



Universität Stuttgart

Institut für Parallele und Verteilte Systeme
Anwendersoftware

Referenzmodelle für das Informationsmanagement in der Smart Factory

Seminararbeit

IT-Systeme und Referenzmodelle für die Smart Factory (SS 2015)

Betreuer: Christoph Gröger

Fabian Keller

Stuttgart, 8. Juni 2015

Referenzmodelle für das Informationsmanagement in der Smart Factory

Fabian Keller

`uni@fabian-keller.de`

Zusammenfassung Im Zuge der vierten industriellen Revolution werden Fertigungsanlagen zunehmend intelligenter und Unternehmen müssen sich der Herausforderung dieser zunehmenden Informationsflut stellen. Derzeit sind Industrie und Forschung damit bemüht einen gangbaren Weg zu finden, um die Visionen der intelligenten Fabrik der Zukunft zu ermöglichen. Eine zentrale Herausforderung dabei ist das Informationsmanagement in einer hochgradig vernetzten Fabrik, die darüber hinaus idealerweise mit ihrer gesamten Zulieferkette vernetzt ist. Diese Arbeit stellt vier Referenzmodelle für das Informationsmanagement vor und zieht eine vergleichende Bilanz über den Stand der Forschung.

1 Einleitung

Mit der Veröffentlichung des Begriffs „Industrie 4.0“ auf der Hannover Messe 2011 wurde die vierte industrielle Revolution eingeläutet [21]. Die erste industrielle Revolution erfolgte Ende des 18. Jahrhunderts durch die Einführung mechanischer Fertigungsanlagen, wie dem Webstuhl, die mit Wasser- und Dampfkraft betrieben wurden. Eines der bekanntesten Beispiele für die zweite industrielle Revolution mit Beginn des 20. Jahrhunderts stellt Henry Ford mit der Fließbandproduktion von Kraftfahrzeugen dar, die Zeit und Kosten für die Herstellung eines Kraftfahrzeugs erheblich senkte. Der damalige Beginn der Massenproduktion fand durch den Einsatz von elektrotechnischen Komponenten, die zur Automatisierung von bestehenden Prozessen eingesetzt wurden, Anfang der 1970er Jahre erneut einen erheblichen Aufschwung [20]. Durch die zunehmende Digitalisierung und fortschreitende Intelligenz der Fertigungsanlagen stellt die Industrie 4.0 nun die nächste industrielle Revolution dar, die gerade erst begonnen hat.

Durch die Technisierung der Fertigungsanlagen verändern sich die Geschäftsbedingungen erheblich, da Fertigungsprozesse nun intelligent, flexibel und ressourcenschonend ausgelegt werden können. Dies stellt Unternehmen jedoch vor zusätzliche Herausforderungen, da zumeist eine heterogene Gerätelandschaft vorliegt, die nicht ohne weiteres vernetzt werden kann. Genau in dieser Vernetzung der Gerätelandschaft liegt aber das Potential der Industrie 4.0, da durch Informationsflüsse, die auf verschiedenste Systeme zugreifen, intelligente Produktionssysteme geschaffen werden können. Die Informations- und Kommunikationstechnik wird daher als Schlüsseltechnologie für die „Smart Factory“ angesehen. Dadurch ergeben sich nun Handlungsfelder, um Unternehmen bei der Integration dieser

neuen Technologien zu unterstützen, ohne bestehende Fertigungsprozesse zu unterbrechen. Zusätzlich entsteht durch die Vielzahl an nun digital gewonnen Informationen die Herausforderung diese Informationen geschickt zu verwenden. Genau dieser Thematik widmet sich derzeit ein breit aufgestelltes Spektrum von Forschungsrichtungen, die das Informationsmanagement in der Smart Factory durch Referenzmodelle beschreiben, die Unternehmen nutzen können, um ihre Fertigungsanlagen gemäß ihren Anforderungen umzusetzen.

Diese Arbeit stellt wesentliche Referenzmodellen für das Informationsmanagement vergleichend vor und zeigt zukünftige Potentiale, die sich durch den Status quo ergeben, auf. Abschnitt 2 versucht die vielseitig auslegbaren Begriffe die im Kontext zur Industrie 4.0 aufgekomen sind anhand existierender Literatur einheitlich zu definieren. Abschnitt 3 vermittelt einen Überblick über die herkömmliche Automatisierungstechnik der vergangenen Jahrzehnte. In Abschnitt 4 werden Chancen, Herausforderungen und Vision der intelligenten Fabrik dargelegt. Verschiedene Referenzmodelle für die intelligente Fabrik werden in Abschnitt 5 vorgestellt. Abschnitt 6 zieht anschließend eine vergleichende Bilanz der vorgestellten Referenzmodelle, bevor Abschnitt 7 einen Ausblick auf zukünftige Forschung gibt.

2 Begriffsklärung

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die in dieser Arbeit verwendeten Begriffe und ihrer Bedeutung untereinander.

Industrie 4.0 ist ein zukunftsorientiertes Technologieprojekt der deutschen Bundesregierung [21]. Der Begriff steht für die vierte industrielle Revolution, dessen technologischen Grundlagen das Internet der Dinge und cyber-physische Systeme sind [27]. Derzeit ist „Industrie 4.0“ ein Sammelbegriff für visionäre Vorstellungen von zukünftigen Fertigungsanlagen, aber dennoch lassen sich einige Ansätze und Charakteristika von Systemen der Industrie 4.0 beschreiben und erkennen [48]. Die Industrie 4.0 hat zum Ziel Fertigungsanlagen zu flexibilisieren, um eine Massen-Individualisierung von Produkten zu ermöglichen. Durch die hohe Vernetzung der Anlagen sogar mit dem Zuliefernetzwerk lässt sich eine hohe Prozesseffizienz erzielen und Ressourcen schonen [18].

Das **Internet der Dinge** versucht nach Atzori et al. [5] die reale mit der virtuellen Welt zu vereinen, indem es die Verknüpfung von Informationen mit Gegenständen ermöglicht. Beispielsweise können Informationen mittels RFID (radio-frequency identification) auf Gegenständen gespeichert werden, sodass der Gegenstand selbst „intelligent“ wird [9, 52]. Das Internet der Dinge ermöglicht damit Gegenständen eine Semantik zuzuweisen und hierdurch Kommunikationsparadigmen zu definieren [9]. Zusätzlich ist eine wesentliche Eigenschaft den physischen Aufenthaltsort der Gegenstände bestimmen und Gegenstände eindeutig identifizieren [28] zu können.

Cyber-physische Systeme (CPS) verbindet die physischen, vom Menschen geschaffenen, Systeme mit informationsverarbeitenden digitalen Systemen [7].

Durch die Kombination von CPS mit dem Internet der Dinge ist es somit möglich, dass Fertigungsanlagen Informationen mit Werkstücken austauschen können, um den Produktionsprozess zu steuern und zu optimieren. Nach Linke [27] reichen CPS von eingebetteten Systemen bis hin zu weltweit vernetzten Diensten, die mittels Sensoren physikalische Daten erfassen und teilen, als auch mittels Aktoren auf physikalische Vorgänge einwirken können.

Die **Smart Factory**, zu deutsch „intelligente Fabrik“, nutzt cyber-physische Systeme, um die Konzepte der Industrie 4.0 zu ermöglichen. Hierbei werden Produktionsumgebungen dynamisch und selbst-organisierend gestaltet, um komplexe Probleme in einer sich ständig ändernden Welt effizient und schnell lösen zu können. Radziwon et al. [30] verstehen unter dem Begriff der Smart Factory eine Fertigungslösung, die ein modernes Automatisierungskonzept unter enger Verstrickung von Hardware und Software ermöglicht. Gleichzeitig kann die Smart Factory als eine Perspektive der Zusammenarbeit zwischen industriellen und nichtindustriellen Partnern betrachtet werden, die gemeinsam eine intelligente und dynamische Einheit formen. Wie auch die Industrie 4.0 ist die Smart Factory nach heutigem Stand der Technik eine Vision, deren Ermöglichung erforscht, erprobt und immer weiter verbessert wird.

Unter dem Aspekt der **Automatisierung** versteht sich nach dem Elektrotechnischen Wörterbuch DIN IEC 60050-351 zitiert nach Linke [27]: *einen Prozess oder eine Einrichtung bezeichnend, der oder die unter festgelegten Bedingungen ohne menschliches Eingreifen abläuft oder arbeitet*. Eine Automatisierung in einem Fertigungskontext hat im Allgemeinen zum Ziel, die Produktivität zu erhöhen, die Fertigungszeiten zu verkürzen, die menschliche Arbeit zu erleichtern, die Kosten zu senken, sowie die Qualität zu erhöhen [27].

Da in Smart Factories der Grad der Automatisierung sehr hoch ist, erfordert eine praktische Umsetzung sogenannte **Referenzmodelle**. Ein Referenzmodell ist ein Modell, welches zur Entwicklung spezieller und auf konkrete Anforderungen angepasste Modelle ermöglicht [17]. Dabei steht als kostenreduzierender Faktor die Wiederverwendbarkeit des Referenzmodells im Vordergrund. Die Referenzmodelle, die für die Industrie 4.0 infrage kommen, lassen sich nach der deutschen Normungs-Roadmap „Industrie 4.0“ [37] in fünf Bereiche unterteilen: die Systemarchitektur, die technischen Systeme und Prozesse, die leittechnischen Funktionen, die technisch-organisatorischen Prozesse sowie die Aufgaben und Rollen des Menschen.

Referenzmodelle für das **Informationsmanagement** lassen sich in alle fünf Teilbereiche der Normungs-Roadmap einordnen. Diese Arbeit befasst sich mit dem Informationsmanagement in Referenzmodellen für die Smart Factory. Nach Krcmar [24] liegen dem Informationsmanagement unter anderem die beiden Kernaufgaben des Bereitstellens benötigter Informationen und die Verwaltung der dafür erforderlichen Infrastruktur zugrunde. In dieser Arbeit bezieht sich das Informationsmanagement ausschließlich auf einen Fertigungskontext. Die nach Krcmar in dem Informationsmanagement ebenfalls enthaltenen Führungsaufgaben sind nicht Teil der Betrachtung in dieser Arbeit. Relevant sind dagegen sämtliche Informationen, die in einer Fertigungsanlage sowohl für den laufenden

Betrieb als auch für die strategische Produktionsplanung relevant sind. Neben den Informationen selbst wird in dieser Arbeit ebenfalls der Fokus auf die Organisation der IT-Systeme gelegt, die die Erhebung, Verarbeitung und Speicherung der nötigen Informationen bewerkstelligen und unterstützen.

3 Informationsmanagement in der Herkömmlichen Produktion

Zur Produktionsautomatisierung vor der Industrie 4.0 wurde jahrzehntelang die Automatisierungspyramide als Referenzmodell für das Informationsmanagement herangezogen [43]. Abschnitt 3.1 erklärt die wesentlichen Prinzipien der Automatisierungspyramide, bevor Abschnitt 3.2 die Einschränkungen der Pyramide durch den technologischen Fortschritt erläutert.

3.1 Informationsmanagement mit der Automatisierungspyramide

Die Automatisierungspyramide gemäß Abbildung 1 unterscheidet nach der VDI Norm 5600 [38] drei verschiedene Ebenen, die untereinander eine Hierarchie ausbilden. Die drei Ebenen dieses Modells können weiter unterteilt werden, sodass die Automatisierungspyramide aus bis zu fünf Ebenen besteht [27, 32, 39, 43]. Für die Betrachtung in dieser Arbeit wird das vereinfachte Modell mit drei Ebenen verwendet, da dies die Einordnung der Ebenen und den Vergleich der Automatisierungspyramide mit anderen Referenzmodellen für das Informationsmanagement erleichtert.

Von untereren zu oberen Ebenen werden Informationen in der Regel aggregiert, um eine effiziente Übertragung und Verarbeitung von Daten zu ermöglichen. Die Datenmengen die hierbei verarbeitet werden müssen sind in höheren Ebenen größer als in den Ebenen darunter, da sie sich aus der Vielzahl kleiner Datenmengen aus den unteren Ebenen zusammensetzen. In den unteren Ebenen entstehen aufgrund der erforderlichen schnellen Datenverarbeitung der Informationsflüsse zudem Echtzeitanforderungen, während höhere Ebenen keine Echtzeitanforderungen aufweisen [43].

Als oberste Ebene beschreibt die *Unternehmensleitebene* vor allem strategische Prozesse und Aufgaben, wie die Investitions- oder Produktionsplanung. Typische Informationsflüsse sind dabei konkrete Aufgaben oder erfasste strategische Kennzahlen, welche meist in Enterprise Resource Planning (ERP) Systemen verwaltet werden. Die *Fertigungsleitebene* umfasst Prozesse die den täglichen Betrieb des Unternehmens kennzeichnen. Eingesetzt werden dabei Manufacturing Execution Systems (MES), die zur Verwaltung der Produktion inklusive der Kosten- und Terminkontrolle dienen. Um Maschinen und Personal in der Produktion zu verwalten werden sogenannte Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) Systeme verwendet [11]. Die Fertigungsleitebene stellt weiterhin sicher, dass die Produktionsprozesse gesteuert und geregelt werden können. Typischerweise läuft ein Produktionsprozess innerhalb eines Fertigungsbereichs ab, sodass räumliche

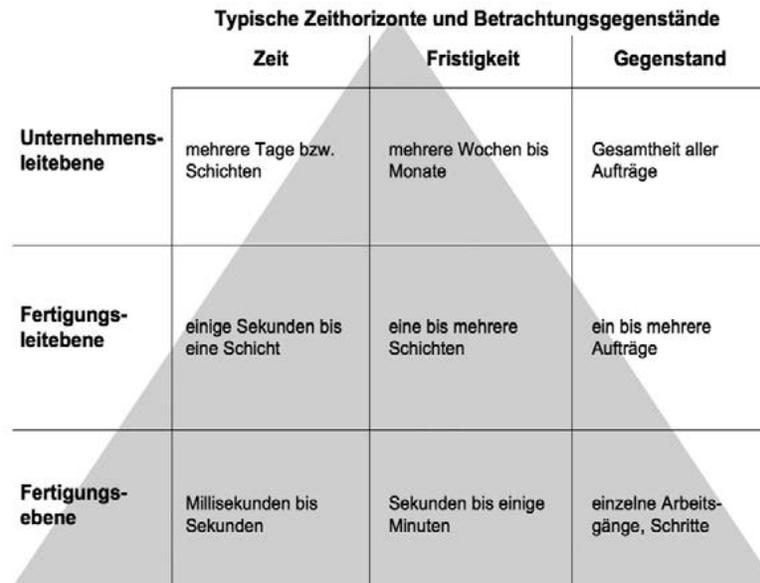


Abbildung 1. Schematische Darstellung der verschiedenen Ebenen der Automatisierungspyramide mit typischen Zeithorizonten und Betrachtungsgegenständen der jeweiligen Ebene. Grafik aus VDI [38].

Nähe zwischen den Anlagenkomponenten gegeben ist. Die *Fertigungsebene* enthält schließlich sämtliche Aktoren, Sensoren und Anzeigegeräte. Ziel ist es die anfallenden Datenmengen an die übergeordnete Ebene effizient und zeitnah zu übertragen, um eine Echtzeitsteuerung zu ermöglichen.

3.2 Änderungen im Informationsmanagement von Fertigungsanlagen

Die in Abschnitt 3.1 dargestellte Automatisierungspyramide diente lange als Referenzmodell für das Informationsmanagement in Fertigungsanlagen. Allerdings haben sich durch den technologischen Fortschritt Änderungen in den Fertigungsanlagen ergeben, die sich nicht mehr mit dem einfachen Modell der Automatisierungspyramide beschreiben lassen. Ziel dieser Änderungen ist es, die Produktivität zu erhöhen, die Kosten der Fertigungsprozesse zu senken, die Qualität zu erhöhen, sowie die Fertigungszeiten zu verkürzen [27]. Die Triebfeder der Rationalisierungsmaßnahmen ist hierbei die systemische Verkürzung des Produktentwicklungszyklus, da die Wünsche des Kunden häufigen Änderungen unterliegen und er darüber hinaus eine hohe Produktvielfalt fordert [23].

Im Falle der herkömmlichen Automatisierungspyramide ist es schwierig einen

bestehenden Fertigungsprozess anzupassen, da die Elemente in der Hierarchie einen festen Platz einnehmen und damit Abhängigkeiten untereinander ausbilden. Durch fehlende Standardisierungen ist es zudem schwierig Teile des Prozesses austauschbar zu gestalten [14, 43]. Viele der existierenden Lösungen verwenden Geräte mit herstellereigenen Informationsschnittstellen, die den gesamten Prozess aufgrund mangelnder Kompatibilität der Informationen unflexibel werden lassen [10].

Ein Versuch mehr Flexibilität in den Fertigungsprozess einzubringen stellt die Automatisierungspyramide mit modularen Sub-Prozessen dar [43]. Dabei herrscht (vor allem informationstechnisch betrachtet) eine Autonomie zwischen einzelnen Prozessschritten. Jeder Prozessschritt wird in der Fertigungslebene durch eine eigene Automatisierungspyramide abgebildet, welche Informationen erst auf Höhe der Unternehmenslebene teilen können. Dadurch entsteht eine deutlich leistungsfähigere und flexiblere Fertigung verglichen zu einer klassischen Automatisierungspyramide.

4 Herausforderungen und Potentiale der Industrie 4.0

Die Erwartungen, die sich an die Industrie 4.0 richten, sind vielseitig. Relevante Perspektiven sind dabei das Wirtschaftsunternehmen selbst, die Mitarbeiter des Unternehmens, die in die Fertigung involviert sind, die Kunden der gefertigten Produkte, sowie gesellschaftliche Forderungen durch sozial-ökologische Aspekte. Abschnitt 4.1 stellt die Charakteristika einer modernen Fertigung basierend auf den Konzepten der Industrie 4.0 vor. Die Herausforderungen die bei der Umsetzung der Konzepte berücksichtigt werden müssen sind in Abschnitt 4.2 erläutert. In Abschnitt 4.3 werden schließlich die Potentiale der Industrie 4.0 dargelegt.

4.1 Charakteristika der Industrie 4.0

Grundsätzliche Charakteristika einer modernen Fertigung lassen sich basierend auf Linke [27] und Drath und Koziolk [15] in vier wesentliche Bereiche unterteilen. Aus Sicht der **Wettbewerbsfähigkeit** ist es für ein Unternehmen unerlässlich eine Erhöhung der Produktionsleistung zu erreichen. Dabei sollen die Produktionskosten verringert werden, um niedrige Stückpreise zu erzielen. Gleichzeitig ist eine kurze Produktionszeit und eine gezielte Planung von Produktionsprozessen wichtig, um eine schnelle Reaktion auf veränderte Kundenwünsche zu ermöglichen. Durch den vermehrten Einsatz informationstechnischer Systeme muss bei allen Aktivitäten die Informationssicherheit gewährleistet bleiben, um beispielsweise der Betriebsespionage vorzubeugen. Die **Mitarbeiter** des produzierenden Unternehmens erwarten eine einfach verständliche und konsistente Bedienbarkeit der Fertigungsanlagen. Dabei ist es für sie wichtig, dass ihre Arbeit nicht ersetzt wird, sondern durch die informationstechnischen Systeme unterstützt wird. Dem **Kunden** sollen durch eine moderne Fertigung variationsreiche bis individuelle Produkte zum Preis einer vergleichbaren Massenfertigung angeboten werden

können. Die Qualität der gefertigten Produkte soll dabei noch weiter erhöht werden. Trotz des hohen Wettbewerbs erwartet die **Gesellschaft** einen geringen Rohstoffverbrauch, um Ressourcen zu schonen. Darüber hinaus soll durch eine Erhöhung der Produktionseffizienz der Energieverbrauch minimiert werden. Eine Verbesserung der technischen Sicherheit in der Fertigung soll mögliche Gefahrensituationen und Unfälle vermeiden.

Basierend auf diesen Charakteristika ergeben sich nun Herausforderungen und Potentiale der Industrie 4.0 bezüglich der Umsetzung des Konzepts.

4.2 Herausforderungen aus Sicht der IT

Aus den in Unterabschnitt 4.1 beschriebenen Charakteristika lassen sich Herausforderungen ableiten, die bei der tatsächlichen Umsetzung entstehen. Diese Herausforderungen lassen sich in *nicht-technische* und *technische* Herausforderungen einteilen, welche in diesem Abschnitt detailliert werden.

Nicht-technische Herausforderungen: Nach Drath [13] muss für ein Unternehmen der *Investitionsschutz* gegeben sein. Das bedeutet, dass Industrie 4.0 Komponenten sukzessive in bestehende Fertigungsanlagen integrierbar sein müssen. Integrierte Industrie 4.0 Komponenten dürfen darüber hinaus nicht zu einer Produktionsstörung oder einem Ausfall der Anlage führen. Für einen guten Investitionsschutz müssen zudem vor allem Anbieter von Produktionslösungen für einfache Migrationsmöglichkeiten in der Zukunft sorgen [8]. Die nicht-funktionalen Anforderungen an die alten Systeme müssen dabei durch die neuen Komponenten mindestens erfüllt sein. Damit sich die Investition lohnt, ist es wichtig dass die neuen Komponenten ungeachtet ihrer Komplexität eine hohe *Stabilität* aufweisen, daher zuverlässig, robust und langlebig sind. Durch den hohen Grad der Vernetzung von Industrie 4.0 Komponenten ist eine gute *Steuerbarkeit* zwingend erforderlich. Um die *Informationssicherheit* zu gewährleisten, ist zum einen die Sicherheit des Systems gegen ungewollte Zugriffe (von außen), als auch die feingranulare Berechtigungszuweisung von Eingriffen in die Produktion durch Mitarbeiter im Unternehmen von sehr hoher Bedeutung [16].

Technische Herausforderungen: Speziell aus Sicht der IT sieht Vogel-Heuser [42] Herausforderungen in verschiedenen Teilbereichen. Einer der Teilbereiche ist die *Informationsaggregation und -aufbereitung für den Menschen*. Die anfallenden, enormen Datenmengen müssen für den Operator als auch für den Ingenieur nutzbar sein. Das bedeutet, dass eine Aufbereitung der Daten kontextspezifisch und anwendungsbezogen erfolgen muss. Wichtig dabei ist, dass die Daten gefiltert werden und ihre Zusammenhänge zwischen ihnen hergestellt werden [45]. Den Mitarbeitern soll es möglich sein, aufgrund dieser Daten Schlüsse zu ziehen und dadurch ihr Vorgehen planen zu können.

Ein weiterer Teilbereich stellt die *Kommunikation und Datendurchgängigkeit* dar. Bestehende Fertigungsanlagen weisen häufig eine hohe Kopplung der verwendeten

Daten auf. Dies ist auf fehlende herstellerunabhängige Standardschnittstellen zurückzuführen. Um flexibler Änderungen vornehmen zu können, müssen Daten aus Engineering-Systemen und aus Laufzeitsystemen intelligenter verknüpft werden können. Langfristig ist dabei eine modellbasierte Verknüpfung der verschiedenen Engineering-Systemen mittels standardisierter Schnittstellen und Kommunikationsparadigma nötig, wie sie beispielsweise von Terkaj und Urgo [36] genutzt wird, um reale Performance-Daten einer Produktionsanlage an dessen digitales Modell zu knüpfen. Hierbei können einzelne Prozesse unabhängig modelliert, erweitert und verändert werden, ohne Auswirkungen auf das Gesamtsystem zu haben. Gleichzeitig ist durch die modellgetriebene Prozessbeschreibung eine Simulation dessen möglich, um Schwachstellen bereits vor der Umsetzung zu erkennen. Durch eine einheitliche Modellierung und Formalisierung kann zudem eine automatische Produktionsplanung und -optimierung ermöglicht werden [4].

Zusätzlich besteht die Herausforderung *intelligente Produkte und adaptive intelligente Produktionseinheiten* zu gestalten. Diese so genannten „smart products“ bringen die Information zu ihrer Fertigung wörtlich bereits mit sich. Technisch können diese Informationen beispielsweise mittels RFID direkt auf dem Werkstück aufgebracht und können dadurch von allen Maschinen die an der Fertigung des Werkstücks involviert sind, ausgelesen werden [9, 52]. Da die Maschinen ihre Fähigkeiten auch kennen, können damit automatische Prozessanpassen erfolgen, indem die Maschinen und Werkstücke kommunizieren, um den optimalen Fertigungspfad zu ermitteln.

Schließlich ist eine weitere Herausforderung das Erstellen von *Referenzmodellen*, die definieren und standardisieren wie die Herausforderungen konkret gelöst werden können. Wichtig dabei ist vor allem, dass heterogene Gerätelandschaften einfach integriert werden können. Nach Azevedo und Almeida [6] müssen Referenzmodelle auf bewährte Praktiken jeweiliger Industriesparten Rücksicht nehmen. Zusätzlich ist es wichtig, dass das Referenzmodell nicht verhindert, die vielen, in Unternehmen bereits gelebten, Prozesse zu modellieren. Das Referenzmodell soll zudem die Möglichkeit bieten, die erforderlichen und entstehenden Informationen von beteiligten Prozessen zu spezifizieren. Außerdem muss spezifiziert werden können, wer anfallende Informationen in welcher Form erhält, sodass die fließenden Informationen in ihrer Gesamtheit sinnvoll interpretierbar sind.

4.3 Potentiale der Industrie 4.0

Neben den Herausforderungen sehen Drath und Koziolk [15], Shrouf et al. [34] viele zukünftige Möglichkeiten, die mit einer intelligenten Fabrik erreicht werden können. Zukünftig sind Maschinen in der Smart Factory *herstellerübergreifend* identifizierbar und ansprechbar. Dadurch können die Maschinen vernetzt werden, wodurch sie dem Menschen in der Konstruktion, dem Betrieb und der Wartung hilfreiche Informationen bereitstellen. Gleichzeitig kann durch die Standardisierung die Fertigungsanlage virtuell simuliert werden, bevor sie physisch in Betrieb

genommen wird. Der Betrieb kann durch die Identifikation der Maschinen *Fernüberwacht* werden, was eine proaktive Wartung von Maschinen ermöglicht und neue Dienstleistungsmöglichkeiten erschafft [31, 44].

Dies ermöglicht ein breites Spektrum an *Prozess-Optimierungspotential*, da entsprechende Algorithmen mit simulierten und realen Daten den Prozess optimieren können. Beispielsweise kann der Energieverbrauch sämtlicher Maschinen zur Laufzeit erhoben und damit optimiert werden [35]. Mittels *BigData*-Analyse von Informationen aus Produktionsprozessen haben Unternehmen nun die Möglichkeit ihr Wertschöpfungspotential zu erhöhen. Hier wird beispielsweise schnell auf Produktionsfehler eingegangen, die in der Qualitätssicherung festgestellt werden, indem Maschinen, die aus der Toleranz laufen, sofort einen Wartungstechniker rufen. Gleichzeitig kann durch die Echtzeitanalyse von Informationen der Prozess im Hinblick auf verschiedener Aspekte wie Zeit, Qualität, Preis und ökologischer Aspekte zur Laufzeit angepasst werden [26, 41].

Durch den erhöhten *Informationsaustausch* und dem vorhandenen (semantischen) Wissen im Maschinennetzwerk können Werkstücke optimal durch die Fertigungsanlage manövriert werden. In einem noch größeren Kontext können dabei sogar ganze Zuliefernetzwerke verschaltet werden [47]. Damit wäre es beispielsweise möglich in Echtzeit auf Zulieferengpässe zu reagieren. Mit allen genannten Visionen rückt eine Massen-Individualisierung im Fertigungsprozess immer näher.

5 Referenzmodelle für das Informationsmanagement

Um die Anforderungen und Herausforderungen anzugehen gibt es diverse Referenzmodelle für das Informationsmanagement in der Smart Factory. In dieser Arbeit werden vier verschiedene Referenzmodelle vorgestellt. Die gewählten Referenzmodelle decken einen Großteil der Forschung ab, die zum gegenwärtigen Zeitpunkt mittels informationstechnischer Methoden bestrebt sind, Fertigungsanlagen intelligenter zu gestalten. Dabei beleuchten die verschiedenen Ansätze die Problemstellung aus unterschiedlichen Perspektiven und schließen sich nicht zwingend gegenseitig aus. Die vorliegende Arbeit gibt einen Überblick über die Hintergründe, Ansätze und Perspektiven der verschiedenen Forschungsrichtungen.

Das in Abschnitt 5.1 vorgestellte Automatisierungsdiabolo beschreibt den konzeptionellen Wandel des Informationsmanagements durch die Industrie 4.0. Das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0, das besonders vom deutschen Wirtschaftsraum gefördert wird, ist in Abschnitt 5.2 vorgestellt. Anschließend folgen in Abschnitt 5.3 Referenzmodelle zur Service-orientierten Integration der Leitebenen der Automatisierungspyramide. Schließlich stellt Abschnitt 5.4 einen Cloud-basierten Ansatz zur Entwicklung und Fertigung dar.

5.1 Automatisierungsdiabolo

Cyber-physical Systems haben längst Einzug in die moderne Fertigungsanlage gefunden. CPS sind jedoch nicht nur (informations)technisch komplexe Fertigungsbestandteile, sondern erhöhen ebenfalls die Komplexität der benötigten

Automatisierung. Da CPS aus intelligenten und kooperativen eingebetteten Systemen bestehen, kann man aufgrund der dezentralen Steuerung nicht mehr von einer Automatisierungspyramide sprechen. Die Automatisierung lässt sich konzeptuell vielmehr als *Automatisierungsdiabolo* [43] wie in Abbildung 2 betrachten. Ein wesentlicher Aspekt des Modells ist die Lösung von den starren Ebenen der Automatisierungspyramide. Das Diabolo besteht im wesentlichen aus zwei Bereichen, die durch ein gemeinsam genutztes Informationsmodell kommunizieren können. Der obere Bereich entspricht dabei weitestgehend der Manufacturing Execution System (MES) Ebene, also der Produktions- und Betriebsleitebene der Automatisierungspyramide. Der untere Bereich des Diabolos entspricht der Feld- und Prozessleitebene, die die eigentlichen Aktoren und Sensoren enthält. Daten werden zwischen den Bereichen nun in einem standardisierten, möglichst herstellerunabhängigen Informationsmodell ausgetauscht, sodass eine vertikale Integration der beiden Bereichen ermöglicht wird. Gleichzeitig bietet das Modell Möglichkeiten zur horizontalen Integration von Produktionsanlagen, die durch die hohe Informationsquantität im unteren Bereich des Diabolos zwingend erforderlich ist.

Die Aufteilung des Automatisierungsdiabolos weist eine Ähnlichkeit zu den Bereichen des Informationsaustausches nach DIN 62264-1 [12] auf. Das Pendant zum Informationsmodell des Automatisierungsdiabolos stellt in der DIN 62264-1 ein dreiteiliges Informationsmodell dar. Die drei Teile des Modells entsprechen dabei 1) Informationen über das Potential, ein Produkt herzustellen, 2) Informationen, die zur Produktion benötigt werden und 3) Informationen über die tatsächliche Produktion. Die drei Bereiche überschneiden sich mit Informationen aus der Unternehmensplanung und der Anlagenproduktionsdisposition, was dem oberen Teil des Diabolos entspricht, und Informationen zum Betrieb und zur Steuerung von Produktionsanlagen, was dem unteren Teil des Diabolos entspricht. Die DIN Norm detailliert dabei die 3 Bereiche des Informationsmodells.

Zukünftig ist es möglich durch die Abstraktionsebene des Informationsmodells im Automatisierungsdiabolo eine „plug-and-produce“-fähige, modulare und vernetzte Fertigungsanlage zu gestalten [32]. Die Arbeiten an einer Standardisierung des Informationsmodell und der herstellerunabhängigen (einfachen) Integration von Fertigungsanlagen steht jedoch noch am Anfang. Bisher geben relevante Forschungsarbeiten zu dem Automatisierungsdiabolo noch keine konkreten Anhaltspunkte wie ein solches Informationsmodell aussehen könnte. Dennoch erfordert die Smart Factory ein Umdenken, was die langjährig in der Automatisierungstechnik gelehrt Konzepte angeht. Das Automatisierungsdiabolo setzt dabei einen der benötigten Grundsteine für das Informationsmanagement.

5.2 Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0)

Das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 ist eine Hightech-Strategie der deutschen Bundesregierung, die mittels den technischen Grundlagen von cyber-physischen Systemen und dem Internet der Dinge die Wettbewerbsfähigkeit des Industriestandortes Deutschland stärken soll. Dabei ist vor allem wichtig im Rahmen heutiger und zukünftiger informationstechnischer Technologien eine intelligente

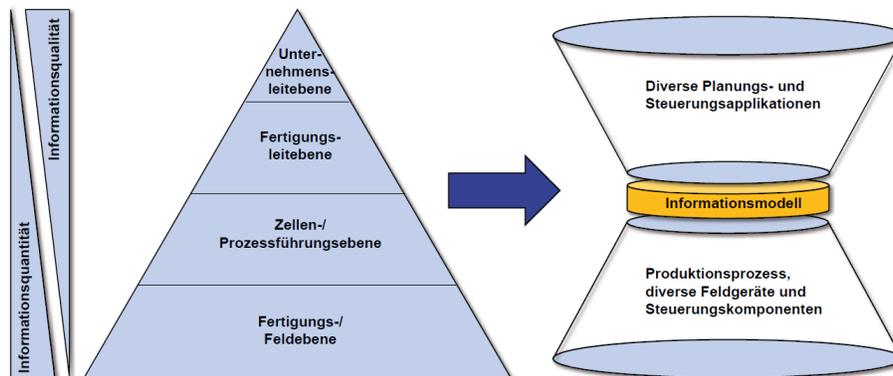


Abbildung 2. Transformation der Automatisierungspyramide in das Automatisierungsdiabolo. Grafik aus Sauer [32].

Fabrik zu erstellen, die die Automation der Fertigungsprozesse in Unternehmen grundlegend verbessern. Um für ein grundsätzliches Referenzmodell für die Prozessautomation einen Konsens zwischen den unterschiedlichen Interessen, Technologien und verwendeten Standards der involvierten Branchen zu finden ist das „Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0“ (RAMI 4.0) [1, 2] derzeit in Arbeit. Ziel des Referenzmodells ist vor allem eine einheitliche Kommunikationsplattform zu schaffen, um zukünftig zielorientiert Standards und Normen zu kreieren. Dabei bedeutet zielorientiert zum einen Lücken in bestehenden Standards und Normen zu schließen, Überschneidungen zwischen mehreren Standards und Normen zu definieren (i.e. Vorzugslösungen) und die Anzahl der eingesetzten Standards und Normen zu minimieren.

Überblick über RAMI 4.0: In Abbildung 3 ist eine Übersicht des RAMI 4.0 Referenzmodells dargestellt. Die vertikale Achse ist dabei in Schichten unterteilt, die häufig in IT-nahen Projekten verwendet werden, um die Komplexität der Prozesse eines produzierenden Unternehmens in kleinere Schichten und überschaubare Teilmengen aufzubrechen. Auf der einen horizontalen Achse wird der Lebenszyklus des Produkts mit seinen Wertschöpfungsketten dargestellt. Besonders wichtig ist dabei die Durchgängigkeit sämtlicher Daten in allen Produktlebenszyklen, wie sie bereits von Vogel-Heuser [42] gefordert wurde (vgl. Abschnitt 4.2). Die andere horizontale Achse bildet eine funktionale Hierarchie innerhalb der Fertigungsanlage aus. Trotz der Ähnlichkeit zu den Leitebenen aus der Automatisierungspyramide wie in Abschnitt 3 vorgestellt handelt es sich bei dieser Taxonomie um keine *organisatorische* Beziehung, sondern um die systemisch betrachteten funktionalen Aspekte der einzelnen Unterteilungen. Die 6 Schichten des Referenzmodells sollen eine lose Kopplung zwischen den Schichten, und gleichzeitig eine hohe Kohäsion innerhalb einer Schicht aufweisen.

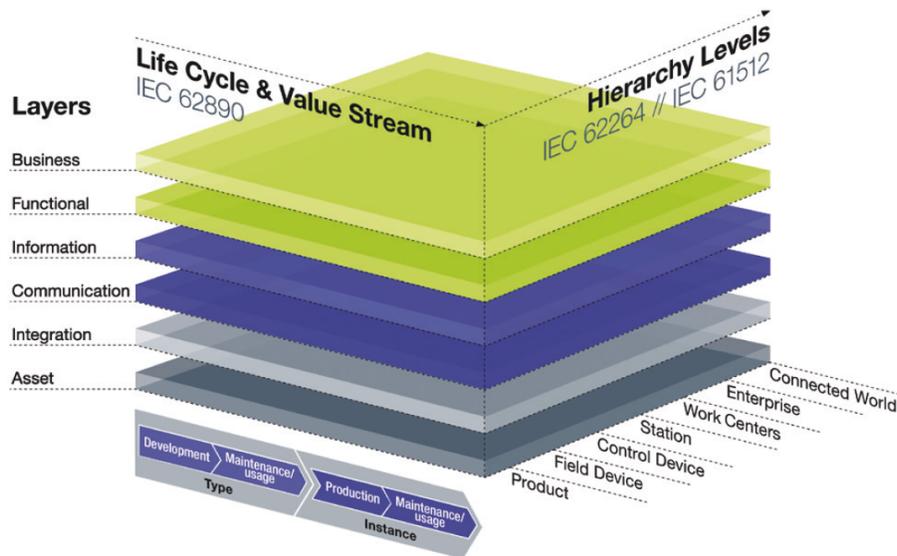


Abbildung 3. Die Schichten und Dimensionen des Referenzarchitekturmodells Industrie 4.0. Grafik aus [2].

Die unterste Schicht **Assets** steht für die realen Komponenten und Maschinen innerhalb einer Fertigungsanlage. Darüber hinaus enthält die Assets-Schicht auch Werkstoffe, Dokumente, Ideen und schließlich auch den Menschen selbst. Die Anbindung an die virtuelle Welt erfolgt über die **Integrations**-Schicht, welche sämtliche Informationen über die reale Welt enthält und bereitstellt. Auch die Beziehungen zwischen realen Elementen sind in der Integrations-Schicht manifestiert, beispielsweise die Zugehörigkeit einer Komponente zu einer Maschine. Neben der reinen Informationshaltung ist die Schicht auch zuständig für die konkrete Steuerung technischer Prozesse. Ereignisse, die sich in der realen Welt ereignen werden ebenfalls in der Integrations-Schicht virtuell abgebildet und können somit an höhere Schichten weitergereicht werden. Für die Weiterreichung der Ereignisse ist dabei die **Kommunikations**-Schicht zuständig, die einheitliche Datenformate und Transportprotokolle definiert. Weiterhin überträgt die Kommunikationsschicht einheitlich definierte Steuerungsbefehle für die technischen Prozesse, die von der Integrationssschicht dann ausgeführt werden. Die **Informationsschicht** stellt eine Laufzeitumgebung für die Ereignisse und Informationen, die aus der Kommunikationsschicht übertragen werden, bereit. Dabei bietet die Informationsschicht die Möglichkeit ereignisorientierte Regeln formal zu definieren, die zur Steuerung genutzt werden können. Gleichzeitig bietet die Informationsschicht die Möglichkeit Daten und Ereignisse persistent und konsistent zu speichern. Dabei ist es insbesondere wichtig Daten aus heterogenen Quellen in ein einheitliches und konsistentes Datenformat zu transformieren. Die Modellierung von

Geschäftsprozessen und das Bereitstellen von Diensten, die horizontal integriert werden können, findet in der nächst höheren **Funktionsschicht** statt. Die Funktionsschicht stellt dabei eine Laufzeitumgebung für die fachliche Funktionalität bereit, die die eigentliche Implementierung durch die darunterliegenden Schichten kapselt. Dadurch kann sichergestellt werden, dass durch eine horizontale Integration in Wertschöpfungsnetzwerken keine Seiteneffekte durch einen inkonsistenten Zugriff möglich sind. Zu temporären (Fern-)Wartungszwecken ist ein Zugriff auf tiefere Schichten durch die Funktionsschicht vorgesehen, um beispielsweise Diagnosedaten aus bestimmten Maschinen auszulesen. Die **Geschäftsschicht** modelliert als oberste Schicht den gesamten Wertschöpfungsprozess und bietet die Möglichkeit komplexe Regeln zu definieren, die beispielsweise die Einhaltung von rechtlichen Vorgaben sicherstellen. Weiterhin dient die Geschäftsschicht dem Zusammenschließen der Dienste aus der Funktionsschicht in Wertschöpfungsketten und verschiedene Geschäftsprozesse.

5.3 SOA-basierte Referenzmodelle zur Integration der Leitebenen

Historisch bedingt sind in vielen Fertigungsanlagen informationstechnische Systeme vorhanden, die eine bestimmte Aufgabe lösen, untereinander jedoch nicht vernetzt sind. Im Zuge der Industrie 4.0 ergeben sich technische Möglichkeiten, die nur umsetzbar sind, wenn die informationstechnischen Systeme zu einem Gesamtsystem integriert werden. Häufig werden die Systeme durch individuell entwickelte Integrationsmodule gekoppelt, die sich nur schwer an neue Anforderungen anpassen lassen und somit eine starre Integration darstellen. Um diesen Integrationsprozess flexibler zu gestalten setzten verschiedene Forschungsarbeiten auf das Konzept der Service-orientierten Architekturen (SOA) [25, 33, 52]. Dabei werden bestehende Anwendungen und Elemente der Feldebene durch Services abstrahiert, die definierte Schnittstellen haben und dadurch miteinander kommunizieren können. Verglichen mit der Automatisierungspyramide erläutert Zuehlke [52] dabei die Abstraktionsschritte von Signalen aus der Feldebene über Nachrichten in der Prozessleitebene zu Diensten in der Betriebs-/Unternehmensleitebene. Bei allen drei Ansätzen werden die Abstraktionsschritte mittels XML-basierter Beschreibungssprachen modelliert. Die Beschreibungssprachen nutzen bzw. erweitern dabei meist gängige Konzepte Service-orientierter Architekturen wie die Web Service Definition Language (WSDL) oder die Business Process Engineering Language (BPEL), um die Services und Geschäftsprozesse abzubilden [40]. Der Manufacturing Service Bus (MSB) [29] wird nun stellvertretend für SOA-basierte Referenzmodelle vorgestellt.

Der Manufacturing Service Bus verwendet ein Bus-System mit einheitlichem Nachrichtenformat um die Leitebenen der Automatisierungspyramide durch verschiedene Services zu integrieren. Ziel des Konzepts ist es, eine hohe Flexibilität durch einfache Integrationsprozesse, eine gute Interoperabilität durch geeignete Schnittstellen, und eine hohe Anpassungsfähigkeit durch die Definition eines Lebenszyklus für die Anpassung von Diensten zu erreichen. Das Schichten-basierte Referenzmodell des MSB ist in Abbildung 4 dargestellt und besteht aus fünf Ebenen. Die unterste Schicht stellt dabei die Systeme dar, die integriert werden

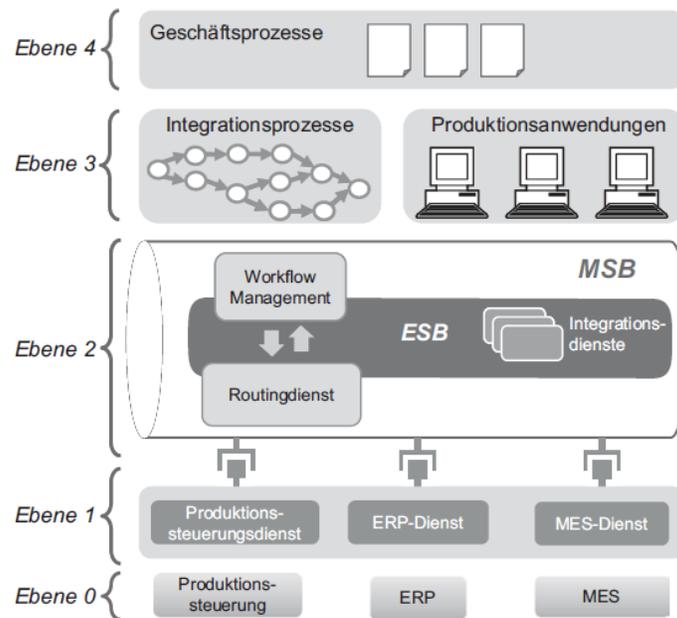


Abbildung 4. Referenzmodell des Manufacturing Service Bus Minguez [29].

sollen. Zieht man die Automatisierungspyramide (vgl. Unterabschnitt 3.1) heran, stammen die zu integrierenden Systeme aus allen Leitebenen der Pyramide. Um die Systeme integrationsfähig zu gestalten werden in Ebene 1 die Systeme durch Dienste gekapselt, die wohldefinierte Schnittstellen und Datenformate besitzen. Die Dienste können nun in das Dienstverzeichnis des MSB in Ebene 2 veröffentlicht werden und sind damit für mögliche Konsumenten sowohl auffindbar, als auch aufrufbar. Die Integrationsprozesse aus Ebene 3 lassen sich aus den Geschäftsprozessen und -zielen aus Ebene 4 ableiten. Zusammen mit den Produktionsanwendungen in Ebene 3 können die Integrationsprozesse im Workflow Management System des MSB abgebildet werden.

Abbildung 5 verdeutlicht den schematischen Aufbau eines Integrationsprozesses, die im System schließlich den konkreten Informationsfluss darstellen. Der Integrationsprozess setzt sich dabei aus drei unterschiedlichen Teilprozessen zusammen. Zum einen können BPEL-Prozesse von dem Integrationsprozess aus ausgeführt werden, um vor allem bereits existierende Anwendungen zu integrieren. Die Integrationsdienste nehmen die Rolle von Mediationsdiensten ein, die zwischen verschiedenen existierenden Prozessen die Kommunikation ermöglichen. Darunter zählt zum einen die Fähigkeit Daten beispielsweise durch XSLT-Transformationen zu einem einheitlichen Datenformat umzuwandeln, um eine Kommunikation innerhalb des MSB zu ermöglichen. Gleichzeitig ist es genauso wichtig, entsprechende Daten beim Empfänger in sein spezielles Datenformat zu transformieren, sodass die Systeme integrationsfähig sind. Integrationsdienste

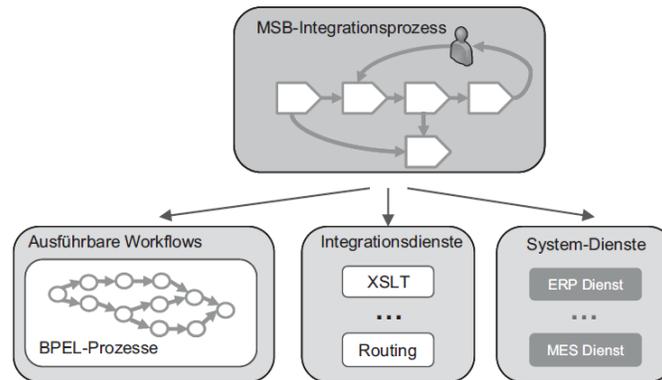


Abbildung 5. Die Abbildung der Integrationsprozesse im Manufacturing Service Bus. Grafik aus Minguez [29].

übernehmen ferner auch Routing-Dienste, um Nachrichten zwischen den Teilprozessen korrekt zuzustellen. System-Dienste sind schließlich die Teilprozesse, die in Ebene 2 (vgl. Abbildung 4) des Modells bestehende Systeme integrieren und damit ansprechen können. Der MSB-Integrationsprozess bietet somit die Möglichkeit, komplexe Integrationsszenarien durch geeignete ereignisgesteuerte Workflows abzubilden.

5.4 Cloud-based Design and Manufacturing

Um komplexe Produkte effizient entwerfen und herstellen zu können ist es besonders wichtig, dass involvierte Interessensgruppen eine geeignete Plattform haben, die ihre Zusammenarbeit ermöglicht und fördert [3, 19, 46]. Durch Cloud Computing stehen diesen Plattformen nun neue Möglichkeiten offen, die insbesondere eine geographisch Unabhängigkeit der involvierten Personen und eine Skalierbarkeit der Plattformen in nahezu jeder Hinsicht fördern. Wu et al. [51] definiert daher das Cloud-based Design and Manufacturing (CBDM) als Zusammenschluss der beiden Teilfunktionen Cloud-based Design (CBD) und Cloud-based Manufacturing (CBM), die sich aus dem Technologieschub des Cloud Computings aus herkömmlichen CAx-Systemen ergeben.

Bei CBD steht das Entwerfen von Produkten in einem kollaborativen, sozialen Netzwerk im Vordergrund. Um dies zu erreichen, müssen CBM Plattformen ständig verfügbar und komplexe sowie semantische Informationen effizient speichern und dem Nutzer zu Verfügung stellen können. Derzeit existieren eine Reihe an CBM Plattformen, die dabei erste Konzepte erfolgreich umsetzen konnten¹. Cloud-

¹ Autodesk 123D (<http://www.123dapp.com/>) richtet sich an das Entwerfen und Drucken von 3D Modellen im kleineren Maßstab. 100kGarages.com (<http://www.100kgarages.com/>) vernetzt Produktdesigner mit Herstellern. Quirky (<https://www.quirky.com>) ist ein soziales Netzwerk zum Produktentwurf.

based Manufacturing (CBM) bezieht sich auf eine vernetzte Wertschöpfungskette von (verteilten) Fertigungsressourcen. Darunter zählen Fertigungsschritte und Materialien, sowie das Wissen und die Transparenz über Kosten und Ressourcenverbrauch. Charakteristiken des CBM sind vor allem die allgegenwärtige Zugriffsmöglichkeit auf Fertigungsressourcen, die Skalierbarkeit der Ressourcen und eine Service-basierte Architektur. Auch für CBM Systeme sind bereits erste Konzepte erprobt². Die Integration der beiden Konzepte ergeben folglich CBDM-Systeme, die von ihrer Architektur die Stärken des Cloud Computings, des Internet of Things und einer Service-orientierten Architektur nutzen.

Von Wu et al. [50] werden Anforderungen und Visionen an ein CBDM System erläutert. Ein CBDM System muss ein soziales Netzwerk abbilden, um die Kommunikation und den Wissensaustausch zwischen involvierten Menschen zu unterstützen. Dabei ist es von besonderem Interesse Produktentwürfe mit anderen Menschen zu teilen, weshalb die Modelle in geeignetem Format in einem skalierbaren und hoch-verfügbaren Datenspeicher abgelegt sein müssen. Neben den Produktmodellen sollen auch Echtzeit-Daten aus angebundenen Produktionssystemen wie der Verfügbarkeit von Rohstoffen und Maschinen, als auch der aktuellen Auslastung und ausstehenden Produktionsaufträgen in einem zugänglichen, verfügbaren und skalierbarem Datenspeicher abgelegt werden. Das CBDM System ist dann in der Lage, mittels einer intelligenten Suchfunktion vorhandenes Wissen in diesem Datenspeicher einem Benutzer Antworten auf seine Fragen zu liefern. Gleichzeitig ist es technisch versierten Nutzern über eine Schnittstelle möglich auf die Daten in einer Form zuzugreifen, die eine Analyse großer Datenmengen zulässt. Das vorhandene Wissen kann ebenfalls dazu genutzt werden, dem Produktentwickler eine Kosten-, Ressourcen-, und Fertigungszeitschätzung zu liefern.

Wu et al. [49] haben ein Prototyp eines CBDM-Systems entworfen, dessen Architektur in Abbildung 6 zu sehen ist, und als Referenzmodell für CBDM-Systeme gesehen werden kann. Dabei wird das Gesamtsystem in fünf Schichten unterteilt. Die unterste Schicht stellt dabei die **Ressourcenzuordnung** dar. Unter den Begriff „Ressourcen“ fällt dabei sämtliche Hardware, die in das Gesamtsystem involviert ist, z.B. von 3D-Druckern über Server und Datenspeicher bis hin zu ganzen Fertigungszellen. Die darüberliegende **Serviceschicht** bietet insbesondere CAx-Funktionalitäten an und interagiert direkt mit der Ressourcenzuordnungsschicht. Dabei sind CAx-Funktionalitäten sowohl für die Produktentwicklungsseite (z.B. CAD/CAE), als auch für die Fertigungsseite (z.B. CAM/CAPP) verfügbar. Die **Anwendungsschicht** enthält hauptsächlich produkt-relevante Informationen wie Produktspezifikationen und Fertigungsvorgaben. Die Daten werden dabei aus der höher gelegenen zentralen Portal-Schicht erhalten und in einem einheitlichen Datenformat gespeichert. Die **zentrale Portal-Schicht** ist der hauptsächliche Interaktionspunkt für Benutzer des Systems. Das Portal bietet eine Vielzahl an Cloud-basierten Anwendungen, die die Kommunikation zwischen

² Quickparts (<http://www.quickparts.com>) ist ein Rapid-Prototyping Dienstleister. LiveSource (<http://www.livesource.com/>) kann automatisch Wertschöpfungsketten kalkulieren.

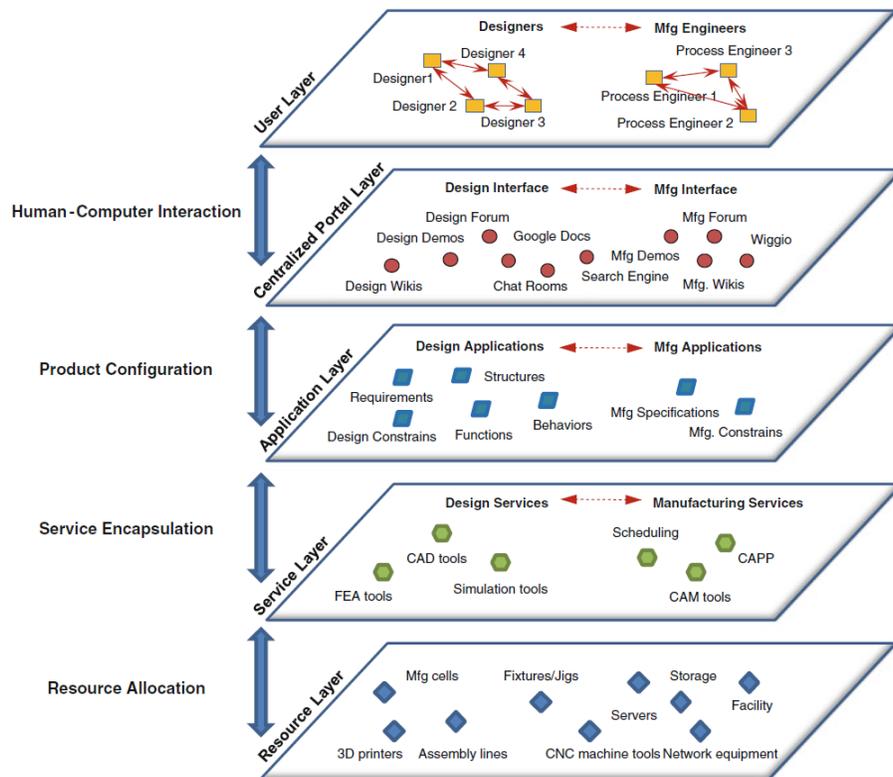


Abbildung 6. Referenzmodell des Prototypen-Systems „DMCloud“ für das Cloud-based Design and Manufacturing Konzept von Wu et al. [49]. Die Abkürzung „Mfg“ steht dabei für engl. „Manufacturing“, zu dt. „Fertigung“.

den verschiedenen Benutzern zu unterschiedlichen Zwecken ermöglicht. Einfache Kommunikationsformen wie Chats und Foren werden dabei genauso unterstützt wie komplexe und kollaborative Plattformen zur Dokumentenbearbeitung. Die **Anwenderschicht** bildet schließlich die Rollen und Beziehen der verschiedenen Anwender ab.

6 Diskussion der Referenzmodelle

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die Chancen und Potentiale der verschiedenen Referenzmodelle und zeigt vergleichend deren Anwendungsmöglichkeiten auf. Die verschiedenen Modelle werden zudem kritisch hinterfragt und gegenübergestellt.

Das Automatisierungsdiabolo (vgl. Abschnitt 5.1) beschreibt den strukturellen Wandel des Informationsmanagements von der Automatisierungspyramide zu

einem Automatisierungsdiabolo, dessen Zusammenhalt das gemeinsame Informationsmodell darstellt. Getrieben von der stetig wachsenden Komplexität der Fertigungsanlagen zeigt das Modell eine gute Möglichkeit zwischen der Fertigungsebene und der Unternehmensleitebene eine Abstrahierung zu integrieren, die herstellerübergreifende und einheitliche Schnittstellen bietet. Das Modell beschreibt derzeit jedoch ausschließlich den konzeptionellen Wandel und bietet noch keine konkreten Lösungshinweise wie das Informationsmodell umgesetzt werden kann. Daher kann das einfach gehaltene Modell als Kommunikationsbasis für weitere Forschung in diese Richtung betrachtet werden. Jedoch hat das Automatisierungsdiabolo in der Forschung derzeit nur eine überschaubare Anzahl an Vertretern, die sich damit beschäftigt haben.

Das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0) (vgl. Abschnitt 5.2) enthält ein dreidimensionales Referenzmodell, das in einer Dimension den Lebenszyklus und die Wertschöpfung abbildet, in einer weiteren Dimension die funktionale Hierarchie von Elementen einer Fertigungsanlage und in der dritten Dimension informationstechnische Schichten unterteilt, um die Komplexität auf einzelne, kleine Schichten zu reduzieren. RAMI 4.0 und die Plattform Industrie 4.0 erhalten derzeit viel Aufmerksamkeit aus Industrie und Forschung. Eine zentrale Herausforderung stellt dabei die Identifikation von gemeinsam nutzbaren Anforderungen und Visionen dar. Dies wird durch an die Realität angelehnte Fallbeispiele definiert, aus denen anschließend Handlungs- und Forschungsempfehlungen abgeleitet werden [22]. Es ist erkennbar, dass RAMI 4.0 noch keine konkrete Lösung für eine Industrie 4.0-fähige Fertigungs-Infrastruktur darstellt und durch seine mediale Verbreitung noch sehr Marketing-getrieben wirkt. Allerdings gewinnt das Projekt durch die Vereinheitlichung von Begriffen, Anforderungen und Visionen und der breiten Förderung durch Industriepartner zunehmend an Bedeutung. Vielversprechend erscheinen dabei die Handlungs- und Forschungsempfehlungen, die schon jetzt einen klaren Pfad des Projekts erkennen lassen.

SOA-basierte Referenzmodelle verwenden eine Service-orientierte Architektur, um die Leitebenen der Automatisierungspyramide zu integrieren. Dabei werden für bestehende Systeme Schnittstellen entwickelt, die als Service angeboten und konsumiert werden können. Die Services verwenden zur Umsetzung häufig Elemente der WS-* Spezifikationsfamilie, wodurch auch Unternehmensanwendungen wie ERP-Systeme einfach integriert und mit Fertigungsanlagen vernetzt werden können. Ein charakteristisches Merkmal der SOA-basierten Referenzmodelle ist, dass es sich um einen sehr praxisnahen Lösungsbaustein handelt. Die Referenzmodelle setzen meist eine bestehende Fertigungsanlage voraus und bieten mit den Services eine Möglichkeit zur Vernetzung einer vorhandenen starren Integration. Die Services und Schnittstellen werden zwar nicht näher definiert, jedoch haben Unternehmen damit eine Methode zur Hand, um ihre Fertigungsanlagen zu vernetzen, indem sie die Schnittstellen definieren und implementieren. Um wirtschaftlich eine sinnvolle Lösung zu ergeben, müssen langfristig die Schnittstellen mindestens innerhalb der jeweiligen Branche standardisiert und vereinheitlicht werden, um eine Wiederverwendung von Anlagen und Komponenten zu ermöglichen. Die Standardisierung kann dann auch dazu beitragen, die Zulieferkette zu vernetzen.

Cloud-based Design and Manufacturing (CBDM) setzt auf Cloud-Technologien, um den gesamten Engineering Prozess zu vernetzen und verteilt abzubilden. Der Fokus wird dabei vor allem auf die Zusammenarbeit und den Wissensaustausch der beteiligten Menschen in allen Phasen des Produkt-Lebenszyklus gelegt, der durch die Vernetzung sämtlicher Anwendungen unterstützt werden soll. CBDM beschreibt daher ein kollaboratives Konzept und bietet dazu ein Referenzmodell an, welches an einer Beispiel-Anwendung in akademischem Kontext erprobt wurde. Das Konzept wird in einigen Arbeiten beschrieben und analysiert, jedoch ist das Referenzmodell vor allem für Anwendungen mit verteilten, nicht zwingend einem Unternehmen zugehörigen, Nutzern ausgelegt. Dadurch ist seine Anwendbarkeit in einem klassischen Fertigungsunternehmen eingeschränkt.

Die vier betrachteten Referenzmodelle lassen sich zueinander in Verbindung stellen. SOA-basierte Referenzmodelle erweisen sich als sehr praxisnahe Lösung als konzeptuell durch das Automatisierungsdiabolo beschreibbar. Die einzelnen Services und Schnittstellen sind dabei Teil des Informationsmodells, die die Feldgeräte im Produktionsprozess mit den Planungs- und Steuerungsapplikationen verbinden. Die Automatisierungspyramide wird dabei durch die Services zu einem verteilten System und kann mit einer flexiblen, netzartigen Struktur beschrieben werden [25]. Dieser Schritt der Integration durch Services und Schnittstellen lässt sich im RAMI 4.0 Referenzmodell in der Informations- und Kommunikationsschicht abbilden. RAMI 4.0 detailliert weiterhin noch den Lebenszyklus und die eigentliche Wertschöpfung, sowie die funktionale Hierarchie der Anlagen und wird damit zum umfangreichsten Modell der vier betrachteten Modelle. Dies bedeutet allerdings auch, dass das große Konzept hinter RAMI 4.0 bestehende Forschungen und Lösungen evaluieren kann, um diese zu einem durchgängigen Lösungsportfolio zusammenzuschließen. Als Beispiel eines solchen Lösungsportfolios kann das CBDM Referenzmodell betrachtet werden, das wie das RAMI 4.0 Modell verschiedene Schichten unterteilt und den Lebenszyklus eines Produkts im Referenzmodell abbildet. Um zu einem RAMI 4.0 Beispiel zu werden, fehlt bei CBDM noch die Einordnung und Beschreibung der vorhandenen Geräte und Anwendungen in die funktionale Hierarchie der Geräte im RAMI 4.0 Modell.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die verschiedenen Referenzmodelle viele Herausforderungen teilen und in Kombination Synergieeffekte zeigen. Diese Synergieeffekte sind die Potenzialträger der Referenzmodelle, um von Marketinglastigen und allgemeinen Modellen zu lösungsorientierten und handlungsweisenden Modellen zu gelangen, die in einem industriellen Kontext von großer Bedeutung sein werden.

7 Ausblick

Die Trends in der Entwicklung von Fertigungsanlagen in den letzten Jahren weisen deutlich auf eine engere Vernetzung von intelligenteren Fertigungsanlagen hin. Mit den vorgestellten Referenzmodellen werden Wege eingeschlagen um die hohe Komplexität solcher Anlagen in kleinere, handhabbare Teile zu brechen. Viele der Modelle haben weiterhin ungeklärte Herausforderungen, die erst ge-

löst werden müssen, bevor die Technologie sich als praxistauglich erweist. Eine zentrale Herausforderung für alle Modelle ist die Definition einheitlicher und semantischer Schnittstellen, um herstellerübergreifende Lösungen entwickeln zu können. Wichtig dabei ist, dass auch schon in naher Zukunft praktische Erfahrung durch Pilotprojekte gesammelt wird, durch die Industrie und Forschung weiter lernen und wachsen können.

Weiterhin ist es von zentraler Bedeutung, den Fokus auf nicht-funktionale Aspekte der Referenzmodelle zu legen. Themen wie (Informations-)Sicherheit, Flexibilität, Agilität, Kosten, Umwelt- und soziale Aspekte, Energieeffizienz, Verfügbarkeit und Qualitätssicherung sind für die langfristige Wirtschaftlichkeit eines Unternehmens essentiell. Es bleibt Aufgabe der Referenzmodelle diese Thematiken bewertbar zu gestalten, sodass Unternehmen fundiert die Chancen und Risiken der Umsetzung einer Industrie 4.0 Fertigungsanlage analysieren können.

Literaturverzeichnis

- [1] Adolphs, P., Bedenbender, H., Dirzus, D., Ehlich, M., Epple, U., Hankel, M., Heidel, R., Hoffmeister, M., et al. (2015a). Statusreport Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0): April 2015. Seiten 1–32.
- [2] Adolphs, P., Bedenbender, H., Ehlich, M., Epple, U., Hankel, M., Heidel, R., Hoffmeister, M., Huhle, H., et al. (2015b). Referenzarchitektur, Standardisierung, Normung. *Umsetzungsstrategie Industrie 4.0: Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0*, Seiten 40–69.
- [3] Álvares, A. J., Ferreira, J. C. E., und Lorenzo, R. M. (2008). An integrated web-based CAD/CAPP/CAM system for the remote design and manufacture of feature-based cylindrical parts. *Journal of intelligent manufacturing*, 19(6):643–659.
- [4] Anis, A., Schafer, W., und Niggemann, O. (2014). A comparison of modeling approaches for planning in Cyber Physical Production Systems. In *Emerging Technology and Factory Automation (ETFA), 2014 IEEE*, Seiten 1–8. IEEE.
- [5] Atzori, L., Iera, A., und Morabito, G. (2010). The internet of things: A survey. *Computer networks*, 54(15):2787–2805.
- [6] Azevedo, A. und Almeida, A. (2011). Factory templates for digital factories framework. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27(4):755–771.
- [7] Baheti, R. und Gill, H. (2011). Cyber-physical systems. *The impact of control technology*, Seiten 161–166.
- [8] Bettenhausen, K. D. (2012). Zukunft der Automation? *at-Automatisierungstechnik Methoden und Anwendungen der Steuerungs-, Regelungs-und Informationstechnik*, 60(6):367–371.
- [9] Chen, J. C., Cheng, C.-H., und Huang, P. B. (2013). Supply chain management with lean production and RFID application: A case study. *Expert systems with applications*, 40(9):3389–3397.
- [10] Cutting-Decelle, A.-F., Young, R. I., Michel, J.-J., Grangel, R., Le Cardinal, J., und Bourey, J. P. (2007). ISO 15531 MANDATE: a product-process-resource based approach for managing modularity in production management. *Concurrent Engineering*, 15(2):217–235.
- [11] Daneels, A. und Salter, W. (1999). What is SCADA. In *International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems*, Seiten 339–343.
- [12] DIN, EN (2008). 62264-1 (2008): Integration von Unternehmensführungs-und Leitsystemen. Teil 1: Modelle und Terminologie.
- [13] Drath, R. (2014). Industrie 4.0–eine Einführung.
- [14] Drath, R., Fay, A., und Barth, M. (2011). Interoperabilität von Engineering-Werkzeugen. *at-Automatisierungstechnik Methoden und Anwendungen der Steuerungs-, Regelungs-und Informationstechnik*, 59(7):451–460.
- [15] Drath, R. und Koziolk, H. (2015). Industrie 4.0. *atp edition-Automatisierungstechnische Praxis*, 57(01-02):28–35.

- [16] Eckert, C. und Fallenbeck, N. (2015). Industrie 4.0 meets IT-Sicherheit: eine Herausforderung! *Informatik-Spektrum*, Seiten 1–7.
- [17] Epple, U., Bangermann, T., Barbian, M., Bauer, C., Braune, A., Diesner, M., Friedrich, J., Göbe, F., et al. (2014). Statusreport Industrie 4.0 Auf dem Weg zu einem Referenzmodell. Seiten 1–16.
- [18] Forstner, L. und Dümmler, M. (2014). Integrierte Wertschöpfungsnetzwerke—Chancen und Potenziale durch Industrie 4.0. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, 131(7):199–201.
- [19] Fuh, J. Y. und Li, W. (2005). Advances in collaborative CAD: the-state-of-the-art. *Computer-Aided Design*, 37(5):571–581.
- [20] Jensen, M. C. (1993). The modern industrial revolution, exit, and the failure of internal control systems. *the Journal of Finance*, 48(3):831–880.
- [21] Kagermann, H., Lukas, W., und Wahlster, W. (2011). Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution. *VDI nachrichten*, 13:2011.
- [22] Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J., Dais, S., Bauer, K., Diegner, B., Diemer, J., Dorst, W., et al. (2013). Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. *Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0*.
- [23] Kinkel, S. (2005). Anforderungen an die Fertigungstechnik von morgen: wie verändern sich Variantenzahlen, Losgrößen, Materialeinsatz, Genauigkeitsanforderungen und Produktlebenszyklen tatsächlich? Technical report, Mitteilungen aus der Produktionsinnovationserhebung.
- [24] Krcmar, H. (2015). *Informationsmanagement*, volume 6. Springer-Verlag.
- [25] Langmann, R. und Meyer, L. (2013). Architecture of a web-oriented automation system. In *Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), 2013 IEEE 18th Conference on*, Seiten 1–8. IEEE.
- [26] Liggesmeyer, P., Dörr, J., und Heidrich, J. (2014). Big Data in Smart Ecosystems. *Informatik-Spektrum*, 37(2):105–111.
- [27] Linke, P. (2015). Grundlagen zur Automatisierung. *Grundlagen Automatisierung*, Seiten 1–28.
- [28] Mattern, F. und Floerkemeier, C. (2010). Vom internet der computer zum internet der dinge. *Informatik-Spektrum*, 33(2):107–121.
- [29] Minguez, J. (2013). Der Manufacturing Service Bus. *Digitale Produktion*, Seiten 271–289.
- [30] Radziwon, A., Bilberg, A., Bogers, M., und Madsen, E. S. (2014). The Smart Factory: Exploring adaptive and flexible manufacturing solutions. *Procedia Engineering*, 69:1184–1190.
- [31] Russwurm, S. (2013). Software: Die Zukunft der Industrie. In *Industrie 4.0*, Seiten 21–36. Springer.
- [32] Sauer, O. (2013). Informationstechnik für die Fabrik der Zukunft. *Industrie Management 1/2013-Vierte industrielle Revolution*, Seite 11.
- [33] Schlick, J., Stephan, P., Loskyll, M., und Lappe, D. (2014). *Industrie 4.0 in der praktischen Anwendung*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [34] Shrouf, F., Ordieres, J., und Miragliotta, G. (2014a). Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in

- production based on the Internet of Things paradigm. In *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2014 IEEE International Conference on*, Seiten 697–701. IEEE.
- [35] Shrouf, F., Ordieres-Meré, J., García-Sánchez, A., und Ortega-Mier, M. (2014b). Optimizing the production scheduling of a single machine to minimize total energy consumption costs. *Journal of Cleaner Production*, 67:197–207.
- [36] Terkaj, W. und Urgo, M. (2014). Ontology-based modeling of production systems for design and performance evaluation. In *Industrial Informatics (INDIN), 2014 12th IEEE International Conference on*, Seiten 748–753. IEEE.
- [37] VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (2013). Deutsche Normungs-Roadmap Industrie 4.0.
- [38] VDI, R. (2007). 5600, Manufacturing Execution Systems. *Verein Deutscher Ingenieure*.
- [39] Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2013). Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation.
- [40] Vernadat, F. B. (2007). Interoperable enterprise systems: Principles, concepts, and methods. *Annual Reviews in Control*, 31(1):137–145.
- [41] Vikhorev, K., Greenough, R., und Brown, N. (2013). An advanced energy management framework to promote energy awareness. *Journal of Cleaner Production*, 43:103–112.
- [42] Vogel-Heuser, B. (2014). Herausforderungen und Anforderungen aus Sicht der IT und der Automatisierungstechnik. *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, Seiten 37–48.
- [43] Vogel-heuser, B., Kegel, G., und Wucherer, K. (2009). Global information architecture for industrial automation. *atp edition-Automatisierungstechnische Praxis*, 51(01-02):108–115.
- [44] Voigt, K.-I., Steinmann, D.-I. F., Bauer, D.-I. J., und Dremel, A. (2013). Condition Monitoring als Schlüsseltechnologie—Eine Analyse der Anforderungen an neue Geschäftsmodelle für den Remote Service.
- [45] Wagner, G., Konnerth, H., und Wetzlinger, W. (2015). Big Data Datenvisualisierung zur Optimierung der Unternehmensprozesse.
- [46] Wang, Y. und Nnaji, B. O. (2006). Document-driven design for distributed CAD services in service-oriented architecture. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 6(2):127–138.
- [47] Werner, H. (2013). Instrumente des Supply Chain Managements. In *Supply Chain Management*, Seiten 227–312. Springer.
- [48] Wiesmüller, M. (2014). Industrie 4.0: surfing the wave? *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, 131(7):197–197.
- [49] Wu, D., Rosen, D. W., und Schaefer, D. (2014). Cloud-based design and manufacturing: status and promise. *Cloud-Based Design and Manufacturing (CBDM)*, Seiten 1–24.
- [50] Wu, D., Rosen, D. W., Wang, L., und Schaefer, D. (2015). Cloud-based design and manufacturing: A new paradigm in digital manufacturing and design innovation. *Computer-Aided Design*, 59:1–14.
- [51] Wu, D., Thames, J. L., Rosen, D. W., und Schaefer, D. (2012). Towards a cloud-based design and manufacturing paradigm: looking backward, looking

- forward. In *ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Seiten 315–328. American Society of Mechanical Engineers.
- [52] Zuehlke, D. (2010). SmartFactory—Towards a factory-of-things. *Annual Reviews in Control*, 34(1):129–138.