

Diplomarbeit

Abstraktion verteilter Produktions- maschinen in CPPS

30. August 2016

Peter Heisig

Matr.-Nr.: 3521226

Betreuer

Dipl.-Medieninf. Gordon Lemme,
Dr.-Ing. Sebastian Götz

Verantwortl. Hochschullehrer

Prof. Dr. Uwe Aßmann

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel

Abstraktion verteilter Produktionsmaschinen in CPPS

unter Angabe aller Zitate und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel selbstständig angefertigt habe.

Dresden, den 30. August 2016

Peter Heisig

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Methode und Aufbau	5
2	Grundlagen	7
2.1	Produktion und deren Automatisierung	7
2.1.1	Kommunikation	7
2.2	Informationsmodelle in der Fertigungsindustrie	9
2.2.1	OPC Unified Architecture	9
2.2.2	MTCConnect	10
2.3	Kontrolle & Überwachung von Produktionsmaschinen	11
2.4	Cyber-physische Produktionssysteme	11
2.5	Cloud Manufacturing und Fog-Computing	12
2.6	Zusammenfassung	12
3	Anforderungen	13
3.1	Überwachung	13
3.2	Steuerung	14
3.3	Standardisierung	14
3.4	Lokalität	15
4	Forschungsstand	17
4.1	Netzwerkarchitektur für CPPS	17
4.2	Fernzugriff zu Steuerung und Überwachung	18
4.3	Zusammenfassung	20
4.4	Maschinendatenerfassung & -analyse	21
4.4.1	Legacy Machine Monitoring Using Power Signal Analysis [DP11]	21
4.4.2	Diss: In-process tool condition monitoring systems in CNC turning operations [Lee06]	22

4.4.3	Machine-readable data carriers – a brief introduction to automatic identification and data capture [Fur00]	23
4.4.4	Zusammenfassung	24
4.5	Rechnergestützte numerische Steuerung	24
4.5.1	An ARM-based Multi-channel CNC Solution for Multi-tasking Turning and Milling Machines [GM16]	24
4.6	Architekturen & Methoden für CPPS	26
4.6.1	Information Architecture for Reconfigurable production systems [Pau+13]	26
4.6.2	Prototype OPC UA Server for Remote Control of Machine Tools [Aya+13]	28
4.6.3	A systematic approach to OPC UA information model design [PFK16]	29
4.7	Zusammenfassung	32
5	Konzeption	35
5.1	Virtuelle Maschinenrepräsentation	37
5.2	Kommunikations- & Informationsmodell	37
5.3	Systemintegration	37
5.4	Zusammenfassung	37
6	Implementation	39
6.1	Zusammenfassung	39
7	Evaluation	41
7.1	Zusammenfassung	41
8	Zusammenfassung	i
8.1	Schlussfolgerung	i
8.2	Ausblick	i
A	Anhang	i
	Abbildungen	iii
	Programmcode	v
	Tabellen	vii
	Literatur	ix

1 Einleitung

Seit der Mitte des 18. Jahrhunderts ist die industrielle Fertigung in stetigem Wandel. Mit der Entwicklung dampfgetriebener Arbeits- und Kraftmaschinen um 1750 wurde die erste industrielle Revolution eingeleitet. Zum Ende des 19. Jahrhunderts ermöglichten die Einführung arbeitsteiliger Massenproduktion und wissenschaftlicher Betriebsführung das erste Transportband in der fleischverarbeitenden Industrie. Knapp einhundert Jahre nach dieser zweiten Revolution, wurden 1969 erste speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) zur variantenreichen Serienproduktion eingesetzt. Informations- und Kommunikationstechnologie sind seither der Grundstein automatisierungsgetriebener Rationalisierungen. Im Jahr 2011 wurde ausgehend von *Lean Production* der Begriff *Industrie 4.0* geprägt, der die vierte Industrielle Revolution beschreibt [Gau+14]. Sie zeichnet sich durch neue Ansätze wie das *Internet of Things* (IoT) und cyber-physische Systeme (CPS) im Kontext industrieller Produktion aus [SG16].

1.1 Motivation

Vor der vierten Revolution war klassische Produktionssteuerung zentralisiert und Steuerungstechnik monolithisch strukturiert. Zukünftig wird die Fertigung in cyber-physische Systeme von Systemen zerlegt und mit offenen Standards dezentral betrieben [Mil14]. Moderne Produktionseinrichtungen beherbergen jedoch Maschinen jeden Alters, die zu einem gemeinsamen System verwachsen müssen. Die Technologie zur numerische Kontrolle von Werkzeugmaschinen existiert bereits seit den frühen 1950er Jahren. Gerade diese älteren Anlagen besitzen häufig keine Möglichkeit der Integration in die IT-Systeme einer künftigen Fertigungsstrecke [Wan+04]. Das schlichte Ersetzen dieser Altmaschinen ist aufgrund hoher Kosten meist keine Lösung [Fra16b]. Jedoch behindern diese vorrangig die nahtlose Machine-To-Machine (M2M) Kommunikation durch fehlende Infrastrukturanbindung, womit die Kette von Bearbeitungsschritten für ein Produkt zahlreiche manuelle Eingriffe erfordert. Vor einigen Jahren wurden bis zu 60% der Arbeitszeit eines Werkers auf die Übertragung des Entwurfs eines Fertigungsschrittes in die Umsetzung an der Maschine verwendet [GML00]. So besitzt eine Altmaschine als Teil des Fertigungsprozesses kei-

ne Möglichkeit externer Kommunikation und kein *Application Programming Interface* (API) [DP11]. Bei jüngeren Konstruktionen treten Integrationsschwierigkeiten an anderer Stelle auf. So sind selbst bei bestehender Netzwerkfähigkeit geschlossene Soft- und Hardwarearchitekturen und fehlende Schnittstellen verantwortlich für eingeschränkte Überwachung und Steuerung, respektive für die Verhinderung von ökonomisch sinnvoller Automatisierung [DP11; FC07]. Weiterhin erschweren die unzureichende Umsetzung von Industriestandards und -normen die Integration der Maschinen [Wan+04; Hop14].

Technische Komponenten, wie eine Netzwerkanbindung, sind nicht die einzigen Barrieren moderner Produktionsautomatisierung. Fehlerbehaftete Kommunikationsmechanismen, sowie die Gefahr der Veräußerung betriebsinterner Daten, sind Probleme die heute gelöst werden können. Auch erfordern sinkende Losgrößen und steigende Produktvariabilität eine flexible Automatisierung von Echtzeitüberwachung und -kontrolle verteilter, rekonfigurierbarer Fertigungssysteme [Wan+04; LS01]. Produktionseinrichtungen basierten bisher auf dem manuellen Sammeln und Verteilen von Daten für Überwachung, Steuerung und Wartung der Maschinen. Doch gegenüber hohen Kosten, menschlichen Fehlern, dem teilweise schlechten Zugang zur Anlage und Aspekten der Datensicherheit, sind Automatisierungslösungen heute günstig, sicher und attraktiv für die Fertigungsindustrie [DP11].

1.2 Zielsetzung

Nach der Motivation und der damit einhergehenden Identifikation des Kernproblems, werden nun die Ziele dieser Arbeit beschrieben. Den Schwierigkeiten in der industriellen Praxis wird wie folgt begegnet:

- Durch die entfernte Kontrolle einer Altmaschine werden manuelle Tätigkeiten wie das Übertragen eines Maschinenprogramms gemindert. Der operative Einsatz einer vormals nicht integrierten Anlage kann damit stärker automatisiert werden und beschleunigt den gesamtheitlichen Produktionsablauf.
- Die zentrale Auswertung von Prozessdaten ermöglicht einen gesamtheitlichen Einblick in die Produktion, wobei jene Daten nicht notwendigerweise zentral zu persistieren sind. Diagnosen geschehen damit nicht mehr vor Ort, wodurch Wartungszyklen besser überprüft und eingehalten werden können. In der Konsequenz wird außerdem die Planung der Fertigung vereinfacht und die Zeit bis zur Produktion gesenkt. Weiterhin sollen Störfälle wie Werkzeugbruch und -wechsel ad hoc an Verantwortliche kommuniziert werden.

Im Kontext dieser Arbeit gilt eine Anlage als *integriert*, wenn die infrastrukturelle Einbettung in ein cyber-physisches Gesamtsystem den Anforderungen (vgl. Kapitel 3) genügt. Neben den praktisch orientierten Vorgaben wird die Forschung zur Anlagenmodernisierung für die Industrie 4.0 durch weitere Ziele unterstützt:

- Eine dezentrale Informations- und Kommunikationsarchitektur verbessert die Resilienz, Produktionsstabilität und Skalierbarkeit von verteilten Fertigungssystemen.
- Kommunikationskanäle zwischen einzelnen Maschinen werden aufgrund durchgängig offener Schnittstellen nicht mehr unterbrochen. Durch damit einheitlich mögliche *Machine-To-Machine* (M2M) Kommunikation wird die Kontrolle und Überwachung hierarchisiert und dezentralisiert.
- Die Modellierung von Komponenten und Funktionalität einer Maschine wird durch Standardentwicklungswerkzeuge und -austauschformate vereinfacht.
- Das Optimierungspotential der Gesamtanlage kann durch statistische Auswertung der anfallenden Daten zu Maschinenoperation und -auslastung ausgeschöpft werden.

Die Hierarchisierung von Kontrolle und Überwachung bezieht sich auf das Beispiel der flexiblen Fertigungszelle in denen ein Verbund von Maschinen eine gemeinsame Aufgabe bearbeitet (vgl. [Gro08]). Um diese Ziele im Rahmen dieser Arbeit effektiv erreichen zu können, unterliegen Konzept und Implementierung verschiedenen Einschränkungen und Voraussetzungen.

- Eine bestehende Netzwerkinfrastruktur auf Basis von TCP/IP erlaubt das Einbinden eines virtuellen Maschinenabbilds in die Fertigungsstrecke.
- Zugang zur Anlage, regelungstechnische Modifikationen und das Anbringen von Sensorik und Aktuatoren sind gegeben.
- Die zu modernisierende Werkzeugmaschine wird durch rechnergestützte numerische Steuerung (CNC) kontrolliert.
- Einplatinencomputer sind ausreichend leistungsfähig für die Steuerung und Überwachung von CNC-Maschinen (vgl. [GM16]).

Somit ist das vorgestellte Konzept der Anlagenmodernisierung auf diskrete Fertigung mit bestehender Netzwerkinfrastruktur beschränkt. Unter Berücksichtigung der besprochenen Ziele und Einschränkungen, wird eine konzeptuelle und prototypische Lösung durch die folgenden Schritte erreicht.

1. Ermitteln der Anforderungen für eine Integration von Altmaschinen in mo-

derne, verteilte Produktionsumgebungen – im Folgenden als Retrofitting bezeichnet.

2. Recherchen zum heutigen Stand der Technik und die Einbeziehung vorhandener Systeme.
3. Konzeption einer virtuellen Repräsentation als Schnittstelle der zu integrierenden Anlage.
4. Ermöglichen von dezentraler Kontrolle und Überwachung im Hinblick auf cyber-physische Produktionssysteme.
 - Transfer und Ausführung von Maschinenprogrammen.
 - Erfassen von Produktionsdaten durch angeschlossene Sensoren.
 - Verifikation automatischer Aktionen durch Rückkopplung.
5. Vorstellung eines skalierenden, erweiterbaren Frameworks.
6. Eine prototypische Implementierung belegt die prinzipielle Durchführbarkeit.
 - Testgetriebene Entwicklung ergänzt die Lösung um eine adäquate Test-Infrastruktur.

Nach Klärung der Ziele, Beschränkung des Konzepts und dem Aufzeigen eines groben Lösungswegs werden in dieser Arbeit folgende Fragen zu beantworten sein.

Welchen softwaretechnologischen Konzepten muss die Modernisierung und der infrastrukturelle Kontext einer Altmaschine unterliegen, um eine ganzheitliche Integration in cyber-physische Produktionssysteme (CPPS) gewährleisten zu können?

1. Welche System- und Softwarearchitektur ist für ein flexibles Retrofitting zur Steuerung und Überwachung veralteter CNC-Maschinen im Kontext von CPPS geeignet?
2. Wie und wo werden Informationen zu Maschinenzustand und -operation erfasst, verarbeitet, persistiert und Fremdsystemen zur Verfügung gestellt?
3. Welche standardisierten Protokolle und Datenstrukturen eignen sich für M2M-Kommunikation in einem CPPS?

1.3 Methode und Aufbau

Angelehnt an die *Design Science Research Methodology* (DSRM) wurden bisher grundlegende Probleme identifiziert und die Arbeit motiviert [Gee11]. Durch die folgenden Grundlagen (Kapitel 2) werden essentielle Technologien und Konzepte beschrieben. Die sich anschließenden Anforderungen (Kapitel 3) spezifizieren die Zielvorgaben der darauf entwickelten Lösungskonzepte (Kapitel 4) für die Abstraktion von Maschinen in cyber-physischen Produktionssystemen. Durch die prototypische Implementation (Kapitel 5) des Frameworks und das virtuelle Maschinenabbild wird die prinzipielle Durchführbarkeit des Vorhabens belegt. Die Evaluation (Kapitel 6) hat eine qualitative und quantitative Bewertung von Konzept und Implementation des Prototyps zum Ziel. Schlussendlich werden in der Zusammenfassung ein Fazit und Ausblick (Kapitel 7) auf weitere Forschung gegeben.

2 Grundlagen

2.1 Produktion und deren Automatisierung

- Ebenen der Automatisierungspyramide
 - MES
 - ...

2.1.1 Kommunikation

Zusammenfassung von [Pau+13]

- SPS mit digital inputs/outputs (DI/DO)
- Feldbusse (EtherCAT, ProfiBUS, CAN, etc.) => Adapter
 - trotz ICE 61158 untersch. Standards
- Ethernet Varianten (TCP, RPC, OPC)

G-code is considered a „dumb“ language as it only documents instructional and procedural data, leaving most of the design information behind. G-code programs are also hardware dependent, denying modern CNC machine tools desired interoperability and portability [XLY06].

Hersteller von Software für *Supervisory Control and Data Aquisition* (SCADA) verwalten eine große Anzahl an Kommunikationstreibern für unterschiedliche Automations- und Informationssysteme. Außerdem erschweren verschiedene Kommunikationsprotokolle und Nachrichtenformate die Integration zusätzlicher Systeme [Aya+13].

Industrie 4.0 [DC09]

²Darstellung durch Wikipedia-Nutzer UlrichAAB

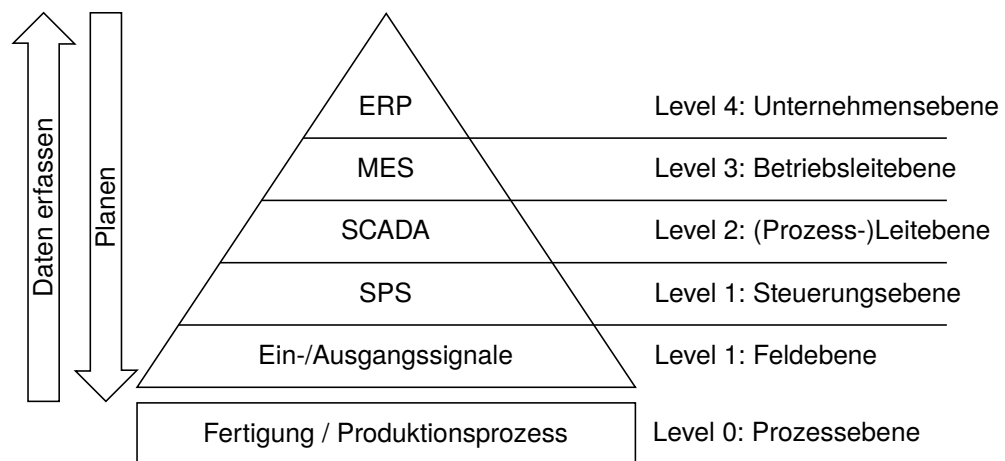


Abbildung 2.1: Beispiel einer klassischen Automatisierungspyramide²

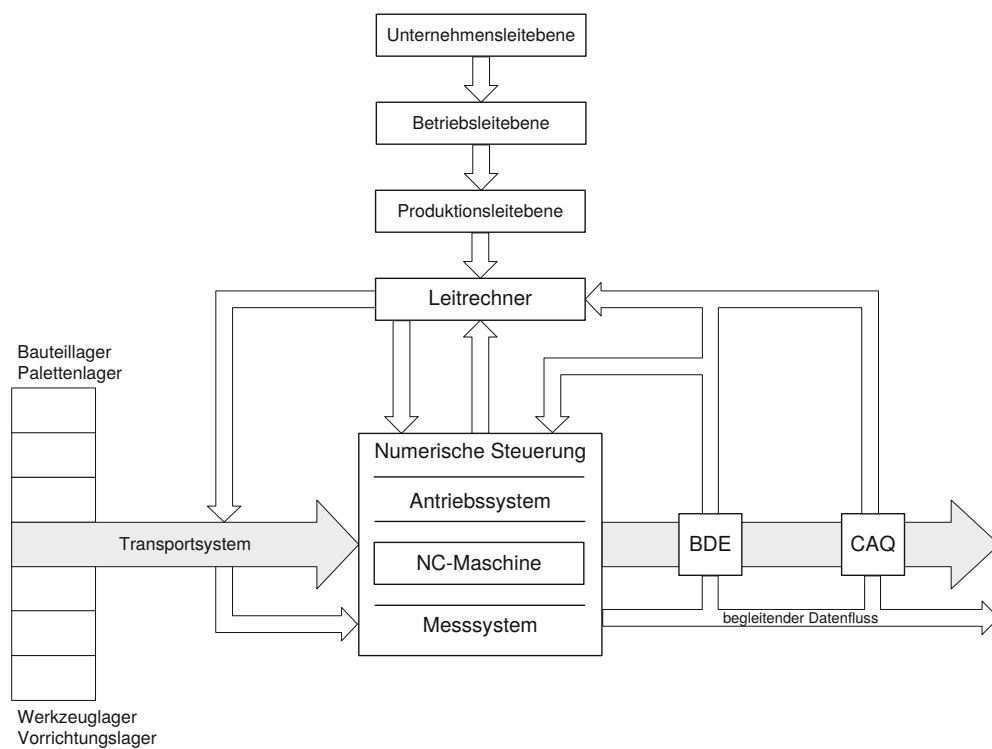


Abbildung 2.2: Grundstruktur flexibler Automation [Lin15]

2.2 Informationsmodelle in der Fertigungsindustrie

Informationsmodelle sind Repräsentationen von Konzepten, Relationen, Beschränkungen, Regeln und Operationen zur Spezifikation der Bedeutung (Semantik) von Daten innerhalb einer bestimmten Domäne [Lee1999].

2.2.1 OPC Unified Architecture

Die *OPC Unified Architecture* (OPC UA) ist ein semantischer Kommunikations- und Datenmodellierungsstandard für den Informationsaustausch via TCP/IP [Aya+13].

- Communication Technology that merges:
 - (1) Transport mechanism (uses internet standards XML, HTTP,... and also optimized binary TCP)
 - (2) Information modelling (using an extensible meta model)
- Extensible meta model
- Platform independent (cross-platform)
- Scalable
- But not hard real-time (not yet) => nicht geeignet für direkt Bewegungskontrolle [Pau14]

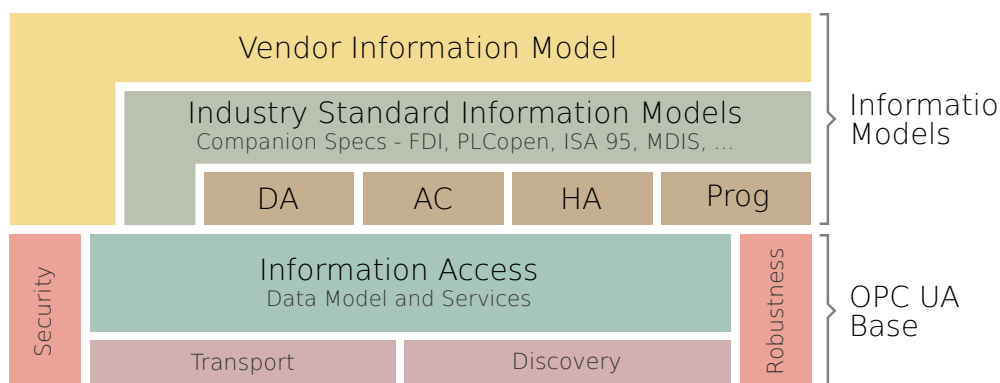


Abbildung 2.3: OPC UA Übersicht³

Die definierte Semantik des Address Space erlaubt nicht nur anspruchsvolle M2M-Kommunikation. Sie ermöglicht dem Operator einer FFZ Strukturinformationen einzusehen und die Automatisierungskomponenten zu kontrollieren [Aya+13].

³nach opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua

Hoppe 2014 [Hop14]

Obwohl bereits verschiedene wichtige Informationsmodelle, wie OPC-UA for Analyser Devices, FDI (Field Device Integration), ISA95, MT-Connect, BACnet und PLCopen existieren, oder in der Entstehung sind, gibt es hier noch Handlungsbedarf:

- Wie geben sich z. B. ein „Temperatursensor“ oder eine „Ventilsteuerung“ zu erkennen?
- Welche Objekte, Methoden, Variablen und Ereignisse definieren die

Schnittstelle für Konfiguration, Initialisierung, Diagnose und Laufzeit? OPC-UA hat das Potential, sich als De-facto-Standard für den Daten- und Informationsaustausch in der Automatisierungspyramide für nicht-echtzeitkritische Anwendungen zu etablieren. Eine sichere, horizontale und vertikale Kommunikation vom Sensor bis in die IT-Systeme ist damit bereits heute umsetzbar. Die Verbände BITCOM, VDMA und ZVEI werden durch die Industrie-4.0-Arbeitskreise keinen neuen Kommunikationsstandard definieren können; die Arbeitskreise bieten aber eine gute Grundlage zum Informationsaustausch.

Alternative: Woopsa (<http://www.woopsa.org/>)

2.2.2 MTConnect

- RO Standard for Process Information in CNC [Vij+08]

Wikipedia:

Data from shop floor devices is presented in XML format, and is retrieved from information providers, called Agents, using Hypertext Transfer Protocol (HTTP) as the underlying transport protocol. MTConnect provides a RESTful interface, which means the interface is stateless. No session must be established to retrieve data from an MTConnect Agent, and no logon or logoff sequence is required (unless overlying security protocols are added which do). Lightweight Directory Access Protocol (LDAP) is recommended for discovery services.

=> MTConnect-OPC UA Companion Specification

sonstige Standards...

2.3 Kontrolle & Überwachung von Produktionsmaschinen

- CNC
- STEP-NC [HL07; XN06]
- IEC 61499 Function Blocks

2.4 Cyber-physische Produktionssysteme

Die Verbindung von Überwachung und Kontrolle technischer Systeme mündet in Paradigmen, die Realität und virtuelle Umgebungen miteinander verschmelzen lassen. So wurde das Konzept cyber-physischer Systeme (CPS) 2006 durch Edward A. Lee erstmalig erläutert. Er versteht diese als Integration von Informationsverarbeitung und physischen Prozessen. Virtuelle und physische Abläufe werden durch Sensoren und Aktuatoren überwacht, beziehungsweise beeinflusst, stehen in unmittelbarer Wechselwirkung und sind durch Kontrollschleifen rückgekoppelt [Lee06]. Zeit und Nebenläufigkeit der realen Welt sind Eigenschaften die durch Infrastruktur- und Informationsabstraktionen abgedeckt werden müssen [WVG08]. Technologien wie Echtzeitbetriebssysteme, Middlewares und spezialisierte eingebettete Prozessorarchitekturen bilden den ersten Schritt zum Schließen dieser Lücke [Lee06]. Dennoch ist vor allem die inhärente Heterogenität der Komponenten eine Herausforderung für bestehende Kontrollmechanismen, Kommunikationsmuster und Softwareparadigmen [WVG08].

- Abbildung zu Autom.-Pyr. => CPS [Ver13]
- CPPS: [SG16]

Im Kontext industrieller Produktionskontrolle ergeben sich neben den Herausforderungen für CPS (vgl. [Lee08]) weitere Anforderungen. Die autonome Kontrolle von Produktionsprozessen mit Hilfe von Kontrollschleifen wird durch Sensoren und Aktuatoren entlang der Produktionskette und an den individuellen Maschinen unterstützt. Dafür muss das Gesamtsystem in eigenständige Subsysteme mit gekapselten Rückkopplungsmechanismen gegliedert werden. Kommunikation geschieht auf

der Basis bestehender Infrastrukturen mit kabelgebundenen und kabellosen Übertragungstechnologien. Die bisher eingesetzten Standards wurden auf der Prämisse homogener Teilnehmer entwickelt und müssen im Zusammenhang mit cyberphysischen Produktionssystemen (CPPS) überdacht werden. Ein drahtloses Sensornetzwerk ist eine Ausprägung einer solchen Infrastruktur innerhalb derer die Kommunikationspartner mit unterschiedlicher Bandbreite und Zuverlässigkeit arbeiten müssen. Weiterhin sind auf diesen Komponenten verteilte Echtzeitoperationen für Kontrollschleifen unerlässlich, wodurch das Design bestehender Netzwerkprotokolle oft in Frage steht. So kann die Verarbeitung von Netzwerkpaketen, beziehungsweise deren Routing, Verifikation und Redundanz unvorhersehbar Zeit beanspruchen [WVG08].

Dual Reality-Konzept ...

2.5 Cloud Manufacturing und Fog-Computing

Bonomi 2012 [Bon+12]

Aazam 2016 [AH16]

Im WAN problematisch [Sch+15] => OPC4Factory

2.6 Zusammenfassung

3 Anforderungen

Für die in Abschnitt 1.2 aufgestellten Ziele, werden in diesem Kapitel die spezifischen Kriterien zu deren Erfüllung erläutert.

Informationssysteme in der Produktion dienen der Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit und müssen Innovations- und Zeitdruck standhalten. Moderne Produktionsumgebungen helfen Arbeitsabläufe zu optimieren und vereinfachen Beteiligten die Ausführung ihrer Arbeit. Jedoch verhindern Altmaschinen aufgrund fehlender Infrastrukturanbindung (vgl. [DP11]) die Vollautomatisierung dieser Arbeitsabläufe und erfordern die physische Anwesenheit einer Fachkraft [Wan+04].

3.1 Überwachung

Im Wartungs- und Störfall muss der Zustand der Anlage bekannt sein. Dieser kann bei nicht integrierten Altmaschinen nur am Terminal eingesehen werden. Ein Techniker muss die Betriebs- und Prozessdaten vor Ort erfassen um eine Diagnose stellen zu können und unter anderem das ERP-System darüber zu informieren. Weiterhin kann eine cyber-physikalische Rückkopplungsschleife nicht autonom auf den Prozess wirken, wenn die Daten nicht im virtuellen Weltmodell vorliegen.

REQ1 Die Überwachung von Betriebs- und Prozessdaten der Altmaschine und ihrer automatisierten Maschinen- und Werkzeugkomponenten ist ortsunabhängig, so dass Zustandserfassung und Störfalldiagnose durch Subsysteme des CPPS erfolgen kann.

Die steigende Automatisierung zur Optimierung der Produktionsabläufe wird in einem CPPS durch Rückkopplung erreicht. Mit den Einhalten der Anforderungen zu Überwachung und Steuerung hat das System die Möglichkeit automatisch auf veränderte Bedingungen zu reagieren. Außerdem werden darauf aufbauende Konzepte wie Predictive Maintenance und Condition Monitoring ermöglicht.

3.2 Steuerung

Um einen bestimmten Fertigungsschritt an einer numerisch kontrollierten (NC) Anlage durchzuführen, muss das auszuführende Programm übertragen werden. Dafür wird dieses entweder mit einem Speichermedium auf den Steuerungs-PC kopiert oder direkt an dessen Terminal kodiert. Der zeitliche Aufwand und das notwendige Personal verlangsamen die Fertigung des Endprodukts und führen zu einer suboptimalen Fertigungsstrecke. Für das Retrofitting der Anlage muss die entfernte numerische Kontrolle ermöglicht werden. Weiterhin sind Produktionsmaschinen mit zusätzlichen automatisierten Komponenten wie Schließmechanismen für Schutztüren, Kühl-, Entlüftungs- oder Einspannsystemen ausgestattet. Auch die Steuerung dieser muss ortsunabhängig sein, damit ein CPPS ganzheitlich in den Produktionsprozess eingreifen kann.

REQ2 Die Steuerung der Altmaschine und ihrer automatisierten Maschinen- und Werkzeugkomponenten ist ortsunabhängig, so dass Übertragung, Ausführung und Abbruch von NC-Programmen, beziehungsweise produktionsbedingter Steuerbefehle, durch Subsysteme des CPPS erfolgen kann.

3.3 Standardisierung

Nach Ferrolho et al. entstehen auch mit Netzwerkanbindung und Programmierschnittstellen noch zu überwindende Probleme [FC07]. CNC-Maschinen basieren auf einer geschlossenen Architektur numerischer Kontrolle und sind nicht für die Integration mit anderen ausgelegt. Die Kontrolleinheit der Anlage lässt die Steuerung von einem entfernten PC nicht zu. Programmierungsumgebungen sind nicht ausreichend leistungsfähig um komplexe Aufgaben, wie die kollaborative Operation innerhalb einer flexiblen Fertigungszelle, zu entwickeln. Unterschiedliche Hersteller verwenden eigene Programmiersprachen und Entwicklungstools, wodurch Integration und gemeinschaftliche Produktion erschwert werden. Die sich damit ergebende Heterogenität der Anlagen einer Produktionsstrecke ist ein bereits betrachtetes Problem cyber-physikalischer Systeme (vgl. [SG16]). Im Falle proprietärer Schnittstellen und geschlossener Architekturen muss ein Adapter die Standardisierung von Protokollen und Informationen durchsetzen [Aya+13].

REQ3 Standardisierte Informationsprotokolle und -modelle werden für die Integration heterogener Altmaschinen eingesetzt, so dass Datenaggregation und M2M-Kommunikation gesamtheitlich gewährleistet werden kann.

3.4 Lokalität

CPPS müssen in geringstmöglicher Zeit Betriebs- und Prozessdaten der Maschine analysieren, bewerten und in den Produktionsprozess eingreifen können. Die Synchronisation des virtuellen Modells der Realität wird jedoch durch stetig wachsende Datenvolumina aufgrund steigender Geräteanzahl erschwert. Damit verlangsamt sich die Verarbeitung der Daten mit der geografischen Entfernung zwischen Gerät und System (vgl. [Bon+12]). Bei der Integration von Altmaschinen muss demnach die Datenanalyse, -persistenz und Historie, sowie die Reaktion auf dadurch erkannte Veränderungen möglichst nahe an der Anlage geschehen. Läuft eine Rückkopplungsschleife direkt an der Maschine, muss außerdem nur ein Teil der anfallenden Daten veräußert und die Kontrolle nur teilweise an hierarchisch übergeordnete Systeme abgegeben werden [Bon+12]. Durch den verminderten Austausch zwischen den Systemen werden die Sicherheit der Daten verbessert und Kommunikationsfehler minimiert (vgl. [Wan+04]).

REQ4 Die Erfassung und Persistierung anfallender Betriebs- und Prozessdaten, sowie die Interpretation von Maschinenbefehlen geschieht geografisch nahe der Anlage, wodurch zeitliche Latenzen, Kommunikationsaufwände und -fehler minimiert werden.

Auch wenn die Zeit für die Kommunikation von Steuerbefehlen und Sensordaten durch die Nähe zur Maschine minimiert wird, ist Echtzeit kein Kriterium. Es wird davon ausgegangen, dass die Interpretation und Ausführung der Maschinenbefehle, sowie die Aggregation der Daten, direkt an der Maschine geschieht. Um in adäquater Zeit reagieren zu können, unterliegen die für CPPS erforderlichen Kontrollschleifen damit ebenfalls dem Lokalkriterium [Bon+12].

4 Forschungsstand

Nach der Spezifikation der Zielvorgaben werden in diesem Kapitel der aktuelle Stand der Technik, sowie bereits bestehende Forschungsarbeiten zum Thema erläutert und mit den aufgestellten Kriterien für eine Lösung abgeglichen.

4.1 Netzwerkarchitektur für CPPS

Monolithische Architekturen sind ungeeignet für cyber-physische Systeme (CPS). Durch die Aufteilung eines skalierenden ganzheitlichen Systems in Subsysteme entsteht ein *System of Systems* (SoS). Abbildung 4.1 verbildlicht das Konzept der Systemkapselung und Verbindung einzelner Produktionskomponenten in einer Architektur für CPPS.

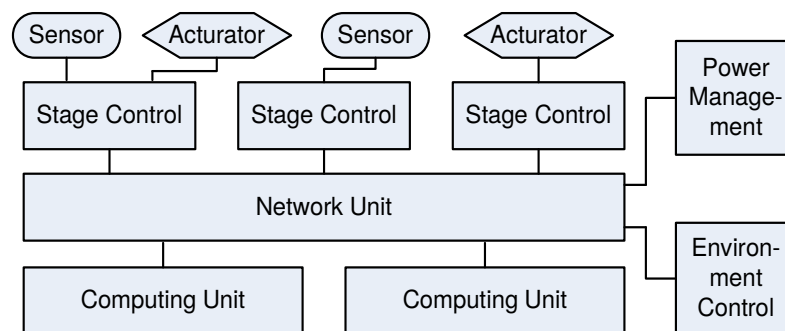


Abbildung 4.1: CPS-Architektur nach Wang et al. [WVG08]

Diese von Wang et al. vorgestellte heterogene Struktur für Steuerungsnetzwerke besteht aus verschiedenen, miteinander verbundenen CPS-Einheiten welche sich wiederum aus Kontrolleinheiten für Subsysteme, Sensoren, Kameras und Aktuatoren zusammensetzen. Einige der Komponenten kommunizieren nicht direkt mit Sensoren oder Aktuatoren, sondern stellen die Rechenleistung für die Ausführung der Anfragen anderer Systeme. Dem gegenüber stehen unmittelbar mit dem Netzwerk verbundene Sensoren und Aktuatoren. Der zentrale Aspekt dieser Architektur ist die *heterogene Netzwerkeinheit* (HE). Durch sie werden zeitliche und den Ausfall

betreffende Probleme der Komponenten abstrahiert.

Damit reduziert sich das Problem der Komplexität des Designs von CPS auf den Entwurf der HE, deren Verhalten und Latenz bezüglich notwendiger Kommunikationskriterien garantiert werden muss.

Im Falle der Störung oder des Ausfalls einer HE und des damit verbundenen Bearbeitungsschritts der Fertigungsstrecke, kommt die Produktion nicht vollständig zum Stillstand. Werkstücke oder Produkte können über alternative, autark agierenden Strecken umgeleitet werden [WVG08].

Mit Fokus auf Garantien zu zeitlichem Verhalten und Zuverlässigkeit der Komponenten eines CPS, beschreiben Wang et al. eine generische Netzwerkarchitektur für moderne Produktionssysteme. Jede zu steuernde Phase (*Stage* in Abbildung 4.1) des Fertigungsprozesses ist mit einem eingebetteten Kontrollsystem versehen und kann damit autonom agieren. Sensoren als Teil einer möglichen Rückkopplungsschleife sind vorgesehen, nicht aber Schwerpunkt des vorgestellten Konzepts. Für Anwendungen der Industrie 4.0 muss die HE zur virtuellen Repräsentation abstrahiert werden.

Die Anforderung zur ortsunabhängigen Steuerung (REQ1) kann mit dieser Netzwerkarchitektur durch eine Erweiterung erfüllt werden. Arbeitsteilig können die *Computing Units* und *Stages* (vgl. Abbildung 4.1) die Interpretation und Ausführung von NC-Programmen und automatisierten Komponenten übernehmen. Die ortsunabhängige Überwachung der Maschine (REQ2), deren virtuelle Repräsentation als *Stage* fungiert, ist durch die Einbindung Sensoren vorbereitet, nicht aber erfüllt. Um diesen Anforderungen vollends zu entsprechen muss ein lösungsorientiertes Konzept noch entwickelt werden. Es werden keinerlei Aussagen zu standardisierten Kommunikationsprotokollen oder Informationsmodellen getroffen, weshalb REQ3 nicht erfüllt wird. Da auf die Persistenz von Betriebs- und Prozessdaten der Stages nicht eingegangen wird, ein eingebettetes Kontrollsystem aber Bestandteil der jeweiligen Phase ist, wird der Anforderung der Lokalität nicht vollständig entsprochen (REQ4). Zusammenfassend kann das Konzept von Stages und Computing Units für die Lösung des Retrofitting-Problems übernommen werden.

4.2 Fernzugriff zu Steuerung und Überwachung

Auf einer Netzwerkarchitektur wie in Abschnitt 4.1, können konkrete Mechanismen für die Überwachung und Kontrolle von Anlagen aufgebaut werden. Nach den Anforderungen REQ1 und REQ2 (vgl. Abschnitte 3.1, 3.2) muss die Interaktion mit CPPS-Subsystemen und Menschen fernab vom Terminal gewährleistet werden. Wang et al. entwickelte 2008 eine offene Architektur für die Echtzeitüberwachung

und -kontrolle von im Netzwerk befindlichen CNC-Maschinen über eine grafische Schnittstelle mit 3D Repräsentation [Wan+04].

Ein Web-basierter Thin-Client des *Wise-ShopFloor* ermöglicht die Kontrolle und Überwachung der Maschinen über ein dreidimensionales Modell der Fertigungsstrecke. Das darunterliegende Framework basiert auf einer Client/Server-Architekturstil und verwendet seitens des Servers das MVC-Entwurfsmuster. Maschinen werden über das Fabriknetzwerk mit dem Server verbunden und sind somit vom Internet getrennt. Bei der Verwendung mehrerer Clients wird für das Routing ein Publish/Subscribe Mechanismus über HTTP-Streaming eingesetzt. Mit Hilfe dessen wird das Verhalten des auf Java 3D basierenden Visualisierungsmodells durch Sensorik an den Maschinen beeinflusst. In der von Wang et al. durchgeführten Case Study wurde unter Verwendung einer CNC-Fräsmaschine die Tauglichkeit des Konzepts verifiziert. Die Schnittstelle zwischen Server und Maschine wurde durch einen *Open Architecture Controller*¹ bereitgestellt. Für die Kontrolle der Fräse kann zwischen einem manuellen und einem automatischen Modus gewählt werden, wobei letzterer die direkte Übertragung von G-Code ermöglicht.

Das Internet ist ein zentraler Aspekt verteilter Produktion. Jedoch sind damit Sicherheitslücken fatal für interne Daten und vertrauliche Informationen der Organisation. Die gezielte Verbreitung dieser stellt ein erhöhtes wirtschaftliches Risiko dar und muss in besonderem Maße geschützt werden. Weiterhin sind Systemfehler auf Maschinenebene im Bezug auf Personen- und Materialschäden untragbar. Daher muss die reibungslose Kommunikation von Steuerungsbefehlen zu jeder Zeit gewährleistet sein.

Standards für die Kommunikation von Sensor- und Steuerungsinformationen sind notwendig um Effizienz und Integration der Systeme zu vereinfachen. So müssen globale Schnittstellen definiert und durch die Komponenten des Systems implementiert werden. Durch die Verwendung eines zuverlässigen NC-Befehlsinterpreters ist die verteilte Echtzeitsteuerung von CNC-Maschinen nach Wang et al. praktisch möglich. Jedoch setzt dieses System eine bestehende Anbindung an die Steuerungsebene voraus.

Die direkte Verbindung des Clients zu einer Maschine ist mit der verwendeten Technologie nicht möglich. Sowohl die Java Sicherheitsinfrastruktur, als auch die Überwindung von Firewalls stellen zukünftig zu lösende Probleme dar. Für künftige Maschinen ist daher das Einbetten eines dedizierten Web-Services in die Kontrolleinheit notwendig.

Ein wichtiger Aspekt des Konzepts von Wang et al. ist die technische Umsetzung auf der Java-Plattform. Mit dieser werden Sicherheitsinfrastrukturmerkmale wie byte-code-Verifikation und Rechteverwaltung direkt unterstützt. Die Indirektion des Kontrollflusses über den Server der Architektur zu den Maschinen verhilft zur Einhaltung.

¹Steuerungskomponente, die Modifikationen über das API hinaus zulässt [Yonglin2004]

Durch Verteilung von Steuerung und Überwachung der Maschine auf im Netzwerk befindliche Clients, sowie die browserbasierte Nutzungsschnittstelle, werden die Anforderungen REQ1 und REQ2 (vgl. Abschnitte 3.1, 3.2) vollständig erfüllt. Ein Standard wird mit der Kommunikation via HTTP verwendet, während Informationsprotokoll und -modell nicht näher erläutert wird. Damit ist REQ3 nur ansatzweise erfüllt. Auch mit der Konzeption einer Netzwerkarchitektur für CPS (vgl. Abschnitt 4.1) wurde die Notwendigkeit des Einbettens der Steuerung erkannt. Da aber Persistenz von Prozess- und Betriebsdaten von einem dedizierten Datenserver übernommen wird, ist das Lokalkriterium (REQ4) nur teilweise erfüllt. Grundsätzlich wurden Sicherheitsaspekte im Konzept beachtet und in den vertikalen Prototypen integriert. Die Verwendung von HTTP für die Kommunikation über Firewalls hinaus ermöglicht skalierenden, hierarchischen Zugriff.

4.3 Zusammenfassung

Die Gegenüberstellung von Anforderungen und bestehenden Forschungsarbeiten ist in Tabelle 4.1 zusammengefasst. Wobei ● die Erfüllung, ◐ die eingeschränkte oder teilweise Erfüllung und ○ die Nichterfüllung symbolisiert.

Tabelle 4.1: Anforderungen bzgl. bestehender Forschungsarbeiten

	Überwachung	Steuerung	Standards	Lokalität
[WVG08]	◐	◐	○	◐
[Wan+04]	●	●	◐	◐

- Control software for industrial CNC machines [FCL05; FC07]
 - kein Standard bei Kommunikation
- Prototypischer OPC UA Server für Fernsteuerung [Aya+13]
- Unterschied RetroNet [Fra16b] (TODO)
 - keine zentrale Datenhaltung

4.4 Maschinendatenerfassung & -analyse

4.4.1 Legacy Machine Monitoring Using Power Signal Analysis [DP11]

Problem: Datenerfassung (=> Prozessüberwachung) bei Altmaschinen nicht vorhanden

Lösung: unabhängige minimalinvasive Sensorik

Purpose. Ziel von Deshpande et al. war eine nicht-invasive Methode der Echtzeitüberwachung von Energieverbrauch und weiteren Parametern bei Legacy-Maschinen.

Design/Methodology/Approach. Durch das Abgreifen des Stromverbrauchs über eine *Universal Power Cell* (UPC), dem Sensor an der Maschine, können Informationen via TCP und UDP an eine externe Komponente übergeben und ausgewertet werden. Die in Kilowatt eingehenden Verbrauchsdaten wurden durch an Bedingungen gekoppelte Schwellwerte in Status (an, aus, Leerlauf), Energieverbrauch, Werkzeugwechsel und Werkstückdurchsatz unterschieden. Für die Case Study und einen anschließenden Vergleich hatten Deshpande et al. auch moderne Maschinen mit der UPC ausgestattet. Verglichen wurde die zeitabhängige Auslastung von drei unterschiedlichen Modellen.

Findings. Mit einer Genauigkeit von 95% für den Status und 99% für Werkzeugwechsel und Durchsatz wurde das Konzept erfolgreich getestet.

Research Limitations/Implications. Das Konzept nutzt ausschließlich den Eingangsstrom der Maschine, wodurch Genauigkeit und Umfang der Daten begrenzt werden.

Practical Implications.

Für den Einsatz in einer realen Produktionsumgebung fehlen UI und API. Anforderungen an die Energieversorgung, sowie der Verbrauch von Teilsystemen der Produktionskette werden messbar. Die periodische Planung der Wartung kann aufgrund tatsächlicher Nutzung und Auslastung geschehen. Außerdem werden Prinzipien wie VSM echtzeitfähig und ermöglichen eine höhere Produktivität.

Originality/Value. Die minimal-invasive Methode ist unabhängig von Hard- Software und erlaubt die autonome Aggregation von Informationen unzugänglicher Altmaschinen.

Problem: ein Sensor => zu wenig Infos

Lösung: verschiedene Sensoren (auch für Fusion) einsetzen

4.4.2 Diss: In-process tool condition monitoring systems in CNC turning operations [Lee06]

- Purpose
 - Online Tool Condition Monitoring (TCM) bei CNC-Drehmaschinen mittels
 - * Signal-Dekomposition
 - * statischer Datenanalysen
 - * neuronaler Netze
 - Untersuchung vieler versch. Netzwerkstrukturen => Optimierung für TCM
 - Schwerpunkt auf Analyse indirekter Messungen von Maschinensignalen
- Design/Methodology/Approach
 - Sensordaten durch Wavelet-Transformation in versch. Komponenten aufgeteilt, Quellen:
 - * dreidimensionales Accelerometer
 - * Schallemissionssensor
 - statistische Elimination maschinenspezifischer Effekte auf Sensordaten => Filter
 - statistische Signifikanzprüfung der Komponenten
 - Entwurf zweier Systeme basierend auf signifikanten Komponenten
 1. multipler linearer Regression
 2. künstlichen neuronalen Netzen
 - Fallstudie
- Findings
 - 12,6%ige Verbesserung der KNN-Vorhersagen durch Filter
 - 90% Genauigkeit bei multipler Regression
 - 97% Genauigkeit bei KNN
- Research Limitations/Implications
 - ausschließliche Betrachtung von TCM

- Practical Implications
 - Reduktion von Maschinenstillstand durch verbesserte Vorhersage des Werkzeugausfalls
 - Minimierung von Ausschuss
 - Kostenreduktion
- Originality/Value
 - Umfassende Untersuchung aktueller Forschung zu MDE (Tabelle 2.1) und Entscheidungssystemen

4.4.3 Machine-readable data carriers – a brief introduction to automatic identification and data capture [Fur00]

Problem: ausschließliche Betrachtung von TCM (Wartung) => Aber was wird wie bearbeitet?

Lösung: Werkstückidentifikation/-erkennung für Verknüpfung operativer Schritte

- Purpose
 -
- Design/Methodology/Approach
 -
- Findings
 -
- Research Limitations/Implications
 -
- Practical Implications
 -
- Originality/Value
 -

4.4.4 Zusammenfassung

Ohne Carrier?

Data-Collection/Reasoning Stuff [Dow+16]

Anfallende Daten zu * Prozess * Technologie (CAD/CAM) * Werkzeug * Werkstück
* Peripherie (*loading door*)

Kommunikation der Informationen via OPC UA, MTConnect, MQTT ansprechen

- Umfangreiche Recherchen zu bestehender Forschung durch [Tet+10]
 - Werkzeugzustand
 - Späneigenschaften
 - Prozesszustand
 - Werkstückbeschaffenheit

4.5 Rechnergestützte numerische Steuerung

Problem: Wissen über operative Schritte und Werkstück verfügbar - Umsetzung der Schritte?

Lösung: Kontrolle der Maschine

4.5.1 An ARM-based Multi-channel CNC Solution for Multi-tasking Turning and Milling Machines [GM16]

Problem: Kontrolle der Maschine durch SPS mit CNC auf Terminal-PC inflexibel und teuer

Lösung: Portierbarkeit des CNC-Kernels auf andere Systeme

- Purpose
 - Untersuchung von CNC mit ARM-Computern
 - * Portierung eines CNC-Kernels auf Pi 2 durch Virtualisierung mit gemeinsamen Bibliotheken (Cross-Compile)

- * Kontrolle mehrerer paralleler Kanäle mit Schrittmotoren und Spindel
 - * Kommunikation über EtherCAT Feldbus (Echtzeit)
- Design/Methodology/Approach
 - Soft-SPS, RT-Linux auf ARM-Computer
 - ARM/PC-Anbindung
 - * Spindel- und Motortreiber via EtherCAT
 - * Feldbus-Koppler via EtherCAT
 - * NC-Terminal via TCP
 - Fallstudie mit einer Dreh-/Fräsmaschine
 - Synch. der Kanäle durch High-Level-Funktionen (Load, Run, Start, Stop, Reset, Wait, Sleep)
- Findings
 - Ressourcen eines Einplatinencomputers sind ausreichend
 - parallele Portierung PC/ARM von NC-Software bei guter Kernel-Arch. mgl.
 - lediglich individuelle Konfiguration der Werkzeuge/Maschinen notwendig
 - CNC-Kernel braucht idle 20% ARM-CPU / 3% PC-CPU => steigt mit #Kanäle #Achsen
- Research Limitations/Implications
 - weitere Forschung auf Basis dessen
 - * Verarbeitungspräzision/-Stabilität (Precision Engineering)
 - * Adaptive Kontrolle
 - * Diagnose/Prognose
- Practical Implications
 - EtherCAT Cycle Time¹ < 2ms, perspektivisch < 1ms => beeinfl. Anzahl paralleler Kontroll-Kanäle
 - künftig: Einplatinencomputer kontrollieren > 12 Achsen
- Originality/Value
 - Bewertung mit *Technology Readiness Level*² 6

¹„[...] die Zeit, die ein Teilnehmer (slave) warten muß, bis er wieder ‚dran‘ ist.“

²www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/txt_accordion1.html

4.6 Architekturen & Methoden für CPPS

- SOA [Mey10; FWW16]
- MAS, Holonic [Lei09; Fal16]
- Blackboard [MVK06; Pau+13]
- RAMI4.0 [AE15]

4.6.1 Information Architecture for Reconfigurable production systems [Pau+13]

Problem: Betrachtungen des Retrofitting bzgl. Kontrolle und Überwachung einzelner Maschine, Integration?

Lösung: flexibel konfigurierbarer Verbund miteinander kommunizierender Maschinen => FFZ

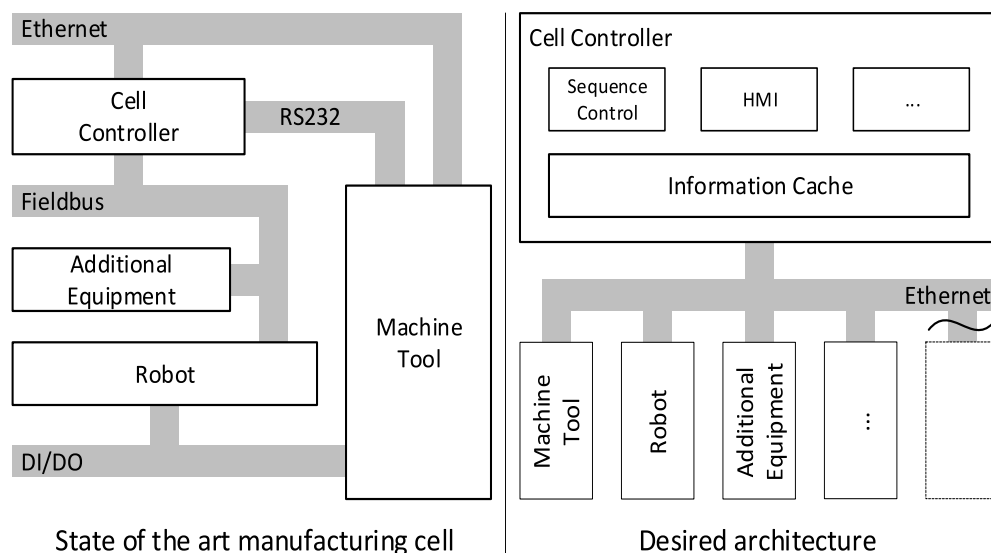


Abbildung 4.2: Vergleich der Architekturen von Fertigungszellen aus [Pau+13]

- Purpose
 - Montage und Konfiguration von FFZ bzgl. Informationsebene vereinfachen
 - Design von Informationsmodell und zentralem Daten-Cache
 - Design einer Kommunikationsarchitektur für die Komponenten einer FFZ

- Rekonfiguration einer FFZ zur Laufzeit (Losgrößenproblematik)
- wissensch. Experimente mit rekonfigurierbaren Fertigungssystemen
- Design/Methodology/Approach
 - VDMA 34180 als Arch.-Ref. für FFZ betrachtet
 - * beschreibt Kommunikationsarchitekturen für *Robotized Manufacturing Cells* (RMC)
 - * Schwerpunkt auf Werkstücklogistik mit Robotern
 - Blackboard-Architektur für Kommunikation
 - * zentrale Datenbasis
 - * keine Kontrolleinheit (vgl. Blackboard in intelligenten Systemen)
 - * XML als Datenformat
 - Parameter für Kommunikation (IP, Port)
 - Maschinenstatus
 - Programm (Ident., Status)
 - Informationen zu angeschlossenen Geräten
 - * Konsistenz durch R/W-Locks
 - * Sequenzkontrollkomponente legt Handlungsweisungen auf Blackboard ab
 - * *Microsoft Visual Programming Language* (VPL) als Sequenzdefinitionsformat (Datenflussdiagramm)
 - * Maschinen und Sequenzkontrolle als aktive *Knowledge Sources* holen sich diese Instruktionen
 - Master/Slave-Prinzip für Workflow und Job-Delegation (Master-Worker-Pattern)
 - Ethernet-basierte Kommunikationsschnittstellen
 - Adapter zu den Maschinen-Controllern (via Socket an Cell-Controller)
 - Fallstudie durch FFZ mit zwei Fräsen und einem Roboter
- Findings
 - Reduktion von Komplexität der Topologie => geringerer Konfigurationsaufwand
 - VDMA 34180 nutzt DI/DO für Kommunikation => Konfiguration auf HW-Ebene => zu inflexibel für rekonfigurierbare RMCs
 - Fallstudie zeigt die Eignung der Architektur für FFZ

- Blackboard geeignet bei notwendiger Austauschbarkeit der Komponenten
- Research Limitations/Implications
 - Schwerpunkt auf Blackboard-Informationscache
 - Eignung von VPL für Datenflussdefinition zu untersuchen
 - Performanz-Probleme mit XML als Blackboard-Backend (SQLite wird diskutiert)
 - * R/W-Locks
 - * Parsen der Datei
 - Socket-basierte Kommunikation Problematisch
 - * proprietäre Kommunikationsprotolle => Adapter immer notwendig
 - * OPC UA Server für beteiligte Komponenten
- Practical Implications
 - Hinzufügen/löschen von HW-/SW-Komponenten ohne Überarbeiten der Informationsarch./-modelle
 - *Plug & Produce* für FFZ wird möglich
 - Einbinden einer Komponente erfordert Adapter
- Originality/Value
 - Blackboard den intelligenten Systemen entlehnt
 - Definition der Sequenz für den Cell-Controller

4.6.2 Prototype OPC UA Server for Remote Control of Machine Tools [Aya+13]

Problem: Socket-basierte, proprietäre Maschinenkommunikation (Adapter) **Lösung:** OPC UA Server für Komponenten einer FFZ

- Purpose
 - OPC UA Server für CNC innerhalb einer FFZ
 - semantische Kommunikationsschnittstelle
- Design/Methodology/Approach
 - Implementierung eines OPC UA Informationsmodells für CNC-Maschinen

- Methoden des Informationsmodells für Instruktionen verwendet
- Kommunikation zw. Server und Maschine via propriät. Direct Numerical Control (DNC)
- Case-Study an CNC-Drehmaschine & Industrieroboter
- C++ UA Server SDK, .NET UA Client SDK (Unified Automation)
- OPC UA Client mit Kontrollfunktionalität
- Findings
 - OPC UA ist eine geeignete Technologie für erweiterte Maschinenanbindung
 - Problem der Granularität des Modells (Ockhams Rasiermesser, KISS), 1-zu-1 Mapping ungeeignet
- Research Limitations/Implications
 - Definition eines Standard-Informationsmodells benötigt (vgl. MTConnect-OPC UA Comp.)
 - Anforderungen (horiz./vert. Integr.) für bestehende Standards (MES)
- Practical Implications
- Originality/Value
 - OPC UA Methoden als Steuerungsschnittstelle
 - dynamische (Runtime) Werkzeugrepräsentation im OPC UA Adressraum

4.6.3 A systematic approach to OPC UA information model design [PFK16]

Problem: OPC UA ist nicht alleiniger Standard für Informationsmodelle

Lösung: Informationsmodelle modellgetrieben entwickeln

- MOF?
- M0 == FFS
- FFS repräs. durch PIM, definiert in UML auf M2
=> plattformunabh. Modellierung auf M1
- PIM => PSM: ein PIM-Elem. entspricht einem PSM-Elem. pro PSM (OPC UA, MTConnect, etc.)
- ein PSM kann dann in untersch. Sprachen (C#, C++, ...) übersetzt werden

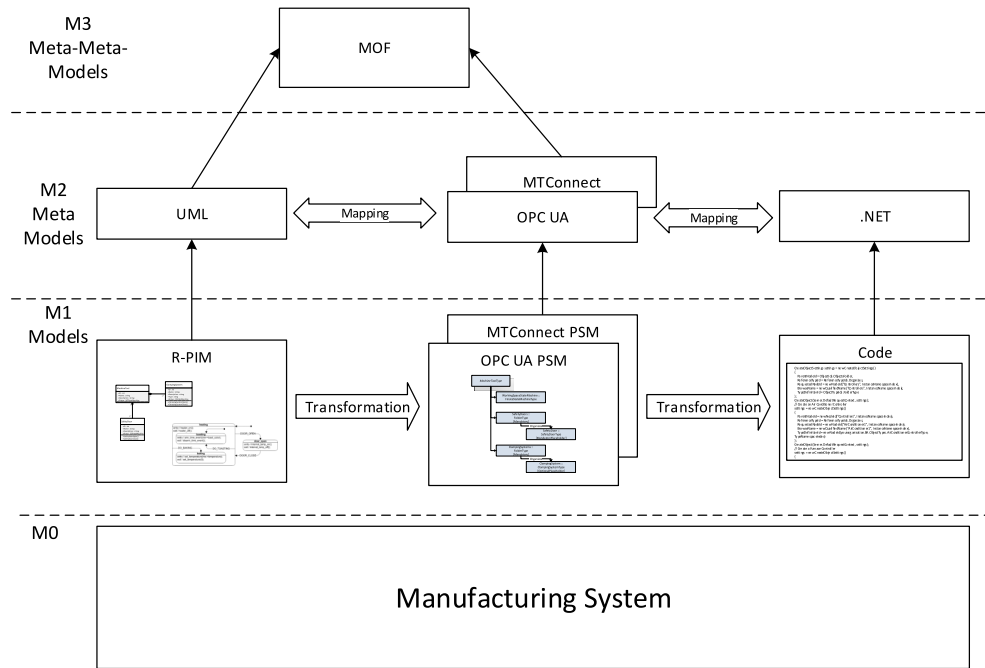


Abbildung 4.3: Transformationsprozess PIM zu PSM aus [PFK16]

- M3 Meta-Metamodell beschr. Sprache für spez. Metamodelle auf M2 => Interoperabilität zw. M2-Modellen

- Purpose
 - UML als einheitliche Modellierungssprache in der Softwareentwicklung, untersch. Modellierungssprachen in der Fertigungsindustrie
 - Model und Code müssen für jede Sprache separat entwickelt und gewartet werden => hoher manueller Aufwand
 - Konzept modellgetriebenen Designs (MDA) auf Fertigungsindustrie übertragen
 - * automatisiertes Ableiten plattformspezifischer Modelle von plattformunabhängigen
 - Spezifikation eines Prozesses mit dem virtuelle Repräsentationen von I4.0-Komponenten generiert werden können
 - * Diagramme und Tools für Modellierung und Code-Generierung
 - * OPC UA Informationsmodelle von Systemanforderungen zu Code-generierung und Deployment

- RAMI4.0 Konformität
- Design/Methodology/Approach
 - erfassen statischer und dynamischer (Verhalten) Aspekte von Produktionssystemen
 - systematischer Ansatz für Modelltransformation zu OPC UA Informationsmodelle (hier: Zieltechnologie)
 - wichtigste plattformspez. Technologien untersucht => MDA Workflow definiert => Restriktionen für PIM definiert
=> Restricted Platform Independent Model (R-PIM)
 - * z.B.: Mehrfachvererbung in UML + nicht mgl. mit C#
 - * z.B.: notwendige Attribute der OPC UA Knoten (NodeId, NodeClass, BrowseName, DisplayName)
 - * untersch. zu MDA liegt in diesen Restriktionen
 - generisch bzgl. Zielmodell (OPC UA, MTConnect, etc.) <= Systemanalyse und -design mit der UML
 1. Komponenten- und Anwendungsfalldiagramme zur Beschreibung der Domäne
 - * manuell, da Wissen von Domänenexperten/Systemnutzern benötigt
 - * Komponentendiagramm: Systemgrenzen und Subsysteme identifizieren
 - * Anwendungsfalldiagramme: abstrakte Systemfunktionalität
 2. Domänenwissen => R-PIM
 - * Klassendiagramme
 - * Zustandsdiagramme
 3. R-PIM => Zieltechnologie
 - * Adressraummodell
 4. Zieltechnologie => Code-Gerüst
 5. Implementierung der Logik in Komponenten (API)
 6. Deployment eines ausführbaren Artefakts
- Findings
 - fehlende APIs/Tools => noch viel manueller Aufwand
- Research Limitations/Implications
 - Definition eines Meta-Metamodells für Restriktionen steht noch aus

- manuelle R-PIM => PSM Transformation (exist. Konzept erlaubt nur statischer Aspekte des Address Space)
- TU Wien arbeitet an Transf. dynamischer Aspekte => Guarded State Machines aus OPC UA Spec
- vorerst nur OPC UA
- Verbesserung der CIM-Definition
- Ontologien als Wissensbasen statt Experten
- Practical Implications
 - Adressraummodellierung, Logikimplementierung zum Großteil noch händisch (fehlende Tools und APIs)
- Originality/Value
 - MDA-Prozess für generische Informationsmodelle durch UML

4.7 Zusammenfassung

Die Integration bestehender Hardware in die intelligente Steuerung einer Fabrik ist Thema des *RetroNet*-Projekts. Das Fraunhofer IPK entwickelt mit Industriepartnern physische und logische Adapter für die Anbindung von bestehenden Anlagen an eine Steuerungsplattform. Maschinen-, Anlagen und Produktionsdaten werden zu diesem Zweck zentral erfasst und gespeichert. Weiterhin soll eine Middleware im Client-Server-Architekturstil Dienste und zugrunde liegende Teilsysteme miteinander verbinden und eine vermittelnde Rolle im Gesamtsystem einnehmen [Fra16b].

Forschung im Bereich Cloud-basierter Industriesteuerung wird in Zusammenarbeit von Fraunhofer, der TU Berlin und Industriepartnern betrieben. Im Projekt *pI-CASSO* werden die Auslagerung von Steuerungsdiensten in die Cloud und Möglichkeiten einer Verteilung und Modularisierung herkömmlicher Kontrollsysteme auf CPS-Komponenten untersucht [Fra16a].

Im Projekt *OPC4Factory* der TU Wien, wurden generische OPC UA Informationsmodelle entwickelt. Diese verbessern die Konnektivität von NC-Maschinen, Industrierobotern und anderen Komponenten innerhalb einer flexibel automatisierten Fertigungszelle. Die Orchestrierung der Fertigungsoperationen, sowie die Konfiguration der Komponenten soll durch die Lösung der Schnittstellenproblematik ver-

einfacht werden¹.

[Sch+15; Sch+14; Vic+15]

- TODO Projekte zusammenfassen & gegeneinander abgrenzen
- Schnittstellenproblematik immer Teil des Problems
- Entwicklung von Adaptern meist Standardlösung
- Kosten => Remote Maintenance?

¹www.ift.at/forschung/forschungsprojekte/opc4factory see [Aya+13; Pau+13; Pau14]

5 Konzeption

Durch steigende Rechenleistung sind ARM-Prozessoren auf Einplatinencomputern in der Lage Mehrachsmaschinen zu kontrollieren [GM16].

- Laufzeitkonfiguration des Surrogate?
- Surrogate in bestehende Netzwerkinfrastruktur einbinden?
 1. direkte SG-Kommunikation (Wifi-Direct, BT, ...) zur Konfiguration der Netzwerkanbindung via Mobile device
 2. Auswahl des Access-Points
 3. Festlegen der OPC UA Discovery-Service Adresse
 4. SG mit Infrastr. verbunden + Registrierung bei Discovery-Service
 5. OPC UA Systemevent => neues Surrogate registriert
 6. Konfiguration des Adressraums via HTTP/WebApp
- Controlling nicht aus der Cloud @... sondern an der Maschine
 - SPS (und Motortreiber) als Teil des Surrogate
 - CNC-Kernel auf dediziertem Controller
 - * Kernel muss nicht portiert werden (vgl. [GM16])
 - *
 - Echtzeit kein Problem (OPC UA kann's eh nicht)
 - kein Feldbus, keine Koppler, kein DI/DO (vgl. [GM16])
 - Ethernet-basierte Kommunikation
- Konzept eines *Cell Controller* als Basis (vgl. [Aya+13; FWW16])
- kein Maschinenspez. NC-Terminal => verteiltes System => entfernte Mensch-Maschine-Schnittstelle (vgl. [GM16])

- Rekonfigurierbare FFZ [Pau+13]
- Bisher OPC UA Server als Adapter zu proprietären Maschinenprotokollen
 - Server <-> Maschine => Server <-> Adapter <-> Maschine ?
 - Smoothieboard/Embedded (soft-)SPS als Adapter zu Maschine
- Wiederverwendung [Aya+13]
 - des Informationsmodells
 - des Flow-Charts für die Server-Logik (teilweise)
- Persistenzkonzept: Blackboard? [Pau+13]
- Kontrolle der Arbeitssequenz? (PROtEUS, BPMN/Activiti)
- Framework
 - Definition der Bindings von Extension Points in OPC UA Modell

Nach Rücksprache

- OPC UA zur Metamodellierung bzgl. der Maschine
- OPC UA Modell synchron mit Realität => Laufzeitmodell
- Zu erwartendes Verhalten des physischen Systems über FB-Loop (MAPE-K) kontrollierbar => Modellierung/Sprache der *Regeln*?
- Elemente eines Frameworks mit Schichtenarch. im Client/Server-Stil
- Microkernel-Ansatz (Plugins für OPC UA Typen, Sensoren und Aktuatoren)
- FB-Loop intern oder extern?

OPC4Factory:

OPC UA Server und ihre Informationsmodelle repräsentieren alle für die Automatisierungsaufgaben erforderlichen Komponenten der angeschlossenen Maschinen und Roboter (Ladetüren, Spannmittel, Werkzeuge, NC-Programme etc.) mit ihren Attributen, Ereignissen und Methoden. Die Kommunikation auf dieser Ebene **erfordert keine Echtzeitfähigkeit**, da Steuerungsaufgaben mit Echtzeitanforderungen ausschließlich innerhalb der Maschinen- bzw. Robotersteuerung abgewickelt werden.

- Statusreport: Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0) => **Abb. 9 I4.0-Komponente** [AE15]
- Kruchten 4+1?
- arc42?

5.1 Virtuelle Maschinenrepräsentation

- Service-/Protokolllayer (OPC UA)
- CPS-Layer, Hardwareanbindung
- Einbetten eines dedizierten Web-Services [Wan+04]
- Stage braucht eingebettetes Kontrollsystem [WVG08]

5.2 Kommunikations- & Informationsmodell

[Pau+13] Komponentengranularität bis zur Achse (intelligente Maschinenteile)

5.3 Systemintegration

5.4 Zusammenfassung

6 Implementation

- Smoothieboard als Maschinen-Adapter
 - Nachteil: Beobachten des Prozessfortschritts langsam (*progress*) => kann nicht in online-FB einbezogen werden
- open62541 oder ähnliche OPC UA Stack-Implementierungen für Server auf Pi

6.1 Zusammenfassung

7 Evaluation

These/Behauptung? * Steigerung des Automatisierungsgrads durch Feedbackloop *
physische Anwesenheit des Werkers technisch überwinden (Remote-Control/-Programming)
* Laufzeitmodell für *online*-Monitoring

Umsetzung? * Proof of concept * Case-Study mgl.? * HIL-Simulation?

Blocking Factors/mögliche Kritik? * Leistung von embedded computing devices =>
siehe [GM16] * Energieverbrauch

7.1 Zusammenfassung

8 Zusammenfassung

8.1 Schlussfolgerung

8.2 Ausblick

- MDSD mit [PFK16]
- CNC ersetzen durch STEP-NC? [Suh+03; XN06; Xu06; XLY06]
- Prozessmodell für Abstrakte Leitebene
- Wo läuft die Logik für orchestrierende Steuerung? (OPC UA Clients)
- Surrogate als reaktiver Agent => Einbindung in MAS denkbar
- Möglichkeiten des Nutzens der Daten
 - Welcher G-Code Befehl korreliert auf welche Weise mit welchen gemessenen Werten?
 - Automatische Erkennung von Gut-/Schlechtteilen

A Anhang

Abbildungen

2.1	Beispiel einer klassischen Automatisierungspyramide	8
2.2	Grundstruktur flexibler Automation [Lin15]	8
2.3	OPC UA Übersicht	9
4.1	CPS-Architektur nach Wang et al. [WVG08]	17
4.2	Vergleich der Architekturen von Fertigungszellen aus [Pau+13] . . .	26
4.3	Transformationsprozess PIM zu PSM aus [PFK16]	30

Programmcode

Tabellen

4.1	Anforderungen bzgl. bestehender Forschungsarbeiten	20
-----	--	----

Literatur

- [AE15] Peter Adolphs und Ulrich Epple. *Statusreport: Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0)*. Technischer Bericht April. 2015 (siehe Seiten 26, 36).
- [AH16] Mohammad Aazam und Eui-Nam Huh. „Fog Computing: The Cloud-IoT/IoE Middleware Paradigm“. In: *IEEE Potentials* 35.3 (Mai 2016), Seiten 40–44. DOI: 10.1109/MPOT.2015.2456213 (siehe Seite 12).
- [Aya+13] I Ayatollahi, B Kittl, Florian Pauker u. a. „Prototype OPC UA Server for Remote Control of Machine Tools“. In: *International Conference on Innovative Technologies*. Band 1009. 12. 2013, Seiten 73–76 (siehe Seiten 7, 9, 14, 20, 28, 33, 35, 36).
- [Bon+12] Flavio Bonomi, Rodolfo Milito, Jiang Zhu u. a. „Fog Computing and Its Role in the Internet of Things“. In: *Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing*. 2012, Seiten 13–16. DOI: 10.1145/2342509.2342513. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/2342509.2342513> (siehe Seiten 12, 15).
- [DC09] Boris Durisin und Giulia Calabretta. „Working Paper“. In: 01 (2009), Seiten 1984–2004. ISSN: 4921177783. DOI: 10.2139/ssrn.701181. arXiv: arXiv:1011.1669v3 (siehe Seite 7).
- [Dow+16] Jonathan Downey, Denis O’Sullivan, Mirosław Nejmen u. a. „Real Time Monitoring of the CNC Process in a Production Environment- the Data Collection & Analysis Phase“. In: *Procedia CIRP* 41 (2016), Seiten 920–926. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2015.12.008. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827115010872> (siehe Seite 24).
- [DP11] Amit Deshpande und Ron Pieper. „Legacy Machine Monitoring Using Power Signal Analysis“. In: *ASME 2011 International Manufacturing Science and Engineering Conference, Volume 2*. ASME, 2011, Seiten 207–214. DOI: 10.1115/MSEC2011-50019 (siehe Seiten 2, 13, 21).
- [Fal16] Solmaz Mansour Fallah. „Multi Agent based Control Architectures“. In: *26th DAAAM International Symposium on intelligent Manufacturing and Automation* (2016), Seiten 1166–1170. DOI: 10.2507/26th.daaam.proceedings.164 (siehe Seite 26).

- [FC07] Antnio Ferrolho und Manuel Crisostomo. „Intelligent Control and Integration Software for Flexible Manufacturing Cells“. In: *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 3.1 (Feb. 2007), Seiten 3–11. DOI: 10.1109/TII.2006.890529 (siehe Seiten 2, 14, 20).
- [FCL05] A. Ferrolho, M. Crisostomo und M. Lima. „Intelligent control software for industrial CNC machines“. In: *2005 IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems, 2005. INES '05*. IEEE, 2005, Seiten 267–272. DOI: 10.1109/INES.2005.1555171 (siehe Seite 20).
- [Fra16a] Fraunhofer IPK. *Industrie 4.0 - Cloudbasierte Steuerungen*. 2016. URL: https://www.ipk.fraunhofer.de/fileadmin/user_upload/IPK/publikationen/themenblaetter/aut_pICASSO_web.pdf (siehe Seite 32).
- [Fra16b] Fraunhofer IPK. „RetroNet - Praxisnahe Brücke in die Industrie 4.0“. In: *FUTUR* (2016), Seite 8. URL: https://issuu.com/claudiaengel/docs/futur_1_2016 (siehe Seiten 1, 20, 32).
- [Fur00] Anthony Furness. „Machine-readable data carriers – a brief introduction to automatic identification and data capture“. In: *Assembly Automation* 20.1 (2000), Seiten 28–34. ISSN: 0144-5154. DOI: 10.1108/01445150010311699 (siehe Seite 23).
- [FWW16] Solmaz Mansour Fallah, Sabine Wolny und Manuel Wimmer. „Towards model-integrated service-oriented manufacturing execution system“. In: *2016 1st International Workshop on Cyber-Physical Production Systems (CPPS)*. IEEE, Apr. 2016, Seiten 1–5. DOI: 10.1109/CPPS.2016.7483917 (siehe Seiten 26, 35).
- [Gau+14] Jürgen Gausemeier, Roman Dumitrescu, Jürgen Jasperneite u. a. *Auf dem Weg zu Industrie 4.0: Lösungen aus dem Spitzencluster it's OWL*. Technischer Bericht. Paderborn: it's OWL Clustermanagement GmbH, 2014. URL: http://www.its-owl.de/fileadmin/PDF/Industrie_4.0/Auf_dem_Weg_zu_Industrie_4.0_-_Loesungen_aus_dem_Spitzencluster_its_OWL_RGB.pdf (siehe Seite 1).
- [Gee11] Guido L. Geerts. „A design science research methodology and its application to accounting information systems research“. In: *International Journal of Accounting Information Systems* 12.2 (Juni 2011), Seiten 142–151. DOI: 10.1016/j.accinf.2011.02.004 (siehe Seite 5).
- [GM16] Sergej N. Grigoriev und Georgi M. Martinov. „An ARM-based Multi-channel CNC Solution for Multi-tasking Turning and Milling Machines“. In: *Procedia CIRP* 46 (2016), Seiten 525–528. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.036 (siehe Seiten 3, 24, 35, 41).

- [GML00] a. Gunasekaran, H. B. Marri und B. Lee. „Design and Implementation of Computer Integrated Manufacturing in Small and Medium-Sized Enterprises: A Case Study“. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 16.1 (2000), Seiten 46–54. ISSN: 0268-3768. DOI: 10.1007/PL00013131 (siehe Seite 1).
- [Gro08] Mikell P. Groover. *Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing*. Prentice Hall, 2008, Seite 815. ISBN: 0132393212 (siehe Seite 3).
- [HL07] Martin Hardwick und David Loffredo. „STEP-NC : Smart Data for Smart Machining“. In: *Proceedings of the Intl. Conf. on Smart Machining Systems, NIST*. 2007 (siehe Seite 11).
- [Hop14] Stefan Hoppe. „Standardisierte horizontale und vertikale Kommunikation: Status und Ausblick“. In: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, Seiten 325–341. DOI: 10.1007/978-3-658-04682-8_16 (siehe Seiten 2, 10).
- [Lee06] Soo-Yen Lee. „In-process tool condition monitoring systems in CNC turning operations“. Dissertation. Iowa State University, 2006 (siehe Seiten 11, 22).
- [Lee08] Edward A. Lee. „Cyber Physical Systems: Design Challenges“. In: *2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)* (2008), Seiten 363–369. DOI: 10.1109/ISORC.2008.25 (siehe Seite 11).
- [Lei09] Paulo Leitão. „Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey“. In: *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 22.7 (2009), Seiten 979–991. DOI: 10.1016/j.engappai.2008.09.005 (siehe Seite 26).
- [Lin15] Petra Linke. „Grundlagen zur Automatisierung“. In: *Grundlagen Automatisierung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, Seiten 1–28. DOI: 10.1007/978-3-658-05961-3_1 (siehe Seite 8).
- [LS01] Gunter Lay und Elna Schirrmeister. *Sackgasse Hochautomatisierung? Praxis des Abbaus von Overengineering in der Produktion*. Technischer Bericht. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, 2001. URL: <http://hdl.handle.net/10419/29534> (siehe Seite 2).
- [Mey10] Heiko Meyer. „Software Architecture of Manufacturing Execution Systems“. In: *Systemics, Cybernetics and Informatics* 8.2 (2010), Seiten 62–66 (siehe Seite 26).
- [Mil14] Joachim Milberg. *Trends in der fabrik*. Technischer Bericht. Institut für Produktion und Logistik, 2014. URL: http://www.ifpconsulting.de/media/pdf/ifp_ku_trends_2014sm_abstract.pdf (siehe Seite 1).

- [MVK06] L. Monostori, J. Váncza und S.R.T. Kumara. „Agent-Based Systems for Manufacturing“. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 55.2 (2006), Seiten 697–720. DOI: 10.1016/j.cirp.2006.10.004 (siehe Seite 26).
- [Pau+13] Florian Pauker, T Weiler, I Ayatollahi u.a. „Information Architecture for Reconfigurable production systems“. In: *DAAAM International Scientific Book 2013* January (2013), Seiten 873–886. DOI: 10.2507/daaam.scibook.2013.53 (siehe Seiten 7, 26, 33, 36, 37).
- [Pau14] Florian Pauker. „OPC UA for machine tending industrial robots - Prototypic development of an OPC UA server for ABB industrial robots“. In: October (2014). DOI: 10.15224/978-1-63248-031-6-155 (siehe Seiten 9, 33).
- [PFK16] Florian Pauker, Thomas Frühwirth und Burkhard Kittl. „A systematic approach to OPC UA information model design“. In: *49th CIRP Conference on Manufacturing Systems*. May. 2016 (siehe Seiten 29, 30, i).
- [Sch+14] Jan Schlechtendahl, Felix Kretschmer, Armin Lechler u.a. „Communication Mechanisms for Cloud based Machine Controls“. In: *Procedia CIRP*. Band 17. Elsevier, 2014, Seiten 830–834. DOI: 10.1016/j.procir.2014.01.074 (siehe Seite 33).
- [Sch+15] Jan Schlechtendahl, Felix Kretschmer, Zhiqian Sang u.a. „Extended study of network capability for cloud based control systems“. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. May 2014. 2015. DOI: 10.1016/j.rcim.2015.10.012 (siehe Seiten 12, 33).
- [SG16] David Siepmann und Norbert Graef. „Industrie 4.0 – Grundlagen und Gesamtzusammenhang“. In: *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, Seiten 17–82. DOI: 10.1007/978-3-662-48505-7_2 (siehe Seiten 1, 11, 14).
- [Suh+03] S.H. Suh, B.E. Lee, D.H. Chung u.a. „Architecture and implementation of a shop-floor programming system for STEP-compliant CNC“. In: *Computer-Aided Design* 35.12 (2003), Seiten 1069–1083. ISSN: 00104485. DOI: 10.1016/S0010-4485(02)00179-3 (siehe Seite i).
- [Tet+10] R. Teti, K. Jemielniak, G. O'Donnell u.a. „Advanced monitoring of machining operations“. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59.2 (2010), Seiten 717–739. ISSN: 00078506. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.05.010 (siehe Seite 24).
- [Ver13] Verein Deutscher Ingenieure e.V. *Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation*. Technischer Bericht. VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, 2013. URL: <https://www.vdi.de/technik/fachthemen/mess-und-%20automatisierungstechnik/fachbereiche/thesen-und-handlungsfelder/> (siehe Seite 11).

-
- [Vic+15] Axel Vick, Christian Horn, Martin Rudorfer u. a. „Control of robots and machine tools with an extended factory cloud“. In: *2015 IEEE World Conference on Factory Communication Systems (WFCS)*. IEEE, Mai 2015, Seiten 1–4. DOI: 10.1109/WFCS.2015.7160575 (siehe Seite 33).
- [Vij+08] Athulan Vijayaraghavan, Will Sobel, Armando Fox u. a. „Improving Machine Tool Interoperability Using Standardized Interface Protocols : MTConnect“. In: *Laboratory for Manufacturing and Sustainability* (2008) (siehe Seite 10).
- [Wan+04] Lihui Wang, Peter Orban, Andrew Cunningham u. a. „Remote real-time CNC machining for web-based manufacturing“. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 20.6 (2004), Seiten 563–571. DOI: 10.1016/j.rcim.2004.07.007 (siehe Seiten 1, 2, 13, 15, 19, 20, 37).
- [WVG08] Yunbo Wang, Mehmet C. Vuran und Steve Goddard. „Cyber-physical systems in industrial process control“. In: *ACM SIGBED Review* 5.1 (2008), Seiten 1–2. DOI: 10.1145/1366283.1366295 (siehe Seiten 11, 12, 17, 18, 20, 37).
- [XLY06] X.W. Xu, Lihui Lihui Wang und Yiming Yiming Rong. „STEP-NC and function blocks for interoperable manufacturing“. In: *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 3.3 (Juli 2006), Seiten 297–308. DOI: 10.1109/TASE.2005.862147 (siehe Seiten 7, i).
- [XN06] X.W. Xu und S.T. Newman. „Making CNC machine tools more open, interoperable and intelligent - a review of the technologies“. In: *Computers in Industry* 57.2 (2006), Seiten 141–152. DOI: 10.1016/j.compind.2005.06.002 (siehe Seiten 11, i).
- [Xu06] X.W. Xu. „Realization of STEP-NC enabled machining“. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 22.2 (2006), Seiten 144–153. DOI: 10.1016/j.rcim.2005.02.009 (siehe Seite i).