandteil ihrer Dekarbonisierungsstrategie. Sie stärken lokale Wertschöpfungsketten und verbinden sie mit der Globalisierung, arbeiten enger und zielgerichteter mit Lieferanten zusammen und initiieren einen Wettbewerb um nachhaltige Lösungen in der Lieferkette. Dies erfordert, dass das Thema an der Stelle angesprochen wird, die jeden Lieferanten hauptsächlich interessiert: **Bei der Vergabeentscheidung**. Nur wenn Unternehmen und Verbraucher nachhaltigere Einkaufsentscheidungen treffen, schaffen sie Anreize für die Dekarbonisierung in der Industrie.

SiGREEN bietet für diese besseren, nachhaltigeren Entscheidungen eine zuverlässige Datenbasis für fundierte Entscheidungen, speziell für die verfügbaren Produkte und Komponenten. Bisher basierten Emissionsdaten entlang der vorgelagerten Lieferkette in der Regel auf Industriedurchschnitten und Schätzungen. Dank der Siemens-Lösung können Emissionen entlang der Kette quantifiziert und zu einem **dynamischen CO₂-Fußabdruck** aggregiert werden, wobei die Datensicherheit der beteiligten Partner gewährt bleibt. Dies ermöglicht eine genauere Messung von Veränderungen in der Lieferkette und die Definition präziserer Reduktionsmaßnahmen. Ressourcen lassen sich so effizient einsparen und Emissionen wirksam senken – in Amberg und weit darüber hinaus [38].



Bild 9.8: Funktion Estainium Network

ESTAINIUM Association

Um die volle Wirkung dieser Lösung zu entfalten, ist eine enge und vertrauensvolle Zusammenarbeit mit Herstellern, Lieferanten, Kunden und Partnern erforderlich. Zu diesem Zweck hat Siemens die branchenübergreifende ESTAINIUM Association gegründet, die die industrielle Dekarbonisierung in einem vorwettbewerblichen Ökosystem vorantreibt. ESTAINIUM stellt ein Netzwerk bereit, das den **sicheren Austausch und die transparente Darstellung vertrauenswürdiger Daten** zum Product Carbon Footprint ermöglicht (Siehe Abbildung 9.8). Dies ermöglicht Entscheidungsträgern in Unternehmen, zu erkennen, wo und wie sie ihre Lieferketten dekarbonisieren können. Dies befähigt sowohl Endverbraucher als auch Unternehmen, klügere Kaufentscheidungen zu treffen. Die Priorität liegt darin, Kunden und Partnern dabei zu helfen, produktiver, effizienter und nachhaltiger zu werden.

DEGREE – der 360-Grad-Ansatz für Umwelt, Soziales und Governance

Im Sommer 2021 wurde mit DEGREE ein umfassendes Rahmenwerk für die Nachhaltigkeitsbemühungen eingeführt, um die Ziele einer nachhaltigen und verantwortungsvollen Unternehmensführung greifbarer und leichter umsetzbar zu machen. DEGREE repräsentiert einen **360-Grad-Ansatz** für ESG-Themen (Environmental, Social, Governance) und betont nicht nur den Beitrag zur Begrenzung der Erderwärmung, sondern auch die Berücksichtigung sozialer Implikationen und Herausforderungen. Jeder Buchstabe in DEGREE steht symbolisch für einen Bereich, in dem Siemens sich für Nachhaltigkeit einsetzt: [38]

- D für Dekarbonisierung
- E für Ethik
- G für Governance
- R für Ressourceneffizienz
- E für Equity (Chancengleichheit)
- E für Employability (nachhaltige Beschaffungsfähigkeit)

Mit DEGREE werden klare und ambitionierte Ziele in Bezug auf ESG-Themen gesetzt.

Dekarbonisierung

Im Kontext der Dekarbonisierung strebt das Unternehmen neben dem Ziel der Netto-Null-Emissionen in den eigenen Betrieben auch Netto-Null-Emissionen in der Lieferkette bis 2050 an. Bis 2030 wird eine Reduzierung um 20 Prozent angestrebt. Die Hauptaufgabe für Siemens liegt jedoch darin, den Kunden bei der Erreichung ihrer Nachhaltigkeitsziele zu unterstützen. Erneuerbare Energien bilden das Fundament für eine nachhaltige Energiegewinnung, während die Elektrifizierung bestehender Systeme den klimafreundlichen Betrieb verschiedener Sektoren fördert, insbesondere im Verkehrsbereich durch den Übergang zur E-Mobilität. Es ist jedoch anzumerken, dass erneuerbare Energien nicht für alle industriellen Aktivitäten, wie beispielsweise den Bedarf an industrieller Wärme, uneingeschränkt geeignet sind.

Ressourceneffizienz

Ressourceneffizienz erfordert ein ganzheitliches Denken über den gesamten Lebenszyklus von Produkten und Herstellungsverfahren. Unternehmen müssen von linearen zu zirkulären Modellen übergehen, die auf gemeinsame Nutzung, Wiederverwendung und Recycling von Rohstoffen setzen. Digitale Technologien wie Advanced Analytics, 3D-Druck, das Internet der Dinge (IoT), maschinelles Lernen und Blockchain spielen als Enabler eine wichtige Rolle in komplexen Ökosystemen wie der Lieferkette.

Bei Siemens sind konkrete Maßnahmen geplant, wie die Erhöhung des Einkaufs von Sekundärmaterialien und die Anwendung des Ökodesign-Ansatzes auf alle relevanten Produktfamilien bis 2030. Das Unternehmen strebt an, den Deponieabfall bis 2025 um 50 Prozent zu reduzieren und bis 2030 auf null zu kommen. Siemens stellt auch Technologien bereit, um eine zuverlässige

Wasserversorgung und Abwasserentsorgung zu gewährleisten, das Wassermanagement effizienter zu gestalten und zur Qualität und Nachhaltigkeit der Wasserressourcen beizutragen, die für das **Überleben von Menschen und unserem Planeten** von entscheidender Bedeutung sind [38].

9.8 Zusammenfassung

Die Thematik Nachhaltigkeit gewinnt nicht nur im privaten Haushalt immer mehr an Bedeutung. Um eine lebenswerte Erde auch für unsere Nachfahren zu hinterlassen, müssen Industriebetriebe an diesem Wandel teilhaben. So wird von Kunden und Mitarbeitern inzwischen erwartet, dass das Unternehmen nachhaltig agiert. Und auch in den Unternehmen selbst besteht gerade auf Führungsebene ein echter Wille, nachhaltiger zu wirtschaften. Das eine interne Nachhaltigkeitspolitik neue Chancen und diverse Vorteile mit sich bringt, sollte zusätzlich eine Motivation sein. Umso wichtiger, dass auch die Politik vermehrt Vorgaben im Bereich Nachhaltigkeit vorgibt.

Als Vorreiter dient hierfür die Siemens AG. Durch die Implementierung einer allumfassenden Nachhaltigkeitspolitik bzw. -strategie, zeigt das Unternehmen, wie Nachhaltigkeit in zentraler Position in Erfolg umgewandelt werden kann und gleichzeitig der Planet Erde nicht weiter geschädigt wird. Ganz im Gegenteil: Auch die Umwelt profitiert von dem Handeln.

Dafür können diverse Methoden und Konzepte zum Einsatz kommen. Das Nachhaltige Supply Chain Management, die Kreislaufwirtschaft, Stromstoffanalysen und der Carbon Footprint ermöglichen Unternehmen, die Nachhaltigkeit sowohl zu verbessern, als auch mögliche Verbesserungspotenziale im Produktlebenszyklus aufzuzeigen.

Darüber hinaus ist die Nutzung von innovativen, digitalen Technologien wie Digitale Zwillinge, Advanced Analytics, Internet der Dinge, Künstliche Intelligenz, Maschinelles Lernen und Blockchain für den nachhaltigen Wandel in Unternehmen unabdingbar.

KAPITEL 10

Smart Logistics

Lernziele

Nach der Bearbeitung dieses Kapitels werden Sie wissen, ...

- ... wofür Smart, Extra- und Intra-Logistics steht.
- ... welche Herausforderungen es im Logistik-Bereich gibt.
- ... wie Predictive und Prescriptive Analytics in der Supply Chain angewandt wird.
- ... Wie Lkw-Platooning funktioniert
- ... weshalb Traceability in der Logistik eine große Rolle spielt.
- ... wie Fahrerlose Transportsysteme in der Intralogistik eingesetzt werden

Einführung

Digitalisierung und Automatisierung haben auch auf die Logistikbranche großen Einfluss. Der Begriff "Logistik 4.0" bzw. "Smart Logistics" beschreibt dabei im weiteren Sinne die Auswirkungen von Industrie 4.0 auf sämtliche Bereiche des Transportwesens und der Materialversorgung.

Im engeren Sinn bezieht sich Logistik 4.0 auf interne und externe logistische Prozesse von Produktions- und Handelsunternehmen und ist geprägt durch deren Vernetzung, Dezentralisierung, Automatisierung und Standardisierung. Die digitale Transformation ermöglicht eine höhere Transparenz entlang der gesamten Supply Chain, Optimierungen bzgl. der logistischen Grundanforderungen (6R)¹, sowie mehr Flexibilität und Effizienz [39].



¹ Das oberste Ziel der Logistik ist die Erfüllung der 6R: Das richtige Produkt in der richtigen Qualität zur richtigen Zeit am richtigen Ort in der richtigen Menge und zu den richtigen Kosten.

10.1 Zukünftige Herausforderungen und Trends

In einer Studie hat die Bundesvereinigung Logistik (BVL) als aktuelle Trends in der Logistikbranche Kostendruck, Komplexitätssteigerung und Individualisierung beschrieben. Wie in anderen Unternehmensbereichen auch fordert die digitale Transformation von der Logistikbranche eine stärkere Vernetzung und Digitalisierung von Geschäftsprozessen sowie mehr Transparenz in den Wertschöpfungsketten.

Sowohl Privat- als auch Geschäftskunden stellen höchste Ansprüche an die **Lieferfähigkeit, Liefertreue, Flexibilität** und den Servicegrad logistischer Dienstleistungen. Um den gestiegenen Kundenbedürfnissen gerecht zu werden und optimal auf veränderte Marktanforderungen reagieren zu können, muss die Logistik **schneller, interaktiver, zuverlässiger und sicherer kommunizieren und agieren**. Dies stellt die Logistik vor informationstechnische Herausforderungen. Zur Verfolgung von Material, Waren und Gütern in Echtzeit (**Tracking und Tracing**) ist die Bereitstellung großer Datenmengen erforderlich, gleichzeitig sind digitale Services in globale Netzwerke zu integrieren.

Ausgehend von den neuen Anforderungen entstehen neue Services und Geschäftsmodelle, weshalb sich gesamte Logistikbranche weiterentwickeln und die Chancen der Digitalisierung nutzen muss, um nicht zum Engpass in der digitalen Entwicklung und der Industrie 4.0 zu werden. Informationstechnologien bilden dabei einen entscheidenden Treiber für diese Veränderung und bilden einen wesentlichen Bestandteil neuer Logistiklösungen und -services:

- **Individualisierung von Logistiklösungen und Services** für den Kunden, z.B. nutzerspezifische Dashboards mit Logistik-KPIs oder individuell angepasste Apps zum Sendungsmanagement
- **Gezielte Zusammenführung einzelner Daten** zur Gewinnung neuer Informationen, z.B. Big Data Monitoring, um ein verbessertes Risikomanagement entlang der Wertschöpfungs- oder Transportkette sowie bessere Vorhersehbarkeit und Prognosen (Stau, Unwetter, Lieferengpässe, etc.) zu erreichen. Dies ermöglicht deutliche Steigerungen in der Lieferzuverlässigkeit.
- **Effizientere Dienstleistungserbringung** und Vermeidung von Verschwendung, z.B. durch übergreifende, IT-gestützte Konsolidierung¹, Automatisierung und Risikoreduzierung.
- **Fehlerreduktion**, z.B. durch den Einsatz von Sensoren, RFID-Codes, QR-Codes.

Die Chancen für Logistikdienstleister und -abteilungen liegen darin, Lösungen und Services anzubieten, welche Flexibilität schaffen, Komplexität reduzieren, Effizienz steigern, Verschwendung vermeiden und nachhaltige Verkehrskonzepte ermöglichen [40].

10.2 Predictive Analytics in der Logistik

Während sich Descriptive Analytics mit der vergangenheitsbezogenen Auswertung von Daten beschäftigt und damit dem klassischen Reporting entspricht, versucht Predictive Analytics Prognosen zu erstellen und künftige Ereignisse vorherzusagen. Die vorhandenen Daten werden beispielsweise mit Methoden des Data Mining oder Forecastings weiterverarbeitet. Mithilfe mathematischer Verfahren (z.B. Machine Learning) werden Trends, Cluster und Präferenzen ermittelt und zur Erstellung der Prognosen genutzt.

¹ Konsolidierung beschreibt in der Logistik den Prozess der Reorganisation und Bündelung von Produkten, um deren Transport und Lagerung einheitlich gestalten zu können.

Predictive Analytics ist in vielen Gebieten einsetzbar, z.B. in den Bereichen Produktion (z.B. Maschinenverschleiß), Marketing (z.B. Profiling von Topkunden) und Betrugserkennung (z.B. Kreditkarten- oder Versicherungsbetrug).

Im Logistikbereich wird Predictive Analytics eingesetzt, um Waren-, Informations- und Ressourcenströme zu analysieren und ein besseres Monitoring der Wertschöpfungskette zu ermöglichen. Die aus Big Data gewonnenen Informationen werden im **Digitalen Supply-Chain-Management**¹ eingesetzt, um die Effizienz hinsichtlich Kosten, Nachhaltigkeit und Synergien sowie die Effektivität im Hinblick auf die Erfüllung von Kundenanforderungen zu steigern. So können mittels Predictive Analytics Vorhersagen über zukünftige Lieferketten und logistische Ereignisse getroffen werden.

Beispiele für Einsatzbereiche von Predictive Analytics in der Logistik:

- **Bestands- und Versandplanungen** können bereits Monate im Voraus auf Grundlage von Kaufverhalten und Kundennachfrage vorbereitet werden und somit frühzeitig Anpassungen entschieden werden.
- **Monitoring der Logistikleistung:** Die Transportleistung des Spediteurs kann in Echtzeit überwacht werden, um so den exakten Liefertermin zu bestimmen. Über einen längeren Zeitraum ist es z.B. möglich zu berechnen, welcher Logistikdienstleister das optimale Gleichgewicht zwischen Versandkosten und Kundenzufriedenheit bietet.
- **Versandkosten:** Predictive Analytics ermöglicht eine genaue Analyse der Ursachen für den Versandkostenanstieg und hilft dadurch, diesen Kostensteigerungen entgegenzuwirken.
- **Transportgewicht:** Durch optimierte Verpackungslösungen und Gewichtsverteilungsanalysen können Kosten reduziert werden.
- **Versandkostentransparenz:** Es kann festgestellt werden, welche Routen bezüglich der anfallenden Kosten überdurchschnittlich häufig von der Kalkulation abweichen oder an welchen Stellen der Lieferkette unerwartete Zusatzkosten anfallen.
- **Vorbeugende Instandhaltung:** In der Supply-Chain-Logistik wird diese v.a. beim Flottenmanagement von Lkw's und Transportschiffen, aber auch im Bereich Kommissionierung und Verpackung genutzt.
- **Analyse des Vertriebsgebietes:** Durch die Zusammenführung von Kosten- und Kundenversanddaten können z.B. Entscheidungen über ein neues Logistikzentrum in einem bestimmten Vertriebsgebiet getroffen werden.

10.3 Prescriptive Analytics in der Logistik

Prescriptive Analytics baut auf Descriptive Analytics und Predictive Analytics auf. Als Basis für Prescriptive Analytics dient ebenfalls Big Data. Indem die Auswirkungen verschiedener Handlungsoptionen auf das Ergebnis untersucht werden, wird versucht, ein optimales Ergebnis oder eine bestmögliche Lösung zu erreichen. Die Fragestellung hinter Prescriptive Analytics lautet daher: Wie müssen wir handeln, damit ein bestimmtes Ergebnis eintritt? So lässt sich abhängig von der gegebenen Situation eine optimale Vorgehensweise bestimmen.

¹ **Digitales Supply-Chain-Management** verbindet mithilfe von Informations- und Kommunikationstechnologie sämtliche Material-, Produkt-, Personen- und Informationsflüsse vom Rohstoff bis zum Endkunden über unterschiedlichste Logistikkanäle hinweg.

Ziel ist es, **Handlungsempfehlungen vorzuschlagen** und damit Risiken zu minimieren oder maximale Vorteile zu erzielen. Diese Analysemethode ermöglicht **automatisierte Entscheidungsfindungen** und reduziert die Notwendigkeit menschlicher Intervention in Prozesse. Gleichzeitig kann es bei nicht berücksichtigten Einflussfaktoren sowie veralteter oder eingeschränkter Datengrundlage zu fehlerhaften Handlungsempfehlungen kommen.

In der Logistik wird diese Analysemethode zur **Optimierung von Lieferwegen** und Lieferketten sowie im Bestandsmanagement zur **Auslastung von Lagerkapazitäten** angewandt. Sie wird dabei auch als **"Anticipatory Logistics"** (deutsch: Vorwegnehmende Logistik) bezeichnet.

So hat sich der Onlinehändler Amazon bereits 2014 ein Patent auf **Anticipatory Shipping** gesichert. Amazon sammelt über Warenkörbe, Wunschlisten, Suchbegriffe, getätigte Einkäufe usw. Kundendaten und leitet daraus das Kundenverhalten ab.

Aus diesen Datenmengen werden Prognosen für die Zukunft erstellt, durch welche Amazon besser vorhersehen kann, welche Produkte der Kunde demnächst kaufen wird. So kann das Käuferlebnis des Kunden positiv beeinflusst werden. Insgesamt macht der Einsatz von Prescriptive Analytics bzw. Anticipatory Logistics die Logistikbranche robuster, effizienter, rentabler und kundenfreundlicher.

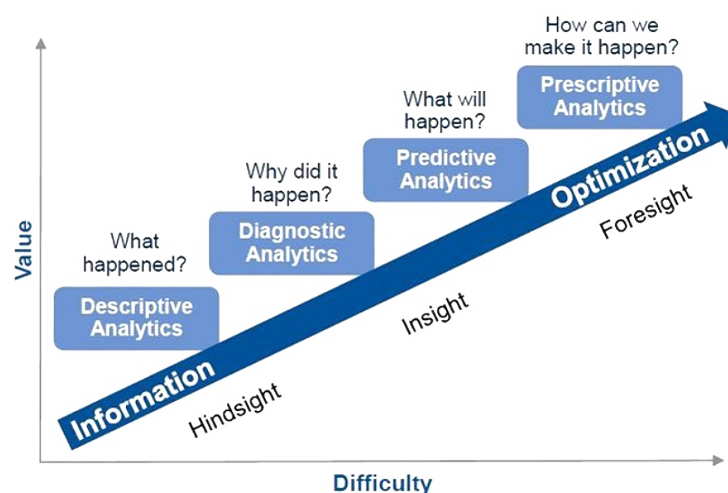


Bild 10.1: Die vier verschiedenen Business-Analysemethoden nach Gartner (2012)

10.4 Extralogistik

Die **Extralogistik** stellt das Antonym zur Intralogistik dar und bezeichnet dementsprechend die logistischen Material- und Warenflüsse, welche außerhalb eines Betriebsgeländes ablaufen, z.B. Warentransport durch eine Spedition.

Im Laufe der Zeit haben sich umfangreiche, globale Transportnetzwerke herausgebildet, wobei der Warentransport größtenteils per Lkw, Bahn, Schiff oder Flugzeug erfolgt. Entsprechende Netzwerkkonzepte ersetzen vermehrt die reinen Punkt-zu-Punkt-Verbindungen und erhöhen so die Effizienz. Mit der Komplexität der Transportnetzwerke wächst gleichzeitig auch der Kostendruck, während die Leistungsversprechen steigen.

Die Transportbranche hat zudem mit kritischen externen Rahmenbedingungen zu kämpfen. So warnt die Internationale Straßen-Union (IRU) vor einem **akuten Fahrermangel**. In Umfragen wird ein Fahrermangel von 21 % im Transportbereich angegeben. Gleichzeitig führt das **wachsende Umweltbewusstsein** zu immer strengeren Auflagen. Die **Pönalisierung¹ von Schadstoffausstoß**, z.B. über Mautkosten, Mineralölsteuer oder Schadstoffbesteuerung größerer Unternehmen über deren CO₂-Bilanz, erhöht die Kosten pro gefahrenem Kilometer.

Hinzu kommen höchste Ansprüche des Kunden an Liefertreue und die Einhaltung individuell festgelegter Lieferzeitpunkten. Entstandene Probleme müssen oft kurzfristig behoben werden, z.B. durch Sonderfahrten oder -flüge. Diese gewaltigen Herausforderungen beschleunigen ein Umdenken in der gesamten Branche.

Routen- / Touren Optimierung und Netzwerkplanung

Die Digitalisierung eröffnet der Logistikbranche zahlreiche neue Möglichkeiten, darunter auch die Netzwerkplanung und Routen/Touren-Optimierung in Echtzeit. Mit Hilfe von integrierten Systemen erhält der Transportplaner in Zukunft Informationen über die aktuelle Verkehrssituation und weitere relevante Rahmenbedingungen.

So kann er z.B. über ein **Supply Chain Event Management (SCEM)** System Schwierigkeiten in der Lieferkette seines Teilelieferanten erkennen und durch eine frühzeitige Reaktion Probleme in der eigenen Produktion verhindern, wodurch die Notwendigkeit teurer Sonderfahrten entfällt. Die heute eingesetzten softwaregestützten **Transport-Management-Systeme (TMS)** stehen vor dem grundlegenden Problem, dass sie keine Möglichkeit bieten, unterschiedliche Bereiche wie die Routen- und Touren-Planung mit der Netzwerkoptimierung zu verbinden, um so komplexe Kundenanforderungen zu meistern. Den Lösungen fehlen neben individualisierbaren, bereichsübergreifenden Transportplanungsmöglichkeiten auch die notwendige Datengrundlage und die Intelligenz für zuverlässige Prognosen.

Um einen umfassenden Überblick und verbesserte Planungsmöglichkeiten über das gesamte Wertschöpfungsnetzwerk hinweg zu erhalten, benötigt man nicht nur eine vollständige Transparenz der eigenen Produktion und Logistik, sondern auch Informationen über die Produktions- und Transportplanung aller Beteiligten (Vorlieferanten und Logistikdienstleister) der vorgelagerten Supply Chain. Momentan fehlt für diesen visionären Ansatz noch eine unabhängige, übergreifende Plattform, welche alle Daten über eine einheitliche Schnittstelle erfasst und bereitstellt, ohne dabei Unternehmensgeheimnisse offenzulegen. Aktuelle Ansätze streben für die Zukunft jedoch ein **intelligentes, durch KI unterstütztes SCEM an, welches in Echtzeit szenariobasierte, proaktive Eingriffe ermöglicht** und die Effizienz der Supply Chain deutlich erhöht.

Indem alle Sendungen lückenlos erfasst werden, um korrekte Stammdaten zu generieren, kann mithilfe von TMS die Grundlage für ein solches integriertes SCEM-Gesamtsystem geschaffen

¹ (lateinisch poena) "Strafe"; englisch penalty

werden. Das SCEM stellt eine weitere perspektivisch notwendige Stufe in der Logistikgestaltung dar. Denn während Maschinenausfälle in Zukunft mittels Predictive Maintenance vorhergesagt werden können, sind Unfälle im Verkehrsgeschehen nicht planbar. Ziel ist es deshalb, eine möglichst große Anzahl der externen Parameter in das Planungssystem des SCEM einzubeziehen. Durch KI kann das System dazulernen und eine steigende Menge von Faktoren berücksichtigen.

Der **Control Tower** steht dabei im Mittelpunkt des Systems, da er die operative Überwachungseinheit der Supply Chain vom Rohstoff bis zur Warenlieferung ist. Momentan kann er bereits über **Track-and-Trace¹-Systeme** sämtliche Prozesse entlang der Supply Chain visualisieren. Wenn der Control Tower zukünftig in Echtzeit verlässliche Daten über den Sendungsverlauf erhält, können diese auf Störungen überprüft und die potenzielle Tragweite der Abweichung analysiert werden.

Durch Prescriptive Analytics können Szenarien mit Kostenanalysen, Lieferzeiteeinflüssen etc. entwickelt und optimale Handlungsoptionen aufgezeigt werden.

In Praxisprojekten zeigen sich je nach Szenario folgende Effekte:

- Systemgesteuerte Routen-Touren-Optimierung: bis zu 20% Effizienzgewinn
- Netzwerkoptimierung: 25% Effizienzsteigerung
- Metaoptimierung zwischen Routen-/Tourenoptimierung und Netzwerkoptimierung als szenario-basierte Gesamtsteuerung: zusätzlich 8-10% Zugewinne und 40% Kapazitätseinsparungen bei der Planung
- Anwendung von SCEM: Halbierung der Risikobestände, Reduzierung der Sonderkosten z.B. für Luftfracht um bis zu 70%

Gleichzeitig entstehen allerdings auch Kosten für den Betrieb des Control Tower und das System. Bereits die Implementierung eines integrierten Gesamtsystems nimmt viel Zeit, Geld und Ressourcen in Anspruch und erfordert eine genaue Planung.

Wenn eine Einflussnahme des Menschen auf die KI möglich ist, muss der Prozess außerdem in bestimmten Szenarien Freigabeschritte enthalten, um selbstverstärkende Effekte durch KI zu verhindern. Somit bleibt der Mensch trotz KI die Kontrollinstanz und trifft bis auf Weiteres die endgültige Entscheidung [41].

Platooning

Aktuelle gesellschaftliche Trends wie Onlinehandel, steigende Kundennachfrage und Urbanisierung führen zu einem stetig steigenden Transportbedarf. Ein Lösungsansatz ist das Konzept des **Lkw-Platooning**, welches den Transport auf Autobahnen revolutionieren wird. Bei diesem Konzept werden mehrere Lkw als Konvoi, auch **”Platoon”** genannt, angeordnet und elektronisch miteinander gekoppelt, sodass sie in Echtzeit kommunizieren können.

Technische Fahrassistenz- und Steuersysteme erlauben es, den Abstand zwischen zwei Fahrzeugen deutlich zu reduzieren, wodurch der Luftwiderstand verringert wird. Das Führungsfahrzeug kann sein Fahrverhalten wie Bremsen oder Beschleunigen auf die anderen Fahrzeuge übertragen, die Fahrzeuge agieren synchron.

Dazu sind die einzelnen Fahrzeuge mit Kameras, Lidar-, Radar- und Lenksystemen ausgestattet und tauschen über WLAN (ITS G5) kontinuierlich Daten aus (siehe Bild 10.2).

1 Track and Trace: Das Verfahren erlaubt dem Kunden jederzeit eine Nachverfolgung seiner Sendung, welche visuell mit den einzelnen Stationen entlang der Transportkette verknüpft wird. Die Statuserfassung kann dabei manuell, app- oder telematikbasiert, sowie mit Drahtlostechniken wie Bluetooth oder RFID-Schnittstellen erfolgen.

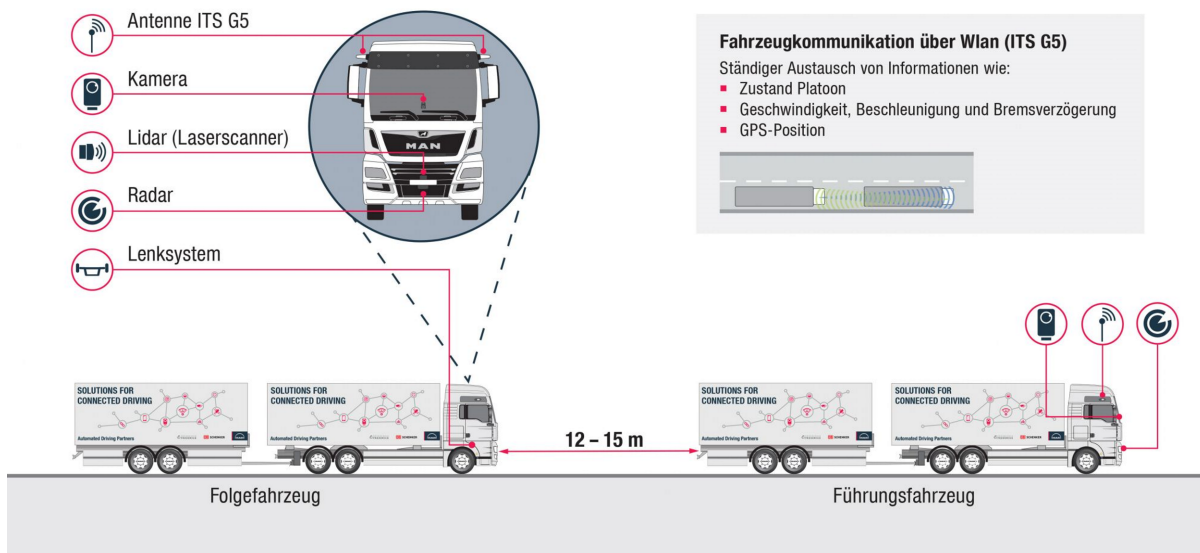


Bild 10.2: Darstellung der Funktionsweise von Lkw-Platooning

Die Fahrzeuge können vorausschauender auf Verkehrssituationen reagieren, wodurch der Abstand zwischen den Lkw deutlich reduziert und so auch der Luftwiderstand entscheidend verringert werden kann. Durch Platooning werden die CO₂-Emissionen und der Spritverbrauch gesenkt, der Verkehrsfluss optimiert, der vorhandene Verkehrsraum besser genutzt, sowie die Fahrzeugführer entlastet.

Die Fahrzeuge sind trotz des hohen Automatisierungsgrads mit Fahrern besetzt, die jederzeit eingreifen können und auch beim Abfahren von der Autobahn wieder das Steuer übernehmen. Auf langfristige Sicht soll das Platooning jedoch möglichst autonom ablaufen.



Bild 10.3: QR-Code
Platooning-Projekt:
Erste Transporte in
vernetzten Lkw
<https://www.youtube.com/watch?v=dHCUecOEtLo>

Ein Cyber-Physisches System besteht aus einem Teil in der physischen Realität und einem Teil im digitalen bzw. virtuellen Raum:

- In der physischen Welt besteht das CPS aus Sensoren (Messen), Aktoren (Agieren), Benutzerschnittstellen sowie der verknüpfenden digitalen Kommunikationstechnologie (Kommunizieren).
- Auf logischer Ebene bewerkstelligen intelligente Funktionen die Erfassung, Transport, Verarbeitung und Bereitstellung der Informationen (Berechnen + Kommunizieren).

Urbane Logistik

Urbane Logistik bezeichnet die Warenströme innerhalb einer städtischen Fläche. Sie bildet die Grundlage für die Versorgung der Stadtbevölkerung und hat dementsprechend großen Einfluss auf die Lebensqualität der Bewohner. Urbanisierung, E-Commerce, der Wunsch des Einzelhandels nach flexibleren und kleinteiligeren Lieferungen, sowie das steigende Kundenbedürfnis nach individuellerer und schnellerer Zustellung sind hier als wesentliche Trends auszumachen.

Da immer mehr Menschen in den Städten leben und dabei individuell mobil sein wollen, Händler ihr Bestellmuster hin zur täglichen Warenversorgung ändern und gleichzeitig ihre Vertriebskanäle ausbauen und immer mehr kleinteilige Sendungen ausgeliefert werden, erhöht sich das Verkehrsaufkommen auf der sogenannten "letzten Meile" sehr stark. Zur Lösung dieses Problems benötigt

es innovative Lösungen und smarte Konzepte, welche sich in vier Grundrichtungen aufteilen lassen:

- **Fahrzeug-Innovationen / -Alternativen:** Durch einen Umstieg auf alternative Antriebe (Elektro oder Wasserstoff) können Emissionen deutlich verringert werden. So setzt die Deutsche Post inzwischen vermehrt auf Elektrofahrzeuge. Lastenfahrräder sowie autonome oder unbemannte Zustellmöglichkeiten, wie z.B. Drohnen oder Paketroboter, bieten nur geringe Transportkapazitäten und sind mit vergleichsweise hohem Personaleinsatz bzw. hohen Anschaffungskosten verbunden.
- **Zeitliche Optimierung der Verkehrslast:** Durch eine Verlagerung von B2B-Belieferung in die verkehrsarmen Nachtstunden können Transportunternehmen die Auslastung ihrer Ressourcen optimieren und sind dadurch flexibler. Beim Händler werden Verkaufs- und Anlieferstätigkeiten entkoppelt und Lagerflächen können dank täglichem Warennachschub reduziert werden. Die Entschärfung zeitlicher Lieferrestriktionen und die Entwicklung neuer Konzepte zur geräusch- und emissionsarmen Nachtbelieferung von Städten spielen dabei eine entscheidende Rolle.
- **Kommunale Ansätze zur Verbesserung der urbanen Infrastruktur (City-Projekte):** Kommunen können nicht nur durch örtliche Belieferungsrestriktionen oder das gezielte Einrichten von Entlade- und Beladezonen Einfluss auf das städtische Verkehrsaufkommen nehmen und höheren Verkehrsfluss sowie Emissionssenkungen gewährleisten. Sie können auch als Infrastrukturpartner die Nutzung von Synergieeffekten zwischen Dienstleistern in Form von Kooperationen fördern.
Ein Beispiel dafür ist die durch Kommunen initiierte Einrichtung von Multi-Hubs (große Lager in Außenbezirken) und Mikro-Hubs / mobile Depots (kleine Lager im Stadtbezirk).
- **Digitalisierung der Logistikbranche:** Digitale Innovationen und automatisierte Prozesse ermöglichen Optimierungen und Effizienzsteigerungen entlang der gesamten Lieferkette. Kunden können Lieferzeitpunkte flexibler wählen, wodurch die Erstzustellquote steigt. Optimierte Tourenplanung ermöglicht (kooperative) Auslastung von Transportfahrzeugen und reduziert die Lieferzeiten.

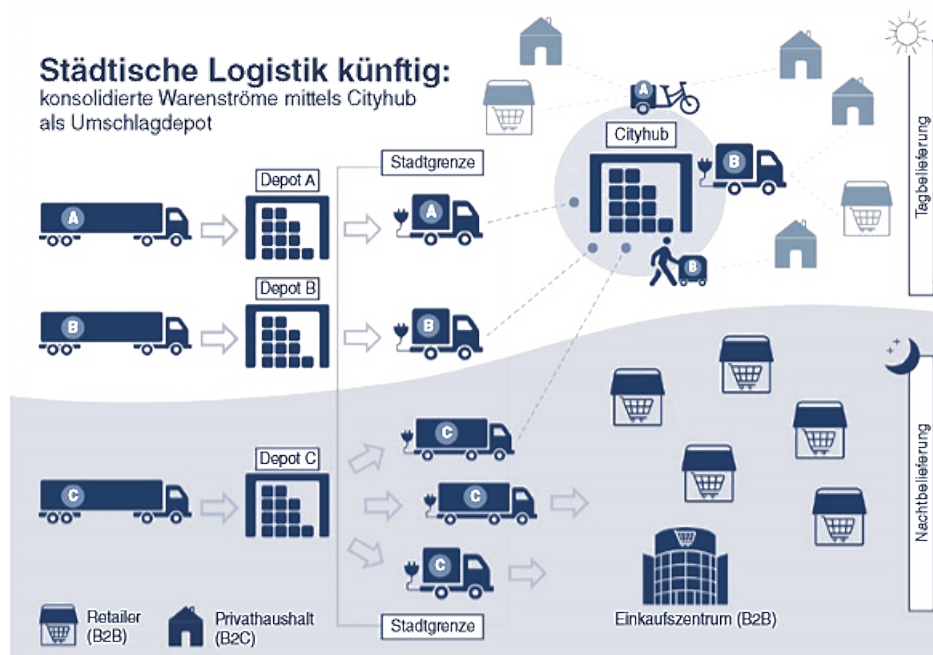


Bild 10.4: Konsolidierte Warenströme als Merkmal künftiger urbaner Logistik

Einordnung der Digitalisierungswerkzeuge in den Hype-Cycle

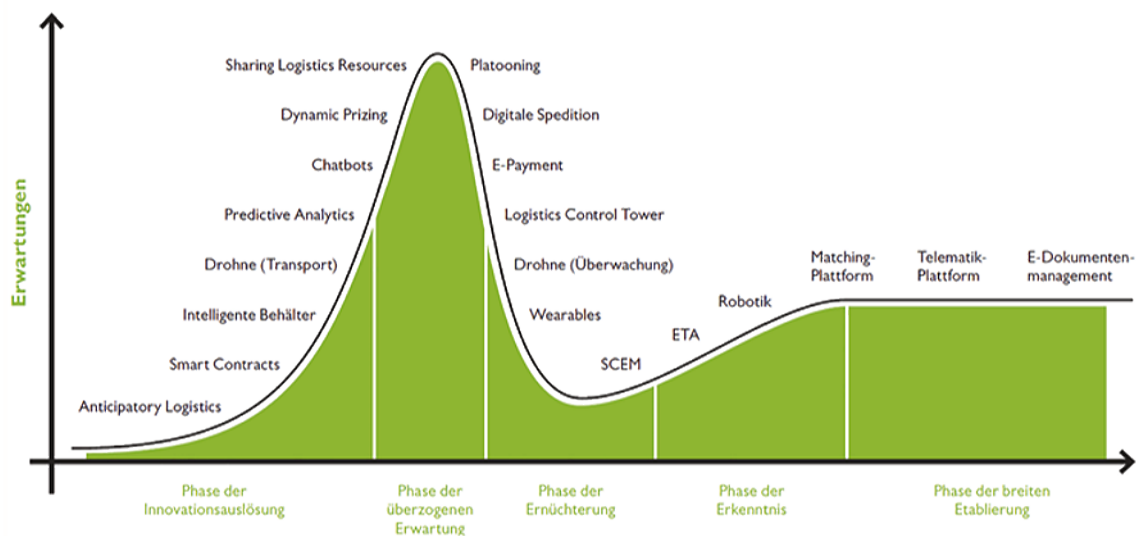


Bild 10.5: Einordnung der Digitalisierungswerkzeuge aus der Logistik in den Hype-Cycle
(Quelle: Universität St. Gallen, 2018)

10.5 Intralogistik

Nach einer Definition des VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau) umfasst die **Intralogistik** die Organisation, Steuerung, Durchführung und Optimierung innerbetrieblicher Material- und Informationsflüsse sowie des Warenumschs in Unternehmen der Industrie, des Handels und in öffentlichen Einrichtungen.

Traceability

Der Begriff **Traceability** beschreibt die Möglichkeit, **Daten zur Rekonstruktion eines Sendungsverlaufs** zu erfassen oder zu nutzen. Heutzutage geschieht dies in der Regel durch rechnergestützte Sendungsverfolgung, das sogenannte Tracking and Tracing. Es wird sowohl innerbetrieblich als auch außerbetrieblich eingesetzt. Tracking (deutsch: Verfolgbarkeit) bezeichnet dabei die Verfolgung des Rohmaterials bis zum Endprodukt, während Tracing (deutsch: Rückverfolgbarkeit) für die Rückverfolgung des Endprodukts bis zum Rohmaterial steht. Der Zusammenschluss beider Funktionen ergibt die Traceability und ermöglicht eine besondere Transparenz in allen Stufen der Supply Chain.

Vor allem in der Lebensmittelbranche spielt Traceability eine wichtige Rolle, seit am 1. Januar 2005 die EU-Verordnung 178/2002 in Deutschland in Kraft trat. Sie schreibt das generelle Gebot der Rückverfolgbarkeit von Lebensmitteln vor.

In der Automobilindustrie wird durch die IATF 16949 im vorhergehenden Abschnitt ebenfalls die Kennzeichnung und Rückverfolgbarkeit der Produkte gefordert. Dies dient der nachträglichen Klärung von Fehlern und der Schadensbegrenzung im Fehlerfall. Außerdem können Produkte jederzeit identifiziert und ihr Prüfstatus erkannt werden, wodurch Verwechslungen vermieden werden.

Die eindeutige Kennzeichnung sowie die Vernetzung und Identifizierung von Produkten in Echtzeit wird durch automatische Identifikationsverfahren ermöglicht. Vor allem die RFID-Technik (Radio-Frequency Identification) und die **Barcode-Technik** werden eingesetzt, um Halbfertig- und Fertigteile in der Produktion nachverfolgen zu können.

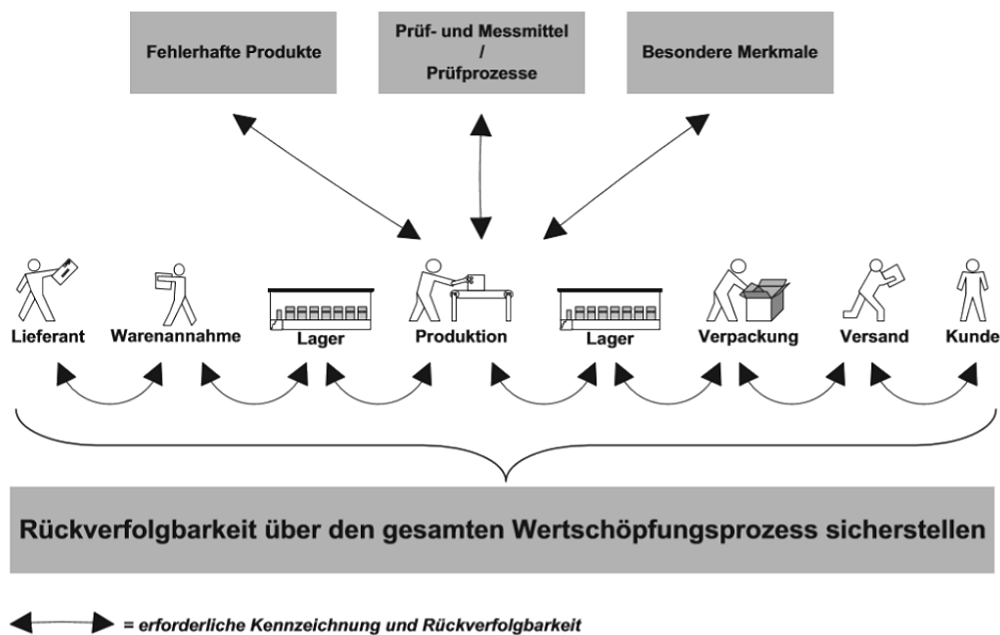


Bild 10.6: Kennzeichnung und Rückverfolgbarkeit entlang des Wertschöpfungsprozesses

Fördertechnik und autonome Materialflusssysteme

Im Rahmen der Intralogistik ist ein effizienter Materialfluss durch die Produktionssysteme essenziell. Dazu wird die Materialflusstechnik innerhalb des Produktionssystems durch cyber-physische Systeme vernetzt, sodass Logistikfahrzeuge oder einzelne Fördermodule autonom miteinander kommunizieren und interagieren können.

In diesem Zusammenhang wird viel im Bereich Plug& Play-Fördertechnik geforscht und entwickelt. Fördertechnik beinhaltet alle organisatorischen und technischen Systeme zum Transportieren oder Bewegen von Gütern und Personen, in der Regel begrenzt auf den Bereich der Intralogistik. Indem darauf das "Plug& Play"-Prinzip aus der Computertechnologie übertragen wird, können die einzelnen Fördermodule über einfache Steckverbindungen, welche die erforderlichen Schnittstellen enthalten, hinzugefügt oder voneinander getrennt werden. Die folgenden fünf Gestaltungsregeln für Plug&Play-Fördertechnik wurden entwickelt, um dem Nutzer einen dauerhaften und produktiven Einsatz automatisierter Fördertechnik zu vereinfachen:

- **Modularität:** Module müssen nur physisch miteinander verbunden werden, die datentechnische Verbindung baut sich eigenständig auf.
- **Funktionsintegration:** Jedes Modul ist mit Sensoren und Aktoren ausgestattet und besitzt die Grundfunktionen Fördern, Verzweigen, Zusammenführen, Warten und Bedienen. Durch Koordination untereinander können die Module auch komplexe intralogistische Aufgaben (z.B. Sortieren, Kommissionieren und Sequenzieren) ausführen. Die Identifizierung der transportierten Fördereinheit ist durch Integration in spezialisierte Module möglich. Eine Herausforderung besteht aktuell noch in der Integration von Konzepten zur Personensicherheit.
- **Dezentrale Steuerung:** Jedes Modul hat eine eigene Steuerung. Aufgrund der vom Nutzer aufgebauten Topologie ist eine automatisierte Topologie-Erkennung notwendig. Für jeden Transportauftrag muss eine Routenfindung durchgeführt werden, die Transportvorgänge werden durch die einzelnen Module koordiniert und durchgeführt. Dabei sollten Deadlocks ("ausweglose Situationen") durch gegenseitiges Blockieren der Module vermieden werden.
- **Interaktion zwischen Modulen:** Die Koordination von Transportvorgängen wird allein durch die Interaktion zwischen benachbarten Modulen ermöglicht. Ziel ist es, durch An-

wendung möglichst einfacher, intuitiver Regeln ein komplexes Systemverhalten zu erreichen (Emergenz), welches passend auf unterschiedlichste Anforderungen reagiert.

- **Standardisierte physikalische und Informationsschnittstellen:** Damit ein einfacher Aufbau des Systems realisiert werden kann, müssen die Module standardisierte physikalische Schnittstellen vorweisen und Informationsschnittstellen unabhängig von der technischen Ausführung der Module sein.

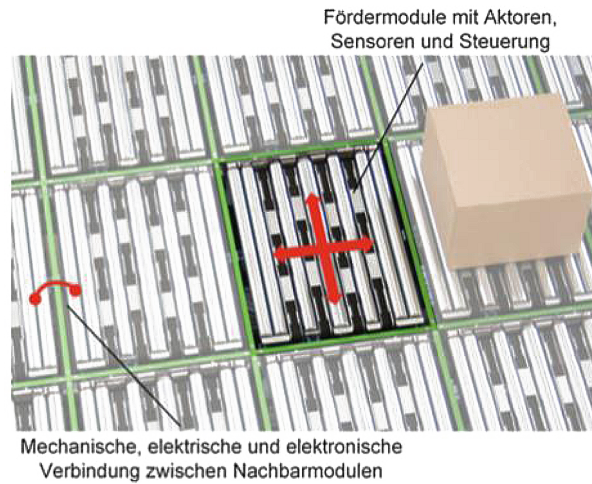


Bild 10.7: Beispiel für Plug&Play-Fördertechnik-Module und Verbindungen des GridSorters

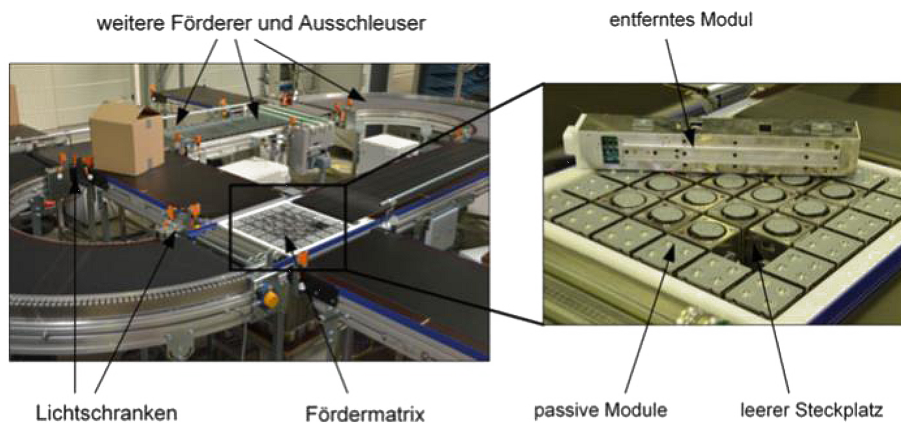


Bild 10.8: Im Rahmen des Forschungsvorhabens "Kognitive Logistiknetzwerke CogniLog" entstandenen Fördermatrix als Beispiel für Plug&Play-Fördertechnik

Einsatz von Fahrerlosen Transportsystemen

Fahrerlose Transportsysteme (FTS), englisch: Automated guided transport system) gewinnen in der Intralogistik immer mehr an Bedeutung. Es handelt sich dabei um ein flurgebundenes Fördersystem, welches im Wesentlichen aus einem oder mehreren berührungslos geführten Fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF, englisch: **Automated Guided Vehicle, AGV**) mit eigenem Fährantrieb, einem Leit- und Navigationssystem, einer Einrichtung zur Datenübertragung, sowie einer entsprechenden Infrastruktur, z.B. zur Energieversorgung, besteht. Ein FTS wird primär für den automatisierten Materialtransport (Ziehen/Tragen von Fördergut mit aktiven oder passiven Lastaufnahmemitteln) eingesetzt und kann Transportaufträge auf vorgegebenen Fahrkursen autonom ausführen.

FTF gibt es in den verschiedensten Ausführungsformen. Im Allgemeinen wird abhängig vom Einsatzbereich des FTF zwischen **Logistik-FTF** und **Montage-FTS** (für Serienmontage, auf einem Unterbau sitzt die Aufnahme für das Montageobjekt) unterschieden. Teilweise werden die FTF auch in Abhängigkeit von der Transportweise und der transportierten Last kategorisiert, z.B. Gabelhub-FTF für Paletten oder Mini-FTF für KLT.



Bild 10.9: links: Unterfahr-FTF mit kleinen Rollenwagen für Gitterboxen, rechts: Montage-FTS bei Volkswagen; im Hintergrund erfolgt die Verheirathung von Antriebsstrang und Karosserie auf einem FTF, vorne entfernt sich ein leeres FTF

Zur Energieversorgung von FTS gibt es drei gängige Technologien: Traktionsbatterien (NiCd-, Blei-, Lithium-Ionen-Akkumulatoren), Berührungslose Energieübertragung oder Hybridsysteme (Berührungslose Energieübertragung plus Doppelschichtkondensator oder Batterie).

Die Navigation erfolgt auf einem vorgegebenen Fahrkurs entweder leit-liniengeführt über Leitdraht (induktiv), Leitlinien (optisch), Leitband (magnetisch) oder RFID-Tags im Boden. Auch eine Steuerung über Navigationssysteme (Laser, GPS, Funk) ist möglich (siehe Abb. 10.10).

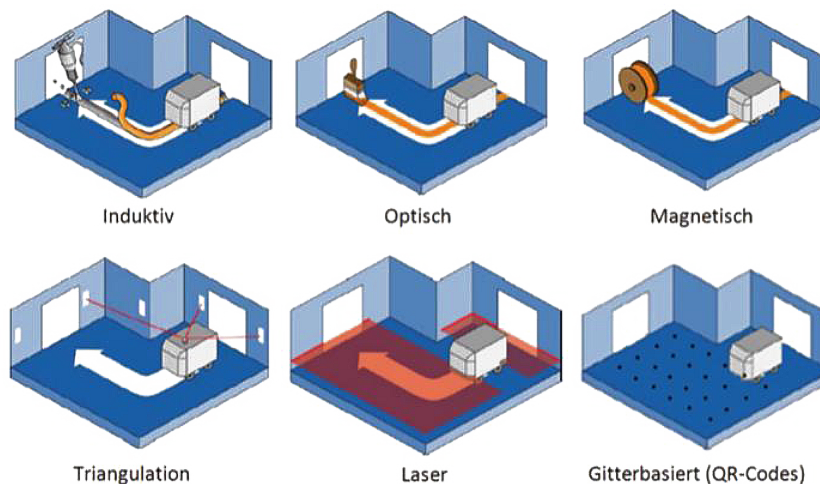


Bild 10.10: Navigationsverfahren für Fahrerlose Transportsysteme

Um die notwendige Sicherheit beim Einsatz von FTS sicherzustellen gibt es zahlreiche Gesetze, Vorschriften, Normen und Richtlinien (z.B. Maschinenrichtlinie, VDI-Richtlinie 2510), welche beachtet werden müssen. Unter anderem ist im Personenverkehr eine Höchstgeschwindigkeit von 1 m/sec (3,6 km/h) vorgegeben. Außerdem sind Personenerkennungssysteme, Bremssysteme, Warneinrichtungen und Not-Aus-Einrichtungen für FTS vorgeschrieben.



Bild 10.11: a

<https://www.youtube.com/watch?v=B7xmWYOttB8>

<https://www.youtube.com/watch?v=s0re79GRf1Q>

Vorteile eines FTS:

1. Organisierter Material- und Informationsfluss stellt produktivitätssteigernde Transparenz in der Intralogistik sicher
2. Nachverfolgbarkeit logistischer Prozesse durch lückenlose Prozesshistorie
3. Reduzierung der Personalbindung im Transport -> Senkung der Personalkosten
4. Hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit
5. Skalierbarkeit innerhalb des FTS, Anpassung an schwankende Transportbedarfe
6. Einfache Realisierung von Kreuzungen und Verzweigungen
7. Transport unterschiedlicher Güter, vielfältige Zusatzfunktionen realisierbar
8. Nur geringfügige Infrastrukturmaßnahmen erforderlich
9. Minimierung von Transportschäden durch hohe Präzision bei automatischer Lastübergabe und -übernahme
10. Minimierung von Fehllieferungen und Wartebeständen im Produktionsbereich durch kalkulierbare, terminierte und transparente Transportvorgänge
11. In der Regel kein zusätzlicher Flächenbedarf, Eignung auch für geringe Raumhöhen, Möglichkeit zur Layout-Änderung
12. Anpassung an einen steigenden Automatisierungsgrad
13. Verbessertes Arbeitsumfeld: Sichere und angenehme Arbeitsbedingungen, positive Innen- und Außenwirkung, saubere und leise Transportvorgänge

Nachteile eines FTS:

1. Hohe Kosten durch die Verlagerung komplexer Technik in die FTF
2. Einführung eines FTS erfordert genaue Planung und Organisation, Anforderungen müssen klar definiert sein
3. FTS sind komplexe Systeme, die Planung, Inbetriebnahme und teilweise auch die Wartung erfordert deshalb speziell geschultes Personal
4. Genauigkeit bei GPS-Navigation beträgt nur ca. 20 m, optische Navigationsverfahren sind anfällig gegen Verschmutzungen, RFID-Transponder im Boden verursachen hohe Kosten

Die größte **Anwenderbranche** für FTS bildet die Automobilindustrie, wo FTF häufig direkt in der Montage oder zur Produktionsversorgung eingesetzt werden. Auch die Zulieferindustrie setzt seit ca. 2015 stärker auf FTS. In der Papiererzeugung und -verarbeitung wird das Papierrollen-Handling meist von FTS-Anwendungen ausgeübt, um eine bei manuellem Handling häufige Beschädigung der Rollen zu verhindern. Durch den enormen Kostendruck in der Branche sind FTS-Anwendungen auch für die Getränke-/Lebensmittelindustrie interessant. So setzt z.B. die Radeberger Brauerei beim Paletten-Handling auf FTF. Weitere Bereiche wie die Stahlindustrie oder die Kliniklogistik werden von FTS-Anwendungen ebenfalls zunehmend erobert.

10.6 Zusammenfassung

Die Auswirkungen von Industrie 4.0 auf die Logistikbranche werden unter dem Begriff Smart Logistics zusammengefasst. Diese Vernetzung, Dezentralisierung, Automatisierung und Standardisierung von Logistikprozessen ermöglichen mehr Effizienz, Flexibilität und Transparenz entlang der Supply Chain.

Aktuelle Trends wie Kostendruck, Individualisierung und Komplexitätssteigerungen machen der ganzen Logistikbranche zu schaffen. Nur wenn die Logistik IT-Lösungen nutzt, um schneller, interaktiver und zuverlässiger zu agieren, kann sie den steigenden Kundenanforderungen hinsichtlich Liefertreue, Lieferfähigkeit, Servicegrad und Flexibilität genügen.

Im Digitalen Supply-Chain-Management wird Predictive Analytics eingesetzt, um aus Big Data Prognosen über zukünftige Ereignisse zu erstellen. Diese Prognosen helfen z.B. bei der Bestands- und Versandplanung. Prescriptive Analytics geht noch einen Schritt weiter und schlägt situationsabhängige Handlungsempfehlungen vor, wodurch automatisierte Entscheidungsfindungen ermöglicht werden.

Im Bereich der Extralogistik werden der gesamten Logistikbranche in den nächsten Jahren große Umbrüche bevorstehen. Die Digitalisierung bietet der Extralogistik neue Möglichkeiten hinsichtlich Routen-/Touren-Optimierung und Netzwerkplanung.

Durch den Einsatz von softwaregestützten Transport-Management-Systemen (TMS) können Unternehmen eine Datengrundlage schaffen, um zukünftig mit einem KI-gestützten Supply Chain Event Management (SCEM) in Echtzeit szenariobasierte, proaktive Eingriffe in die Lieferkette zu ermöglichen und so die Effizienz der Supply Chain signifikant zu steigern.

Im Bereich der Urbanen Logistik gibt es eine Vielzahl an smarten Lösungen, welche versuchen das Verkehrsaufkommen in den Städten zu reduzieren. Trotz vielversprechender Ansätze bleibt abzuwarten, welche Konzepte und Technologie sich in Zukunft durchsetzen werden.

Der Bereich der Intralogistik ist bereits heute in vielen Unternehmen durch die fortschreitende Digitalisierung geprägt.

Traceability spielt eine wichtige Rolle, da die Rückverfolgbarkeit der Produkte über die gesamte Supply Chain vorgeschrieben ist. Eine eindeutige Kennzeichnung von Produkten wird durch automatische Identifikationsverfahren wie die RFID-Technik oder die Barcode-Technik ermöglicht, wodurch eine rechnergestützte Sendungsverfolgung ermöglicht wird.

Die Materialflusstechnik innerhalb des Produktionssystems wird zunehmend durch cyber-physische Systeme vernetzt. Sogenannte Plug&Play-Fördertechnik bietet hier große Potenziale für einen autonom agierenden, flexiblen Materialtransport.

Auch Fahrerlose Transportsysteme (FTS) werden in vielen Bereichen wie der Automobilindustrie oder im Lebensmittelbereich immer häufiger eingesetzt. Die Fahrerlosen Transportfahrzeuge (FTF) können sowohl in der Logistik als auch in der Montage eingesetzt werden und sind in den verschiedensten Ausführungsformen erhältlich.

KAPITEL 11

IO-Link

Lernziele

Nach der Bearbeitung dieses Kapitels werden Sie wissen, ...

- ... was man unter IO-Link versteht.
- ... auf welchen Ebenen IO-Link Verwendung findet.
- ... wer die Technologie verwaltet und vorantreibt.
- ... welche Daten zwischen Device und Master verschickt werden.
- ... welche Vorteile IO-Link hat.

Einführung

IO-Link ist eine weltweit standardisierte Technologie zur Anbindung intelligenter Sensoren und Aktoren in Automatisierungssystemen. Die einflussreichsten Hersteller der Automatisierungsbranche haben bereits verschiedenste IO-Link Devices in ihr Produktportfolio aufgenommen und entwickeln kontinuierlich an weiteren IO-Link Devices.

Die Technologie ist bereits am Markt etabliert und bietet dennoch enormes Wachstumspotential. Durch den Einsatz von IO-Link Sensoren und Aktoren wird die Feldebene von Automatisierungssystemen intelligent und kommunikativ. Damit ist sie eine Schlüsseltechnologie um Automatisierungssysteme, speziell die Feldebene, Industrie 4.0 tauglich zu machen.



11.1 Automatisierungssysteme und deren Anforderungen

Automatisierungssysteme werden üblicherweise in fünf Ebenen dargestellt. Diese fünf Ebenen bilden die sogenannte Automatisierungspyramide.

1. Unternehmensebene (ERP)
2. Betriebsleitebene (MES)
3. Prozessleitebene (SCADA)
4. Steuerungsebene (SPS)
5. Feldebene (Sensoren und Aktoren)

Die Unternehmensebene bildet das gesamte Netzwerk eines Unternehmens ab. Hier werden sogenannte Enterprise Resource Planning Systeme (ERP-Systeme) eingesetzt.

Darunter gibt es mit der Betriebsleitebene ein Netz, das über eine ganze Anlage hinweg alle einzelnen Komponenten verbindet. Hier werden zum Beispiel Produktionsaufträge ausgelöst und die Logistik innerhalb der Produktion gesteuert.

Die Prozessleitebene, eine Ebene weiter unten, beinhaltet die Feldbussysteme. Diese Ebene dient dem Anwender und Entwickler einer Automatisierungsanlage als Schnittstelle zum Gesamtsystem. Hier werden Fehlermeldungen und Betriebszustände visualisiert.

Darunter, auf der Steuerungsebene, agieren Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) zur Auswertung und Steuerung aller Sensoren und Aktoren. Die Feldbussysteme sind auch für zeitkritische Anwendungen geeignet.

Auf der Feldebene sind Sensoren und Aktoren angesiedelt. Diese führen die Befehle der SPS aus, beziehungsweise geben gemessene Prozessparameter an die Steuerung ab. In dieser Ebene findet IO-Link seine Anwendung.

Zwischen den Ebenen liegen Schnittstellen mit verschiedenen Anforderungen. Eine davon ist die Echtzeitanforderung. Diese beschreibt wie schnell der Datenaustausch zwischen den Ebenen aber auch einzelnen Baugruppen abgewickelt wird. Die Echtzeitanforderung nimmt mit steigender Entfernung einer Ebene vom physikalischen Prozess ab.

In den oberen Ebenen, grob gesagt den Büroarbeitsplätzen, arbeiten viele Teilnehmer mit großen Daten und Datenmengen. Hier ist die Verarbeitungszeit der Daten nicht von entscheidender Bedeutung. In den unteren Ebenen hingegen ist die Netzausdehnung und die Teilnehmerzahl überschaubar.

Im Gegensatz werden hier kleine Daten, beispielsweise Prozessdaten, mit hoher Geschwindigkeit (Mikrosekunden) verarbeitet und es besteht auf Grund des direkten Eingriffs in den Prozess eine Echtzeitanforderung an das System. Die höchsten Anforderungen an die Kommunikationstechnologie stellt somit die Schnittstelle zwischen Feld- und Steuerungsebene. Hier muss die Übertragung von Prozessdaten auf Grund der Nähe zum physikalischen Prozess in Echtzeit ablaufen. Konkret sind dies die Verbindungen zwischen Sensoren sowie Aktoren und der SPS. Werden hier Signale verspätet gesendet und empfangen, hat dies Einwirkungen auf den Produktionsprozess und führt zu Fehlfunktionen und undefinierten Zuständen.

11.2 Konsortium und Marke

„IO-Link ist eine weltweit standardisierte I/O - Technologie (IEC 61131-9) um mit Sensoren und auch Aktoren zu kommunizieren.“ Hinter der Technologie steht das Konsortium der Profibus Nutzerorganisation e.V. (PNO), welche die Technologie verwaltet und vorantreibt. Unter den mehr als 200 beteiligten Firmen, genannt IO-Link Competence Center (IOLCC), befinden sich unter anderem die Marktführer der Automatisierungsbranche und weiterer Branchensegmente wie beispielsweise der Sensorik.

Das Ziel der Gemeinschaft ist es, die standardisierte Technologie zu verbreiten und die Sensor- und Aktorkommunikation weltweit flexibel und einheitlich zu gestalten. Unter anderem stellen die Feldbussysteme PROFIBUS und PROFINET solche Standards dar. Ein Hauptziel der IO-Link Technologie ist die Feldbusunabhängigkeit. Das bedeutet, dass die Technologie mit allen gängigen Feldbussystemen nutzbar ist. Darüber hinaus ist IO-Link in der Norm IEC 61131-9 mit dem Titel Single-drop digital communication interface for small sensors and actuators (SDCI) spezifiziert. Ein weiteres primäres Ziel der IO-Link Community ist es, ein Qualitätssicherungssystem einzurichten, welches Inhalte über die Qualität der Produktes, den Demosystemen und den Service beinhaltet.

Unter der Marke IO-Link darf ein Hersteller jedoch nur verkaufen, wenn er ein IOLCC ist oder eine Lizenz hierfür erworben hat. Das Lizenzmodell schließt dagegen eine aktive Mitarbeit in der Community aus. Besitzt ein Hersteller keine Mitgliedschaft und keine Lizenz, ist ihm das Verkaufen unter der Marke IO-Link nicht gestattet. Des Weiteren stellt die IO-Link Community auf ihrer Website einen IODDfinder (Input Output Device Description Finder) zu Verfügung. Hier werden alle IO-Link fähigen Devices der IOLCCs gelistet und durch die IODDs (Input Output Device Description) einheitlich beschrieben.

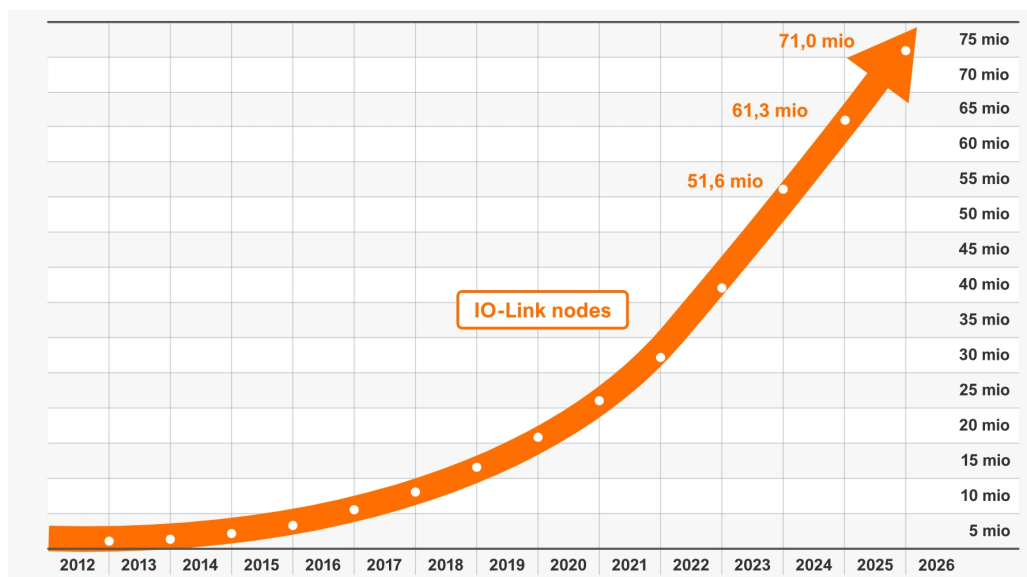


Bild 11.1: IO-Link nodes in the field (2026)

Momentan existiert keine alternative Technologie die IO-Link konkurriert. Da IO-Link durch jedes Unternehmen vertreten werden kann und normiert ist, ist eine Konkurrenztechnologie nicht nötig. Das Konsortium hinter der Marke möchte Einheitlichkeit schaffen, denn Einheitlichkeit verbessert die Performance der IO-Link Technologie. Die Bemühungen während der Entwicklung von IO-Link zum wirtschaftlichem Erfolg der Technologie zeigen bereits Wirkung. Wie die Abbildung 11.1 zeigt, waren Ende 2025 bereits über 71 Millionen IO-Link Knoten im Feld, während die Tendenz weiter steigend ist.

11.3 Wer stellt IO-Link Devices und Master her?

IO-Link Devices und Master werden von den verschiedensten Unternehmen hergestellt. Da alle Devices mit allen Masters kompatibel sind, gibt es auch Unternehmen, die lediglich Devices herstellen. Die meisten führenden Unternehmen stellen jedoch beides her. IO-Link Master unterscheiden sich in der Anzahl und Art der Ports. Üblicherweise hat ein Master zwischen 4 und 10 Ports um Sensoren und Aktoren anschließen zu können. Folgende Unternehmen sind für die aktive Mitarbeit und die führende Stellung im IO-Link Konsortium bekannt:

- ifm electronic GmbH
- Siemens AG
- Balluff GmbH
- Pepperl+Fuchs GmbH
- SICK AG
- WAGO Kontakttechnik GmbH und Co. KG
- Festo GmbH und Co. KG
- und viele mehr...

11.4 Wie funktioniert IO-Link?

Bei dem standardisierten Kommunikationssystem IO-Link handelt es sich um eine Punkt-zu-Punkt Kommunikation zwischen einem IO-Link Master und einem Sensor oder Aktor als IO-Link Device. Mit IO-Link soll die Intelligenz der untersten Feldebene des Automatisierungssystem zugänglich werden. Der IO-Link Master ist am Feldbus angeschlossen und stellt seinerseits IO-Link Ports für die Kommunikation mit IO-Link Devices bereit. Es gibt Master für verschiedene Feldbussysteme, wie in Abb. 11.2 ersichtlich ist.

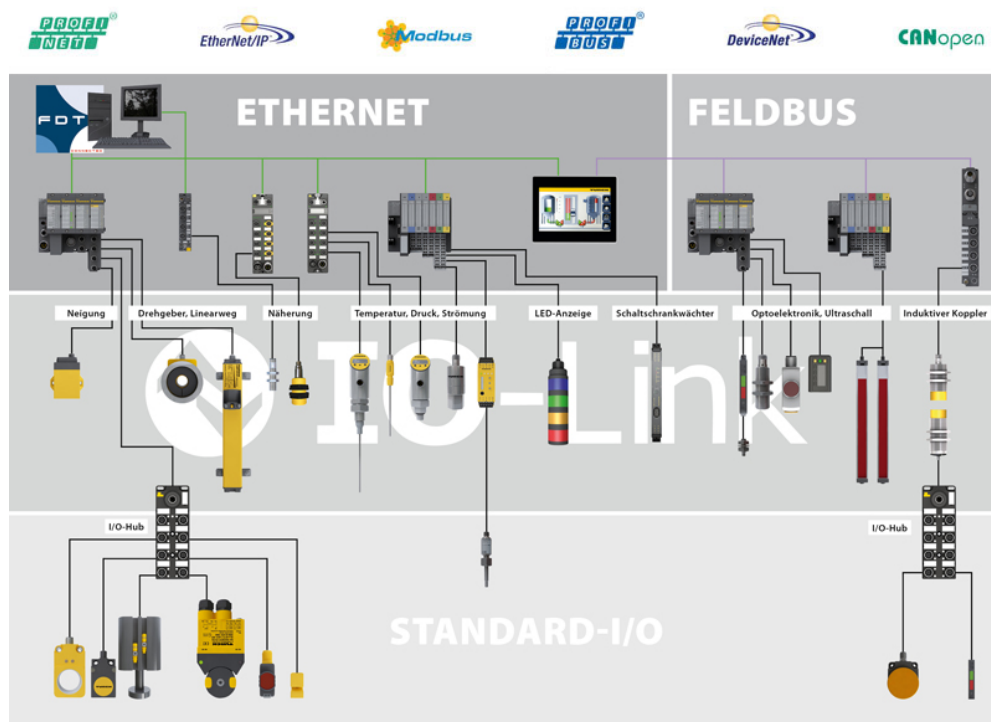


Bild 11.2: Beispiel für die Integration von IO-Link in ein Automatisierungssystem

IO-Link ist kein Feldbus, sondern ein Punkt-zu-Punkt Kommunikationssystem. Übliche Feldbusse besitzen einen Master der mit mehreren untergeordneten Slaves kommuniziert. Da dies bei IO-Link nicht der Fall ist, kann hier nicht von einem Feldbus gesprochen werden. Die gängigsten Feldbusse sind PROFIBUS, Modbus-RTU und CC-Link. Darüber hinaus gibt es Industrial Ethernet, die eine innovativere und schnellere Form der Feldbusse darstellen. Die gängigsten Industrial Ethernet sind PROFINET, EtherNet/IP und EtherCat. In Automatisierungssystemen besteht das Ziel eine durchgehende Prozessüberwachung in einer automatisierten Anlage zu erlangen. Um dies zu erreichen müssen alle Schichten miteinander kommunizieren können.

Betriebsarten

IO-Link sieht prinzipiell zwei Betriebsarten vor, den SIO und den COM Modus. Der SIO Modus steht dabei für den Standard-Input/Output-Modus, der die Rückwärtskompatibilität zu herkömmlichen Installationen von schaltenden Sensoren nach IEC 61131-2 garantiert. In diesem Modus wird auf die Datenleitung des IO-Link Devices ein binär schaltendes Signal gegeben. Der COM Modus steht für den eigentlichen Kommunikationsmodus, in dem ein serielles Datensignal zwischen Master und Device ausgetauscht wird. Die folgende Abbildung 4 zeigt sowohl das SIO Signal, als auch das COM Signal.



Bild 11.3: Betriebsmodi von IO-Link

Übertragungsmedium

Bei IO-Link wird zwischen zwei Portklassen unterschieden. Der standardmäßige Port Class A sieht drei Leiter vor, die durch einen vierten ergänzt werden können. Dabei kommen ungeschirmte Kabel zum Einsatz. Am Master ist immer eine Buchse vorhanden, während am Device ein Stecker angebracht ist. In der Spezifikation ist der Anschluss über M12, M8 oder M5 Buchsen und Stecker vorgesehen, jedoch sind auch Schaltschrankkomponenten erhältlich, bei dem die einzelnen Litzen geklemmt werden. Mit der M-Anschlussstechnik wird die Schutzklasse IP65/67 erreicht. Die etablierten Stecker und Buchsen können direkt im Feld verwendet werden. Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch die Pinbelegung der Port Class A an einem M-Stecker.

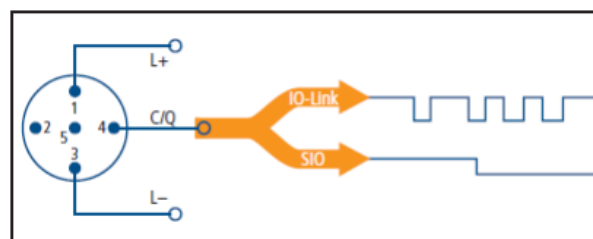


Bild 11.4: Pinbelegung IO-Link Port Class A

Für eine Verbindung zwischen einem IO-Link Device und einem Master mit der Port Class A ist also mindestens eine dreiadrigte Leitung nötig. Über die Leitung L+ hat man laut IO-Link Spezifikation am Device mindestens einen Strom von 200 mA zur Verfügung. Einige Devices, häufig Aktoren, benötigen eine weitere Stromversorgung. Dafür wird der Port Class B verwendet. Der Port Class B kann nur in Verbindung mit M12 Steckern und Buchsen verwendet werden,

garantiert aber einen Mindeststrom von 1,6 A garantiert. Der verfügbare Strom wird durch den M12 Stecker jedoch auf 3,5 A begrenzt.

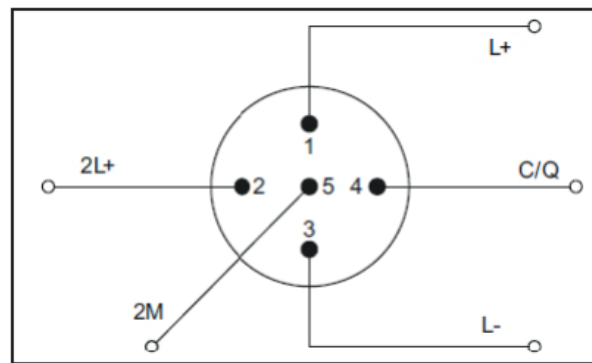


Bild 11.5: Pinbelegung IO-Link Port Class B

An die Leitung zwischen IO-Link Master und Device werden weitere Anforderungen gestellt. Die maximale Kabellänge darf nicht mehr als 20 m betragen, während der Aderquerschnitt mindestens 0,34 mm² groß sein muss. Häufig verwendeten Sensoren wie beispielsweise Drucksensoren oder Positionssensoren genügen die 200 mA auf der L+ Leitung des Port Class A. Ein handelsüblicher kapazitiver Sensoren besitzt dagegen beispielsweise eine Stromaufnahme von rund 25 mA.

Datenpakete

Bei IO-Link werden die Daten über zwei logische Datenkanäle zwischen Master und Device ausgetauscht. In einem Kanal werden die zyklischen Daten ausgetauscht, während ein zweiter Kanal azyklische Nachrichten behandelt.

Die **zyklischen Daten** beinhalten Prozessdaten. Das sind Daten, die während des Betriebs direkt an die Steuerung einer SPS weitergegeben werden, zum Beispiel eine digitale Sensormessgröße. Außerdem beinhalten die Prozessdaten auch Werte, die von der Steuerung an ein IO-Link Device weitergegeben werden, beispielsweise eine Stellgröße für einen Aktor.

Die **azyklischen Daten** werden nur auf Anfrage ausgetauscht und bestehen im Wesentlichen aus Parameter- und Diagnosedaten. Durch Parameterdaten lässt sich eine Einstellung im Device ändern, während Diagnosedaten zur Rückmeldung bestimmter Zustände in einem Device dienen.

11.5 IODD

IO-Link Devices, sprich Sensoren und Aktoren, ermöglichen sehr komplexe Funktionen, die nicht ohne weiteres einfach handzuhaben sind. Aus diesem Grunde wird zu jedem IO-Link Device eine Input Output Device Description (IODD) geliefert. Diese IODD beinhaltet alle wichtigen Daten, die das IO-Link Device betreffen. Die IODD wird in Form einer oder mehrerer XML-Files erstellt. Die Projektierungstools der Steuerungshersteller greifen auf diese Dateien zurück, um dem Bediener eine einfache visuelle Darstellung des Devices zu ermöglichen. Zusätzlich zum XML-File sind auch Bilder des Devices, das Logo des Herstellers und ein Icon des Devices erforderlich.

Der Device-Hersteller ist verpflichtet zu jedem Device eine IODD zu erstellen. Der Kunde erwirbt diese mit dem Device zusammen. Auf der Homepage des Device-Herstellers ist die IODD als Download verfügbar. Eine Datenbank der IODDs von namhaften IO-Link Device-Herstellern ist im Internet unter <https://ioddfinder.io-link.com> abrufbar. Diese Website

wird von der IO-Link Community betrieben. Sie bietet eine Suchmaschine für IODDs an. Der Benutzer kann zum Beispiel nach dem Hersteller oder der Produktbezeichnung suchen. Der IODD-Finder bietet jedoch keine Möglichkeit, die Produkte auf Preise und technische Eigenschaften zu vergleichen. Alternativ sind Tools vorhanden, die über den IO-Link Master die HerstellerID und DeviceID eines verbundenen Devices auslesen und die IODD automatisch von der Homepage laden.

Die Grundsprache der IODD ist Englisch. In dem XML-File werden lediglich TextIDs benutzt. In einer IODD können weitere XML-Dateien enthalten sein, die TextIDs in anderen Sprachen definieren. Der Name der IODD ist strikt vorgegeben und wie folgt aufgebaut: „Firmenname-DeviceID-Datum-IODD1.1.xml“. Die Dateien werden zu einem Zip-File verbunden. Die IODD enthält folgende Daten:

- **Identifikationsdaten**

HerstellerID: Jeder IO-Link Device-Hersteller muss Mitglied in der PNO sein und bekommt eine ID zugewiesen. DeviceID: Jedes IO-Link Device bekommt eine DeviceID. Für jedes Produkt mit abgeänderter Funktionsweise muss eine neue DeviceID verwendet werden. Der Anzahl der adressierbaren Devices ist hierbei keine Grenze gesetzt. Marktführer der Branche verfügen deshalb auf Grund der hohen Produktvielfalt über tausende solcher DeviceIDs.

- **Parameterdaten** mit Adresse, Wertebereiche, Default-Wert und Datentyp

Für jeden Parameter wird eine ID, ein Index, der Datentyp, ein Defaultwert und die Grenzwerte definiert.

- **Prozessdatenaufbau** inklusive Länge, Struktur und Wertebereiche

Den einzelnen Bestandteilen der Prozessdaten wird eine bestimmte Bedeutung zugewiesen, beispielsweise können einzelne Bits Variablen zugewiesen werden.

- **Eventliste**

Für jede devicespezifische Eventnummer wird ein Event definiert.

- **Textverweise** für Sprachdateien

- **Menü-Strukturen**

Es ist verpflichtend die IODD nach einer bestimmten Struktur aufzubauen. Deshalb muss jede IODD verifiziert werden, bevor diese zur Verwendung frei gegeben wird. Dazu bietet die IO-Link Community eine Software an, den IODD-Checker. Dieser untersucht das XML-File auf fehlenden oder falschen Inhalt. Bei erfolgreichem Durchlauf einer IODD generiert das Programm eine Prüfsumme. Das Interpretertool berechnet bei der Erstverwendung wiederum eine Checksumme des XML-Files. Stimmen die beiden Checksummen nicht überein, gibt das Tool eine Fehlermeldung aus. Eine Veränderung des XML-Files zieht eine Änderung der Checksumme nach sich. Mit dieser Vorgehensweise wird der Verwendung von nachträglich geänderten IODDs vorgebeugt. Auf diese Weise soll das Einbinden und Benutzen nicht funktionsfähiger IODDs verhindert werden.

11.6 Vorteile von IO-Link

Die IO-Link Technologie bietet als digitale Schnittstelle beim Anschluss von Sensoren und Aktoren entscheidende Vorteile. Eine neue Technologie am Markt kann sich am besten durch eine Kosteneinsparung beim Endanwender etablieren. Darum wurde bei der Entwicklung von IO-Link ein Augenmerk auf die wirtschaftliche Anwendung im Feld gelegt. Das IO-Link Device an sich ist meist teurer als eine herkömmliche Komponente. Die Kosteneinsparung ergibt sich erst bei der Anwendung.

Normung und Zugänglichkeit

Einer der Hauptvorteile liegt darin, dass die IO-Link Technologie einen offenen Standard nach IEC 61131-9 bietet und dort unter der Bezeichnung single-drop digital communication interface for small sensors and actuators (SDCI) normiert ist. D.h. unter anderem, dass die IO-Link Devices in allen gängigen Feldbussystemen und Automatisierungssystemen integrierbar sind. Dies ist ein entscheidender Vorteil, da weltweit verschiedenste Feldbussysteme verwendet werden.

Verkabelung

Ein weiterer zentraler Vorteil ist die standardisierte Verkabelung im plug-and-play Stil. Die einfache Verkabelung äußert sich dadurch, dass es nahezu unmöglich ist einen IO-Link Sensor falsch anzuschließen. Die M5, M8 oder M12 Verbindungen können sich von Hand angebracht werden. Werkzeuge werden keine benötigt. Eine Verpolung ist durch die Anwendung von M5, M8 oder M12 Stecker ausgeschlossen. Die ungeschirmten Leitungen sind Massenprodukte und können daher in diversen Längen zu einem günstigen Preis eingekauft werden.

Fernparametrierung

Da die Parametrierdaten per IO-Link auf das Device übertragen werden können, ist eine Einstellung am Einbauort nicht mehr nötig. Dies bringt mehrere wirtschaftliche Vorteile mit sich. Zum einen muss der Mitarbeiter im Feld den Sensor oder Aktor lediglich mechanisch befestigen und mit einem IO-Link Master verbinden. Die Parametrierung kann am PC durchgeführt werden. Weiterhin bieten die Hersteller Tools, die dem Arbeiter bei der Einstellung der Parameter zum Beispiel über eine visuelle Darstellung helfen. Außerdem ist auch eine automatische Datenübertragung über den Feldbus bis zum IO-Link Master und Device möglich. So können die Daten automatisch von einem Parametrierserver bereitgestellt werden. Ein weiterer Vorteil ist die Änderung der Einstellungen bei der Umrüstung einer Produktionsanlage. Dies wirkt sich besonders bei schwer zugänglichen Einheiten aus. Weiter perfektioniert wird die Fernparametrierung durch IO-Link Devices mit WLAN Schnittstellen. Dadurch können IO-Link Devices, ohne hohen Kabelaufwand, an schwer zugänglichen Einheiten installiert werden. Auch cloudbasierte Lösungen werden bereits erfolgreich genutzt und werden immer attraktiver.

Backup Parametrierung

Muss ein IO-Link Device in einer Anlage ersetzt werden, wird die Komponente automatisch mit den im Master gespeicherten Daten parametriert. Eine neue Parametrierung vor Ort entfällt. Durch die Identifizierung des Devices am Master wird ein Fehler gemeldet, falls ein falsches Device am jeweiligen Port des Masters angeschlossen ist.

Selbstdiagnose

Die Selbstdiagnose bewirkt vor allem eine Zeiteinsparung bei der Wartung einer Automationsanlage. Durch die Selbstdiagnose der Devices kann bei Ausfall einer Produktionslinie der verantwortliche Sensor schnell herausgefiltert und ausgetauscht werden. Außerdem können die Devices ihren Wartungszustand rückmelden, sodass eine Wartung auf Zuruf möglich wird. Beispielsweise meldet ein Lichtsensor seinen Verschmutzungsgrad, sodass eine Wartung zum richtigen Zeitpunkt, sprich in der produktionsfreien Zeit, durchgeführt wird.

Robustes digitales Signal

Die Signalübertragung ist Aufgrund des hohen Spannungspegels sehr robust und ersetzt analoge Signalformen. Die kontinuierliche Größe wird im Sensor digitalisiert und über die IO-Link Schnittstelle übertragen. Verwendet wird, wie es in der Automatisierungstechnik üblich ist, eine Gleichspannung von 24 V.

Tools zur Projektierung

Um die steigende Komplexität der Devices und der Einstellmöglichkeiten zu minimieren, bieten die Hersteller der IO-Link Komponenten ein breites Band an Tools zur Unterstützung während der Projektierung einer Automatisierungsanlage an. Es werden Tools zur Parametrierung angeboten. Außerdem werden die Devices auch in den Programmierertools der Steuerungshersteller unterstützt, sodass herkömmliche Tools auch mit IO-Link Verwendung finden. Die Tools müssen meist zusätzlich erworben werden und sind damit nicht automatisch für jeden zugänglich.

Wirtschaftlichkeit

Die meisten der eben genannten Vorteile resultieren zu einer Zeitersparnis bei der Anwendung. Fehler werden besser erkannt und schneller gefunden. Dadurch kann Geld eingespart und die Produktivität erhöht werden. In einem Interview der Zeitschrift „Elektrotechnik Automatisierung“ berichtet Jochen Lorenz, der damalige Leiter des Steering Commitees der PNO für IO-Link folgende Erfahrungen der Kunden von IO-Link Produkten:

„Durch den Einsatz von IO-Link bei Montage und Inbetriebnahme lassen sich nach Aussagen unserer Kunden bis zu 30 Prozent der Kosten einsparen. Im laufenden Betrieb sind, ebenfalls laut Kundenaussagen, durch höchste Anlagentransparenz, zum Beispiel durch Auslesen von Geräteinformationen bis aus der Feldebene, die Stillstandszeiten um bis zu 40 Prozent reduzierbar.“ Dadurch werden die wirtschaftlichen Vorteile von IO-Link bei der Anwendung im Feld nochmals deutlich. Ein weiterer wichtiger Punkt für den Erfolg einer neuen Technologie am Markt stellt die Investitionssicherheit der Kunden dar. Der Kunde will ein Produkt kaufen, für das er in zehn Jahren auch noch einen Ersatz findet. Die Entwicklung von IO-Link zielte darauf ab, einen Standard zu entwickeln, der eine große Investitionssicherheit für den Kunden bietet.

11.7 Zusammenfassung

Die IO-Link Technologie ermöglicht durch die Standardisierung eine enorme Effizienzsteigerung in den verschiedensten Bereichen. Von Produktentwicklung, über Nutzung der Devices bis hin zur Wartung werden Prozesse durch die Standardisierung von IO-Link optimiert. Durch die Zugänglichkeit der Marke für Unternehmen und die große Akzeptanz in der Branche hat das Konsortium eine starke Community geschaffen, welche kontinuierlich ihre Kompetenzen gezielt einsetzt und sich weiterentwickelt. Die Marke und Technologie IO-Link wird weiterhin wachsen und beim Thema Industrie 4.0 eine zentrale Rolle spielen.

KAPITEL 12

Predictive Maintenance

Lernziele

Nach der Bearbeitung dieses Kapitels werden Sie wissen, ...

- ... was mit Predictive Maintenance gemeint ist.
- ... welche Rolle die Predictive Maintenance in der Smart Factory spielt.
- ... welche Instandhaltungs-Strategien es gibt.
- ... was "IIoT" bedeutet.
- ... was Remaining Useful Life (RUL) bedeutet.

Einführung

Die Instandhaltung stellt einen zentralen Bestandteil des Anlagenmanagements dar und dient der Sicherstellung der Funktionsfähigkeit technischer Systeme über deren gesamten Lebenszyklus hinweg. Technische Anlagen unterliegen im Betrieb einem kontinuierlichen Abbau ihres Abnutzungsvorrats, wodurch sich ihr Zustand im Zeitverlauf verschlechtert. Ziel der Instandhaltung ist es, diesen Prozess zu verlangsamen, die Funktionsfähigkeit zu erhalten sowie die Verfügbarkeit der Anlagen zu möglichst geringen Kosten sicherzustellen. Neben der technischen Funktionserfüllung trägt die Instandhaltung damit wesentlich zur Wirtschaftlichkeit, Betriebssicherheit und Werterhaltung von Produktionsanlagen bei.

Die Instandhaltung bildet die Grundlage für weiterentwickelte, datenbasierte Instandhaltungsansätze. Moderne Strategien bauen auf diesem Grundverständnis auf und erweitern klassische Maßnahmen um digitale Zustandsüberwachungen und Prognoseverfahren, die in den folgenden Abschnitten näher erläutert werden.



12.1 Instandhaltungsstrategien im Überblick

Zur Sicherstellung der Funktionsfähigkeit technischer Systeme haben sich in der industriellen Praxis unterschiedliche Instandhaltungsstrategien etabliert, die sich vor allem hinsichtlich des Zeitpunkts und der Grundlage von Instandhaltungsmaßnahmen unterscheiden. Diese Strategien bilden den organisatorischen und technischen Rahmen für den Umgang mit Abnutzungs- und Verschleißprozessen an Maschinen und Anlagen.

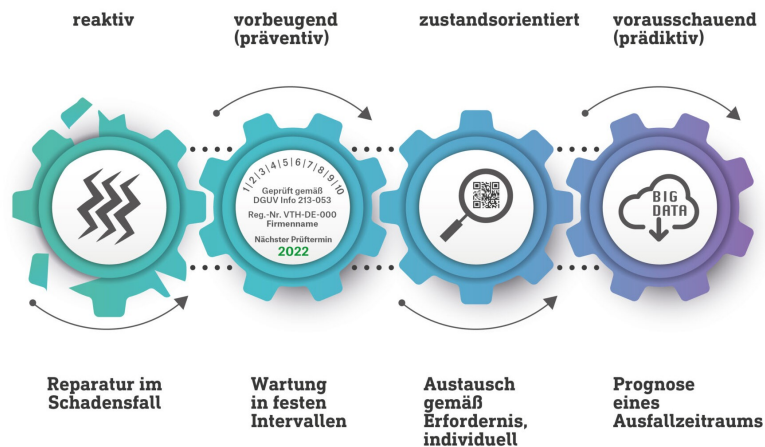


Bild 12.1: Instandhaltungsstrategien

Eine grundlegende Form stellt die reaktive Instandhaltung dar. Maßnahmen werden hierbei erst nach dem Auftreten eines Ausfalls durchgeführt. Ziel ist die Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit nach einer Störung. Diese Vorgehensweise ist organisatorisch einfach, kann jedoch zu ungeplanten Stillständen und hohen Folgekosten führen, insbesondere in stark vernetzten Produktionssystemen.

Die präventive Instandhaltung verfolgt dagegen einen vorbeugenden Ansatz. Wartungsmaßnahmen werden in festgelegten Zeit- oder Nutzungsintervallen durchgeführt, unabhängig vom tatsächlichen Zustand der Anlage. Ziel ist es, potenzielle Ausfälle frühzeitig zu vermeiden. Allerdings besteht hierbei das Risiko unnötiger Eingriffe sowie erhöhter Wartungskosten, da der tatsächliche Verschleißzustand nicht immer berücksichtigt wird.

Als Weiterentwicklung dieser Ansätze gilt die zustandsbasierte Instandhaltung. Hier werden Maßnahmen auf Grundlage erfasster Zustandsdaten technischer Systeme geplant. Sensorische Messgrößen wie Schwingungen, Temperaturen oder Betriebsparameter liefern Hinweise auf den aktuellen Anlagenzustand. Eingriffe erfolgen, sobald definierte Grenzwerte erreicht werden. Diese Strategie erlaubt eine bessere Anpassung an reale Verschleißprozesse und reduziert unnötige Wartungen.

Darauf aufbauend entwickelte sich die prädiktive Instandhaltung. Sie nutzt neben aktuellen Zustandsinformationen auch Prognoseverfahren, um zukünftige Entwicklungen des Anlagenzustands abzuschätzen. Ziel ist es, den optimalen Wartungszeitpunkt auf Basis von Vorhersagen über Verschleiß oder Restlebensdauer zu bestimmen. Damit verbindet sie technische Zustandsüberwachung mit datengetriebenen Analyseverfahren. Die prädiktive Instandhaltung stellt somit eine Weiterentwicklung der zustandsbasierten Strategie dar und bildet den Übergang zu modernen, digital gestützten Instandhaltungskonzepten.

12.2 Definition und Zielsetzung von Predictive Maintenance und Smart Factory

Predictive Maintenance beschreibt einen datenbasierten Instandhaltungsansatz, bei dem der zukünftige Zustand technischer Systeme prognostiziert wird, um Wartungsmaßnahmen zum optimalen Zeitpunkt durchführen zu können. Im Gegensatz zu rein reaktiven oder intervallbasierten Strategien basiert dieser Ansatz auf der kontinuierlichen Erfassung und Analyse von Zustands- und Betriebsdaten. Ziel ist es, potenzielle Ausfälle frühzeitig zu erkennen und Eingriffe so zu planen, dass ungeplante Stillstände vermieden sowie Ressourcen effizient eingesetzt werden. Predictive Maintenance verbindet damit Zustandsüberwachung, Datenanalyse und Prognoseverfahren zu einem integrierten Instandhaltungskonzept.

Zentrale Zielsetzungen von Predictive Maintenance liegen in der Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit, der Reduktion von Instandhaltungskosten sowie der Verbesserung der Planbarkeit von Wartungsmaßnahmen. Durch die Verschiebung von ungeplanten Reparaturen hin zu planbaren Eingriffen können Produktionsunterbrechungen minimiert und Ersatzteilbestände optimiert werden. Gleichzeitig ermöglicht der zustands- und prognoseorientierte Ansatz eine bessere Ausnutzung von Bauteillebensdauern, da Komponenten nicht mehr ausschließlich auf Basis fixer Intervalle ausgetauscht werden. Predictive Maintenance trägt somit zur Steigerung von Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Prozesssicherheit in industriellen Produktionssystemen bei.

Die Umsetzung von Predictive Maintenance ist eng mit der Entwicklung digitalisierter Produktionsumgebungen verknüpft, die unter dem Begriff Smart Factory zusammengefasst werden. Eine Smart Factory zeichnet sich durch vernetzte Maschinen, durchgängige Datenerfassung sowie die Integration von Informations- und Kommunikationstechnologien in Produktionsprozesse aus. Innerhalb dieser Umgebung können Zustandsdaten kontinuierlich erfasst und ausgewertet werden, wodurch die Grundlage für datengetriebene Instandhaltungsstrategien geschaffen wird. Predictive Maintenance stellt somit einen wesentlichen Anwendungsfall der Smart Factory dar, da sie die Verfügbarkeit digitaler Daten nutzt, um technische Entscheidungen zu unterstützen.

Aktuelle Forschungsarbeiten betonen die Bedeutung intelligenter Sensoren und cyber-physischer Systeme für die Umsetzung von Predictive Maintenance in Smart-Factory-Umgebungen. Die kontinuierliche Erfassung und Nutzung von Zustandsdaten ermöglicht eine datenbasierte und vorausschauende Instandhaltung. Predictive Maintenance kann somit als zentraler Anwendungsfall von Industrie-4.0-Technologien verstanden werden, bei dem physische Anlagenzustände in digitale Informationsströme überführt und für betriebliche Entscheidungen genutzt werden.

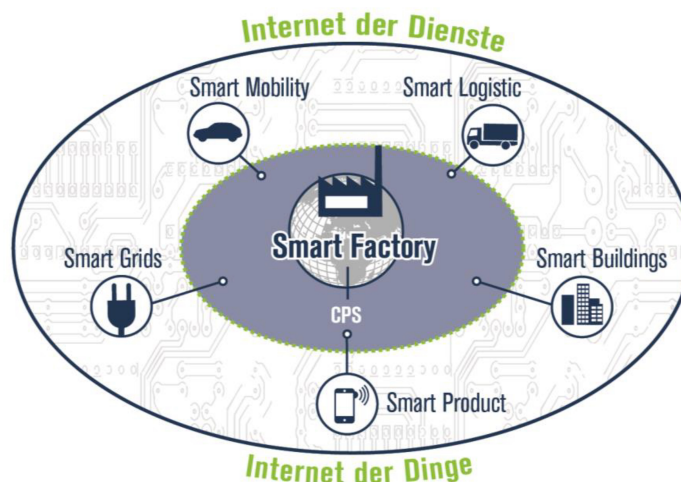


Bild 12.2: SIPM

12.3 Technische Grundlagen

Die Umsetzung von Predictive Maintenance basiert auf der Verfügbarkeit technischer Systeme zur Erfassung, Übertragung und Verarbeitung von Zustands- und Betriebsdaten. Erst durch das Zusammenspiel von Sensorik, Kommunikationsinfrastruktur sowie informationsverarbeitenden Systemen wird eine datenbasierte und vorausschauende Instandhaltung möglich. Technologische Grundlagen bilden somit die Voraussetzung dafür, Anlagenzustände kontinuierlich zu überwachen und daraus Prognosen für zukünftige Entwicklungen abzuleiten.

Sensorik, Daten und Zustandsüberwachung

Sensoren bilden die primäre Datenquelle für Predictive Maintenance. Sie erfassen kontinuierlich physikalische Größen wie Temperatur, Schwingungen, Druck oder Stromaufnahme und ermöglichen dadurch eine Bewertung des aktuellen Anlagenzustands. Die gewonnenen Messwerte werden zu Zustandsindikatoren verarbeitet, wodurch Abweichungen vom Normalbetrieb frühzeitig erkannt werden können. Die kontinuierliche Zustandsüberwachung bildet somit die Grundlage für datengetriebene Instandhaltungsentscheidungen.

Industrial Internet of Things (IIoT)

Das Industrial Internet of Things (IIoT) beschreibt die Vernetzung industrieller Anlagen, Sensoren und Steuerungssysteme über digitale Kommunikationsnetzwerke mit dem Ziel einer kontinuierlichen Datenerfassung und -verfügbarkeit innerhalb industrieller Prozesse. Im Unterschied zum allgemeinen Internet of Things liegt der Fokus auf industriellen Anforderungen wie Zuverlässigkeit, Echtzeitfähigkeit und Integration in bestehende Automatisierungsstrukturen.

Im Kontext von Predictive Maintenance übernimmt das IIoT die Funktion einer verbindenden Infrastruktur zwischen der physischen Anlagenebene und digitalen Analyseprozessen. Sensordaten werden über Gateways und industrielle Kommunikationssysteme an übergeordnete Plattformen übertragen und dort für Monitoring sowie weitere Analysen bereitgestellt. Dadurch entsteht eine durchgängige Datenkette, die eine kontinuierliche Zustandsüberwachung und datenbasierte Wartungsentscheidungen ermöglicht.

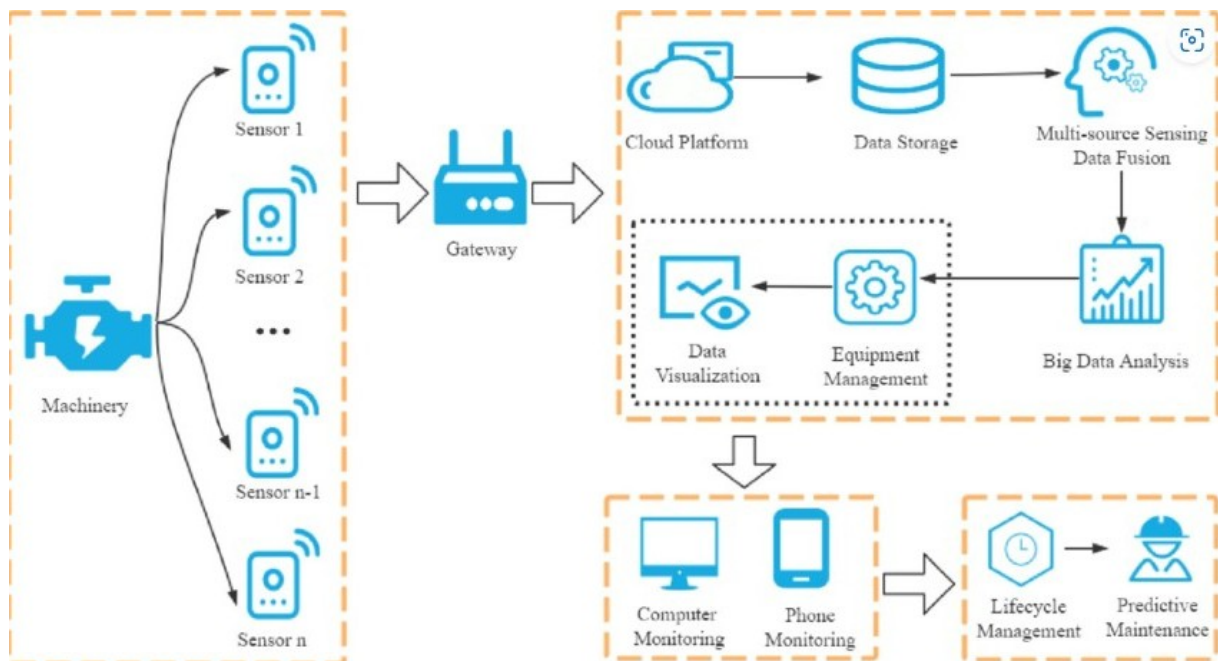


Bild 12.3: IIoT

IT-Systemlandschaft der Instandhaltung

Übergeordnete IT-Systeme ermöglichen die organisatorische und betriebliche Nutzung der im IIoT erfassten Daten. Zu den zentralen Systemen zählen Computerized Maintenance Management Systems (CMMS), Enterprise-Resource-Planning-Systeme (ERP) sowie Supervisory Control and Data Acquisition Systeme (SCADA).

CMMS unterstützen die Planung und Dokumentation von Instandhaltungsmaßnahmen, ERP-Systeme integrieren Instandhaltungsdaten in betriebswirtschaftliche Prozesse, während SCADA-Systeme Echtzeitdaten aus Produktionsanlagen bereitstellen. Das Zusammenspiel dieser Systeme ermöglicht eine durchgängige Nutzung von Daten entlang des Wartungsprozesses und integriert Predictive Maintenance in bestehende Produktions- und Managementstrukturen.

12.4 Predictive Maintenance in der Smart Factory

Nachdem die technologischen Grundlagen dargestellt wurden, steht im folgenden Abschnitt die Anwendung von Predictive Maintenance innerhalb vernetzter Produktionssysteme im Fokus. Im Mittelpunkt steht dabei nicht mehr die einzelne Technologie, sondern deren Zusammenwirken innerhalb eines integrierten Produktions- und Instandhaltungssystems. Predictive Maintenance wird somit als organisatorischer und datengetriebener Bestandteil der Smart Factory betrachtet.

Smart Factory als Anwendungsumgebung für Predictive Maintenance

Die Smart Factory schafft die Rahmenbedingungen für den praktischen Einsatz von Predictive Maintenance, da Maschinen, Sensoren und Informationssysteme kontinuierlich miteinander verbunden sind. Diese Vernetzung ermöglicht die durchgängige Verfügbarkeit von Zustandsdaten und bildet die Grundlage für datengestützte Entscheidungen im Instandhaltungsprozess.

Im Gegensatz zu klassischen Produktionsumgebungen werden Informationen innerhalb der Smart Factory nicht isoliert verarbeitet, sondern systemübergreifend genutzt. Dadurch können Instandhaltungsmaßnahmen frühzeitig mit Produktionsprozessen abgestimmt werden, wodurch ungeplante Stillstände reduziert und die Anlagentransparenz erhöht wird.

Einbettung von Predictive Maintenance in Smart-Factory-Konzepte

Predictive Maintenance ist in Smart-Factory-Konzepten nicht als eigenständige Funktion zu verstehen, sondern als Teil eines vernetzten Systems aus Produktion, Monitoring, Planung und Instandhaltung. Die kontinuierliche Rückkopplung zwischen diesen Bereichen ermöglicht es, Wartungsentscheidungen direkt in operative Prozesse einzubinden.

Monitoring-Systeme liefern kontinuierlich Zustandsinformationen, welche von Planungs- und Managementsysteme genutzt werden, um Wartungsmaßnahmen effizient zu terminieren. Dadurch entwickelt sich Instandhaltung von einer reaktiven Reparaturfunktion hin zu einer strategischen Prozesskomponente innerhalb der Produktionsorganisation.

Datenfluss und Entscheidungsunterstützung

Ein zentrales Merkmal der Anwendung von Predictive Maintenance in der Smart Factory ist der durchgängige Datenfluss zwischen Maschinenebene, Datenplattform und Entscheidungsunterstützungssystemen. Sensordaten werden über PLCs erfasst, über industrielle Kommunikationssysteme übertragen und anschließend in Datenbanken gespeichert, wo sie für Monitoring und Analyse bereitstehen.

Die Verarbeitung dieser Daten ermöglicht eine Kombination aus Echtzeitüberwachung und historischer Analyse. Auf dieser Basis können frühzeitige Warnmeldungen erzeugt und potenzielle Ausfälle erkannt werden, wodurch Wartungsmaßnahmen vorbereitet werden können, bevor kritische Zustände entstehen.

Visualisierungs- und Dashboard-Systeme unterstützen Entscheidungsträger dabei, komplexe Zustandsinformationen verständlich aufzubereiten und daraus geeignete Maßnahmen abzuleiten. Predictive Maintenance übernimmt dadurch die Rolle eines Entscheidungsunterstützungssystems innerhalb der Smart Factory.

Praxisbeispiel einer Smart-Factory-Integration

Ein praxisnahes Beispiel für die Integration von Predictive Maintenance zeigt eine industrielle Anwendung in einer Abwasseraufbereitungsanlage. Hier werden Maschinenzustände kontinuierlich über Sensoren erfasst und durch PLC-Systeme gesammelt. Die Daten werden über ein IIoT-Netzwerk an eine zentrale Datenbank übertragen und über SCADA-Systeme visualisiert.

Innerhalb dieser Architektur erfolgt die Analyse der Zustandsdaten automatisiert über ein Dashboard-System, das Gesundheitsdaten der Anlagen darstellt und frühzeitige Warnmeldungen generiert. Werden kritische Grenzwerte erreicht, können automatisch Wartungsaufträge erstellt und an verantwortliche Entscheidungsträger weitergeleitet werden.

Das Praxisbeispiel zeigt, dass Predictive Maintenance nicht nur auf der Analyse technischer Daten basiert, sondern vor allem auf der Integration mehrerer Systemebenen, von der Sensorik über Kommunikationsnetzwerke bis hin zu Management- und Wartungssystemen. Dadurch entsteht ein geschlossener Informationskreislauf, der eine vorausschauende und planbare Instandhaltung ermöglicht.

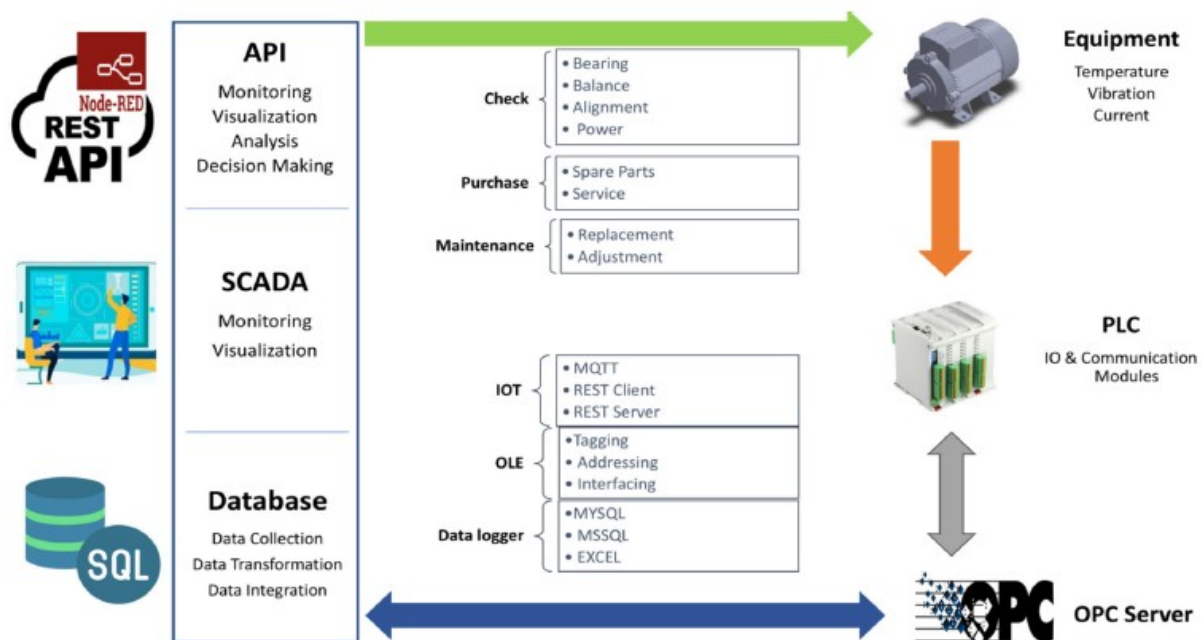


Bild 12.4: Architektur einer Predictive-Maintenance-Anwendung mit PLC-, OPC-, SCADA- und Datenbankintegration

12.5 Prognosekonzepte und Remaining Useful Life

Nachdem die Integration von Predictive Maintenance in Smart-Factory-Umgebungen dargestellt wurde, steht im folgenden Abschnitt die prognostische Bewertung technischer Systeme im Mittelpunkt. Ziel ist es, aus Zustandsdaten nicht nur aktuelle Anlagenzustände abzuleiten, sondern zukünftige Entwicklungen quantitativ abzuschätzen. Hierfür kommen unterschiedliche Prognosekonzepte zum Einsatz, die eine Bewertung des verbleibenden Nutzungszeitraums technischer Komponenten ermöglichen.

Begriff und Bedeutung der Remaining Useful Life

Der Begriff Remaining Useful Life (RUL) beschreibt die verbleibende Nutzungsdauer einer technischen Komponente bis zum Erreichen eines definierten Ausfall- oder Verschleißzustands. Die RUL stellt somit eine prognostische Größe dar, die angibt, wie lange ein System unter gegebenen Betriebsbedingungen noch zuverlässig betrieben werden kann.

Die Bestimmung der Remaining Useful Life ermöglicht eine vorausschauende Planung von Instandhaltungsmaßnahmen. Anstelle fester Wartungsintervalle können Eingriffe auf Basis der tatsächlichen Restlebensdauer erfolgen, wodurch sowohl unnötige Wartungen als auch ungeplante Ausfälle reduziert werden. Damit stellt die RUL einen zentralen Baustein moderner Predictive-Maintenance-Konzepte dar.

Darüber hinaus unterstützt die RUL die Entscheidungsfindung innerhalb der Smart Factory, da sie technische Zustandsinformationen in eine verständliche Kennzahl überführt. Produktionsplanung, Ressourcenmanagement und Ersatzteilbeschaffung können dadurch besser aufeinander abgestimmt werden.

Die grundsätzliche Idee der Remaining Useful Life lässt sich als Degradationsverlauf mit definiertem Ausfallschwellenwert darstellen (vgl. Abbildung 3.5).

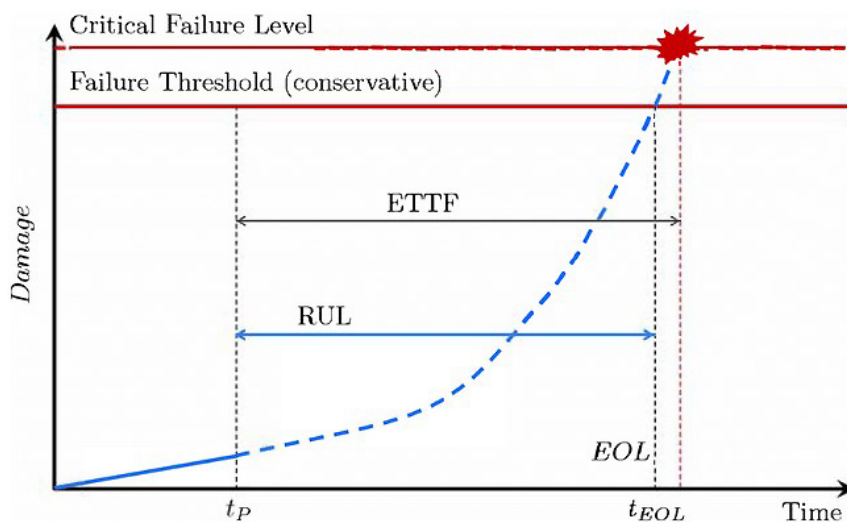


Bild 12.5: Schematische Darstellung des Degradationsverlaufs und der Remaining Useful Life (RUL)

Ansätze zur Zustands- und Lebensdauerprognose

Zur Prognose der verbleibenden Nutzungsdauer existieren unterschiedliche methodische Ansätze, die sich hinsichtlich Datenbasis, Modellierung und Komplexität unterscheiden. Grundsätzlich lassen sich drei Hauptkategorien unterscheiden: physikbasierte, datengetriebene sowie hybride Prognoseansätze.

Physikbasierte Ansätze basieren auf bekannten Verschleiß- und Alterungsmodellen technischer Systeme. Dabei werden physikalische Zusammenhänge genutzt, um den Degradationsprozess einer Komponente mathematisch abzubilden. Diese Verfahren bieten eine hohe Interpretierbarkeit, setzen jedoch detaillierte Kenntnisse über das Verhalten der betrachteten Systeme voraus.

Datengetriebene Ansätze nutzen hingegen große Mengen historischer und aktueller Sensordaten, um Muster und Trends zu erkennen. Mithilfe statistischer oder lernbasierter Verfahren werden Prognosen über zukünftige Zustandsentwicklungen erstellt. Diese Methoden sind besonders geeignet, wenn komplexe Systeme vorliegen, deren physikalische Modelle nur schwer vollständig beschrieben werden können.

Hybride Ansätze kombinieren physikalisches Wissen mit datenbasierten Verfahren, um die Vorteile beider Methoden zu nutzen. Dabei werden physikalische Modelle durch datengetriebene Analysen ergänzt oder verbessert, wodurch robustere und praxisnahe Prognosen möglich werden. In industriellen Anwendungen gewinnen solche kombinierten Ansätze zunehmend an Bedeutung, da sie sowohl Interpretierbarkeit als auch hohe Prognosegenauigkeit ermöglichen.

Unabhängig vom gewählten Ansatz ist die Qualität der verfügbaren Daten ein entscheidender Einflussfaktor für die Genauigkeit der Prognosen. Eine zuverlässige Datenerfassung sowie geeignete Vorverarbeitungsschritte sind daher grundlegende Voraussetzungen für eine belastbare Lebensdauerabschätzung im Rahmen von Predictive Maintenance.

Herausforderungen bei der Prognose der Remaining Useful Life

Obwohl Prognoseverfahren ein zentrales Element von Predictive Maintenance darstellen, ist die zuverlässige Abschätzung der Remaining Useful Life mit verschiedenen Herausforderungen verbunden. Eine wesentliche Schwierigkeit liegt in der Qualität und Verfügbarkeit der zugrunde liegenden Daten. Unvollständige Messreihen, Sensorfehler oder inkonsistente Datenaufzeichnungen können die Aussagekraft von Prognosemodellen erheblich beeinflussen und zu unsicheren Vorhersagen führen.

Ein weiterer Einflussfaktor ergibt sich aus variierenden Betriebsbedingungen technischer Anlagen. Veränderungen in Lastprofilen, Umgebungsbedingungen oder Nutzungsintensitäten führen dazu, dass Degradationsprozesse nicht immer gleich verlaufen. Modelle, die unter bestimmten Bedingungen trainiert oder entwickelt wurden, lassen sich daher nicht ohne Weiteres auf andere Anwendungen übertragen.

Auch die Modellkomplexität stellt eine Herausforderung dar. Während datengetriebene Ansätze oftmals hohe Prognosegenauigkeiten erzielen können, erfordern sie große Mengen qualitativ hochwertiger Daten sowie einen erhöhten Rechenaufwand. Physikbasierte Modelle sind dagegen interpretierbarer, stoßen jedoch bei komplexen oder nur teilweise bekannten Systemen an ihre Grenzen.

Darüber hinaus bestehen Unsicherheiten hinsichtlich der Prognosezeitpunkte. Insbesondere bei frühen Lebenszyklusphasen einer Komponente können nur eingeschränkt belastbare Aussagen über die verbleibende Nutzungsdauer getroffen werden. Dies erfordert eine kontinuierliche Aktualisierung der Modelle sowie eine laufende Bewertung der Prognosequalität im Betrieb.

Bewertung der Prognosequalität und Unsicherheiten

Für die praktische Anwendung von Remaining-Useful-Life-Prognosen ist nicht nur die Vorhersage selbst entscheidend, sondern auch die Bewertung ihrer Zuverlässigkeit. Prognosemodelle liefern häufig keine exakten Zeitpunkte, sondern Wahrscheinlichkeitsbereiche oder Unsicherheitsintervalle, die die mögliche Streuung zukünftiger Entwicklungen abbilden.

Die Genauigkeit von Prognosen wird maßgeblich durch die Qualität der Eingangsdaten, die Wahl geeigneter Modellparameter sowie die Aktualität der verfügbaren Informationen beeinflusst. Eine kontinuierliche Validierung der Modelle anhand realer Betriebsdaten ist daher notwendig, um die Zuverlässigkeit der Vorhersagen sicherzustellen und Fehlentscheidungen zu vermeiden.

In industriellen Anwendungen spielt die transparente Darstellung von Unsicherheiten eine wichtige Rolle für die Entscheidungsunterstützung. Wartungsentscheidungen basieren häufig nicht auf einem einzelnen Prognosewert, sondern auf einer Bewertung von Risiken und Wahrscheinlichkeiten. Dadurch wird Predictive Maintenance zu einem unterstützenden Werkzeug, das Entscheidungsträger bei der Planung von Wartungsmaßnahmen entlastet, ohne die finale Verantwortung vollständig zu automatisieren.

Die Bewertung der Prognosequalität ist somit ein zentraler Bestandteil moderner Predictive-Maintenance-Strategien, da sie eine realistische Einschätzung der verbleibenden Nutzungsdauer ermöglicht und gleichzeitig die Grenzen datenbasierter Vorhersagen transparent macht.

12.6 Zusammenfassung

Die Instandhaltung sichert die Funktionsfähigkeit technischer Systeme über ihren gesamten Lebenszyklus und trägt wesentlich zu Verfügbarkeit, Wirtschaftlichkeit, Betriebssicherheit und Werterhaltung von Anlagen bei. Mit steigender Komplexität moderner Produktionssysteme hat sie sich von einer reaktiven Tätigkeit zu einer strategischen Unternehmensfunktion entwickelt.

In der industriellen Praxis werden unterschiedliche Instandhaltungsstrategien unterschieden. Während die reaktive Instandhaltung erst nach einem Ausfall eingreift und die präventive Instandhaltung auf festen Intervallen basiert, berücksichtigt die zustandsbasierte Instandhaltung den aktuellen Anlagenzustand. Darauf aufbauend ermöglicht die prädiktive Instandhaltung eine vorausschauende Planung von Wartungsmaßnahmen auf Basis zukünftiger Zustandsentwicklungen.

Predictive Maintenance basiert auf der kontinuierlichen Erfassung und Analyse von Zustands- und Betriebsdaten. Ziel ist es, Ausfälle frühzeitig zu erkennen, ungeplante Stillstände zu reduzieren und Wartungsmaßnahmen optimal zu terminieren. Dieser Ansatz ist eng mit der Smart Factory verbunden, in der vernetzte Systeme, durchgängige Datenerfassung und digitale Technologien die Grundlage für datenbasierte Entscheidungen schaffen.

Technisch beruht Predictive Maintenance auf dem Zusammenspiel von Sensorik, IIoT und übergeordneten IT-Systemen wie CMMS, ERP und SCADA. Dadurch entsteht ein durchgängiger Datenfluss, der Echtzeitüberwachung, historische Analysen und Entscheidungsunterstützung ermöglicht.

Ein zentrales Element ist die Prognose der verbleibenden Nutzungsdauer, der sogenannten Remaining Useful Life (RUL). Zu ihrer Bestimmung kommen physikbasierte, datengetriebene und hybride Ansätze zum Einsatz. Gleichzeitig ist die RUL-Prognose mit Herausforderungen wie Datenqualität, Modellunsicherheiten und variierenden Betriebsbedingungen verbunden, weshalb eine kontinuierliche Validierung notwendig ist.

Zukünftig wird Predictive Maintenance durch künstliche Intelligenz, Machine Learning, digitale Zwillinge und Edge Computing weiter an Bedeutung gewinnen. Langfristig entwickelt sich die Instandhaltung damit zu einem strategischen Optimierungsinstrument innerhalb digitalisierter Wertschöpfungsketten.

KAPITEL 13

Machine Learning in der Industrie

Lernziele

Nach der Bearbeitung dieses Kapitels werden Sie wissen, ...

- ... was Machine Learning von klassischer Programmierung unterscheidet.
- ... wie läuft der Lernprozess abläuft.
- ... welche Lernarten es gibt.
- ... welche Modelltypen zum Einsatz kommen.
- ... wo es konkret in der Industrie eingesetzt und wo die Grenzen liegen.

Einführung

Dieses Kapitel gibt eine systematische Einführung in die Grundlagen des Machine Learning im Kontext industrieller Anwendungen. Es erläutert zunächst, was unter Machine Learning zu verstehen ist und wie lernbasierte Verfahren aus Daten Modelle ableiten. Darauf aufbauend werden zentrale Konzepte wie Lernarten, Modelle und der Lernprozess vorgestellt. Ziel ist es, ein grundlegendes Verständnis dafür zu vermitteln, wie Machine Learning genutzt werden kann, um Daten aus der Smart Factory zu analysieren und industrielle Prozesse zu unterstützen.

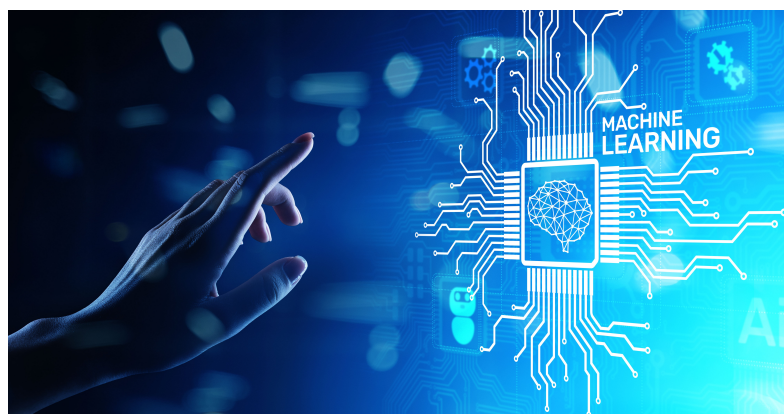


Bild 13.1: Machine Learning

13.1 Was ist Machine Learning?

Machine Learning bezeichnet einen Ansatz der Informatik, bei dem Computersysteme aus Daten lernen, anstatt ausschließlich durch fest programmierte Regeln gesteuert zu werden. Ziel ist es, aus vorhandenen Beispieldaten ein Modell zu erzeugen, das Zusammenhänge zwischen Eingabedaten und Ergebnissen beschreibt und auf neue, unbekannte Daten angewendet werden kann. Machine Learning wird dabei als datenbasierte Modellbildung verstanden, mit deren Hilfe sowohl vorhandene Daten analysiert als auch zukünftige Zustände vorhergesagt werden können.

Im Gegensatz zur klassischen Programmierung, bei der alle Entscheidungsregeln explizit vorgegeben werden, werden diese Regeln beim Machine Learning aus Daten abgeleitet. Das bedeutet, dass das Verhalten des Systems nicht direkt programmiert wird, sondern durch einen Lernprozess entsteht, in dem das Modell schrittweise an die beobachteten Daten angepasst wird. Dadurch eignet sich Machine Learning besonders für Anwendungen, in denen die zugrunde liegenden Zusammenhänge zu komplex oder zu variabel sind, um sie vollständig in Form fester Regeln zu beschreiben.

Ein einfaches Beispiel aus der industriellen Praxis ist die Erkennung fehlerhafter Produkte. Anstatt feste Grenzwerte für Messgrößen vorzugeben, wird einem Machine-Learning-System eine große Anzahl von Beispielen gezeigt, die als „fehlerhaft“ oder „in Ordnung“ gekennzeichnet sind. Aus diesen Beispielen lernt das System typische Muster und kann anschließend neue Produkte automatisch bewerten. Dieses Prinzip des Lernens aus Beispielen ist ein zentrales Merkmal von Machine-Learning-Verfahren.

Der grundlegende Ablauf eines Machine-Learning-Systems lässt sich in drei Schritte einteilen:

- Sammlung und Aufbereitung der Daten
- Lernen eines Modells aus diesen Daten
- Anwendung des gelernten Modells auf neue Daten

Durch diesen Ansatz können Machine-Learning-Systeme auch mit großen und komplexen Datenmengen umgehen, wie sie in modernen Industrie-4.0-Umgebungen entstehen. Sie sind in der Lage, Muster zu erkennen, Vorhersagen zu treffen und Entscheidungen zu unterstützen, ohne dass alle Regeln im Voraus festgelegt werden müssen.

13.2 Der Lernprozess

Der Kern von Machine Learning ist der Lernprozess, bei dem aus vorhandenen Daten ein Modell erzeugt wird, das auf neue Daten angewendet werden kann. Ziel ist es, Zusammenhänge zwischen Eingabedaten und Ergebnissen so zu erfassen, dass das Modell nicht nur bekannte Beispiele beschreibt, sondern auch auf bisher unbekannte Daten verallgemeinern kann. Dieser Prozess wird in der Fachliteratur als datenbasierte Modellbildung beschrieben, bei der statistische Modelle aus Beispieldaten gelernt werden.

Datensammlung und Aufbereitung

Der Lernprozess beginnt mit der Sammlung geeigneter Daten. In industriellen Anwendungen stammen diese Daten typischerweise aus Sensoren, Maschinensteuerungen, Qualitätsmessungen oder Bildverarbeitungssystemen. Damit die Daten sinnvoll genutzt werden können, müssen sie in ein geeignetes Format gebracht werden. Dazu gehören unter anderem das Entfernen fehlerhafter Messwerte, der Umgang mit fehlenden Daten sowie die Auswahl relevanter Merkmale. Die Qualität dieser Vorverarbeitung hat einen direkten Einfluss auf die Qualität des späteren Modells.

Modelllernen

Anschließend wird aus den aufbereiteten Daten ein Modell gelernt. Dabei wird ein mathematisches Modell so angepasst, dass es die beobachteten Daten möglichst gut beschreibt. Dieser Anpassungsprozess erfolgt durch die Minimierung eines Fehlers, der angibt, wie stark die Vorhersagen des Modells von den tatsächlichen Werten abweichen. Das Prinzip der Fehler- oder Verlustminimierung ist ein zentrales Element moderner Machine-Learning-Verfahren.

Test und Generalisierung

Nach dem Training wird das Modell mit neuen, bisher unbekannten Daten überprüft. Dieser Schritt ist notwendig, um zu beurteilen, ob das Modell nicht nur die Trainingsdaten auswendig gelernt hat, sondern auch in der Lage ist, neue Situationen korrekt zu bewerten. Ein Modell, das sehr gute Ergebnisse auf den Trainingsdaten, aber schlechte Ergebnisse auf neuen Daten liefert, gilt als überangepasst. Dieses Problem wird als Overfitting bezeichnet und ist eine der zentralen Herausforderungen im Machine Learning.

Zusammenfassung des Ablaufs

Der grundlegende Ablauf eines Machine-Learning-Systems lässt sich in drei Schritte zusammenfassen:

- Sammlung und Aufbereitung der Daten
- Lernen eines Modells aus diesen Daten
- Anwendung des gelernten Modells auf neue Daten

13.3 Lernarten

Die Art und Weise, wie die Parameter eines Lernalgorithmus bestimmt werden, dient als Kriterium für die Einteilung von Machine Learning in drei grundlegende Lernarten:

- Supervised Learning = Überwachtes Lernen
- Unsupervised Learning = Unüberwachtes Lernen
- Reinforcement Learning = Verstärkendes Lernen

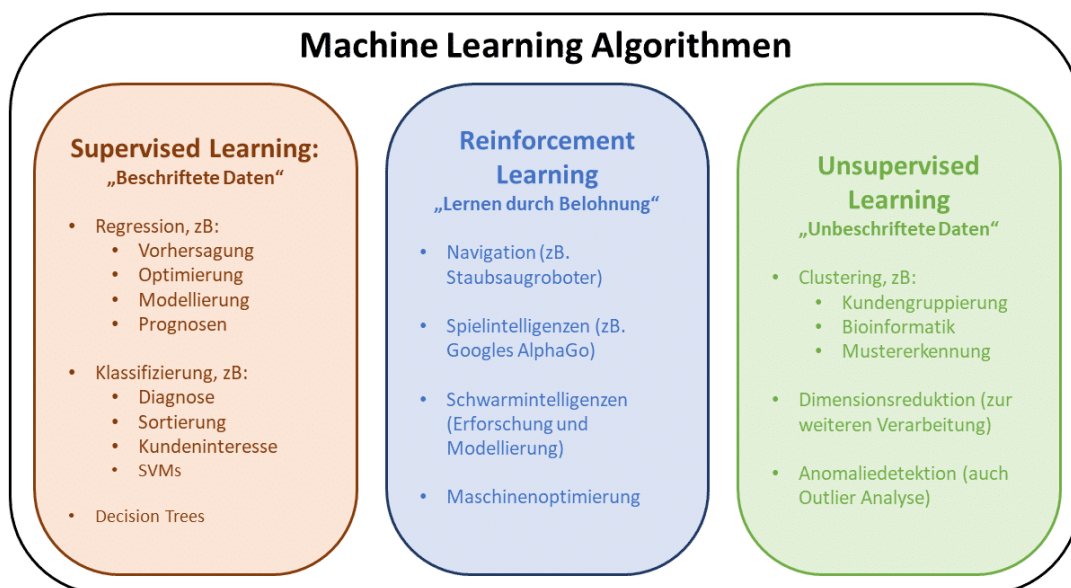


Bild 13.2: Lernarten

Supervised Learning

Beim Supervised Learning (überwachtes Lernen) steht ein Datensatz zur Verfügung, der als Trainingsdaten bezeichnet wird und sowohl Eingaben als auch die zugehörigen erwarteten Ausgaben enthält. Diese erwarteten Ausgaben werden auch als Labels bezeichnet. Ziel ist es, ein Machine-Learning-Modell so zu trainieren, dass es die richtigen Labels vorhersagen kann, wenn ihm später neue, ähnliche Eingabedaten vorgelegt werden. Lernverfahren, die auf solchen gelabelten Daten basieren, werden als überwachtes Lernen bezeichnet.

Ein anschauliches Beispiel für Supervised Learning ist die automatische Erkennung von Obstsorten anhand von Bilddaten. Angenommen, es liegt ein Datensatz mit zahlreichen Bildern von Äpfeln, Birnen und Orangen vor. Zu jedem Bild ist die richtige Bezeichnung der Obstsorte bekannt. Diese Bezeichnungen stellen die sogenannten Labels dar.

Das Machine-Learning-Modell wird mit diesen gelabelten Bildern trainiert. Dabei lernt es charakteristische Merkmale wie Form, Farbe oder Oberflächenstruktur zu erkennen. Nach Abschluss des Trainings kann das Modell ein neues, bisher unbekanntes Bild analysieren und vorhersagen, ob es sich beispielsweise um einen Apfel handelt.

Genau dieser Ablauf wird in 13.3 dargestellt: Ein bekanntes Bild („Das ist ein Apfel“) dient als Trainingsbeispiel. Das Modell lernt aus solchen Beispielen und kann anschließend ein neues, unbekanntes Bild korrekt klassifizieren.

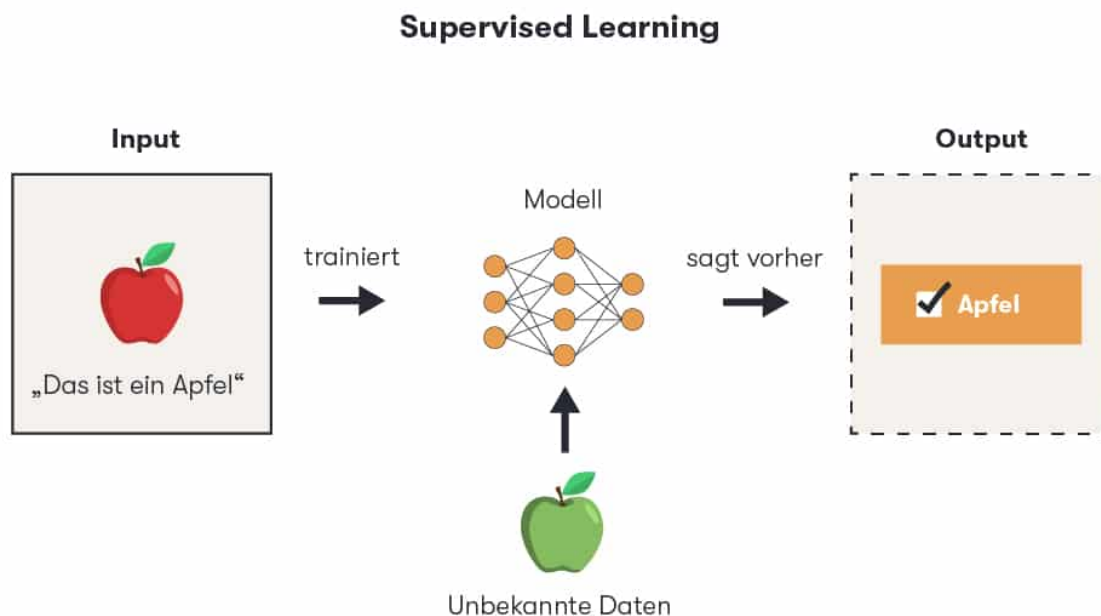


Bild 13.3: Beispiel Supervised Learning

Unsupervised Learning

Beim Unsupervised Learning stehen keine gelabelten Daten zur Verfügung. Das Modell erhält ausschließlich Eingabedaten und versucht, darin selbstständig Strukturen oder Muster zu erkennen. Ziel ist es, ähnliche Datenpunkte zu gruppieren oder verborgene Zusammenhänge aufzudecken.

Ein anschauliches Beispiel zeigt 13.4: Dem Modell werden Bilder von Katzen und Hunden ohne Bezeichnungen übergeben. Es kennt also keine Labels wie „Katze“ oder „Hund“ und erhält keine Information darüber, wie viele Klassen existieren oder welche Merkmale entscheidend sind. Das Modell analysiert stattdessen die Bilddaten und extrahiert typische Eigenschaften wie

Form der Ohren, Körperproportionen, Fellstruktur oder Gesichtskonturen. Auf Grundlage dieser Ähnlichkeiten ordnet es die Bilder automatisch in Gruppen ein.

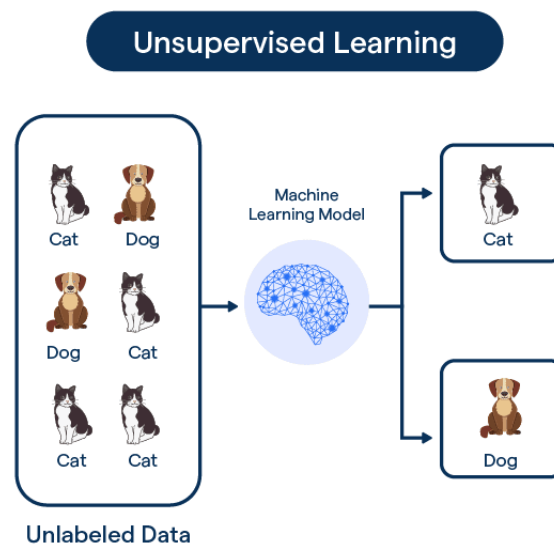


Bild 13.4: Beispiel: Unsupervised Learning

Wie in der Darstellung erkennbar, entstehen dabei zwei Cluster mit jeweils ähnlichen Merkmalen. Das Modell selbst weiß nicht, dass es sich um „Katzen“ und „Hunde“ handelt – es unterscheidet lediglich zwei Gruppen von Bildmustern. Erst durch eine nachträgliche Interpretation durch den Menschen erhalten die Cluster eine Bedeutung. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass beim unüberwachten Lernen die Struktur der Daten eigenständig erkannt wird, ohne dass vorab Zielwerte definiert werden.

Reinforcement Learning

Reinforcement Learning stellt eine besondere Form des maschinellen Lernens dar, die getrennt von überwachtem und unüberwachtem Lernen betrachtet werden muss. Diese Lernart basiert auf Rückmeldungen aus der Umgebung und kann daher nicht als vollständig unüberwacht eingestuft werden. Gleichzeitig stehen jedoch keine fest vorgegebenen, korrekt gelabelten Trainingsdaten zur Verfügung, weshalb Reinforcement Learning auch nicht im klassischen Sinne als überwachtes Lernen eingeordnet werden kann.

Bei Reinforcement-Learning-Verfahren interagiert das System kontinuierlich mit seiner Umgebung, um ein gewünschtes Verhalten zu entwickeln. Dabei erhält es fortlaufend Rückmeldungen in Form von Belohnungen oder Bestrafungen, anhand derer es sein Verhalten anpasst. Der Lernprozess kann jederzeit unterbrochen werden, um das bis dahin erlernte Verhalten zu beobachten.

Diese Form des Lernens weist große Ähnlichkeiten mit menschlichem Lernen auf. Bereits ein menschliches Baby befindet sich von Geburt an in einem ständigen Prozess des Reinforcement Learning, indem es mit seiner Umwelt interagiert und aus den erhaltenen Reaktionen lernt.

13.4 Modelle im Machine Learning

Ein zentrales Element jedes Machine-Learning-Systems ist das Modell. Ein Modell beschreibt die Beziehung zwischen Eingabedaten und den zugehörigen Ausgaben und stellt damit das Ergebnis

des Lernprozesses dar. Es kann als mathematische oder algorithmische Repräsentation verstanden werden, die aus Trainingsdaten abgeleitet wird und anschließend zur Analyse oder Vorhersage neuer Daten genutzt wird.

Je nach Problemstellung und Datenstruktur kommen unterschiedliche Modelltypen zum Einsatz. Die Wahl eines geeigneten Modells hat einen großen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit eines Machine-Learning-Systems. Ein zu einfaches Modell kann wichtige Zusammenhänge nicht erfassen, während ein zu komplexes Modell dazu neigt, sich zu stark an die Trainingsdaten anzupassen.

Lineare Modelle

Ein grundlegender Modelltyp sind lineare Modelle. Diese beschreiben den Zusammenhang zwischen Eingaben und Ausgaben durch eine lineare Funktion. Lineare Modelle sind vergleichsweise einfach, gut interpretierbar und werden häufig als Baseline eingesetzt, etwa für Regressionsaufgaben oder einfache Klassifikationsprobleme. Trotz ihrer Einfachheit sind sie in vielen industriellen Anwendungen überraschend leistungsfähig.

Entscheidungsbäume

Ein weiterer wichtiger Modelltyp sind Entscheidungsbäume. Sie modellieren Entscheidungsprozesse in Form einer Baumstruktur, bei der anhand von Bedingungen schrittweise eine Entscheidung getroffen wird. Entscheidungsbäume sind besonders gut nachvollziehbar und eignen sich daher für Anwendungen, bei denen Erklärbarkeit eine wichtige Rolle spielt, beispielsweise in der Qualitätskontrolle oder Fehlerdiagnose.

Neuronale Netze

Neuronale Netze stellen eine Klasse leistungsfähiger, aber auch komplexerer Modelle dar. Sie bestehen aus mehreren Schichten künstlicher Neuronen, die nichtlineare Zusammenhänge zwischen Eingaben und Ausgaben lernen können. Neuronale Netze werden vor allem dann eingesetzt, wenn große Datenmengen und komplexe Muster vorliegen, etwa bei der Bildverarbeitung oder der Analyse hochdimensionaler Sensordaten.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich Machine-Learning-Modelle hinsichtlich ihrer Komplexität, Interpretierbarkeit und Anwendungsbereiche deutlich unterscheiden. Die Auswahl eines geeigneten Modells hängt von der jeweiligen Aufgabenstellung, der verfügbaren Datenmenge und den Anforderungen an Genauigkeit und Nachvollziehbarkeit ab.

13.5 Daten als Grundlage

Daten bilden die zentrale Grundlage jedes Machine-Learning-Systems. Ohne geeignete Daten ist es nicht möglich, ein Modell zu trainieren oder zuverlässige Vorhersagen zu treffen. Sowohl die Menge als auch die Qualität der verfügbaren Daten beeinflussen maßgeblich die Leistungsfähigkeit eines Modells. In der Fachliteratur wird Machine Learning daher als datengetriebener Ansatz beschrieben, bei dem Wissen aus Beispieldaten gewonnen wird.

In industriellen Anwendungen stammen Daten aus unterschiedlichen Quellen. Häufig werden Sensordaten aus Maschinen, Bilddaten aus Kamerasystemen sowie Prozess- und Logdaten aus Steuerungen und IT-Systemen genutzt. Diese Daten unterscheiden sich hinsichtlich Struktur, zeitlicher Auflösung und Informationsgehalt. Durch die Nutzung verschiedener Datenarten können industrielle Prozesse umfassender analysiert werden.

Die Qualität der Daten ist entscheidend für den Erfolg von Machine-Learning-Verfahren. Fehlerhafte Messwerte, fehlende Daten oder starkes Rauschen können dazu führen, dass ein Modell

falsche Zusammenhänge lernt. Daher ist eine sorgfältige Prüfung und Vorverarbeitung der Daten notwendig, bevor sie für das Training eingesetzt werden. In der Literatur wird hervorgehoben, dass unzureichende Datenqualität auch durch komplexe Modelle nicht ausgeglichen werden kann.

Damit Daten für den Lernprozess genutzt werden können, müssen sie in geeigneter Form vorliegen. Die Eingabedaten werden als Features bezeichnet, während die zugehörigen Zielwerte im überwachten Lernen als Labels bekannt sind. Die Auswahl geeigneter Features hat einen großen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit eines Modells und kann die Genauigkeit deutlich verbessern.

Zur objektiven Bewertung eines Modells werden Datensätze häufig in Trainings-, Validierungs- und Testdaten aufgeteilt. Die Trainingsdaten dienen zum Lernen der Modellparameter, die Validierungsdaten zur Anpassung von Modelleinstellungen und die Testdaten zur abschließenden Bewertung der Modellleistung. Diese Trennung ist notwendig, um die Generalisierungsfähigkeit eines Modells realistisch einschätzen zu können.

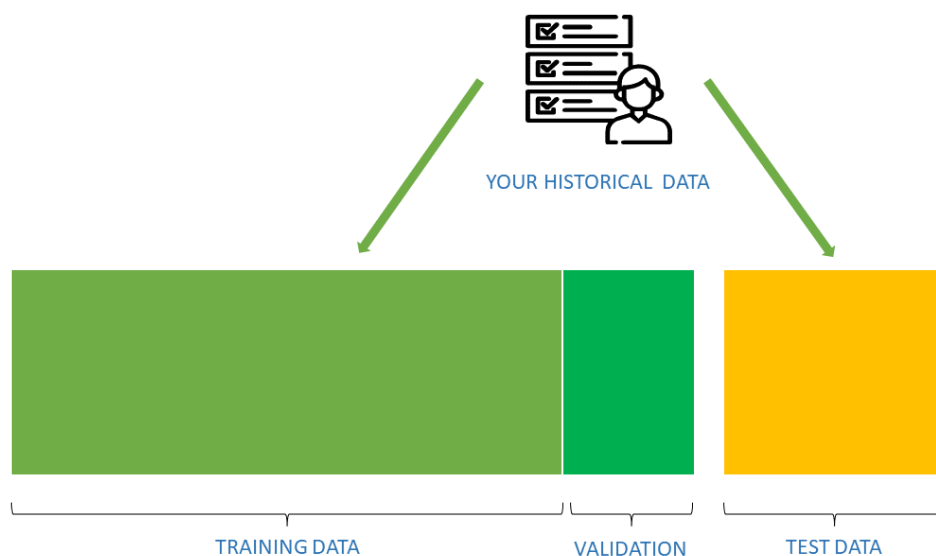


Bild 13.5: Historische Daten

13.6 Multimodale Daten und Information Fusion

In industriellen Anwendungen stammen relevante Informationen häufig aus mehreren Datenquellen. Einzelne Sensorwerte liefern oft nur einen Teil des Gesamtbildes und können zudem durch Störungen oder Messfehler beeinflusst sein. Daher werden verschiedene Datenquellen gemeinsam ausgewertet, um ein vollständigeres und stabileres Bild des Systemzustands zu erhalten.

In einer Smart Factory entstehen unterschiedliche Datenarten, beispielsweise Sensordaten wie Temperatur oder Vibration, Bilddaten aus Kamerasystemen sowie Prozess- und Logdaten aus Steuerungen. Diese Daten ergänzen sich, da sie verschiedene Aspekte eines Prozesses abbilden.

Information Fusion beschreibt die Kombination solcher Datenquellen, um genauere und robustere Ergebnisse zu erzielen. Die Daten können dabei entweder vor dem Training eines Modells zusammengeführt oder getrennt verarbeitet und anschließend kombiniert werden.

Der Einsatz multimodaler Daten verbessert insbesondere die Robustheit von Machine-Learning-Modellen. Durch die Kombination verschiedener Messgrößen lassen sich Qualitätsprobleme, Prozessabweichungen oder ungewöhnliche Maschinenzustände zuverlässiger erkennen.

13.7 Anwendungen in der Industrie

Visuelle Inspektion und automatisierte Qualitätsprüfung



Bild 13.6: Visuelle Inspektion in der Qualitätskontrolle

Die visuelle Inspektion ist eine der am weitesten verbreiteten Anwendungen von Machine Learning in der industriellen Praxis. Moderne Produktionsanlagen sind häufig mit Kamerasystemen ausgestattet, die kontinuierlich Bilder von Bauteilen oder Oberflächen erfassen. Diese Bilddaten werden mithilfe lernbasierter Modelle ausgewertet, um Fehler wie Kratzer, Risse, Formabweichungen oder Montagefehler automatisch zu erkennen. Im Gegensatz zu klassischen, regelbasierten Bildverarbeitungsverfahren können Machine-Learning-Modelle komplexe Muster und nicht eindeutig definierbare Fehlerbilder erfassen. Dadurch steigt sowohl die Erkennungsrate als auch die Flexibilität bei wechselnden Produktvarianten.

Ein weiterer Vorteil besteht in der gleichbleibenden Prüfqualität. Während manuelle Kontrollen von Erfahrung, Aufmerksamkeit oder Ermüdung beeinflusst werden können, liefern ML-basierte Systeme reproduzierbare Ergebnisse. Besonders in der Serienfertigung oder bei hohen Stückzahlen ermöglicht dies eine kontinuierliche Inline-Prüfung ohne Produktionsunterbrechung. Gleichzeitig können erkannte Fehler statistisch ausgewertet werden, um Rückschlüsse auf Prozessursachen zu ziehen und Qualitätsverbesserungen einzuleiten.

Prozessüberwachung und Anomalieerkennung

Neben der Qualitätsprüfung wird Machine Learning eingesetzt, um Maschinen und Prozesse in Echtzeit zu überwachen. Dabei analysieren Modelle kontinuierlich Sensordaten wie Temperatur, Druck, Vibration, Drehzahl oder Stromaufnahme. Ziel ist es, typische Muster des Normalbetriebs zu erlernen und Abweichungen frühzeitig zu erkennen. Solche Abweichungen können auf beginnenden Verschleiß, fehlerhafte Einstellungen oder externe Störungen hinweisen.

Ein besonderer Vorteil lernbasierter Verfahren besteht darin, dass sie auch komplexe Zusammenhänge zwischen mehreren Messgrößen berücksichtigen können. Während klassische Grenzwertüberwachung einzelne Parameter isoliert betrachtet, analysiert Machine Learning mehrere Signale gleichzeitig. Dadurch können subtile Veränderungen erkannt werden, bevor es zu sichtbaren Problemen oder Stillständen kommt. Diese Form der datenbasierten Prozessüberwachung trägt zur Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit und zur Reduzierung ungeplanter Ausfälle bei.

Prozessoptimierung und Entscheidungsunterstützung

Ein weiterer zentraler Einsatzbereich von Machine Learning liegt in der Optimierung industrieller Prozesse und der Unterstützung betrieblicher Entscheidungen. Modelle analysieren historische Produktions- und Prozessdaten und erkennen Zusammenhänge zwischen Eingangsparametern und Ergebnisgrößen wie Qualität, Energieverbrauch oder Durchlaufzeit. Auf dieser Grundlage können Vorhersagen für neue Einstellungen getroffen oder optimale Parameterkombinationen vorgeschlagen werden.

Darüber hinaus wird Machine Learning auch auf übergeordneter Ebene eingesetzt, beispielsweise in der Produktionsplanung, Auftragspriorisierung oder Bedarfsprognose. Hierbei werden große Mengen betrieblicher Daten ausgewertet, um fundierte und datenbasierte Entscheidungen zu ermöglichen. Besonders in komplexen Produktionssystemen kann dies zu stabileren Abläufen und effizienterer Ressourcennutzung führen. Gleichzeitig ist es wichtig, die Ergebnisse solcher Modelle nachvollziehbar zu gestalten, damit Entscheidungsträger ihre Empfehlungen fachlich bewerten können.

13.8 Grenzen und Herausforderungen

Datenabhängigkeit und Modellgüte

Machine-Learning-Modelle sind stark von der Qualität und Menge der verfügbaren Trainingsdaten abhängig. Unvollständige, fehlerhafte oder systematisch verzerrte Daten wirken sich unmittelbar auf die Vorhersageleistung aus. In industriellen Anwendungen entstehen zusätzliche Herausforderungen durch unterschiedliche Datenquellen, Messrauschen, Sensorausfälle oder inkonsistente Datenerfassung. Darüber hinaus stehen für seltene Fehlerfälle häufig nur wenige gelabelte Beispiele zur Verfügung, was das Training überwachter Verfahren erschwert. Neben der Datenqualität spielt auch die Modellkomplexität eine Rolle: Wird ein Modell zu stark an Trainingsdaten angepasst, verliert es seine Fähigkeit, auf neue Situationen zu verallgemeinern. Eine strukturierte Datenaufbereitung, geeignete Validierungsverfahren und eine bewusste Modellwahl sind daher zentrale Voraussetzungen für zuverlässige Ergebnisse.

Interpretierbarkeit und Vertrauen in ML-Systeme

Neben der Genauigkeit ist in industriellen Anwendungen die Nachvollziehbarkeit von Entscheidungen von großer Bedeutung. Insbesondere bei qualitätskritischen oder sicherheitsrelevanten Prozessen müssen Vorhersagen erklärbar und überprüfbar sein. Viele leistungsfähige Modelle, vor allem tiefe neuronale Netze, gelten jedoch als schwer interpretierbar, da ihre Entscheidungsprozesse nicht unmittelbar nachvollzogen werden können. Dies kann die Akzeptanz bei Anwendern verringern und die Integration in regulierte Umgebungen erschweren. Daher werden zunehmend Ansätze verfolgt, die Transparenz erhöhen, etwa durch erklärbare Modelle oder zusätzliche Analyseverfahren zur Interpretation von Modellentscheidungen. Ziel ist es, das Vertrauen in datenbasierte Systeme zu stärken und ihre Ergebnisse fachlich bewerten zu können.

Integration, Robustheit und langfristiger Betrieb

Die Einführung von Machine Learning in industrielle Umgebungen ist nicht nur eine technische, sondern auch eine organisatorische Herausforderung. Modelle müssen in bestehende IT- und Produktionssysteme integriert werden und mit Echtzeitdaten zuverlässig arbeiten. Gleichzeitig unterliegen industrielle Prozesse ständigen Veränderungen, etwa durch neue Produkte, veränderte Parameter oder Verschleißerscheinungen. Solche Veränderungen können dazu führen, dass sich die Datenverteilung im Laufe der Zeit verschiebt und die Modellleistung abnimmt. Daher ist ein kontinuierliches Monitoring notwendig, um Leistungsabfälle frühzeitig zu erkennen. Zudem sollten Prozesse für Nachtraining, Versionsverwaltung und Wartung definiert sein. Nur wenn der

gesamte Modelllebenszyklus berücksichtigt wird, kann ein nachhaltiger und stabiler Einsatz von Machine Learning gewährleistet werden.

13.9 Zusammenfassung

Machine Learning ist eine zentrale Technologie im Kontext von Industrie 4.0, da es die datengetriebene Analyse komplexer Zusammenhänge ermöglicht. Im Gegensatz zu klassischen Automatisierungssystemen, die auf festen Regeln basieren, können lernbasierte Verfahren Muster erkennen, Vorhersagen treffen und Entscheidungsprozesse unterstützen.

In diesem Kapitel wurden die grundlegenden Konzepte des Machine Learning vorgestellt, darunter der Lernprozess, verschiedene Lernarten sowie typische Modelltypen wie lineare Modelle, Entscheidungsbäume und neuronale Netze. Zudem wurde die Bedeutung qualitativ hochwertiger Daten und multimodaler Datenquellen für industrielle Anwendungen hervorgehoben.

Anhand praktischer Beispiele wurde gezeigt, dass Machine Learning unter anderem in der visuellen Qualitätsprüfung, der Prozessüberwachung und der Prozessoptimierung eingesetzt wird. Gleichzeitig bestehen Herausforderungen, etwa hinsichtlich Datenqualität, Interpretierbarkeit von Modellen und der Integration in bestehende Systeme.

Insgesamt trägt Machine Learning dazu bei, industrielle Prozesse effizienter, transparenter und datenbasierter zu gestalten und ist damit ein wichtiger Bestandteil moderner Produktionssysteme.

KAPITEL 14

Halbleiter-Industrie

Lernziele

Nach der Bearbeitung dieses Kapitels werden Sie wissen, ...

- ... warum Halbleiter für die Industrie 4.0 unverzichtbar sind.
- ... wie Silizium physikalisch als Halbleitermaterial funktioniert.
- ... wie die Halbleiterfertigung abläuft.
- ... wo Halbleiter in der Smart Factory eingesetzt werden.
- ... wie die globale Lieferkette mit ihren Risiken aufgebaut ist.

Einführung

Halbleiter zählen heute zu den zentralen Technologiebausteinen der Industrie 4.0. Ohne sie wäre weder die Vernetzung moderner Produktionsanlagen noch der Einsatz künstlicher Intelligenz in industriellen Prozessen denkbar. Als Bindeglied zwischen physischer und digitaler Welt ermöglichen Halbleiterbauelemente die Erfassung, Verarbeitung und Übertragung von Daten in Echtzeit – sei es in Sensoren, Prozessoren oder komplexen Steuerungssystemen.

Das vorliegende Kapitel beleuchtet die Rolle von Halbleitern entlang ihres gesamten technologischen und wirtschaftlichen Kontexts. Zunächst werden die physikalischen Grundlagen erläutert: Wie funktioniert ein Halbleiter auf Materialebene, und welche Eigenschaften machen Silizium zum bevorzugten Werkstoff der Branche? Darauf aufbauend wird der Fertigungsprozess dargestellt, von der Lithografie über Ätzverfahren bis zur Dotierung, durch die aus reinem Silizium funktionsfähige Bauteile entstehen.



14.1 Relevanz von Halbleitern in der Industrie 4.0

In der technischen Welt ist der Einsatz von Halbleitern zu einem unabdingbaren Bestandteil vieler Komponenten geworden. Halbleiter sind das Bindeglied zwischen physischen Prozessen und digitaler Steuerung, also der Kern in allen "Cyber-physischen Systemen". Sie bilden die Hardwarebasis für moderne Systeme wie Grafikprozessoren oder neuromorphe Prozessoren bis hin zu Systemen künstlicher Intelligenz. Die Geräte- und Sensorebene der Industrie 4.0 basiert auf komplexen Halbleitersystemen. Diese integrieren Sensorik, Speicher, Kommunikation und Logikfunktionen, um Daten in Echtzeit zu erfassen und zu verarbeiten. Die einzelnen Komponenten der Industrie 4.0 benötigen enorme Rechenkapazitäten und künstliche Intelligenz zur Analyse großer Datenströme. Halbleiter sind besonders wichtig hierfür, da sie die Grundlage für Mikroprozessoren darstellen, welche die Rechenleistung für große Datenmengen bereitstellen. Die hohe Relevanz der Halbleiter für die Industrie 4.0 lässt sich aus der steigenden Nachfrage nach Sensoren herleiten.

Der Markt für Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) verzeichnet seit dem Jahr 2010 ein kontinuierliches Wachstum, das eng mit der zunehmenden Bedeutung der Sensor- und Aktorikfertigung verknüpft ist. MEMS sind mikro- und nanostrukturierte Halbleiterbauelemente, die mit klassischen Halbleiterprozessen, wie zum Beispiel Lithografie, Ätzen oder Dotieren gefertigt werden. MEMS werden auf Siliziumwafern gefertigt, wobei identische oder sehr ähnliche Prozessketten wie in der Integrated Circuit (IC) Fertigung eingesetzt werden. Es lässt sich ableiten, dass die zunehmende Nachfrage nach MEMS mit einer steigenden Nachfrage nach Halbleiterfertigungskapazitäten und -technologien korreliert. MEMS umfassen verschiedene Sensoren, wie beispielsweise Oszillatoren, Mikrofone, Drucksensoren, optische MEMS und Strahlungssensoren. All diese Sensoren finden zentrale Anwendung in der Industrie 4.0 und sind zuständig für Aufgaben wie die Echtzeit-Zustandsüberwachung (Beschleunigungs-, Druck-, Drehratensensoren), die Vernetzung von Maschinen (RF-MEMS), Predictive Maintenance (Mikrofone, optische MEMS) oder autonome Regelkreise (optische MEMS).

Aus diesen Entwicklungen lässt sich folgern, dass Halbleiterbauelemente für die Industrie 4.0 unabdingbar sind. Im Zuge der zunehmenden Vernetzung von Produktionssystemen sowie der wachsenden Nutzung von Anwendungen der Künstlichen Intelligenz und cloudbasierter Dienste steigt die weltweite Nachfrage nach Halbleiterbauelementen (vgl. Abb. 14.1), da diese die technologische Grundlage für Rechenleistung, Sensorik und Kommunikation bilden.

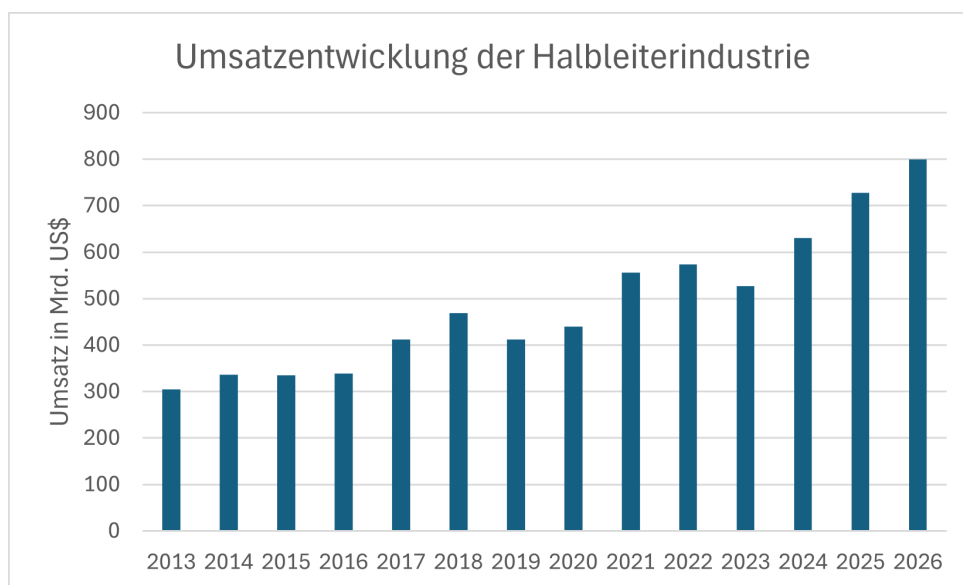


Bild 14.1: Umsatzentwicklung der Halbleiterindustrie

Das folgende Kapitel soll vermitteln, warum Halbleiter benötigt werden, wie sie gefertigt werden, was potenzielle Anwendungen sind und wie sich die aktuelle Versorgungslage verhält.

14.2 Grundlagen der Halbleitertechnik

Halbleiter nehmen eine Zwischenstellung zwischen Leitern und Isolatoren ein, wobei ihre elektrische Leitfähigkeit gezielt einstellbar ist. Diese Fähigkeit ermöglicht eine kontrollierte Signalverarbeitung, Schaltfunktionen und die Speicherung und Weiterleitung von Informationen. In Anbetracht dessen, stellen Halbleiter die Grundlage aller integrierten elektrischen Systeme dar und fungieren innerhalb der Industrie 4.0 als technisches Bindeglied zwischen physischer Welt und digitaler Steuerung. Damit diese Eigenschaften von Halbleitern genutzt werden können, ist bei der Fertigung das verwendete Material von höchster Priorität: Silizium.

Bei Silizium handelt es sich um das zweit-häufigste Element der Erde und um ein ideales Halbleitermaterial. Silizium wird aus Quarzsand gewonnen und lässt sich je nach Reinheitsgrad in unterschiedliche Klassen gliedern: Roh-/Ferrosilizium besitzt einen Siliziumanteil von 50-75% und einen Reinheitsgrad von 98-99%. Diese Art von Silizium wird in der Stahl- und Gusseisenproduktion verwendet, wobei Produkte mit höherem Siliziumanteil als Polysilizium, monokristallines Silizium oder amorphes Silizium bezeichnet werden.

Halbleitersilizium für moderne Solarzellen besitzen einen Reinheitsgrad von über 99.999999999% (9N-11N, kristallines Polysilizium). Als Ausgangsmaterial für Computerchips, Prozessoren und Halbleiter in fast allen elektronischen Geräten wird monokristallines Silizium verwendet (Es besteht aus einem einzigen, durchgehenden Siliziumkristall ohne Unterbrechungen. Es erfordert die absolute Spitzenreinheit von 11N oder höher. Schon ein einziges falsches Atom auf eine Milliarde Siliziumatome kann einen Mikroprozessor unbrauchbar machen.

Amorphes Silizium hat eine ungeordnete Atomstruktur und wird bei günstigen Solarmodulen wie z.B. bei Taschenrechnern verwendet.

Silizium ist ein Element, das auf der äußersten Schale vier Valenzelektronen besitzt (vgl. Abb. 14.2). Diese ermöglichen eine Bindung mit benachbarten Atomen. Im festen Zustand bilden die Siliziumatome ein Kristallgitter, wobei jedes Atom kovalente Bindungen mit vier Nachbaratomen eingeht.

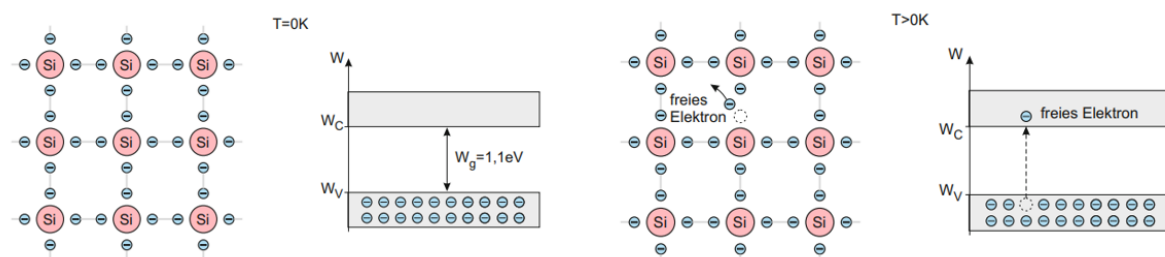


Bild 14.2: Verhalten von Kristallgittern bei Temperaturanstieg

Bei Temperaturen um den absoluten Nullpunkt sind die Elektronen fest gebunden und es findet kein Ladungsaustausch statt. Bei steigender Temperatur können Elektronen Energie aufnehmen. Bei Überschreitung der Bandlücke werden sie beweglich. Die Bandlücke beschreibt den energetischen Abstand zwischen Valenzband und Leitungsband (vgl. Abb. 14.3) eines Festkörpers. Die Bandlücke von 1,1eV trägt dazu bei, dass Silizium bei üblichen Betriebstemperaturen nicht außergewöhnlich leitend wird. Andererseits liegt die Bandlücke von Silizium ideal, um Feldeffekttransistoren mit niedrigen Schwellenspannungen zu konstruieren. Aufgrund der Dichte der

Bauteile auf Prozessoren, ist es notwendig, dass die verbauten Materialien über eine gute Wärmeableitung verfügen. Der Verbau von Silizium führt dazu, dass Verlustleistungen schnell abgeführt werden können und Überhitzungen verhindert werden können.

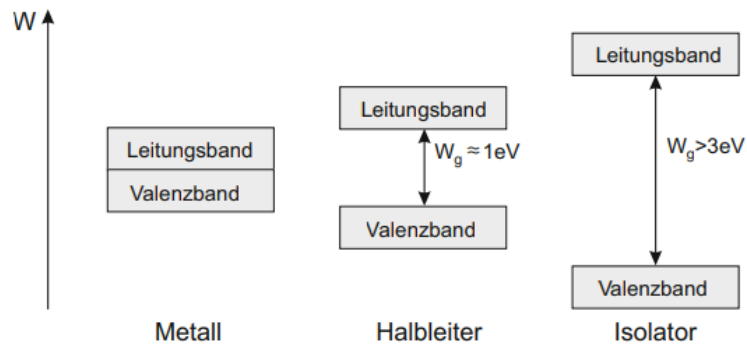


Bild 14.3: Vergleich der Bänderabstände (W_G) mit Elektronenvolt (eV) Angaben

Silizium lässt sich als hochreiner Einkristall herstellen. Dabei sind die Atome in jede Richtung absolut regelmäßig und ohne Unterbrechungen verteilt und ausgerichtet. Dieser Punkt ist für die Herstellung von Mikroprozessoren unabdingbar, da Unregelmäßigkeiten im Kristallgitter dazu führen können, dass sich unerwünschte Strompfade ergeben, was wiederum zu Kurzschlüssen im Bauteil führt.

Halbleiter aus Silizium sind nicht von Natur aus als Stromleiter zu betrachten. Die Leitungsfähigkeit entsteht erst durch die gezielte Einbringung von Fremdatomen in das Kristallgitter, dem Dotieren. Das Dotieren wird in zwei verschiedene Varianten unterteilt: n-Dotierung (Hinzufügen von Elektronen) und die p-Dotierung (Hinzufügen von Löchern).

Das Dotieren eines Halbleiters macht es möglich, die elektrischen Fähigkeiten zu steuern. Stoßen die beiden dotierten Bereiche aneinander, so entsteht der pn-Übergang, an dessen Kontaktstelle Elektronen (n-dotierte Seite) in die Löcher (p-dotierte Seite) diffundieren. Spannung kann nun in zwei verschiedenen Richtungen angelegt werden, der Durchlassrichtung und der Sperrrichtung.

Wird Spannung in Sperrrichtung angelegt, wobei + an der n-dotierten Seite und - an der p-dotierten Seite anliegt, so vergrößert sich die Raumladungszone. In der Folge erhöht sich der Widerstand derart stark, dass lediglich ein geringer Strom fließt, der sogenannte Sperrstrom. Im gegenteiligen Fall, dem Anlegen der Spannung in Durchlassrichtung, verkleinert sich die Raumladungszone und es fließt ein Strom.

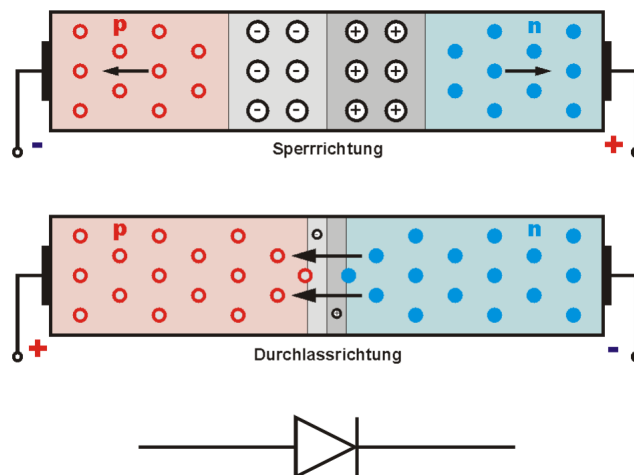


Bild 14.4: PN-Übergang

Dieser Effekt wird in verschiedensten Bauteilen angewendet, wie zum Beispiel Dioden, Leistungselektronischen Schaltern, MOSFETs oder IGBTs. Als (IC) bezeichnet man eine Gruppe an diskreten Bauteile, welche wiederum Bestandteil des komplexen Gefüges eines Mikroprozessors sind.

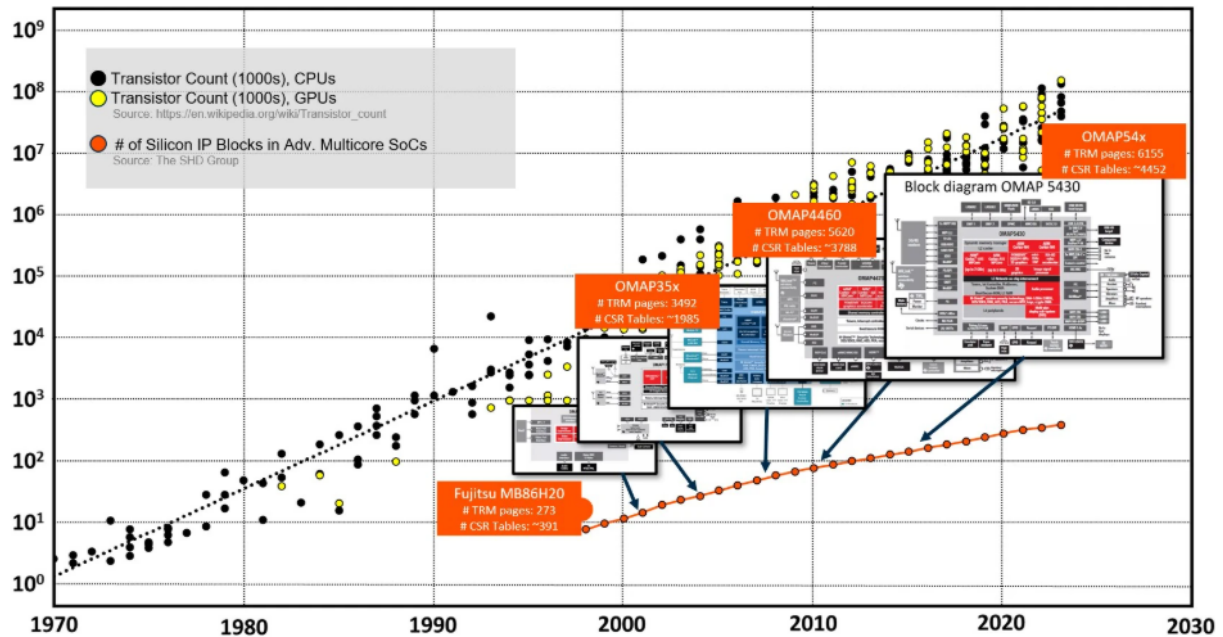


Bild 14.5: Entwicklung der Transistoren auf ICs

Durch die Integration einer Vielzahl halbleiterbasierter Bauelemente entstehen IC, die komplexe Funktionen auf kleinstem Raum vereinen (vgl. Abb. 14.5). Diese Entwicklung mündet in hochintegrierte System-on-Chip-Lösungen, bei denen kurze Signallaufzeiten und geringe Energieverluste eine zentrale Voraussetzung für echtzeitfähige industrielle Anwendungen darstellen.

14.3 Lithografie als Schlüsselprozess der Halbleiterfertigung

Die Lithografie stellt die Grundlage für die präzise Strukturierung funktionaler Halbleiterbauelemente auf globaler Ebene dar. Es gibt verschiedene Lithografieverfahren, Foto-, EUV-, Röntgen-, Elektronenstrahl- und Ionenstrahlolithografie und die Elektronenstrahlschattentwurfsmethode, die unterschiedliche Vor- und Nachteile je nach Anwendungsfall haben. Der Begriff „Lithografie“ bezeichnet eine Abfolge von Prozessen, die zwingend zu durchlaufen sind, um eine funktionierende Basis für ICs zu generieren. Der Einfachheit halber wird in diesem Kapitel lediglich das Verfahren der Fotolithografie durch Projektionsbelichtung behandelt.

Die erste Phase der Prozesskette besteht darin, die Oberfläche des Wafers vorzubereiten (vgl. Abb. 14.6), indem Feuchtigkeit von der Scheibe entfernt wird (1) und eine funktionale Dünnschicht (SiO_2) aufgebracht wird (2). Diese Schicht wird später auf dem Wafer strukturiert. Im Anschluss daran wird die Scheibe mit dem Fotolack bedeckt (3), der stark lichtempfindlich ist und als Strukturierung für nachfolgende Prozessschritte benötigt wird. Er stellt eine Art Maske dar, durch die ein Muster eines Entwurfs auf die Oberfläche des Wafers übertragen wird.

Durch das Auftragen der Fotomaske auf den Wafer gelangt eine geringe Menge an Lösungsmittel auf die Oberfläche. Um das Lösungsmittel aus dem aufgetragenen Fotolack herauszulösen, ist eine Hitzezufuhr erforderlich - das sogenannte Pre Bake. Durch das Belichten mit UV Licht (4) werden fotochemische Prozesse ausgelöst, die dazu führen, dass sich die Löslichkeit des Lackes in den belichteten Bereichen erhöht (Positivlack) oder verringert (Negativlack). Dies dient dazu, damit

im nachfolgenden Entwicklungsschritt die gewünschte Lackstruktur entsteht, die anschließend durch Ätzprozesse in die darunterliegende Schicht übertragen wird..

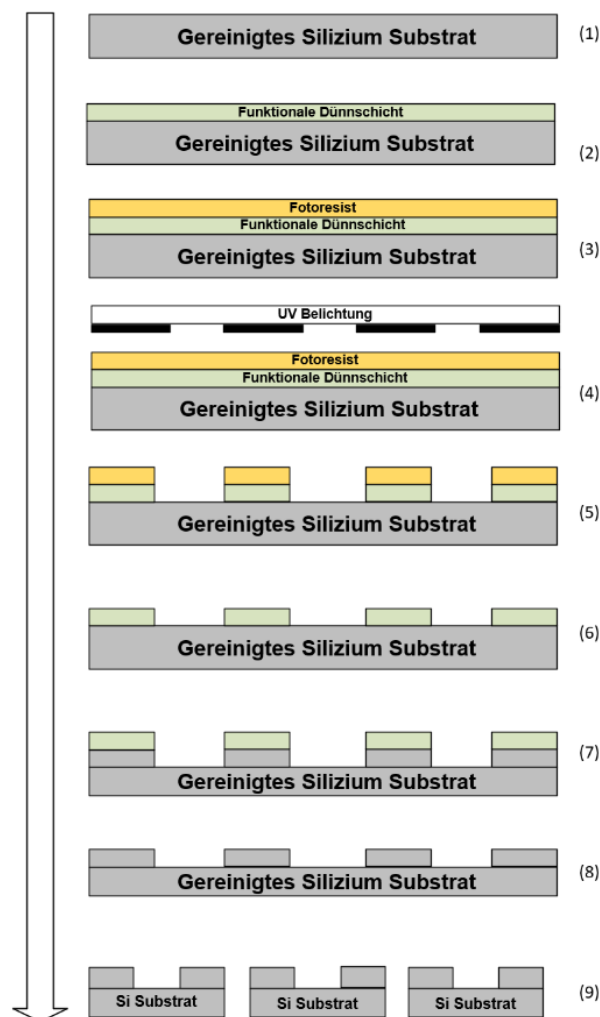


Bild 14.6: Prozessschritte der Fotolithografie

Anschließend wird der restliche Fotoresist entfernt (6) und in die darunterliegende Funktionsschicht bzw. das Siliziumsubstrat übertragen (7). Zuletzt wird die Dünnschicht entfernt (8) und die Mikrostrukturen gesondert (9). Die Schritte (2)-(8), also das Auftragen neuer Strukturen, kann in mehreren Zyklen geschehen, je nachdem wie hoch der Bedarf nach Mikrostrukturierungen auf dem Substrat ist.

Die Lithografie ist das zentrale Strukturierungsverfahren der Halbleiterfertigung, indem sie geometrische Informationen in temporäre Masken überführt und eine gezielte Umsetzung nachfolgender Prozessschritte ermöglicht.

14.4 Strukturierung und Dotierung von Halbleitern

Aufbauend auf der lithografischen Strukturdefinition werden bei ICs durch verschiedenste Ätzprozesse Strukturen für Bauteile in wenigen Mikrometern/Nanometern erzeugt.

Die angewandten Ätzprozesse lassen sich in nasschemische Ätzverfahren und Trockenätzverfahren unterteilen. Mittels dieser Ätzverfahren werden die zuvor durch Fotolithografie definierten Strukturen und Materialsichten so modifiziert, dass eine entsprechende Einstellung der elektrischen Eigenschaften des betroffenen Siliziums durch anschließende Dotierungsverfahren ermöglicht

wird. Auf die Strukturdefinition erfolgt eine selektive Materialabtragung, damit die Strukturen der Masken in darunterliegende Funktionsschichten übertragen werden. Die Abtragung der Materialschichten erfolgt mittels der beiden Ätzverfahren.

Während das nasschemische Ätzen das Material in allen Richtungen gleichzeitig abträgt, wird im Rahmen der isotropen Strukturierung eine gleichmäßige Materialabtragung in alle Richtungen erzielt..

Das Trockenätzverfahren zielt genau auf die gegenteilige Wirkung ab und versucht, insbesondere durch plasmagestützte Verfahren, dreidimensionale Formgebungen im Material zu verwirklichen.

Nun sind die verschiedenen Schichten auf dem Halbleiter nicht nur durch lithografische Strukturbildung aufgezeigt, sondern auch bereits physisch im Substrat implementiert. Um sicherzustellen, dass der Aufbau der verwendeten Materialien auf der Oberfläche des Siliziumsubstrats den Vorgaben entspricht, müssen mithilfe von Dünnschichtprozessen isolierende, leitfähige oder halbleitende Schichten aufgebracht werden.

Diese Schichten übernehmen verschiedene Aufgaben und stellen beispielsweise das Gate-Dielektrium beziehungsweise die Gate-Elektrode oder die Isolationsschicht eines Transistors dar. Durch das Zusammenspiel von Schichtabscheidung und Strukturierung können komplexe Bauteilstrukturen hergestellt werden

Nach Abschluss der Vorbereitung der Materialschichten des Substrates ist eine gezielte Steuerung der elektrischen Eigenschaften des Siliziums erforderlich. Zur Erreichung dieses Ziels werden Verfahren wie die Ionenimplantation eingesetzt. Dabei werden Dotieratome in das Kristallgitter eingebracht, um die elektrischen Eigenschaften des Siliziums nutzbar zu machen.

Diese Dotieratome sind im Kristallgitter elektrisch inaktiv, was zu Veränderungen in der Ladungsträgerkonzentration, der Ladungsträgerbeweglichkeit und dem spezifischen elektrischen Widerstand führt. Diese Wirkungen werden als Kristallgittereffekte bezeichnet. Die Dotieratome werden durch thermische Prozesse auf reguläre Gitterplätze transferiert und somit elektrisch aktiviert. Erst durch die Kombination aus Dotierung und thermischer Aktivierung entstehen beispielsweise elektrisch funktionsfähige Source-, Drain- und Kanalbereiche und somit ein funktionierender Transistor im Silizium-Substrat.

14.5 Halbleitertechnologie in der Smart Factory

Die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten der Halbleiterbauteile finden auch in Komponenten der Smart Factory Anwendung und stellen dort einen wichtigen Teil dar. Einzelne Halbleiterbauelemente sind in der Smart Factory nicht zu finden, eher treten sie im Verbund in beispielsweise Prozessoren oder Sensoren auf, die verschiedene Aufgaben innerhalb der Fabrik innehaben. Zur Simulation verschiedenster Modelle, wie beispielsweise dem des digitalen Zwillings wird eine massive Rechenleistung benötigt, die größtenteils durch Prozessoren bestehend aus Halbleiterelementen generiert wird.

Prinzipiell sind Halbleiterelemente in allen vernetzten Maschinen, Werkzeugen oder anderen Bauteilen enthalten, weshalb im Zuge dieses Kapitels die Smart Factory in drei Anwendungsbereiche unterteilt wird: Sensorik, Aktorik und die Steuerung.

Sensoren sind sowohl in der Fabrikautomation als auch der Prozessautomation enthalten und tragen somit einen wichtigen Teil zur Entstehung einer vollumfänglichen Smart Factory bei. Die in der Fabrikautomation verbauten Sensoren dienen zur Erfassung geometrischer Größen und Texturen der Produktionsumgebung und ermöglichen es, dass diese Texturen von automatisierten/autonomen Systemen entsprechend genutzt werden. Diese Sensoren tragen außerdem

durch funktionale Verwendung wie Lichtschranken zur Sicherheit bei. Die Prozessautomation hingegen wird von Umwelteinflüssen, wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Druck oder Füllstand geprägt. Die Erfassung dieser physikalischen Größen durch Sensoren bildet die Grundlage für den Automatisierungsprozess. Die Adaption der Prozesse an die jeweiligen Umweltbedingungen wird durch diese Erfassung maßgeblich ermöglicht.

Aktoren hingegen übernehmen Aufgaben zur Anpassung des physikalischen Prozesses, indem elektrische Signale in mechanische Aktionen umgesetzt werden (vgl. Abb. 14.7). Ein Anwendungsbeispiel für Aktoren, die Halbleiterbauelemente enthalten, ist ein Elektromotor. Im Elektromotor werden anhand von Halbleiterbauelementen wie Triacs oder Thyristoren die Energie gesteuert. Somit tragen Halbleiterbauelemente auch als Bestandteile von Aktoren zur Industrie 4.0 bei.

Die Steuerung ist der dritte Bauteil der Produktion der Zukunft und stellt das Bindeglied zwischen Sensoren und Aktoren dar. Um konkrete Entscheidungen bezüglich der Steuerung von Maschinen zu treffen, ist eine fundierte Datenbasis erforderlich, auf der Datenverarbeitungen durchgeführt werden können. Für diese Datenverarbeitungen sind leistungsfähige Prozessoren erforderlich, die wiederum den Einsatz von Halbleiterbauelementen voraussetzen. Hierfür werden Signalprozessoren verwendet, die ICs darstellen und Funktionen wie Filterung, Komprimierung oder Transformation der Daten durchführen.

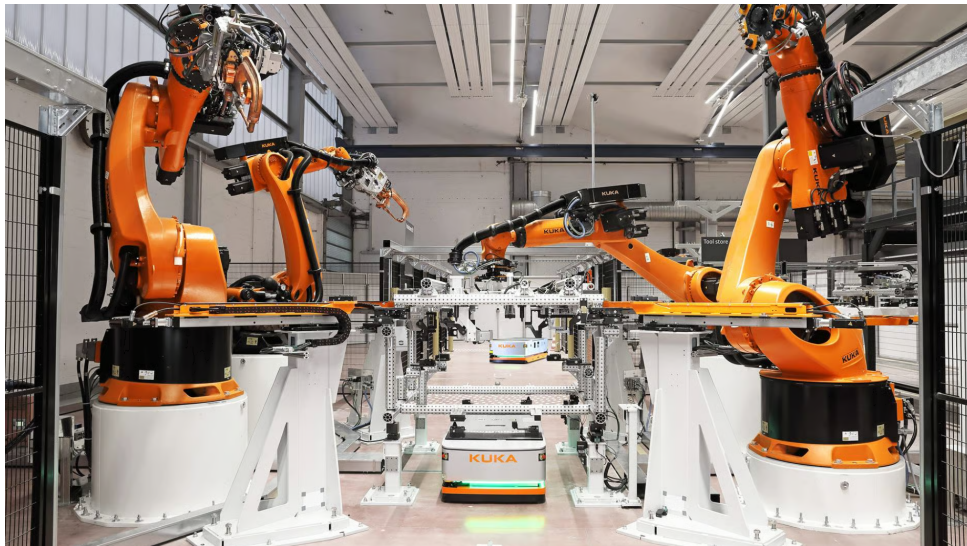


Bild 14.7: Automatisierung anhand der Firma KUKA

14.6 Lieferketten, Produktion und Logistik von Halbleitern

Die Hauptmenge des für die Halbleiterproduktion verwendeten Siliziums wird in China gefördert. Das aus Quarzsand geförderte Silizium (vgl. Abb. 14.8) wird im nächsten Schritt von Unternehmen wie der deutschen Wacker Chemie AG zu einem hohen Reinheitsgrad weiterverarbeitet, der für elektrische Anwendungen ausreicht. Im Anschluss an den ersten Produktionsschritt erfolgt die Weiterverarbeitung des hochreinen Siliziums zu Wafern. In diesem Bereich ist das deutsche Unternehmen Siltronic der einzige westliche Produzent von Wafern mit einem Durchmesser von 300 mm.

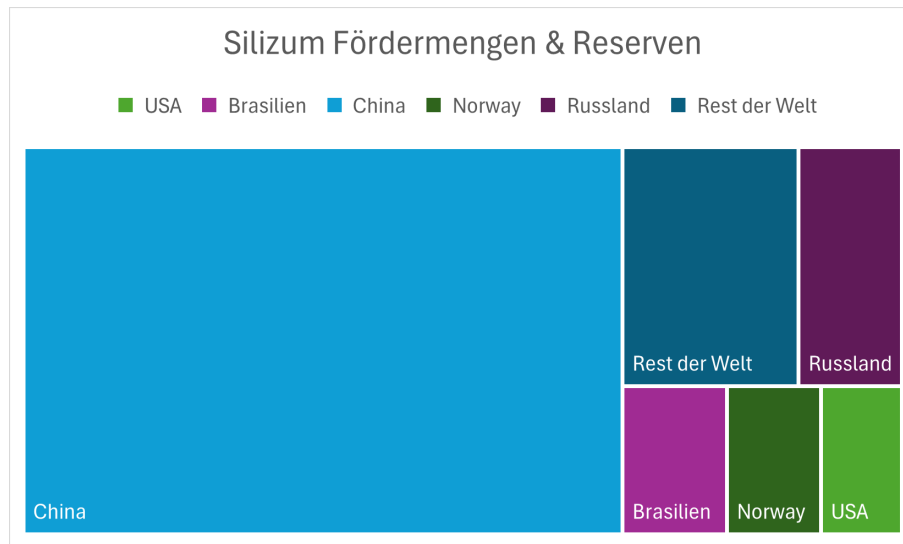
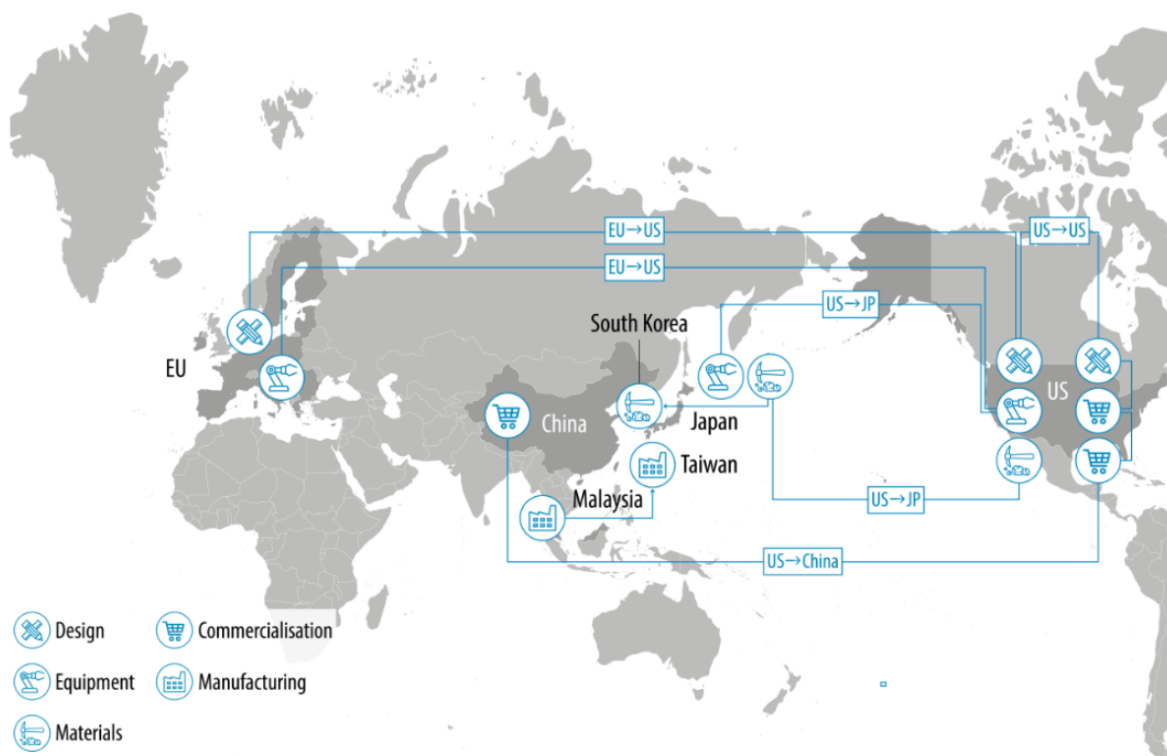


Bild 14.8: Silizium Fördermengen und Reserven

Im nachfolgenden Produktionsschritt werden die aktiven Bauelemente, wie etwa Transistoren oder MEMS, unter Verwendung der Anlagen des niederländischen Unternehmens ASML von Unternehmen wie TSMC oder Samsung in Asien gefertigt (vgl. Abb. 14.9). Im darauffolgenden Prozessschritt werden die erzeugten Bauelemente miteinander verschaltet und die Prozesszuverlässigkeit geprüft.

Um die Qualität sicherzustellen werden elektrische Tests durchgeführt und um anschließende Schäden zu verhindern, werden die gefertigten Halbleiterteile auf der Leiterplatte mit einem Gehäuse überzogen. Schlussendlich wird das fertige Halbleiterbauelement an den Kunden versendet, der dieses in sein Produkt integriert und über verschiedene Wege an den Endkunden bringt.



Source: EPRS.

Bild 14.9: Globale Vernetzung der Halbleiter Lieferketten

14.7 Herausforderungen und Trends

Die Nachfrage nach Halbleiterbauteilen weist seit Jahren starke Schwankungen auf. Im Zuge der globalen Pandemie, die durch das Coronavirus (SARS-CoV-2) verursacht wurde, kam es zu einer signifikanten Steigerung der Nachfrage nach Halbleiterchips. Dieser Anstieg war so erheblich, dass die Versorgung mit den Chips in einigen Fällen nicht mehr gewährleistet werden konnte oder nur zu einem Preisniveau, das die finanziellen Ressourcen vieler Haushalte überstieg. Dies resultierte in Produktionsstopps und Kurzarbeit in der Belegschaft deutscher Automobilhersteller wie Audi, BMW, Daimler und Volkswagen. Diese Ereignisse veranschaulichen die signifikante Abhängigkeit der deutschen Automobilindustrie von ausländischen Halbleiterlieferanten.

Der beobachtete Einbruch im Angebot ist auf eine Reihe von Ereignissen zurückzuführen, die sich auf die Halbleiterindustrie in verschiedenen Teilen der Welt auswirkten. Dazu zählen insbesondere Brände bei mehreren Halbleiterherstellern in Asien sowie ein Wintersturm in Texas, der die Produktion in diesem Bundesstaat zum Erliegen brachte. Diese Krise resultierte nicht nur aufgrund kurzfristiger Ereignisse, sondern auch geschuldet der Struktur der Halbleiter-Industrie. Dadurch, dass 15% der in Premium Fahrzeugen verwendeten Chips bereits bei Verbau veraltet sind, gestaltet sich die Beschaffung dieser als schwierig.

Eine geringe Anzahl von Halbleiterherstellern, darunter Nexperia, Infineon und Renesas, sind auf den Automotive-Markt fokussiert. Diese Hersteller sind auch von Rohstoffen aus chinesischer Produktion abhängig. Im Gegensatz dazu bedienen sich renommierte Hersteller wie TSMC oder Samsung in erster Linie der Nachfrage von Unternehmen wie beispielsweise NVIDIA.

Semiconductor demand vs. supply (Strategy& model)

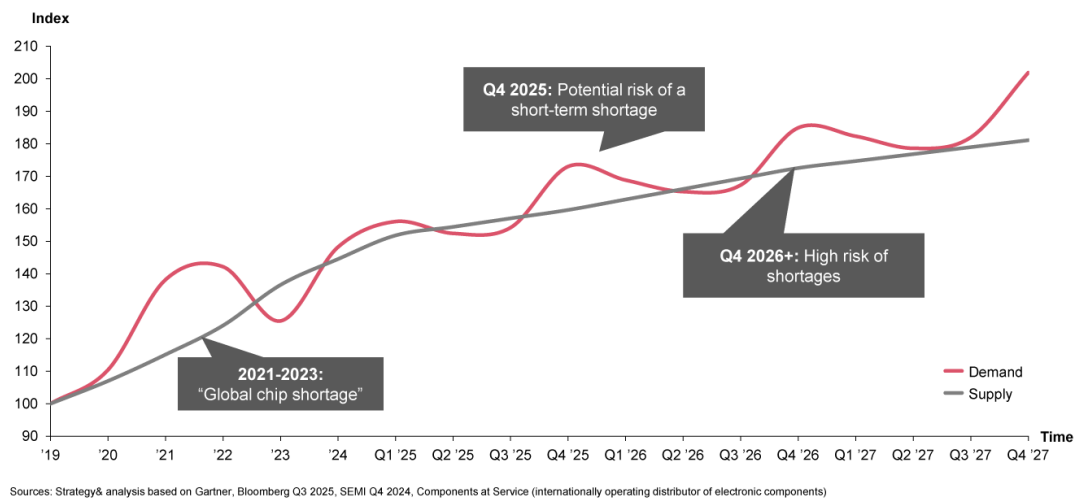


Bild 14.10: Vergleich Angebot und Nachfrage von Halbleitern

Innerhalb der Zeitspanne von 2021 bis 2023 (vgl. Abb. 14.10) resultierte aus der Knappheit von Halbleiterbauelementen ein Schaden von über 100 Milliarden Euro bei deutschen Autoherstellern.

Für die Entwicklung der europäischen Industrie, nicht nur im Automobilbereich, wird die strategische Beschaffung von Halbleiterbauelementen sowie der Aufbau eigener Fertigungs- und Designfähigkeiten von entscheidender Bedeutung sein.

14.8 Zusammenfassung

Halbleiter bilden die Hardwarebasis moderner Systeme – von Sensoren über Prozessoren bis hin zu KI-Anwendungen – und sind das zentrale Bindeglied zwischen physischer und digitaler Welt. Besonders die wachsende Nachfrage nach MEMS-Bauelementen (Mikrosensoren, Aktoren) treibt den Bedarf an Halbleiterfertigungskapazitäten.

Physikalisch beruht die Funktion von Halbleitern auf Silizium als ideales Trägermaterial: Durch gezieltes Dotieren (n- und p-Dotierung) lässt sich die elektrische Leitfähigkeit präzise steuern, wodurch Bauteile wie Dioden, Transistoren und integrierte Schaltkreise (ICs) entstehen. Die Fertigung selbst erfolgt über mehrstufige Prozesse – Lithografie zur Strukturierung, Ätzverfahren zur Materialabtragung sowie Ionenimplantation zur elektrischen Aktivierung.

In der Smart Factory kommen Halbleiter in Sensorik, Aktorik und Steuerung zum Einsatz und ermöglichen Echtzeitüberwachung, Automatisierung und digitale Zwillinge. Die globale Lieferkette (Rohstoffgewinnung in China, Waferproduktion u. a. durch Siltronic, Fertigung durch TSMC/Samsung mit ASML-Anlagen) macht die Branche jedoch anfällig für Störungen – wie die Chipkrise 2021–2023 zeigte, die deutsche Autohersteller über 100 Mrd. Euro kostete. Für Europas Industrie wird daher der Aufbau eigener Fertigungskapazitäten strategisch entscheidend.

KAPITEL 15

Robotik in der Smart Factory

Lernziele

Nach der Bearbeitung dieses Kapitels werden Sie wissen, ...

- ... welche Bedeutung Robotik in der Industrie und der Smart Factory hat.
- ... wie industrielle Roboter aufgebaut sind und wie sie sich bewegen.
- ... welche Arten von Robotern es gibt und wofür sie eingesetzt werden.
- ... wie vernetzte Roboter zusammenarbeiten und Prozesse optimieren.
- ... wie Robotik eine flexible und individuelle Produktion ermöglicht.

Einführung

Die zunehmende Digitalisierung und Automatisierung prägen seit Jahren die industrielle Produktion und bilden die Grundlage für das Konzept der Smart Factory. In diesem Kontext bekommt die Robotik eine zentrale Rolle. Roboter gelten als Schlüsseltechnologie, um Produktionsprozesse effizienter, flexibler und qualitativ hochwertiger zu gestalten.

15.1 Entwicklung und Begriffsbestimmung

Ihre Entwicklung hat eine lange Geschichte, bereits in den 1960er-Jahren wurden die ersten Industrieroboter vorgestellt. Diese waren dem menschlichen Arm nachempfunden und als Universalmaschinen konzipiert, mit dem Ziel, wiederkehrende Fertigungsprozesse ohne menschliche Arbeitskraft zu automatisieren.

Die Hauptziele des Robotereinsatzes liegen bis heute in der wirtschaftlichen Rationalisierung und der Sicherstellung einer konstant hohen Produktqualität, unabhängig von menschlicher Leistungsfähigkeit. Besonders deutlich zeigt sich das im Automobilrohbau, der als nahezu vollständig automatisierter Bereich zum Maßstab für viele andere Industrien geworden ist. Neben der Automobil- und Zulieferbranche finden Industrieroboter auch in der Elektro-, Metall-, Chemie- und Lebensmittelindustrie breite Anwendung. Während ihr Einsatz traditionell in Hochlohnländern besonders ausgeprägt war, gilt heute China als größter Robotermarkt weltweit, gefolgt von Ländern wie Südkorea, Japan, den USA und Deutschland.

Eine allgemeingültige Definition des Begriffs “Roboter“ existiert nicht, was vor allem auf die Vielfalt der Robotertypen und ihrer Einsatzumgebungen zurückzuführen ist. Die ISO 8373:2021

definiert ein Industrieroboter als „Ein automatisch gesteuertes, wiederprogrammierbares, universell einsetzbares Manipulationsgerät, das in drei oder mehr Achsen programmiert werden kann und entweder ortsfest oder auf einer mobilen Plattform für den Einsatz in Automatisierungsanwendungen in einer industriellen Umgebung verwendet werden kann.“

Roboter werden zunehmend zu einem festen Bestandteil des Alltags und tragen entscheidend zur Weiterentwicklung intelligenter, vernetzter Produktionssysteme bei. In der Smart Factory ermöglichen sie die enge Kooperation zwischen Mensch, Maschine und digitalen Systemen, ein entscheidender Schritt in Richtung Industrie 4.0.

15.2 Grundlagen Robotik

Der Aufbau und die Funktionsweise eines industriellen Roboters lassen sich exemplarisch am sechssachsigen Knickarmroboter verdeutlichen, da dieser den in der Industrie am weitesten verbreiteten Typ darstellt. Der Knickarmroboter orientiert sich in seiner Konstruktion am menschlichen Bewegungsapparat. Sein Aufbau ist dem menschlichen Arm nachempfunden. Die rotierenden Hauptachsen verleihen dem Roboter seine hohe Beweglichkeit und ermöglichen eine freie Positionierung und Orientierung im dreidimensionalen Raum.

Mit insgesamt sechs Freiheitsgraden kann der Knickarmroboter nahezu jeden Punkt innerhalb seines Arbeitsraums erreichen. Dadurch ist er in der Lage, komplexe Bewegungsabläufe präzise und wiederholbar auszuführen. Seine Bewegungen umfassen Translationen und Rotationen in allen Raumrichtungen, was ihn besonders vielseitig macht. Diese Flexibilität ist ein wesentlicher Grund für seine weite Verbreitung in der industriellen Praxis.

Ein Knickarmroboter besteht aus mehreren grundlegenden Komponenten, die zusammen seine Beweglichkeit und Funktionalität gewährleisten. Dazu zählen der Roboterarm, die Zentralhand sowie die Schwinde und das Karussell, die für die Bewegungen des Systems im Raum verantwortlich sind.

Das Grundgestell bildet die stabile Basis des Roboters, während der Gewichtsausgleich die Lasten während der Bewegungen ausgleicht und die Präzision unterstützt. Die Robotersteuerung übernimmt die Koordination der Achsen und Bewegungsabläufe, gesteuert über das Programmierhandgerät. Schließlich sorgt der Anbauflansch für die Verbindung des Endeffektors oder weiterer Werkzeuge mit der Zentralhand.

Diese Bestandteile bilden zusammen die funktionale Einheit eines Knickarmroboters und ermöglichen die präzise Ausführung komplexer Bewegungen in industriellen Anwendungen.

Die Bewegungen eines Industrieroboters werden durch Haupt- und Nebenachsen realisiert. Die Hauptachsen (A1–A3) werden auch als „große Achsen“ bezeichnet. Sie dienen der Positionierung des Endeffektors und bestimmen den Arbeitsraum. Ihre Bewegungen erfolgen linear oder rotatorisch und ermöglichen die Makrobewegungen des Roboters. Nebenachsen (A4–A6), auch „kleine Achsen“ oder „Handachsen“ genannt, übernehmen die Feinausrichtung und Orientierung im Greifbereich. Sie sind fast immer rotatorisch ausgeführt und ermöglichen präzise Feinpositionierungen.

Die Achsnummerierung beginnt am Sockel des Roboters. Achse 1 ist die erste Bewegungsachse an der Befestigungsfläche. Von dort erfolgt die Zählung entlang der kinematischen Kette bis zum Endeffektor, also dem Anbauflansch. Diese Nummerierung gilt auch für überkopf montierte Roboter.

Der Freiheitsgrad (f) beschreibt die unabhängigen Bewegungsmöglichkeiten eines Körpers. Im dreidimensionalen Raum besitzt ein starrer Körper sechs Freiheitsgrade, drei Translationen entlang der x-, y- und z-Achse sowie drei Rotationen um diese Achsen. Industrieroboter verfügen in der Regel über sechs Achsen, wodurch sie jede beliebige Position und Orientierung im Raum erreichen können. Eine hohe Anzahl an Achsen ermöglicht eine größere Bewegungsfreiheit und eine flexiblere Bahnsteuerung, erfordert jedoch einen höheren mechanischen und elektrischen Aufwand bei Bau und Steuerung.

Roboter mit weniger als sechs Freiheitsgraden gelten als global degeneriert. Sie besitzen einen eingeschränkten Bewegungsraum und erlauben nur eine limitierte Orientierung des Werkzeugs. Standard-Industrieroboter hingegen verfügen über sechs Freiheitsgrade, was ihnen volle Bewegungsfreiheit im dreidimensionalen Raum ermöglicht und die präzise Positionierung und Orientierung von Werkzeugen erlaubt. Roboter mit mehr als sechs Freiheitsgraden werden als redundant oder überbestimmt bezeichnet. Sie bieten mehr Bewegungsmöglichkeiten, als für die reine Aufgabenbewältigung notwendig wäre, wodurch sie besonders flexibel Hindernisse umgehen und komplexe Bewegungsabläufe ausführen können.

15.3 Einsatzgebiete von Robotern in der Industrie

Industrieroboter haben sich in der industriellen Produktion als unverzichtbare Helfer etabliert, insbesondere dort, wo präzise, schnelle und wiederholbare Arbeitsschritte erforderlich sind. Die Roboter sind in der Lage, tonnenschwere Lasten zu bewegen und Tätigkeiten auszuführen, die für Menschen unangenehm, gefährlich oder monoton sind. Industrieroboter kommen heute vor allem in der vollautomatisierten Massenproduktion zum Einsatz. Ein zentraler Anwendungsbereich ist die Automobilindustrie. In der Karosseriefertigung übernehmen Roboter nahezu alle repetitiven und körperlich belastenden Aufgaben, während in der Endmontage der Mensch weiterhin den Großteil der Arbeit leistet und Roboter unterstützend eingesetzt werden. Neben der Automobilindustrie finden Industrieroboter auch in der Konsumgüterproduktion und der Elektronikfertigung breite Anwendung.

Weitere Aufgaben sind Schweißen, Heben, Transportieren, Lackieren, Palettieren, Maschinenbeschickung, Entgraten und Kleben. Dort übernehmen sie Fließbandarbeit, körperlich belastende Tätigkeiten sowie Mess- und Prüfanwendungen.

Mit Aufgaben wie Kleben sowie Messen und Prüfen tragen sie entscheidend zur Produktivitätssteigerung, Sicherheit und Qualität in modernen Fertigungsprozessen bei. Ein aktueller Trend zeigt den wachsenden Einsatz von Montage- und Prüfrobotern, wodurch die Effizienz und Präzision der Produktionsprozesse weiter steigt. In bestimmten Bereichen des Automobilbaus erreicht der Automatisierungsgrad bereits über 95 Prozent.

15.4 Roboterarten in der Industrie

Industrielle Roboter unterscheiden sich nicht nur in ihrer Aufgabe, sondern vor allem in ihrer Kinematik, Bauweise und Freiheitsgraden. Je nach Anwendungsbereich kommen unterschiedliche Robotertypen zum Einsatz, die jeweils spezifische Stärken und Einschränkungen aufweisen. Im Folgenden soll genauer erläutert werden, welche unterschiedlichen Roboterarten in der industriellen Produktion die größte Bedeutung besitzen, wie sie sich in ihrem Aufbau voneinander unterscheiden und für welche Aufgaben sie jeweils am besten geeignet sind.

Portalroboter gehören zu den kinematisch unterbestimmten Systemen und verfügen über drei bis vier Freiheitsgrade. Ihre Bewegungen erfolgen entlang linearer Achsen, wodurch sie große Arbeitsräume präzise abdecken können, während der Boden frei bleibt. Aufgrund ihrer hohen Traglasten und präzisen Positionierung eignen sie sich besonders für die Maschinenbeschickung,

die Mehrmaschinenbedienung, die Montage großer Baugruppen, wie Motorenfertigung, sowie die Verkettung von Materialflüssen in Produktionslinien. Varianten wie Linear-, Ausleger- oder Flächenportale ermöglichen flexible Anpassungen an unterschiedliche Produktionsanforderungen.

Palettierroboter sind auf das Stapeln von Paletten, Kartons oder Packstücken spezialisiert und besitzen typischerweise vier Freiheitsgrade. Dank der Parallelogrammkinematik bleibt das Werkzeug immer parallel zum Boden, was eine exakte Handhabung schwerer Lasten bei hoher Taktgeschwindigkeit ermöglicht. Typische Anwendungen finden sich im automatischen Beladen von Paletten, etwa in der Getränke- oder Verpackungsindustrie.



Bild 15.1: Palettierroboter

SCARA-Roboter (Selective Compliance Assembly Robot Arm) zeichnen sich durch ihre kompakte Bauweise, geringe Stellfläche und schnelle Bewegungen aus. Sie verfügen über vier Freiheitsgrade, drei horizontale Rotationen und einen vertikalen Hub, und können am Boden, an Wänden oder an der Decke installiert werden. Ihre hohe Wiederholgenauigkeit und kurzen Taktzeiten machen sie besonders geeignet für Kleinteilmontage, Pick-and-Place-Aufgaben, Leiterplattenbestückung sowie Sortier- und Verpackungsprozesse.



Bild 15.2: SCARA-Roboter

Delta-Roboter basieren auf einer Parallelkinematik, bei der mehrere Gelenkarme die Basis mit einer beweglichen Plattform verbinden. Sie besitzen drei bis vier Freiheitsgrade und sind sehr leicht, schnell sowie präzise. Durch die stationären Hauptantriebe können sie hochdynamische Bewegungen ausführen, eignen sich jedoch nur für geringe Traglasten und kleine Arbeitsräume. Typische Anwendungsfelder sind Hochgeschwindigkeits-Pick-and-Place, Verpackung, Sortierung und Montage, insbesondere in der Lebensmittel- und Pharmaindustrie. In Kombination mit Kamerasystemen können Delta-Roboter flexibel Objekte erkennen und handhaben.

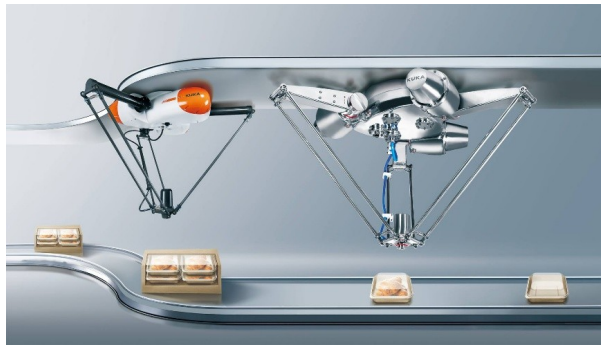


Bild 15.3: Delta-Roboter

Mobile Roboterplattformen unterscheiden sich grundlegend von fest installierten Systemen, da sie ihre Position selbstständig verändern können. Sie kommen vor allem in der Intralogistik, Lagerlogistik und beim Materialtransport zum Einsatz. Mobile Roboter bieten hohe Flexibilität, unterstützen Werker direkt an Produktionslinien und benötigen keinen festen Arbeitsplatz. Moderne Entwicklungen führen zunehmend zu kollaborativen Systemen („Cobot“), die ohne Schutzzaun arbeiten und direkt mit Menschen interagieren, wodurch sie zu echten Kooperationspartnern in der Fertigung werden.

Jeder dieser Robotertypen ist auf spezifische Aufgaben zugeschnitten, wodurch Unternehmen die Möglichkeit haben, ihre Produktionsprozesse gezielt zu optimieren und die Effizienz, Präzision sowie Sicherheit in der Fertigung deutlich zu steigern.



Bild 15.4: Mobile Roboterplattformen

15.5 Humanoide Roboter

Humanoide Roboter sind Maschinen, die in Form, Bewegungen und teilweise auch Verhalten dem Menschen nachempfunden sind. Sie sollen Aufgaben ausführen, die normalerweise von Menschen erledigt werden, insbesondere in Bereichen, die gefährlich, monoton oder körperlich belastend sind. Ein aktuelles Beispiel ist der Tesla Optimus, auch bekannt als Tesla Bot, der von Tesla entwickelt wird, um Industrie und Alltag zu unterstützen.

Tesla Optimus ist als voll humanoider Roboter konzipiert. Der Aufbau orientiert sich am menschlichen Körper, um Flexibilität und Vielseitigkeit zu gewährleisten. Er ist etwa 173cm groß, wiegt zwischen 55 und 60kg und verfügt über zwei Arme mit mehreren Freiheitsgraden, zwei Beine zum Laufen und Balancieren sowie einen Kopf mit Kameras, Mikrofonen und Sensoren zur Umgebungswahrnehmung. Die Hände sind so konstruiert, dass sie Objekte präzise greifen und manipulieren können, während das Gehäuse aus leichten Materialien wie Aluminium und Verbundstoffen besteht, um Beweglichkeit und Energieeffizienz zu gewährleisten. Seine Energieversorgung erfolgt über eine interne Batterie, die genaue Kapazität ist jedoch nicht öffentlich.

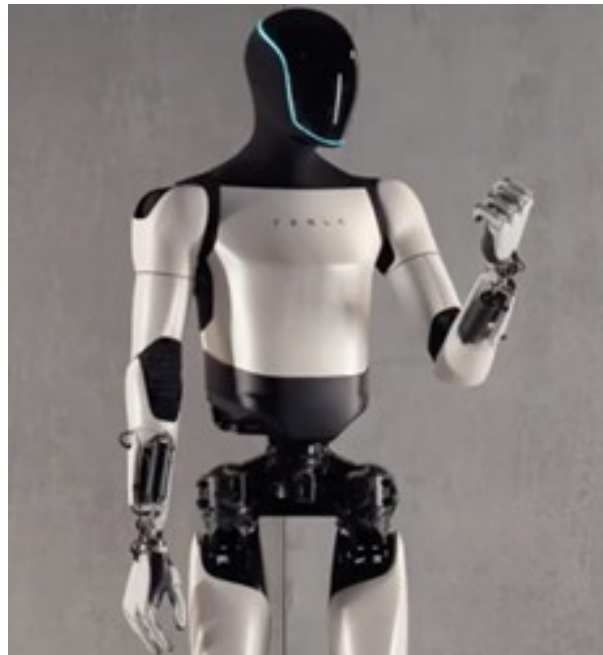


Bild 15.5: Tesla Optimus

Die Funktionsweise von Optimus basiert auf einer Kombination aus Hardware, Software und künstlicher Intelligenz. Kameras und Sensoren erfassen die Umgebung in Echtzeit, während das Gehirn des Roboters auf Teslas Full-Self-Driving-Chip und neuronalen Netzen basiert. Dieser Chip wurde ursprünglich für das autonome Fahren entwickelt und ist extrem leistungsfähig. Dadurch kann Optimus Objekte erkennen, Bewegungen planen und autonom Entscheidungen treffen. Die 40 elektrischen Aktuatoren steuern Arme, Beine und Hände und ermöglichen feinmotorische Bewegungen. Sensorisches Feedback sorgt dafür, dass Position, Kraft und Gleichgewicht kontinuierlich angepasst werden, sodass der Roboter Bewegungen präzise ausführen kann.

Technisch verfügt Optimus über eine Vielzahl von Funktionen, die ihn für industrielle Aufgaben qualifizieren. Er kann bis zu 8km/h laufen, trägt Lasten 9 kg zwischen 68kg je nach Körper und Armhaltung.



Bild 15.6: Tesla Optimus erledigt Aufgabe

In der Industrie könnten humanoide Roboter wie Optimus in verschiedenen Bereichen eingesetzt werden. Dazu zählen die Montage und Fertigung, bei der sie kleinere Komponenten einbauen, verschrauben oder Teile handhaben. Auch in der Logistik könnten sie Materialien transportieren, ein- und auslagern oder Waren bewegen. Zudem könnten sie in der Qualitätskontrolle eingesetzt werden, um Produkte auf Schäden oder Abweichungen zu prüfen und in gefährlichen Umgebungen Tätigkeiten übernehmen, die für Menschen riskant wären, beispielsweise in heißen, giftigen oder strahlenbelasteten Bereichen.

Zu den Pionieren im Einsatz humanoider Roboter in der Produktion zählt auch Mercedes. Das

Unternehmen erprobt derzeit den Roboter „Apollo“ in einem Werk in Ungarn, unter anderem in den Bereichen Montage, Intralogistik sowie im direkten Zusammenspiel mit menschlichen Mitarbeitenden.

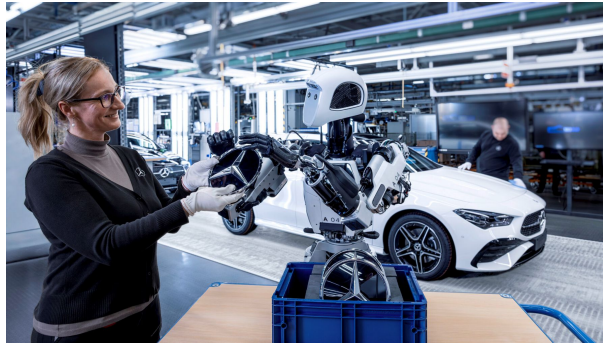


Bild 15.7: Apollo von Mercedes mit Mensch

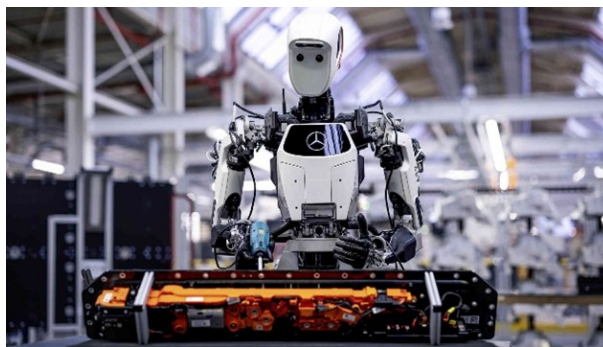


Bild 15.8: Apollo von Mercedes bei Montageaufgabe

Die Vorteile solcher humanoiden Roboter liegen in ihrer Flexibilität, der Möglichkeit, Menschen von gefährlichen oder monotonen Aufgaben zu entlasten und der leichten Integration in bestehende Abläufe dank ihres menschenähnlichen Aufbaus. Nachteile bestehen jedoch in den hohen Kosten, der technischen Komplexität und der noch nicht vollständig erreichten Autonomie bei komplexen Montageaufgaben.

Insgesamt zeigt Tesla und Mercedes, wie humanoide Roboter die Grenze zwischen menschlicher Flexibilität und roboterbasierter Präzision verschieben können. Die Kombination aus künstlicher Intelligenz, sensorischer Wahrnehmung und humanoidem Design macht ihn besonders für industrielle Anwendungen interessant. Auch wenn die Technologie noch in den Kinderschuhen steckt und die vollständige Autonomie in komplexen Fertigungsprozessen noch nicht erreicht ist, verdeutlicht Optimus das Potenzial humanoider Roboter, menschliche Arbeit zu ergänzen, zu erleichtern und langfristig in vielen Bereichen der Industrie einzusetzen.

15.6 Internet of Robotic Things

Das Internet of Robotic Things (IoRT) erweitert das Konzept des Internet of Things (IoT) um Roboter, die nicht nur Daten austauschen, sondern aktiv in ihrer Umgebung handeln können. Während das IoT physische Geräte wie Sensoren, Maschinen oder autonome Fahrzeuge miteinander vernetzt und Informationen austauschen lässt, integrieren IoRT-Systeme Roboter, die diese Daten nutzen, um ihre Handlungen autonom und adaptiv zu steuern. Ziel ist die Bildung vernetzter Roboterteams, die Aufgaben effizienter erledigen, voneinander lernen und Fehler erkennen können. Dabei verbinden IoRT-Systeme Smart Spaces, wie Smart Rooms, Smart Factories, Smart Buildings oder Smart Cities, mit autonomen Robotern. Während die Smart Spaces Zustände überwachen und einfache Aktionen ausführen können, übernehmen

die Roboter komplexe Tätigkeiten, wie die Bewegung von Objekten oder die Interaktion mit Menschen.

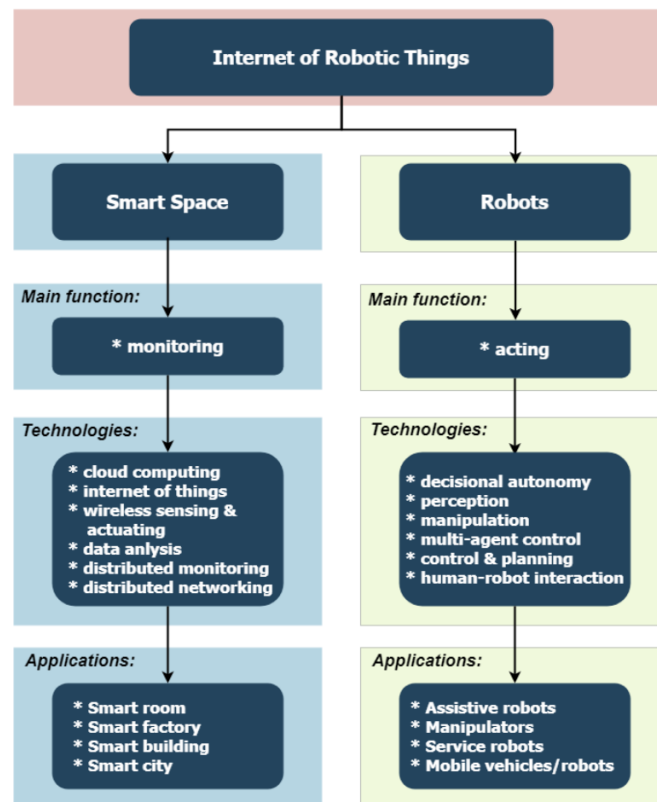


Bild 15.9: Schema IoRT

Die Vorteile des IoRT liegen insbesondere darin, dass Roboter nicht jede kognitive Fähigkeit selbst entwickeln müssen, sondern auf die im IoT verfügbaren Informationen zurückgreifen können. Dadurch lassen sich Prozesse lokal und verteilt optimieren und klassische “Maschine-zu-Maschine“-Abläufe entwickeln sich zu “Roboter-zu-Roboter“-Interaktionen weiter. Roboter in einem IoRT-Netzwerk können Daten teilen, aus Fehlern lernen und Optimierungspotenziale erkennen, was insbesondere in Produktionsanlagen mit kollaborierenden Robotern zu Effizienzsteigerungen führt. Praxisbeispiele, wie das Amazon Fulfillment Center, verdeutlichen den Nutzen.



Bild 15.10: Multi-Robot-System bei Amazon

Hierbei bewegen Roboter autonom Warenablagen zu den Mitarbeitern, erkennen Hindernisse über Kameras und Infrarotsensoren, navigieren mithilfe von QR-Codes auf dem Boden und werden über eine zentrale Wi-Fi-Verbindung koordiniert. Das Ergebnis ist eine deutliche Reduzierung langer Laufwege, schnellere Auftragsbearbeitung und eine flexible Handhabung verschiedener Produktarten und -größen.

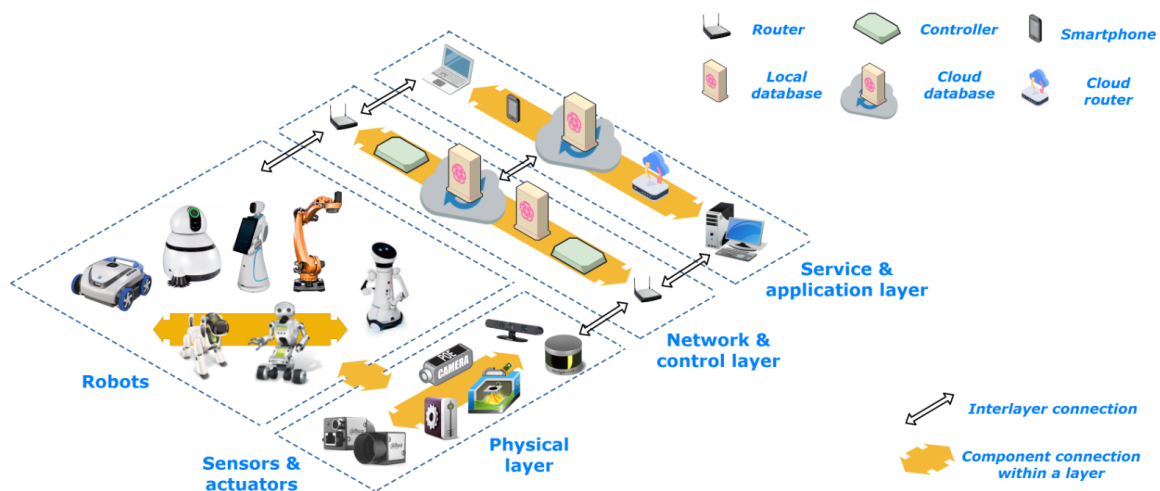


Bild 15.11: IoRT Systemarchitektur

Die Architektur des IoRT kann in drei Schichten unterteilt werden. In der physischen Schicht agieren die Roboter als intelligente Agenten, kommunizieren untereinander und bilden Multi-Robot-Systeme, unterstützt von Kameras oder Bewegungssensoren sowie Aktuatoren, beispielsweise Werkzeugmaschinen oder 3D-Druckern. Die Netzwerk- und Steuerungsschicht umfasst Router, Controller, lokale und Cloud-Datenbanken sowie die Kommunikations- und Steuerprotokolle, die die Koordination zwischen Robotern, Sensoren und Aktuatoren sicherstellen. In der Service- und Anwendungsschicht werden Programme zur Überwachung, Verarbeitung und Steuerung implementiert, die mithilfe von KI und Machine Learning die Prozesse optimieren. Vernetzung und Kommunikation erfolgen häufig über drahtlose Mesh-Netzwerke, um den Datenaustausch zwischen Robotern, Sensoren, Aktuatoren und Smart Spaces zu ermöglichen.

IoRT unterstützt besonders Multi-Robot-Systeme (MRS), bei denen mehrere Roboter in derselben Umgebung zusammenarbeiten. Ziele sind dabei eine höhere Effizienz, verteilte Aufgabenbewältigung, erweiterte Funktionalität und Fehlerresistenz durch Redundanz. Herausforderungen bestehen in der Koordination, möglichen Interferenzen, Kosten und Robustheit. Multi-Robot-Systeme lassen sich nach verschiedenen Dimensionen klassifizieren, etwa in Bezug auf Kooperationsgrad, Wissen, Art der Koordination, Teamorganisation, Kommunikationsmechanismen, Teamzusammensetzung, Architektur und Teamgröße. IoRT bietet hier eine natürliche Lösung, um die Netzwerk- und Kommunikationsanforderungen effizient zu unterstützen.

Die öffentliche Wahrnehmung von vernetzten Robotern ist oft von Ängsten geprägt, die auf Science-Fiction-Szenarien zurückgehen, in denen Roboter gegen Menschen agieren. Tatsächlich ist eine vollständig autonome, menschenfeindliche Roboterwelt reine Fiktion. Dennoch wirft IoRT gesellschaftliche Fragen auf, etwa hinsichtlich möglicher Arbeitsplatzverluste oder der Neuschaffung von Arbeitsplätzen durch KI-gestützte Robotersysteme. Gleichzeitig ermöglicht IoRT die flexible Zusammenarbeit von Mensch und Maschine, wobei Roboter Routineaufgaben übernehmen und Menschen ihre kognitiven Fähigkeiten, Flexibilität und Problemlösungsfähigkeiten einbringen können.

Insgesamt stellt das IoRT die nächste Evolutionsstufe der Robotik dar. Es verbindet physische Robotik mit datenbasierter Intelligenz, ermöglicht vernetzte, autonome und lernfähige Roboterteams und optimiert Prozesse in Smart Spaces. Praxisbeispiele wie das Amazon Fulfillment Center zeigen, dass IoRT die Effizienz steigert, Ressourcen schont und die Grundlage für eine neue, flexible Form der Produktion legt, in der Robotik und menschliche Arbeit effektiv kombiniert werden.

15.7 Losgröße 1 in der Industrie 4.0

Die Losgröße 1 beschreibt die Fertigung eines Produkts als Einzelstück, also ein Los mit der Größe 1, mit dem Ziel, individuelle Kundenwünsche bei gleichzeitiger wirtschaftlicher Produktion zu erfüllen. Im Gegensatz zur traditionellen Fertigung, bei der eine optimale Losgröße größer als 1 angestrebt wird, um Umrüstkosten zu minimieren und große Produktionsmengen effizient abzuwickeln, stellt die Losgröße-1-Produktion besondere Anforderungen an die industrielle Wertschöpfung. Klassische Produktionsanlagen waren aufgrund hoher Rüstzeiten und beschränkter Flexibilität nur bedingt in der Lage, eine hohe Variantenvielfalt wirtschaftlich zu fertigen.

Die Realisierung von Losgröße 1 wird durch die Kombination moderner Robotik, des Internet of Robotic Things (IoRT) und autonomer Transportsysteme wesentlich erleichtert. Industrieroboter ermöglichen präzise, schnelle und wiederholbare Arbeitsschritte, die für die Fertigung individueller Produkte in Einzelstücken erforderlich sind. Durch flexible Robotersysteme lassen sich unterschiedliche Produktionsaufträge ohne lange Umrüstzeiten umsetzen, während humanoide Roboter und Cobots die direkte Zusammenarbeit mit Menschen in der Montage und bei anstrengenden Arbeitsschritten ermöglichen.

Das IoRT erweitert diese Möglichkeiten, indem vernetzte Roboter in Echtzeit Informationen austauschen, ihre Handlungen autonom anpassen und voneinander lernen können. Durch die Integration in Smart Spaces lassen sich Prozesse flexibel steuern, Engpässe vermeiden und mehrere Roboter gleichzeitig effizient koordinieren. Die Daten aus IoRT-Netzwerken unterstützen zudem die kontinuierliche Optimierung der Produktion und reduzieren den Programmieraufwand einzelner Maschinen.

Autonome Transportsysteme tragen zusätzlich dazu bei, Materialflüsse und Logistikprozesse innerhalb der Fertigung flexibel zu gestalten. Waren, Werkstücke oder Bauteile können bedarfsgerecht und ohne menschliche Eingriffe zwischen den Fertigungsstationen transportiert werden, wodurch Wartezeiten minimiert und die Durchlaufzeit einzelner Aufträge reduziert werden.

In Kombination schaffen diese Technologien die Voraussetzungen für eine wirtschaftliche, flexible und individualisierte Fertigung. Durch die Automatisierung, Vernetzung und adaptive Steuerung wird die Produktion von Produkten mit der Losgröße 1 möglich, ohne dass Effizienz oder Qualität verloren gehen. Die Smart Factory bildet so die Grundlage, um auf Kundenwünsche schnell, präzise und ressourcenschonend reagieren zu können.

15.8 Zusammenfassung

Die Robotik bildet das Rückgrat der Smart Factory und ermöglicht durch flexible, präzise und wiederholbare Arbeitsschritte die Automatisierung industrieller Produktionsprozesse. Unterschiedliche Robotertypen, vom Knickarmroboter über SCARA- und Delta-Roboter bis hin zu mobilen Plattformen und humanoiden Robotern, decken ein breites Spektrum an Aufgaben ab, von der Montage kleiner Bauteile über Palettierung bis hin zur direkten Zusammenarbeit mit Menschen. Humanoide Roboter wie Tesla Optimus oder Apollo verdeutlichen, wie menschenähnliche Flexibilität mit roboterbasierter Präzision kombiniert werden kann, um auch komplexe und körperlich belastende Aufgaben zu übernehmen.

Das Internet of Robotic Things (IoRT) erweitert diese Möglichkeiten, indem Roboter in Echtzeit vernetzt arbeiten, Daten austauschen und voneinander lernen. Die Integration in Smart Spaces ermöglicht eine adaptive Steuerung, optimiert Multi-Robot-Systeme und reduziert den Programmieraufwand einzelner Roboter. Praxisbeispiele wie das Amazon Fulfillment Center zeigen,

dass vernetzte Roboter die Effizienz steigern, Prozesse optimieren und die Ressourcennutzung verbessern können.

Diese Technologien schaffen die Grundlage für die Umsetzung der Losgröße 1 in der Industrie 4.0. Durch die Kombination von Robotik, IoRT und autonomen Transportsystemen wird eine wirtschaftliche und flexible Fertigung individueller Produkte in Einzelstücken möglich. Die Smart Factory ermöglicht so eine schnelle, präzise und ressourcenschonende Produktion, bei der Kundenwünsche direkt in den Fertigungsprozess integriert werden können, ohne dass Effizienz oder Qualität verloren gehen.

Literaturverzeichnis

- [1] E. Westkämper. *Digitale Produktion*. Springer Vieweg, Berlin, 2013. (Zitiert auf Seite 2)
- [2] T. u.a. Bauernhansl, editor. *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014. (Zitiert auf Seite 2)
- [3] Birgit Vogel-Heuser and u.a. Bauernhansl, editors. *Handbuch Industrie 4.0: Produktion, Automatisierung und Logistik*. Springer NachschlageWissen. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2015. (Zitiert auf Seite 2)
- [4] H. Kagermann. Umsetzungsempfehlungen_industrie4_0. 2013. (Zitiert auf Seiten 4, 9, 11 und 37)
- [5] Litzel Tutanch. Was ist das internet of things? 2016. (Zitiert auf Seite 6)
- [6] u.a. Vogel-Heuser. *Handbuch Industrie 4.0 Bd.1: Produktion*. VDI Springer Reference. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2nd ed. edition, 2016. (Zitiert auf Seite 7)
- [7] D. u.a. Lucke. Ipa_strukturstudie_industrie_4.0_bw. 2014. (Zitiert auf Seiten 9 und 11)
- [8] Berthold Heinrich, Petra Linke, and Michael Glöckler. *Grundlagen Automatisierung: Sensorik, Regelung, Steuerung*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015. (Zitiert auf Seite 16)
- [9] A. Brandt. wmr_wirtschaftsbericht2015_230216. 2016. (Zitiert auf Seite 20)
- [10] M. Fratzscher. Kein roboter kann die Altenpflegerin ersetzen, 2018. (Zitiert auf Seite 21)
- [11] Reiser, Martin, GS1 Germany GmbH. Epc-informationsservices (epcis). 2007. (Zitiert auf Seite 23)
- [12] Busse, J. u.a., Plattform Industrie 4.0. Interaktionsmodell für industrie 4.0-komponenten. 2014. (Zitiert auf Seite 23)
- [13] Geisberger, E., Broy, M. agendacps: Integrierte forschungsagenda cyber-physical systems. *aca-tech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften*. Springer., 2012. (Zitiert auf Seite 26)
- [14] Gurzki,T., Hinderer, H. Eine referenzarchitektur für software zur realisierung von unternehmensportalen. *Professionelles Wissensmanagement - Erfahrungen und Visionen*, 2003. (Zitiert auf Seite 40)
- [15] VDI/VDE. Statusreport-referenzmodelle-2015-v10. 2015. (Zitiert auf Seite 43)
- [16] Donald A. Norman. *The design of everyday things*. Basic Books, New York New York, revised and expanded edition edition, 2013. (Zitiert auf Seite 48)
- [17] Robin Klostermeier, Steffi Haag, and Alexander Benlian. Geschäftsmodelle digitaler zwillinge. In Siemens Schweizer AG, editor, *Geschäftsmodelle digitaler Zwillinge*, pages 1–2. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2020. (Zitiert auf Seiten 55 und 56)
- [18] Fei Tao and Meng Zhang. *Digital twin driven smart manufacturing*. Academic Press, London, United Kingdom, 2019. (Zitiert auf Seiten 55 und 56)

- [19] Konica Minolta. Digital twins: creating new innovation opportunities, o.J. (Zitiert auf Seite 57)
- [20] Siemens Schweizer AG, editor. *Geschäftsmodelle digitaler Zwillinge*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2020. (Zitiert auf Seite 57)
- [21] Moritz Schele and Markus Kühn. Vorsprung durch digitale zwillinge: Verknüpfung eines realen produkts mit seinem digitalen abbild. (Zitiert auf Seite 58)
- [22] Mindsquare GmbH. Digital twin, 20.8.2019. (Zitiert auf Seite 59)
- [23] Raphael Wagner, Benjamin Schleich, Benjamin Haefner, Andreas Kuhnle, Sandro Wartzack, and Gisela Lanza. Challenges and potentials of digital twins and industry 4.0 in product design and production for high performance products. *Procedia CIRP*, 84:88–93, 2019. (Zitiert auf Seite 59)
- [24] Clarissa Haller. Digitalisierung in der industrie: Zwillinge mit potential, 2018. (Zitiert auf Seite 60)
- [25] Sven Altenburg, Hans-Paul Kienzler, and Alex auf der Maur. Einführung von automatisierungsfunktionen in der pkw-flotte: Auswirkungen auf bestand und sicherheit. (Zitiert auf Seite 61)
- [26] J-p De Clerck. Insurers want drivers in the vehicle data ownership seat, not car manufacturers. *i-SCOOP*, 1.12.2017. (Zitiert auf Seite 62)
- [27] Carlos Miskinis. Practical examples on how digital twin can be used, 2018. (Zitiert auf Seite 62)
- [28] Job Wizard. Digital twins: creating new innovation opportunities, 9.3.2020. (Zitiert auf Seite 63)
- [29] David W. Cearley, Brian Burke, Samantha Searle, and Mike J. Walker. Top 10 strategic technology trends for 2018. (Zitiert auf Seite 63)
- [30] ifaa – Institut für angewandte Arbeitswissenschaft e. V., editor. *Nachhaltigkeitsmanagement - Handbuch für die Unternehmenspraxis: Gestaltung und Umsetzung von Nachhaltigkeit in kleinen und mittleren Betrieben*. ifaa-Edition. Springer Vieweg, Berlin and Heidelberg, 2021. (Zitiert auf Seiten 74, 76 und 77)
- [31] Nachhaltigkeitspolitik: Sieben fragen. sieben antworten., 2016. (Zitiert auf Seite 75)
- [32] 10 gründe, warum sich nachhaltigkeit für unternehmen lohnt, 2016. (Zitiert auf Seite 77)
- [33] Nachhaltige produktion, 2023. (Zitiert auf Seiten 78 und 83)
- [34] Produktlebenszyklus, 2023. (Zitiert auf Seite 78)
- [35] Anne Wiegert. Nachhaltigkeit im supply chain management, 2020. (Zitiert auf Seite 79)
- [36] Kreislaufwirtschaft: Definition und vorteile, 2023. (Zitiert auf Seite 81)
- [37] Stoffstrommanagement, 2022. (Zitiert auf Seite 82)
- [38] Ulrike Böhm, Alexandra Hildebrandt, and Stefanie Kästle, editors. *Klimaneutralität in der Industrie: Aktuelle Entwicklungen, Praxisberichte, Handlungsempfehlungen*. Springer Gabler, Berlin and Heidelberg, 2023. (Zitiert auf Seiten 84, 85, 86 und 87)
- [39] Vogel Communications Group. Mm logistik: Was ist logistik 4.0? alles zum thema digitalisierung und logistik. 2020. (Zitiert auf Seite 88)
- [40] F. Heistermann et. al. Digitalisierung in der logistik - antworten auf fragen aus der unternehmenspraxis (positionspapier). *Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V.*, 2017. (Zitiert auf Seite 89)

- [41] P. Beisswenger R. Recknagel, editor. *Trotz Control Tower und Digitalisierung - Der Transportplaner bleibt*. Logistik - die unterschätzte Zukunftsindustrie: Strategien und Lösungen entlang der Supply Chain 4.0. Springer Gabler, Wiesbaden, 2., erweiterte und bearbeitete auflage edition, 2017. (Zitiert auf Seite [93](#))