

MASTERARBEIT

DIE AUSWIRKUNGEN VON INDUSTRIE 4.0 AUF DIE MESSTECHNIK

Am Beispiel der Entwicklung einer Software zur Status Überwachung und
Auslastungsplanung für Messmaschinen

ausgeführt an der



am Studiengang

Software Engineering Leadership

Von: Gerhard Draser

Personenkennzeichen: 1540030004

Holzhausen, am 03.08.2018

Unterschrift

EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benützt und die benutzten Quellen wörtlich zitiert sowie inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

.....

Unterschrift

DANKSAGUNG

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die mich in der vorangegangenen Zeit unterstützt und ermutigt haben. Bei meinem Betreuer Felix Heppner möchte ich mich für die investierte Zeit und das konstruktive Feedback bedanken. Bei meinen Kollegen und Vorgesetzten bei Mitutoyo CTL Germany GmbH bedanke ich mich für das entgegengebrachte Vertrauen und Verständnis sowie für das Entgegenkommen, dass ich die Arbeit in Kooperation mit der Firma durchführen konnte. Besonders den Kollegen, die mich regelmäßig ermutigt und mir Feedback gegeben haben, möchte ich meinen Dank aussprechen. Des Weiteren möchte ich mich bei meiner Familie, meinen Freunden und meinen Kommilitonen bedanken, die mich in der langen Zeit des Studiums und während der Ausarbeitung der Masterarbeit begleitet und immer wieder ermutigt und mir viel Verständnis und Entgegenkommen gezeigt haben. Vielen Dank dafür.

KURZFASSUNG

Was muss ein Unternehmen heutzutage leisten um auf Dauer mit dem Wettbewerb mithalten und den Veränderungen von Industrie und Gesellschaft standzuhalten? Was bedeuten die einzelnen Buzz-Wörter wie „Industrie 4.0“, „Internet of Things“ und „Cyber-Physikalisches Produktionssystem“ konkret für die eigene Situation? Die folgende Arbeit versucht, diesen Fragen nachzugehen. Konkret wird hierfür das Beispiel der Messtechnik Branche untersucht und versucht, für die Software des Mitutoyo Konzerns eine Softwarearchitektur zu entwickeln, welche für die neuen Entwicklungen gewappnet ist. Hierfür wird zunächst eine grundlegende Untersuchung der aktuellen Trends in der Industrie durchgeführt und daraus Anforderungen abgeleitet. Dann werden die einzelnen Aspekte auf die Architektur übertragen und eine grundlegende Basisstruktur definiert. Anhand des konkreten Beispiels einer Software zur Status Überwachung und Auslastungsplanung für Messmaschinen wird dann untersucht, inwiefern die Basis Architektur den ermittelten Anforderungen gerecht wird.

ABSTRACT

What does a company have to do in the current time to keep up with the competition and to withstand the changes of industry and society? What do the individual buzz words such as "Industry 4.0", "Internet of Things" and "Cyber-Physical Production System" mean when projected onto their situation? The following thesis tries to find an answer to these questions. For this the specific example of the metrology industry is examined and it is attempted to develop a software architecture for the software of the Mitutoyo Group ready to face these new developments. A fundamental examination of the current trends in the industry is done to accomplish this and requirements are derived from it. Afterwards the individual aspects are transferred to the architecture and a fundamental base structure is defined. Based on the concrete example of a software for status monitoring and capacity planning of measurement machines it is then examined to what extent the basic architecture meets the previously determined requirements.

GLEICHHEITSGRUNDSATZ

Aus Gründen der Lesbarkeit wurde in dieser Arbeit darauf verzichtet, geschlechtsspezifische Formulierungen zu verwenden. Jedoch möchte ich ausdrücklich festhalten, dass die bei Personen verwendeten maskulinen Formen für beide Geschlechter zu verstehen sind.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
2	THEORIETEIL	3
2.1	Historische Entwicklung.....	3
2.2	Was ist Industrie 4.0?	4
2.3	Neue Technologien.....	5
2.3.1	Internet of Things.....	5
2.3.2	Cloud Dienstleistungen.....	5
2.3.3	Sensoren	7
2.3.4	Kollaborative Roboter	7
2.3.5	Virtuelle Realität.....	8
2.3.6	Big Data und Date Science	9
2.3.7	Künstliche Intelligenz	9
2.3.8	Autonome Transportmittel	10
2.3.9	3D Druck.....	11
2.3.10	Digital Thread	11
2.3.11	Digital Twin	12
2.3.12	Blockchain	12
2.3.13	Identifikationsverfahren	13
2.4	Neue Geschäftsmodelle	14
2.4.1	Servicebasierte Geschäftsmodelle	14
2.4.2	Unternehmensübergreifende Netzwerke.....	14
2.4.3	Personalisierte Produkte	14
2.4.4	Fehler Vorausberechnung	15
2.5	Auswirkungen auf Unternehmen	15
2.5.1	Kundenanforderungen	15
2.5.2	Wirtschaftlichkeit.....	15
2.5.3	IT Architekturen	16
2.5.3.1.	Klassische IT Architekturen	16
2.5.3.2.	Cyber-physikalisches Produktionssystem	17
2.5.3.3.	Gemeinsame Datenbasis	18
2.5.3.4.	Kommunikationsstandards	18
2.5.3.5.	IT Sicherheit.....	19
2.6	Generelle Anforderungen	19

2.6.1	Große Industriekonzerne	20
2.6.2	Zulieferer	21
2.6.3	Kleinere Unternehmen	22
2.7	Anforderungen an Messtechnik	22
2.7.1	Definition der Messtechnik	22
2.7.2	Datenverfügbarkeit	23
2.7.3	Flexibilität in der Auftragsplanung	23
2.7.4	Weiterverwendung der Daten aus anderen Systemen	24
2.8	Zusammenfassung des Theorieteils	24
3	PRAXISTEIL	25
3.1	Datenverfügbarkeit	25
3.1.1	Aktueller Zustand	25
3.1.2	Übertragung auf CPMS	26
3.2	Flexibilität in der Auftragsplanung	28
3.2.1	Aktueller Zustand	28
3.2.2	Übertragung auf CPMS	28
3.3	Weiterverwendung der Daten aus anderen Systemen	31
3.3.1	Aktueller Zustand	31
3.3.2	Übertragung auf CPMS	32
3.4	Generelle Konzepte	33
3.4.1	Continuous Delivery und unabhängig deploybare Module	33
3.4.2	Messaging	33
3.4.3	CQRS und Event Sourcing	33
3.4.4	REST API	34
3.5	Basis Architektur	35
3.5.1	Legacy Adapter	35
3.5.2	Module	36
3.5.3	Adapter und Data Miner	37
3.6	Auslastungsplanung	38
3.6.1	Modul Status Überwachung	38
3.6.2	Modul Wartungsplanung	39
3.6.3	Modul Auftragsplanung	39

3.6.4	CPMS Auslastungsplanung.....	40
3.6.5	Ansicht aktueller Aufträge.....	41
3.7	Bewertung.....	41
3.8	Fazit und Ausblick.....	42
4	SCHLUSS.....	43
	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	44
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	45
	TABELLENVERZEICHNIS	46
	LITERATURVERZEICHNIS	47

1 EINLEITUNG

Ein Thema, welches in den Medien und auf Fachmessen immer wieder auftaucht ist Industrie 4.0. Es wird von Firmen heutzutage nahezu erwartet, dass sie sich mit dem Thema auseinandersetzen, weshalb der Begriff immer wieder auf Werbebannern und in Anzeigen auftaucht. Jedoch sind weder die Bedeutung dieses Begriffes noch die Auswirkungen des damit verbundenen Wandels allorts klar. Viele Firmen stellen daher Untersuchungen an um festzustellen, welche konkreten Auswirkungen diese Entwicklung langfristig gesehen für sie bedeutet. Gerade die disruptiven Veränderungen, welche mit vielen der Neuerungen einhergehen, könnten für viele Firmen ein Problem darstellen. Andererseits bieten neue Technologien am Markt auch noch nie dagewesene Möglichkeiten für innovative Geschäftsmodelle. Um den neuen Gegebenheiten dauerhaft Stand halten zu können, gilt es für Unternehmen sich mit dem Thema und seinen Folgen auseinanderzusetzen.

Als internationaler Messgerätehersteller ist das japanische Unternehmen Mitutoyo ebenfalls von dieser Problematik betroffen. Einerseits ist die Messtechnik ein zentraler Bestandteil der Qualitätssicherung und daher in den meisten industriellen Wertschöpfungsketten unverzichtbar. Es ist daher essentiell festzustellen, welchen zusätzlichen Anforderungen die Produkte des Konzerns in Zukunft gerecht werden müssen. Andererseits gilt es auch für den Konzern selbst festzustellen, welche Veränderungen an den Geschäftsmodellen notwendig werden und welche Möglichkeiten sich in Zukunft daraus ergeben könnten. Ein zentraler Bestandteil des mit Industrie 4.0 verbundenen Wandels ist Software. Die Firma Mitutoyo CTL Germany GmbH in Oberndorf ist eine von mehreren Tochtergesellschaften des Konzerns welche die Software des Unternehmens entwickelt. Damit die verschiedenen Softwarepakete sich auch in Zukunft am Markt behaupten können muss festgestellt werden, welchen zusätzlichen Anforderungen auf diese zukommen und welche Funktionen die Kunden in Zukunft noch zusätzlich benötigen könnten.

Die folgende Arbeit fokussiert sich auf die Produkte und deren neue Anforderungen. Hierbei wird der Fokus primär auf die Software gelegt und der Frage nachgegangen, welche Anforderungen die Software im Bereich der Messtechnik langfristig erfüllen muss, um den mit Industrie 4.0 verbundenen Veränderungen standzuhalten. Hierfür muss zunächst Klarheit über den Begriff Industrie 4.0 und den damit verbundenen Wandel geschaffen werden. Dazu soll ein Blick auf den geschichtlichen Hintergrund und die Entstehung dieser vierten industriellen Revolution geworfen werden. Danach werden einige der damit verbundenen Technologien genauer betrachtet und die daraus resultierenden veränderten oder neuen Geschäftsmodelle untersucht. Des Weiteren werden dann die generellen Auswirkungen auf Unternehmen betrachtet. Aus der Perspektive von IT Entscheidern sowohl großer Konzerne als auch von kleineren Firmen heraus wird dann erörtert, welche generellen Anforderungen die innerhalb der Wertschöpfungskette verwendete Software langfristig erfüllen muss. Daraufhin wird der Fokus auf die Messtechnik als Teil der Wertschöpfungskette gelegt und versucht, diese Anforderungen auf die dort verwendete Software

zu übertragen und konkrete Herausforderungen, mit denen sich der Konzern auf Dauer auseinandersetzen muss, herauszuarbeiten.

Aus den Ergebnissen dieser theoretischen Analyse wird dann eine Softwarearchitektur abgeleitet, welche langfristig den Anforderungen standhält. Diese wird dann auf das Beispiel einer Software zur Statusüberwachung und Auslastungsplanung für Messmaschinen übertragen und anhand dieses Beispiels die Eignung der Architektur überprüft.

2 THEORIETEIL

Zunächst gilt es zu klären, was unter dem Begriff Industrie 4.0 zu verstehen ist. Hierzu soll zunächst die historische Entwicklung dieser sogenannten vierten industriellen Revolution betrachtet und dann die eigentliche Bedeutung des Begriffes genauer untersucht werden. Danach wird der Fokus auf einige Technologien gelegt, welche in diesem Zusammenhang eine Rolle spielen und auf die Veränderungen einen Einfluss haben. Anschließend werden diese Technologien mit davon betroffenen oder sich dadurch neu ergebenden Geschäftsmodellen in Verbindung gesetzt. Daraufhin werden dann die generellen Auswirkungen, welche auf Unternehmen zukommen könnten, untersucht. Aus der Perspektive von IT Entscheidern wird dann untersucht, welche Anforderungen diese an die verwendete Software stellen müssen, um die Geschäftsmodelle effektiv umsetzen zu können und um der veränderten Unternehmensstruktur gerecht zu werden. Aus der Rolle der Messtechnik innerhalb dieser Geschäftsmodelle werden dann die Anforderungen an die dort verwendete Software herausgearbeitet.

2.1 Historische Entwicklung

Um die vierte industrielle Revolution genauer zu verstehen ist es hilfreich, zunächst die drei vorangegangenen Revolutionen genauer zu betrachten. Durch die Erschließung der Dampfkraft um diese gezielt einsetzen zu können kam es zur ersten industriellen Revolution. Dampfmaschinen haben es ermöglicht, schneller und in größeren Stückzahlen zu fertigen und Eisenbahnen haben den Transport von Personen und Gütern beschleunigt. Elektrische Arbeitsmaschinen und das Fließband haben durch die damit ermöglichte Massenproduktion und die flexiblere Positionierung der Arbeitsstationen die zweite industrielle Revolution geprägt. Computer und Automatisierung waren ausschlaggebend für die dritte Revolution. Diese ermöglichten es, Fertigungsmaschinen zu bauen, welche komplexe Fertigungsabläufe vollautomatisch durchführen konnten. Diese mussten nicht mehr kontinuierlich von einem Bediener gesteuert werden, sondern konnten, nachdem sie einmal von einem Spezialisten eingerichtet wurden, eigenständig komplexe Aufgaben durchführen. Ganze Fertigungsstraßen ließen sich somit nahezu vollständig automatisieren. (Schwab, 2016) (Schüler, Digit-All-isierung, 2017) (Kaufmann, 2015)

Gemeinsam ist diesen industriellen Revolutionen, dass eine oder mehrere technologische Neuerungen Industrie und Gesellschaft geprägt und neue Möglichkeiten eröffnet haben. Ein Gesichtspunkt, welcher sich kontinuierlich durchzieht, ist das Ersetzen von Muskelkraft durch den Einsatz von Technik. (Schwab, 2016) Das besondere an der vierten Revolution ist jedoch, dass viele neue Technologien diese prägen und diese Technologien sich gegenseitig verstärken. (Schwab, 2016) Um „die Wettbewerbsfähigkeit des Standortes Deutschland zu stärken“ (Kaufmann, 2015) wurde Industrie 4.0 als Zukunftsprojekt von der Akademie für Wissenschaften (acatech) in Zusammenarbeit mit VDMA, ZVEI und Bitkom und Teilnehmern aus der Industrie, aus Forschungseinrichtungen und aus Universitäten konzipiert.

In Abbildung 1 werden die verschiedenen industriellen Revolutionen zueinander in Beziehung gestellt und ihre Besonderheiten aufgezeigt.

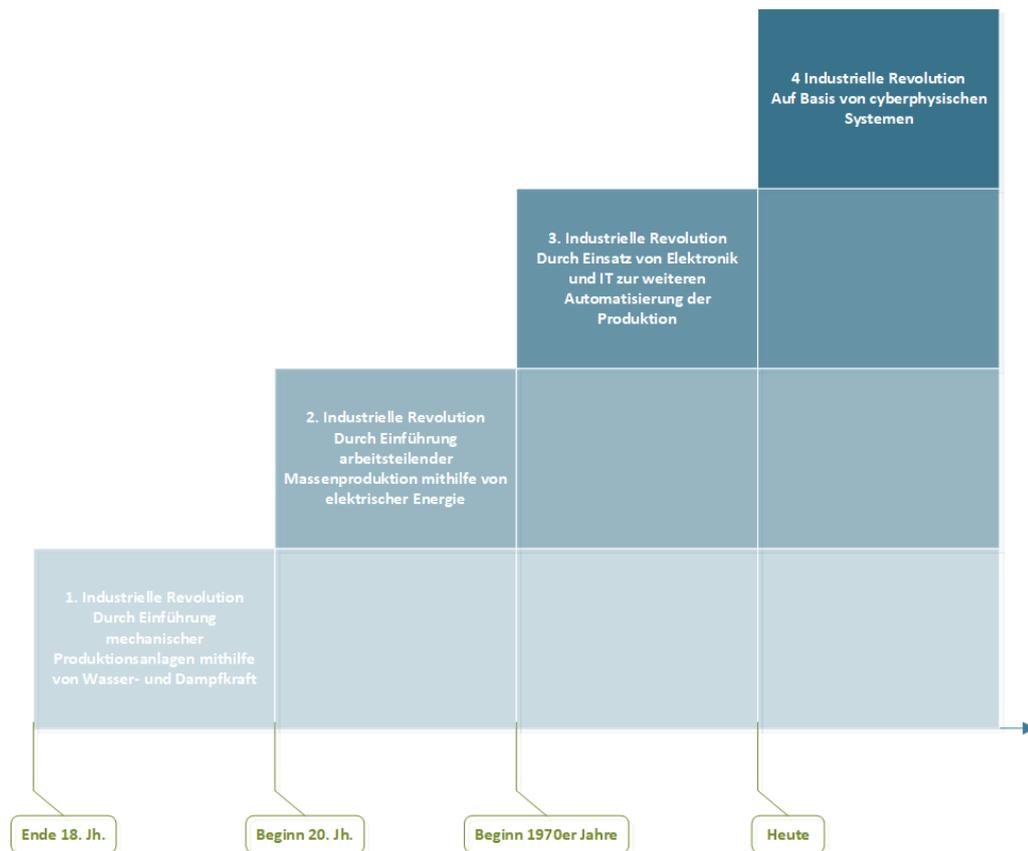


Abbildung 1 Übersicht industrielle Revolutionen. Nach (Industrie 4.0: Wenn die Revolution nach Österreich kommt, 2014)

2.2 Was ist Industrie 4.0?

Industrie 4.0 ist die vollständige Integration digitaler Automatisierung in den physikalischen Fertigungsprozess. (Brooks, 2017) Treibende Kraft hierbei ist die Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft. Durch die Verzahnung von Industrie 4.0 mit modernster Informations- und Kommunikationstechnik und der damit in Zusammenhang stehenden Veränderung der Art und Weise, wie produziert wird, entstehen intelligente Fabriken oder auch „Smart Factories.“ Von einem technischen Standpunkt aus grundlegend hierfür sind intelligente, digitalvernetzte Systeme, welche eine weitestgehend selbstorganisierte Produktion ermöglichen. (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) Hierbei erfassen moderne Fertigungsmaschinen den Zustand der Produktion über Sensoren und kommunizieren miteinander über Datenverbindungen. Sie organisieren ihre Abläufe selbstständig, füllen wenn nötig Lagerbestände über automatische Bestellungen auf und reagieren rasch auf Störungen und Ausfälle. (Industrie 4.0: Wenn die Revolution nach Österreich kommt, 2014) Die hierbei entstehenden intelligenten Wertschöpfungsketten schließen alle Phasen des Produktlebenszyklus mit ein und ermöglichen es, leichter maßgeschneiderte Produkte nach Kundenwünschen zu produzieren und dabei dennoch die Kosten der Produktion zu senken.

Anstelle nur eines Produktionsschrittes wird hierbei die ganze Wertschöpfungskette optimiert. (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie)

2.3 Neue Technologien

Im Folgenden sollen nun einige der Technologien, welche mit Industrie 4.0 in Zusammenhang stehen, aufgelistet und die sich daraus ergebenden Veränderungen in der Industrie betrachtet werden. Da sich die Industrie immer weiterentwickelt und kontinuierlich neue Technologien entstehen, kann hierbei nur schwer eine vollständige Liste aufgestellt werden. Die hier vorgestellten Technologien sind allerdings aus mehreren Quellen zusammengetragen und ermöglichen einen ersten Überblick.

2.3.1 Internet of Things

Ein Thema, welches im Zusammenhang mit Industrie 4.0 häufig genannt wird, ist das „Internet of Things.“ (IoT) Sei es in der Heimautomatisierung, bei der die Alltagsgegenstände über das Internet angebunden sind und den Bewohnern das Leben erleichtern, oder in der intelligenten Fabrik, in der sich Maschinen vollautomatisch untereinander abstimmen, um auf Probleme schnell reagieren zu können. Allgemein gesprochen wird unter IoT die Vernetzung von den verschiedensten Geräten verstanden. Die Daten der Maschinen stehen von außen zur Verfügung und ermöglichen so, dass der Fertigungsprozess automatisiert gesteuert werden kann. In Verbindung mit den Daten von Zulieferern und der Kunden lässt sich so die gesamte Wertschöpfungskette automatisieren. Wird beispielsweise ein Problem mit der Lieferung des Materials festgestellt, kann darauf reagiert und die Produktion umgeplant werden, wodurch sich Maschinenstillzeiten vermeiden lassen. (Schwab, 2016) Die Daten der Maschine zugänglich zu machen ist hierbei ein entscheidender Faktor für darauf basierende Analysen. (Kaufmann, 2015) (Ematinger, 2018) Dabei kommen neue, offene Technologien zum Einsatz, welche das Anbinden vereinfachen. Maschinen sind dabei über Webtechnologien angebunden, wodurch sich Automatisierungslösungen einfacher entwickeln lassen als mit den herkömmlichen Automatisierungstechnologien, da hierfür mit offenen Standards gearbeitet wird. Auch können diese um Cloud Dienstleistung erweitert werden, welche weitergehende Analysen ermöglichen. (Hänisch, 2017)

2.3.2 Cloud Dienstleistungen

Im Zusammenhang mit IoT stehen auch Cloud Dienstleistungen. Softwaresysteme werden hierbei auf über das Internet angebandenen Plattformen gehostet, wodurch sie über standardisierte Schnittstellen erreichbar sind. Die Anbieter werden hierbei nach den verwendeten Konzepten unterschieden. Stellt der Anbieter nur die Infrastruktur zur Verfügung während die Verwaltung der Server vom Kunden übernommen wird, spricht man in diesem Zusammenhang von „Infrastructure as a Service.“ (IaaS) Gibt es eine Plattform, welche dem Kunden einige grundlegenden Aufgaben abnimmt und fertige Funktionalität zur Verfügung stellt, spricht man von

„Platform as a Service.“ (PaaS) Übernimmt der Anbieter die gesamte Dienstleistung und der Kunde bezahlt nur für die Nutzung, dann spricht man von „Software as a Service.“ (SaaS) (Garg, 2010) Abbildung 2 veranschaulicht die Unterschiede der drei Ansätze.

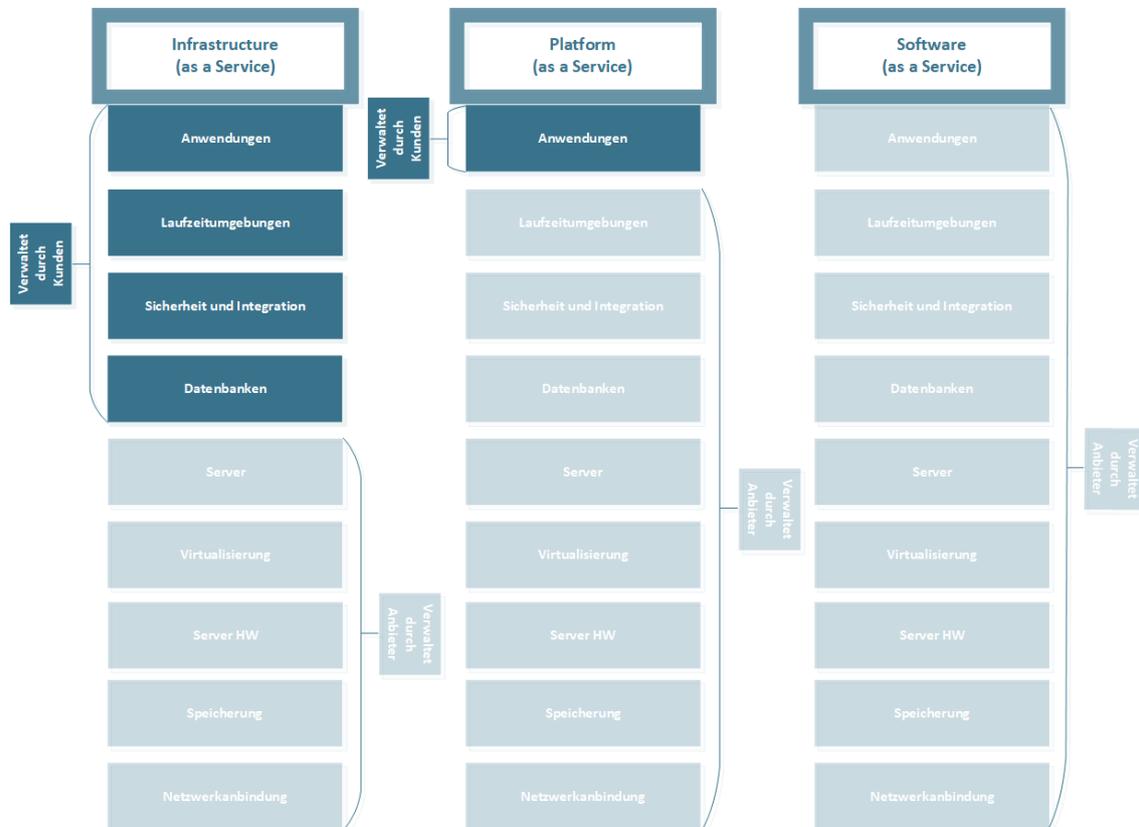


Abbildung 2 Vergleich IaaS, PaaS und SaaS. Nach (Garg, 2010)

Der Einsatz von Cloud Dienstleistungen hat sowohl Risiken als auch Chancen. Einerseits wird die Hoheit über die Daten in die Hände des Anbieters gelegt und durch die Anbindung an das Internet eine Angriffsfläche für Außenstehende geboten. Andererseits erspart man sich die Wartungskosten für die Infrastruktur und kann gegebenenfalls wertvolle Mehrdienstleistungen wie beispielsweise Analyse Services verwenden, welche über die Plattform verfügbar sind. Besonders die Skalierbarkeit kann hierbei von Vorteil sein, da bei hoher Rechenlast flexibel zusätzliche Ressourcen auf dem Server zur Verfügung gestellt werden können. Ein Mittelweg um die Auslagerung ins Internet zu umgehen ist das Hosten der Plattformumgebung auf einem Unternehmensserver. (Fauser, Ott, Böhm, & Wiedemann, 2017) (Bochkor, 2017)

Ein Beispiel für ein solches Cloud Angebot ist Microsoft Azure. Dort stehen vielfältige Services zur Verfügung, welche somit nicht mehr von den Verwendern selbst implementiert werden müssen. (Microsoft, 2018) Unter anderem befinden sich dort die „Microsoft Cognitive Services,“ eine Sammlung von Diensten zum Einsatz von künstlicher Intelligenz und maschinellem Lernen. Neben anderen Anwendungszwecken bietet Microsoft eine API für Emotionserkennung auf Bildern und einer Sprechererkennung in Audio Streams. (Microsoft, 2018) Zwar sind viele der Dienste noch in der Entwicklung, diese Services können jedoch die Einstiegshürde in den Bereich künstliche Intelligenz für Entwickler verringern und so neue Möglichkeiten erschließen. (Braun, 2017) (Dobrochynskyy, Moderieren mit Automatik, 2017)

Eine Weiterführung von Software as a Service ist „Function as a Service.“ (FaaS) In diesem Zusammenhang spricht man auch oft von „Serverless Computing.“ Hierbei werden kleine Funktionseinheiten zur Verfügung gestellt, welche atomare Funktionen übernehmen. Die Tatsache, dass die Aufgabe in der Cloud abgearbeitet wird, ist hierbei vollkommen herausabstrahiert. (Lorenz, Du sollst nicht programmieren, 2017)

2.3.3 Sensoren

Eine grundlegende Technologie für die Industrie 4.0 sind die Sensoren. Sowohl in den Fertigungsmaschinen als auch in den Produkten werden diese in einem immer höher werdenden Maße eingebaut und stärker integriert. Durch Multisensorsysteme ist es möglich den jeweiligen Zustand aus verschiedenen Gesichtspunkten zu erfassen und die individuellen Messgrößen miteinander in Beziehung zu setzen. Sensoren sind eine Schlüsselkomponente, da diese Daten über den aktuellen Zustand des Systems liefern und somit grundlegend für die Steuerung der Prozesse und weiterführende Analysen sind. (Veselovac & Jamal, 2014) Ein Beispiel für die Bedeutung der Sensoren findet sich in der Forschung zum autonomen Fahren. Dort ermöglichen es Multisensor-Systeme unter anderem bestehend aus Radar, LIDAR, Ultraschall-Sensoren und Kameras ein umfassendes Bild der Umgebung aufzunehmen welches essentiell ist, damit die Steuerung korrekte Fahrentscheidungen treffen kann. (Porteck, Alles im Blick?, 2018)

Während die Sensoren in klassischen Anlagen lediglich der Maschinensteuerung die notwendigen Daten zur Prozessüberwachung liefern wird es im Zusammenhang von Industrie 4.0 notwendig, dass diese Daten mit der gesamten Unternehmenssoftware austauschen. Somit werden Analysen ermöglicht, für die Steuerungssysteme wie zum Beispiel eine SPS nicht ausgelegt sind. Die Sensoren werden dadurch zu einer der wichtigsten Informationsquellen der Industrie 4.0. (Ermisch, 2017)

2.3.4 Kollaborative Roboter

Ein weiteres Thema, welches im Zusammenhang mit Industrie 4.0 diskutiert wird, sind Roboter. Die bisher in der Industrie eingesetzten Roboter sind in der Regel in separaten Bereichen abgeschirmt um sicherzustellen, dass beim Einsatz kein Mitarbeiter zu Schaden kommt. Diese Roboter führen schwere Aufgaben mit Präzision aus ohne dabei zu ermüden. (Hänisch, 2017) Da diese Aufgaben jedoch in der Regel fest sind und im Vorfeld aufwendig programmiert werden müssen, sind ihre Einsatzmöglichkeiten eingeschränkt. Im Zusammenhang mit Industrie 4.0 nimmt daher die Verwendung kollaborativer Roboter, sogenannter „Cobots,“ immer weiter zu. Diese müssen nicht getrennt von Menschen arbeiten, sondern arbeiten Seite an Seite mit ihren menschlichen Kollegen zusammen. Sensor Systeme sind hierbei im Einsatz um das Umfeld wahrzunehmen und Unfälle zu verhindern. Cobots lassen sich flexibler einsetzen und sind oft einfacher zu programmieren. Je nach Entwicklungsstufe der künstlichen Intelligenz können diese nicht nur Arbeitsabläufe ausführen, welche sie durch Interaktion erlernt haben, sondern diese auch aktiv an die Gegebenheiten anpassen und optimieren. (Masiske, 2017) (Ematinger, 2018)

Die Lernergebnisse der einzelnen Roboter können des Weiteren mit anderen geteilt werden und die Arbeitsschritte somit noch weiter verbessert werden. (Grävemeyer, Mit Feingefühl und auch mal autonom, 2018) In der Verbindung mit Cloud Technologien gibt es weiterführende Überlegungen diese Industrieroboter über eine zentrale Intelligenz zu steuern. Diese würde dann die Roboter entsprechend ihrer Fähigkeiten an der richtigen Stelle einsetzen und so die Produktion optimieren. Hierbei spricht man auch von Cloud Robotik. (Hänisch, 2017)

2.3.5 Virtuelle Realität

Eine weitere Technologie im Bereich von Industrie 4.0 ist die virtuelle Realität. Während diese Technologie einerseits in der Spiele- und Home Entertainment Industrie zum Einsatz kommt, lassen sich auch im betrieblichen Umfeld Einsatzmöglichkeiten dafür finden. In der Logistik helfen Datenbrillen Lagerarbeiten beispielsweise dabei, sich schnell im Lager zurecht zu finden und verbessern somit den Versandprozess. Techniker einer Anlage können von einem Spezialisten des Herstellers unterstützt werden ohne dass dieser direkt vor Ort sein muss. In der Regel werden hierbei dem Benutzer Inhalte über eine Brille angezeigt. (Ziegler, 2017) Unterschieden werden dabei die Varianten „Virtual Reality“ (VR), „Augmented Reality“ (AR) und „Merged Reality“ (MR). Bei VR wird die Außenwelt komplett ausgeblendet und der Benutzer taucht in eine digitale Umgebung ein. Diese könnte eine Aufnahme der realen Welt unter Zuhilfenahme mehrerer Kameras oder eine komplett künstliche, per CGI erstellte Welt sein. AR wiederum nimmt die Außenwelt und blendet zusätzliche Inhalte ein um die in der realen Welt existierenden Objekte um Zusatzinformationen anzureichern. MR geht noch einen Schritt weiter und ermöglicht es, über Steuerfunktionen sowohl mit Objekten in der virtuellen Realität als auch mit Objekten in der realen Welt zu interagieren. (State, 2017) Abbildung 3 stellt diese Ansätze einander gegenüber.

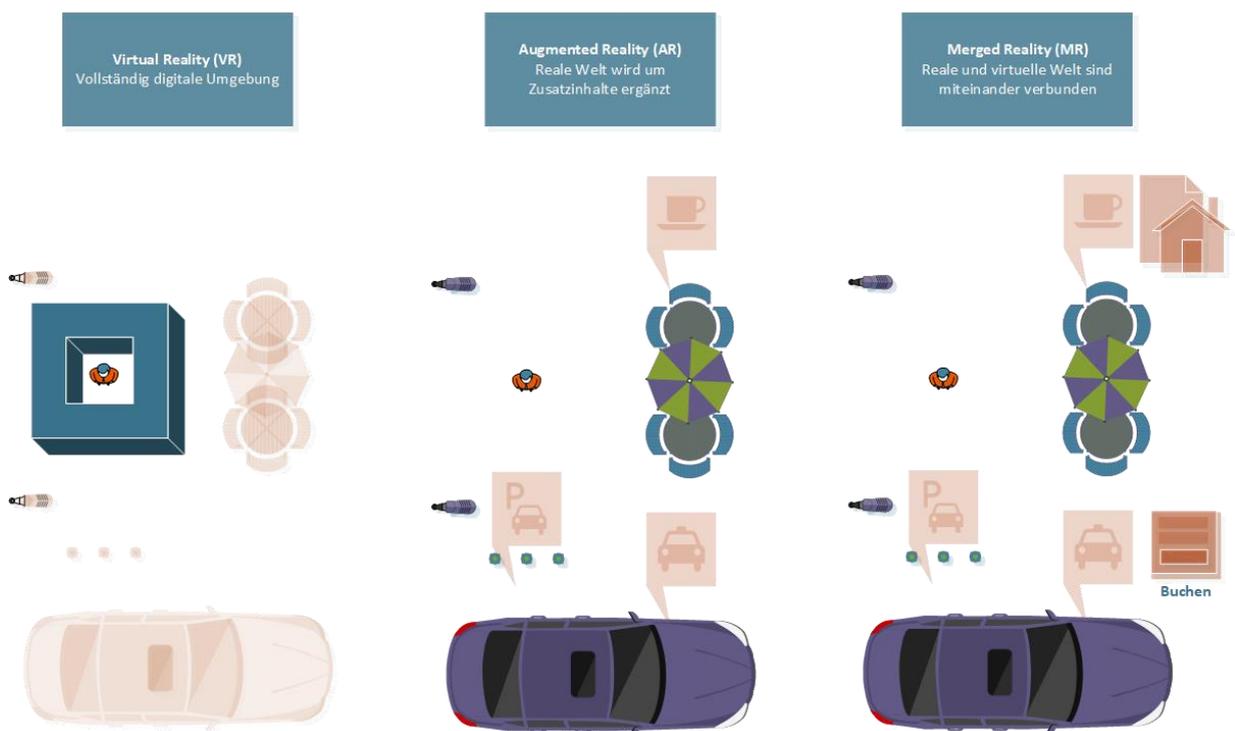


Abbildung 3 Unterscheidung VR/AR/MR. Nach (State, 2017)

In Zusammenhang mit dieser Technologie spricht man auch oft von der Immersion, dem Eintauchen in die virtuelle Welt. Um diese zu erleichtern sollten möglichst viele Sinne beteiligt sein. Passen die Eindrücke zwischen Bild und Umwelt nicht zusammen, wird dies als störend empfunden und kann zu Übelkeit führen, der sogenannten „Motion Sickness.“ (Hänisch, 2017)

2.3.6 Big Data und Data Science

Durch die zahlreichen Sensoren an den Maschinen entstehen große Datenmengen. Solche Datenmengen zu speichern, zu filtern und zur Verfügung zu stellen ist Hauptaugenmerk von Big Data. (Hänisch, 2017) Auf Basis dieser Daten können dann weiterführende Auswertungen aus dem Bereich der Data Science durchgeführt werden um einen Mehrwert zu erzeugen. In diesem Zusammenhang spricht man auch von Smart Data. (Kaufmann, 2015) Zwar wurden schon vor Industrie 4.0 Daten durch Sensoren erfasst und gespeichert, jedoch waren diese oft nicht von außen zugänglich und verblieben in sogenannten Daten-Silos. (Hänisch, 2017) Im Zusammenhang mit Industrie 4.0 ist es allerdings notwendig, diese zu erschließen und möglichst alle Daten der Produktion zu erfassen. Zu untersuchen ist hierbei auch, durch welche Datenlecks - also Bereiche in denen Daten nicht zugänglich sind und somit verlorengehen - dabei die meisten Probleme entstehen. (Baur & Wee, 2015) Die gesammelten Daten werden weiterverarbeitet und daraufhin in den Prozess zurückgeführt, um diesen zu verbessern. Somit wird versucht, das volle Potential der anfallenden Daten auszuschöpfen. (Brooks, 2017)

Ein Beispiel für eine Software in diesem Bereich bietet das Unternehmen SAP unter der Marke Leonardo. Die gesammelten Daten können dort mit Data Science Algorithmen analysiert werden. Somit ergeben sich Möglichkeiten wie Predictive Maintenance oder auch die Analyse der Verwendungsart der Produkte, um dadurch diese zu verbessern und neue zu entwickeln. (Schüler, Ganzheitliche Digitalisierung, 2017)

2.3.7 Künstliche Intelligenz

Ein weiterer Begriff, welcher im Zusammenhang mit Industrie 4.0 oft fällt, ist die künstliche Intelligenz. Generell werden unter diesem Begriff zahlreiche Ansätze zusammengefasst, bei denen Systeme automatisch Entscheidungen treffen oder auch Prognosen erstellen, auf Basis derer ein Anwender Entscheidungen treffen kann. Ein essentieller Hauptbereich moderner KI Systeme ist die Fähigkeit zu Lernen. (Dobrochynskyy, Eine neue Ära, 2017) Mit dieser Fähigkeit beschäftigt sich das sogenannte maschinelle Lernen. Dabei werden Daten in ein System gespeist, welches diese analysiert und daraus versucht Zusammenhänge abzuleiten. Ist dieses System mit ausreichend Daten angelernet, kann es in der Regel auf Basis von neuen Eingangsdaten Aussagen über einen voraussichtlichen Ausgang eines Prozesses treffen. Sind allerdings nicht genügend Eingangsdaten vorhanden, kann es zu fehlerhaften Prognosen kommen. Ein Beispiel aus der Industrie hierfür ist die „Predictive Maintenance,“ die vorausschauende Wartung. Während der Fertigung eines Produktes werden Sensor- und Verlaufsdaten gesammelt und anhand dieser Daten wird versucht, einen Zusammenhang mit anfallenden Wartungsarbeiten herzustellen. Auf Grundlage der Sensordaten kann das System

dann prognostizieren, wann die nächste Wartung fällig wird und diese so für den optimalen Zeitpunkt planen. Des Weiteren können auch Zusammenhänge zwischen Maschinenauslastung und der Wartungsanfälligkeit hergeleitet werden, auf Basis derer eine Maschinenauslastung, bei welcher der Wartungsaufwand minimiert wird, ermittelt werden kann. (Reiss, 2017)

Eine Umfrage der Cylance Inc. hat ergeben, dass sich Vorteile für Unternehmen erkennen lassen, welche bereits künstliche Intelligenz einsetzen. Neben der Verhinderung von Datenschutzverletzungen und der frühzeitigen Erkennung von IT Sicherheitsbedrohungen lässt sich durch künstliche Intelligenz an vielen Stellen die Lücke schließen, welche durch fehlende Fachkräfte entsteht. (Cylance, 2017) (Lauer, 2017)

Ein Beispiel für den effektiven Einsatz einer KI bietet Google Duplex. Dieses System ist in der Lage, selbstständig Telefonate zu führen und somit Aufgaben wie Bestellungen aufzugeben oder Terminvereinbarungen für den Anwender zu übernehmen. Allerdings muss der ethische Rahmen für ein solches System noch abgeklärt werden. Eine Möglichkeit wäre es, wenn sich das System zu Beginn eines Gesprächs zu erkennen geben müsste. (Porteck, Googles KI-Offensive, 2018)

Ein weiteres Einsatzgebiet von Spracherkennung ist die automatische Übersetzung. KI Systeme wie ein Deep-Neural-Network können dabei nicht nur die einzelnen Worte, sondern auch den Wortzusammenhang in Betracht ziehen. Dadurch wirken die Übersetzungen menschlicher und natürlicher. (Dobrochynskyy, Spracheingabe, 2018)

In der Medizin können KI Systeme Diagnosen anhand der vorhandenen Messdaten erstellen und so die Ärzte unterstützen. Diese Systeme können wesentlich mehr Parameter in Betracht ziehen als Ärzte und so Probleme erkennen, die sonst unter Umständen nicht erkannt worden wären. Da auch diese Systeme nicht unfehlbar sind werden sie in der Regel ergänzend eingesetzt. Sie dienen somit als Zweitmeinung und können helfen, den Auswirkungen des Fachkräftemangels entgegenzuwirken. (Grävemeyer, KI erkennt Krebs, 2018)

2.3.8 Autonome Transportmittel

Ein weiterer Einsatzbereich von künstlicher Intelligenz sind autonome Transportmittel. Beispiele hierfür wären selbstfahrende Automobile oder LKW, autonome Frachter oder auch Drohnen, welche selbstständig Botengänge durchführen. Durch Sensoren nehmen diese ihre Umwelt wahr und können so selbstständig zu ihrem Ziel navigieren und dabei Hindernisse umgehen. (Schwab, 2016) Neben dem Befördern von Personen lassen sich auch Güter transportieren. So können Pakete auch in nicht stark besiedelte Gebiete zügig geliefert werden. (Hänisch, 2017)

Ein nicht außer Acht zu lassender Gesichtspunkt ist hierbei die Rechtslage. Zwar sollten autonome Fahrzeuge möglichst Unfälle vermeiden, jedoch sind diese nicht gänzlich auszuschließen. Eine Ethik Kommission des Bundesverkehrsministers hat sich deshalb mit der Thematik befasst und festgelegt, dass das menschliche Leben hier Vorrang hat. Abwägungen zwischen Personen in Konfliktfällen sind jedoch ethisch nicht vertretbar, weswegen der Fahrer in einem solchen Fall eingreifen muss. Generell müssen Systeme protokollieren, welche Entscheidungen vom Fahrer und welche vom Fahrzeug getroffen werden. Denkt man den Gedanken des autonomen Fahrens weiter könnte man auch über eine zentrale

Verkehrssteuerung nachdenken. In einer solchen Situation würden allerdings zusätzliche Anforderungen an den Datenschutz gelten, welche die Hersteller von vornherein im Design ihrer Fahrzeuge vorsehen müssen. (Schulzki-Haddouti, Im Zweifel für den Menschen, 2017)

Die amerikanische Rechtsprechung behandelt in Sachen Sicherheit noch weitere Punkte, unter anderem den des Schutzes vor Cyber-Attacken. Der vom US-Repräsentantenhaus verabschiedete „Self-Drive-Act“ schreibt einen „Cyber-Security Plan“ vor, wodurch Hersteller eine Strategie zur Verhinderung von Cyber-Attacken auf die Fahrzeuge entwickeln müssen. Des Weiteren müssen diese einen „Privacy Plan“ entwickeln, um die Daten der Anwender zu schützen. Diese Pflicht entfällt jedoch, wenn die Hersteller von vornherein auf „Privacy by Design“ setzen und die Daten durch Verschlüsselung oder Anonymisierung keinem bestimmten Fahrzeug zuzuordnen sind. (Schulzki-Haddouti, Law & Order fürs Auto, 2017)

Eine alternative Herangehensweise zur Sensorik in den Fahrzeugen ist das Verlegen der Sensorik in die Infrastruktur. So könnten beispielsweise an verkehrstechnisch problematischen Stellen zusätzliche Sensoren und Kameras platziert werden, welche die Bewegungen der Verkehrsteilnehmer erkennen und mit den Verkehrsteilnehmern teilen. Diese Daten würden dann die Sensordaten am Fahrzeug ergänzen und bei der Unfallprävention helfen. Der Datenschutz ist jedoch auch hier eine Problematik, welche beachtet werden muss. (Schulzki-Haddouti, Personenschützer, 2018)

2.3.9 3D Druck

Eine weitere Technologie, welche zu einem Wandel in der Industrie geführt hat, ist der 3D Druck. Vor der Entwicklung dieser Technologie bestand in der Produktion aufgrund der herkömmlichen Fertigungsverfahren oft die Einschränkung, dass die Fertigung erst ab einer entsprechenden Mindeststückzahl für den Hersteller Gewinn erzielt. Diese Einschränkung ist beim 3D Druck nicht gegeben, Einzelanfertigung sind somit durchaus zu einem akzeptablen Preis machbar. Teile lassen sich so auf die individuellen Kundenbedürfnisse hin maßschneidern. Einsatzbereiche sind hierbei unter anderem der Prototypenbau, die Medizin oder auch die Herstellung von Ersatzteilen. (Schwab, 2016) Für größere Teile können diese Verfahren allerdings viel Zeit in Anspruch nehmen, wodurch in solchen Fällen weiterhin auf die herkömmlichen Verfahren zurückgegriffen werden muss. (Hänisch, 2017)

2.3.10 Digital Thread

Ein Problem, welches Unternehmen oft betrifft, sind Informationsverluste innerhalb der Wertschöpfungskette. Von der Konstruktion über die Fertigung bis hin zur Qualitätskontrolle des gefertigten Teils werden unterschiedliche Dateiformate verwendet. Dadurch ergeben sich unter Umständen Transformationsverluste, welche zu Fehlern führen können. Das „National Institute for Standards and Technology“ in den USA hat daher eine Initiative gestartet, um dem entgegenzuwirken, den sogenannten „Digital Thread.“ Alle Prozessschritte sollen hierbei auf einer gemeinsamen Datenbasis aufbauen und diese mit weiteren Informationen entsprechend

ihrer Aufgabe ergänzen. Die Transformationsverluste werden damit nahezu eliminiert. (National Institute of Standards and Technology, 2015)

2.3.11 Digital Twin

Eine weitere Technologie der Industrie 4.0 ist der Digital Twin. Hierbei wird während der Fertigung eines Teils anhand der Bewegungsdaten, der Sensordaten an der Maschine, eines Modells von Maschine und Material und von Algorithmen, welche entsprechend des Fertigungsverfahrens die Bearbeitung des Materials simulieren, parallel zur realen Fertigung ein Modell des Produktes erstellt, welches das reelle Werkstück widerspiegelt. Anhand dieses Modelles lassen sich Prognosen erstellen, ob das erstellte Teil den Anforderungen entsprechen wird, während es noch in der Fertigung ist. Das Werkstück kann somit im Fehlerfall korrigiert werden bevor es die Maschine verlässt. Das stellt einen großen Vorteil gegenüber dem nachgelagerten Prüfen des Teiles in der Qualitätssicherung dar. (Hardwick, 2017)

2.3.12 Blockchain

Ein weiterer Technologietrend, welcher die Industrie in den nächsten Jahren beeinflussen könnte, ist die Blockchain. Sie ist ein Protokoll zur Verifikation von Transaktionen ohne die Notwendigkeit einer neutralen Instanz wie z.B. einer Bank. Ein bekannter Einsatzbereich hierfür ist die Kryptowährung Bitcoin. Bei einer Blockchain muss eine Transaktion von allen an der Blockchain Beteiligten geprüft werden, bevor diese durchgeführt werden kann. Neben Bezahlvorgängen lässt sich diese Technologie auch zur generellen Verifikation von Transaktionen in anderen Branchen einsetzen. (Schwab, 2016)

Eine Blockchain setzt sich aus Blöcken zusammen, welche wiederum aus den die Transaktion beschreibenden Daten, dem Hash des Vorgängerblockes und der sogenannten „Proof of Work“ bestehen. Würde man einen Eintrag nachträglich ändern wollen, müsste man die Hash Werte aller darauffolgenden Blöcke neu berechnen. Die Proof of Work sorgt in diesem Fall dafür, dass die dafür benötigte Rechenleistung in die Höhe getrieben wird. Dadurch wird die Blockchain im Endeffekt gegen Änderungen abgesichert. Generell gilt, dass die Proof of Work die Berechnung erschweren, deren Bedingung allerdings einfach zu verifizieren sein soll. Wird diese Bedingung nicht erfüllt, so wird der Hash so lange mit jeweils veränderter Proof of Work neu berechnet, bis diese erfüllt ist. Blockchains können sowohl öffentlich oder auch privat wie beispielsweise zu firmeninternen Zwecken betrieben werden. (Schulz, Das macht Blockchain, 2017) (Schidler, Die Rätselkette, 2017)

Abbildung 4 veranschaulicht die Funktionsweise der Blockchain und den Zusammenhang mit Kryptowährungen.

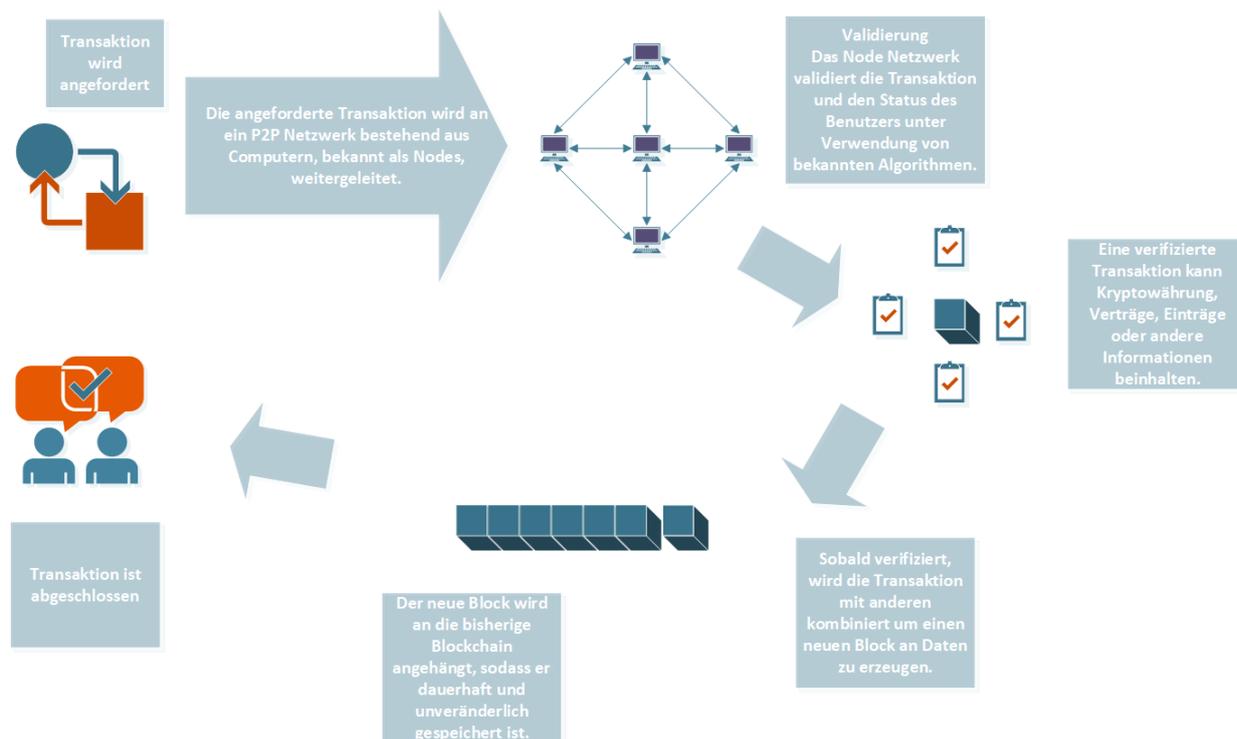


Abbildung 4 Funktionsweise von Blockchain. Nach (Rosic, 2017)

Smart Contracts sind in diesem Zusammenhang eine weiterentwickelte Form der Blockchain. Hierbei werden nicht nur Daten gespeichert, sondern ausführbarer Programmcode. Dieser wird innerhalb der Blöcke manipulationssicher gespeichert und beim Eintreten bestimmter Ereignisse ausgeführt. Auch juristische Verträge lassen sich hiermit aufgrund der gegen Manipulationen gesicherten Speicherung dauerhaft festhalten. Diese sind dabei nicht ausführbar, müssen allerdings in der von der jeweiligen Blockchain vorgegebenen Programmierform verfasst werden. Ein Beispiel für eine Blockchain welche Smart Contracts unterstützt ist Ethereum. (Schulz, Vertrag denkt mit, 2017) (Schidler, Die Rätselkette, 2017)

Ein Einsatzgebiet im industriellen Umfeld könnte im Zusammenhang mit dezentralen Geschäftskonzepten wie beispielsweise ein offener Marktplatz liegen. Hierbei bieten verschiedene Dienstleister ihre Produkte und Arbeitsleistungen an und Kunden können ihre Wertschöpfungskette frei kombinieren. Durch Smart Contracts könnten dabei die Rahmenbedingungen geschaffen werden ohne dass eine zentrale Verwaltung notwendig wäre. (Schidler, Hammer sucht Nagel, 2017)

2.3.13 Identifikationsverfahren

Wenn Produkte auf den Kunden maßgeschneidert hergestellt werden ist es wichtig, diese identifizieren zu können. Dadurch kann im Fehlerfall direkt nachvollzogen werden, wie dieser Fehler entstanden ist und schnell das passende Ersatzteil ermittelt werden. Neben den herkömmlichen optischen Verfahren wie Barcodes können hier auch RFID Chips in das Produkt eingebaut werden, wodurch das Produkt identifiziert und von Fälschungen unterschieden werden kann. Auch für Maschinen ist es wichtig, dass diese im Netzwerk eindeutig identifiziert werden

können. So können im Fehlerfall schnell Gegenmaßnahmen getroffen werden. Ans Netzwerk angebundene Maschinen können hierbei in der Regel über die IP Adresse identifiziert werden. (Hänisch, 2017)

2.4 Neue Geschäftsmodelle

Der ökonomische Nutzen von Technologien kommt erst durch das Einbinden dieser in die Geschäftsmodelle. (Ematinger, 2018) Es reicht also nicht, mit den neuen Technologien zu hantieren und zu zeigen, was alles möglich wäre. Diese müssen auch aktiv in die Geschäftsmodelle des Unternehmens eingebaut werden.

2.4.1 Servicebasierte Geschäftsmodelle

Ein Geschäftsmodell in diesem Zusammenhang ist der Verkauf von Servicedienstleistungen anstelle von konkreten Produkten. (Ematinger, 2018) In der Regel wird hierbei ein Servicevertrag mit dem Kunden geschlossen, in welchem sich der Hersteller des Gerätes dazu verpflichtet, dieses bereitzustellen und die ordnungsgemäße Funktion zu gewährleisten. Oft wird in diesem Zusammenhang auch nach Nutzungsdauer abgerechnet, wodurch der Kunde nur für die tatsächlich geleistete Arbeit bezahlt. Das Risiko der Anschaffungskosten geht in einem solchen Modell vom Kunden auf den Hersteller über. Der Hersteller hat dadurch jedoch Zugriff auf eine größere Menge an Nutzungsdaten, da er diese von den Kunden direkt zurückführen kann. Dies ist oft notwendig, da Analysen, welche unter anderem maschinelles Lernen verwenden erst ab einer gewissen Menge an Daten aussagekräftige Prognosen liefern. Durch die zusätzlichen Kundendaten können so unter anderem die Vorhersagen der Algorithmen zur vorausschauenden Wartung verbessert und der Wartungsaufwand weiter minimiert werden. (Kaufmann, 2015)

2.4.2 Unternehmensübergreifende Netzwerke

Für Unternehmen ist es unter Umständen nicht rentabel, alle Aspekte der Fertigung abzudecken. Hierfür bietet es sich an, mit anderen Unternehmen ein Netzwerk zu bilden. Die einzelnen Unternehmen können sich so auf ihre Kernkompetenzen konzentrieren und müssen sich nicht in die Bereiche der anderen Unternehmen einarbeiten. (Ematinger, 2018) Eine Weiterentwicklung dieses Gedankens ist der Marketplace, bei dem Unternehmen ihre Leistungen anbieten und andere Firmen frei daraus wählen können, um sich ihre individuelle Wertschöpfungskette flexibel zusammenzustellen. (Jahn, 2017) In diesem Zusammenhang spricht man auch von einer Plattform, bei der das Open-Source Konzept der Softwareentwicklung auf die Produktion angewendet wird. (Baur & Wee, 2015)

2.4.3 Personalisierte Produkte

Ein Problem welches Unternehmen oft haben ist, dass auf den Kunden abgestimmte Produkte zu teuer sind. Vor allem die Umrüstzeiten der Maschinen für einzelne Anfertigungen stellen

hierbei ein Problem dar. Durch Industrie 4.0 Technologien wird dieses Problem vermindert. Maschinen können sich auf Grundlage eindeutiger Identifikationsnummern automatisch an die notwendigen Fertigungsschritte anpassen und werden so flexibler. Durch das Aufkommen der 3D Druck Technologie ist es in dieser Hinsicht einfacher, für Kunden Einzelanfertigungen herzustellen. In diesem Zusammenhang haben sich neue Marktteilnehmer etabliert, welche mit bisherigen Herstellern konkurrieren. Im Bereich der Ersatzteil Produktion bieten sich hier weitere Möglichkeiten, da diese direkt beim Händler hergestellt werden können und so lange Lieferzeiten entfallen. (Kaufmann, 2015)

2.4.4 Fehler Vorausberechnung

Bei Prozessen mit hoher Fehleranfälligkeit und einer hohen Sensorabdeckung ist es möglich, durch mathematische Verfahren Fehler zu erkennen bevor diese überhaupt entstehen. Hierbei werden die Daten aus der Qualitätssicherung mit den Sensordaten aus der Fertigung in Relation gebracht und so die Auswirkung einer Sensorabweichung auf die Qualität analysiert. Das daraus resultierende mathematische Modell wird dann verwendet, um anhand von aktuellen Sensordaten Aussagen über die voraussichtliche Qualität des Produktes zu treffen und gegebenenfalls steuernd in den Prozess einzugreifen, bevor es zu Fehlern kommt. Eine Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass die Daten der Prozessschritte zur Verfügung stehen. (Kaufmann, 2015)

2.5 Auswirkungen auf Unternehmen

Die neuen Technologien und die daraus resultierenden Geschäftsmodelle stellen einige Chancen aber auch einige Risiken für Unternehmen dar. Daher soll im Folgenden untersucht werden, welche Auswirkungen dieser Wandel auf die Unternehmen hat.

2.5.1 Kundenanforderungen

Während in der Vergangenheit Kunden immer billigere Produkten forderten, wandeln sich diese Anforderungen immer mehr. Kunden möchten speziell auf ihre Bedürfnisse zugeschnittene Produkte. Des Weiteren werden auch immer kürzere Lieferzeiten gefordert, wodurch die Fertigung oft näher an den Kunden gerückt wird. In einem hochpreisigen Markt kurzfristig zu produzieren stellt eine große Herausforderung dar, für die eine neue Art, die Produktion zu gestalten und zu betreiben, benötigt wird. (Zühlke, 2016)

2.5.2 Wirtschaftlichkeit

Laut Jahn (2017) stellen die mit Industrie 4.0 verbundenen Umstellungen in einem Unternehmen eine große Investition dar, weshalb bei der Planung eine Prüfung der Wirtschaftlichkeit erfolgen sollte. Ein Nutzen liegt in der unternehmensübergreifenden Koordination der Produktion. Durch die sich daraus ergebenden verbesserten Reaktionszeiten auf Probleme in der

Wertschöpfungskette wird die Effizienz gesteigert. Allerdings kann nicht unbedingt ausgeschlossen werden, dass die Umstellung für ein lokales Unternehmen einen Nachteil darstellen würde, während sie für die übergeordnete Organisation von Vorteil ist. Dies muss bei der Planung berücksichtigt werden.

2.5.3 IT Architekturen

Nach Jahn (2017) wird im Kontext von Industrie 4.0 Transparenz und Vernetzung gefordert, was eine Herausforderung für existierende IT Architekturen darstellt.

2.5.3.1. Klassische IT Architekturen

Die klassische IT eines Industrieunternehmens ist hierarchisch aufgebaut. An der Spitze steht in der Regel ein ERP System, welches auf Unternehmensebene die Schnittstelle zu Vertrieb und Einkauf darstellt. Darunter kommt ein MES System als Schnittstelle auf Betriebsleitebene zwischen der Planung und der Steuerung der Fertigung. Auf Prozessleitebene überwachen SCADA die Fertigung anhand von Daten aus der Betriebsdatenerfassung (BDE) und der Maschinendatenerfassung (MDE). Überschreiten die Werte dort einen bestimmten Schwellwert, so werden entsprechende Maßnahmen eingeleitet. Die Steuerung der eigentlichen Fertigungsmaschine auf Steuerungsebene übernimmt die SPS. Auf der untersten Ebene, der Feldebene, befinden sich schließlich einerseits Sensoren, welche Daten erfassen und weiterleiten, und andererseits Anzeigen, welche die Meldungen der SPS ausgeben. Eher außerhalb dieser Automatisierungspyramide (siehe Abbildung 5) sind APS, welche eine bessere Planung sowohl auf strategischer als auch auf operativer Ebene vornehmen. Durch die Annahme von limitierten Ressourcen werden hierbei optimierte Lösungen angestrebt. (Burger, Lang, & Müller, 2017)

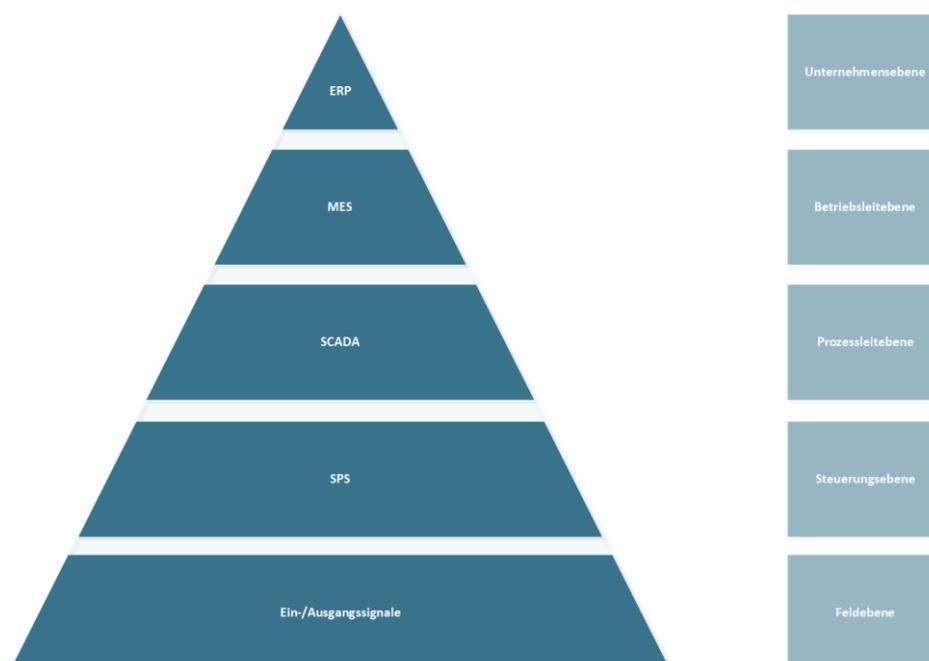


Abbildung 5 Automatisierungspyramide. Nach (Gronau, 2015)

Laut Jahn (2017) ist dabei der Ablauf in einem Störfall, dass diese nach oben hin weiter eskaliert wird bis ein System darauf reagieren kann. Dieser hierarchische Aufbau stellt gerade in größeren Unternehmen ein Problem dar, welches durch die unternehmensübergreifende Vernetzung so groß wird, dass die nötigen Prozessanpassungen nicht rechtzeitig durchgeführt werden können, um die gewünschte Effizienzsteigerung zu erreichen.

2.5.3.2. Cyber-physikalisches Produktionssystem

Daher plädiert Jahn (2017) für ein Umdenken auf dezentrale IT Architekturen. Dabei werden die einzelnen Bereiche der Produktion als Arbeitssysteme gesehen, welche sich gegenseitig durch Feedback koordinieren. Durch die Rückmeldungen der anderen Arbeitssysteme können die einzelnen Elemente der Wertschöpfungskette ihre Vorgehensweise selbst anpassen und optimieren. Die übergeordneten Systeme wie das ERP legen dann nur noch Zielvorgaben fest und erhalten in regelmäßigen Abständen eine Rückmeldung über den Stand in Bezug auf diese Zielvorgaben. Voraussetzung für dieses Vorgehen ist eine konsequente Verfolgbarkeit eines Auftrages durch die Wertschöpfungskette und eine unternehmensübergreifende Vernetzung durch Industrie 4.0 Technologien. Das daraus resultierende System wird auch als Cyber-physikalisches Produktionssystem (CPPS) bezeichnet.

Ein CPPS ist aus über Internet Technologie kommunizierenden, physischen Komponenten aufgebaut, den sogenannten Cyber-physikalischen Systemen (CPS). Die bisherigen monolithischen Produktionsanlagen werden dabei zu agilen, vernetzten Anlagen umstrukturiert. Diese vernetzten Bausteine des Produktionssystems können dabei durch Cloud Dienstleistungen noch weiter ergänzt werden. So könnten unter anderem Planung und Steuerung in die Cloud ausgelagert werden. Die resultierenden Systeme sind modular und individuell anpassbar. (Burger, Lang, & Müller, 2017) (Janiesch, 2017) Abbildung 6 veranschaulicht die Funktionsweise eines CPPS.

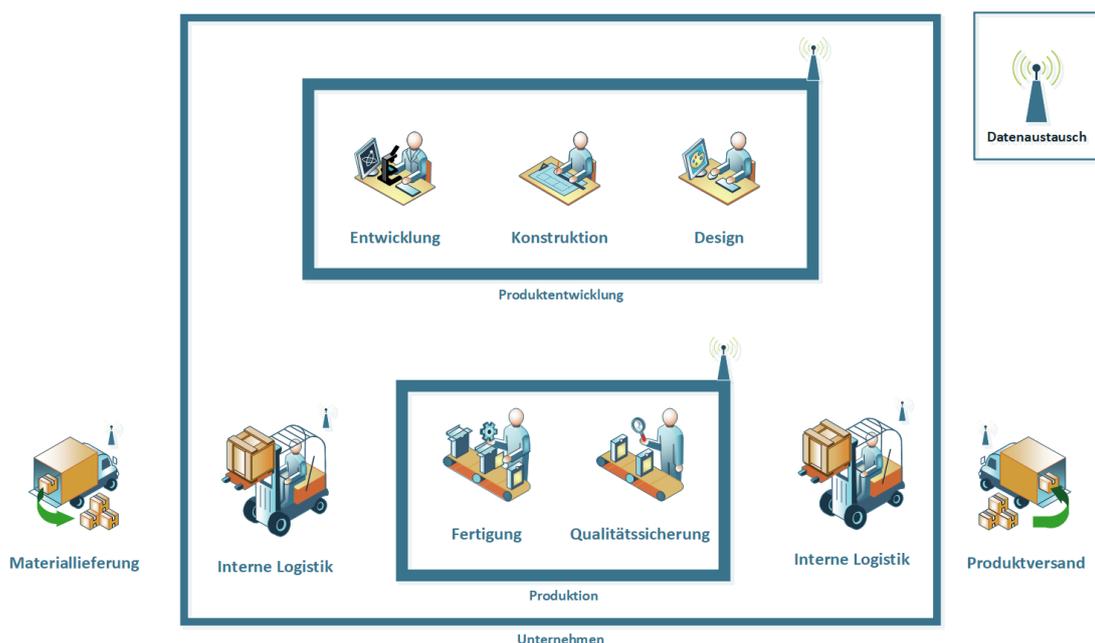


Abbildung 6 Funktionsweise eines CPPS. Nach (Thoben, Wiesner, & Wuest, 2017)

2.5.3.3. Gemeinsame Datenbasis

Eine Basisvoraussetzung für ein funktionierendes CPPS, welche Jahn (2017) nennt, ist eine gemeinsame Datenbasis für alle Arbeitssysteme. Dabei tauschen die Arbeitssysteme quantifizierbare Kontrollgrößen aus, um die unternehmensübergreifenden Zielvorgaben einzuhalten. Um Inkonsistenzen zu vermeiden wird empfohlen, eine zentralisierte Speicherung zu verwenden. Sogenannte Agenten und Dienste agieren dabei auf die Kontrollgrößen um die verschiedensten Aufgaben zu erfüllen, unter anderem Prozessanpassungen und Berichte an übergeordnete Systeme. Durch diese Datenbasis sind viele zusätzliche Einsatzmöglichkeiten denkbar. Allerdings stellt dies auch zusätzliche Anforderungen an den Datenschutz und die Sicherheit, welche im Konflikt mit der Anforderung, die Daten in Echtzeit verarbeiten zu können, stehen.

2.5.3.4. Kommunikationsstandards

Eine weitere Voraussetzung für die effektive Vernetzung von Maschinen sind einheitliche Kommunikationsstandards. Durch diese wird selbst in einer Umgebung, in der Maschinen von mehreren Herstellern eingesetzt werden, der Entwicklungsaufwand reduziert. Zühlke (2016) nennt dies auch einen „Plug-and-Produce“ Ansatz, analog zu einem Drucker, der direkt nach Anschluss verwendet werden kann, sollen Maschinen frei miteinander kombinierbar sein, ohne dass dabei zusätzlicher Aufwand getrieben werden muss. Allerdings sind in der Industrie derzeit mehrere konkurrierende Standards im Einsatz. Tabelle 1 stellt einige davon einander gegenüber. (Klein, Wolters, Dederichs, & Karl, 2016)

Des Weiteren ist im industriellen Umfeld hierbei ebenfalls problematisch, dass eine stabile und dauerhafte Verbindung zwischen den Maschinen nicht unbedingt gegeben ist. Ein Ansatz dem entgegenzuwirken sind Message Broker wie Sie beispielsweise in MQTT verwendet werden. (Mahn, 2018)

Tabelle 1 Gegenüberstellung von Kommunikationsstandards. Nach (Klein, Wolters, Dederichs, & Karl, 2016)

Kriterien	MQTT	MTConnect	OPC Classic	OPC UA
Interoperabilität	-Publish/ Subscribe-Prinzip	+Adapter	-nur Windows	+Basis-Modell
Skalierbarkeit	-sehr gering	-nur Shopfloor	-einzelne Spezifikation	+individuell
Sicherheit	-nicht innerhalb des Protokolls	-sehr begrenzt	+individuell	+individuell
Transportfähigkeit	+hohe Performance	+hohe Performance	-COM- Technologie	+individuell
Modellierung	-nur sehr simpel	-starre Definition	-einzelne Spezifikation	+Informationsmodell
Plug-and- Produce- Tauglichkeit	+Publish/ Subscribe-Prinzip	+Agent-Funktion	+sehr ausgeprägt	+sehr ausgeprägt
Konformität	-offener Standard	-nicht vorhanden	+mehrstufige Tests	+mehrstufige Tests
Bekanntheitsgrad	Facebook Messenger	Primär in den USA	In Europa hoch	Nachfolge von OPC, viele Piloten

2.5.3.5. IT Sicherheit

Durch den vermehrten Einsatz von Internettechnologie in der Produktion bekommt das Thema Sicherheit immer mehr Relevanz. Während die Angriffsfläche für Hacker von Seiten der Fabrikhallen bisher eher gering war, wird diese durch die Vernetzung der Maschinen immer größer. Daher muss auf die Balance zwischen dem Risiko und dem Potential neuer Lösungen geachtet werden. (Zühlke, 2016)

2.6 Generelle Anforderungen

Im Folgenden sollen nun aus der Perspektive von IT-Entscheidern aus Industrieunternehmen Überlegungen angestellt werden, welche Anforderungen die im Unternehmen verwendete Software und die damit verbundenen Systeme im Zusammenhang mit Industrie 4.0 erfüllen sollten.

2.6.1 Große Industriekonzerne

Für große Industriekonzerne liegt in der Regel das Augenmerk auf die gesamte Wertschöpfungskette. Diese gilt es als Ganzes zu optimieren. Hierbei liegt im Zusammenhang mit Industrie 4.0 nahe, die Produktion zu einem CPPS umzuorganisieren. Meist sind an der Produktion auch Tochterunternehmen und Zulieferer beteiligt. Um eine vollständige Umstellung zu erreichen, müssen diese kooperieren und ihre Daten dem neuen System zur Verfügung stellen.

Ein Gesichtspunkt, der hierbei zu beachten ist, ist die Modularität des CPPS und die notwendige Flexibilität. Die einzelnen Bestandteile des Systems müssen flexibel miteinander kombinierbar sein sich schnell an veränderte Gegebenheiten anpassen lassen. Unter Umständen möchte der Konzern in der Lage sein, neue Zulieferer aus einem Marketplace einfach zu integrieren und somit die Bandbreite des CPPS zu erweitern. In Zeiten von hohem Lieferdruck ließe sich so die Produktionskapazität flexibel erweitern. Auch ist denkbar, dass unterschiedliche Zulieferer des gleichen Teilproduktes miteinander verglichen werden und dies als Grundlage für weiterführende Entscheidungen dient.

Ebenfalls wichtig ist die Verfügbarkeit der Daten der einzelnen Teilsysteme. Um diverse Analysen zu ermöglichen ist es essentiell, dass diese Daten möglichst vollständig zu Verfügung stehen. Dadurch werden diese Anforderungen auch für Zulieferer relevant. Durch die Verfügbarkeit der Daten in einem umfassenden Maße werden umfassende Analysen aus dem Bereich der Data Science möglich, welche zusätzliche Optimierungspotentiale aufdecken und unter Umständen Schwachstellen in dem CPPS aufdecken können. Auch könnten Zusammenhänge mit Problemen in der Produktion und der Wahl des jeweiligen Zulieferers des Rohmaterials erkennbar werden.

Ein weiterer Gesichtspunkt ist die Autonomie des Systems. In der intelligenten Fabrik sollten die einzelnen Teilsysteme in der Lage sein, sich selbstständig mit den anderen Systemen zu koordinieren und die Wertschöpfungskette zu optimieren. Die vom ERP System vorgegebenen Kennzahlen, wann welches Produkt geliefert werden muss, sollten von den individuellen Systemen automatisiert ausgewertet werden und die zu produzierenden Teile sollten darauf hin selbstständig ihren Weg durch die Produktion finden. In Störungsfällen sollten die Systeme diese kommunizieren und entsprechende Gegenmaßnahmen automatisch in die Wege leiten. Auch ist denkbar, dass bei mehreren Zulieferern für dasselbe Teilprodukt im Fall von Lieferschwierigkeiten automatisch ein entsprechender alternativerer Zulieferer gewählt wird.

Zusammenfassend lässt sich für große Konzerne sagen, dass diese ihre Wertschöpfungskette nahezu vollständig in ein CPPS überführen könnten. Die dabei verwendeten Systeme müssen

deswegen die notwendigen Schnittstellen zur Datenweitergabe und zur Anpassung an die Gegebenheiten zur Verfügung stellen, sprich der Definition eines CPS genügen.

2.6.2 Zulieferer

Teil der Wertschöpfungskette eines großen Konzerns sind in der Regel Zulieferer. Im Zusammenhang mit einer Industrie 4.0 Umstellung kommen auf diese jedoch noch weitere Anforderungen zu.

Unter Umständen sind Zulieferer nicht nur Teil einer Wertschöpfungskette, sondern mehrerer. Zulieferer könnten Teile für mehrere größere Firmen liefern, welche alle eine Umstellung auf ein CPPS durchführen könnten. Daher müssen die verwendeten Systeme mit all diesen übergeordneten Systemen kooperieren. Die Daten der Produktion müssen den jeweiligen Systemen zur Verfügung gestellt werden können. Hierbei muss flexibel unterschieden werden, welche Daten an welches System geliefert werden. Gerade bei der Fertigung von Standardteilen, welche an mehrere Unternehmen geliefert werden, kann dies zusätzlichen Verwaltungsaufwand bedeuten.

Ein weiteres Problem kommt bei der flexiblen Anpassung der Produktion auf die Zulieferer zu. Bei sich zeitlich überlappenden Bestellungen mehrerer Kunden könnte es dazu kommen, dass nicht alle Kunden zur geforderten Zeit beliefert werden können. Für einen solchen Fall muss die Möglichkeit einer Priorisierung gegeben sein, damit das System selbstständig eine Entscheidung treffen kann. Auch ist eine Anbindung an Mitbewerber denkbar um in einer solchen Situation die Bestellung an diese weiterleiten zu können.

Problematisch ist für die Zulieferer die Frage der Wirtschaftlichkeit einer solchen Umstellung. Einerseits ist diese auf Dauer kaum zu vermeiden, wenn die Kunden die Systeme des Zulieferers als Teil eines CPPS einsetzen wollen. Andererseits ist die Umstellung mit Investitionen verbunden, welche der Zulieferer nur bedingt wieder zurückerhalten könnte. Während große Konzerne von der Produktivitätssteigerung profitieren machen sich die Vorteile davon nicht unbedingt bei den einzelnen Teilsystemen der Wertschöpfungskette bemerkbar (vergleiche 2.5.2). Eine Vorgehensweise, welche dieses Problem mildern könnte, ist die Umstellung der Produktion in Teilschritten. Hierfür ist es notwendig, dass die verwendeten Systeme einen solchen Hybridbetrieb zulassen. Auch wäre es denkbar, bestehende Maschinen mit Sensoren und IoT Technologie aufzurüsten um die Anschaffung von neuen Maschinen zu vermeiden. Hierfür ist zusätzliche Flexibilität bei den Systemen gefragt, damit diese mit den Systemen der Adapterhersteller kommunizieren können. Allerdings sind bei der Erweiterung von Maschinen unter Umständen Grenzen vorhanden, da nicht alle Altsysteme unbedingt kompatibel sind.

Für Zulieferer stellt die Umstellung also eine große Herausforderung dar, da diese sich in einem Spannungsfeld zwischen den Anforderungen ihrer Kunden und ihren limitierten Ressourcen befinden. Lösungen zu einer inkrementellen Umstellung sind daher von Vorteil.

2.6.3 Kleinere Unternehmen

Eine weitere zu betrachtende Kategorie sind kleinere Unternehmen, welche nicht Teil einer größeren Wertschöpfungskette sind. Durch diese Unabhängigkeit besteht in erster Linie kein Zwang, größere Investitionen im Bereich Industrie 4.0 zu tätigen. Allerdings besteht auch bei diesen Unternehmen Potential die Produktion zu verbessern. Grundsätzlich kann hierbei inkrementell vorgegangen und somit die Größe der Investition limitiert werden.

Solange die Anforderungen an die Produkte sich nicht ändern könnte hierbei die Priorität auf das Erkennen und Beheben von Problemen in der Produktion gelegt werden. Die Vorhandenen Systeme könnten hierbei vernetzt werden, sodass Engpässe schnell erkannt und Gegenmaßnahmen getroffen werden können. Auch ist denkbar, Analysen zu den Ursachen von Problemen in der Produktion anzustoßen. Hierzu ist wichtig, die Daten der Maschinen zugänglich zu machen und an die entsprechenden Stellen weiterzuleiten. Sollte die Expertise hierfür im Unternehmen fehlen, könnten die Daten an einen externen Dienstleister weitergegeben werden, der mit der Analyse beauftragt wird.

Eine weitere Möglichkeit ist die Optimierung der Auslastung der Maschinen. Hierbei könnte auf Störungen oder Materialengpässe flexibel reagiert werden, indem gegebenenfalls andere Fertigungsaufträge vorgezogen werden. Sind beispielsweise mehrere Maschinen an der Fertigung eines Teiles beteiligt und die erste hat eine Störung, könnten die darauffolgenden Maschinen andere Aufträge vorziehen und somit Standzeiten vermeiden. Diese könnte auch mit der Planung von Wartungsarbeiten verbunden werden, welche vorgezogen werden könnten, sobald sich längere Stillstandzeiten abzeichnen.

Kleinere Unternehmen sind also nicht unmittelbar von den Veränderungen durch Industrie 4.0 betroffen. Dennoch könnte es sich für sie lohnen, inkrementell Schritte zur Verbesserung der Produktivität im Unternehmen durchzuführen. Hierbei ist die Anbindung an einen Marketplace, bei welchem sich das Unternehmen unter Umständen die nötige Expertise einkaufen kann, von Vorteil.

2.7 Anforderungen an Messtechnik

Im Folgenden soll nun untersucht werden, welche Anforderungen auf Messtechnik Systeme und im speziellen auf die Software zukommen, wenn eine Unternehmen eine Umstellung in Richtung Industrie 4.0 anstrebt. Hierbei wird zunächst definiert, was im Rahmen dieser Arbeit unter Messtechnik verstanden wird. Danach wird auf die einzelnen betroffenen Teilaspekte eingegangen und untersucht, wie diese von der Umstellung betroffen sind.

2.7.1 Definition der Messtechnik

Messtechnik ist ein zentraler Teil industrieller Wertschöpfungsketten, welcher unverzichtbar für das Qualitätsmanagement ist. In der Designphase eines Produktes werden Eigenschaften wie beispielsweise Maße oder Oberflächenbeschaffenheit festgelegt welche notwendig sind damit

das Produkt seinen Zweck erfüllen kann. Bevor dieses Produkt an darauffolgende Arbeitsschritte oder an den Endkunden weitergeleitet werden kann ist es wichtig festzustellen, ob die geforderten Eigenschaften erfüllt sind. Somit kann die Gebrauchsfähigkeit des Produktes innerhalb der gegebenen Messunsicherheit gewährleistet werden. Hauptaufgabe der Messtechnik ist hierbei die notwendigen Mittel zur Verfügung zu stellen um diese Überprüfung zu ermöglichen. Hierbei haben sich unterschiedliche Technologien mit unterschiedlichen Eigenschaften entwickelt, welche je nach Anforderungen an Messunsicherheit und Messgeschwindigkeit zum Einsatz kommen. (Keferstein & Dutschke, 2008) Stellt man beispielsweise die taktile Messung der optischen gegenüber stellt man fest, dass das Antasten mit einem Tastsystem in der Regel genauer ist, während die Aufnahme mit optischen Systemen meist schneller verläuft und diese Systeme besser mit größeren Stückzahlen zurecht kommen. Neben diesen und einigen weiteren Technologien zur Messung beschäftigt sich die Messtechniksoftware in der Regel auch mit der Verwaltung und statistischen Aufbereitung der Messdaten sowie mit diversen weiteren Aufbereitungsmöglichkeiten der Daten.

2.7.2 Datenverfügbarkeit

Eine Anforderung an die Messsysteme ist die Verfügbarkeit der Daten. Da diese ein Abbild des Zustandes in der Produktion aufnehmen, ist die Bedeutung dieser Daten ähnlich denen der Sensorsysteme (vergleiche 2.3.3). Hierbei ist es wichtig, nicht nur Informationen über eine Gut-/Schlecht-Bewertung eines Teils weiterzugeben, sondern die vollständigen Rohdaten zur Verfügung zu stellen. Diese Daten könnten unter Umständen Basis für weiterführende Analysen sein. So könnten beispielsweise die Daten zusammen mit den Sensordaten der Produktionsmaschine Eingangsdaten für eine auf maschinellem Lernen basierende Analyse sein welche Zusammenhänge zwischen den Sensordaten und den Abweichungen in den betroffenen Bereichen herstellt. Die Erkennung von Fehlern im Voraus (vergleiche 2.4.4) könnte auf Basis dieser Daten umgesetzt werden.

Da hierbei nicht davon ausgegangen werden kann, dass alle Kunden dieselben Technologien einsetzen, werden in diesem Zusammenhang auch weitere Anforderungen an die Flexibilität der Datenschnittstelle deutlich. Daher ist es hierbei notwendig, eine offene, auf Standards basierende Schnittstelle zur Verfügung zu stellen, welche sich flexibel an die Bedürfnisse des Kunden anpassen lässt.

2.7.3 Flexibilität in der Auftragsplanung

Parallel zu den Fertigungsmaschinen gilt es auch bei den Messmaschinen, ihre Auslastung zu optimieren. Die Messung könnte hierbei am Ende der Fertigung oder zwischendurch auf Basis von Teilprodukten durchgeführt werden. Um eine Auslastung der Maschinen zu gewährleisten, gilt es hierbei flexibel auf Störungen in der Produktion zu reagieren. Analog zu nachfolgenden Fertigungsschritten könnten hierbei andere Messaufträge vorgezogen oder Wartungsbeziehungsweise Kalibriertätigkeiten eingeplant werden. Sollte es zu Störungen an der Messmaschine kommen müssen gegebenenfalls darauf aufbauende Fertigungsschritte oder der

auf die Teile wartende Kunde über die Verzögerung informiert werden. Auch ein flexibler Wechsel auf eine andere Messmaschine wäre denkbar, jedoch ist hierbei zu beachten, dass dies zu geringfügig anderen Messergebnissen führen kann. Sollte die Fertigung eines Produktes über einen längeren Zeitraum hinweg anhand von historischen Daten analysiert werden, könnte dies zu unerwarteten Abweichungen in der Grafik führen. Analyseergebnisse könnten somit verfälscht werden und daraus falsche Schlüsse gezogen werden.

Generell müssen die Messmaschinen auf Dauer hinweg ähnliche Anforderungen wie die Fertigungsmaschinen erfüllen. Dies Messmaschinen werden somit zu einer eigenen Form eines CPS. Ähnlich zu den Datenschnittstellen gilt auch hierbei, dass Flexibilität gewährleistet sein muss und die jeweiligen Systeme des Kunden unterstützt werden müssen.

2.7.4 Weiterverwendung der Daten aus anderen Systemen

Ein weiterer Anwendungsfall wäre die Verwendung der Daten aus anderen Systemen, um den Ablauf der Messung zu verbessern. Die Sensordaten der Fertigungsmaschine könnten beispielsweise als Indikatoren genommen werden, um mögliche kritische Bereiche zu erkennen. So könnte die Messdichte an diesen Stellen erhöht werden, um eventuelle Fehler zu vermeiden. Auch könnten anhand der Daten prägnante Bereiche des Teiles identifiziert werden, welche eine frühzeitige Erkennung von fehlerhaften Teilen ermöglichen. Durch eine vorgezogene Messung konzentriert auf diese prägnanten Bereiche könnte somit vermieden werden, ein fehlerhaftes Teil vollständig zu vermessen.

Um aus den Daten der anderen Systeme Nutzen zu ziehen, muss die Software des Messsystems intern flexibel aufgebaut sein, um für die jeweiligen Einsatzmöglichkeiten erweiterbar zu sein. Die Verwendung von Fremddaten zur Erweiterung der Funktionalität erfordert des Weiteren, dass die verschiedenen Kommunikationsstandards, welche die Maschinen zu Weitergabe ihrer Daten verwenden, unterstützt werden. Ein einheitlicher Standard bei den unterschiedlichen Kunden lässt sich auch hier nicht voraussetzen.

2.8 Zusammenfassung des Theorieteils

Im vorangegangenen Theorieteil wurde der Begriff Industrie 4.0 erläutert und die damit verbundenen Technologien analysiert. Im Zusammenhang mit Industrie 4.0 wird eine vollständige Vernetzung der Produktion zu einer intelligenten Fabrik angestrebt, welche sich selbstständig an die jeweiligen Gegebenheiten anpasst. Daraufhin wurden dann die Auswirkungen auf die Geschäftsmodelle der Unternehmen und die Auswirkungen auf die Unternehmensstruktur erläutert. Hierbei müssen Unternehmen sich von den starren, klassischen Strukturen abwenden und auf ein flexibles, modulares System wie ein CPPS umstellen, um von den Technologien der Industrie 4.0 den vollen Nutzen ziehen zu können. Anschließend wurden die Anforderungen an die Software und die damit verbundenen Systeme erörtert und daraus Schlussfolgerungen für die Anforderungen im Bereich der Messtechnik gezogen.

3 PRAXISTEIL

Im Folgenden soll nun aus der vorangegangenen Analyse eine Softwarearchitektur entwickelt werden, welche den erarbeiteten Anforderungen gerecht wird. Hierbei wird inkrementell vorgegangen und für die jeweiligen Anforderungen zunächst die aktuelle Situation, inwieweit die bisherigen Softwaresysteme hierfür bereits Funktionalität zur Verfügung stellen, untersucht und daraufhin eine Architekturlösung für die Anforderung erarbeitet. Danach werden die verschiedenen Ansätze zu einer Basis Architektur kombiniert und diese um generelle Konzepte ergänzt. Diese soll dann auf das Beispiel einer Software zur Auslastungsplanung von Messmaschinen übertragen werden und somit auf Grundlage des konkreten Einsatzbereiches auf die Erfüllung der Anforderungen hin untersucht werden.

Zur Vereinheitlichung und in Anlehnung an den Begriff CPPS wird im Folgenden die Bezeichnung „Cyber-Physikalisches Messsystem“ (CPMS) verwendet. Hierunter wird generell ein CPS für Messtechnik verstanden. Konkret beschreibt beispielsweise der Begriff „CPMS Maschine“ die entsprechende cyber-physikalische Repräsentation einer Messmaschine.

3.1 Datenverfügbarkeit

Zunächst soll die Situation der Datenverfügbarkeit untersucht werden. In diesen Bereich fallen generell Anwendungsfälle, bei denen andere Systeme Daten von dem CPMS erhalten beziehungsweise auslesen müssen. Dabei kann es sich um eigene Systeme des Mitutoyo Konzerns oder aber auch um Systeme von externen Anbietern handeln. Wichtig ist hierbei, dass die Systeme über eine definierte Schnittstelle angebunden sind.

3.1.1 Aktueller Zustand

Ein Bereich, welcher schon sehr lange Teil der Messtechnik Software ist, ist die Anbindung an Statistik und Reporting Systeme. Hierbei werden Messergebnisse wie beispielsweise aufgenommene Messpunkte oder ermittelte Ist-Maße an das entsprechende Statistik-System gesendet und daraus Reports erstellt, welche zur Dokumentation und als Nachweis der durchgeführten Messung dienen. Besonders der Aspekt der Nachverfolgbarkeit ist hierbei sehr wichtig, da im Falle eines Fehlers eines Produktes herausgefunden werden muss, an welcher Stelle hierbei die Ursache des Fehlers liegt. Die Daten zu den jeweiligen Messungen müssen daher auf längere Zeit hin verfügbar sein und, im Falle das ein Teilprodukt für die Weiterverarbeitung in einem anderen Unternehmen hergestellt wird, den Kunden zur Verfügung gestellt werden. Die hierfür notwendigen Anbindungen an die Statistik Systeme sind meist pro System individuell implementiert und müssen für neue Systeme meist neu entwickelt werden. Eine einheitliche Schnittstelle ist hierbei nicht gegeben. Im Folgenden werden diese Anbindung als Daten Export bezeichnet.

Ein weiterer Aspekt ist die Überwachung der einzelnen Maschinen und eine Erstellung von Nutzungsstatistiken. Hierfür stellt die Messsoftware seit einigen Jahren ein auf MTConnect basierendes Interface zu Status Überwachung zur Verfügung, im folgenden Status Interface genannt. Dies ermöglicht es, den aktuellen Zustand der Maschine abzufragen und unter anderem festzustellen, welches Teil aktuell vermessen wird, ob die Maschine im Wartungszustand ist oder ob die Maschine sich im Leerlauf befindet und zur Verfügung steht. Neben kleineren Drittanbietern, welche Software zur Status Überwachung anbieten und somit auf die Daten zugreifen können, hat Mitutoyo auch eine eigene Software zur Status Überwachung entwickelt. Allerdings hat die bisherige Software einige Probleme aufgrund der Schnittstelle. Da das Status Interface immer nur den aktuellen Zustand wiedergibt, fehlt eine Historie der individuellen Ereignisse. Somit ist die Status Überwachung gezwungen, kontinuierlich mitzulaufen um einen Verlauf erzeugen zu können und Statistiken zu erstellen. Auch ist die Wahl der Schnittstellentechnologie problematisch, da andere Kunden unter Umständen eine andere Schnittstelle benötigen (vergleiche 2.5.3.4).

Abbildung 7 veranschaulicht die gesamte Situation der im Folgenden untersuchten Software. Auf den Remote Trigger wird an einem späteren Abschnitt noch eingegangen.

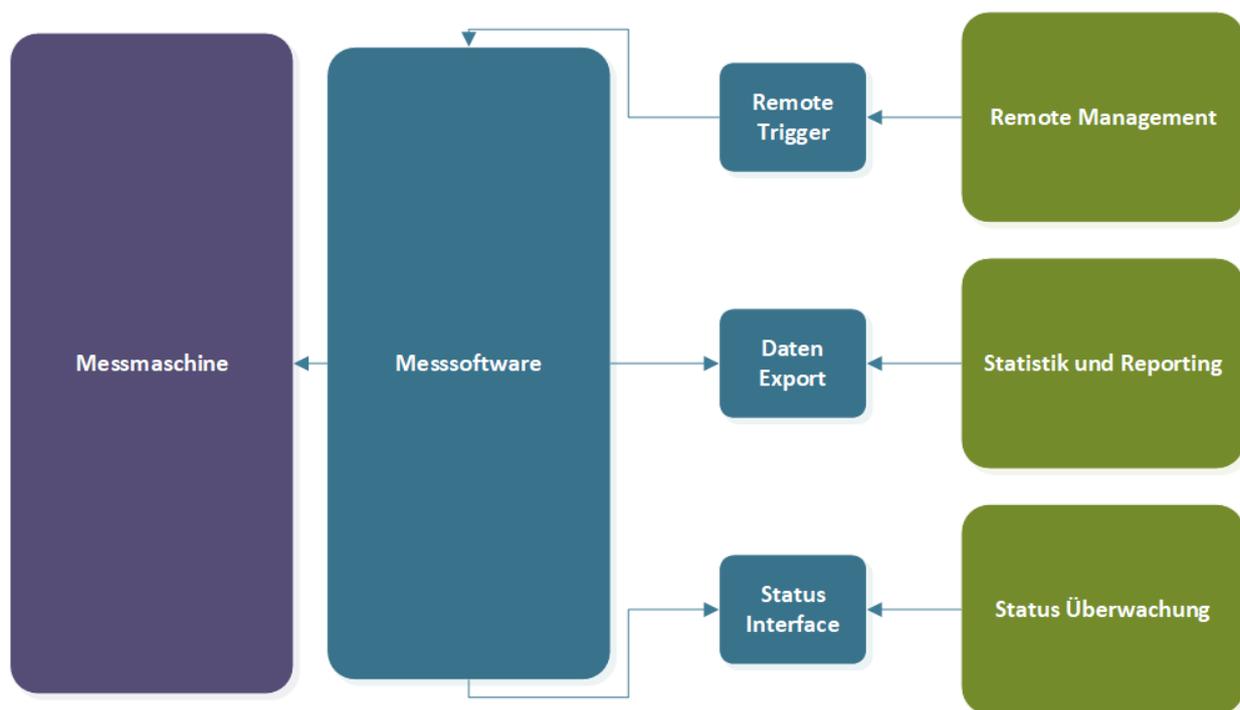


Abbildung 7 Aktueller Zustand der Softwaresysteme

3.1.2 Übertragung auf CPMS

Um die Anbindung an andere Systeme zu verbessern liegt es nahe, einen Middleware Layer zu designen, welcher die aktuellen Schnittstellen der Software nimmt und sie auf die individuellen Bedürfnisse anpasst. Für die Status Überwachung wäre dies ein System, welches regelmäßig den Status abfragt und diese Information in einen Stream an Ereignissen umwandelt. Dieser würde dann über eine allgemeine Schnittstelle zur Verfügung gestellt, welche sowohl von der

eigenen Software als auch von der Software von Fremdanbietern angesprochen werden kann. Abbildung 8 veranschaulicht die Funktionsweise dieser Middleware übertragen auf das vorangegangene Schaubild.

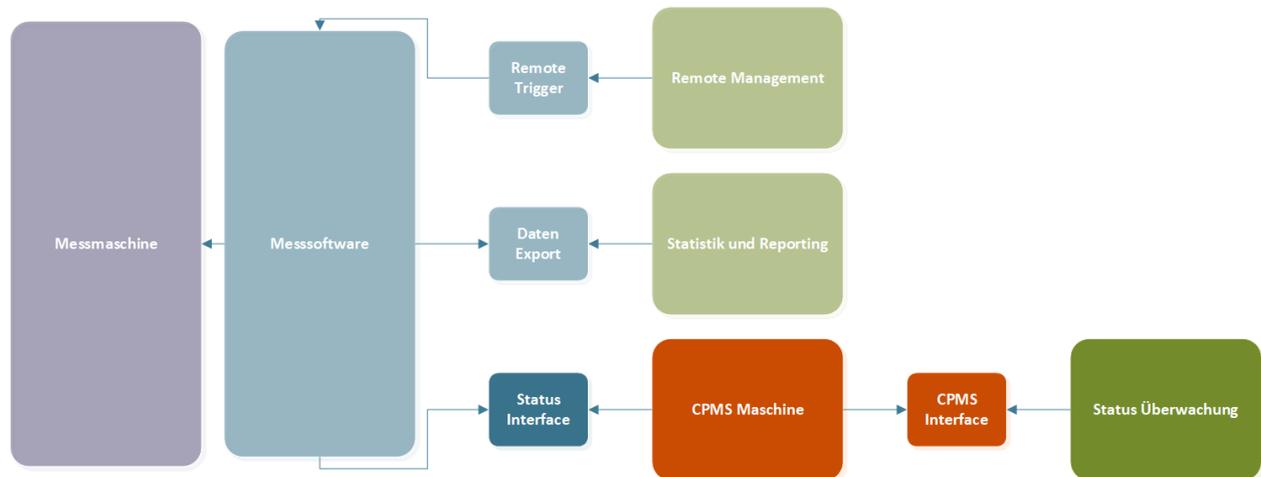


Abbildung 8 CPMS Interface für Status Überwachung

Diese Herangehensweise lässt sich auf ähnliche Art und Weise auf Statistik und Reporting übertragen. Anstelle der individuellen Schnittstellen für die jeweiligen Zielsysteme der Daten könnte über das zentrale CPMS Interface eine einheitliche Schnittstelle zur Verfügung gestellt werden. Somit wäre nicht nur für die bisherigen Statistik-Systeme eine einfachere Umsetzung gegeben, sondern auch die Möglichkeit einer Anbindung an andere Systeme geschaffen. Abbildung 9 veranschaulicht die Erweiterung des Interfaces für Statistik und Reporting.

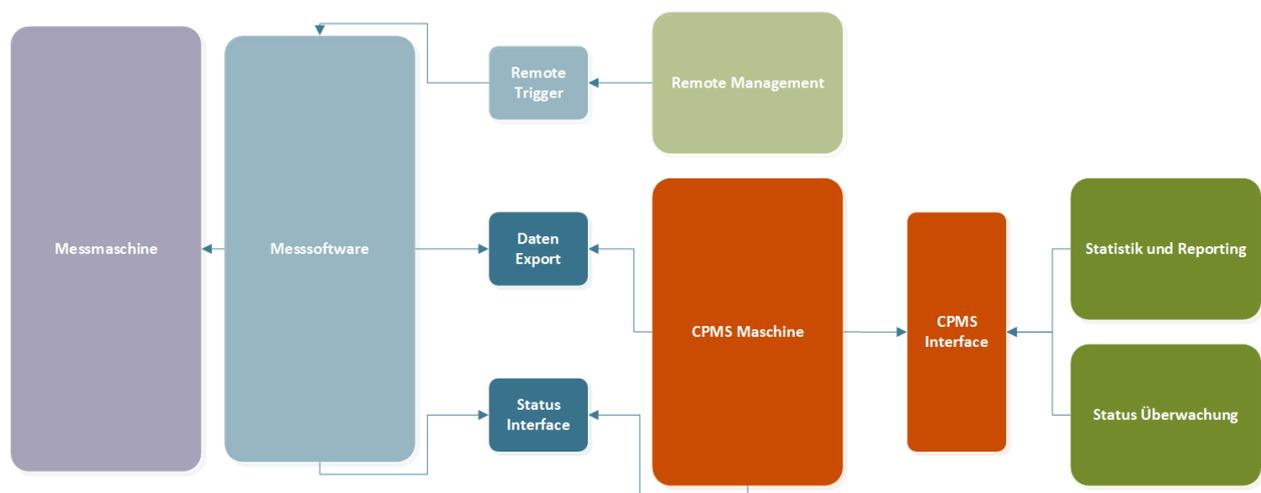


Abbildung 9 CPMS Interface für Statistik und Reporting

Allgemein betrachtet wäre es für die Datenverfügbarkeit ebenfalls denkbar, die Schnittstelle öffentlich bekannt zu machen. Somit wäre es für andere Hersteller möglich eine Anbindung an das CPMS zu implementieren. Vor allem, da mit Industrie 4.0 auch Anbindungen an Systeme über die Messtechnik hinaus notwendig werden und diese nicht mehr allein von einem Hersteller bereitgestellt werden können, ist eine öffentliche Schnittstelle auf Dauer nahezu unumgänglich.

3.2 Flexibilität in der Auftragsplanung

Unter den Bereich der Flexibilität der Auftragsplanung fällt generell Software, welche eine konstante Auslastung der Messmaschinen zum Ziel hat. Die bereits betrachtete Status Überwachung ist ein Teilbereich davon, da anhand der Status Informationen sich Statistiken zur Auslastung ableiten lassen. Jedoch erweitert die Auftragsplanung dies um Konzepte wie intelligente Wartungspläne und Verteilung der Messaufträge auf Grundlage von Fälligkeit und Dringlichkeit. Ferner fallen unter diesen Bereich auch Software Systeme zum automatisierten Starten von Messabläufen und zum automatischen Generieren und Anpassen von Messabläufen passend zu den aktuellen Gegebenheiten.

3.2.1 Aktueller Zustand

Die bisherige Software stellt keine Funktionalität zur Auftragsplanung zur Verfügung. Lediglich das bereits erwähnte System zur Status Überwachung ist direkt in diesen Bereich anzusiedeln. Für die Automatisierungsbranche gibt es des Weiteren ein Remote Management System, welches dazu genutzt werden kann, über einen Remote Trigger Messabläufe zu starten (vergleiche Abbildung 7). Hierbei ist neben einer direkten Anbindung der Remote Management Software an die Messsoftware auch eine Anbindung über Profinet gegeben. Des Weiteren gibt es seit einigen Jahren eine Software zum automatisierten Erstellen von Messabläufen. Diese bietet allerdings kein Interface an, mit dessen Hilfe man die Abläufe von außen ansteuern und somit die Funktionalität verwenden könnte.

3.2.2 Übertragung auf CPMS

Ein Bereich, welcher sich analog zu den bisherigen Bereichen übertragen lässt, ist das Remote Management. Hierbei lässt sich die bisherige Remote Trigger Schnittstelle auf das neue CPMS umleiten. Neben dem bisherigen Remote Management System ließen sich so auch andere Systeme anschließen, welche automatisiert Messabläufe starten könnten. Abbildung 10 veranschaulicht die Erweiterung des CPMS Interfaces auf den Bereich des Remote Managements.

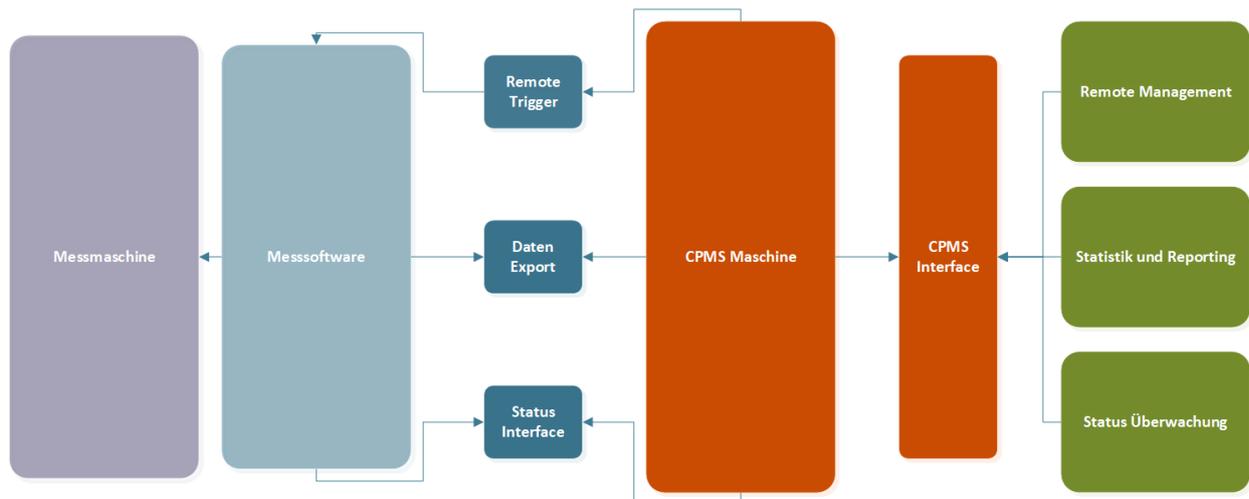


Abbildung 10 CPMS Interface für Remote Management

Um den Bereich der Auftragsplanung abdecken zu können, reicht ein universeller Adapter nicht aus. Hierfür muss das CPMS Maschine selbst um die Funktionalität der Auftragsplanung erweitert werden. Hierzu gehört auf der einen Seite die Möglichkeit, eine priorisierte und mit Zeitpunkten versehene Liste an anstehenden Messaufgaben ausgeben zu können. Auf der anderen Seite umfasst dies auch die Planung von Wartungszeiten, damit diese nicht mit den Messaufgaben in Konflikt stehen. Des Weiteren muss über das CPMS Interface die Möglichkeit gegeben sein, Nachrichten zu empfangen und zu verschicken. Neben Benachrichtigungen über neue anstehende Messaufgaben sind hierbei vor allem Nachrichten von vorgelagerten beziehungsweise Nachrichten an nachgelagerte Prozessschritte essentiell. Sollte es zu Verzögerungen in vorgelagerten Schritten kommen, so muss die Planung angepasst werden. Gegebenenfalls müssen dann andere Aufträge oder Wartungstätigkeiten vorgezogen werden, um Stillstandzeiten zu reduzieren. Nachgelagerte Schritte müssen äquivalent dazu über Verzögerungen informiert werden, damit diese selbst auf die Verzögerung reagieren können.

Damit dieses Versenden und Empfangen von Nachrichten funktioniert, muss die Form der Nachrichten mit den anderen Systemen abgestimmt werden. Hierfür bietet sich ein gemeinsames Data Contract Package an, welches allein die Datentypen für den Nachrichtenaustausch enthält und somit als Kommunikationsgrundlage dient. Wird dieses öffentlich bekanntgemacht, kann dies im Zusammenspiel mit einer Veröffentlichung des CPMS Interfaces dazu führen, dass auch andere Anbieter in der Lage sind, die Auftragsplanung mit zu integrieren. So könnte das System an externe Systeme wie beispielsweise die Auftragsplanung der Fertigung angebunden werden. Sollte das Fertigungssystem nicht direkt mit dem Data Contract der Auftragsplanung arbeiten, ließe sich die Anbindung über einen Adapter lösen. Kombiniert man die Auftragsplanung mit der Remote Trigger Schnittstelle, ließe sich das Potential noch erhöhen. Anstatt dass ein Bediener die Auftragsliste abrufen und das entsprechende Messprogramm starten muss könnte somit dieser Prozessschritt automatisiert werden. Voraussetzung wäre hierfür, dass das Aufspannen des Werkstückes als separater Prozessschritt gehandhabt wird. Abbildung 11 veranschaulicht die Umsetzung der Auftragsplanung unter Voraussetzung sowohl eines eigenen CPMS Auslastungsplanung, welches im Folgenden noch näher betrachtet werden soll, als auch unter

Annahme einer externen CPPS Auslastungsplanung, welche die gesamte Wertschöpfungskette umfasst.

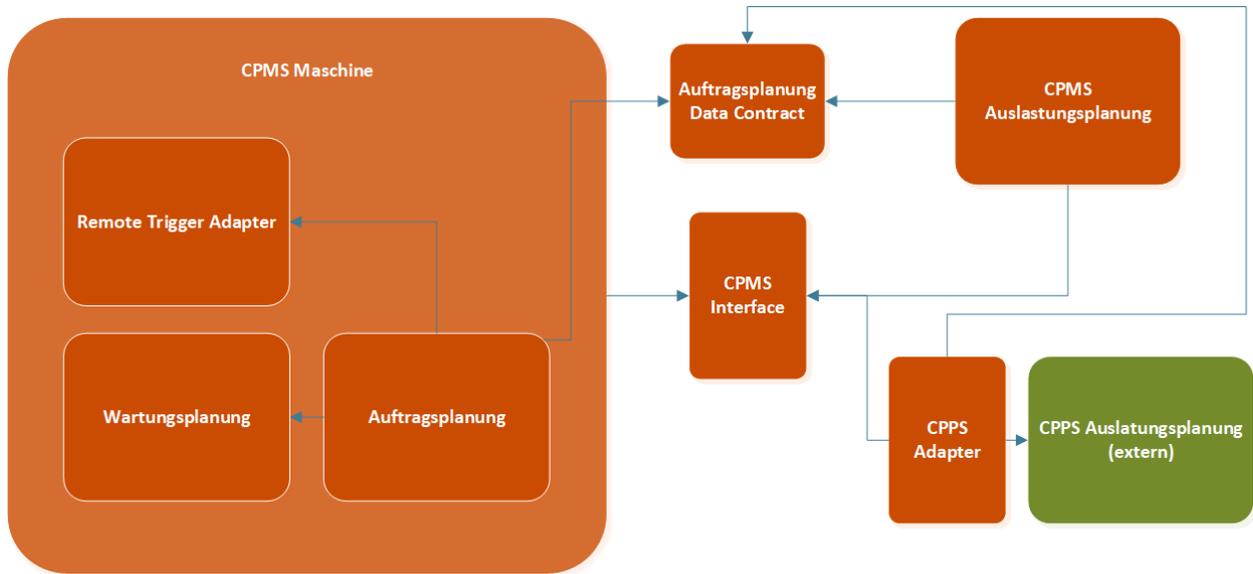


Abbildung 11 Auslastungsplanung unter Verwendung des CPMS Interface

Ebenfalls ist bei der Vielzahl an Systemen nicht davon auszugehen, dass die CPS der vorgelagerten und nachgelagerten Arbeitsschritte direkt mit dem Data Contract der Auftragsplanung kooperieren. Daher sind auch hierfür unter Umständen Adapter notwendig. Abbildung 12 veranschaulicht die Kommunikation zur Auftragskoordination zwischen dem CPMS und einem CPS Fertigung als Beispiel für einen vorgelagerten Schritt und einem CPS Versand als Beispiel für einen nachgelagerten Schritt. Hierbei werden wiederum die externen Systeme durch jeweilige Adapter an das System angebinden.

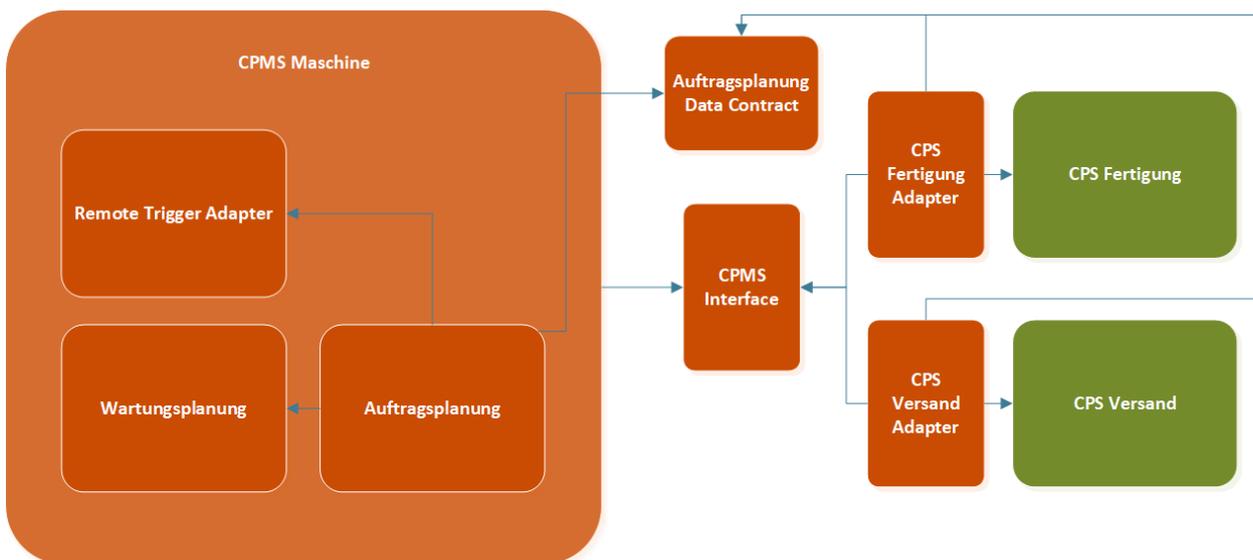


Abbildung 12 Koordination mit anderen Systemen unter Verwendung des CPMS Interfaces

3.3 Weiterverwendung der Daten aus anderen Systemen

Unter der Weiterverwendung der Daten aus anderen Systemen versteht man grundsätzlich eine Form der Erweiterung der Konzepte der Messtechnik zur Integration von Daten aus anderen Teilen der Wertschöpfungskette oder auch aus davon losgelösten Systemen. Für Fertigungssysteme wäre dies beispielsweise die Verwendung von Messergebnissen zur Ermittlung von Korrekturwerten zur Anpassung der Produktionsparameter. Übertragen auf die Messtechnik ergeben sich hier ähnliche Anwendungsfälle. So können Daten aus der Fertigung wie beispielsweise Sensordaten der einzelnen Maschinenteile dazu verwendet werden, die Messung zu optimieren. Voraussichtlich kritische Bereiche könnten so im Voraus erkannt und unter Umständen im Messablauf vorgezogen werden. Unter den entsprechenden Umständen kann sogar die Messstrategie angepasst werden um die Abdeckung des kritischen Bereiches zu erhöhen, vorausgesetzt die Vorgaben des Benutzers erlauben eine solche Anpassung. Des Weiteren lassen sich auch Daten aus der Verwendung der Produkte dazu verwenden, bessere Ergebnisse zu erzielen. Bereiche, welche im Einsatz beim Kunden besonders fehleranfällig sind, da sie womöglich besonderer Belastung ausgesetzt werden, lassen sich ebenfalls als kritische Bereiche kennzeichnen. Auch dadurch ließe sich die Messstrategie auf die Gegebenheiten anpassen und unter Umständen potential fehlerhafte Werkstücke würden erkannt, bevor diese beim Kunden ankommen.

3.3.1 Aktueller Zustand

Die Software im Bereich der Verwendung von Daten anderer Systeme ist bei Mitutoyo nur in bestimmten Bereichen und nur in geringem Umfang vorhanden. So gibt es vereinzelte Lösungen, die für besondere Kunden als Einzelanfertigung geschaffen wurden, bei denen zusätzlich zum eigentlichen Messablauf noch weitere Daten in die Programmausführung fließen, um spezielle Sonderlösungen umzusetzen. Generell lässt sich hierbei festhalten, dass die meisten Steuerungsapplikationen von Mitutoyo ein recht flexibles Programmiermodell aufweisen, welche die Umsetzung von speziell auf den Kunden angepassten Lösungen ermöglichen. Dies steigert zwar die Flexibilität, sorgt aber im Umkehrschluss auch dafür, dass es viele Möglichkeiten der Umsetzung von Anforderungen des CPMS über dieses Programmiermodell gibt. Dies hat zur Folge, dass es potentiell viele Kunden gibt, die ihre Programme für die Umsetzung unter Zuhilfenahme eines CPMS nachträglich anpassen müssten. Dies könnte die Akzeptanz bei bisherigen Kunden schmälern. Des Weiteren gibt es auch wie bereits erwähnt eine Applikation zur automatischen Generierung von Messabläufen. Diese würde sich theoretisch gut eignen um die automatische Anpassung der Messabläufe durchzuführen. Jedoch hat diese wie bereits erwähnt das Problem, dass sie kein Interface zur Ansteuerung der Funktionalität von außen zur Verfügung stellt. Außerdem ist aufgrund von schlechter Code Qualität eine Anpassung des Systems nur mit hohem Aufwand umzusetzen.

3.3.2 Übertragung auf CPMS

Um die Daten der externen Systeme innerhalb des CPMS verwenden zu können gilt es zunächst, diese zu erschließen. Hierfür können Data Miner entwickelt werden, welche für die jeweiligen Systeme als Verbindungspunkt funktionieren. Prinzipiell sind Data Miner nichts anderes als Adapter, ihr primäres Ziel ist jedoch nicht die Bereitstellung von Funktionalität, sondern die Erschließung von Daten. Verwenden die externen Systeme die gleiche Schnittstelle, ließen sich gegebenenfalls Data Miner für mehrere Systeme verwenden. Ansonsten müssten die Data Miner für jedes externe System neu entwickelt werden. Die extrahierten Rohdaten werden dann entsprechend aufbereitet, damit das Zielsystem, ein Teilmodul des CPMS, diese verarbeiten kann. Dies ist wichtig, da ansonsten theoretisch für jede mögliche Anbindung an ein externes System ein eigenes Modul im CPMS eingerichtet werden muss. So stellt das CPMS nur eine bestimmte Anzahl an Modulen zur Verfügung, welche wirkliche Anwendungsfälle in der Messtechnik widerspiegeln. In Abbildung 13 stellt beispielsweise das Modul zur Messprogramm Optimierung eine Data Contract zur Verfügung, welcher die Einflussparameter auf die einzelnen Bereiche abdeckt. Die Data Miner für das CPS Fertigung und das CPS Product Lifecycle Management extrahieren die individuellen Daten aus den jeweiligen Systemen und wandeln diese dann in die jeweiligen Parameter der Optimierung um. Dieses Prinzip lässt sich beliebig erweitern und auch mit den vorangegangenen Lösungen kombinieren, um neue Möglichkeiten zu schaffen.

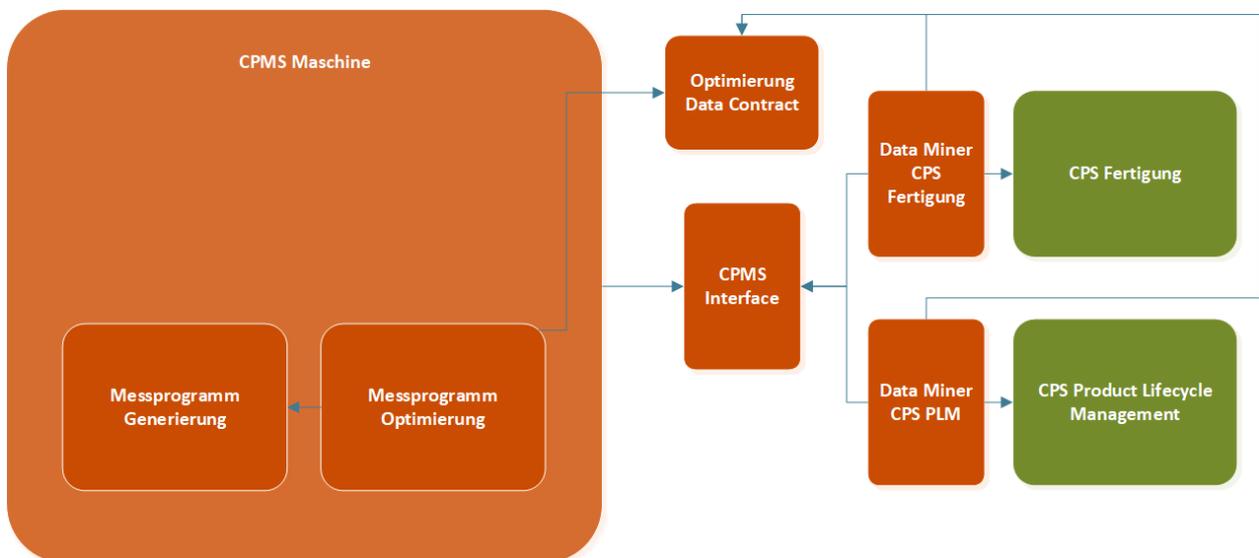


Abbildung 13 Anbindung an Daten externer Systeme mit dem CPMS Interface

3.4 Generelle Konzepte

Im Folgenden werden nun einige generelle Konzepte erläutert, welche in die Architektur miteingeflossen sind.

3.4.1 Continuous Delivery und unabhängig deploybare Module

Ein wichtiger Aspekt ist Continuous Delivery. Hierbei ist im Zusammenhand dieser Arbeit weniger der Gedanke, sehr kurze Release Zyklen zu haben, entscheidend, sondern das Konzept einer Continuous Delivery Pipeline über die Änderungen automatisiert getestet werden können und schnell in den Produktivbetrieb gelangen. Damit verbunden ist auch das Konzept der voneinander unabhängig deploybaren Module. Änderungen an einem Modul sollen möglichst ohne Änderungen an davon unabhängigen Modulen deployed werden können. Somit wird der Integrationsaufwand reduziert. Neben den Effekten auf die Architektur unterstützt dies auch bei der Verteilung der Arbeit auf mehrere Teams und ermöglicht in diesem Zusammenhang eine möglichst eigenständige und isolierte Arbeit der einzelnen Teams in den jeweiligen Bereichen. (Wolff, Microservices - eine Bestandsaufnahme, 2016) (Wolff, Softwarearchitektur für Innovation, 2016)

3.4.2 Messaging

Ein weiteres Konzept, welches im Folgenden zum Einsatz kommt, ist Messaging. Anstelle der häufig verwendeten Form von Funktionsaufrufen, bei denen Informationen übergeben und die Resultate zurückgegeben werden, fließen hierbei Informationen nur in eine Richtung. Informationen werden in einen Aufruf injiziert und die Resultate werden über einen davon getrennten Aufruf zurückgegeben. Dies entkoppelt diese beiden Gesichtspunkte und erhöht die Flexibilität. Außerdem entspricht dieser Ansatz mehr der Objektorientierung und hat mehr Potential, die Wiederverwendbarkeit zu erhöhen. (Westphal, Messaging as a Programming Model, 2013)

3.4.3 CQRS und Event Sourcing

Ein weiterführendes Konzept, welches mit dem Messaging in Verbindung steht, ist CQRS. Hierbei wird eine Auftrennung zwischen den Kanälen zum Erstellen von Daten und denen zum Auslesen von Daten betrieben. Anstelle von CRUD Operationen, welche über eine Stelle in der API durchgeführt werden, wird die API aufgeteilt. Dies gelingt durch ein Umdenken auf Seiten des Datenmodells und durch separate Datenmodelle für das Lesen und das Schreiben der Daten. In diesem Zusammenhang kommt auch das Prinzip von Event Sourcing zum Einsatz. Anstelle von konkreten Zuständen, welche durch eine Operation geändert werden, wird der Weg zu diesem Zustand anhand von Events gespeichert. Nimmt man das Beispiel eines Bankkontos, so wird anstelle einer direkten Änderung des Kontostandes ein Änderungsereignis mit der Differenz gespeichert. Um auf der anderen Seite den konkreten Kontostand auszulesen, werden alle Änderungsereignisse aggregiert und so der korrekte Stand ermittelt. Dies hat den Vorteil, dass

Parallelzugriff problemlos möglich ist, ohne dass es zu Fehlern kommt. Damit einhergeht allerdings auch, dass die Daten beim Auslesen nicht unbedingt vollständig konsistent sein müssen. Während des Aufrufes könnte ein weiteres Änderungsereignis eingetreten sein. Dies muss in der Anwendung bedacht werden. Hierbei spricht man auch von „Eventual Consistency,“ der abgefragte Stand ist nicht unbedingt aktuell, allerdings wird es zu einem bestimmten Zeitpunkt wieder zu einem konsistenten Zustand kommen. Dies zu beachten ist wichtig in Fällen, in denen Konsistenz entscheidend für die Verwendung der Daten ist. In vielen Fällen kann aber eine Konsistenz zu einem späteren Zeitpunkt akzeptiert werden. (Roden, Lesen oder schreiben, 2017)(Roden, Eine Frage der Daten, 2017) Übertragen auf die Status Überwachung wäre ein Event der Wechsel von einem Zustand in einen anderen. Für die Status Überwachung ist es in den Regelfällen, wenn beispielsweise eine Messung gestartet wird, nicht kritisch, ob die Anzeige direkt aktualisiert wird, solange beim nächste Aktualisierungsintervall wiederum der richtige Zustand angezeigt wird. Für Fehlerereignisse sieht dies unter Umständen anders aus, weswegen hierfür ein separater Kanal für Fehlermeldungen sinnvoll wäre.

3.4.4 REST API

Ein weiteres Konzept, welches im Weiteren Verwendung findet, ist eine REST API. Hierbei wird Funktionalität über einen HTTP Endpunkt zur Verfügung gestellt und somit für andere Applikationen erreichbar gemacht. Dies hat sich besonders im Bereich der Microservices etabliert und ist in der Industrie ein üblicher Weg, eine API für andere Systeme, seien diese aus eigenem Hause oder von Drittanbietern, zur Verfügung zu stellen. Dies hat den Vorteil, dass unterschiedliche Technologien für die Umsetzung der jeweiligen Systeme eingesetzt werden können und dass die bestehende Infrastruktur, welche für das Web auf Basis von HTTP gegeben ist, verwendet werden kann. Ein weiteres Konzept in diesem Zusammenhang ist die Entkopplung der API und dem Frontend, mit dem der Nutzer interagiert. Dadurch ist des Weiteren das Frontend nicht mehr auf eine einzige Applikation beschränkt. Pro Zielplattform, auf welcher die Applikation laufen soll, kann eine eigens für diese Plattform optimierte Applikation entwickelt werden. (Lorenz, Das Gold von morgen, 2017) (Zimmermann, 2017) (Westphal, HTTP-Services für jedermann, 2018)

3.5 Basis Architektur

Im Folgenden soll nun die Basis Architektur beschrieben werden, welche aus den vorangegangenen Abschnitten abgeleitet wurde. Hierbei werden die einzelnen Aspekte nacheinander beschrieben und deren Besonderheiten aufgezeigt. Abbildung 14 zeigt hierfür eine Gesamtübersicht.

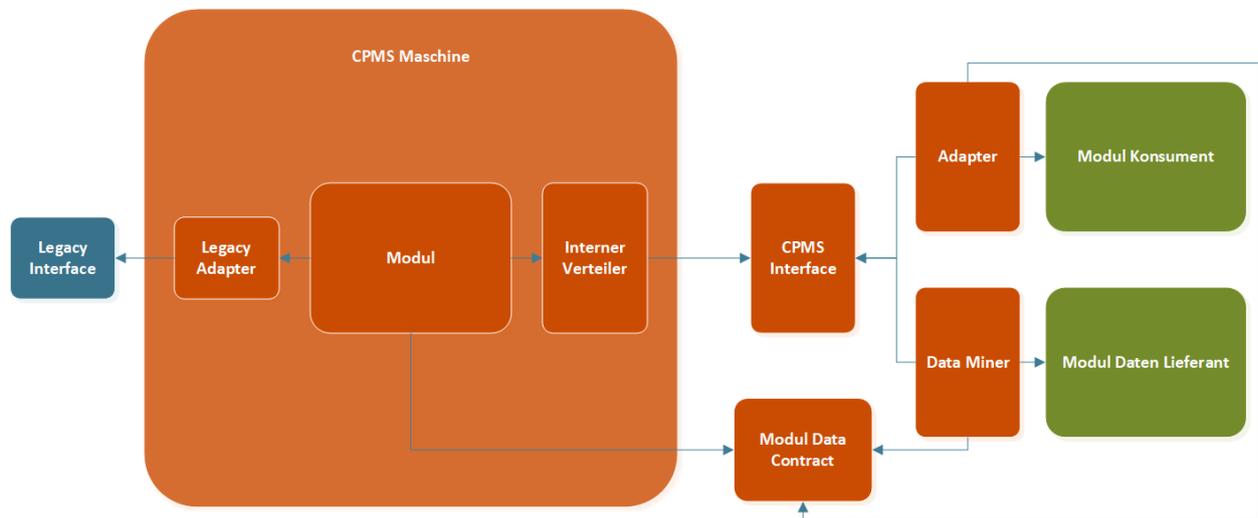


Abbildung 14 Gesamtübersicht der Basis Architektur

Das System fungiert als Middleware zwischen der bisherigen Messsoftware und anderen Systemen. Somit kann die bisherige Funktionalität der existierenden Software um zusätzliche Funktionen aus dem Bereich Industrie 4.0 erweitert werden. Auch kann somit unter Umständen in einigen Fällen existierende Funktionalität anderen Systemen zugänglich gemacht werden. Auf Dauer hin gesehen wäre es denkbar, immer mehr Funktionalität als Modul in das CPMS auszulagern um somit im Endeffekt die Messsoftware und das CPMS zu kombinieren.

3.5.1 Legacy Adapter

Um existierende Systeme anzubinden ist es wichtig die existierenden Schnittstellen anzusteuern. Hier kommt der Legacy Adapter zum Einsatz, welcher die existierende API auf eine von den Modulen verwendbare umleitet. Generell wird hierbei pro existierende Schnittstelle des Altsystems ein Adapter verwendet, welcher unter allen Modulen, die ihn benötigen, geteilt wird. Ferner ist es auch möglich, einen reversen Legacy Adapter einzurichten, welcher das CPMS Interface auf die alte Schnittstelle umleitet. Dies ist dann sinnvoll, wenn mithilfe des CPMS die Schnittstelle an einem anderen Ort, welcher sich möglicherweise in einem anderen Netzwerk befindet, repliziert werden soll, damit Systeme, welche die existierende Schnittstelle erwarten, daran angebunden werden können. Besonders in der Übergangsphase, wenn das CPMS als Middleware zwischen existierende Systeme eingeführt werden soll, ist dies hilfreich, da somit die existierenden Systeme nicht direkt angepasst werden müssen.

3.5.2 Module

Kernstück des CPMS sind die Module. Diese sind prinzipiell auf ein Plug-In Konzept hin ausgerichtet. Das bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die einzelnen Module beliebig ausgetauscht und neue Module jederzeit hinzugefügt werden können, ohne dass der Rest des CPMS davon betroffen ist. Erreicht wird dies durch eine Modul Registrierung, an welcher sich Module flexibel an- und abmelden können. Hierbei teilen diese der Registrierung mit, welchen Typ an Nachrichten sie verarbeiten können. Diese passt dann den zentralen Nachrichtenverteiler so an, dass er Nachrichten dieses Typs an das Modul weiterleitet. Kommen nun Nachrichten über das CPMS an, so erreichen diese die entsprechenden Module. Hier wäre zu einem späteren Zeitpunkt auch ein Load Balancing oder eine Mehrfachabarbeitung durch mehrere Module, welche sich die Nachrichtentypen teilen, denkbar. Auf der anderen Seite können über den zentralen Nachrichtenverteiler neue Nachrichten des Moduls an die entsprechenden Zielsysteme gesendet werden. Abbildung 15 veranschaulicht, wie die einzelnen Systeme miteinander interagieren. Hierbei ist wichtig zu bemerken, dass der interne Verteiler und das CPMS Interface generisch arbeiten und somit nicht direkt über den Data Contract des jeweiligen Moduls Bescheid wissen müssen (vergleiche Abbildung 16). Kann das Empfängermodul die gesendete Nachricht verarbeiten, so sendet sie eine Bestätigung der Nachricht. Ist kein Modul für diesen Nachrichtentyp registriert, sendet der Verteiler einen Fehler zurück, welcher mitteilt, dass die Nachricht nicht verarbeitet werden konnte.

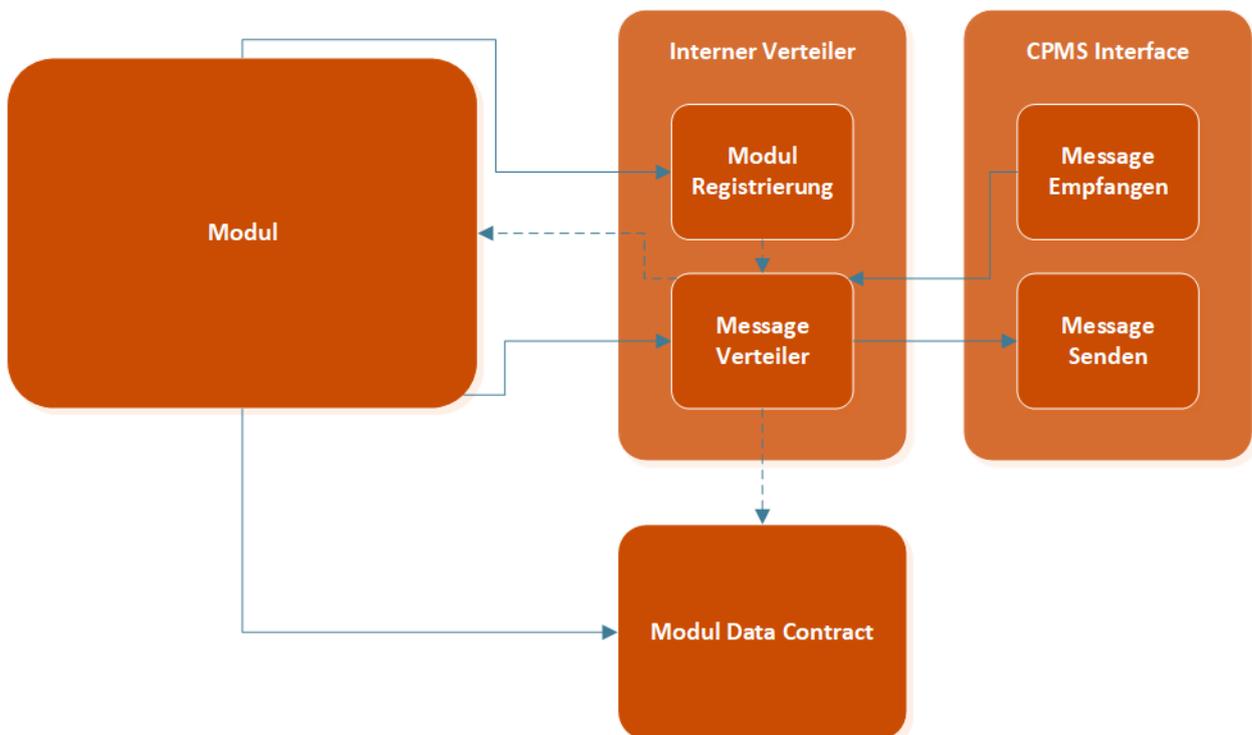


Abbildung 15 Details Ansicht für das Modul System

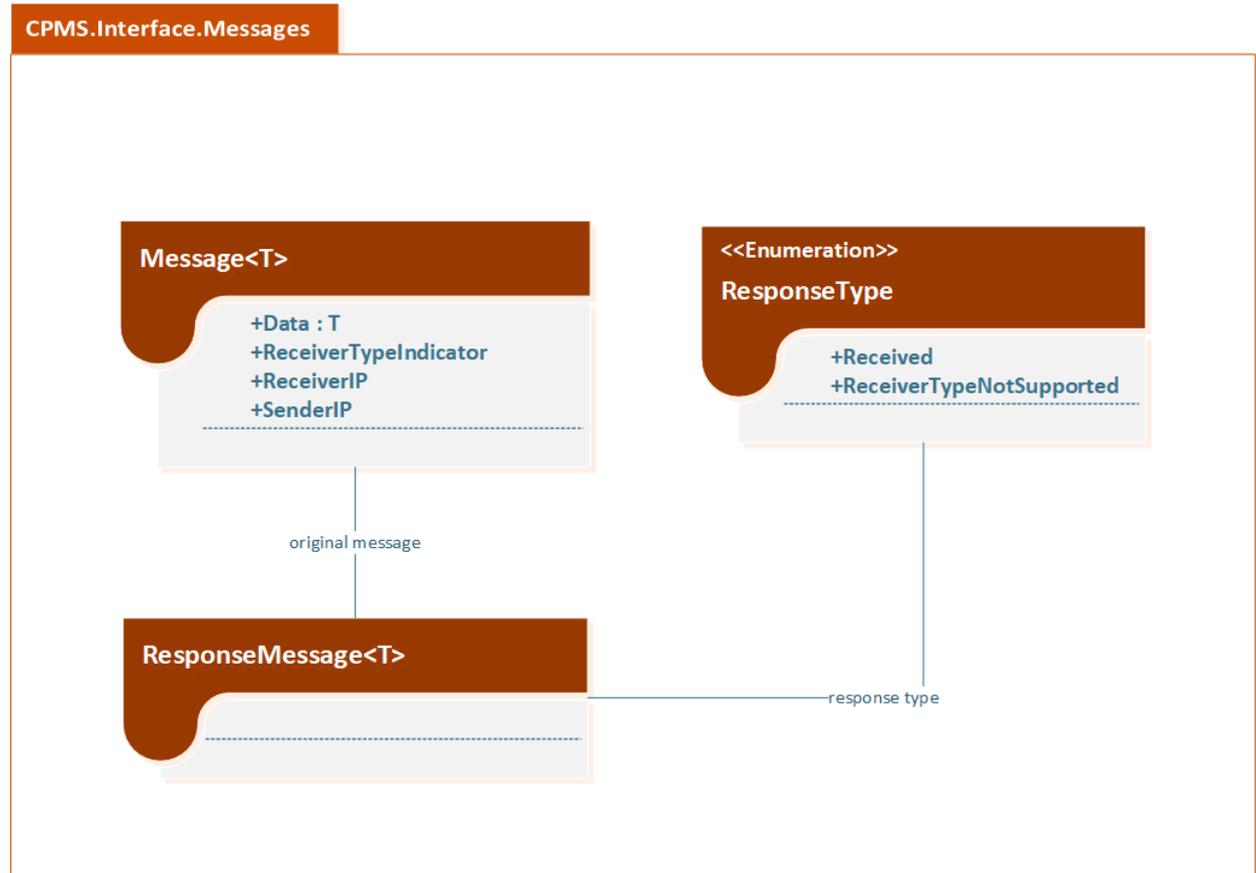


Abbildung 16 Generische Nachrichtenstruktur

3.5.3 Adapter und Data Miner

Ein theoretisch optionaler Teil der Architektur sind die Adapter und Data Miner. Diese sind nur dort notwendig, wo Anbindungen an andere Systeme notwendig sind und diese keine kompatible Schnittstelle anbieten. Wenn diese eine REST basierte Messaging Schnittstelle verwenden wäre auch denkbar, auf die Adapterschicht zu verzichten und diese direkt an das CPMS anzubinden. Hierzu müsste lediglich das Modul in der Lage sein, die vom System gesendeten Daten auszuwerten. Meist sind Adapter jedoch unumgänglich. Neben der Anbindung an andere Systeme können diese auch verwendet werden, um Legacy Schnittstellen zu replizieren. Dies funktioniert nicht nur mit existierenden Legacy Schnittstellen, sondern auch mit solchen, die die Messsoftware selbst gar nicht bereitstellt. Hierfür werden die Daten aus einer anderen Quelle extrahiert und auf die Schnittstelle projiziert. Dies wäre sinnvoll, um älteren Versionen des Messsystems, welche eine bestimmte Schnittstelle nicht besitzen, nachträglich um diese zu erweitern. Die Logik für das Extrahieren der Daten aus anderen Quellen müsste dann innerhalb eines Moduls abgehandelt werden.

3.6 Auslastungsplanung

Im Folgenden soll nun die Basis Architektur erweitert werden um ein System zur Auslastungsplanung der Messmaschinen zu entwickeln. Abbildung 17 zeigt eine Gesamtübersicht des resultierenden Systems. In den nun folgenden Abschnitten werden die einzelnen Bereiche genauer betrachtet und deren Zusammenspiel untersucht.

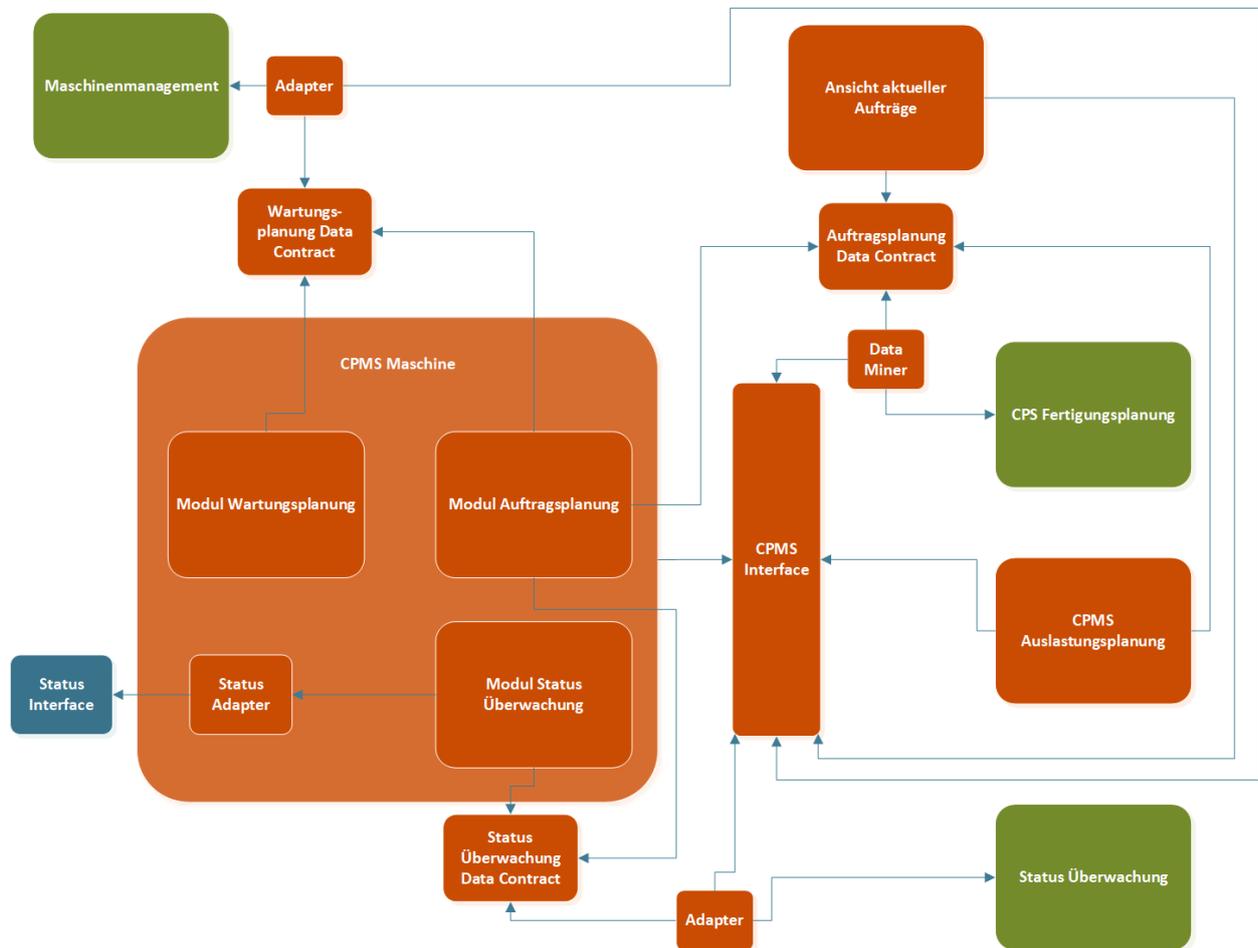


Abbildung 17 Gesamtübersicht des CPMS mit Auslastungsplanung

3.6.1 Modul Status Überwachung

Zunächst wird das Modul Status Überwachung untersucht. Um den aktuellen Status der Maschine abfragen zu können, wird mittels eines Status Adapters auf das existierende Status Interface der Maschine zugegriffen. Diese Informationen werden in einen Event Stream umgewandelt, welcher Status Veränderung repräsentiert. Des Weiteren werden aus diesen Events Kennzahlen, wie beispielsweise wie lange die Ausführung eines Messablaufs dauert oder wie lange Wartungsarbeiten an der Messmaschine dauern, abgeleitet. Neben dem Versenden der bisherigen Daten an die Status Überwachung sendet das System die neu gewonnen Kennzahlen an die Auftragsplanung. So kann anhand der durchschnittlichen Dauer von Messungen und Wartungsarbeiten besser geplant werden.

3.6.2 Modul Wartungsplanung

Ein weiteres Modul ist die Wartungsplanung. Hierbei gilt es festzulegen, in welchen Intervallen eine Messmaschine gewartet werden muss. Über einen Adapter können externe Systeme zum Maschinenmanagement diese Daten übermitteln. Eine Integration der Funktionalität in die Oberfläche zur Auftragsansicht wäre ebenfalls denkbar. Die Daten werden wiederum dem Modul Auftragsplanung zur Verfügung gestellt, damit dieses diese berücksichtigen kann.

3.6.3 Modul Auftragsplanung

Der Kern des CPMS Maschine ist das Modul Auftragsplanung. Zumindest ist dies der Fall für den Aspekt der Auslastungsplanung. In Abbildung 18 wird der Data Contract dieses Moduls veranschaulicht.



Abbildung 18 Data Contract des Moduls Auftragsplanung

Wird nun vom CPMS Auslastungsplanung ein neuer Auftrag erstellt, wird dieser an alle beteiligten Schritte der Wertschöpfungskette mit der Information, welche anderen Schritte in der Kette noch daran beteiligt sind, verteilt. Ist die Messung an der Maschine der erste Schritt in der Kette, was in der Regel bei Wareneingangsmessungen der Fall sein kann, wird der Auftrag in die Planung aufgenommen. Ansonsten wird der Auftrag zunächst in einer Warteliste zwischengespeichert. Dort verbleibt dieser, bis eine Nachricht empfangen wird, dass der vorhergehende Schritt geplant ist. Hierfür verbindet sich ein Data Miner mit dem jeweiligen System entsprechend des vorausgehenden Schrittes. Ist dies beispielsweise die Fertigung, verbindet sich der Data Miner mit dem CPS der Fertigung. Sobald bekannt ist, wann die vorangegangenen Schritte frühestens abgeschlossen sind, wird diese Information verwendet um den Auftrag von der Warteliste in die Planung zu übertragen.

Die Planung selbst verwendet verschiedene Daten aus verschiedenen Systemen. Die Daten aus dem Modul Status Überwachung werden verwendet um eine Aussage über die voraussichtliche Dauer zu treffen. Aus dem Modul Wartungsplanung werden Informationen verwendet, um diese mit der Auftragsplanung in Einklang zu bringen. Als Standard werden neue Auftrag direkt zum frühestmöglichen Zeitpunkt eingeplant. Ist dieser bereits belegt, wird der Auftrag hinten an den nächsten angehängt. Dadurch könnten etwaige darauffolgende Aufträge weiter nach hinten verschoben werden. Handelt sich es hierbei um einen Wartungsauftrag und dieser wird dadurch auf einen späteren Zeitpunkt als erlaubt verschoben, wird der Auftrag hinter den Wartungsauftrag verschoben. Ergibt sich daraus für den Gesamtplan, dass dieser keine Verletzungen der Fristen beinhaltet, wird der Plan so übernommen. Ansonsten wird versucht die Fristverletzungen durch umorganisieren der Aufträge zu beheben. Dabei kann auch ein Vorziehen von Wartungsintervallen angewendet werden. Lassen sich nicht alle Fristverletzungen beheben, wird der Plan mit den geringsten Verletzungen übernommen. Nach Abschluss der Umplanung werden für die jeweiligen Aufträge, die sich geändert haben, die neuen erwarteten Endzeiten veröffentlicht und gegebenenfalls für die problematischen Aufträge eine Warnung geschickt, dass diese voraussichtlich nicht rechtzeitig abgeschlossen werden. Darauf kann dann Seiten des CPMS Auslastungsplanung reagiert werden indem die Fristen für Aufträge angepasst oder Aufträge storniert und an andere Maschinen durchgeführt werden.

Nachdem die Aufträge nun geplant sind, läuft die Produktion zum gegebenen Zeitpunkt an. Wird festgestellt, dass es an einem Schritt eine Verzögerung gibt, wird diese den darauffolgenden Schritten mitgeteilt und diese können ihre Planung anpassen. Ergibt sich eine Fristverletzung, wird diese analog zur initialen Planung der Schritte abgearbeitet und eventuelle Probleme direkt an das CPMS Auslastungsplanung gemeldet.

3.6.4 CPMS Auslastungsplanung

Das CPMS Auslastungsplanung ist an sich nicht direkt ein cyber-physikalisches System. Zum Zwecke der Konsistenz wird es im Folgenden allerdings dennoch als CPMS gesehen, zumal es dasselbe CPMS Interface bereitstellt wie das CPMS Maschine. Hierdurch entfällt die Notwendigkeit für einen Adapter. Dieses System stellt eine Oberfläche bereit, in welcher der Benutzer die jeweiligen Auftragsvorlagen verwalten und den Status aktueller Aufträge einsehen

kann. Die Auftragsvorlagen beinhalten die jeweiligen Schritte, welche zu einem Auftrag gehören. Diese kann der Benutzer verwenden, um einen neuen Auftrag in die Wege zu leiten. Nachdem die für die jeweiligen Schritte verantwortlichen Systeme sich untereinander abgestimmt haben, werden dem Benutzer die entsprechenden Resultate angezeigt und er kann gegebenenfalls darauf reagieren und Gegenmaßnahmen einleiten. Während der Abarbeitung des Auftrages wird der Benutzer über den aktuellen Status informiert und bei festgestellten Problemen benachrichtigt. Somit kann er wiederum gegebenenfalls Gegenmaßnahmen einleiten.

3.6.5 Ansicht aktueller Aufträge

Ein kleiner Teilbereich des Systems ist die Ansicht aktueller Aufträge. Hier wird für die jeweilige Messmaschine der aktuelle Zeitplan für die verschiedenen Aufträge angezeigt. Dies dient dem jeweiligen Maschinenbediener als Information, welcher Auftrag aktuell fällig ist und welches Werkstück er vorbereiten muss. Des Weiteren könnte diese Oberfläche auch dazu verwendet werden, um manuelle Anpassungen an der Zeitplanung durchzuführen, sollte die automatische Planung unzureichende Ergebnisse liefern oder es aufgrund von äußeren Umständen zu Problemen kommen, welche in der Planung nicht vorgesehen sind. Ein Totalausfall der Maschine wäre ein möglicher solcher Grund, mit dem in der Praxis unter Umständen nicht zu rechnen ist.

3.7 Bewertung

Zunächst lassen sich einige Vorteile des Systems erkennen. Da es keine zentrale Steuerungsinstantz gibt, ist das System recht flexibel und gut erweiterbar. Es skaliert gut mit der Anzahl der Arbeitsschritte und kommt somit relativ gut mit einer steigenden Anzahl an Auftragsschritten klar. Die offene Schnittstelle, welche das Anbinden an anderer Systeme erleichtert, ist ebenfalls von Vorteil. Besonders das Plug-In System der Module, worüber sich das System flexibel im Umfang erweitern lässt, trägt stark zur Zukunftsfähigkeit des Systems bei. Durch die Unabhängigkeit der einzelnen Module im Deployment lässt sich die Weiterentwicklung des Systems gut auf mehrere unabhängige Teams verteilen und somit auch gut in verschiedenen Zeitzeonen daran arbeiten.

Die Anforderung der Datenverfügbarkeit ist erfüllt. Durch die offene Schnittstelle und die Data Contracts kann jedes externe System beliebige Daten aus dem CPMS auslesen. Des Weiteren ist die Flexibilität in der Auftragsplanung ebenfalls gegeben. Das System kann sich selbstständig mit anderen Systemen koordinieren und eine automatische Anpassung entlang der Wertschöpfungskette ist gegeben. Daten aus anderen Systemen können problemlos integriert werden und somit ist das Potential gegeben, die Funktionalität flexibel zu erweitern. Aus Sicht der erarbeiteten Anforderungen ist das System also relativ positiv zu bewerten.

Jedoch leidet das System an den grundlegenden Problemen, welche sich aus der großen Unsicherheit im Zusammenhang mit Industrie 4.0 und CPPS ergeben. Die fehlende Standardisierung der Schnittstellen Technologien führt dazu, dass der Bedarf an Adaptern sehr hoch ist. Deren Anzahl wächst mit der Anzahl der angebundenen Systeme mindestens linear,

sofern pro System nur ein Adapter benötigt wird. Des Weiteren befinden sich viele Infrastrukturansätze im System. Somit wurde ein eigenes Framework für CPS entwickelt, was unter Umständen auf Dauer unnötigen Wartungsaufwand bedeutet. Durch die Verwendung eines existierenden CPS Frameworks hätte der Umfang des Systems reduziert und möglicherweise auf einige Adapter verzichtet werden können.

3.8 Fazit und Ausblick

Das in dieser Arbeit entwickelte System ist bereit, um in eine erste Prototypenphase zu gehen. Die erkannten Probleme sind beim aktuellen Stand der Technik leider nur schwer zu umgehen, sollten aber während der Entwicklung und dem Testen weiterhin beobachtet werden. Anhand erster Versuche mit dem System können weitere Erfahrungen gesammelt werden, wodurch sich das Bild der Anforderungen für ein CPMS verfeinern lässt. Durch die konstante Weiterentwicklung der Industrie lässt sich das System auf lange Sicht gesehen unter Umständen auf ein CPS Framework umstellen und somit ließe sich der generelle Aufwand für die Infrastruktur reduzieren. Möglicherweise wird auch über die Zeit hinweg eine Einigung bezüglich der Kommunikationsstandards erreicht und somit der Aufwand für die zu entwickelnden Adapter reduziert. Da dieser Bereich der Industrie sich allerdings unter ständigem Wandel befindet und kontinuierlich neue Technologien und Aspekte hinzukommen, ist ein konkreter Ausblick für die zukünftige Entwicklung nur schwer zu erstellen. Diese Arbeit stellt jedoch einen ersten Schritt in der Beantwortung der vielen, noch offenen Fragen dar.

4 SCHLUSS

Die Industrie ist einem stetigen Wandel ausgesetzt, auf welchen Unternehmen kontinuierlich reagieren müssen, wenn sie sich am Markt behaupten wollen. Die mit Industrie 4.0 verbundenen Veränderungen verstärken diese Problematik noch um ein Vielfältiges. Vor allem jedoch die Ungewissheit, ob die vielen Technologien nun nur eine Modeerscheinung sind oder ob sie sich dauerhaft durchsetzen werden, stellt Projekte in diesem Bereich auf ein schwieriges Fundament. Ein Projekt um die Systeme eines Herstellers auf die Neuerungen vorzubereiten läuft immer auch Gefahr, durch den Wandel in der Technologie oder in der Gesellschaft obsolet zu werden.

Dennoch lassen sich Trends erkennen und somit Prognosen erstellen. Daraus können erste Ansätze für die Systeme hergeleitet und Prototypen zur weiteren Erforschung entwickelt werden. Allerdings ein System zukunftssicher auf die kommenden Anforderungen vorzubereiten, ist im Augenblick noch sehr schwierig, wenn gar unmöglich. Erst mit der Zeit, wenn die Forschung in diesem Bereich noch weiter vorangeschritten ist und zusätzliche Erkenntnisse gesammelt wurden, lässt sich ein System dauerhaft in die richtige Richtung bewegen. Bis dahin ist es vor allem ratsam, die Systeme flexibel zu halten und durch kleine Schritte in die jeweilige Richtung selbst Erfahrungen mit den neuen Technologien zu sammeln.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

API	Application Programming Interface
APS	Advanced Planning and Scheduling
BDE	Betriebsdatenerfassung
CGI	Computer Generated Imagery
CPMS	Cyber-physikalisches Messsystem
CPS	Cyber-physikalisches System
CPPS	Cyber-physikalisches Produktionssystem
CQRS	Command Query Responsibility Segregation
CRUD	Create Read Update Delete
ERP	Enterprise Resource Planning
FaaS	Function as a Service
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IaaS	Infrastructure as a Service
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
KI	Künstliche Intelligenz
LIDAR	Light detection and ranging
MDE	Maschinendatenerfassung
MES	Manufacturing Execution System
MQTT	Message Queue Telemetry Transport
MR	Merged Reality
OPC	Open Platform Communications
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture
P2P	Peer to Peer
PaaS	Platform as a Service
Profinet	Process Field Network
REST	Representational State Transfer
RFID	Radio-frequency identification
SaaS	Software as a Service
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1 Übersicht industrielle Revolutionen. Nach (Industrie 4.0: Wenn die Revolution nach Österreich kommt, 2014).....	4
Abbildung 2 Vergleich IaaS, PaaS und SaaS. Nach (Garg, 2010)	6
Abbildung 3 Unterscheidung VR/AR/MR. Nach (State, 2017)	8
Abbildung 4 Funktionsweise von Blockchain. Nach (Rosic, 2017)	13
Abbildung 5 Automatisierungspyramide. Nach (Gronau, 2015).....	16
Abbildung 6 Funktionsweise eines CPPS. Nach (Thoben, Wiesner, & Wuest, 2017).....	17
Abbildung 7 Aktueller Zustand der Softwaresysteme	26
Abbildung 8 CPMS Interface für Status Überwachung	27
Abbildung 9 CPMS Interface für Statistik und Reporting	27
Abbildung 10 CPMS Interface für Remote Management	29
Abbildung 11 Auslastungsplanung unter Verwendung des CPMS Interface	30
Abbildung 12 Koordination mit anderen Systemen unter Verwendung des CPMS Interfaces	30
Abbildung 13 Anbindung an Daten externer Systeme mit dem CPMS Interface	32
Abbildung 14 Gesamtübersicht der Basis Architektur	35
Abbildung 15 Details Ansicht für das Modul System.....	36
Abbildung 16 Generische Nachrichtenstruktur.....	37
Abbildung 17 Gesamtübersicht des CPMS mit Auslastungsplanung	38
Abbildung 18 Data Contract des Moduls Auftragsplanung	39

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1 Gegenüberstellung von Kommunikationsstandards. Nach (Klein, Wolters, Dederichs, & Karl, 2016).....	19
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

LITERATURVERZEICHNIS

Andelfinger, V. P., & Hänisch, T. (2017). *Industrie 4.0*. Wiesbaden: Springer Gabler.

Baur, C., & Wee, D. (Juni 2015). *Manufacturing's next act*. Abgerufen am 01. Februar 2018 von McKinsey & Company: <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/manufacturings-next-act>

Bochkor, O. (20. Juli 2017). Was kostet schon die Wolke? *dotnetpro Das Magazin für Profi-Entwickler*, S. 66 - 71.

Braun, H. (05. August 2017). Intelligenz als Dienst. *c't Magazin für Computer und Technik*, S. 170 - 174.

Brooks, A. (1. Juni 2017). *Industry 4.0: Digital Dawn*. Abgerufen am 30. Januar 2018 von Shop Metalworking Technology: <http://shopmetaltech.com/resources/blog/digital-dawn.html>

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (kein Datum). *Was ist Industrie 4.0?* Abgerufen am 31. Januar 2018 von Plattform Industrie 4.0: <http://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html>

Burger, A., Lang, A., & Müller, Y. (2017). Mögliche Veränderungen von Systemarchitekturen im Bereich der Produktion. In V. P. Andelfinger, & T. Hänisch, *Industrie 4.0* (S. 57 - 68). Wiesbaden: Springer Gabler.

Cylance. (2017). *ARTIFICIAL INTELLIGENCE: A POSITIVE FORCE IN THE ENTERPRISE*. Abgerufen am 31. Januar 2018 von Cylance: <https://pages.cylance.com/rs/524-DOM-989/images/FINAL%20Infographic-AIreport%2010%202%2017.pdf>

Dobrochynskyy, M. (16. Februar 2017). Eine neue Ära. *dotnetpro Das Magazin für Profi-Entwickler*, S. 8 - 16.

Dobrochynskyy, M. (14. August 2017). Moderieren mit Automatik. *dotnetpro Das Magazin für Profi-Entwickler*, S. 72 - 79.

Dobrochynskyy, M. (15. Januar 2018). Spracheingabe. *dotnetpro Das Magazin für Profi-Entwickler*, S. 66 - 73.

Ematinger, R. (2018). *Von der Industrie 4.0 zum Geschäftsmodell 4.0*. Wiesbaden: Springer Gabler.

Ermisch, S. (19. April 2017). *Vermittler zwischen zwei Welten*. Abgerufen am 08. Februar 2018 von Handelsblatt: <http://www.handelsblatt.com/technik/hannovermesse/sensoren-fuer-die-industrie-4-0-vermittler-zwischen-zwei-welten/19513852-all.html>

- Fausser, K., Ott, A., Böhm, L., & Wiedemann, S. (2017). Integration 4.0 - Anwendungsintegration im Zeitalter der Cloud. In V. P. Andelfinger, & T. Hänisch, *Industrie 4.0* (S. 69 - 82). Wiesbaden: Springer Gabler.
- Garg, T. (01. Dezember 2010). *SAAS, PAAS and IAAS – Making Cloud Computing Less Cloudy*. Abgerufen am 09. Februar 2018 von CIO Research Center: <http://cioresearchcenter.com/2010/12/107/>
- Grävemeyer, A. (23. Juni 2018). KI erkennt Krebs. *c't Magazin für Computer und Technik*, S. 52 - 53.
- Grävemeyer, A. (09. Juni 2018). Mit Feingefühl und auch mal autonom. *c't Magazin für Computer und Technik*, S. 126 - 128.
- Gronau, N. (23. Juni 2015). *Industrie 4.0*. Abgerufen am 29. Mai 2018 von Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik Online-Lexikon: <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/informationssysteme/Sektorspezifische-Anwendungssysteme/cyber-physische-systeme/industrie-4.0>
- Hänisch, T. (2017). Grundlagen Industrie 4.0. In V. P. Andelfinger, & T. Hänisch, *Industrie 4.0* (S. 9 - 31). Wiesbaden: Springer Gabler.
- Hardwick, M. (11. Oktober 2017). *Digital Twin Machining*. Abgerufen am 26. Januar 2018 von Step Tools: http://www.steptools.com/blog/20171011_twin_machining/
- Industrie 4.0: Wenn die Revolution nach Österreich kommt*. (22. August 2014). Abgerufen am 09. Februar 2018 von DiePresse: https://diepresse.com/home/alpbach/3858672/Industrie-40_Wenn-die-Revolution-nach-Oesterreich-kommt
- Jahn, M. (2017). *Industrie 4.0 konkret*. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Janiesch, C. (08. September 2017). *Cyber-physische Systeme*. Abgerufen am 29. Mai 2017 von Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik Online-Lexikon: <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/informationssysteme/lexikon/informationssysteme/Sektorspezifische-Anwendungssysteme/cyber-physische-systeme/cyber-physische-systeme>
- Kaufmann, T. (2015). *Geschäftsmodelle in Industrie 4.0 und dem Internet der Dinge*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Keferstein, C. P., & Dutschke, W. W. (2008). *Fretigungsmesstechnik*. Wiesbaden: B. G. Teubner.
- Klein, A., Wolters, F., Dederichs, S., & Karl, F. (Dezember 2016). *Welcher Kommunikationsstandard für künftige Industrie 4.0-Fabriken?* Abgerufen am 29. Mai 2018 von VDI-Z Integrierte Produktion: <https://www.vdi-z.de/2016/Ausgabe-12/Sonderteil-Elektrische-Automatisierung/Welcher-Kommunikationsstandard-fuer-kuenftige-Industrie-4.0-Fabriken>

- Lauer, B. (05. Oktober 2017). *Für 79 Prozent der Befragten gehört KI zu den Top-Prioritäten*. Abgerufen am 31. Januar 2018 von dotnetpro: <https://www.dotnetpro.de/diverses/79-prozent-befragten-gehört-ki-zu-top-prioritäten-1390710.html>
- Lorenz, P. A. (20. Juli 2017). Das Gold von morgen. *dotnetpro Das Magazin für Profi-Entwickler*, S. 136 - 139.
- Lorenz, P. A. (18. Dezember 2017). Du sollst nicht programmieren. *dotnetpro Das Magazin für Profi-Entwickler*, S. 136 - 139 .
- Mahn, J. (03. März 2018). Weltsprache. *c't Magazin für Computer und Technik*, S. 164 - 167.
- Masiske, H.-A. (15. April 2017). Hand in Hand. *c't Magazin für Computer und Technik*, S. 110 - 112.
- Microsoft. (2018). *Cognitive Services*. Abgerufen am 03. Februar 2018 von Microsoft Azure: <https://azure.microsoft.com/de-de/services/cognitive-services/>
- Microsoft. (2018). *Microsoft Azure: Cloud*. Abgerufen am 03. Februar 2018 von Microsoft Azure: <https://azure.microsoft.com/de-de/>
- National Institute of Standards and Technology. (02. Oktober 2015). *Digital Thread in Manufacturing*. Abgerufen am 25. Januar 2018 von NIST: <https://www.nist.gov/video/digital-thread-manufacturing>
- Porteck, S. (14. April 2018). Alles im Blick? *c't Magazin für Computer und Technik*, S. 74 -76.
- Porteck, S. (26. Mai 2018). Googles KI-Offensive. *c't Magazin für Computer und Technik*, S. 18 - 19.
- Reiss, A. (15. April 2017). Defekt Verhinderer. *c't Magazin für Computer und Technik*, S. 116 - 119.
- Roden, G. (16. Oktober 2017). Eine Frage der Daten. *dotnetpro Das Magazin für Profi-Entwickler*, S. 60 - 62.
- Roden, G. (18. September 2017). Lesen oder schreiben. *dotnetpro Das Magazin für Profi-Entwickler*, S. 33 - 35.
- Rosic, A. (2017). *What is Blockchain Technology? A Step-by-Step Guide For Beginners*. Abgerufen am 31.. Mai 2018 von Blockgeeks: <https://blockgeeks.com/guides/what-is-blockchain-technology/>
- Schidler, P. (14. August 2017). Die Rätselkette. *dotnetpro Das Magazin für Profi-Entwickler*, S. 12 - 17.
- Schidler, P. (14. August 2017). Hammer sucht Nagel. *dotnetpro Das Magazin für Profi-Entwickler*, S. 40 - 42.
- Schüler, P. (15. April 2017). Digit-All-isierung. *c't Magazin für Computer und Technik*, S. 106 - 108.

- Schüler, P. (02. September 2017). Ganzheitliche Digitalisierung. *c't Magazin für Computer und Technik*, S. 72 - 73.
- Schulz, H. (28. Oktober 2017). Das macht Blockchain. *c't Magazin für Computer und Technik*, S. 102 - 106.
- Schulz, H. (28. Oktober 2017). Vertrag denkt mit. *c't Magazin für Computer und Technik*, S. 108 - 112.
- Schulzki-Haddouti, C. (20. Juli 2017). Im Zweifel für den Menschen. *c't Magazin für Computer und Technik*, S. 64.
- Schulzki-Haddouti, C. (14. Oktober 2017). Law & Order fürs Auto. *c't Magazin für Computer und Technik*, S. 38.
- Schulzki-Haddouti, C. (23. Juni 2018). Personenschützer. *c't Magazin für Computer und Technik*, S. 78 - 81.
- Schwab, K. (2016). *Die vierte industrielle Revolution*. München: Pantheon.
- State, J. (1. Mai 2017). *VR, AR or MR...What's the Difference & Why Should I Care?* Abgerufen am 09. Februar 2018 von Applied Art & Technology: <http://www.appliedart.com/blog/vr-ar-or-mr-what-s-the-difference-why-should-i-care>
- Thoben, K.-D., Wiesner, S. A., & Wuest, T. (Januar 2017). *"Industrie 4.0" and Smart Manufacturing – A Review of Research Issues and Application Examples*. Abgerufen am 09. Februar 2018 von ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/312069858_Industrie_4_0_and_Smart_Manufacturing_-_A_Review_of_Research_Issues_and_Application_Examples
- Veselovac, D., & Jamal, R. (2014). *Sensoren für Industrie 4.0*. Abgerufen am 08. Februar 2018 von etz elektronik & automation: <http://www.etz.de/4576-0-Sensoren+fuer+Industrie+40.html>
- Westphal, R. (2013). *Messaging as a Programming Model*. Leanpub.
- Westphal, R. (14. Mai 2018). HTTP-Services für jedermann. *dotnetpro Das Magazin für Profi-Entwickler*, S. 36 - 39.
- Wolff, E. (2016). Microservices - eine Bestandsaufnahme. In i. D. GmbH, *Published 05* (S. 33 - 41). Monheim am Rhein: innoQ Deutschland GmbH.
- Wolff, E. (2016). Softwarearchitektur für Innovation. In i. D. GmbH, *Published 05* (S. 215 - 223). Monheim am Rhein: innoQ Deutschland GmbH.
- Ziegler, P.-M. (15. April 2017). Voll den Durchblick. *c't Magazin für Computer und Technik*, S. 114 - 115.

Zimmermann, T. (16. Oktober 2017). Gut Verbunden. *dotnetpro Das Magazin für Profi-Entwickler*, S. 89 - 93.

Zühlke, D. (22. März 2016). The Rocky Road to the Factory of the Future. *Manufacturing Leadership Journal*, S. 34-39.