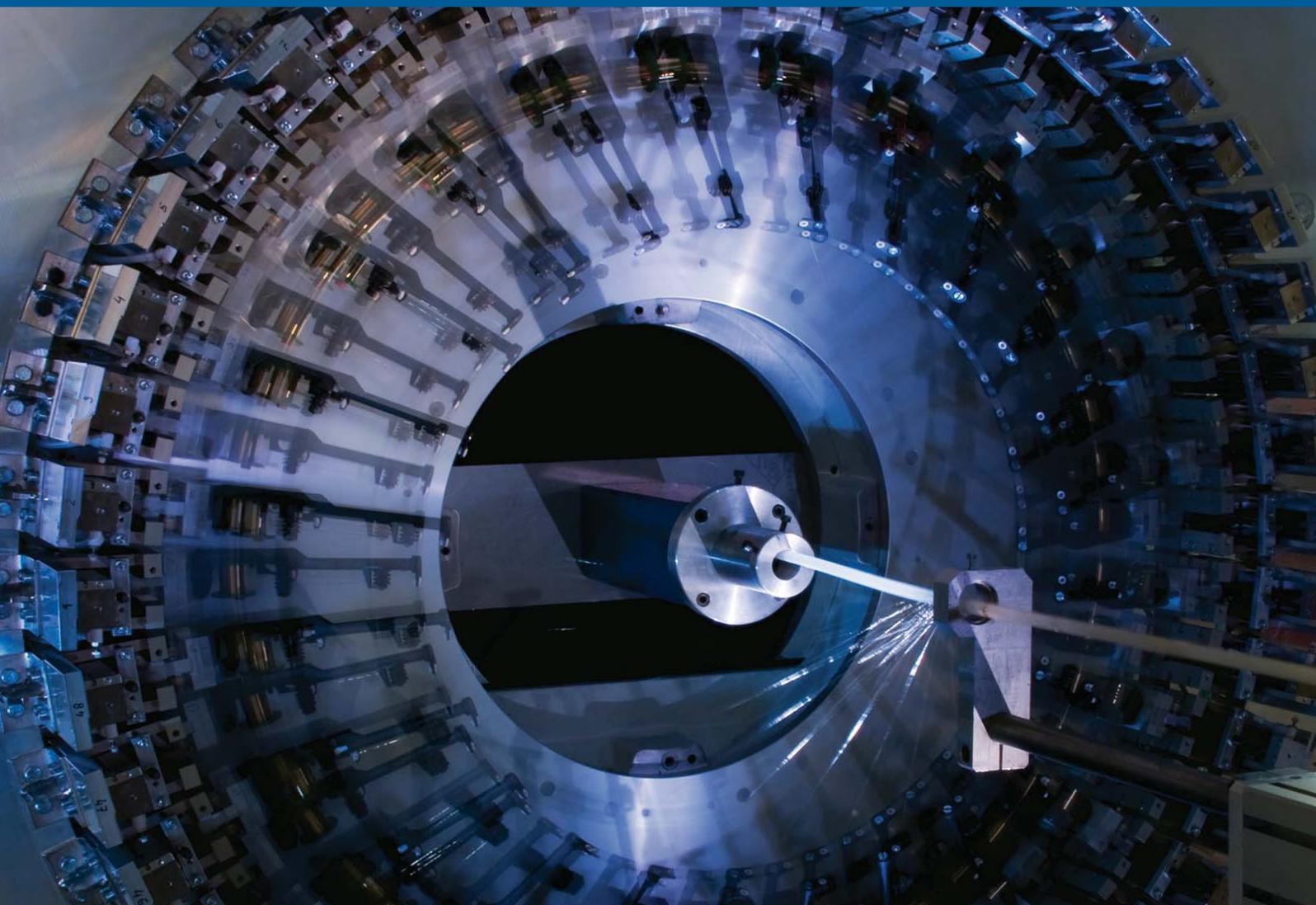


STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG

MICHAEL ABEL

Automatisierte Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen mit serviceorientierten Paradigmen



Universität Stuttgart



Fraunhofer
IPA

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl

Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Michael Abel

**Automatisierte Inbetriebnahme von
rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen
mit serviceorientierten Paradigmen**

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 07 11 9 70-00, Telefax 07 11 9 70-13 99
info@ipa.fraunhofer.de, www.ipa.fraunhofer.de

STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG**Herausgeber:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl
Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart
Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW)
der Universität Stuttgart

Titelbild:© Institut für Steuerungstechnik (ISW)

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISSN: 2195-2892

ISBN (Print): 978-3-8396-1133-3

D 93

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2016

Druck: Mediendienstleistungen des Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart
Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2017

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 07 11 9 70-25 00
Telefax 07 11 9 70-25 08
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

GELEITWORT DER HERAUSGEBER

Produktionswissenschaftliche Forschungsfragen entstehen in der Regel im Anwendungszusammenhang, die Produktionsforschung ist also weitgehend erfahrungsbasiert. Der wissenschaftliche Anspruch der „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ liegt unter anderem darin, Dissertation für Dissertation ein übergreifendes ganzheitliches Theoriegebäude der Produktion zu erstellen.

Die Herausgeber dieser Dissertations-Reihe leiten gemeinsam das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA und jeweils ein Institut der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik an der Universität Stuttgart.

Die von ihnen betreuten Dissertationen sind der marktorientierten Nachhaltigkeit verpflichtet, ihr Ansatz ist systemisch und interdisziplinär. Die Autoren bearbeiten anspruchsvolle Forschungsfragen im Spannungsfeld zwischen theoretischen Grundlagen und industrieller Anwendung.

Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ ersetzt die Reihen „IPA-IAO Forschung und Praxis“ (Hrsg. H.J. Warnecke / H.-J. Bullinger / E. Westkämper / D. Spath) bzw. ISW Forschung und Praxis (Hrsg. G. Stute / G. Pritschow / A. Verl). In den vergangenen Jahrzehnten sind darin über 800 Dissertationen erschienen.

Der Strukturwandel in den Industrien unseres Landes muss auch in der Forschung in einen globalen Zusammenhang gestellt werden. Der reine Fokus auf Erkenntnisgewinn ist zu eindimensional. Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ zielen also darauf ab, mittelfristig Lösungen für den Markt anzubieten. Daher konzentrieren sich die Stuttgarter produktionstechnischen Institute auf das Thema ganzheitliche Produktion in den Kernindustrien Deutschlands. Die leitende Forschungsfrage der Arbeiten ist: Wie können wir nachhaltig mit einem hohen Wertschöpfungsanteil in Deutschland für einen globalen Markt produzieren?

Wir wünschen den Autoren, dass ihre „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ in der breiten Fachwelt als substanziell wahrgenommen werden und so die Produktionsforschung weltweit voranbringen.

Alexander Verl

Thomas Bauernhansl

Engelbert Westkämper

Automatisierte Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen mit serviceorientierten Paradigmen

Von der Graduate School of Excellence
advanced Manufacturing Engineering

der Universität Stuttgart

zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)

genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Michael Abel

aus Stuttgart

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. Peter Klemm

Mitberichter:

Prof. Dr. Dr. h. c. Frank Leymann

Tag der mündlichen Prüfung:

14.06.2016

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen
und Fertigungseinrichtungen (ISW)

der Universität Stuttgart

2016

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Stipendiat an der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME) der Universität Stuttgart sowie im Rahmen meiner nachfolgenden Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) der Universität Stuttgart.

Mein herzlicher Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Peter Klemm für die fachlichen Diskussionen und die Betreuung meiner Arbeit. Ebenfalls möchte ich Prof. Dr. Dr. h. c. Frank Leymann für die Übernahme des Zweitberichtes herzlich danken.

Weiterer Dank gilt Dr.-Ing. Armin Lechler für die initiale Richtungsweisung und die vielen fachlichen Gespräche. Weiterhin gebührt Dr.-Ing. Akos Csiszar Dank für die kritische Durchsicht meiner Arbeit und die vielen hilfreichen Anmerkungen. Ebenfalls gebührt den wissenschaftlichen Mitarbeitern des ISW Anerkennung, da ohne diese sicherlich keine geeignete wissenschaftliche Arbeitsatmosphäre aufgekommen wäre. Dasselbe gilt für meine Mit-Stipendiaten bei der GSaME sowie für die Studierenden, die mich während meiner Arbeit unterstützt haben.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern Renate und Jürgen für die unentwegte Unterstützung von Kindesbeinen an und für die Freiheiten, die ich seit dieser Zeit genießen durfte.

Meiner Frau Astrid danke ich für die Geduld bei der Planung von Abenden, Wochenenden und Urlaubstagen, die leider oftmals für Forschungstätigkeiten geopfert wurden sowie für die sehr kritische Durchsicht meiner Arbeit.

Des Weiteren möchte ich der GSaME für die Organisation der Rahmenveranstaltungen innerhalb meines Promotionsprogrammes danken sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung der GSaME.

Ein weiterer Dank gilt den Herren H.-P. Bock und A. Selig für die fachlichen Vorarbeiten und die freundliche Bereitstellung von sercos-Anbindungen sowie den Unternehmen Cannon Automata und Bosch Rexroth für das Sponsoring von sercos-Hardware und Software.

Kurzzinhalt

Rekonfigurierbare Maschinen sind ein Mittel, um die Wandlungsfähigkeit eines Unternehmens auf technischem Niveau umzusetzen. Die (Re)Konfiguration der Maschinen erfolgt dabei durch die Kombination von mechatronischen Modulen, welche die Funktionalität der Maschine bereitstellen. Nach einer Rekonfiguration müssen die Maschinen erneut zeit- und aufwendig in Betrieb genommen werden. Diese Arbeit stellt daher ein Konzept zur automatisierten Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen vor, um diese Stillstandszeiten zu minimieren.

Zu Beginn werden eine Analyse und eine Systematisierung von Tätigkeiten bei der Inbetriebnahme vorgenommen. Auf dieser Basis wird ein Informationsmodell der Inbetriebnahme abgeleitet. Danach wird ein Konzept zur automatisierten Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen auf Basis einer maschineninternen serviceorientierten Architektur entwickelt. Im Anschluss wird eine für die automatisierte Inbetriebnahme geeignete Systemarchitektur abgeleitet. Den Kern dieser Architektur stellen innerhalb der mechatronischen Module der Maschine verteilte Dienste in Kombination mit einem Inbetriebnahmekoordinatorssystem dar. Letzteres ist nach serviceorientierten Prinzipien entworfen und nutzt eine Orchestration-Engine zur Ausführung von Inbetriebnahmetätigkeiten. Abschließend wird eine Forschungsplattform mit dem Ziel der Evaluierung von Inbetriebnahmestrategien für rekonfigurierbare Bearbeitungsmaschinen vorgestellt. Die Forschungsplattform dient einerseits der praxisnahen Erprobung des entwickelten Inbetriebnahmekonzepts und andererseits der Evaluierung von Aufbaukonzepten und den daraus resultierenden Inbetriebnahmestrategien.

Das in dieser Arbeit entworfene Inbetriebnahmekonzept für rekonfigurierbare Maschinen stellt einen weiteren Schritt in Richtung einer Praxis-Einführung dieses Maschinentyps dar, da dieser Maschinentyp erst dadurch zu einem wirtschaftlichen Einsatz in der Praxis befähigt wird.

Short summary

Reconfigurable production machines are one option to realize changeable production systems on a technical level. The (re)configuration of such machines is performed by combining mechatronic modules, that provide the functionality of the overall machine. Unfortunately, during a reconfiguration the effort-intensive commissioning phase has to be repeated. The purpose of this thesis is to introduce a concept for the automated commissioning of reconfigurable production machines in order to reduce the cost-intensive downtime during reconfigurations.

First of all, an analysis and systematization of necessary tasks during commissioning is performed. On this basis, an information model of the commissioning procedure is derived. In the next step, a concept for the automated commissioning of reconfigurable production machines that is based on a machine-internal service-oriented architecture is created. Afterwards, a system architecture for automated commissioning is deduced. The core of this architecture is formed by a central coordination system for the commissioning process, as well as supporting services, which are located in the machine modules. The latter is designed according to the principles of service-oriented architectures and utilizes an orchestration engine to execute commissioning tasks.

Finally, a research platform is introduced, which can be used to evaluate differing commissioning strategies for reconfigurable production machines. On the one hand, this research platform serves as evaluation platform to evaluate the derived commissioning concept. On the other hand, it serves as an evaluation platform for machine design concepts and the resulting commissioning strategies.

The developed commissioning concept represents a further step towards the introduction of reconfigurable machines into practice. Therefore, automated commissioning forms an enabler technology for a profitable application of this machine type in production environments.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Abbildungsverzeichnis | xii |
| Tabellenverzeichnis | xv |
| 1 Abkürzungen und Symbole | 1 |
| 2 Einleitung und Problemstellung | 4 |
| 3 Grundlagen und Begriffsdefinitionen | 6 |
| 3.1 Begriffsdefinitionen | 6 |
| 3.2 Informations- und Kommunikationstechnik | 7 |
| 3.2.1 Extensible Markup Language | 7 |
| 3.2.2 Objektorientierte Modellierung | 8 |
| 3.2.3 Echtzeitbetriebssysteme | 8 |
| 3.2.4 Referenzmodell für Kommunikationssysteme | 9 |
| 3.2.5 Serial Real Time Communication System | 10 |
| 3.2.6 Web-Services | 11 |
| 3.2.7 Devices Profile for Web-Services | 12 |
| 3.3 Agentensysteme und holonische Systeme | 13 |
| 3.4 Serviceorientierung und serviceorientierte Architektur | 13 |
| 3.4.1 Entwurfsprinzipien der Serviceorientierung | 14 |
| 3.4.2 Serviceorientierte Analyse | 15 |
| 3.4.3 Serviceorientierter Entwurf | 16 |
| 3.4.4 Geschäftsprozesse und Orchestrierung | 16 |
| 3.5 Rekonfigurierbare Bearbeitungsmaschinen | 17 |
| 3.5.1 Einordnung in den Kontext der wandlungsfähigen Produktion | 18 |
| 3.5.2 Komponenten von Bearbeitungsmaschinen | 20 |
| 3.5.3 Eigenschaften von rekonfigurierbaren Maschinen | 21 |
| 3.5.4 Steuerungssysteme für rekonfigurierbare Maschinen | 23 |
| 3.5.5 Module für rekonfigurierbare Maschinen | 24 |
| 3.6 Inbetriebnahme von traditionell aufgebauten Maschinen | 31 |
| 4 Anforderungen an die automatisierte Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen | 35 |
| 4.1 Allgemeine Anforderungen | 35 |
| 4.2 Anforderungen an den zeitlichen Rahmen einer Rekonfiguration | 36 |
| 4.3 Funktionale Anforderungen an die Inbetriebnahmeautomatisierung | 37 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5 | Stand der Technik und der Forschung | 39 |
| 5.1 | Adaptionsverfahren für konfigurierbare und rekonfigurierbare Maschinen . . . | 39 |
| 5.2 | Verteilte Systeme im Umfeld wandlungsfähiger Produktion | 41 |
| 5.3 | Inbetriebnahmeunterstützung und automatisierte Inbetriebnahme | 43 |
| 5.4 | Bewertung der bisher bestehenden Konzepte | 46 |
| 6 | Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit | 48 |
| 6.1 | Ableitung der Zielsetzung | 48 |
| 6.2 | Vorgehensweise zur Erreichung der Zielsetzung | 50 |
| 7 | Erstellung eines Informationsmodells der Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen | 52 |
| 7.1 | Tätigkeiten bei der Inbetriebnahme einer Bearbeitungsmaschine | 52 |
| 7.2 | Wirkungsweise von Inbetriebnahmetätigkeiten | 55 |
| 7.3 | Analyse der Vorgehensweise des Inbetriebnehmers bei der Inbetriebnahme . . | 56 |
| 7.4 | Systematisierung und Verallgemeinerung des Inbetriebnahmevorgangs | 62 |
| 7.5 | Strukturierung und Modellierung der Inbetriebnahme | 64 |
| 7.6 | Auswirkungen einer Inbetriebnahmesystematik auf den Entwurfsprozess von rekonfigurierbaren Maschinen | 66 |
| 8 | Entwicklung einer Methode zur automatisierten Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen | 71 |
| 8.1 | Generierung von Inbetriebnahmeabläufen | 71 |
| 8.1.1 | Wechselwirkungen mit dem wandlungsfähigen Umfeld | 73 |
| 8.1.2 | Generierung von Vorgängen | 75 |
| 8.2 | Sichtweise aus der Informationstechnik | 75 |
| 8.3 | Konzept zur Verteilung des Inbetriebnahmevorgehens auf Dienste | 78 |
| 8.3.1 | Modellierung eines systemweiten Geschäftsprozesses für die Inbetriebnahme | 79 |
| 8.3.2 | Erstellung einer konzeptionellen Blaupause des Dienstinventars | 80 |
| 8.4 | Lösungslogik für eine verteilte Vorgehensweise der Inbetriebnahme | 83 |
| 8.5 | Erweiterung und Modellierung der inneren Abläufe | 85 |
| 8.6 | Zentrale Ablaufsteuerung und sukzessive Generierung | 88 |
| 9 | Systemarchitektur für die automatisierte Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen | 90 |
| 9.1 | Entwurf einer maschinenweiten Systemarchitektur | 90 |
| 9.2 | Entwurf der internen Kommunikationssysteme | 92 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 9.3 | Erweiterung des Architekturkonzepts mechatronischer Module | 95 |
| 9.3.1 | Bestimmung der internen Informationstechnik von mechatronischen Modulen | 95 |
| 9.3.2 | Beschreibung (und Nutzung) von Modulfunktionalität | 99 |
| 9.3.3 | Modulinterne Dienste für die Inbetriebnahmeunterstützung | 101 |
| 9.4 | Feinentwurf des Inbetriebnahmekoordinatorsystems | 102 |
| 9.4.1 | Dienste im Inbetriebnahmekoordinatorsystem | 105 |
| 9.4.2 | Orchestration-Engine und graphische Bedienoberfläche | 106 |
| 9.4.3 | Mediation und Maschinenmodell | 107 |
| 9.4.4 | Generierung und Ausführung der Geschäftsprozesse | 109 |
| 10 | Entwurf und Realisierung einer Forschungsplattform für die Evaluierung der automatisierten Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen | 111 |
| 10.1 | Motivation und Konzept einer Forschungsplattform | 111 |
| 10.2 | Entwurf der Architektur der Forschungsplattform | 114 |
| 10.2.1 | Realisierung der Dienste | 116 |
| 10.2.2 | Realisierung des Inbetriebnahmekoordinatorsystems in der Forschungs- plattform | 118 |
| 10.2.3 | Realisierung der mechatronischen Module in der Forschungsplattform | 122 |
| 10.3 | Exemplarische Vorgänge und Anwendungsfälle | 126 |
| 10.3.1 | Bereitstellung der Basiskommunikation | 126 |
| 10.3.2 | Adaption der Feldbusschnittstelle | 128 |
| 10.3.3 | Anwendungsfall Kalibrierlauf eines Moduls mit Achsverbund | 129 |
| 10.4 | Bewertung von Entwurf und Realisierung der Forschungsplattform | 131 |
| 11 | Zusammenfassung und Ausblick | 132 |
| 11.1 | Zusammenfassung | 132 |
| 11.2 | Ausblick | 133 |
| | Literaturverzeichnis | 135 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|--|----|
| 3.1 | Relevante Notationen in der Unified Modelling Language (UML) | 8 |
| 3.2 | ISO/OSI-Modell (nach (ISO 1994); Darstellung: (Wikipedia e.V. 2015)) | 9 |
| 3.3 | sercos Telegrammstruktur mit Unified Communication Channel | 10 |
| 3.4 | Eigenschaften eines sercos-Parameters (nach (Sercos International 2012a)) | 11 |
| 3.5 | Web-Services-Architektur (nach (Finger und Zeppenfeld 2009)) | 12 |
| 3.6 | Übersicht von Konzepten und Prinzipien der Serviceorientierung | 15 |
| 3.7 | Serviceorientierte Analyse und serviceorientierter Entwurf (nach (Erl 2008)) | 16 |
| 3.8 | Übersicht: Erzeugung und Ausführung von BPEL (nach (Bohn 2009)) | 17 |
| 3.9 | Wirkschema von Veränderungen (nach: (Hernández 2002)) | 19 |
| 3.10 | Aufbau und Schnittstellen einer Werkzeugmaschine (nach: (Westkämper 2006)) | 20 |
| 3.11 | Anforderungen an rekonfigurierbare Maschinen (nach: (Abele und Wörn 2004)) | 23 |
| 3.12 | Strukturmodell der MOSYN-Referenzarchitektur (nach: (Kircher 2011)) | 24 |
| 3.13 | Modulhierarchie einer (rekonfigurierbaren) Mehrtechnologie-Werkzeugmaschine (nach: (Wörn 2009)) | 25 |
| 3.14 | Mögliche Ausprägung eines mechatronischen Moduls (Quelle: (Kircher und Wurst 2006), Bildquelle: ISW, Universität Stuttgart) | 26 |
| 3.15 | Baukasten für wandelbare Bearbeitungssysteme (Quelle: (Westkämper 2006)) | 27 |
| 3.16 | Mögliche Kombinationen von Maschinen aus dem Baukasten (Quelle: IFW, Universität Stuttgart) | 27 |
| 3.17 | Informationsmodell für baukastenbasierte Fertigungseinrichtungen (nach: (Le- wek 2005)) | 29 |
| 3.18 | Mechatronisches Gesamtmodell (nach: (Westkämper 2006)) | 30 |
| 3.19 | Verknüpfung von Maschinen mit einem Steuerungsmodell (nach: (Lutz 1999)) | 30 |
| 3.20 | Zeitlicher Verlauf des Lebenszyklus einer Maschine (Phasenmodell) (nach (Ko- ren 2006)) | 31 |
| 3.21 | Aufgabenstellung und Zielstellungen der Inbetriebnahme (angelehnt an (Weber 2006)) | 33 |
| 3.22 | Einflussfaktoren auf die Inbetriebnahme verfahrenstechnischer Anlagen (nach (Weber 2006)) | 33 |
| 3.23 | Virtuelle Inbetriebnahme des Steuerungssystems | 34 |
| 6.1 | Illustration der Zielstellung | 49 |
| 7.1 | Zusammenhang der Tätigkeiten bei der Inbetriebnahme | 53 |
| 7.2 | Aufgaben bei der Inbetriebnahme einer Bearbeitungsmaschine | 54 |
| 7.3 | Zusammenhang zwischen Aufgaben und Tätigkeiten | 54 |
| 7.4 | Muster zur Lösung von Aufgaben | 55 |

| | | |
|------|--|----|
| 7.5 | Kopplung von Tätigkeiten bei der Inbetriebnahme (in Anlehnung an (VDI 2013)) | 55 |
| 7.6 | Beispielhafte Wirkungskette zwischen Mechanik und Software | 56 |
| 7.7 | Identifizierte Merkmale von Inbetriebnahmetätigkeiten M1 bis M4 | 58 |
| 7.8 | Identifizierte Merkmale von Inbetriebnahmetätigkeiten M5 bis M8 | 58 |
| 7.9 | Identifizierte Merkmale von Inbetriebnahmetätigkeiten M9 bis M12 | 59 |
| 7.10 | Identifizierte Merkmale von Inbetriebnahmetätigkeiten M13 bis M16 | 60 |
| 7.11 | Identifizierte Merkmale von Inbetriebnahmetätigkeiten M17 bis M19 | 62 |
| 7.12 | Zusammensetzung eines Inbetriebnahmeverfahrens | 64 |
| 7.13 | Eigenschaften von Inbetriebnahmeschritten und deren Abhängigkeiten | 65 |
| 7.14 | Transformation eines Inbetriebnahmемодells in ein ausführbares Prozessmodell | 66 |
| 7.15 | Zeitlicher Verlauf der Lebenszeit einer Maschine im Vergleich zu einer rekonfigurierbaren Maschine | 67 |
| 7.16 | Entwurfsprozess zur Findung einer Maschinenstruktur | 68 |
| 7.17 | Bedeutung des Maschinenkonzeptes in Bezug zur Erstellung eines Inbetriebnahmekonzeptes | 69 |
| 8.1 | Vergleich zwischen manueller und automatisierter Inbetriebnahme | 71 |
| 8.2 | Rekonfigurierbare Maschine aus mechatronischen Modulen | 72 |
| 8.3 | Ablauf bei der Inbetriebnahme einer modularen Maschine | 73 |
| 8.4 | Die rekonfigurierbare Maschine im Kontext der wandlungsfähigen Fabrik | 74 |
| 8.5 | Wiederkehrende Muster bei der Inbetriebnahme | 75 |
| 8.6 | Einsatzbereich des serviceorientierten Computings bei der Inbetriebnahme | 78 |
| 8.7 | Systemweiter Geschäftsprozess | 80 |
| 8.8 | Modelle für Inbetriebnahmedienste | 81 |
| 8.9 | Modelle von Inbetriebnahmediendiensten | 81 |
| 8.10 | Konzeptionelle Blaupause des Serviceinventars | 82 |
| 8.11 | Erweitertes Modell eines mechatronischen Moduls (nach (Abel 2011)) | 84 |
| 8.12 | Komposition des Geschäftsprozesses für die Inbetriebnahme | 85 |
| 8.13 | Übersicht zum Ablauf des systemweiten Inbetriebnahmegeschäftsprozesses | 87 |
| 8.14 | Zentrale Ablaufsteuerung und Generierung des Vorgehens für die Parametrierungsphase | 89 |
| 9.1 | Übersicht: Systemarchitektur mit Service-Bus und Inbetriebnahmekoordinator-system | 92 |
| 9.2 | Initialisierung der Kommunikation in der Forschungsplattform | 94 |
| 9.3 | Parametrierung von Echtzeitdatenverbindungen zwischen mechatronischen Modulen | 94 |
| 9.4 | Steuerungstechnische Hierarchie am Beispiel eines Servo-Antriebes | 96 |
| 9.5 | Architekturvarianten von mechatronischen Modulen (nach (Abel 2011)) | 97 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 9.6 | Erweitertes Architekturkonzept für mechatronische Module | 98 |
| 9.7 | Strukturmodell eines mechatronischen Moduls | 100 |
| 9.8 | Übersicht: Dienstinventar für mechatronische Module | 101 |
| 9.9 | Diensthierarchie aus Sicht des Service-Bus | 102 |
| 9.10 | Übersicht: Architektur des Inbetriebnahmekoordinatorsystems | 103 |
| 9.11 | Daten- und Informationsfluss im Inbetriebnahmekoordinatorsystem | 104 |
| 9.12 | Übersicht: Dienstinventar für das IKS | 105 |
| 9.13 | Graphisches Bediensystem für die Inbetriebnahme | 106 |
| 9.14 | Virtuelles Maschinenmodell in der Datenbank | 107 |
| 9.15 | Beispielhafte Ableitung des Inbetriebnahmemodels | 108 |
| 9.16 | Generierung von Geschäftsprozessen | 109 |
| 9.17 | Beispielhafte Ausführung der Parametrierungsphase | 110 |
| 10.1 | Iterative Ableitung eines Konzeptes für rekonfigurierbare Bearbeitungsmaschinen | 112 |
| 10.2 | Vorgehen für die Generierung eines Maschinenkonzeptes | 113 |
| 10.3 | Forschungsplattform mit unterstützenden Simulationsmodellen (nach (Abel und Klemm 2013a)) | 113 |
| 10.4 | Übersicht der Forschungsplattform | 115 |
| 10.5 | Architektur eines SOAP-Dienstes und eines DPWS-Dienstes in der Forschungs- plattform | 117 |
| 10.6 | Übersicht: Struktur des Inbetriebnahmekoordinatorsystems in der Forschungs- plattform | 119 |
| 10.7 | Graphisches Bediensystem des IKS und BPEL-Designer | 120 |
| 10.8 | Übersicht der vereinfachten Dienstkommunikation in der Forschungsplattform . | 121 |
| 10.9 | Mechatronisches Modul in der Forschungsplattform als Feldbus-Master | 123 |
| 10.10 | Mechatronisches Modul in der Forschungsplattform als Feldbus-Slave ((Abel und Klemm 2013b)) | 123 |
| 10.11 | Anbindung an den virtuellen Netzwerkadapter in den Slave-Modulen | 124 |
| 10.12 | Echtzeitdatenverbindungen zwischen Master-Modul und Slave-Modulen | 125 |
| 10.13 | Anwendungsfall mit drei mechatronischen Modulen | 126 |
| 10.14 | Gemittelte ICMP Antwortzeiten zwischen den Modulen A, B und C in CP NRT, CP 2 und CP 4 | 127 |
| 10.15 | Übertragungszeit einer SDDML-Beschreibung zwischen den Modulen (Quelle: (Abel und Klemm 2013b)) | 127 |
| 10.16 | Transparente Adaption der Feldbusschnittstelle von einem externen Dienst . . | 128 |
| 10.17 | Kalibrierlauf für eine separate Achse | 130 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Vergleich von Ausführungen von Werkzeugmaschinen (nach (Koren, Heisel et al. 1999) und (Wörn 2009)) | 22 |
| 5.1 | Bewertung bestehender Adaptionenverfahren | 41 |
| 5.2 | Bewertung verteilter Systeme im Umfeld wandlungsfähiger Produktion | 43 |
| 5.3 | Bewertung bestehender Unterstützungen für die Inbetriebnahme | 46 |
| 6.1 | Vorgehensweise zur Erreichung der Zielstellung | 51 |
| 8.1 | Paradigmen für den Entwurf von verteilten Systemen mit Ablaufsteuerung | 77 |

Kapitel 1

Abkürzungen und Symbole

| | |
|---------------------|---|
| AD | A dapter d ienst |
| AutomationML | A utomation M arkup L anguage |
| APD | A pplikations d ienst |
| API | A pplication P rogramming I nterface |
| AT | A cknowledge T elegramm |
| BAZ | B earbeitungs z entrum |
| BPEL | B usiness P rocess E xecution L anguage |
| CAD | C omputer A ided M anufacturing |
| CP | C ommunication P hase |
| DB | D aten b ank |
| DFG | D eutsche F orschungsbund G emeinschaft |
| DPWS | D evice P rofile for W eb- S ervices |
| EU | E uropäische U nion |
| EUPASS | E volvablen U ltra- P recision A ssembly S ystems |
| FFS | F lexibles F ertigungsbundsystem |
| FPGA | F ield P rogrammable G ate A rray |
| GD | G eneratordienst |
| GUI | G raphical U ser I nterface |
| HiLS | H ardware in the L oop S imulation |
| HMI | H uman M achine I nterface |
| HIPARMS | H ighly P roductive and R econfigurable M anufacturing S ystem |
| HTTP | H ypertext T ransfer P rotokoll |
| IBN | I nbetriebs n ahme |
| ICMP | I nternet C ontrol M essage P rotocol |
| IKS | I nbetriebsnahme k oordinator s ystem |
| IP | I nternet P rotokoll |
| IDEAS | I ntantly D eployable E volvablen A ssembly S ystems |
| ISO | I nternational O rganization for S tandardization |
| LoeWe | L ebenszyklus-orientierte W erkzeug m aschine |
| MAREA | M achning W orkstation R eference A rchitecture |
| MC | M otion C ontrol |
| MDT | M aster D aten T elegramm |
| METEOR | M ehr t echnologie O rientierte R e k onfigurierbare W erkzeug m aschine |
| MOSYN | M odular S ynthesis of advanced machine tools |

| | |
|------------------|--|
| MoSt | Modulsteuerungssystem |
| MM | Mechatronisches Modul |
| MOF | Meta Object Facility |
| NC | Numeric Control |
| NRT | Non Real-Time |
| ODE | Orchestration Director Engine |
| OMAC | Organization for Machine Automation and Control |
| OMG | Object Management Group |
| OASIS | Organization for the Advancement of Structured Information Standards |
| OSACA | Open System Architecture for Controls within Automation Systems |
| OSADL | Open Source Automation Development Lab |
| OSI-Model | Open Systems Interconnection Reference Model |
| OO | Objektorientiert |
| PC | Personal Computer |
| PCI | Peripheral Component Interconnect |
| PVD | Phasenverwaltungsdienst |
| RC | Robot Control |
| RMS | Reconfigurable Manufacturing System Alternativ: Reconfigurable Machining System |
| RMM | Rekonfigurierbare Mehrtechnologie Maschinen |
| RT | Real-Time |
| SDDML | Sercos Device Description Markup Language |
| SFB | Sonderforschungsbereich |
| SHM | Shared Memory |
| SIRENA | Service Infrastructure for Real-time Embedded Networked Applications |
| SOA | Service orientierte Architektur |
| SOAP | Ehem. Simple Object Access Protocol (Eigenname seit SOAP 1.2) |
| SoC | Serviceorientiertes Computing |
| SOCRADES | Service-oriented cross-layer infrastructure for distributed smart embedded devices |
| SODA | Service-Oriented Device & Delivery Architectures |
| sercos | Serial Real-Time Communication System |
| SPS | Speicherprogrammierbare Steuerung |
| SSLV | Sercos Slave Driver |

| | |
|-------------|--|
| TAP | Tap - Netzwerk A bzweigung (engl.) |
| TCP | T ransport C ontrol P rotocol |
| TFB | T ransfer b ereich |
| UC | U nified C ommunication |
| UCC | U nified C ommunication C hannel |
| UDDI | U niversal D escription, D iscovery and I ntegration |
| UPnP | U niversal P lug a nd P lay |
| URI | U niform R esource I dentifier |
| VIBN | V irtuelle I nbetrieb n ahme |
| W3C | W orld W ide W eb C onsortium |
| WS-* | Menge von Web-Service Spezifikationen |
| XML | E xtensible M arkup L anguage |

Kapitel 2

Einleitung und Problemstellung

Produzierende Unternehmen finden sich heutzutage in einer komplexen und dynamischen Umgebung wieder. Trends wie die Globalisierung, neue Technologien, ein verändertes Konsumverhalten sowie eine rapide Zunahme der Innovationsgeschwindigkeit führen zu neuen Herausforderungen. Zu diesen gehören kürzere Produktlebenszyklen, schwankende Nachfrage und eine instabile Wettbewerbssituation. Insgesamt führt dies zu einer Turbulenz am Markt (Jovane, Westkämper et al. 2009). In dieser turbulenten und somit dynamischen Umgebung gewinnt das Konzept der Wandlungsfähigkeit zunehmend an Bedeutung (Westkämper und Zahn 2009). Damit wird die Fähigkeit eines Unternehmens bezeichnet, sich durch Wandlung an neue Situationen anzupassen.

Die Untersuchung der verschiedenen Aspekte der Wandlungsfähigkeit hat an der Universität Stuttgart bereits Tradition. Im Sonderforschungsbereich 467 (Westkämper 2006) sowie im Transferbereich 59 (Westkämper 2008) wurden die Ansätze institutsübergreifend untersucht. Darüber hinaus ist das Konzept der Wandlungsfähigkeit einer der zentralen Ansätze der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME) (GSaME 2015).

Um am Markt zu bestehen, muss ein Unternehmen aus verschiedenen Gesichtspunkten wandlungsfähig sein. Diese Aspekte sind organisatorische, räumliche und technische Wandlungsfähigkeit (Hernández 2002). Unter dem Begriff der technischen Wandlungsfähigkeit versteht man die Fähigkeit eines Unternehmens zur Adaption sämtlicher, technischer, an der Produktion beteiligter Systeme. Ein Hauptmerkmal der technischen Wandlungsfähigkeit ist die Reorganisation der Fertigung, indem die Produktionsmittel selbst verändert werden. Rekonfigurierbare Produktionssysteme sind ein Mittel, um diese Veränderungen praxisnah umzusetzen, da bei diesen Produktionssystemen die Option auf Veränderungen bereits bei der Erstellung vorgesehen wurde. Dies kann beispielsweise geschehen, indem Maschinen und Materialflusssysteme getauscht oder in ihrer Position verändert werden (Daščenko 2006), (Mehrabi, Ulsoy et al. 2002), (Drabow und Woelk 2004).

Ein Ansatz, der, im Vergleich zu rekonfigurierbaren Produktionssystemen, technologisch tiefgreifender ansetzt, verfolgt die Wandlung der in der Produktion eingesetzten Maschinen. Dabei entstehen Maschinen, die, entgegen traditionell entworfenen Maschinen, modular gestaltet sind und bei Bedarf an neue Produktionsanforderungen angepasst werden können. Diesen Typus von modularen Maschinen bezeichnet man als rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen oder rekonfigurierbare Bearbeitungsmaschinen, da die Konfiguration der Maschinen

bei Bedarf verändert werden kann (Heisel und Michaelis 1998), (Wurst, Heisel et al. 2006), (Lorenzer 2010), (Thoben und Fritz 2003).

Die Inbetriebnahme von Maschinen wird heutzutage noch manuell von einem oder mehreren Spezialisten vorgenommen. Die dazu notwendigen Tätigkeiten sind komplex und beruhen zum großen Teil auf Expertenwissen. Im Hinblick auf Maschinen, die während ihrer Lebenszeit mehrfach umgebaut und damit auch mehrfach in Betrieb genommen werden müssen, ist dieses Vorgehen nicht planbar und daher aus wirtschaftlicher Sicht nicht tragbar. Gründe hierfür sind unter anderem, dass die für eine Inbetriebnahme notwendigen Tätigkeiten bisher nicht in strukturierter und formalisierter Weise vorliegen. Um eine rasche Rekonfiguration von Maschinen zu ermöglichen, ist es von entscheidender Bedeutung, die Maschinen schnellstmöglich wieder in einen für die Produktion geeigneten Zustand zu versetzen. Daher liegt es nahe, eine Unterstützung für die Inbetriebnahme einzusetzen oder die Inbetriebnahme selbst zu automatisieren. Dies gewinnt nicht zuletzt durch den vermehrten Einsatz von informationstechnologischen Systemen innerhalb der Maschinen an Bedeutung, da durch die zusätzliche Funktionalität die Komplexität erhöht wird. Weiterhin kommen, bedingt durch die modulare Maschinenstruktur, allgemeingültigere Konzepte zum Tragen. Ebenso wie die modulare Gestaltung einer Maschine muss die Inbetriebnahme schon bei der Konzepterstellung des Maschinensystems berücksichtigt werden. Der dadurch entstehende, höhere Entwicklungsaufwand zahlt sich jedoch durch eine drastisch erhöhte Flexibilität und Wandlungsbereitschaft aus.

In welcher Weise eine automatisierte Inbetriebnahme für Bearbeitungsmaschinen umgesetzt werden kann und welche Details bei Konzepterstellung und Entwurf berücksichtigt werden müssen, ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Induziert durch den schnell wachsenden Anteil an informationsverarbeitenden Systemen, vergrößert sich die zur Aktivierung der Funktion notwendige Komplexität drastisch. Die Informations- und Kommunikationstechnik innerhalb der Maschine verdient dabei besondere Beachtung, da die Beherrschung und Inbetriebnahme dieser Systeme entscheidend für den Gesamterfolg ist.

Zentrale Bedeutung für die Automatisierung der Inbetriebnahme hat die Koordination von Inbetriebnahmeprozessen innerhalb der Maschine. Der Schlüssel zum Erfolg liegt hier in der Betrachtung der Maschine als verteiltes System und folglich in der Anwendung von Methoden aus dem Fachgebiet der verteilten Systeme. Durch eine Betrachtung der internen Vorgänge als verteilte Geschäftsprozesse können die Paradigmen der Serviceorientierung für Analyse und Entwurf des Gesamtsystems angewandt werden. Damit werden auch Möglichkeiten für eine zentral koordinierte Ausführung dieser Tätigkeiten eröffnet. Als Folge können die Inbetriebnahmezeit einer Bearbeitungsmaschine und die hierfür anfallenden Kosten drastisch reduziert werden.

Kapitel 3

Grundlagen und Begriffsdefinitionen

3.1 Begriffsdefinitionen

Die vorliegende Arbeit erstreckt sich auf Fachbereiche der Informationstechnik, der Automatisierungstechnik und des Maschinenbaus. Da einige Begriffe in diesen Fachbereichen uneinheitlich verwendet werden, werden diese im Folgenden kurz erörtert.

Parametrierung:

Parameter ist die Bezeichnung für eine physikalische Größe oder ein im Sinne einer Programmiersprache definierbares Objekt (Brockhaus 2006). Eine **Parametrierung** ist demnach eine Menge von Parametern, die in einem bestimmten Kontext zusammengefasst sind. Unter Parametrierung versteht man auch den Vorgang zur Festlegung von einem oder mehreren Parametern.

Konfiguration:

Allgemein versteht man unter einer **Konfiguration** die Zusammenstellung eines Ganzen aus mehreren Einzelteilen (Daniel 1996). Der Begriff wird allerdings je nach Fachbereich unterschiedlich verwendet: In der Informationstechnik wird darunter auch die Konfiguration eines Programms, die im engeren Sinne eher eine Parametrierung darstellt, verstanden. Dahingegen wird der Begriff im Kontext des Maschinenbaus eher seiner Definition entsprechend eingesetzt, um eine Kombination von Teilsystemen zu einem Gesamtsystem zu beschreiben.

Da in dieser Arbeit Methoden und Technologien aus beiden Fachbereichen genutzt werden, gilt im Folgenden die Definition aus dem Maschinenbau, sofern im Kontext nicht anderweitig spezifiziert.

Prozess und Prozessparameter:

Als **Bearbeitungsprozess** oder Prozess wird die nach einem festen Rahmen ablaufende Anwendung von Bearbeitungstechnologien auf ein Produkt verstanden. Als **Prozessparameter** bezeichnet man die physikalischen Parameter, die für eine Bearbeitung gewählt oder bestimmt wurden, um möglichst ideale und reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten.

Mentales Modell:

Das mentale Modell ist eine Art **Informationsmodell**, das die geistige Repräsentation von Informationen beschreibt. Mentale Modelle werden genutzt, um menschliches Wissen und Vorstellungsvermögen zu beschreiben. Da es sich dabei um eine individuelle und geis-

tige Eigenleistung eines Menschen handelt, können diese Modelle naturgemäß weder exakt formalisiert, noch beschrieben oder übertragen werden.

Verteiltes System:

Ein **verteilt System** ist „eine Ansammlung unabhängiger Computer, die den Benutzern wie ein einzelnes kohärentes System erscheinen“ (Tanenbaum und van Steen 2008). Besondere Eigenschaft verteilter Systeme ist, dass die Unterschiede der Computer und die Art der Kommunikation untereinander dem Benutzer verborgen bleiben.

Middleware:

Oft wird in verteilten Systemen eine als **Middleware** bezeichnete Softwareschicht genutzt, die von den Eigenschaften der Hardware und der Kommunikation abstrahiert und allen Applikationen eine einheitliche Schnittstelle anbietet (Tanenbaum und van Steen 2008).

Mechatronik:

Der Begriff Mechatronik ist ein Kunstwort und bezeichnet ein interdisziplinäres Fachgebiet, welches durch das Zusammenwirken von Elektronik, Mechanik und Informationstechnik entsteht (VDI 2013), (Neugebauer, Denkena et al. 2007). Mechatronische Systeme nutzen Synergieeffekte aus dem Zusammenspiel der eingesetzten Komponenten, um das Verhalten eines technischen Systems zu verbessern. Mechatronische Systeme bestehen meist aus einem mechanischen Grundsystem, welches über Sensoren und Aktoren mit einem Informationsverarbeitungssystem interagiert (VDI 2004).

3.2 Informations- und Kommunikationstechnik

Dieser Abschnitt stellt die zum Verständnis wichtigen Grundlagen aus dem Bereich der Informationstechnik und der Kommunikationstechnik vor.

3.2.1 Extensible Markup Language

Die **Extensible Markup Language** (XML) (W3C 2014) ist eine textuelle Auszeichnungssprache, die von Menschen und gleichermaßen von Rechnersystemen interpretiert und verarbeitet werden kann. **XML-Dokumente** haben eine hierarchische Struktur, an deren Knoten Datenelemente gespeichert werden können. Die Struktur eines Dokuments wird in **XML-Schema** beschrieben, welches selbst in XML verfasst ist und den Standard-XML-Namensraum darstellt. Zusätzlich können weitere Schemata als Erweiterung des Namensraums eingebunden werden.

Die Modellierung von Daten mit XML findet breite Anwendung in der Praxis. Daher existiert eine Vielzahl von Spracherweiterungen; beispielsweise für die Beschreibung von

Geschäftsprozessen (OASIS 2007) oder die Modellierung von Produktionsanlagen mit der Automation Markup Language (AutomationML 2009).

3.2.2 Objektorientierte Modellierung

Objektorientierung (OO) ermöglicht die abstrakte Modellierung eines Softwaresystems, indem kooperierende Objekte als Gestaltungsmittel eingesetzt werden (Balzert 2011). Auf diese Weise können Softwaresysteme und zugehörige Informationsmodelle modelliert werden. Objekte können Dinge aus der realen Welt oder immaterielle Konstrukte darstellen. Weiterhin können Objekte Attribute und Methoden besitzen, welche die Eigenschaften und die Funktionalität des Objekts repräsentieren. Objekte werden von Klassen instanziiert, welche die Eigenschaften eines Objekts beschreiben und somit als eine Art Schablone für die Erstellung von Objekten dienen.

Es hat sich bewährt, objektorientierte Modelle mit der Unified Modelling Language (UML) zu beschreiben (OMG 2011), (Rupp und Queins 2012). UML ist eine graphische Modellierungssprache und nutzt die Meta Object Facility (MOF) als Metamodell (OMG 2013). Abbildung 3.1 zeigt eine Übersicht mit den für diese Arbeit relevanten Notationen.

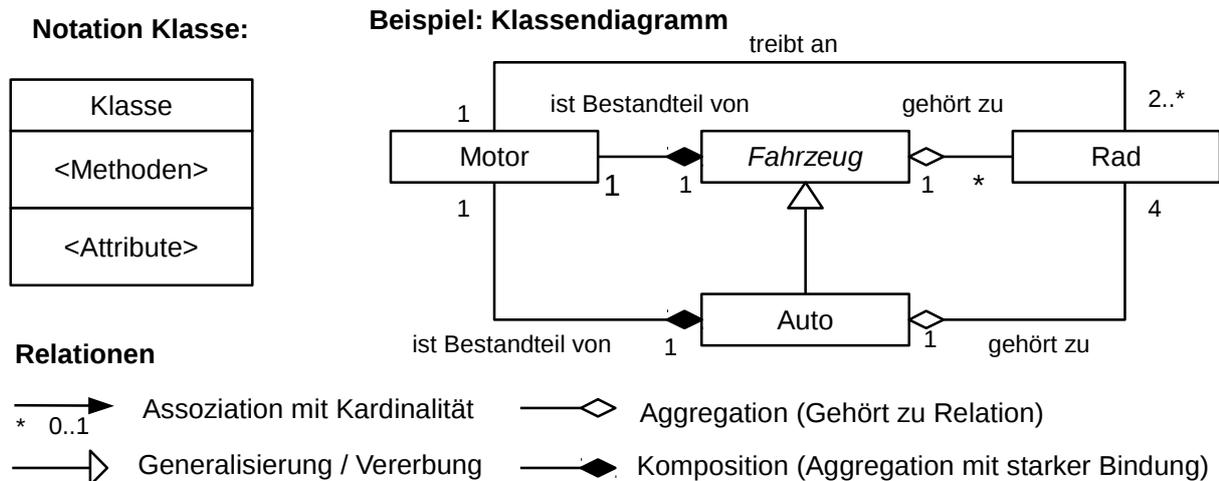


Abbildung 3.1: Relevante Notationen in der Unified Modelling Language (UML)

3.2.3 Echtzeitbetriebssysteme

Mit **Echtzeitfähigkeit** bezeichnet man die Fähigkeit eines Systems rechtzeitig auf ein Ereignis in angemessener Weise reagieren zu können (Quade und Mächtel 2012). Man bezeichnet dabei die Zeit vom Eintreten des Ereignisses bis zum Beginn der Reaktion als **Latenzzeit**. Innerhalb eines Rechnersystems ist u.a. die Interruptlatenzzeit von Bedeutung, welche die Zeit bis zur Behandlung eines Interrupts angibt.

Echtzeitbetriebssysteme garantieren ein rechtzeitiges Verhalten auch für kurze Zeitfenster. Gewöhnliche Betriebssysteme können diese Eigenschaft nicht oder nur bis zu einem bestimmten Zeitintervall erreichen. Unterhalb dieses Intervalls von ca. 100 ms wird ein Echtzeitbetriebssystem benötigt, um in einer angemessenen Zeitspanne reagieren zu können.

In der Produktionstechnik sind Echtzeiteigenschaften für eine Vielzahl von Anwendungen notwendig, da oft eine zyklische Verarbeitung von Ein- und Ausgabedaten im Millisekundenbereich und darunter stattfindet.

Das auf einer freien Lizenz beruhende Betriebssystem **Linux** kann um Echtzeiteigenschaften erweitert werden. Eine als RT_PREEMPT bezeichnete Erweiterung erlaubt Programmen mit Echtzeitpriorität das Betriebssystem bei der Verarbeitung zu unterbrechen. Dadurch wird ein echtzeitfähiges Verhalten erreicht (OSADL 2015), (Quade und Mächtel 2012).

3.2.4 Referenzmodell für Kommunikationssysteme

Als Referenzmodell für die Kommunikation in verteilten Systemen wurde das „Open Systems Interconnection Reference Model“ (OSI-Modell) von der „International Organization for Standardization (ISO)“ entworfen (Tanenbaum und van Steen 2008). Obwohl Teile des Modells in den oberen Schichten selten in der Praxis eingesetzt werden, genießt es dennoch einen hohen Stellenwert für die Beschreibung von Netzwerken. Nach unten hin werden im Modell Daten der jeweils höheren Schichten in Nachrichten eingefügt, bis die Daten über ein Transportmedium übertragen werden können. Jede der Schichten setzt dabei ein eigenes Protokoll und eigene Mechanismen zur Fehlerkorrektur ein (siehe Abbildung 3.2).

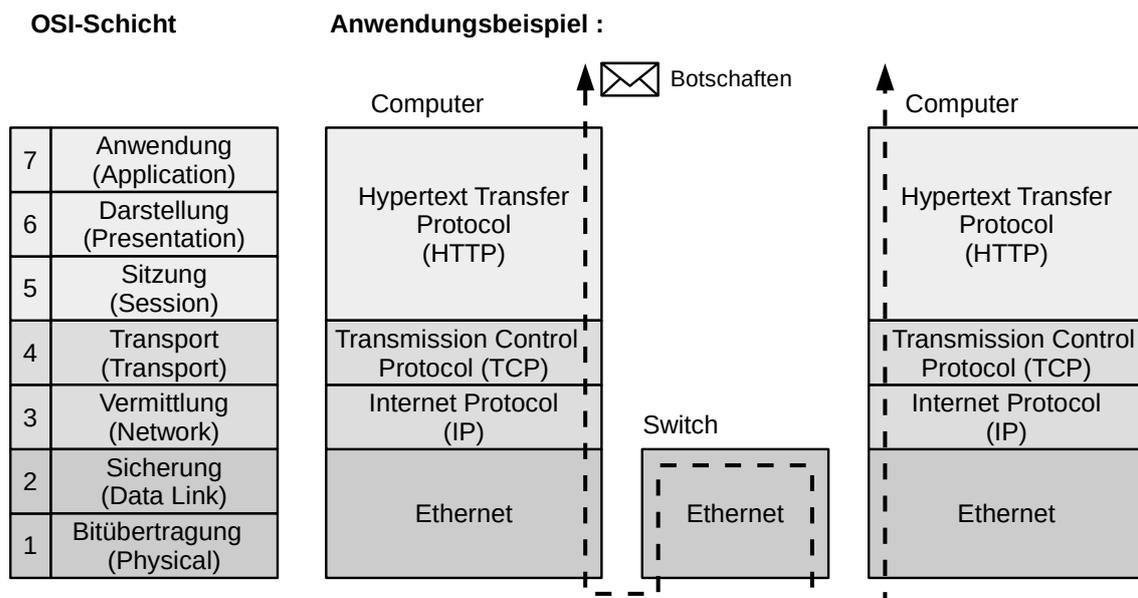


Abbildung 3.2: ISO/OSI-Modell (nach (ISO 1994); Darstellung: (Wikipedia e.V. 2015))

Gezeigt ist ein häufig in der Praxis auftretender Fall. Daten, welche über das Hypertext Transfer Protocol (HTTP) zu einem Kommunikationspartner versendet werden sollen, werden zunächst in Schicht 5 bis 7 fragmentiert und in Pakete des Transmission Control Protocol (TCP) eingefügt. TCP-Pakete werden im folgenden Schritt beim Übergang in Schicht 3 in Pakete des Internet-Protokolls (IP) eingefügt, diese werden wiederum beim Übergang in Schicht 2 in Ethernet-Pakete übersetzt. Im Anschluss werden die Ethernet-Pakete physikalisch als Folge von Spannungsimpulsen zum nächsten Empfänger übertragen.

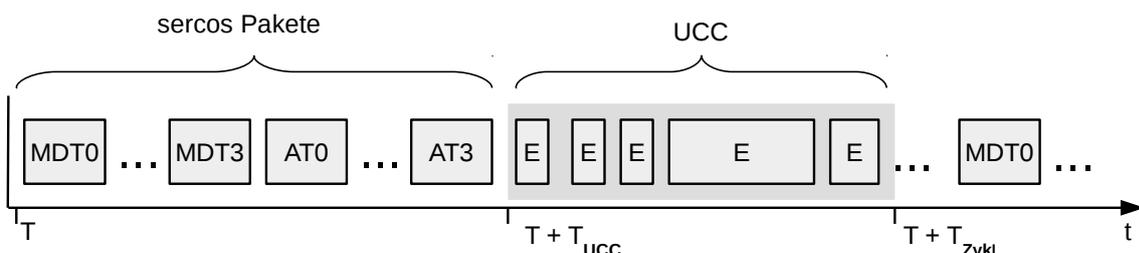
3.2.5 Serial Real Time Communication System

Das Serial Real Time Communication System (**sercos**) III wird für die Anbindung von Peripherie an industrielle Steuerungssysteme in der Automatisierungsindustrie genutzt (Sercos International 2012a). Sercos III setzt auf **Ethernet** (IEEE 2012) als physikalisches Transportmedium, definiert allerdings einen von der PC-Vernetzung abweichenden, echtzeitfähigen Protokollstapel und eine abweichende Netzwerktopologie. Um eine deterministische Datenverarbeitung sicherzustellen, werden in der Regel spezielle Netzwerkkarten eingesetzt. In einem sercos-Netzwerk werden ein Kommunikations-**Master** und eine Menge von **Slave**-Geräten verwendet. Erlaubt sind Ring- und Linientopologien.

Das Bussystem durchläuft bis zur Betriebsbereitschaft 5 Kommunikationsphasen (CP):

- ➔ CP NRT
- ➔ CP0 : Initialisierung des Bussystems
- ➔ CP2 : Konfiguration der Kommunikationsteilnehmer
- ➔ CP3 : Vorstufe zum Betriebsmodus
- ➔ CP4 : Betriebsmodus

Sercos-Telegramme werden in einem Zeitschlitzverfahren über den Bus übertragen. Je nach Bus-Parametrierung sind freie Schlitze verfügbar und können für den **Unified Communication Channel (UCC)** genutzt werden. In dem freien Zeitschlitz können Ethernet-Telegramme von anderen Bus-Protokollen sowie IP-Telegramme über den Bus übertragen werden (siehe auch Abbildung 3.3).



AT: Antwort-Telegramm; E: Ethernet; MDT: Master-Daten-Telegramm; sercos: Serial Real-Time Communication System; UCC: Unified Communication Channel; Zykl.: Zyklus

Abbildung 3.3: sercos Telegrammstruktur mit Unified Communication Channel

Neben der Echtzeitkommunikation dient ein Service-Kanal zur Parametrierung von Feldgeräten. Zur Darstellung von Informationen und Funktionalitäten dient ein funktionales **Parametermodell** (Selig 2011). Zur Beschreibung der funktionalen Schnittstelle eines Gerätes wird die, auf Basis von XML spezifizierte, Sercos Device Description Markup Language (SDDML) genutzt.

Neben den reinen Datensätzen haben sercos Parameter (IDNs) Eigenschaften wie eine Beschreibung, einen Typ, sowie spezielle Attribute. Abbildung 3.4 zeigt die Struktur eines sercos-Parameters.

| Eigenschaften | | Beispiel | |
|---------------|-----------------------------|----------|------------------------------------|
| 1 | IDN (4 Byte) | 1 | S-0-0040.0.0 (0x00000028) |
| 2 | Name (Text) | 2 | Geschwindigkeits-Istwert |
| 3 | Attribute (4 Byte) | 3 | 32 Bit Dezimalwert (0x74220001) |
| 4 | Einheit (Text) | 4 | U/min |
| 5 | Minimalwert (wie Daten) | 5 | Nicht spezifiziert |
| 6 | Maximalwert (wie Daten) | 6 | Nicht spezifiziert |
| 7 | Daten (je nach Attribut) | 7 | -144 |

IDN: Identification Number

Abbildung 3.4: Eigenschaften eines sercos-Parameters (nach (Sercos International 2012a))

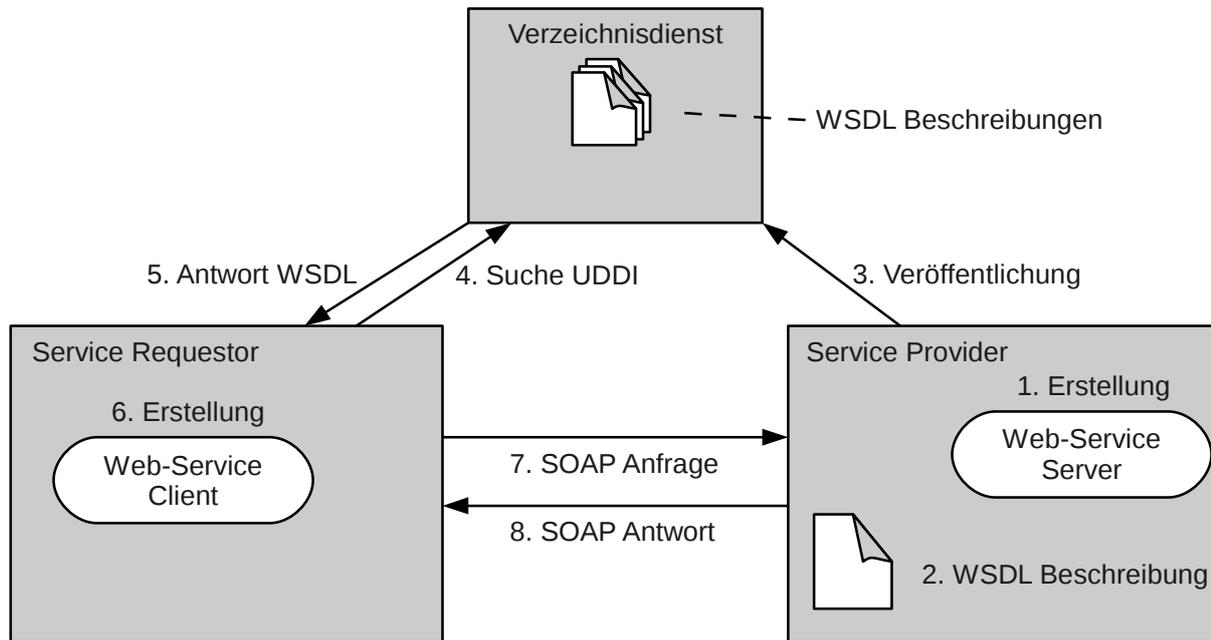
Der Typ eines Datensatzes wird durch die Attribute festgelegt. Neben Standarddatentypen sind auch Listen und Verweise auf andere Parameter erlaubt. Durch den Einsatz von Verweisen können komplexere Datenstrukturen abgebildet werden.

3.2.6 Web-Services

Mit dem Oberbegriff **Web-Services** wird eine Sammlung von offenen und plattformunabhängigen Kommunikationsstandards bezeichnet (Finger und Zeppenfeld 2009). Web-Services dienen als Basistechnologie für eine Reihe weiterer Anwendungen und erfreuen sich zunehmender Verbreitung in der Praxis.

Die für die Kommunikation genutzten Botschaften werden mit dem XML-basierten SOAP-Protokoll ausgetauscht (W3C 2007). Als Transportprotokoll wird oft HTTP eingesetzt. SOAP-Botschaften werden zwischen dem Nutzer eines **Dienstes** (Client) und dem entfernten **Dienstanbieter** (Server) ausgetauscht. Die Schnittstelle für entfernte Prozeduraufrufe sowie die dabei zu übertragenden Daten und deren Typen werden mit der „Web-Services Description Language“ (WSDL) beschrieben (W3C 2001). WSDL Dokumente können von

einem zentralen „Universal Description, Discovery and Integration“ (UDDI)-Dienstregister abgefragt werden. Die Zusammenhänge werden in Abbildung 3.5 dargestellt.



*UDDI: Universal Description, Discovery and Integration;
WSDL: Web-Services Description Language*

Abbildung 3.5: Web-Services-Architektur (nach (Finger und Zeppenfeld 2009))

3.2.7 Devices Profile for Web-Services

Das „**Devices Profile for Web-Services**“ (DPWS) (OASIS 2009) ist ein Web-Service Standard, welcher durch eine Auswahl und Erweiterung bestehender Web-Service Spezifikationen definiert ist. Dadurch ergibt sich ein Kommunikationsprofil, das für kleine und eingebettete Systeme mit eingeschränkten Ressourcen geeignet ist.

Das Konzept sieht vor, dass ein reales Gerät mit gerätezentrierten Diensten repräsentiert wird. Des Weiteren ist dem Gerät sogar die Bewegung zwischen verschiedenen Kommunikationsnetzen gestattet (sog. Roaming). Aus diesem Grund wurde das zentrale Dienstregister durch einen abweichenden Mechanismus zum Auffinden von Geräten ersetzt. Unvorteilhafterweise entstehen dadurch einige Inkompatibilitäten mit bestehenden Web-Service Standards (Bohn 2009).

DPWS wird als potentieller Nachfolger für „Universal Plug and Play“ (UPnP) angesehen, welches für die Heimvernetzung von Multimediageräten genutzt wird. Aufgrund der gerätezentrierten Eigenschaften ist DPWS Gegenstand verschiedener Forschungsprojekte, die sich mit der Anwendung von DPWS in einer industriellen Umgebung beschäftigen (Sirena Project 2005), (Soda Project 2008), (Candido, Jammes et al. 2010), (Zeeb, Moritz et al. 2010).

3.3 Agentensysteme und holonische Systeme

Softwareagenten sind autonom agierende Computerprogramme, welche mit ihrer Umwelt und eventuell weiteren Agenten interagieren. Agenten werden unter anderem in Computerspielen, Handels- und Multiagentensimulationen eingesetzt, wenn deren Interaktion untereinander von Bedeutung ist.

In technischen Systemen sind Agenten interessant für die Simulation und Steuerung von parallel ablaufenden Vorgängen. Agentensysteme werden in der Forschung häufig für die dezentrale Steuerung von Automatisierungssystemen mit ebenfalls dezentraler Infrastruktur genutzt. Vor allem, wenn diese Automatisierungssysteme ein dynamisches Verhalten aufweisen und schwer zentral zu koordinieren sind, erscheinen Agentensysteme geeignet.

Aus technischer Sicht handelt es sich bei einem Agentensystem um ein verteiltes System. Zur Kommunikation der Agenten untereinander kann eine Middleware als transparente Kommunikationsschicht eingesetzt werden.

Agentensysteme werden häufig mit holonischen (Holon: griech. Teil eines Ganzen) Systemen in Verbindung gebracht (Gruver, Kotak et al. 2003). Die Charakteristika von Holonen als teilweise intelligente, autark agierende Einheiten überdecken sich stark mit denjenigen von Agenten. Allerdings soll bei einem holonischen System der Aspekt der Zugehörigkeit zu beispielsweise einem Teil eines Produktionssystems stärker hervorgehoben werden (Glanzer, Schmidt et al. 2003).

3.4 Serviceorientierung und serviceorientierte Architektur

Der Begriff **serviceorientierte Architektur (SOA)** beschreibt einen Architekturstil für verteilte Softwaresysteme (Erl 2006). In einem solchen System werden Dienste (sog. Services) als Grundkomponenten genutzt, die eigene Lösungslogik bereitstellen und über geeignete Schnittstellen verfügen. Als **Service** bezeichnet man dabei eine zu jedem Zeitpunkt verfügbare und über ein Netzwerk nutzbare Softwarefunktionalität. Wichtiger Aspekt bei der Gestaltung einer SOA ist die Ausrichtung an den Geschäftsprozessen eines Unternehmens. In der Praxis existieren viele Ansätze, um die Eigenschaften, Referenzarchitekturen sowie Begriffe zu definieren (Liebhart 2007). Für die Realisierung einer SOA können verschiedene Technologien eingesetzt werden. Am häufigsten werden in der Praxis Web-Services als Technologieplattform eingesetzt. Diese basieren auf anerkannten, industriellen Standards wie XML und SOAP.

Serviceorientierte Architekturen werden primär in der Geschäftswelt für die Realisierung von verteilten Softwaresystemen eingesetzt. Da verschiedenste Systeme über Systemgrenzen hinweg angebonden werden können, eröffnen sich weitere Einsatzmöglichkeiten wie bei-

spielsweise im produzierenden Gewerbe (Mesa 2008), (Mínguez 2012). Interessant ist hier vor allem die Integration von Geräten in das Gesamtsystem bis hinab auf die Geräte- und Feldbusebene. Die Eigenschaften dieser SOA-Varianten wurden bereits in den Forschungsprojekten SIRENA (Sirena Project 2005), SODA (Soda Project 2008) und SOCRADES (Socrades Project 2009) eingehend untersucht. Zusätzlich haben die Bemühungen dazu beigetragen, die DPWS-Spezifikation zu erstellen, die geeignet ist, um die Eigenschaften von Geräten innerhalb einer SOA abbilden zu können. Darüber hinaus ergeben sich aber noch weitere Einsatzbereiche beispielsweise für Echtzeitanwendungen (Mathes, Gärtner et al. 2009) oder für die Inbetriebnahme von Maschinen (Abel und Klemm 2013b), (Abel, Klemm et al. 2011).

3.4.1 Entwurfsprinzipien der Serviceorientierung

Unter Serviceorientierung versteht man ein Paradigma, das auf verteilte Lösungslogik angewendet wird. T. Erl beschreibt dazu acht Entwurfsprinzipien (Erl 2008). Wenn die Entwurfsprinzipien bei der Erstellung einer Anwendung in geeignetem Maß eingesetzt werden, entsteht dadurch eine serviceorientierte Lösungslogik.

Diese Prinzipien sind im Einzelnen (Erl 2008):

- Der Einsatz von **standardisierten Service-Verträgen** in Form von technischen und nicht-technischen Beschreibungen. Diese können beispielsweise WSDL- oder XML-Beschreibungen sein.
- Die Beachtung der **Kopplung von Services** sowohl im internen Entwurf als auch in der Wirkung nach außen. Des Weiteren ist die Kopplung zwischen Servicevertrag und Lösungslogik relevant.
- Umsetzung der **Abstraktion von Services**. Eine Möglichkeit dazu ist das Verbergen von internen Informationen, die für die Außenwelt nicht relevant sind, indem der Servicevertrag auf ein notwendiges Minimum reduziert wird.
- Ein zentrales Prinzip ist die Unterstützung der **Wiederverwendbarkeit von Services** in einem angemessenen Maße. Ein Serviceinventar erhöht das Potential zur Auffindung wiederverwendbarer Services.
- Ein gewisses Maß an **Autonomie von Services** und die damit entstehende Unabhängigkeit von der Umgebung. Durch die Reduktion von Seiteneffekten ergibt sich ein zuverlässigeres Laufzeitverhalten.
- Eine umgesetzte **Zustandslosigkeit von Services** erhöht die Skalierbarkeit und Wiederverwendbarkeit. Zustandsbehaftete Verarbeitung kann ausgelagert werden, um zustandslose Lösungslogik zu erhalten.

- ➔ Die **Auffindbarkeit von Services** erhöht den Wiederverwendungsgrad. Diese kann durch ein Dienstregister mit Serviceverträgen umgesetzt werden.
- ➔ Die **Kompositionsfähigkeit von Services** ist ein zentraler Aspekt einer SOA. Durch die Kombination von Lösungslogik und die Zusammenfassung von Fähigkeiten von Services können komplexe Problemstellungen modularisiert und gelöst werden.

Abbildung 3.6 zeigt einige wichtige SOA-Konzepte und -Prinzipien im Überblick.

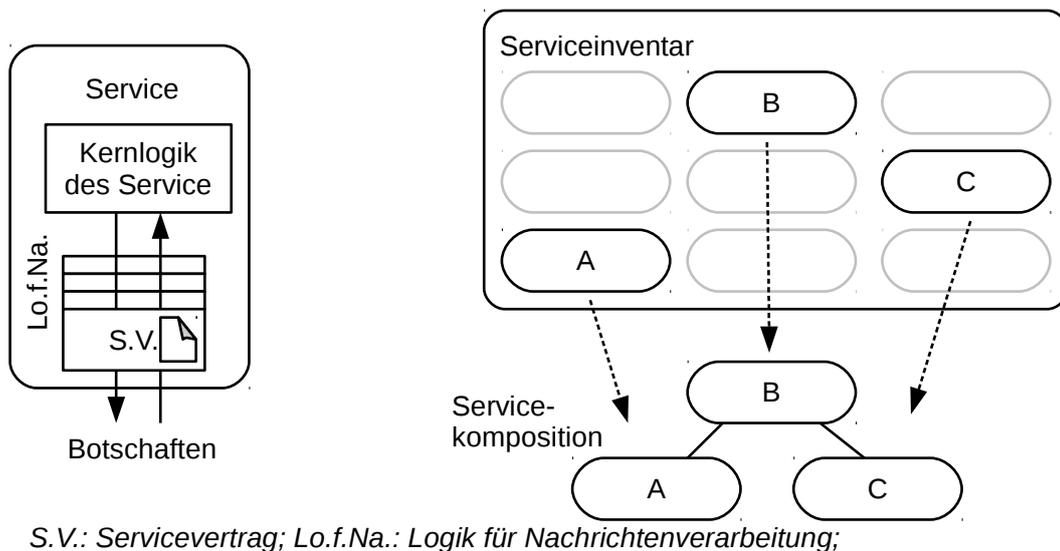


Abbildung 3.6: Übersicht von Konzepten und Prinzipien der Serviceorientierung

3.4.2 Serviceorientierte Analyse

Vergleichbar zur Analyse und zum Entwurf in der Objektorientierung unterscheidet man auch in der Serviceorientierung zwischen Analyse und Entwurf. Allerdings ist das Vorgehen im Bereich der Serviceorientierung bisher weit weniger formal herausgebildet. Der Grund liegt darin, dass diese Entwurfsprozesse, im Normalfall, an den organisatorischen Rahmen einer Unternehmung angepasst werden müssen (Erl 2008).

Es gibt keine standardisierte Vorgehensweise für die Analyse und den Entwurf von serviceorientierten Systemen. Während der **serviceorientierten Analyse** werden mögliche Definitionen für Services erarbeitet sowie etwaige Kandidaten für Services aufgespürt (siehe auch (Erl 2008)). Dadurch entsteht nach mehreren Iterationen eine sogenannte Blaupause des Serviceinventars: eine mögliche Zusammenstellung von später einzusetzenden Diensten. Somit kann direkt aus dem Geschäftsmodell eines Unternehmens eine serviceorientierte IT-Infrastruktur erstellt werden.

3.4.3 Serviceorientierter Entwurf

Der **serviceorientierte Entwurf** ist, ebenso wie die Analyse, kein standardisiertes Vorgehen. Während dieser Phase werden die in der Analyse herausgebildeten Servicekandidaten weiter analysiert und Serviceverträge für die tatsächlich zu realisierenden Services erstellt. Daraus werden in einem nächsten Schritt Schnittstellen generiert, die fortan für die Implementierung der Dienste benutzt werden können (siehe auch (Erl 2008)).

Abbildung 3.7 zeigt eine Übersicht des Vorgehens, zur Findung einer nach den Prinzipien der Serviceorientierung gestalteten Systemarchitektur.

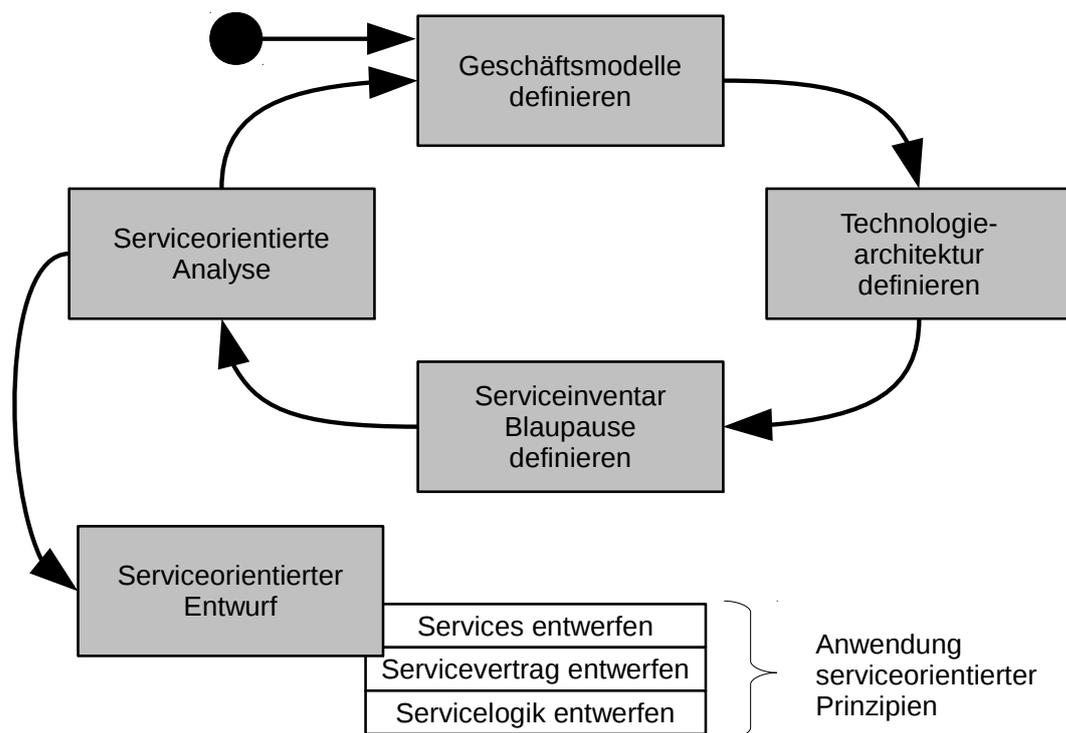


Abbildung 3.7: Serviceorientierte Analyse und serviceorientierter Entwurf (nach (Erl 2008))

3.4.4 Geschäftsprozesse und Orchestrierung

Die Kompositionsfähigkeit von Services bildet die Grundlage für eine übergeordnete Schicht zur Ausführung von Geschäftslogik. Eine zentrale Instanz erhält somit die Fähigkeit zur Ausführung von Geschäftsprozessen. Dieses Konzept wird auch als **Orchestrierung** bezeichnet.

Werden Web-Services als Technologieplattform eingesetzt, kann die „Web-Services Business Process Execution Language“ (WS-BPEL) (OASIS 2007) zur Beschreibung von Web-Service-Kompositionen, sog. BPEL-Prozessen, genutzt werden. Diese können u.a. zur Abbildung von **Geschäftsprozessen** in Unternehmen herangezogen werden. BPEL basiert

auf XML und stellt Sprachkonstrukte eines Prozessmodells bereit. Erlaubt sind „einfache“ Aktivitäten wie der Aufruf von Web-Services (invoke), die Zuweisung von Variablen (assign) usw.. Ferner gibt es „strukturierte“ Aktivitäten wie Sequenzen (sequence), Verzweigungen (Bsp.: if, switch, while) und Mittel für eine parallele Ausführung (flow). Abbildung 3.8 zeigt eine Übersicht der Erstellung von BPEL-Prozessen und deren Einsatz (Deployment).

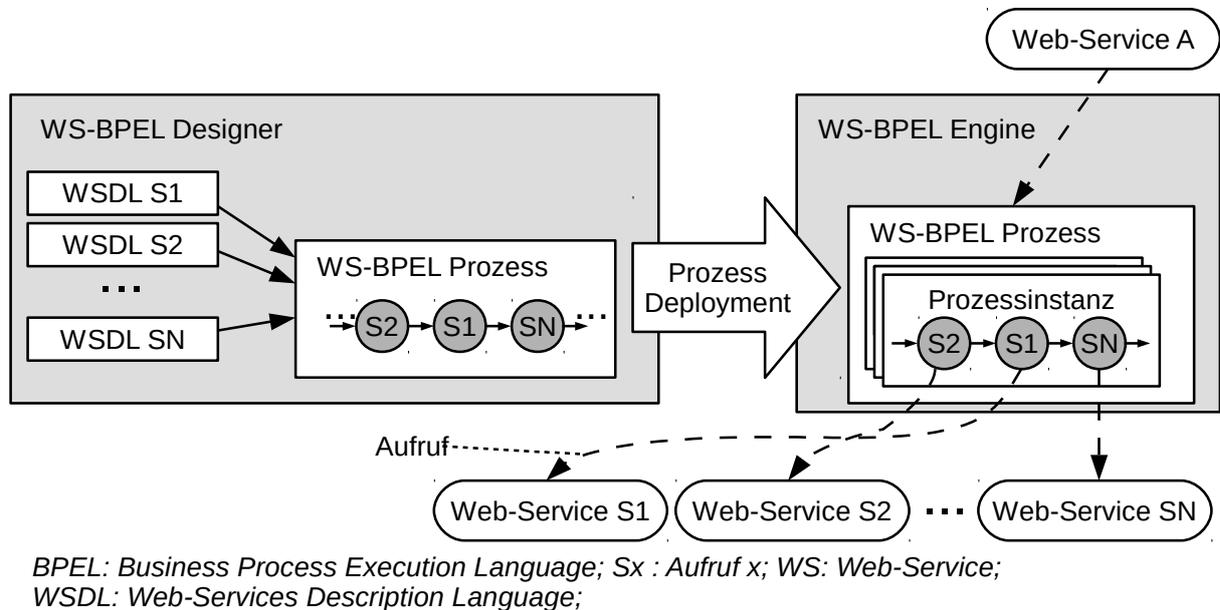


Abbildung 3.8: Übersicht: Erzeugung und Ausführung von BPEL (nach (Bohn 2009))

Während der Erstellung eines BPEL-Prozesses werden die WSDL-Beschreibungen von aufzurufenden Web-Services importiert und damit alle notwendigen Schnittstellen und XML-Nachrichten mit eingebunden. Anschließend wird das Verhalten des Prozesses modelliert. Zur Ausführung wird der BPEL-Prozess in eine sog. BPEL-Engine geladen und dort „deployed“ (dt. eingebracht). Eine Instanz des BPEL-Prozesses ist nun selbst als Web-Service erreichbar und führt den Prozess nach einer Beauftragung von außen aus.

3.5 Rekonfigurierbare Bearbeitungsmaschinen

Dieser Abschnitt stellt das Konzept der rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen vor. Zu Beginn wird das Konzept in Relation zu der wandlungsfähigen Produktion gebracht. Im Anschluss wird näher auf die Entwurfsprinzipien, die Konstruktion und die Modularisierung von rekonfigurierbaren Maschinen eingegangen.

3.5.1 Einordnung in den Kontext der wandlungsfähigen Produktion

Im Hinblick auf Unsicherheiten in der Langzeitplanung durch unvorhersagbare Schwankungen, Instabilitäten und Turbulenzen am Markt gewinnt das Konzept der wandlungsfähigen Produktion an Bedeutung (Westkämper und Zahn 2009), (Jovane, Westkämper et al. 2009). Damit bezeichnet man die Fähigkeit eines Unternehmens, die Produktion an die aktuelle Wirtschafts- und Auftragslage in geeigneter Weise zu adaptieren.

Im Sonderforschungsbereich SFB 467 (Westkämper 2006) sowie im Transferbereich 59 (Westkämper 2008) wurden die Aspekte der Wandlungsfähigkeit an der Universität Stuttgart institutsübergreifend untersucht. Die dabei entstanden Ansätze wurden unter anderem zum Stuttgarter Unternehmensmodell zusammen gefasst (Westkämper und Zahn 2009). Die Konzepte bilden zudem einen der zentralen Kernaspekte der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME) (GSaME 2015).

Um am Markt zu bestehen, muss ein Unternehmen aus verschiedenen Gesichtspunkten heraus wandlungsfähig sein. Dabei ist zwischen organisatorischer, räumlicher und **technischer Wandlungsfähigkeit** zu unterscheiden (Hernández 2002). Aus der Sichtweise der Fabrikplanung ist die Anpassung von Prozessen und Verfahren ein Aspekt der technischen Wandlungsfähigkeit. Wandlungsfähigkeit auf Fabrikebene betrifft beispielsweise die Fähigkeit zur Neuorganisation von Maschinen und Materialfluss innerhalb der Fabrik. Wandlungsfähigkeit auf tieferen Ebenen betrifft die Fähigkeit zum Umbau und zur Anpassung der Produktionsmittel selbst.

Dazu existieren zwei verwandte Ansätze: **Rekonfigurierbare Fertigungssysteme** (engl. Reconfigurable Manufacturing System, RMS) und **rekonfigurierbare (Bearbeitungs-) Maschinen** (engl. Reconfigurable Machining Tool, RMT). Die Unterscheidung zwischen Maschine und Fertigungssystem ist nicht exakt abgegrenzt. Beide Ansätze setzen auf **Modularisierung** als zentrales Basiskonzept und haben das Ziel, ein dynamisch änderbares Umfeld in der Produktion zu etablieren. Im Vergleich zu Maschinen sind Fertigungssysteme größere Anlagen mit umfangreicherer Funktionalität, welche zumeist mehrere Maschinen enthalten. Da bei beiden Ausprägungsformen Veränderungen in Funktionalität und Struktur vorgenommen werden können, verschwimmt die exakte Grenze zur Unterscheidung im Randbereich zwischen beiden Systemen (Koren 2006). Neben Unschärfen durch technologische Überschneidungen entstehen auch Unschärfen bei der Übersetzung von Begriffen und Abkürzungen.

Die Leistungsfähigkeit von rekonfigurierbaren Fertigungssystemen wird oft mit flexiblen Fertigungssystemen (FFS) verglichen (Heisel und Meizner 2006), (VDI 1994), (Mehrabi, Ulsoy et al. 2000), (Koren und Shpitalni 2010). Bei einem FFS wird die Konfiguration des

Systems beibehalten und auf Produktionsänderungen reagiert, indem Bearbeitungsprozesse und Materialfluss flexibel angepasst werden. Die dazu notwendige Flexibilität muss beim Entwurf berücksichtigt werden, wodurch sich die initialen Anlagenkosten erhöhen. Im Gegensatz dazu wird bei einem rekonfigurierbaren Fertigungssystem der Aufbau des Systems an die neuen Anforderungen angepasst (Koren 2006). Weitere Bestrebungen zu rekonfigurierbaren Fertigungssystemen fassen Bi et al. zusammen (Bi, Lang et al. 2008).

Konzepte zur Erreichung wandlungsfähiger Strukturen in der Produktion werden sinngemäß in einen wandlungsfähigen Gesamtkontext eines Unternehmens eingebettet. Wandlungsfähige Unternehmen sind in einen Veränderungsprozess eingebunden (siehe Abbildung 3.9).

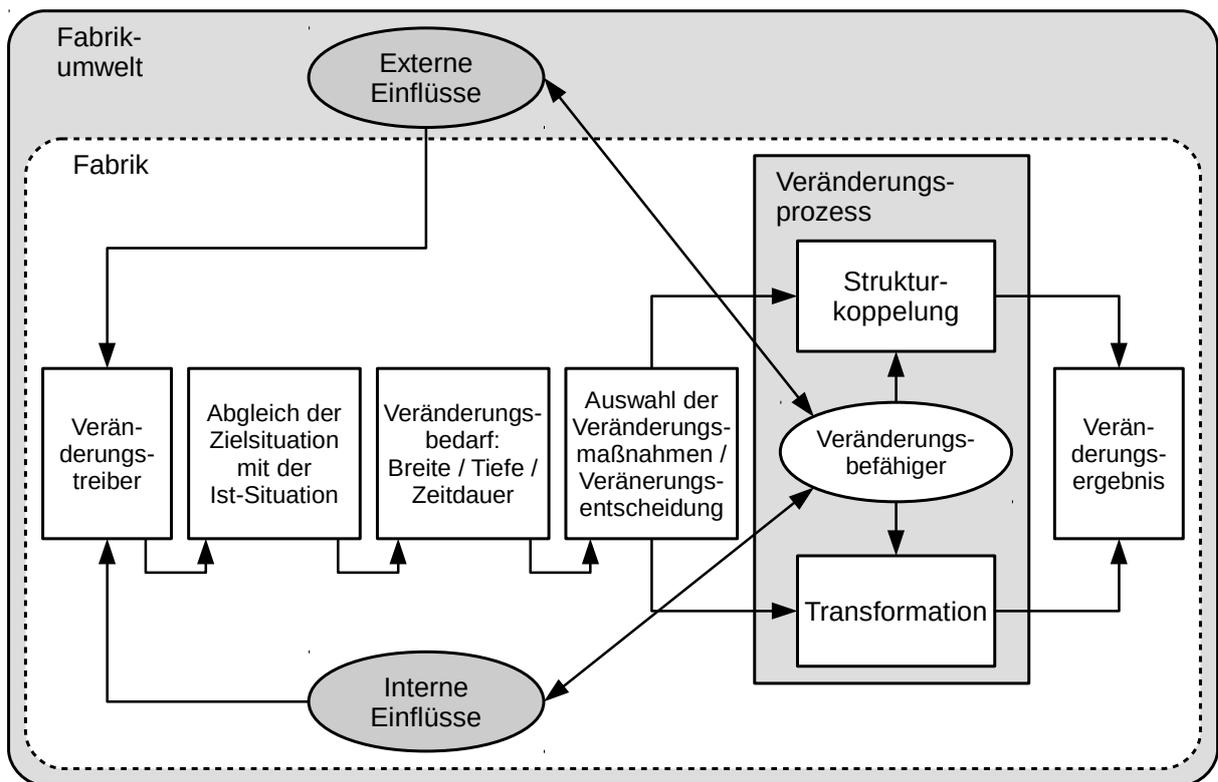


Abbildung 3.9: Wirkschema von Veränderungen (nach: (Hernández 2002))

Der Veränderungsprozess teilt sich auf in zwei Aspekte: **Strukturkoppelung**, welche eine Anpassung der Struktur betrifft, und **Transformation**, welche tiefgreifende Veränderungen in Subsystemen betrifft. Eine Transformation kann durch einen Wandlungsprozess dargestellt werden. Der Wandlungsprozess selbst findet in der Disziplin Fabrikplanung statt und setzt eine interne Wandlungsbereitschaft voraus. Ziel des Wandlungsprozesses ist die Erkennung des Bedarfs für Veränderungen und die Umstellung der Fertigung auf die benötigte Gesamtkonfiguration.

Die Transformation bzw. Rekonfiguration einer Maschine wird beispielsweise dann notwendig, wenn von einer Familie von vergleichbaren Teilen zu einer anderen Familie gewechselt werden soll, bei welcher abweichende Bearbeitungen notwendig sind (Pasek 2006). Maschi-

nenteile können weiterhin für Wartungszwecke gegen baugleiche Teile getauscht werden. Dadurch können längere Stillstandszeiten bei der Wartung vermieden werden (Kircher und Wurst 2006). Daher stellt die Verwaltung von Maschinenteilen einen wichtigen Rahmen. Benötigte Maschinenteile können hierfür aus einem Lager entnommen, erworben oder einem Fundus entliehen werden (Lorenzer 2010). Dadurch kann die Produktion stets an den aktuellen Bedarf adaptiert werden (Toonen, Lappe et al. 2014). Die Planung der notwendigen Maschinenkonfiguration kann bei dem gewünschten Bauteil beginnen und den benötigten Herstellungsprozess auf Basis einer Prozessbeschreibung modellieren (Hoffmeister 2013).

3.5.2 Komponenten von Bearbeitungsmaschinen

Bearbeitungsmaschinen werden traditionell in der fertigen Industrie eingesetzt. Es existieren verschiedene Ausprägungen, die sich, je nach Bearbeitungstechnologie, Durchsatz, Automatisierungsgrad, Präzision usw., unterscheiden (Grote und Feldhusen 2011). Ganzheitlich betrachtet handelt es sich bei einer Bearbeitungsmaschine um ein mechatronisches System (VDI 2013). Im Folgenden werden die mechanischen, elektronischen und informatontechnischen Bestandteile einer Bearbeitungsmaschine am Beispiel einer traditionell und damit nicht modular aufgebauten Werkzeugmaschine vorgestellt.

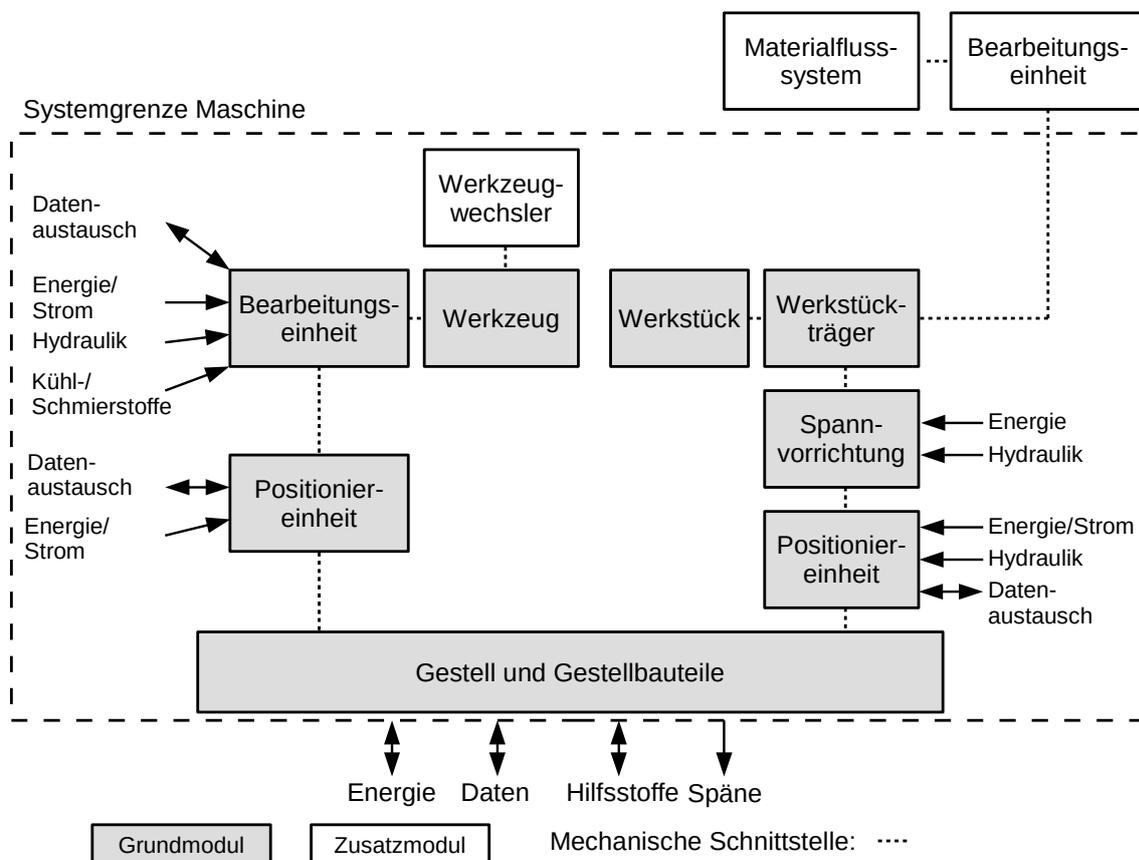


Abbildung 3.10: Aufbau und Schnittstellen einer Werkzeugmaschine (nach: (Westkämper 2006))

Eine zentrale Rolle spielen das Werkstück und das Werkzeug, welches zum Bearbeiten des Werkstücks dient. Das Werkstück ist auf einem **Werkstückträger** fixiert, welcher wiederum während der Bearbeitung mit einer Spannvorrichtung an einer Positioniereinheit befestigt ist. Das Werkzeug ist an einer **Bearbeitungseinheit** befestigt, welche mit einer Positioniereinheit im Raum bewegt wird. Zur Bewegungserzeugung zwischen Werkzeug und Werkstück kommen in der Regel lineare oder rotatorische **Achsen** zum Einsatz. Das Zusammenspiel von Achsen zur Erzeugung von Bewegungen wird auch als Maschinen-**Kinematik** bezeichnet. Ein **Gestell** dient das als stabile Unterkonstruktion.

Zur Automatisierung der Maschine wird ein **Steuerungssystem** verwendet. Je nach Maschinentyp können verschiedene Steuerungssysteme, auch in Kombination, eingesetzt werden: numerische Steuerungssysteme (NC) für komplexe Bewegungsaufgaben; Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) für die Automatisierung von Abläufen; Bewegungssteuerungen (Motion Control, MC); sowie Robotersteuerungen (RC). Zur echtzeitfähigen Vernetzung von Steuerungssystem und Peripherie werden Feldbussysteme eingesetzt.

Peripherie wird entweder direkt oder dezentral über einen **Feldbus** in Form von **Feldgeräten** angebunden. Das Steuerungssystem, die zum Betrieb notwendige Sicherheitstechnik sowie die Anbindung von Aktoren und Sensoren sind im **Schaltschrank** verbaut. Im Steuerungssystem wird weiterhin ein **Echtzeitbetriebssystem** für die Ausführung der Steuerungsfunktionen genutzt. Feldgeräte werden, je nach Bauart, ebenfalls mit einem Echtzeitbetriebssystem oder mit programmierbaren digitalen Schaltkreisen ausgestattet. Den Zusammenschluss von hardwarenahen Softwarebestandteilen bezeichnet man als **Firmware**. Die Bedienung der Maschine erfolgt über eine graphische **Benutzeroberfläche** sowie über eine über den Feldbus angeschlossene Maschinensteuertafel mit Bedienelementen. Zur Automatisierung von maschinenübergreifenden Abläufen kann die Maschine an ein **Leit-system** angebunden werden.

3.5.3 Eigenschaften von rekonfigurierbaren Maschinen

Rekonfigurierbare Maschinen sind ein technisches Mittel, um Wandlungsfähigkeit in der Produktion zu ermöglichen. Zentraler Ansatz ist, dass Maschinen dieses Typs entgegen traditionell aufgebauten Maschinen derart **modular gestaltet** sind, dass diese in ihrer Konfiguration verändert und somit rekonfiguriert werden können (Heisel und Michaelis 1998), (Michaelis 2002). Rekonfigurationen können notwendig werden, wenn abweichende Produktionsanforderungen entstehen oder unterschiedliche Produkte zu produzieren sind (Hedrick und Urbanic 2009).

Ein flexibles Fertigungssystem ist von vornherein dafür ausgelegt, alle möglichen, in Zukunft auftretenden Produktionsaufgaben zu beherrschen (VDI 1994). Erweisen sich die zum Ent-

wurf des FFS herangezogenen Annahmen als nicht korrekt, führt dies zu Fehlinvestitionen (Koren, Heisel et al. 1999). Rekonfigurierbare Maschinen vermeiden Fehlinvestitionen, weil die Maschinen bei Bedarf an **neue Anforderungen** angepasst werden können. Die Einsatzgebiete von rekonfigurierbaren Maschinensystemen sind diejenigen, in welchen starre Serienmaschinen nicht mehr rentabel sind (z.B. bei der Fertigung von kleinen Stückzahlen oder bei einer hohen Anzahl von Varianten) (Koren 2006). Tabelle 3.1 stellt verschiedene Ausführungen von Werkzeugmaschinen gegenüber.

| Ausführung | Traditionelle Maschine | Sonderwerkzeugmaschine | Bearbeitungszentrum | Rekonf. Maschine |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Eignung für Gleichteile | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Eignung für Werkstückspektrum | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Flexibilität der Produktion | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ |
| Adaptierbare Struktur | ✗ | ✗ | ✗ | ✓ |

Legende: ✓: erfüllt; ✗: nicht erfüllt

Tabelle 3.1: Vergleich von Ausführungen von Werkzeugmaschinen (nach (Koren, Heisel et al. 1999) und (Wörn 2009))

Analytische Vergleiche zwischen rekonfigurierbaren und traditionellen Fertigungssystemen stellen (Zhang, Liu et al. 2006) und (Koren 2006) vor. Eine Methode zur Evaluation von Struktur und Performanz von rekonfigurierbaren Werkzeugmaschinen gibt (Lorenzer, Weikert et al. 2007).

Rekonfigurierbare Mehrtechnologiemaschinen (RMM) stellen eine Gattung von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen dar, bei welchen die Prozesstechnologie verändert werden kann. Dieser Maschinentyp wurde im Projekt METEOR 2010 untersucht (Meteor 2004), (Abele und Wörn 2004), (Abele, Versace et al. 2006), (Abele und Wörn 2009). Anforderungen an rekonfigurierbare Maschinen stellt Abbildung 3.11 am Beispiel von RMM dar.

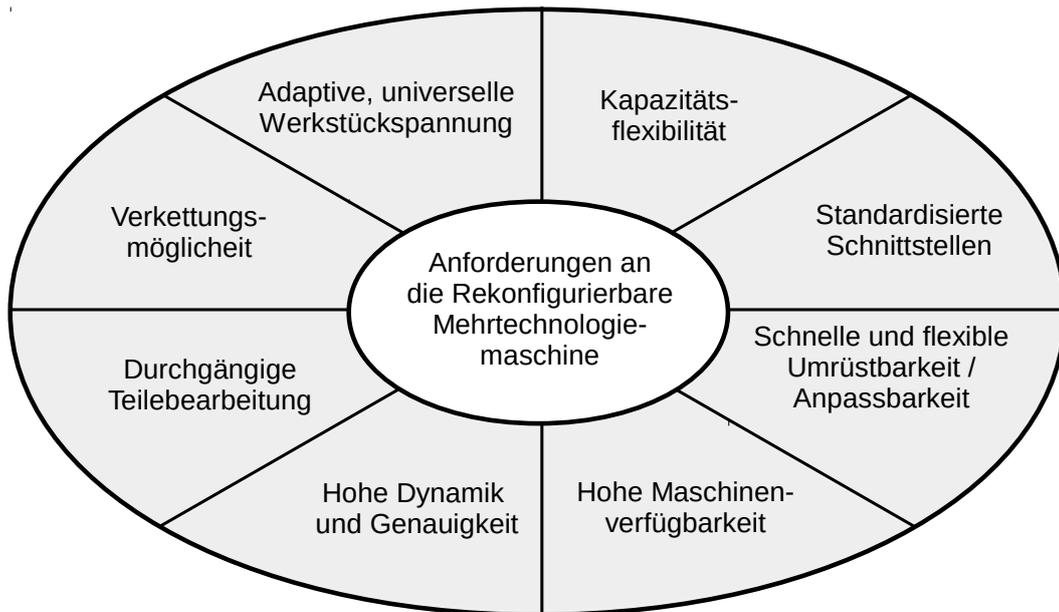


Abbildung 3.11: Anforderungen an rekonfigurierbare Maschinen (nach: (Abele und Wörn 2004))

3.5.4 Steuerungssysteme für rekonfigurierbare Maschinen

Das Steuerungssystem ist ein elementarer Bestandteil einer Bearbeitungsmaschine. Für den Betrieb einer rekonfigurierbaren Maschine wird ein Steuerungssystem benötigt, welches an die Veränderungen in der Maschine angepasst werden kann.

Zur Abbildung dieser Veränderungen ist ein konfigurierbares Steuerungssystem unerlässlich. Im Rahmen des OSACA-Projektes wurde dafür eine geeignete Basisplattform geschaffen (OSACA e.V. 1997), (Sperling 1999), (Daniel 1996). Die OSACA-Plattform fand später ebenfalls Einzug in modulare Maschinensysteme. Im Projekt HIPARMS wurden Zusammenhänge zwischen der Konfiguration von Steuerungssystemen und von modularen Transfermaschinen untersucht (Fukaya 2004), (Ullrich 2006), (Neuhaus 2003).

Zum Betrieb einer rekonfigurierbaren Maschine wird idealerweise ein Steuerungssystem eingesetzt, welches automatisiert an die aktuelle Maschinenkonfiguration angepasst werden kann (Pritschow, Kircher et al. 2006), (Pritschow, Wurst et al. 2003).

Die interne Struktur des Steuerungssystems ist dabei modular gestaltet und kann flexibel an verschiedene Maschinenstrukturen adaptiert werden (Kircher, Seyfarth et al. 2006). Dazu wurde eine modellbasierte Konfigurierungsmethode zur Generierung einer NC-Steuerungskonfiguration entwickelt (Kircher 2011). Die resultierende Maschine kann daher als Verbund aus rekonfigurierbarer Mechanik und rekonfigurierbaren Softwaresystemen angesehen werden (Koren 2006).

3.5.5 Module für rekonfigurierbare Maschinen

Modularität ist neben Integrierbarkeit, Flexibilität, Skalierbarkeit, Konvertierbarkeit und Diagnostizierbarkeit ein Kern-Charakteristikum für Systeme in der rekonfigurierbaren Produktion (Koren 2006). Für rekonfigurierbare Maschinensysteme ist konsequent umgesetzte Modularität daher ein erfolgsentscheidendes Schlüsselkriterium.

Zum Aufbau von Maschinen werden sehr häufig herstellerspezifische **Baukastensysteme** wie beispielsweise der Index RatioLine-Systembaukasten verwendet (INDEX 2014). Durch die hohe Zahl an Kombinationsmöglichkeiten ist es den Herstellern möglich, spezielle Maschinentypen auf Kundenwunsch zu erstellen. Allerdings erlaubt dieses Vorgehen bisher keinen herstellerübergreifenden Einsatz.

Erste **Modularisierungskonzepte** für rekonfigurierbare Maschinen wurden bereits in den Projekten MOSYN, MAREA erstellt (Böger 1998). Im Rahmen von MOSYN wurde eine objektorientierte Referenzarchitektur für modulare Fräsmaschinen entwickelt (siehe Abbildung 3.12). Die Module enthalten formale Beschreibungen über deren Eigenschaften und Schnittstellen. Eine Werkzeugmaschine besteht demnach aus einer Menge von Modulen, Verbindungen und einer **Konfigurationsbeschreibung**.

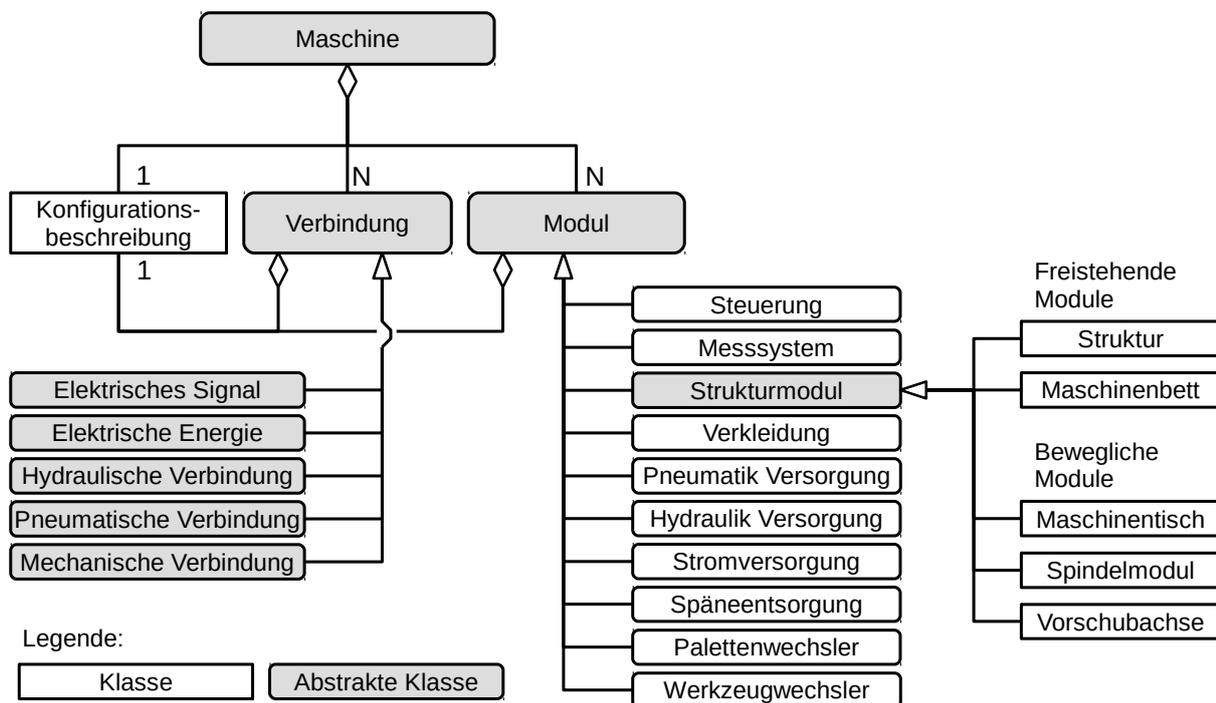


Abbildung 3.12: Strukturmodell der MOSYN-Referenzarchitektur (nach: (Kircher 2011))

Einem Baukastensystem liegt stets ein Modularisierungskonzept zu Grunde, welches eine Hierarchie von interoperablen Komponenten definiert. Abbildung 3.13 zeigt eine Hierarchie aus Maschinen, Modulen und Komponenten zum Aufbau von Modulen.

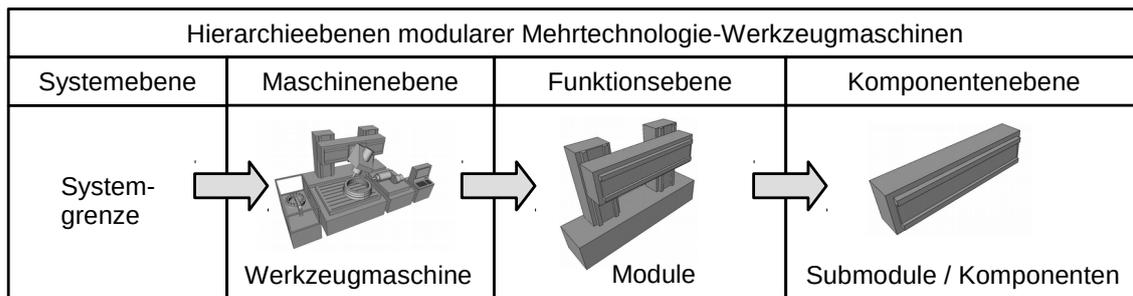


Abbildung 3.13: Modulhierarchie einer (rekonfigurierbaren) Mehrtechnologie-Werkzeugmaschine (nach: (Wörn 2009))

Es existieren verschiedene Ansätze zur Erstellung von Modulen und Maschinenkonzepten für rekonfigurierbare Bearbeitungsmaschinen. Eine herstellerübergreifende Konfigurierung erlaubt Böger (1998), indem ein Referenzmodell und eine zugehörige Konfigurierungsmethode erstellt werden. Eine Modularchitektur und eine Systematik zur Behandlung von Schnittstellen sowie ein Planungswerkzeug für Rekonfigurationen wird von Michaelis (2002) bestimmt. Den iterativen Entwurf und die optimale Selektion von Maschinenmodulen betrachtet Moon (2006).

Ein Vorgehen zur Erstellung und Evaluation von Modulbausätzen entwickelt Lorenzer (2007). Module wurden weiterhin exemplarisch umgesetzt und deren strukturelle und dynamische Eigenschaften vermessen (Lorenzer 2010).

Im Rahmen eines DFG-Schwerpunktprogramms wird ein neuer Ansatz für rekonfigurierbare Maschinen für kleine Werkstücke entwickelt (Wulfsberg 2014), (Wulfsberg, Verl et al. 2013), (Abel und Heinze 2013).

Module zum Aufbau von rekonfigurierbaren Mehrtechnologiemaschinen (RMM) werden in (Abele, Versace et al. 2006) und (Abele und Wörn 2004) untersucht. Je nach Anwendungsfall können RMM einzeln oder auch zu mehreren im Verbund als Fertigungssystem eingesetzt werden.

Module werden anhand mechanischer Schnittstellen zu einer Maschine verbunden (Wörn 2009), (Abele, Wörn et al. 2007). Diese Schnittstellen können neben der reinen mechanischen Kopplung auch Anbindungen für Energie, Medien und Informationstechnik bereitstellen (Westkämper 2006). Dem Entwurf einer Maschine aus einem vorhandenen Modulsystem widmen sich Heisel und Meizner (2006) durch Ableitung eines mehrstufigen Entwurfsprozesses.

Mechatronische Module für rekonfigurierbare Bearbeitungsmaschinen

Der Begriff mechatronische Module (MM) bezeichnet Komponenten zum Aufbau von rekonfigurierbaren Bearbeitungssystemen. Ein solches Modul beherbergt eine dedizierte Funktio-

nalität, beispielsweise die eines Bearbeitungsaggregates zur spanabhebenden Bearbeitung. Integriert sind alle funktionsrelevanten Subsysteme wie mechanische Teilsysteme, elektronischen Systeme sowie ein internes Steuerungssystem.

Eine geeignete Wahl von Modulsystemgrenzen und eine Harmonisierung von funktionalen sowie von baulichen Systemgrenzen führen zu einer Vereinfachung in der Konstruktion und unterstützen die Erstellung von interoperablen Modulen (Kircher und Wurst 2006). Durch Reduktion externer Schnittstellen werden die Module einfacher untereinander kombinierbar und der Verkabelungsaufwand wird reduziert. Im Idealfall sind mechatronische Module in ihrer Funktionalität autark und nutzen dezentrale Hilfsaggregate, beispielsweise zur Erzeugung von Druckluft, sofern nötig. Übrig bleibt somit ein minimaler Satz von standardisierten Schnittstellen. Somit ist eine aus mechatronischen Modulen aufgebaute Maschine bezüglich Technologie, Struktur und Kapazität zu einem späteren Zeitpunkt erweiterbar (Kircher und Wurst 2006).

Module besitzen einen über die Feldbus-Schnittstelle lesbaren Identifikationsspeicher. Abbildung 3.14 zeigt eine mögliche Ausprägung eines Antriebsmoduls mit dezentralen Hilfsaggregaten.

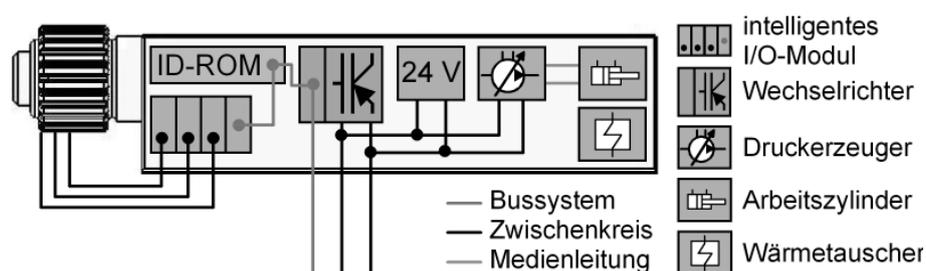


Abbildung 3.14: Mögliche Ausprägung eines mechatronischen Moduls (Quelle: (Kircher und Wurst 2006), Bildquelle: ISW, Universität Stuttgart)

Die essenziellen Eigenschaften eines mechatronischen Modulsystems im Kontext der wandlungsfähigen Produktion sind:

- Einsatz herstellerunabhängiger Schnittstellen
- Einheitliche, standardisierte und interoperable Schnittstellen
- Nutzung von universalen Spannvorrichtungen zu benachbarten Modulen
- Anpassbare und umprogrammierbare interne Funktionalität
- Erhöhte Anpassbarkeit und Parametrierbarkeit an wechselnde Anforderungen
- Eine Vorab-Inbetriebnahme der Module

Im Rahmen des SFB 467 wurde im Teilprojekt C ein mechatronischer Baukasten auf Basis eines mechatronischen Gesamtmodells für rekonfigurierbare Bearbeitungssysteme entworfen (Westkämper 2006), (Heisel 2004). Die dort erstellten Module haben eine für sich geschlos-

sene Systemgrenze; es erfolgen beispielsweise keine Medienflüsse über Modulgrenzen hinaus (siehe Abbildung 3.15).

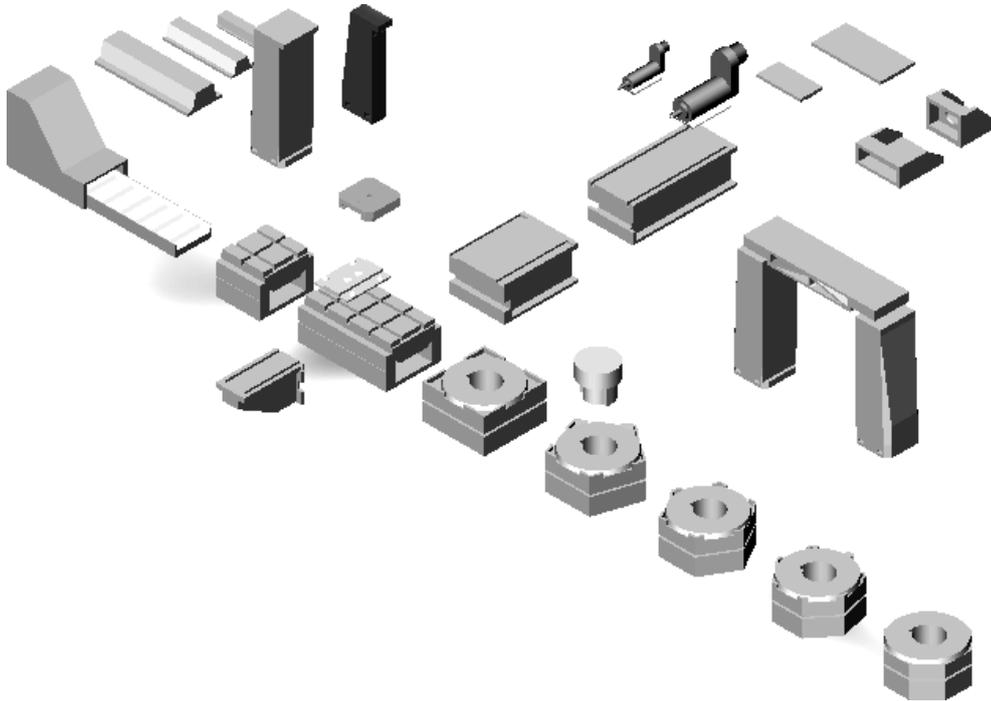


Abbildung 3.15: Baukasten für wandelbare Bearbeitungssysteme (Quelle: (Westkämper 2006))

Der Baukasten erlaubt den einfachen Aufbau einer Vielzahl von Maschinentypen von Einzelmaschinen bis zu Rundtakt- und Transfermaschinen. Die Module sind autark und haben die nötigen Softwareprogramme und Steuerungsfunktionen bereits integriert. Dennoch wird ein modulübergreifendes Steuerungssystem benötigt (Kircher, Seyfarth et al. 2004). Eine mögliche, aus dem Baukasten erstellte Maschinenkonfiguration zeigt Abbildung 3.16.

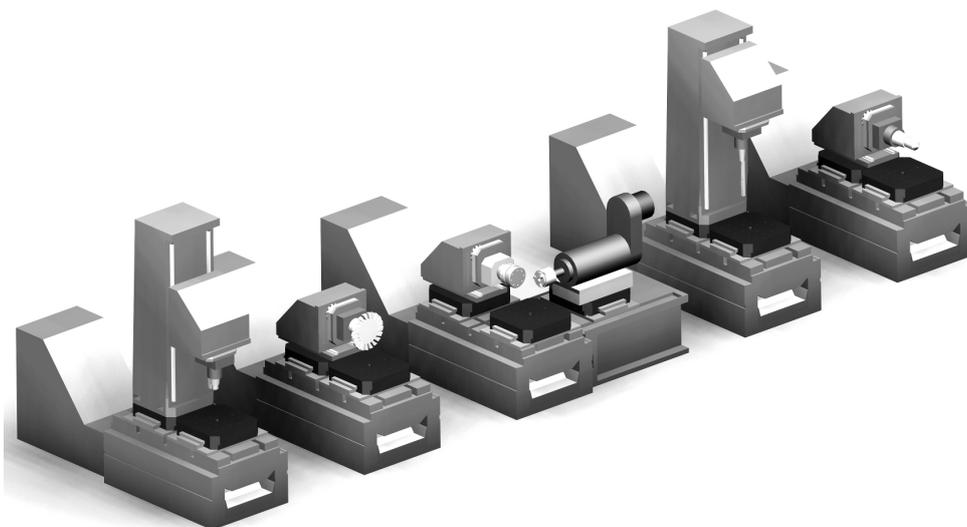


Abbildung 3.16: Mögliche Kombinationen von Maschinen aus dem Baukasten (Quelle: IFW, Universität Stuttgart)

Einen Vorgang zur Analyse bestehender Systeme und die nachfolgende mechatronische Modularisierung auf Basis von Maschinenfunktionen zur Findung von optimalen System-schnittstellen stellen Lechler, Schmitz et al. (2007) vor.

Je nach auszuführendem Prozess wird ein geeignetes Steuerungssystem benötigt. Ein selbst-adaptierendes numerisches Steuerungssystem entwirft Kircher (2011) für rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen auf Basis von mechatronischen Modulen. Die Identifikation von Modulen spielt eine wesentliche Rolle, um Module automatisch in das Steuerungssystem einbinden zu können. Es existieren dazu bereits Ansätze, um an den USB-Bus angelehnte Identifikationsmethoden benutzen zu können (Kircher und Wurst 2006). Moderne Feldbussysteme erlauben eine Identifikation von an den Feldbus angeschlossenen Geräten, indem Kennungen, Versionsnummern und Herstellerbezeichnungen über einen Feldbus ausgelesen werden, wie beispielsweise bei dem Automationsbus sercos III (Sercos International 2012a).

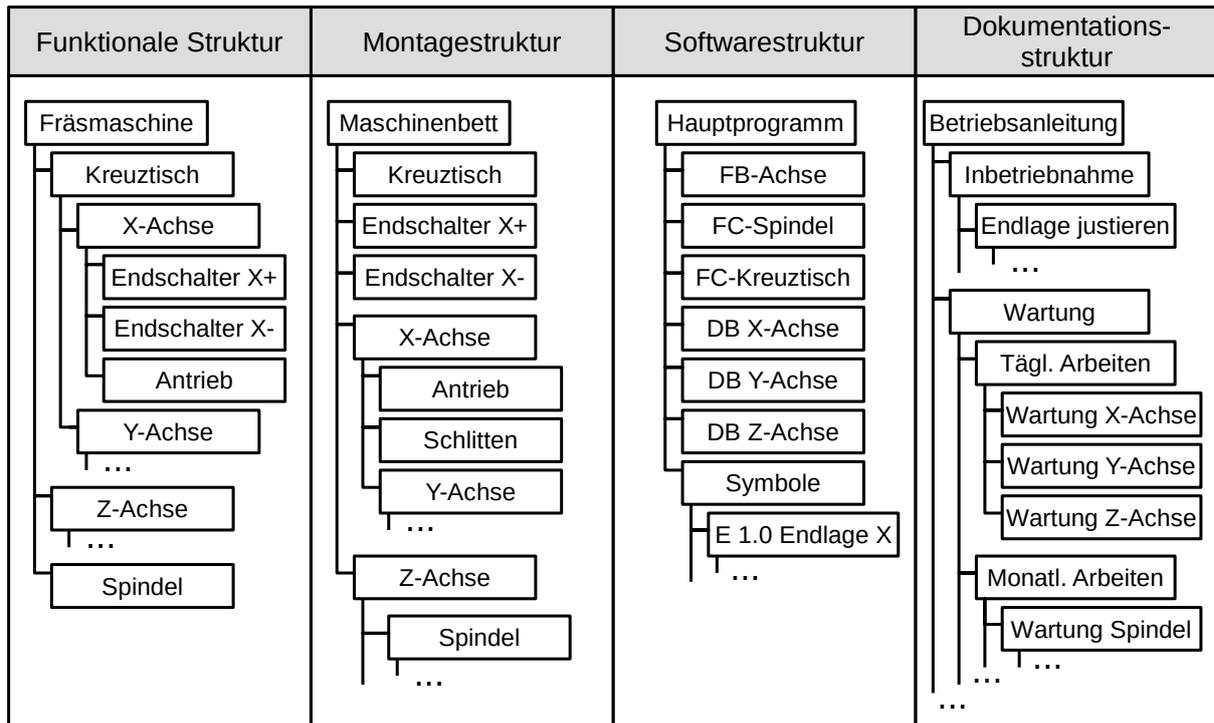
Weiterhin existieren Ansätze zur Modellierung des Steuerungssystems der Maschine als mechatronisches Modul (Abel 2011). Damit wird eine einheitliche interne Softwarearchitektur erreicht. Der mechatronische Modul-Ansatz wird um weitere informationstechnische Eigenschaften, wie les- und beschreibbaren Speicherplatz für Moduldaten sowie um interne Rechenkapazität erweitert. Ziel ist die Modellierung von intelligenten mechatronischen Modulen, welche eine Integration in weitere maschinenweite Softwaresysteme erleichtern. Dazu werden weitere, parallel zum Feldbus nutzbare Kommunikationsschnittstellen auf Web-Service-Basis hinzugefügt (Abel, Klemm et al. 2011). Damit wird es möglich Module nicht nur über den Feldbus zu identifizieren, sondern auch selbstbeschreibende Eigenschaften zu integrieren und Dokumente, welche Funktion und Schnittstellen von Modulen beschreiben, zu beherbergen.

Informationstechnische Modellierung von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen

Für die Modellierung von rekonfigurierbaren Maschinen existieren verschiedene Ansätze, welche dem jeweiligen Fortschritt der Informationstechnik angepasst sind (Michaelis 2002), (Lorenzer 2010), (Weber 2007). Weitere Ansätze sind nicht zwingend auf rekonfigurierbare Maschinen beschränkt, können aber zur Modellierung hinzugezogen werden (Schaich 2001). Es ist davon auszugehen, dass zur Modellierung nicht nur ein einzelnes Modell ausreichend sein wird, sondern eher mehrere miteinander verknüpfte Modelle notwendig sein werden (Lewek 2005), (Drath 2010), (Lutz und Sperling 1997). Der Vorteil dieser Modellierungsweise liegt darin, dass domänenspezifische Beschreibungssprachen in Kombination genutzt werden können. Weiterhin ist die Beschreibungsmethode erweiterbar und kann dem jeweiligen Stand der Technik angepasst werden.

Zur Beschreibung der **Maschinenstruktur** kann das in Abbildung 3.12 vorgestellte Modell dienen. Dieses Modell ist zwar auf Fräsmaschinen begrenzt, kann jedoch bei Bedarf um zusätzliche Module und Verbindungen erweitert werden.

Ein Informationsmodell zur Beschreibung baukastenbasierter Fertigungseinrichtungen entwirft Lewek (2005). Darin werden funktionales Modell, Montage- und Softwaremodell zu einem **mechatronischen Gesamtinformationsmodell** kombiniert. Abbildung 3.17 zeigt beispielhaft die dazu verwendeten Basismodelle.



FB: Funktionsbaustein; FC: Funktion; DB: Datenbaustein; E: Steuerungseingang

Abbildung 3.17: Informationsmodell für baukastenbasierte Fertigungseinrichtungen (nach: (Lewek 2005))

Im SFB 467 (Westkämper 2006) wurde ein hierarchisches, mechatronisches Modell einer rekonfigurierbaren Maschine entworfen. Das Modell verknüpft die mechanischen, elektronischen und informationstechnischen-Komponenten zu mechatronischen Modulen. Eine mögliche Konfiguration wird darin als Konfigurationsmuster bezeichnet (siehe auch Abbildung 3.18).

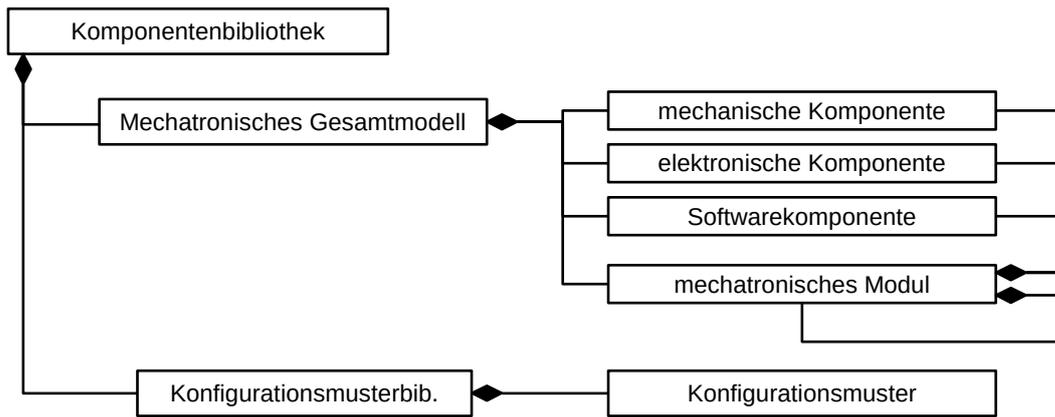


Abbildung 3.18: Mechatronisches Gesamtmodell (nach: (Westkämper 2006))

Ein Modell zur Beschreibung von maschinennahen Steuerungsfunktionen entwirft Lutz (1999). Hierbei werden funktionale Einheiten von Maschinen mit Steuerungsfunktionen verknüpft. Durch die Kopplung von Steuerungsfunktionen an Maschinenelemente wird ferner auch die Erstellung und von Steuerungsprogrammen für Baukastensysteme ermöglicht (siehe auch Abbildung 3.19).

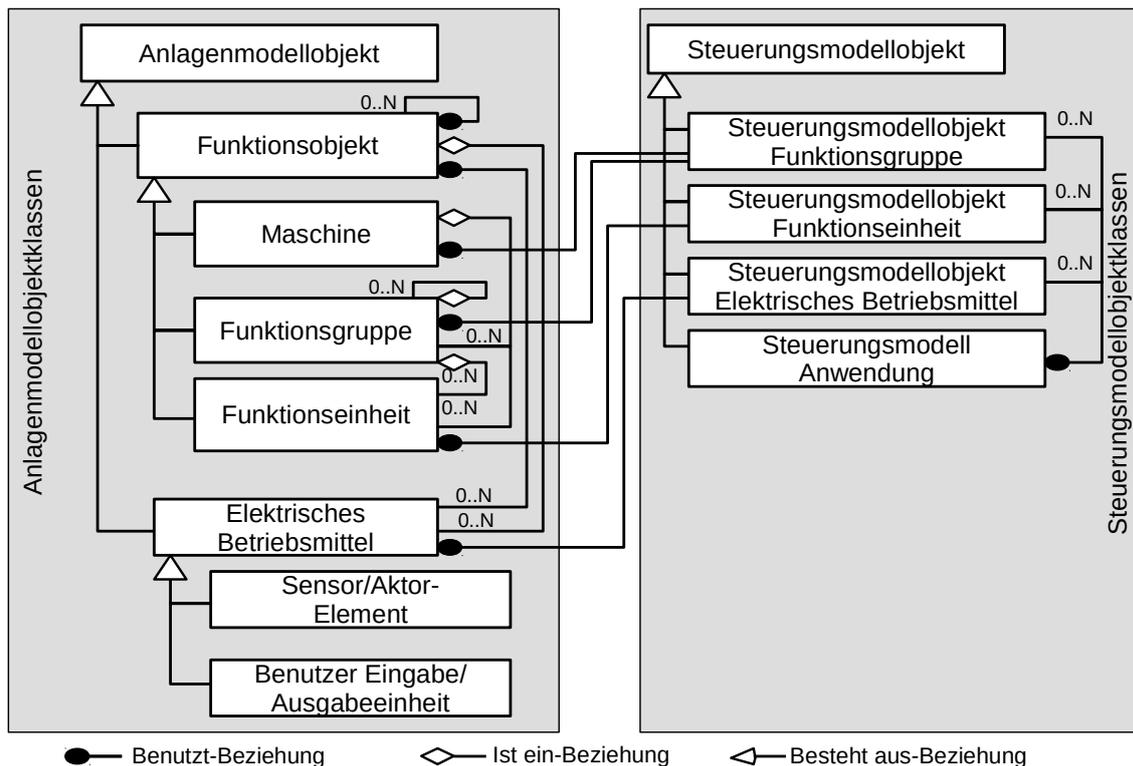


Abbildung 3.19: Verknüpfung von Maschinen mit einem Steuerungsmodell (nach: (Lutz 1999))

Ein Modell zur Beschreibung **funktionaler Eigenschaften** von Automatisierungsgeräten entwirft (Selig 2011). Zugrunde liegt dabei ein logisches Gerätemodell, welches physikalische und applikationsspezifische Eigenschaften von Feldgeräten berücksichtigt.

Der Beschreibung von Fertigungsaufgaben im Bereich der wandlungsfähigen Produktion widmet sich Hoffmeister (2013). Darin entwirft er zur Abbildung von Fertigungsaufgaben ein durchgängiges Datenmodell bestehend aus Auftrags-, Material- und Produktspezifikationen.

3.6 Inbetriebnahme von traditionell aufgebauten Maschinen

Die **Inbetriebnahme** stellt innerhalb des Lebenszyklus einer Maschine einen wesentlichen Vorgang dar. Während des **Inbetriebnahmeprozesses** findet der Übergang von einer neu aufgebauten Maschine, welche sich im Stillstand befindet, hin zu einer für die Produktion bereiten Maschine statt. Abbildung 3.20 stellt den Lebenszyklus einer Maschine in einem Phasenmodell dar.

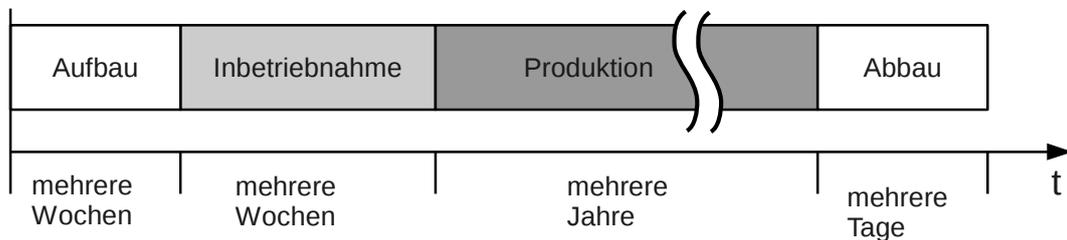


Abbildung 3.20: Zeitlicher Verlauf des Lebenszyklus einer Maschine (Phasenmodell) (nach (Koren 2006))

Die Inbetriebnahme ist kurz gefasst die Summe aller Tätigkeiten, um eine Bearbeitungsmaschine in einen für die Produktion bereiten Zustand zu versetzen. Der Begriff „Inbetriebnahme“ unterliegt keiner Standardisierung und wird im alltäglichen Gebrauch oft ambivalent eingesetzt. Daher existieren in der Literatur sowie in der Praxis eine Vielzahl von Definitionen und Ansätzen, um die Inhalte der Tätigkeiten genauer zu bestimmen (siehe (VDI 1990), (Lacour 2012), (Steuer 1991)). Darüber hinaus gibt es weitere Definitionen, die ebenfalls, je nach Fachgebiet unterschiedlich sein können (Lacour 2012). Des Weiteren werden im deutschen sowie im englischen Sprachraum zahlreiche Synonyme wie bspw. Anlauf, Inbetriebsetzung, Ramp-Up, Commissioning und Start-up genutzt, welche bisweilen Überschneidungen aufweisen oder Teilbereiche abdecken.

Die Inbetriebnahme von Maschinen wird heutzutage noch manuell von einem oder mehreren Experten durchgeführt. Die dazu notwendigen Tätigkeiten sind komplex und beruhen zum großen Teil auf individuellem Expertenwissen. Darüber hinaus liegen die für eine Inbetriebnahme notwendigen Tätigkeiten bisher nicht in strukturierter und formalisierter Weise vor.

In der Vergangenheit wurden die bei einer Inbetriebnahme vorzunehmenden Tätigkeiten bisher „im Vergleich zu anderen Fachgebieten des Maschinen- und Anlagenbaus nur wenig wissenschaftlich betrachtet“ (Weber 2006). Die Gründe hierfür liegen in der starken Inter-

disziplinarität der Thematik, sowie darin, dass konkrete Tätigkeiten, aufgrund mangelnder Standardisierung, nur für spezielle Anlagen geeignet sind.

Ein früher Ansatz zu Beschreibung der Inbetriebnahme lautet (VDI 1990):

„In der betrieblichen Praxis fällt der Inbetriebnahme die Aufgabe zu, die montierten Produkte termingerecht in Funktionsbereitschaft zu versetzen, ihre Produktionsbereitschaft zu überprüfen und soweit sie nicht vorliegt oder nicht gesichert ist, diese herzustellen.“

Zur Inbetriebnahme zählen alle Tätigkeiten beim Hersteller und beim Anwender, die zum Ingangsetzen und zur Sicherstellung der korrekten Funktion von zuvor montierten und auf vorschriftsmäßige Montage kontrollierten Baugruppen, Maschinen und komplexe Anlagen zu zählen sind. Als Baugruppen werden in diesem Zusammenhang auch die Steuerung, in sich geschlossene Teile der Steuerung, die Steuerungssoftware bzw. Module der Steuerungssoftware verstanden.“

Abweichend dazu versteht die Maschinenrichtlinie (EU 2006) unter dem Begriff Inbetriebnahme *„Die erstmalige bestimmungsgemäße Verwendung einer Maschine“* und damit eher die erstmalige Verwendung der Maschine beim Kunden.

Weber (2006) bestimmt stattdessen den Begriff der Inbetriebnahme als *„Überführung einer Anlage aus dem Ruhezustand in den Dauerbetriebszustand“*.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde folgende Definition der Inbetriebnahme gewählt:

Inbetriebnahme: „Verbund von Tätigkeiten, um eine fertig montierte Anlage in Betriebsbereitschaft zu versetzen“ und der *„Nachweis der Leistungsfähigkeit“* (nach (Lacour 2012) und (Dominka 2007)).

Die Aussage „fertig montiert“ bezieht sich ebenfalls auf Software in der Maschine. Die reine Entwicklung der Steuerungsprogramme gehört demnach eigentlich nicht zu den Tätigkeiten der Inbetriebnahme, sondern geschieht vorab.

Das Vorgehen bei einer Inbetriebnahme ist je nach Anlage stark unterschiedlich. Die durchzuführenden Aufgaben und die zu erreichenden Ziele sind allerdings stets ähnlich. Abbildung 3.21 zeigt eine Übersicht der Aufgaben und Zielstellungen während der Inbetriebnahme.

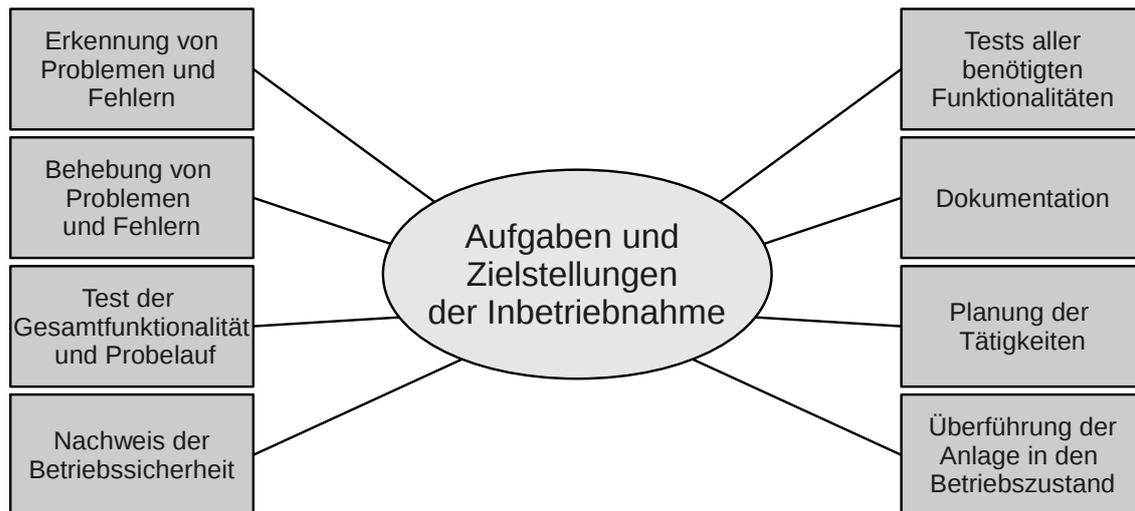


Abbildung 3.21: Aufgabenstellung und Zielstellungen der Inbetriebnahme (angelehnt an (Weber 2006))

Verschiedene Faktoren haben einen Einfluss auf den Erfolg der Inbetriebnahme. Die Gründe hierfür in einer starken Abhängigkeit von der Gestalt des Systems. Darüber hinaus ist die Inbetriebnahme ein eher dynamisches Vorgehen, bei dem mit nicht planbaren Verzögerungen aufgrund unerwartet auftretender Probleme gerechnet werden muss. Weiterhin sind die an der Inbetriebnahme beteiligten Personen ein erfolgsentscheidender Faktor. Abbildung 3.22 zeigt eine Übersicht dieser Faktoren.

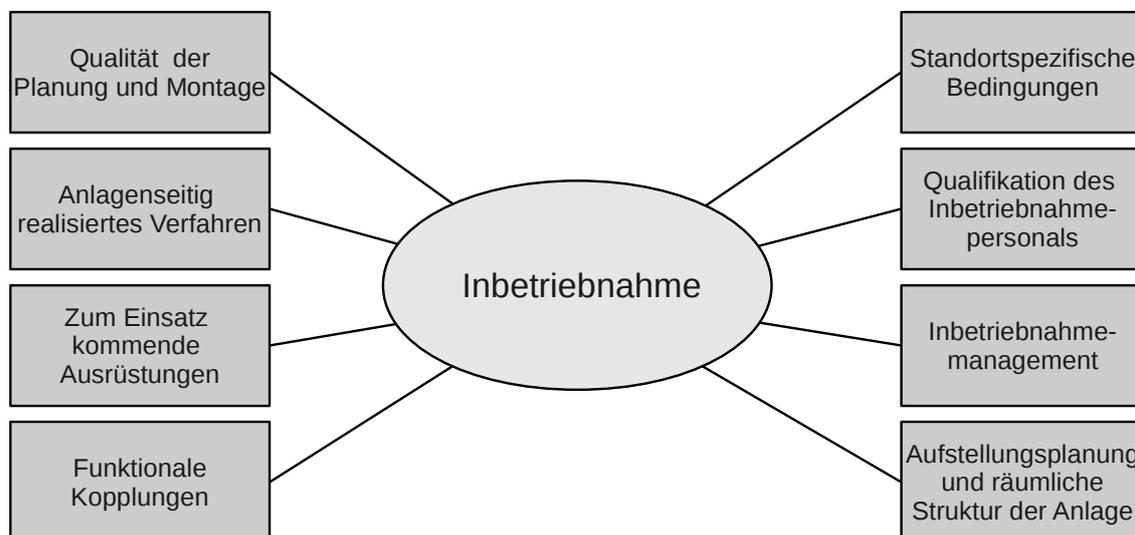


Abbildung 3.22: Einflussfaktoren auf die Inbetriebnahme verfahrenstechnischer Anlagen (nach (Weber 2006))

Bei einem Produktionssystem macht die Inbetriebnahme 15% bis 20% der Lebenszeitkosten einer Maschine aus. Davon wird ein Großteil für die Inbetriebnahme von Elektronik und Steuerungstechnik und die Korrektur der enthaltenen Softwarefehler aufgewendet (Wünsch 2008).

Im Graduiertenkolleg „Anlaufmanagement 1491“ wird der Anlauf von größeren Produktionssystemen untersucht. Dort werden vorrangig organisatorische und systemtheoretische Aspekte des Produktionsanlaufs analysiert (Gartzen 2012), (Tücks 2010).

Im Rahmen eines VDI-Arbeitskreises wurde die Inbetriebnahme komplexer Maschinen untersucht (VDI 1990). Schon damals wurde erkannt, dass die Inbetriebnahmezeit mit steigender Maschinenkomplexität rasant zunimmt und dass u.a. eine **Vorab-Inbetriebnahme** von Baugruppen helfen kann, die Inbetriebnahmezeit zu verkürzen.

Die klassische Inbetriebnahme eines Materialflusssystems wird von Trautmann und Lanfer (2010) anhand eines Modells mit sieben Phasen untersucht. Für ein größeres Materialflusssystem müssen demnach 3-8 Wochen Inbetriebnahmezeit eingeplant werden.

Virtuelle Inbetriebnahme

Mit virtueller Inbetriebnahme (VIBN) wird die „Hardware in the Loop Simulation“ (HiLS) von Maschinen und Anlagen bezeichnet. Darunter wird die Inbetriebnahme eines realen Steuerungssystems anhand eines Simulationsmodells der Maschine verstanden. Im Idealfall ist das Simulationsmodell echtzeitfähig und kann direkt über den Feldbus mit dem Steuerungssystem verbunden werden (Röck 2011).

Indem mit dem Testen des Steuerungsprogramms begonnen werden kann, bevor die eigentliche reale Maschine verfügbar ist, kann die Entwicklungszeit von Maschinen und Anlagen drastisch reduziert werden. Abbildung 3.23 zeigt den Aufbau bei der virtuellen Inbetriebnahme.

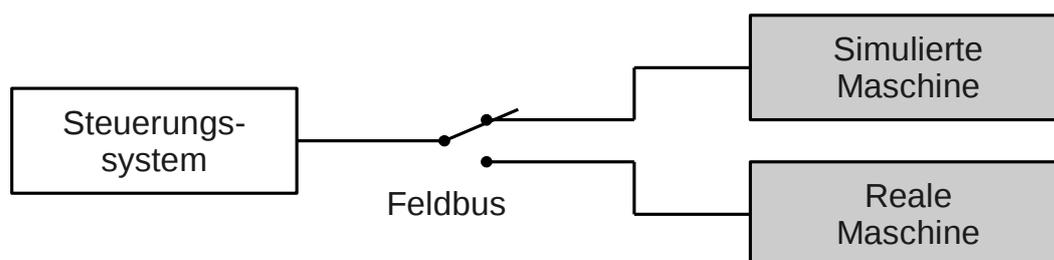


Abbildung 3.23: Virtuelle Inbetriebnahme des Steuerungssystems

Sobald die Steuerungsprogramme korrekt ablaufen, kann das Steuerungssystem an die reale Anlage angebunden werden. Damit können neben der Erkennung von Programmierfehlern und Kollisionen auch Fehlerreaktionen im Voraus getestet werden (Kufner 2012).

Trotz der Reduktion der Entwicklungszeit durch die virtuelle Inbetriebnahme, kann die finale Inbetriebnahme nur an der realen, aufgebauten Anlage erfolgen. Nur hier sind alle final in der Maschine eingesetzten Komponenten vorhanden und eventuelle Probleme in deren Zusammenspiel können behoben werden.

Kapitel 4

Anforderungen an die automatisierte Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen

Damit Rekonfigurationen von Bearbeitungsmaschinen in Zukunft schneller und einfacher durchgeführt werden können, soll die Inbetriebnahme dieser Maschinen in Zukunft automatisiert werden können. In diesem Kapitel werden daher gesammelte, zu erfüllende Anforderungen an ein automatisiertes Inbetriebnahmesystem für rekonfigurierbare Bearbeitungsmaschinen vorgestellt.

Primäre Ziele sind die Reduktion von Stillstandszeiten bei Rekonfigurationen sowie die Reduktion der Herstellungskosten. Die Kostenreduktion soll durch Verringerung der Aufwände für die Inbetriebnahme und der damit einhergehenden, früher erreichten Produktionsreife erreicht werden.

Die Inbetriebnahme erfordert tiefe Kenntnisse über technische Zusammenhänge und die aus Veränderungen resultierenden Seiteneffekte. Das für die Inbetriebnahme erforderliche Expertenwissen soll daher ebenfalls reduziert werden.

Die erarbeiteten Anforderungen wurden in die Kategorien allgemeine, zeitliche und funktionale Anforderungen gegliedert, welche in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden.

4.1 Allgemeine Anforderungen

Ein automatisiertes Inbetriebnahmesystem für rekonfigurierbare Bearbeitungsmaschinen soll die unten genannten, allgemeinen Eigenschaften aufweisen:

Eignung für den Einsatz innerhalb eines wandlungsfähigen Produktionsumfeldes zur Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen, welche aus mechatronischen Modulen aufgebaut sind.

Einfachheit im Einsatz: Die Nutzung muss auch für Personen möglich sein, die keine Experten auf dem spezifischen Fachgebiet sind. Die Vorgänge müssen daher auch vom Endanwender des Systems durchgeführt werden können.

Hohe **Zuverlässigkeit** bei späteren Produktionsaufgaben: Ein einmal in Betrieb genommenes Maschinensystem soll seine Funktionalität während der gesamten nachfolgenden Produktionsphase bis zur nächsten Rekonfiguration behalten. Die Produktion soll des Weiteren nicht durch Rückwirkungen oder Seiteneffekte des Inbetriebnahmesystems beeinträchtigt werden.

Es soll weiterhin eine hohe Zuverlässigkeit beim Auffinden einer Inbetriebnahmestrategie erzielt werden. Dies betrifft vor allem die **Wiederholbarkeit** der Ergebnisse.

Das System soll eine ausreichende **Adaptivität** aufweisen, um ohne wesentliche Anpassungen für zukünftige Produktionsaufgaben geeignet zu sein.

Entwickelte Inbetriebnahmekonzepte sollen unabhängig von der eingesetzten Prozesstechnologie oder der Modularisierungsstrategie des Zielsystems sein, um eine Übertragbarkeit auf verschiedene Anwendungsbereiche sicher zu stellen. Die Konzepte sollen daher **universell** für verschiedene Zielszenarien eingesetzt werden können.

Die Konzepte sollen **erweiterbar** sein und nicht auf starren und unflexiblen Strukturen beharren. Gewünscht ist daher ein flexibles System, welches dynamisch erweitert werden kann.

Das resultierende System soll ein für Produktionssysteme geeignetes, **echtzeitfähiges Verhalten** aufweisen, um für verschiedene Produktionsanwendungen einsetzbar zu sein.

Bei der Umsetzung sollen primär in der Praxis erprobte **Standardtechnologien** zum Einsatz kommen. Dadurch wird eine Umsetzung in der Praxis erleichtert und ein herstellerübergreifender Einsatz ermöglicht.

Des Weiteren sollen die Konzepte **herstellerunabhängig** anwendbar sein und somit die Integration von Modulen verschiedener Herstellern ermöglichen.

4.2 Anforderungen an den zeitlichen Rahmen einer Rekonfiguration

Nach einem Umbau soll eine rasche Wiederinbetriebnahme einer rekonfigurierbaren Maschine möglich sein. Eine Umfrage im Rahmen des SFB 467 hat ergeben, dass eine Stillstandszeit zwischen Rekonfigurationen von weniger als 2 Stunden noch tragbar für den Endanwender ist (Heisel und Meizner 2006). Weitere Analysen zeigen, dass die gesamte Zeit für eine Rekonfiguration maximal im Bereich von Stunden oder höchstens wenigen Tagen liegen sollte, damit die Fortsetzung der Produktion nicht unnötig hinaus verzögert wird (Toonen, Lappe et al. 2014).

Die Stillstandszeit ist vom Maschinenkonzept abhängig und setzt sich aus der für die Rekonfiguration notwendigen Zeit sowie der Inbetriebnahmezeit zusammen. Bei der mechanischen Rekonfiguration müssen gegebenenfalls große und schwere Komponenten mit einem Kran bewegt und zusammengefügt werden. Je nach Anwendungsfall kann hierfür ein Zeitraum von einigen Minuten bis zu einigen Stunden angesetzt werden.

Damit die Stillstandszeit der Maschine während einer Rekonfiguration nicht wesentlich erhöht wird, soll das für die Inbetriebnahme notwendige Zeitfenster ebenfalls im **Zeitraum von Minuten bis zu wenigen Stunden** liegen. Ein Inbetriebnahmesystem soll folglich möglichst rasch in der Lage sein, eine Maschine in einen betriebsbereiten Zustand zu versetzen.

4.3 Funktionale Anforderungen an die Inbetriebnahmeautomatisierung

Das Inbetriebnahmesystem muss den initialen Aufbau sowie die Adaption der Maschine an neue Produktionsbedingungen durch Tausch, Entfernen oder Hinzufügen von Modulen ermöglichen. Die Inbetriebnahmeautomatisierung soll nicht an einen Typ oder an eine Baureihe von Maschinen gebunden sein, sondern beliebige Maschinenaufbauten aus mechanischen Modulen unterstützen.

Der Nutzer des Inbetriebnahmesystems soll durch den gesamten Inbetriebnahmeprozess geführt werden. Die Führung des Nutzers soll zur Erhöhung der Nutzerfreundlichkeit mit Hilfe eines graphischen Bediensystems erfolgen.

Weitere in der Maschine vorhandene Softwaresysteme sollen ebenfalls neben dem zentralen Steuerungssystem in den Inbetriebnahmeprozess mit eingebunden werden. Dies gilt insbesondere für modulinterne Software- und Steuerungssysteme sowie die graphische Bedienschnittstelle der Maschine. Da davon auszugehen ist, dass die Komplexität der maschineninternen Informationstechnik weiter ansteigt, ist somit eine vollständige Integration gewährleistet.

Darüber hinaus soll die Inbetriebnahmeautomatisierung erweiterbar gestaltet sein, sodass diese an neue Technologien angepasst werden kann. Im besten Fall ist das Inbetriebnahmesystem unabhängig von den eingesetzten Prozesstechnologien und der Maschinenkonstruktion.

Das Inbetriebnahmesystem soll den Inbetriebnehmer interaktiv bei seiner Tätigkeit unterstützen. Darüber hinaus soll das Inbetriebnahmesystem Tätigkeiten autonom durchführen können und den Inbetriebnehmer nur in Problemfällen zu den nächsten Schritten befragen.

Jede Veränderung in der Modulkonfiguration einer Maschine hat ebenfalls eine Veränderung der Funktionalität der Maschine zur Folge. Daher müssen alle internen Systeme, abhängig vom neuen Aufbau der Maschine, in den Inbetriebnahmeprozess mit eingebunden werden können.

Für die Inbetriebnahme sollen keine im Vorfeld erstellten Parametrierungen oder auf festen Mustern basierende Vorgänge genutzt werden. Aufgrund der bei vielen Modulen rasch

ansteigenden Anzahl an Kombinationen kann nicht für jede Kombinationsmöglichkeit ein vorab gespeichertes Vorgehen herangezogen werden. Das Vorgehen für die Inbetriebnahme soll stattdessen dynamisch und abhängig von den vorhandenen Modulen und der benötigten Maschinenfunktionalität generiert werden.

Das Endsystem soll weiterhin an Bedingungen angepasst werden können, die durch einen zukünftigen Technologiesprung entstehen, um für zukünftige Einsatzszenarien gerüstet zu sein. Weiterhin soll die Automatisierung verschiedene Modularisierungskonzepte unterstützen, d.h. unabhängig vom eigentlichen Aufbau der Maschine sein.

Während der Inbetriebnahme sollen wenige manuelle Tätigkeiten notwendig sein. Die Interaktion mit dem Anwender soll über ein adaptierbares graphisches Bediensystem mit kontextabhängig generierten Inhalten erfolgen. Automatisierbare Tätigkeiten sollen automatisiert durchführbar sein. Der Inbetriebnehmer soll bei Problemfällen mit einbezogen werden können. Sind manuelle Justierungen oder zu überwachende Vorgänge notwendig dann, soll das Inbetriebnahmesystem diese mit dem Inbetriebnehmer abstimmen.

Weiterhin sollen bereits bestehende Softwaresysteme in den Inbetriebnahmevorgang integriert werden können. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass diese Softwaresysteme eine entsprechende Adaptierbarkeit aufweisen. Ebenfalls soll die Möglichkeit zur Prüfung der Maschinenkonfiguration zur Erkennung ungeeigneter Modulkonfigurationen, potentieller Kollisionen, vorhandener Energieengpässe oder gar fehlender Module usw. gegeben sein.

Kapitel 5

Stand der Technik und der Forschung

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik und der Forschung analysiert und bewertet. Die zuvor in Kapitel 4 abgeleiteten Anforderungen dienen dabei als Maßstab zur Bewertung des Stands der Technik.

Bisher existieren keine Konzepte, welche direkt mit einer automatisierbaren Inbetriebnahme von Maschinen, wie sie im vorangegangenen Kapitel beschrieben wurde, verglichen werden können. Zur Bewertung des Stands der Technik und der Forschung werden daher in den folgenden Abschnitten verwandte und überlappende Forschungsbereiche herangezogen. Zur Bewertung dienen folgende Kriterien:

- Liegt der Fokus auf rekonfigurierbare Maschinen?
- Liegt der Fokus auf wandelbaren Produktionssystemen?
- Wird interne Informationstechnik berücksichtigt?
- Wird die Problematik der Inbetriebnahme berücksichtigt?
- Wird eine automatisierte Inbetriebnahme berücksichtigt?
- Ist ein herstellerübergreifender Einsatz möglich oder vorgesehen?
- Werden die Eigenschaften von verteilten Softwaresystemen berücksichtigt?

5.1 Adaptionenverfahren für konfigurierbare und rekonfigurierbare Maschinen

Im Bereich der beim Aufbau konfigurierbaren und dem Bereich der bei Bedarf rekonfigurierbaren Systeme existieren verschiedene Ansätze zur Adaption maschineninterner Informationstechnik. Diese werden im Folgenden untersucht und bewertet. Zusätzlich werden einige Verfahren zur Erstellung einer Steuerungskonfiguration untersucht, da dies eine elementare Tätigkeit während der Inbetriebnahme darstellt.

Ein Konzept für ein dynamisch konfigurierbares Steuerungssystem für modulare Transferstraßen stellt Ullrich (2006) vor. Dazu wurde aufbauend auf den im Projekt HIPARMS spezifizierten Modulen für Transfermaschinen ein auf der OSACA-Steuerungsarchitektur basierendes Steuerungssystem entworfen. Die Parametrierung des Steuerungssystems für eine bestimmte Maschinenkonfiguration muss manuell erfolgen. Ein Konfigurierungswerkzeug unterstützt den Bediener während der Inbetriebnahme. Die Lösung ist allerdings beschränkt auf den Anwendungsfall von Transfermaschinen, betrachtet den Vorgang für die Inbetriebnahme nicht gesondert und integriert neben OSACA-Architekturobjekten keine weitere maschineninterne Informationstechnik.

Eine Modularisierungsarchitektur sowie ein Planungswerkzeug für Rekonfigurationen auf Basis eines Expertensystems definiert Michaelis (2002). Erstellte Maschinenkonfigurationen können anhand eines Simulationsmodells evaluiert werden. Modulinterne Informationstechnik oder die für eine Inbetriebnahme notwendigen Tätigkeiten werden allerdings nicht gesondert berücksichtigt.

Die Forschungsarbeiten im DFG-Schwerpunktprogramm „Kleine Werkzeugmaschine“ fokussieren sich auf ein Modularisierungskonzept für eine rekonfigurierbare Maschine mit kleinem Bauraum (Wulfsberg 2014). Jedoch wird die Inbetriebnahme konzeptionell nicht gesondert betrachtet.

Einige Module einer rekonfigurierbaren Werkzeugmaschine werden von Lorenzer (2010) erstellt und in verschiedenen Konfigurationen vermessen. Konfigurationsvarianten können zuvor in einer Simulationsumgebung evaluiert werden. Außerdem werden Ansätze zur Generierung von Steuerungskonfigurationen vorgestellt. Die Lösung betrachtet die Inbetriebnahme nur am Rande. Die NC-Steuerungskonfiguration sowie Korrekturparameter werden anhand eines mechatronischen Maschinenmodells aus einem Achsbaukasten generiert. Zudem muss jede abweichende Maschinenkonfiguration initial manuell in Betrieb genommen werden.

Im Rahmen des Transferbereiches 59 „Wandlungsfähigkeit in der variantenreichen Serienfertigung“ wurde eine modellbasierte Konfigurierungsmethode für NC-Steuerungen in rekonfigurierbaren Werkzeugmaschinen auf Basis von mechatronischen Modulen erstellt (Kircher 2011). Anhand der baulichen Struktur der Maschine sowie anhand von Konfigurationsmustern wird mit einem Selbstadaptionsmechanismus eine Konfiguration für die NC-Steuerung abgeleitet. Ein Konfigurierungskordinator steuert die Vorgänge bei der Inbetriebnahme des Gesamtsystems anhand eines Zustandsmodells abhängig von den Zuständen der Module. Die Lösung ist beschränkt auf den Anwendungsfall von numerisch gesteuerten Maschinen. Die Steuerung kann nur an Maschinenkonfigurationen adaptiert werden, welche als Konfigurationsmuster hinterlegt sind. Mechatronische Module können nur genutzt werden, wenn diese zuvor im Informationsmodell berücksichtigt wurden. Im Weiteren findet keine Berücksichtigung von zusätzlicher, modulinterner Informationstechnik statt. Tabelle 5.1 bewertet die relevanten Vorarbeiten in einer tabellarischen Übersicht.

| Kriterium | (Ulrich 2006) | (Michaelis 2002) | (Wulfsberg 2014) | (Lorenzer 2010) | (Kircher 2011) |
|---|---------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|
| Fokus rekonfigurierbare Maschinen | + | + | + | + | + |
| Fokus wandelbare Produktionssysteme | o | - | - | - | o |
| Berücksichtigung interner Informationstechnik | o | - | - | - | o |
| Berücksichtigung Inbetriebnahme | o | - | - | o | + |
| Berücksichtigung automatisierter Inbetriebnahme | - | - | - | - | o |
| Herstellerübergreifend anwendbar | + | + | o | o | + |
| Berücksichtigung verteilter Systeme | - | - | - | - | o |

Legende: +: erfüllt; -: nicht erfüllt; o: teilweise erfüllt

Tabelle 5.1: Bewertung bestehender Adaptionsverfahren

Im Bereich der Adaptionsverfahren für konfigurierbare und rekonfigurierbare Maschinen existiert bisher nur eine unzureichende Betrachtung der Inbetriebnahme. Weiterhin wird die interne Informationstechnik, welche für eine Inbetriebnahmeunterstützung benötigt wird, bisher ebenfalls noch vernachlässigt. Zusammenfassend lässt sich schließen, dass die Inbetriebnahme auf diesem Fachgebiet bisher unzureichend betrachtet wurde.

5.2 Verteilte Systeme im Umfeld wandlungsfähiger Produktion

Im Folgenden werden Ansätze für verteilte Systeme im Kontext der wandlungsfähigen Produktion untersucht. Im Anschluss werden die Konzepte verglichen und bewertet.

Agentensysteme werden in der Forschung häufig für Automatisierungssysteme mit dezentraler Infrastruktur genutzt. Vor allem, wenn diese Automatisierungssysteme ein dynamisches Verhalten aufweisen und schwer zentral zu koordinieren sind, erscheinen Agentensysteme geeignet.

Agentensysteme werden häufig mit holonischen (Holon: griech. Teil eines Ganzen) Systemen in Verbindung gebracht (Gruver, Kotak et al. 2003). Diesen Ansatz verfolgt Glanzer, Schmidt et al. (2003), indem ein holonisches Fertigungssystem inklusive einer Fertigungssteuerung mit den Konzepten der Orchestrierung verbunden wird. Die Ansätze betrachten jedoch weder tiefe technologische Randbedingungen von rekonfigurierbaren Maschinen, die dafür notwendigen Steuerungssysteme, noch die Behandlung von deterministischen Kommunikationswegen. Zudem wird die Inbetriebnahme nicht gesondert betrachtet.

Einen agentenähnlichen Ansatz stellt Weber (2007) zur Unterstützung der Wandlungsfähigkeit durch innovative Softwaresysteme vor. Dazu wird ein modulares Produktionssystem entworfen und mit Hilfe von autarken, selbsterkennenden, selbstkonfigurierbaren Softwarekomponenten automatisiert. Die Lösung analysiert primär modulare Montagesysteme mit flexiblen Transportwegen.

Konzepte für serviceorientierte Paradigmen finden ebenfalls Einzug in verschiedene Aspekte der Produktionstechnik (Jammes und Smit 2005), (Mínguez 2012). Als Basistechnologie werden dabei in der Regel auf Web-Services aufsetzende Systeme eingesetzt (Phaithoonbuathong, Monfared et al. 2010). Im EU-Projekt SOCRADES (de Souza, Spiess et al. 2008) wird eine serviceorientierte Architektur zur Integration intelligenter Geräte und Prozessen angestrebt. Die Integrationsarchitektur stellt eine Infrastruktur von Diensten für die Produktion sowie zur Ausführung von Geschäftsprozessen bereit.

Im SOCRADES Umfeld wurden weitere für den Stand der Technik relevante Forschungsarbeiten durchgeführt: Modellierung und Ausführung von Herstellungsprozessen mit Hilfe von Orchestrierung (Jammes, Smit et al. 2005); die Abstraktion von technologischen Details von Maschinen durch einen Normalisierungsprozess (Gilart-Iglesias, Maciá-Pérez et al. 2007); die Integration von Geometrie- und Kinematikbeschreibungen gepaart mit Web-Service-Beschreibungen (Cachapa, Harrison et al. 2011). Eine weitere Arbeit widmet sich in diesem Kontext rekonfigurierbaren Fertigungssystemen und stellt eine serviceorientierte und modulare Steuerungsarchitektur auf Basis von Petri-Netzen bereit (Mendes, Leitão et al. 2008).

Die untersuchten Quellen befinden sich im Umfeld der wandlungsfähigen Produktion. Allerdings berücksichtigen diese keine rekonfigurierbaren oder änderbaren Maschinenstrukturen. Des Weiteren werden keine für Bearbeitungsmaschinen geeigneten, echtzeitfähigen Kommunikationsmittel vorgesehen. Eine Berücksichtigung der Inbetriebnahme findet ebenfalls nur unzureichend statt. Tabelle 5.2 bewertet die untersuchten Vorarbeiten in einer tabellari-schen Übersicht.

| Kriterium | (Gruver, Kotak et al. 2003) | (Glanzer, Schmidt et al. 2003) | (Weber 2007) | (Phaithoonbuathong, Monfared et al. 2010) | (de Souza, Spiess et al. 2008) | (Jammes, Smit et al. 2005) | (Gilart-Iglesias, Maciá-Pérez et al. 2007) | (Mendes, Leitão et al. 2008) | (Cachapa, Harrison et al. 2011) |
|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------|---|--------------------------------|----------------------------|--|------------------------------|---------------------------------|
| Fokus rekonfigurierbare Maschinen | - | - | - | - | - | - | - | o | o |
| Fokus wandelb. Produktionssysteme | o | o | + | o | o | + | o | + | + |
| Berücksichtigung int. Inf.techn. | + | + | + | + | + | + | o | + | + |
| Berücksichtigung der Inbetriebnahme | - | - | + | o | - | o | - | o | o |
| Ber. automatisierter Inbetriebnahme | - | - | o | o | - | o | - | - | - |
| Herstellerübergreifend anwendbar | o | + | + | + | + | + | + | + | + |
| Berücksichtigung verteilter Systeme | + | + | + | + | + | + | + | + | + |

Legende: +: erfüllt; -: nicht erfüllt; o: teilweise erfüllt

Tabelle 5.2: Bewertung verteilter Systeme im Umfeld wandlungsfähiger Produktion

5.3 Inbetriebnahmeunterstützung und automatisierte Inbetriebnahme

Im Folgenden wird der Stand der Technik hinsichtlich des Fokus auf die Inbetriebnahme sowie im Hinblick auf eine automatisierte Inbetriebnahme von Bearbeitungsmaschinen untersucht. Weiterhin werden Randgebiete untersucht, in welchen vergleichbare Mechanismen existieren. Ebenfalls betrachtet werden Ansätze aus dem Bereich „Plug and Produce“, da diese dem Konzept einer automatisierten Inbetriebnahme konzeptionell nahe stehen.

Im EU Projekt IDEAS (Onori, Lohse et al. 2012), welches auf den Erkenntnissen aus dem EUPASS Projekt aufbaut, werden Methoden des Plug-and-Produce für rekonfigurierbare und veränderbare Montagesysteme untersucht. Im Speziellen kommen Mehragentensysteme für die Integration verteilter Steuerungstechnik und von Handhabungssystemen zum Einsatz. Zusätzlich sollen Synergieeffekte aus dem Bereich der serviceorientierten Architekturen

genutzt werden. Die Ansätze sind für Montagesysteme mit moderaten Zeitanforderungen angepasst, daher können die Ansätze nicht direkt auf rekonfigurierbare Maschinensysteme angewandt werden. Darüber hinaus wird die Inbetriebnahme nicht gesondert betrachtet.

Für den Anlauf von größeren technischen Anlagen existieren bereits Fortschritte beispielsweise auf dem Gebiet der Verfahrenstechnik (Weber 2006) sowie im Rahmen des Anlauf-Managements für Montagesysteme (Gartzen 2012) und für die Automobilindustrie (Tücks 2010). Die Anlagen werden von einer Vielzahl von Personen geplant und aufgebaut. Der Anlauf wird ebenfalls von einer Personengruppe geplant und umgesetzt. Der Fokus dieser Vorarbeiten richtet sich auf den verfahrenstechnischen oder organisatorischen Bereich. Technische Schlussfolgerungen können daher nicht direkt auf den Fachbereich der rekonfigurierbaren Maschinensysteme übertragen werden.

Im Rahmen eines VDI-Arbeitskreises wurde die Inbetriebnahme komplexer Maschinen untersucht (VDI 1990). Für damalige Verhältnisse besitzt die Betrachtung einen wegweisenden Charakter, da die Inbetriebnahme als Vorgang angesehen wird, der bei der Entwicklung und dem Aufbau von Maschinen und Anlagen zwingend berücksichtigt werden muss. Die Vorarbeit legt methodische Grundsteine, wie Ansätze zur Vorabinbetriebnahme von Modulen, betrachtet jedoch weder während ihrer Lebenszeit änderbare Maschinen, noch interne Informationstechnik.

Die Inbetriebnahme von Materialflusssystemen im Kontext des „Internet der Dinge“ beschreibt (Trautmann und Lanfer 2010). Dort wird eine standardisierte Laufzeitumgebung auf Basis eines DPWS-Agentensystems hergestellt. Das Vorgehen basiert auf der inkrementellen und iterativen Inbetriebsetzung des Gesamtsystems. Wiederverwendbare und im Voraus getestete Module und Softwarebausteine reduzieren dabei den Test- und Inbetriebnahmeaufwand. Der Ansatz berücksichtigt heterogene und modulare Systeme, allerdings ausschließlich für den Fachbereich der Logistik- und Materialflusssysteme.

Steuer (1991) beschreibt die Entwicklung von Softwarewerkzeugen zur wissensbasierten Inbetriebnahme von komplexen Serienmaschinen. Zentraler Ansatz ist ein auf einem Regelsatz basierendes Expertensystem, welches die Inbetriebnehmer bei der Einstellung von Maschinenparametern unter Zuhilfenahme eines Regelwerkes unterstützt. Der Ansatz betrachtet keine rekonfigurierbaren Maschinenstrukturen und keine maschineninterne Informationstechnik.

Die automatisierte Inbetriebnahme von elektromechanisch gekoppelten Bewegungsachsen wird von Ketterer (1995) untersucht. Vordergründig werden die Struktur der Regelstrecke und der Regelungsverfahren sowie eine nachgelagerte, automatisierte Reglersynthese unter dem Einsatz von anwendungsnahen Sollprofilen betrachtet. Das Verfahren ist integrierbar in eine automatisierte Ablaufsteuerung, betrachtet aber nicht die weiteren Subsysteme innerhalb der Maschine.

Krug (2012) und Reinhart, Krug et al. (2010) beschreiben eine Lösung zur automatischen Konfiguration von Robotersystemen auf Basis von funktionsorientierten Plug&Produce-Modulen. Hierbei wurde die Modularisierung eines Robotersystems mit Peripherieaggregaten vorgenommen. Ein Konfigurationsmanager erstellt auf Grundlage eines Zustandsmodells und von Informationen aus Gerätebeschreibungen eine Zielkonfiguration für die Steuerung eines Roboters. Die Zielkonfiguration dient im Anschluss zur informationstechnischen Vernetzung von Funktionalitäten innerhalb der Module. Die Lösung ist beschränkt auf Robotersysteme und nutzt eine fest vorgegebene Konfigurationssequenz, die für den beschriebenen Anwendungsfall geeignet ist.

Der Anlauf von Montagesystemen wurde ebenfalls bereits in der Forschung untersucht. Dazu stellt Scrimieri, Oates et al. (2013) ein Konzept vor, um die in der Vergangenheit gemachten, persönlichen Erfahrungen des Inbetriebnehmers zu nutzen. Die dort gewonnen Informationen dienen, der Führung des Inbetriebnehmers durch den Anlaufprozess und der Unterstützung mit Empfehlungen für Einstellungen. Ein Steuerungssystem zur Steuerung des Produktionsanlaufs entwickeln Winkler, Heins et al. (2007). Dieses basiert auf Prognosemodellen und auf Ursache-Wirkungsbeziehungen. Einen Ansatz zur semantischen Repräsentation von Inbetriebnahmewissen in Verbindung mit Maschinendaten entwickeln Konrad, Hoffmeister et al. (2012). Die Vorarbeiten resultieren aus dem Anlauf von Montagesystemen, sind eher organisatorischer Natur und weisen damit nicht die für die Inbetriebnahme von Bearbeitungsmaschinen notwendige technische Tiefe auf.

Der untersuchte Stand der Technik und der Forschung enthält bisher noch keine geeigneten Konzepte für eine automatisierte Inbetriebnahme. Untersuchungen zu vergleichbaren Vorgehen sind für großtechnische Anlagen und bedienen sich einer betriebswirtschaftlichen Betrachtungsweise. Weiterhin sind Systeme, welche eine Unterstützung der Inbetriebnahme leisten sollen, nicht für den Anwendungsfall der rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen geeignet. Tabelle 5.3 bewertet die Vorarbeiten zu relevanten Konzepten welche eine Unterstützung bei der Inbetriebnahme bieten.

| Kriterium | (Onori, Lohse et al. 2012) | (Weber 2006) | (Gartzen 2012), (Tücks 2010) | (VDI 1990) | (Trautmann und Lanfer 2010) | (Steuer 1991) | (Ketterer 1995) | (Krug 2012) | (Reinhart, Krug et al. 2010) | (Scrimieri, Oates et al. 2013) | (Winkler, Heins et al. 2007) | (Konrad, Hoffmeister et al. 2012) |
|----------------------------------|----------------------------|--------------|------------------------------|------------|-----------------------------|---------------|-----------------|-------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| Fokus rekonf. Maschinen | o | - | - | - | - | - | - | + | o | o | o | - |
| Fokus wandelb. Produktionssys. | + | - | + | - | o | - | - | + | o | + | o | o |
| Berücksichtigung int. Inf.techn. | + | - | - | - | + | - | - | o | o | - | - | - |
| Berücks. Inbetriebnahme | o | + | + | + | + | + | + | + | o | + | + | o |
| Berücks. automatisierter IBN | - | o | - | o | o | o | + | + | - | o | + | o |
| Herstellerübergreifend anwendbar | + | o | o | o | o | o | o | + | + | o | o | o |
| Berücks. verteilter Systeme | + | o | - | - | + | - | - | o | + | - | o | - |

Legende: +: erfüllt; -: nicht erfüllt; o: teilweise erfüllt

Tabelle 5.3: Bewertung bestehender Unterstützungen für die Inbetriebnahme

5.4 Bewertung der bisher bestehenden Konzepte

Die Analyse des Stands der Technik und der Forschung zeigt auf, dass die Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen bisher unzureichend betrachtet wurde. Bestehende Kenntnisse aus dem Bereich der Produktionssysteme oder verfahrenstechnischer Anlagen können nicht auf den Bereich der rekonfigurierbaren Maschinen übertragen werden, da diese einen anderen technischen Fokus aufweisen.

Weiterhin existieren bisher keine Untersuchungen zu den bei einer Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Maschinen vorzunehmenden Tätigkeiten. Die Gründe dafür sind, dass die bisher bestehenden Maschinenkonzepte noch eher konzeptioneller Natur sind und damit für einen Einsatz in der Praxis noch nicht geeignet sind.

Bisher ist kein Verfahren für die rasche Inbetriebnahme einer rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschine verfügbar, welches neben einem numerischen Steuerungssystem auch weitere in der Maschine vorhandene Informationstechnik betrachtet. Bestehende Konzepte, welche interne Informationstechnik sowie eine Ausdehnung auf mehrere Rechnersysteme berücksichtigen, weisen zudem eine ungenügende technische Tiefe auf. Zusammenfassend lässt sich

feststellen, dass Konzepte für eine Automatisierung der Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Maschinen bisher in der Forschung nur ungenügend betrachtet wurden.

Kapitel 6

Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit

Dieses Kapitel leitet eine Zielstellung auf Basis des im Kapitel 5 identifizierten Defizits des Stands der Technik und der Forschung ab. Das Vorgehen zur Erreichung dieser Zielstellung wird im Anschluss erläutert.

6.1 Ableitung der Zielsetzung

Die Analyse des Stands der Technik und der Forschung zeigt auf, dass die Inbetriebnahme im Umfeld der rekonfigurierbaren Maschinen bisher noch unzureichend betrachtet wurde. Informationen zur Inbetriebnahme liegen weder standardisiert noch formalisiert vor. Es existieren ebenfalls keine vollständigen Analysen zu den während der Inbetriebnahme auszuführenden Tätigkeiten. Weiterhin wurde die Integration von modulinternen Softwaresystemen im Bereich der rekonfigurierbaren Maschinen nicht ausreichend betrachtet. Arbeiten, die eine entsprechende informationstechnische Unterstützung propagieren, befinden sich auf einer zu hohen konzeptionellen oder organisatorischen Ebene in der wandlungsfähigen Fabrik. Daher können diese Erkenntnisse nicht direkt auf rekonfigurierbare Bearbeitungsmaschinen angewandt werden.

Als Zielsetzung für diese Arbeit wird daher die Entwicklung eines ganzheitlichen Konzepts für die automatisierte Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen auf Basis von autarken mechatronischen Modulen gewählt.

Primäres Ziel ist die Ermöglichung von raschen Rekonfigurationen bei Bearbeitungsmaschinen im Kontext der wandlungsfähigen Produktion. Dabei sollen Stillstandszeiten, die während der Umbaumaßnahmen entstehen, mit einer automatisierten Inbetriebnahme auf den Zeitraum von wenigen Stunden drastisch reduziert werden.

Für diesen Zweck soll ein Inbetriebnahmeautomatisierungssystem entworfen werden, das den Prozess der Inbetriebnahme automatisiert ausführen kann. Da durch eine Automatisierung der Vorgänge bei der Inbetriebnahme eine signifikante Zeitersparnis erreicht werden kann, werden damit auch die Lebenszeitkosten der Maschinen reduziert.

Die Inbetriebnahmeautomatisierung soll den Inbetriebnehmer bei seiner Tätigkeit unterstützen und die Inbetriebnahme, sofern möglich, weitgehend autonom durchführen. Der Inbetriebnehmer soll nur in Ausnahmefällen zum weiteren Vorgehen befragt werden müssen. Die Inbetriebnahme soll daher in Kooperation zwischen Inbetriebnehmer und Inbetriebnahmeautomatisierung stattfinden.

Da die Inbetriebnahme bisher noch nicht ausreichend in den bestehenden Modularisierungskonzepten berücksichtigt wurde, sollen außerdem Rückwirkungen des Inbetriebnahme-Automatisierungskonzeptes auf das Modularisierungskonzept der Maschine berücksichtigt werden. Dazu muss das Modularisierungskonzept um die für die Inbetriebnahme notwendigen Funktionalitäten erweitert werden. Je nach gewähltem Modularisierungskonzept können noch manuelle Tätigkeiten durch den Inbetriebnehmer erforderlich sein. Gründe hierfür können wirtschaftlicher oder konstruktiver Natur sein. Die eventuell notwendigen manuellen Tätigkeiten sollen ebenfalls von der Inbetriebnahmeautomatisierung berücksichtigt werden. Die Inbetriebnahme soll daher von Inbetriebnehmer und der Inbetriebnahmeautomatisierung in Kooperation durchgeführt werden. Abbildung 6.1 zeigt die Zielstellung exemplarisch. Zusätzlich zu den mechatronischen Modulen bildet die, mit dem Inbetriebnehmer interagierende, Inbetriebnahmeautomatisierung einen essenziellen Teil der rekonfigurierbaren Maschine.

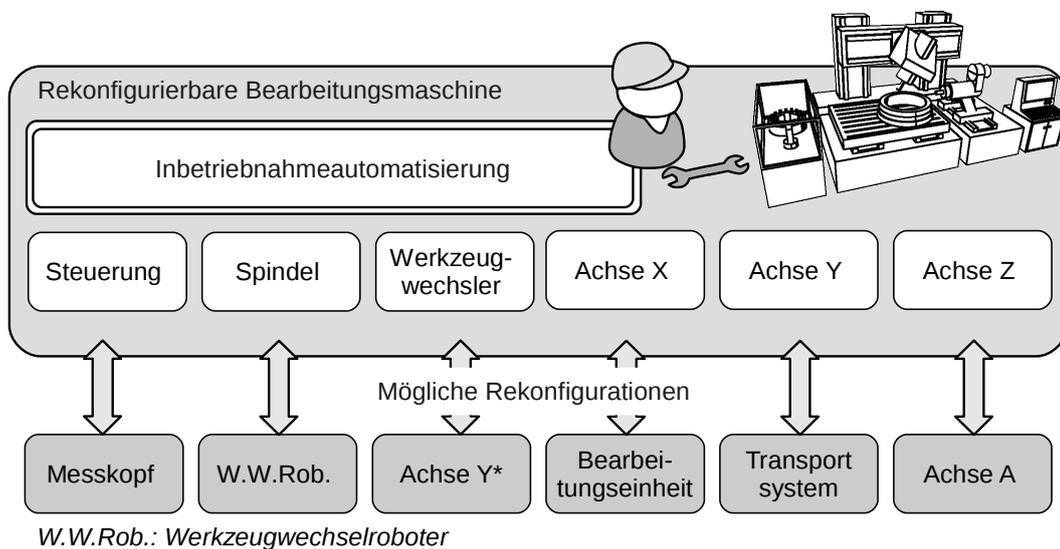


Abbildung 6.1: Illustration der Zielstellung

Nach dem ersten Aufbau oder einer erneuten Konfiguration einer rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschine muss diese in einen für die Produktion bereiten Zustand versetzt werden. Die dazu notwendigen Vorgänge werden von einem System zur Inbetriebnahmeautomatisierung koordiniert.

Weitere Aspekte, die für die Zielstellung relevant sind, ergeben sich aus den Anforderungen an eine automatisierte Inbetriebnahme in Kapitel 4.

- ➔ Zum Erreichen der Zielstellung muss eine ganzheitliche Systemarchitektur entworfen werden. Diese soll einerseits fähig sein, eine Automatisierung der Inbetriebnahme zu erreichen und andererseits genügend Erweiterbarkeit und Flexibilität aufweisen, um auch für zukünftige Herausforderungen in der rekonfigurierbaren Produktion geeignet zu sein.

- Weiterhin soll das Konzept den herstellerübergreifenden Einsatz von autarken mechatronischen Modulen ermöglichen, um die Interoperabilität und den Wiederverwendungsgrad zu erhöhen.
- Das erstellte Konzept soll nicht nur auf den Anwendungsfall der Inbetriebnahme von Bearbeitungsmaschinen beschränkt sein, sondern es soll auch für weitere Maschinentypen und Prozesstechnologien geeignet sein.
- Intention ist die Reduktion der manuellen Tätigkeiten des Inbetriebnehmers, indem Tätigkeiten automatisiert werden. Statt den Inbetriebnehmer komplett zu ersetzen, sollen Inbetriebnehmer und Inbetriebnahmesystem in Kooperation agieren und ihre naturgemäßen Stärken entsprechend einbringen.
- Eine Bearbeitungsmaschine verfügt aus wirtschaftlichen Gründen in der Regel nicht über eine allumfassende Aktorik und Sensorik, um alle mechanischen Einstellmöglichkeiten eigenständig vornehmen und vermessen zu können. Das Ziel ist daher, notwendige Tätigkeiten entweder durch manuelle oder automatisierte Interaktion mit dem Maschinensystem durchzuführen.
- Die Inbetriebnahmeautomatisierung soll Funktionalitäten aufweisen, die zum Auflösen von inneren, baulichen und funktionalen Abhängigkeiten notwendig sind.
- Nach Abschluss der automatisierten Inbetriebnahme soll im Produktionsbetrieb auf den Einsatz von traditionell für die Produktion vorgesehenen Technologien wie Steuerungs- und Kommunikationssysteme zurückgegriffen werden können.
- Für den Aufbau der Inbetriebnahmeautomatisierung sollen etablierten Standardtechnologien und Methoden genutzt werden. Ebenfalls soll, um Neuentwicklungen zu verhindern, die Integration von bereits bestehenden Softwaresystemen möglich sein.

6.2 Vorgehensweise zur Erreichung der Zielsetzung

Das Vorgehen zur Erreichung der Zielstellung wurde in separate Teilaufgaben unterteilt. Diese Teilaufgaben werden in den folgenden Kapiteln separat behandelt. Betrachtet wird zunächst die Analyse und Systematisierung von Tätigkeiten bei der Inbetriebnahme. Die Erkenntnisse sollen zur Erstellung eines Informationsmodells der Inbetriebnahme dienen. Im Anschluss daran wird eine Methode zur Automatisierung von Inbetriebnahmetätigkeiten entwickelt. Danach erfolgt die Erstellung einer geeigneten Systemarchitektur für die automatisierte Inbetriebnahme. Abschließend wird die Systemarchitektur als Forschungsplattform für die automatisierte Inbetriebnahme realisiert. Tabelle 6.1 zeigt die gewählte Vorgehensweise zur Erreichung der Zielstellung.

| Teilaufgabe | Kapitel | Vorgehensweise |
|-------------|---------|---|
| 1 | 7 | Analyse und Systematisierung von Tätigkeiten bei der Inbetriebnahme und Erstellung eines Informationsmodells der Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen. |
| 2 | 8 | Entwicklung einer Methode zur automatisierten Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen |
| 3 | 9 | Entwurf einer Systemarchitektur für die automatisierte Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen |
| 4 | 10 | Entwurf und Realisierung einer Forschungsplattform für die Evaluierung der automatisierten Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen |

Tabelle 6.1: Vorgehensweise zur Erreichung der Zielstellung

Kapitel 7

Erstellung eines Informationsmodells der Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen

In diesem Kapitel werden eine Analyse und eine Systematisierung von Tätigkeiten bei der Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen vorgenommen. Zuerst werden die Aufgaben und die Ziele der Inbetriebnahme analysiert. Daraufhin werden notwendige Tätigkeiten während der Inbetriebnahme anhand des mentalen Modells des Inbetriebnehmers untersucht. Diese Eigenschaften der Tätigkeiten werden im Anschluss systematisiert und verallgemeinert. Danach wird aus den gewonnenen Erkenntnissen ein Informationsmodell der Inbetriebnahme abgeleitet. Am Ende des Kapitels werden die Auswirkungen auf den Entwurf von rekonfigurierbaren Maschinen sowie auf den Entwurf von mechatronischen Modulen diskutiert.

7.1 Tätigkeiten bei der Inbetriebnahme einer Bearbeitungsmaschine

Aufgabe der Inbetriebnahme ist es, eine montierte Anlage in Betriebsbereitschaft zu versetzen (siehe Abschnitt 3.6). Es handelt sich dabei um einen Vorgang, der aus einer Menge von zielführenden Tätigkeiten zusammengesetzt ist. Die bei einer Inbetriebnahme vorzunehmenden Tätigkeiten variieren je nach Ausprägung der Maschine, da drastische Unterschiede in der Konfiguration der Aufbauten bestehen. Die Inbetriebnahme ist des Weiteren stark von der Bearbeitungstechnologie und dem auszuführenden Prozess abhängig.

Unter der Inbetriebnahme einer Bearbeitungsmaschine wird die Transformation von einer bereits aufgebauten Maschine zu einer für die Produktion bereiten Maschine verstanden. Die Tätigkeiten bei dieser Transformation werden in der Regel von einem oder mehreren Inbetriebnehmern vorgenommen, wobei verschiedene Randbedingungen beachtet werden müssen (siehe auch Abbildung 7.1).

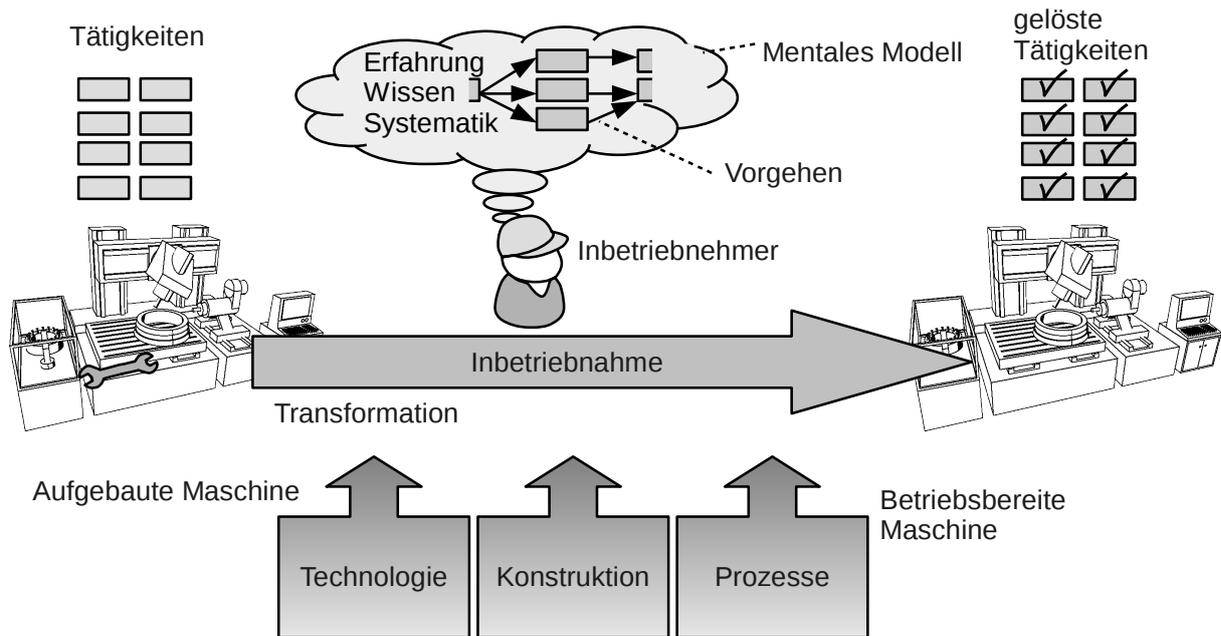


Abbildung 7.1: Zusammenhang der Tätigkeiten bei der Inbetriebnahme

Welche Tätigkeiten bei der Inbetriebnahme konkret auszuführen sind, hängt vom Bearbeitungsprozess, von der Konstruktion der Maschine sowie von den für den Aufbau der Maschine genutzten Verbindungstechnologien et cetera ab. Die wichtigste Rolle spielen der oder die Inbetriebnehmer, welche mit ihrem Wissen und ihrer Erfahrung wesentlich am Gelingen des Vorgehens beteiligt sind. In welcher Abfolge die Tätigkeiten ausgeführt werden, wird üblicherweise vom Inbetriebnehmer auf der Basis seines individuellen Expertenwissens bestimmt. Dazu bedient sich der Inbetriebnehmer seines Verständnisses für Konstruktion und Funktionsweise einer Maschine und leitet mit Hilfe dieses mentalen Modells notwendige Tätigkeiten ab. Da es sich dabei um eine individuelle Leistung handelt, fällt das resultierende Vorgehen ebenfalls individuell aus.

Da die Anzahl von Tätigkeiten einerseits groß und andererseits durch technologische Seiteneffekte schwer zu überblicken ist, hat dieses Vorgehen oft einen experimentellen Charakter. Vor allem durch die vermehrte Integration von informationstechnischen Systemen steigt die Komplexität stark an. Treten Probleme auf, müssen diese spontan gelöst werden oder mit anderen Tätigkeiten fortgefahren werden, bis eine geeignete Lösung zur Verfügung steht.

Obwohl die bei der Inbetriebnahme konkret durchzuführenden Tätigkeiten verschieden sind, müssen dabei stets vergleichbare Aufgaben gelöst werden. Diese Aufgaben erstrecken sich von der Planung und Informationsgewinnung, über die Parametrierung und dem Test aller Teilfunktionen, die Erkennung und Behebung von auftretenden Störungen, bis hin zu einem Testlauf mit abschließender Optimierung der Maschinenfunktionen (siehe Abbildung 7.2).

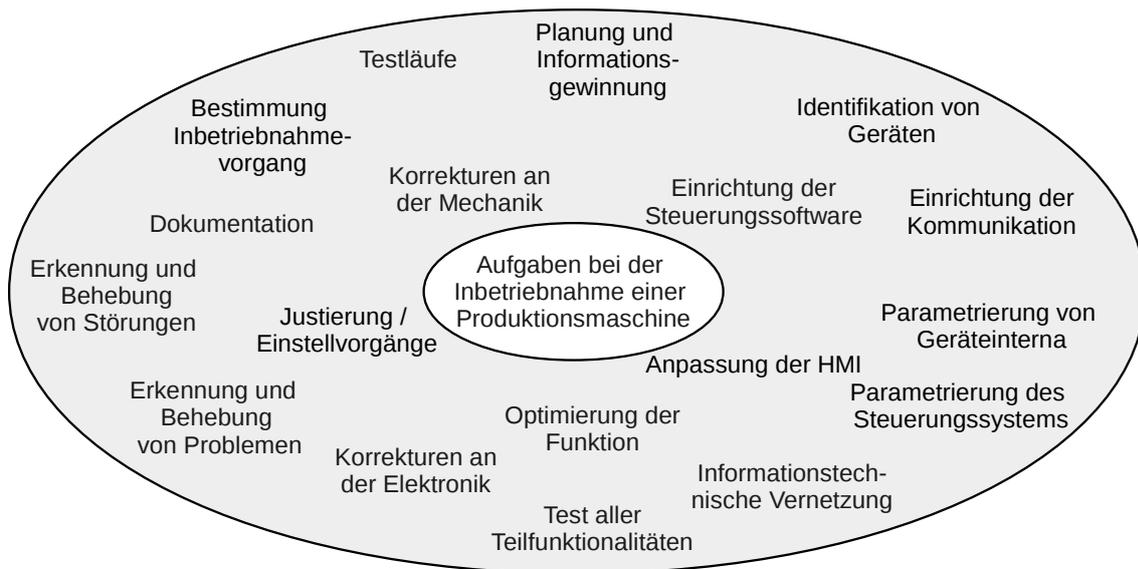


Abbildung 7.2: Aufgaben bei der Inbetriebnahme einer Bearbeitungsmaschine

Aufgaben, welche während der Inbetriebnahme gelöst werden müssen, sind vielfältig. Erfüllt wird eine Aufgabenstellung, indem der Inbetriebnehmer eine oder mehrere Tätigkeiten durchführt und erfolgreich abschließt. Die Herausforderung in dem Vorgehen des Inbetriebnehmers liegt darin, eine Abweichung vom gewünschten Sollzustand der Maschine zu erkennen und diese auf eine Problemstellung zurückzuführen. Aus dieser müssen notwendige Tätigkeiten abgeleitet werden, deren Auswirkungen zum gewünschten Ergebnis führen und anschließend muss der Erfolg bewertet werden (siehe Abbildung 7.3).

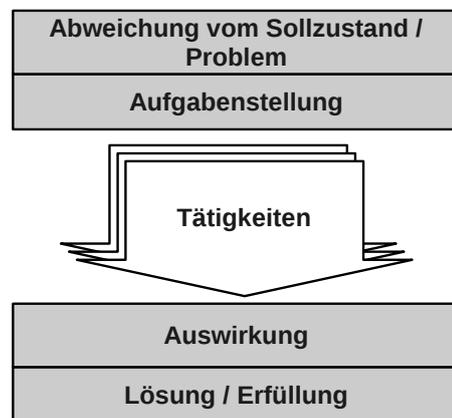


Abbildung 7.3: Zusammenhang zwischen Aufgaben und Tätigkeiten

Zur Lösung eines Problems muss der Inbetriebnehmer zunächst die Aufgabenstellung identifizieren. Danach folgt eine Phase zur Analyse und zum Verständnis des Problems. Auf dieser Basis muss der Inbetriebnehmer einen Lösungsweg ableiten und die erforderlichen Tätigkeiten umsetzen. Eine Tätigkeit kann dabei aus mehreren separaten Arbeitsschritten bestehen. Abschließend muss der Erfolg überprüft werden. Das Vorgehen zum Lösen einer bestimmten Aufgabenstellung lässt sich mit dem in Abbildung 7.4 gezeigten Muster be-

schreiben. Stellt sich heraus, dass die ermittelte Lösung nicht zum Ergebnis führt, müssen Alternativen bestimmt werden. Existieren Wechselwirkungen oder Seiteneffekte mit weiteren bei der Inbetriebnahme notwendigen Aufgaben, so kann es notwendig werden, diese im Vorfeld zu lösen.

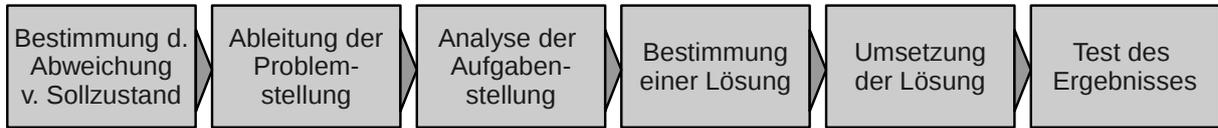


Abbildung 7.4: Muster zur Lösung von Aufgaben

Falls eine Tätigkeit nicht zielführend war, muss ein alternativer Lösungsweg getestet werden. Die Problematik an dieser Herangehensweise liegt darin, dass sofern eine Problemstellung nicht richtig bestimmt wurde, keine korrekte Tätigkeit abgeleitet werden kann und das Ergebnis somit unbestimmt ist.

7.2 Wirkungsweise von Inbetriebnahmetätigkeiten

Naturgemäß sind die Wirkmechanismen von Aktionen innerhalb einer Bearbeitungsmaschine nicht auf einen Fachbereich beschränkt, sondern erstrecken sich über alle mechatronischen Disziplinen. Die Auswirkungen von Einstellungen sowie von Fehlern und Störungen sind demnach nicht zwingend in der Disziplin zu beobachten, in der die Wirkung verursacht wurde, sondern können sich auf weitere Disziplinen erstrecken, wie in Abbildung 7.5 gezeigt wird.

| | | Ereignis/Effekt | | |
|------------|------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | | Actio/ Reactio | Mechanik | Elektronik |
| Auswirkung | Mechanik | Mechanikinteraktion | Elektronik wirkt auf Mechanik | |
| | Elektronik | Mechanik wirkt auf Elektronik | Elektronikinteraktion | Software wirkt auf Elektronik |
| | Informatik | | Elektronik wirkt auf Software | Softwareinteraktion |

Abbildung 7.5: Kopplung von Tätigkeiten bei der Inbetriebnahme (in Anlehnung an (VDI 2013))

Wie in der Abbildung angedeutet, ist zwischen Informationstechnik und Mechanik keine direkte Kopplung möglich, da eine Einflussgröße ausschließlich über elektronische Signale übertragen wird. Beispielsweise werden zur informationstechnischen Erfassung eines me-

chanischen Zustands demnach zwei Mechanismen benötigt: zuerst eine Übersetzung des Zustandes in ein elektrisches Signal und von dort aus weiter in Information.

Im Rahmen einer Inbetriebnahme werden unter anderem alle Teilfunktionalitäten der Maschine getestet. Dies bedeutet, dass alle relevanten Zustandsinformationen und Signale intern übertragen werden müssen. Geht man beispielsweise von einem im Steuerungssystem initiierten Test aus, so sind mehrere Teile der Maschine bei der Weiterleitung der Signale beteiligt: Damit eine im Steuerungssystem initiierte Bewegung, beispielsweise eines entfernten Aktors, ausgeführt wird, muss eine Kette von Sub-Systemen der Maschine eingebunden werden (Schaich 2001). Abbildung 7.6 zeigt eine solche Wirkungskette am Beispiel eines mechanischen Aktors, der über ein dezentrales Ein-Ausgabegerät an den Feldbus angeschlossen ist.

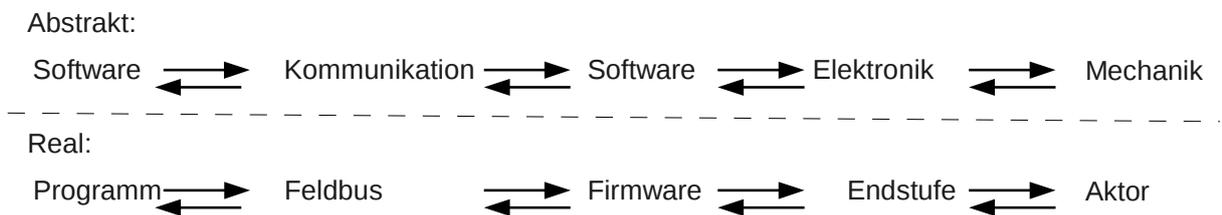


Abbildung 7.6: Beispielhafte Wirkungskette zwischen Mechanik und Software

Bei der Inbetriebnahme einer Maschine ist zu beachten, dass die Inbetriebnahme der Subsysteme der Maschine in der durch die Wirkungskette vorgegebenen Reihenfolge erfolgen muss. Selbiges gilt für den Test von Teilfunktionen. Die Kenntnis und das Verständnis für Wirkmechanismen sind dem Inbetriebnehmer aufgrund seiner Ausbildung und seiner Auffassungsgabe gegeben, er kann die Mechanismen in vielen Fällen leicht durchschauen. Ein Automatisierungssystem muss diese Mechanismen ebenfalls berücksichtigen. Sollen Inbetriebnahmetätigkeiten automatisiert durchgeführt werden können, so ist es beispielsweise notwendig, die Subsysteme am Beginn der Wirkungskette vor denjenigen am Ende der Wirkungskette in Betrieb zu nehmen.

7.3 Analyse der Vorgehensweise des Inbetriebnehmers bei der Inbetriebnahme

Die für eine erfolgreiche Inbetriebnahme einer Bearbeitungsmaschine notwendigen Tätigkeiten sind in der Forschung bisher noch nicht eingehend auf eine Systematik hin untersucht worden. Daher werden in diesem Abschnitt Merkmale erarbeitet, mit welchen Inbetriebnahmetätigkeiten von Bearbeitungsmaschinen systematisiert und formalisiert werden können. Die Merkmale werden analog zu (Kircher 2011) und (Lewek 2005) anhand des mentalen Modells des Inbetriebnehmers abgeleitet, indem sein Vorgehen bei der Inbetriebnahme analysiert wird. Die erarbeitete Systematik soll später zum Aufbau eines Modells dienen, mit

dem Inbetriebnahmevorgänge von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen beschrieben werden können.

Die Inbetriebnahme einer Bearbeitungsmaschine beginnt nach dem mechanischen Aufbau der Maschine mit mechatronischen Maschinenmodulen, mit der ersten Aktivierung. Der Aufbau der Maschine sowie der auszuführende Prozess sind dem Inbetriebnehmer bereits aus der Produktionsplanung der wandlungsfähigen Fabrik bekannt.

Bei einer traditionell gebauten Maschine sind die Funktionalitäten der Maschine fest und nicht veränderbar. Da bei einer rekonfigurierbaren Maschine auch die Funktionalität der Maschine verändert werden kann, sind hier ggf. auch Inbetriebnahmetätigkeiten notwendig, welche bei einer traditionellen Maschine den Entwicklern vorbehalten sind.

Bei kleineren Änderungen, wie dem Tausch von Modulen gegen solche mit vergleichbarer Funktionalität, kann im Idealfall ein Teil der zuvor genutzten Parametrierungen übernommen werden. In Folge muss nicht die gesamte Maschine erneut in Betrieb genommen werden, sondern nur der von den Änderungen betroffene Teil.

Umfasst eine Inbetriebnahme mehrere, separate Arbeitsschritte, die eine Auswirkung auf die Maschine haben und in Summe zu einem bestimmten Ergebnis führen, so werden diese als **Inbetriebnahmeschritte** bezeichnet. Ein Inbetriebnahmeschritt stellt dabei einen „atomaren Teil“ einer Inbetriebnahmetätigkeit dar, der nicht weiter in kleinere Schritte unterteilt werden kann.

Einzelne Aufgabenstellungen löst der Inbetriebnehmer mit dem in Abbildung 7.4 gezeigten Lösungsmuster für Inbetriebnahmetätigkeiten. Der Inbetriebnehmer bearbeitet intuitiv gedanklich mehrere dieser Muster parallel und in verschiedenen Phasen, sodass beispielsweise mehrere Umsetzungen oder Tests gemeinsam erledigt werden können.

Zu Beginn wählt der Inbetriebnehmer auf Basis der aktuellen Maschinenkonfiguration ein Vorgehen zur Inbetriebnahme (siehe **M1** in Abbildung 7.7). Daraufhin bestimmt er Funktionalität, welche stark gekoppelt ist und im Verbund in Betrieb genommen werden muss (**M2**). Der Inbetriebnehmer leitet anschließend eine grobe Abfolge für das weitere Vorgehen ab, indem er gedanklich Gruppen von Inbetriebnahmetätigkeiten in eine Reihenfolge bringt (**M3**). Dabei bedient er sich intuitiv einer mentalen Repräsentation einer Wirkungskette. Er betrachtet ebenfalls implizit eventuelle alternative Abläufe, welche bei vergleichbaren Tätigkeiten oder bei der Behandlung von Fehlern im Ablauf zum Tragen kommen (**M4**).

| M1: Bestimmung des IBN Vorgangs | M2: Gruppierung nach Funktionalität | M3: Bestimmung der IBN-Reihenfolge | M4: Alternative Abläufe |
|---|---|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Analyse Maschine / Module • Bestimmung benötigter Funktionalität | <ul style="list-style-type: none"> • Funktionale Kopplung • Kopplungsgrad • Inbetriebnahmeschritte | <ul style="list-style-type: none"> • Gemeinsam zu verwaltende Funktionalität • Bestimmung der Wirkungsketten | <ul style="list-style-type: none"> • Fehlerbehandlung • Wiederholungen • Optionale Vorgänge • Alternatives Vorgehen |

IBN: Inbetriebnahme

Abbildung 7.7: Identifizierte Merkmale von Inbetriebnahmetätigkeiten M1 bis M4

Die Tätigkeiten, die zur Inbetriebnahme einer Bearbeitungsmaschine durchgeführt werden müssen, sind sehr stark von der Aufbautechnologie der Maschine sowie von weiteren Faktoren wie dem Bearbeitungsprozess, dem genutzten Steuerungssystem und der für die Automatisierung genutzten Technologie abhängig (siehe **M5** in Abbildung 7.8). Der Inbetriebnehmer beachtet diese Abhängigkeiten in der Regel implizit, da diese dem von ihm gewohnten Aufbaumuster entsprechen.

Parameter können mechanischer, elektronischer oder informationstechnischer Natur sein und stehen stets im Zusammenhang mit dem Maschinenmodell, dem funktionalen Modell oder dem steuerungstechnischen Modell der Maschine (**M6 & M7**). Weiterhin können Parameter nur veränderbar, nur lesbar oder beides gleichzeitig sein (**M8**).

| M5: Externe Abhängigkeiten | M6: Typen von Parametern | M7: Zusammenhang mit Maschinenmodellen | M8: Zugriff auf Einstellparameter |
|---|---|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Aufbautechnologie • Automatisierungstechnologie • Bearbeitungsprozess • Steuerungssystem • Werkstücke | <ul style="list-style-type: none"> • Mechanisch • Elektronisch • Informationstechnisch | <ul style="list-style-type: none"> • Maschinenmodell • Funktionales Modell • Steuerungstechnisches Modell | <ul style="list-style-type: none"> • Nur lesbar • Nur schreibbar • Les- und schreibbar |

Abbildung 7.8: Identifizierte Merkmale von Inbetriebnahmetätigkeiten M5 bis M8

Allgemeine Konstruktion

Der Inbetriebnehmer analysiert die bestehende **Maschinenstruktur** und leitet anhand von gedanklichen Mustern ein mentales **Maschinenmodell** ab. Dabei stützt er sich auf seine Erfahrungen und sein technisches Verständnis. Aus der Dokumentation von Komponenten werden Informationen über vorhandene Einstellparameter entnommen sowie eventuelle Hinweise zum Vorgehen. Einzustellende Parameter, deren Typ sowie erlaubte Wertebereiche sind ebenfalls in der vom Hersteller erhältlichen Modul-Dokumentation und den Gerätehandbüchern enthalten.

Bei der Analyse bildet er automatisch logisch und funktional zusammenhängende Gruppen von Baugruppen, welche im Verbund in Betrieb genommen und getestet werden müssen. Statt das gesamte Inbetriebnahmeverfahren mental abzubilden, stützt sich der Inbetriebnehmer auf diese Gruppen, um im Zusammenhang stehende Funktionalitäten im Verbund in Betrieb zu nehmen.

Die **logische Gruppierung** von Maschinenfunktionalität und die Ableitung von Inbetriebnahmetätigkeiten anhand dieser Gruppen unterstützen den Inbetriebnehmer bei der Bestimmung einer einzuhaltenden Reihenfolge. Dabei gilt es interne Abhängigkeiten wie Wirkungsketten zu berücksichtigen und Seiteneffekte mit benachbarten Modulen zu beachten. Der Inbetriebnehmer berücksichtigt dabei interne Abhängigkeiten sowie Wirkungsketten bei der Planung der Reihenfolge in der Regel implizit.

Entsprechende funktionale Vor- und Nachbedingungen müssen dabei ebenso berücksichtigt werden wie die Auswirkungen von Parametrierungen. Zu beachten ist dabei des Weiteren, ob Funktionalität zentral oder dezentral parametriert werden muss. Weiterhin kann zentral einzustellende Funktionalität modulweite oder auch maschinenweite Auswirkungen zur Folge haben (siehe **M9** in Abbildung 7.9).

Ebenfalls müssen topologische Abhängigkeiten zwischen Komponenten sowie eventuelle Vor- und Nachbedingungen bei der Ausführung von Tätigkeiten in Betracht gezogen werden (**M10**). Funktionalitäten, die für die initiale Funktion der Maschine notwendig sind, oder solche, die noch während der Inbetriebnahme benötigt werden, müssen vorrangig behandelt werden. Funktionalitäten, welche erst bei den Funktionstests oder einer Optimierungsphase relevant werden, können nachgestellt behandelt werden (**M11**). Der Erfolg einer Einstellung kann entweder vom Steuerungssystem aus ermittelt werden oder muss manuell begutachtet werden (**M12**).

| M9: Einstellort und Auswirkung | M10: Abhängigkeiten mit anderen Tätigkeiten | M11: Dringlichkeit / Priorität | M12: Messung des Erfolgs |
|--|--|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Zentral mit zentraler Wirkung • Dezentral mit zentraler Wirkung • Zentral mit dezentraler Wirkung • Dezentral mit dezentraler Wirkung | <ul style="list-style-type: none"> • Vorgängertätigkeiten • Nachfolgetätigkeiten • Verbundtätigkeiten | <ul style="list-style-type: none"> • Notwendig für initiale Funktion • Notwendig bei Funktionstests • Optimierung | <ul style="list-style-type: none"> • Manuell • Automatisch • Halbautomatisch |

Abbildung 7.9: Identifizierte Merkmale von Inbetriebnahmetätigkeiten M9 bis M12

Abhängig von der eingesetzten **Bearbeitungstechnologie** und dem auszuführenden **Bearbeitungsprozess** ist sicherzustellen, dass die Energie- und Medienversorgung verfügbar und ausreichend dimensioniert ist. Weiterhin bestimmt der Inbetriebnehmer Besonderheiten, welche bei der Bearbeitungstechnologie und dem auszuführenden Prozess bei der Inbe-

triebnahme berücksichtigt werden müssen. Für eine Strahlbearbeitung muss beispielsweise die Werkstückauflage besonders gestaltet sein im Vergleich zu einer spanenden Bearbeitung. Ebenfalls ist relevant, ob die Maschine in einem Verbund mit anderen Maschinen steht und beispielsweise der Werkstück- oder Materialfluss zwischen den Maschinen sichergestellt werden muss. Des Weiteren müssen dem Prozess Rohstoffe zugeführt und Produkte nach der Bearbeitung wieder abtransportiert werden (siehe **M13**, **M114** in Abbildung 7.10).

Steuerungssystem und Kommunikation

Nachdem der Inbetriebnehmer ein grundlegendes Verständnis für die Funktionsweise der Maschine erlangt hat, beginnt er mit der Parametrierung des Steuerungssystems und der modulinternen Einstellparameter sowie der informationstechnischen Verknüpfung von Funktionen (**M15**).

Dazu wird zuerst der Feldbus soweit in Funktionsbereitschaft versetzt, dass vorhandene Module identifiziert und für die Kommunikation relevante Einstellparameter justiert werden können. Sind Module mit einem separaten internen Steuerungssystem ausgestattet, müssen dort ebenfalls die erforderlichen Einstellungen getätigt werden.

Daraufhin kann mit der Parametrierung des Steuerungssystems fortgefahren werden. Der Inbetriebnehmer prüft die erkannte Maschinenkinematik, parametriert Achstransformationen und erstellt daraus eine Steuerungskonfiguration (**M16**). Je nach eingesetztem Steuerungssystem kommt entweder eine herstellerspezifische Software zum Einsatz oder die Steuerungskonfiguration wird mittels Konfigurationsdateien erstellt. Wird ein selbstadaptierendes Steuerungssystem genutzt, so kann dieses auf der Basis von Konfigurationsmustern eine Steuerungskonfiguration erzeugen (siehe hierzu auch (Kircher 2011)).

| M13: Abhängigkeiten mit Produkten | M14: Abhängigkeiten mit Edukten | M15: Informations-technische Verknüpfung | M16: Abhängigkeiten mit bewegten Teilen |
|--|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Bearbeitungsschritte • Bearbeitungsverfahren • Unterkomponenten • Physikalische Randbedingungen | <ul style="list-style-type: none"> • Typ und Menge • Schmiermittel • Kühlmittel • Späne Abtransport • Materialtransport | <ul style="list-style-type: none"> • Zuordnung von Steuerungsfunktionalität • Hardware an Software • Software an Hardware | <ul style="list-style-type: none"> • Justierung von <ul style="list-style-type: none"> - Kinematik - Achstransformationen - Bewegungsspielraum - Regelparametern |

Abbildung 7.10: Identifizierte Merkmale von Inbetriebnahmetätigkeiten M13 bis M16

Je nach Beschaffenheit der in der Maschine eingebauten Module müssen im modulinternen Steuerungssystem ebenfalls Parameter eingestellt werden. Beispielsweise werden für zu bewegend Achsen Regelparameter abgeleitet und eingestellt, Positionen von Endschaltern justiert und weitere physikalische Parameter wie Geschwindigkeit, Beschleunigung und

Ruck eingestellt. Weiterhin müssen Bestandteile des Steuerungssystems und des Kommunikationssystems informationstechnisch verknüpft werden.

Der Inbetriebnehmer gleicht vorhandene Steuerungsfunktionalität mit der in das Steuerungssystem integrierten Funktionalität ab. Dabei bedient er sich eines steuerungstechnischen Modells der Maschine, der Prozessbeschreibung (Hoffmeister 2013) und des funktionalen Modells (Lewek 2005).

Maschinenmodule

Nach der Parametrierung des Steuerungssystems fährt der Inbetriebnehmer mit den in der Maschine vorhandenen Modulen fort. Dazu vermisst er die genaue mechanische Situation, analysiert die Kinematik der Maschine, bestimmt zusammenhängende Achsgruppen sowie deren Freiheitsgrade. Alle Parameter, welche den Bewegungsspielraum betreffen, werden insofern justiert, dass keine Kollisionen zwischen Modulen oder Modulteilen vorkommen können. Bei Bedarf aktualisiert der Inbetriebnehmer die Firmware von Modulen oder installiert zusätzliche Software (siehe **M17** in Abbildung 7.11).

Graphische Bedienoberfläche

Im Anschluss wird die graphische Bedienoberfläche an die aktuelle Maschinenkonfiguration angepasst. Dazu wird ein geeignetes Bediensystem für die Maschine geladen und die Prozessvisualisierung an den zu fahrenden Produktionsprozess angeglichen (**M18**).

Feldbussysteme

Nachdem Module und Steuerungssystem parametrierung wurden, wird der Feldbus vom Konfigurationsbetrieb in den Produktivbetrieb oder Echtzeitmodus umgeschaltet. Dazu müssen im Vorfeld die in Echtzeit zu bedienenden Quellen und Senken für Daten sowie die zyklisch zu übertragenden Datensätze bestimmt werden (**M18**). Nach der Parametrierung der Echtzeitdaten schaltet der Inbetriebnehmer den Feldbus in den Produktivbetrieb und überwacht eventuelle Meldungen der Module, welche die Bereitschaft zur Umschaltung positiv quittieren müssen.

Testläufe

Es folgen Funktionstests zur Überprüfung der bestimmungsgemäßen Maschinenfunktion. Dazu wird ein Testplan mit allen wichtigen und genutzten Teilfunktionalitäten der Maschine erstellt und abgearbeitet (**M19**). Am Ende der Testphase stehen weitere Probeläufe.

| M17: Versionierung | M18: Herstellung von Datenverbindungen | M19: Zu testende Funktionalität |
|--|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Kennung / Name • Versionsnummer • Kompatibilitäten • Inkompatibilitäten | <ul style="list-style-type: none"> • Verknüpfung von SW Funktionalität • Quellen und Senken für Echtzeitdaten | <ul style="list-style-type: none"> • Testplan • Obligatorische Funktionalität • Optionale Funktionalität |

Abbildung 7.11: Identifizierte Merkmale von Inbetriebnahmetätigkeiten M17 bis M19

7.4 Systematisierung und Verallgemeinerung des Inbetriebnahmeprozesses

Aufbauend auf der im vorherigen Abschnitt erstellten Analyse der Merkmale von Inbetriebnahmetätigkeiten soll nun eine Systematisierung der Tätigkeiten erfolgen. Besondere Beachtung bei der Systematisierung findet die Beschreibung und Abbildung von Vorgängen, welche durch die Komposition von Tätigkeiten bei der Inbetriebnahme entstehen.

Besondere Bedeutung für die Modellierung von Eigenschaften kommt der informationstechnischen Beschreibbarkeit und der Möglichkeit, diese Eigenschaften in Relation zueinander zu setzen zu. Weiterhin ist für eine Modellierung neben der Beschreibbarkeit auch die kausale Messbarkeit des Erfolgs von ausgeführten Tätigkeiten bedeutsam.

Aus den im vorhergehenden Abschnitt identifizierten Merkmalen von Inbetriebnahmetätigkeiten können folgende Eigenschaften abgeleitet werden:

- Es existiert ein starker Zusammenhang zwischen den Inbetriebnahmetätigkeiten für die Maschine und dem mechatronischen Modell der Maschine (**Kopplung zum Maschinenmodell**).
- Es existiert eine starke Kopplung mit dem funktionalen sowie mit dem steuerungstechnischen Modell der Maschine (**Kopplung zu weiteren Informationsmodellen**).
- Es existiert eine starke Kopplung mit anderen zur Inbetriebnahme notwendigen Tätigkeiten (**Kopplung mit weiteren Inbetriebnahmetätigkeiten**).
- Es existieren Abhängigkeiten zwischen den Tätigkeiten. Daher ist die Reihenfolge der Ausführung wichtig (**Konzept Sequenzialisierung**).
- Es gibt hierarchische Tätigkeiten: Tätigkeiten können andere Tätigkeiten erfordern. Es existieren Gruppen von Tätigkeiten (**Konzept Hierarchisierung**).
- Sofern keine unerwünschten Seiteneffekte existieren, können Schritte parallel zu anderen ausgeführt werden (**Konzept Parallelisierung**).

- Je nach Gegebenheiten müssen verschiedene oder alternative Vorgehen gewählt werden (**Konzept Verzweigung**).
- Schritte müssen wiederholt ausgeführt werden. Beispielsweise bei mehreren ähnlichen Tätigkeiten oder bei einem Fehlschlag (**Konzept Wiederholung**).
- Es gibt verschieden geartete Zusammenhänge zwischen den Tätigkeiten (**Konzept Relation**).
- Schritte sind ähnlich zueinander und Gemeinsamkeiten können abstrahiert werden (**Konzepte Generalisierung und Spezialisierung**).

Diese systematische Betrachtungsweise ermöglicht weitere Schlussfolgerungen über die informationstechnische Modellierbarkeit von Inbetriebnahmetätigkeiten:

- Abhängigkeiten und Relationen des Inbetriebnahmемodells mit dem Maschinenmodell und weiteren Informationsmodellen müssen modelliert werden. Voraussetzung jedoch ist, dass für die Inbetriebnahme notwendige Eigenschaften informationstechnisch modelliert werden können. Beispielsweise ist die Abbildung von Fachwissen und kontextabhängigen Zusammenhängen noch eine Herausforderung in der Informationstechnik.
- Die Art und Weise, in der Inbetriebnahmeschritte in Relation zueinander getätigt werden müssen, kann mit einem Ausführungsmodell abgebildet werden. Da verschiedene Konzepte wie Sequenzialisierung, Verzweigung, Wiederholung etc. benötigt werden, kann ein hierfür geeignetes Verfahren für die Ausführung heran gezogen werden.
- Es gibt Abhängigkeiten zwischen Inbetriebnahmetätigkeiten und Abhängigkeiten, die eine Generalisierung und Spezialisierung von Schritten nahe legen. Des Weiteren können Relationen zwischen zusammenhängenden Schritten existieren. Diese Charakteristika von Inbetriebnahmetätigkeiten sind vergleichbar mit den Eigenschaften, die in einem objektorientierten Systemmodell zu finden sind. Daher liegt es nahe, ein objektorientiertes Modell zur Beschreibung von Inbetriebnahmetätigkeiten zu wählen.

Als Fazit lässt sich daher zusammenfassen, dass eine automatische Ausführung eines Inbetriebnahmevorgangs im Rahmen eines Prozessmodells möglich ist. Zudem lässt sich schließen, dass eine objektorientierte Modellierung von Inbetriebnahmeschritten möglich ist. Diese Erkenntnisse sollen im nächsten Abschnitt dazu dienen, ein objektorientiertes Modell der Inbetriebnahme zu erstellen.

7.5 Strukturierung und Modellierung der Inbetriebnahme

In diesem Abschnitt wird ein systematisches Modell von Tätigkeiten bei der Inbetriebnahme erstellt. Dazu wurden im vorherigen Abschnitt Inbetriebnahmetätigkeiten systematisiert. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sollen nun der Erstellung eines geeigneten Modells dienen.

Ein gesamtes **Inbetriebnahmevergehen** lässt sich in einzelne **Tätigkeiten** unterteilen. Diese Tätigkeiten können selbst hierarchisch sein und wieder aus einzelnen (atomaren) Schritten und Tätigkeiten bestehen. Ein **Inbetriebnahmeschritt** stellt eine einzelne Aktivität im Verlauf des gesamten Vorgehens dar und besitzt weitere für eine Modellierung relevante Eigenschaften und Relationen zu weiteren Informationsmodellen. Die Ausführung einer Tätigkeit umfasst daher einen oder mehrere zusammenhängende Schritte.

Abbildung 7.12 zeigt ein aus der vorgestellten Anschauung resultierendes Diagramm über die Zusammenstellung eines Inbetriebnahmevergehens aus Inbetriebnahmetätigkeiten und -schritten.

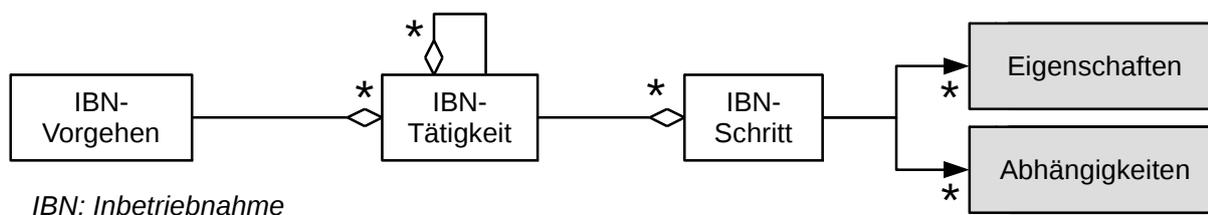


Abbildung 7.12: Zusammensetzung eines Inbetriebnahmevergehens

Die im Diagramm dargestellten Eigenschaften dienen der Modellierung von weiteren mit einem Inbetriebnahmeschritt in Verbindung stehenden Charakteristika: z.B. einzuhaltende Regeln bei der Einstellung eines Parameters. Relationen zum Informationsmodell beschreiben die Zusammenhänge mit weiteren, relevanten Maschineninformationen.

Die möglichen Relationen eines Inbetriebnahmeschritts zu weiteren Informationsmodellen und Eigenschaften verfeinert Abbildung 7.13.

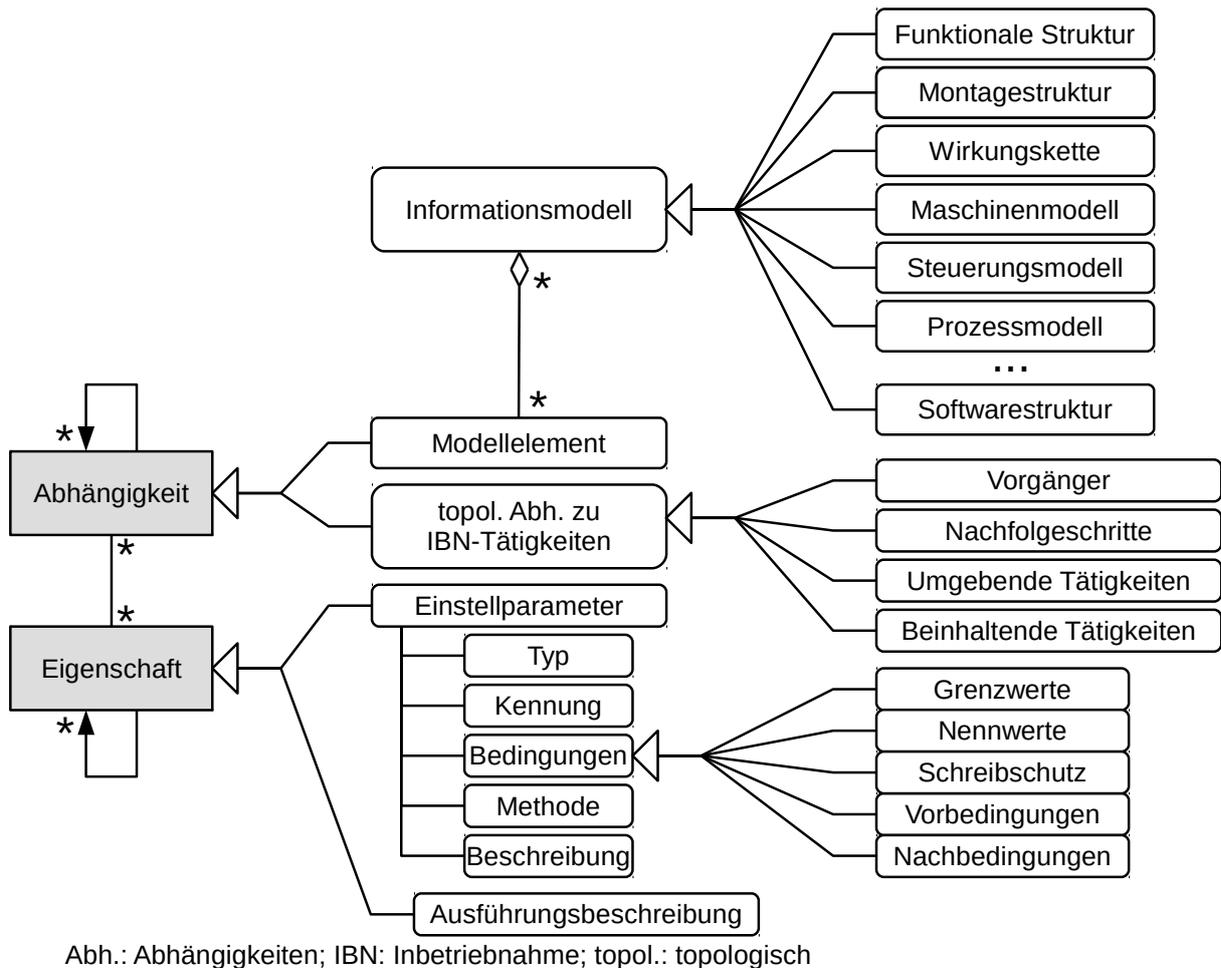


Abbildung 7.13: Eigenschaften von Inbetriebnahmeschritten und deren Abhängigkeiten

Die im Modell oben dargestellte Verfeinerung des Informationsmodells symbolisiert die Kopplung eines Inbetriebnahmeschritts mit weiteren, als Informationsbasis dienenden Maschinen- und Informationsmodellen. Die Eigenschaften eines Inbetriebnahmeschritts können bei der Ausführung einzustellende Parameter, zu beachtende Abhängigkeiten mit anderen Schritten sowie einzuhaltende Bedingungen oder Verweise zu Methoden, welche bei der Ausführung gewählt werden, darstellen. Abhängigkeiten zu weiteren Inbetriebnahmeschritten dienen der Abbildung und Ableitung von Zusammenhängen mit Produkten und Maschinenteilen. „Topologische Abhängigkeiten“ modellieren Beziehungen zu umgebenden Tätigkeiten, Sequenzen und Hierarchien über spezielle Relationen.

Insgesamt kann das Inbetriebnahmeverfahren so als Baumstruktur abgebildet werden, welche mit weiteren Maschinenmodellen vernetzt ist. Unter Berücksichtigung von Vorgänger- und Nachfolgerbeziehungen sowie weiterer Informationen, wie z.B. von Wirkungsketten können die Elemente des Modells in eine logische Reihenfolge gebracht werden. Durch die Sortierung kann das Modell in Folge in ein ausführbares Prozessmodell für die Inbetriebnahme überführt werden. Die Inbetriebnahme erfolgt anschließend durch eine geordnete Ausführ-

rung der modellierten Inbetriebnahmeschritte. Abbildung 7.14 zeigt einen exemplarischen Verlauf eines Inbetriebnahmevorgangs und dessen Konvertierung in ein Prozessmodell.

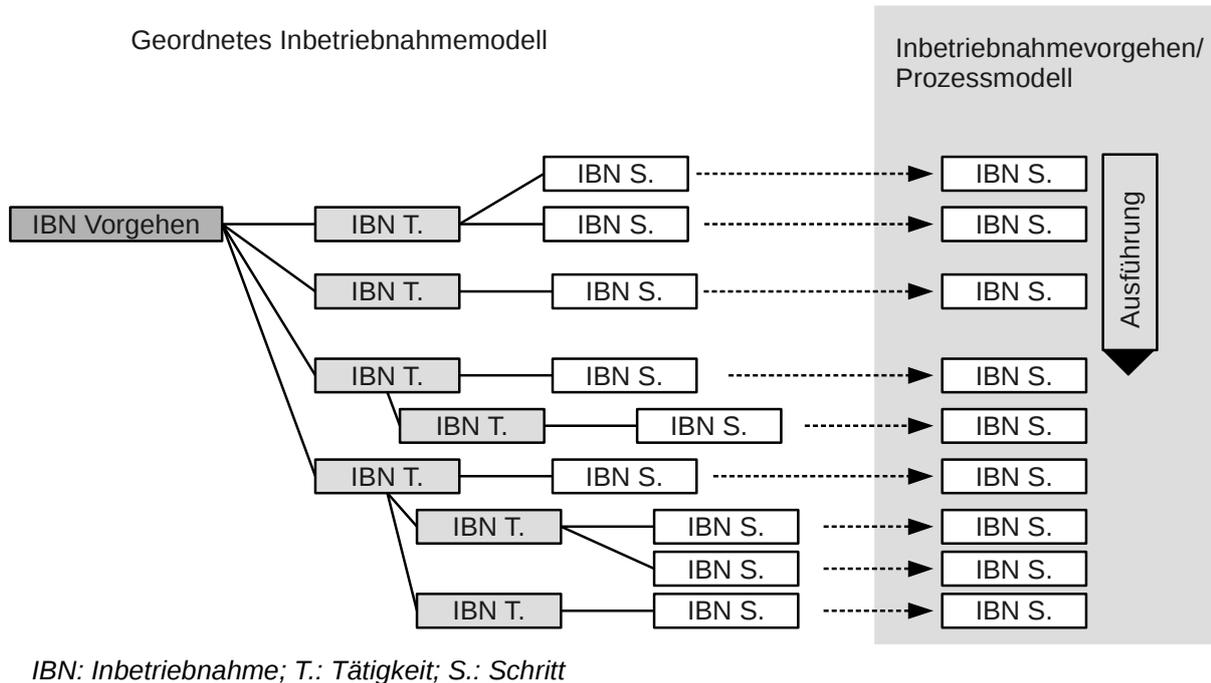


Abbildung 7.14: Transformation eines Inbetriebnahmемodells in ein ausführbares Prozessmodell

Mit dem in diesem Abschnitt vorgestellten Modell für die informationstechnische Repräsentation der Inbetriebnahme einer Bearbeitungsmaschine kann die Inbetriebnahme nun informationstechnisch dargestellt und in ein ausführbares Format überführt werden.

7.6 Auswirkungen einer Inbetriebnahmesystematik auf den Entwurfsprozess von rekonfigurierbaren Maschinen

Bei einem traditionell aufgebauten Maschinensystem muss die Inbetriebnahme nicht zwangsweise bei dem Entwurf der Maschine berücksichtigt werden. Stattdessen fällt die Inbetriebnahme in den Aufgabenbereich eines Inbetriebnahmeingenieurs. Dieser trägt mit seinem Wissen und seinem Erfahrungsschatz wesentlich zum Erfolg der Inbetriebnahme bei. Durch den modularen Aufbau einer rekonfigurierbaren Maschine ergeben sich signifikante Änderungen im Entwurf der Anlagen (Heisel und Meizner 2006). Darüber hinaus wird eine rekonfigurierbare Maschine im Laufe ihrer Lebenszeit mehrfach verändert und muss daher auch mehrfach in Betrieb genommen werden. Nach einer Rekonfiguration ist eine erneute Inbetriebnahme notwendig, um die Maschine wieder in einen produktionsbereiten Zustand zu versetzen. Daher ist der Stellenwert der Inbetriebnahme bei einer rekonfigurierbaren Maschine höher anzusetzen als bei einer traditionell aufgebauten Maschine.

Das Vorgehen, um eine rekonfigurierbare Maschine in Betrieb zu nehmen, ist eng mit dem Modularisierungskonzept sowie den Funktionalitäten der Module der Maschine gekoppelt. Die Gründe hierfür liegen einerseits in einer Bauweise, welche Möglichkeiten für bauliche Veränderungen während der Maschinenlebenszeit eröffnet und andererseits darin, dass für Konstruktion und Informationstechnik angepasste Konzepte zum Einsatz kommen, welche prinzipbedingt einen Einfluss auf die bei der Inbetriebnahme notwendigen Tätigkeiten haben.

Eine Automatisierung der Inbetriebnahme kann daher nicht ohne Veränderungen im Maschinensystem eingeführt werden, da Wechselwirkungen zwischen dem Inbetriebnahmekonzept und dem Maschinenkonzept existieren. Diese Auswirkungen einer Inbetriebnahmeautomatisierung auf den Entwurf von rekonfigurierbaren Maschinen werden im Folgenden untersucht.

Da eine rekonfigurierbare Maschine während ihrer Lebenszeit mehrfach in Betrieb genommen wird, unterscheidet sich der chronologische Verlauf der Maschinenlebenszeit maßgeblich von dem einer konventionellen Maschine. Abbildung 7.15 zeigt den Lebenszyklus einer konventionell gebauten Maschine im Vergleich zu dem einer rekonfigurierbaren Maschine.

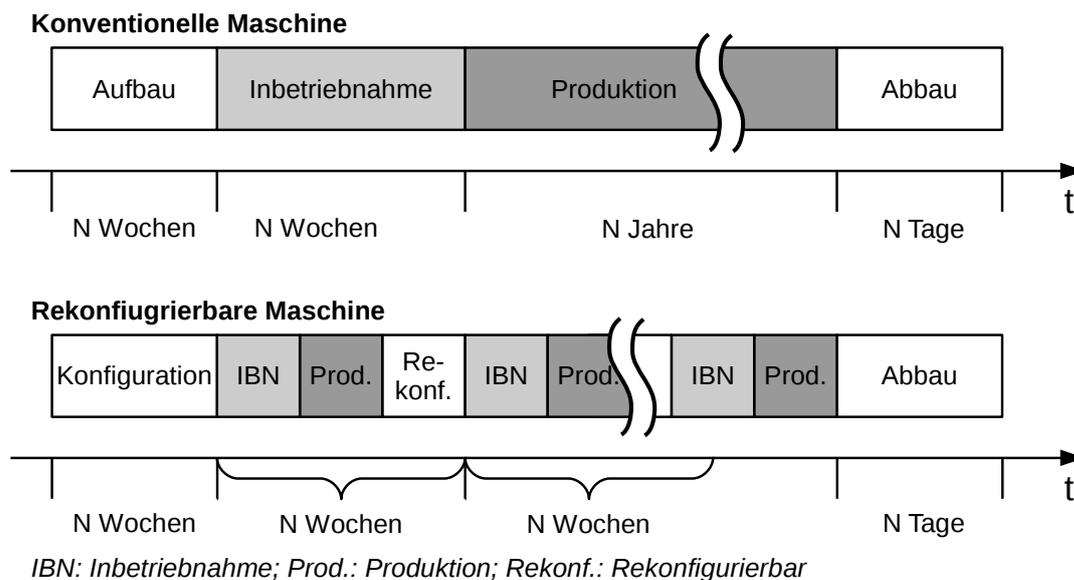


Abbildung 7.15: Zeitlicher Verlauf der Lebenszeit einer Maschine im Vergleich zu einer rekonfigurierbaren Maschine

Die für eine Inbetriebnahme einer Maschine gewählte Systematik hat einen Einfluss auf den Entwurf des gesamten Maschinensystems. Die Gestaltung einer Maschine ist nur dann sinnvoll, wenn bekannt ist, wie die Maschine zur Funktion gebracht werden kann. Insofern muss die Systematik der Inbetriebnahme schon während des Entwurfs des Maschinenkonzeptes berücksichtigt werden. Dabei müssen neben den Eigenschaften des Maschinensystems auch die Eigenschaften der Module berücksichtigt werden, aus denen die Maschinen

aufgebaut werden sollen. Demnach existiert ein essenzieller Zusammenhang zwischen dem Modulkonzept und dem Inbetriebnahmekonzept. Abhängig von der gewählten Modulstruktur müssen bestimmte Inbetriebnahmetätigkeiten durchgeführt werden (siehe auch Abbildung 7.16).

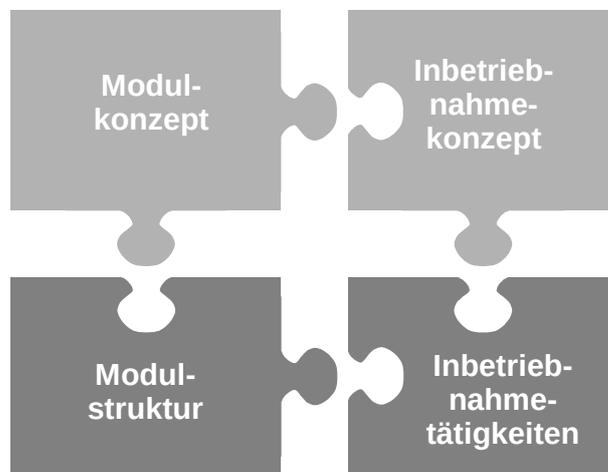


Abbildung 7.16: Entwurfsprozess zur Findung einer Maschinenstruktur

Herausforderung ist, dass Modul- und Inbetriebnahmekonzept nicht isoliert voneinander betrachtet werden können, sondern gleichermaßen Beachtung in der Entwurfsphase des Maschinensystems finden müssen. Der Anwender eines Modulbaukastens muss bei dem Einsatz von Modulen im Idealfall keine initiale Kenntnis darüber besitzen, wie die Module genau einzusetzen sind und wie die Funktionsbereitschaft der Module hergestellt werden kann. Die Informationen dazu müssen vom Modul selbst bereitgestellt werden.

Ein Modul kann in verschiedenen Szenarien eingesetzt werden, in denen das Modul jeweils selbst unterschiedliche Funktionalitäten in der Maschine realisiert. Diese verschiedenen Einsatzfelder müssen bei dem Entwurf eines Moduls berücksichtigt werden, indem die Inbetriebnahmeanweisungen an verschiedene Szenarien angepasst werden oder das Modul selbst flexibel an verschiedene Einsatzszenarien adaptiert wird. Für jedes zu integrierende Modul wird daher eine Beschreibung darüber benötigt, welche Funktionalitäten enthalten sind und wie das Modul in einem Maschinenverbund verwendet werden kann. Ebenfalls wird eine Beschreibung über Wirkzusammenhänge und Schnittstellen der Module benötigt. Module müssen sich nahtlos in die Maschinenstruktur integrieren. Für jedes Modul sind unterschiedliche Schritte notwendig, bis dieses zur Funktion gebracht werden kann. Diese Inbetriebnahmeschritte müssen für jedes der eingesetzten Module bekannt sein und sich automatisiert in den Gesamtkontext der Maschineninbetriebnahme integrieren lassen.

Als logische Konsequenz muss die Inbetriebnahme eines Moduls im Maschinenverbund ebenfalls bereits im Entwurfsprozess eines Modulsystems berücksichtigt werden. Die hier auf-

tretenden Seiteneffekte zwischen Inbetriebnahme der Maschine und den einzelnen Modulen müssen bekannt sein.

Da Module als abgeschlossene Einheiten in die Maschine eingebaut werden, müssen die Funktionalitäten eines Moduls bereits vorab beim Modulhersteller erprobt und getestet werden. Diese Vorgehensweise ist auch unter der Bezeichnung „Vorab-Inbetriebnahme“ bekannt (Trautmann und Lanfer 2010).

Das Vorgehen während der Entwurfsphase eines Modulsystems hat naturgemäß einen iterativen Charakter. Entscheidungen den Entwurf des Modulkonzeptes betreffend haben einen wesentlichen Einfluss auf die Nutzungsphase der Maschine (siehe Abbildung 7.17).

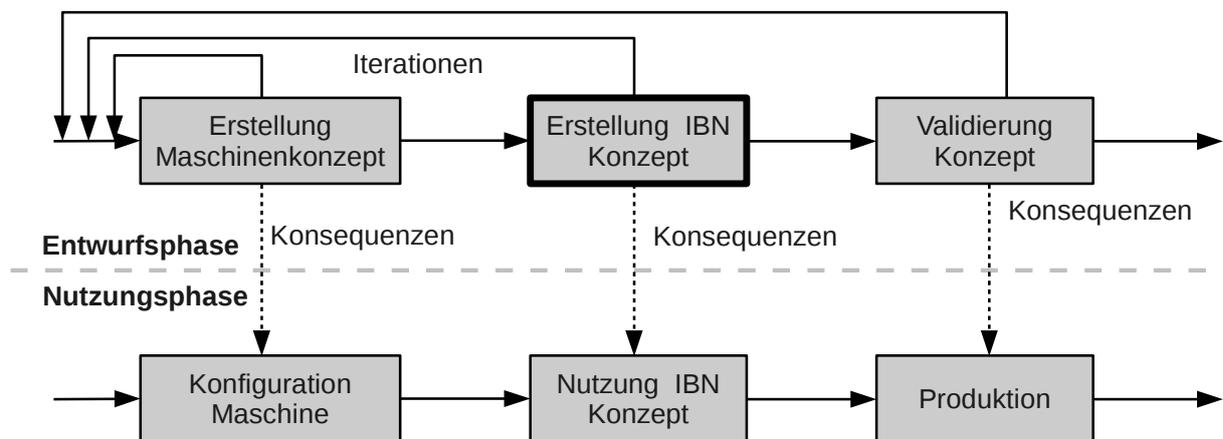


Abbildung 7.17: Bedeutung des Maschinenkonzeptes in Bezug zur Erstellung eines Inbetriebnahmekonzeptes

Nach der Erstellung eines Maschinenkonzeptes und des dazugehörigen Modulkonzeptes folgt die Erarbeitung und Optimierung eines Inbetriebnahmekonzeptes. Die Erstellung eines Maschinenkonzeptes sowie eines Inbetriebnahmekonzeptes haben daher einen wesentlichen Einfluss auf die spätere Maschinenkonfiguration sowie den Ablauf der Inbetriebnahme.

Eine Möglichkeit zur Validierung des späteren Gesamtkonzeptes stellen (Abel und Klemm 2013a), (Abel und Klemm 2013b) vor. Dabei dient eine Forschungsplattform der Evaluierung eines Modul-, Maschinen- und Inbetriebnahmekonzeptes.

Zusammenfassen lässt sich daher, dass Maschinenkonzept und Inbetriebnahmekonzept aufgrund der starken gegenseitigen Kopplung nicht getrennt voneinander betrachtet werden können. Daher muss die Inbetriebnahme schon während der Entwurfsphase des Modulsystems berücksichtigt werden, um sicherzustellen, dass die notwendigen Inbetriebnahmetätigkeiten bekannt sind und automatisiert ausgeführt werden können.

Die Anforderungen des Inbetriebnahmekonzeptes an das Maschinenkonzept sind vielschichtig und möglicherweise erst nach einigen Iterationen ausreichend umgesetzt. Je nach Anforderungen an die Umsetzung der automatisierten Inbetriebnahme müssen einzelne Inbetrieb-

nahmetätigkeiten entweder vollautomatisiert ablaufen können oder unter Einbeziehung des Inbetriebnehmers vorgenommen werden. Welche Softwaremodule und Informationen dazu benötigt werden ist wiederum von der Inbetriebnahmetätigkeit und deren gewünschten Automatisierungsgrad abhängig.

Wenn beispielsweise Bewegungen über Modulgrenzen hinaus gehen oder Module von anderen Modulen bewegt werden, besteht die Gefahr von Kollisionen. Um diese zu verhindern müssen die Verfahrbereiche der Achsen geeignet beschränkt werden. So müssen beispielsweise justierbare Endlagenschalter oder vergleichbare Sensoren zur Lageerkennung verfügbar sein. Ebenso müssen Software zur Bestimmung von möglichen Kollisionen sowie die dafür notwendigen geometrischen Daten der Module vorhanden sein. Weiterhin werden Softwaremodule für Probeläufe unter Einbeziehung des Inbetriebnehmers benötigt.

Eine weitere unerwünschte Situation ist das Auftreten von Schwingungen bei Bewegungen. Da sich bei der Rekonfiguration einer Maschine auch deren Geometrie verändert, vergrößert sich auch die Gefahr von unerwünschten Schwingungen. Bei der Inbetriebnahme von Bewegungsachsen können Schwingungen beispielsweise durch eine geeignete Wahl von Regelparametern unterdrückt werden. Dazu ist es notwendig, dass die Regelparameter automatisiert bestimmt und automatisch angepasst werden können. Eventuell dazu notwendige Sensoren und Softwaremodule müssen in die Maschine integriert werden, um eine automatisierte Inbetriebnahme zu ermöglichen.

Kapitel 8

Entwicklung einer Methode zur automatisierten Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen

In diesem Kapitel wird eine Methode zur automatisierten Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen entwickelt. Damit soll die komplizierte und zeitaufwendige manuelle Arbeit des Inbetriebnehmers in Zukunft reduziert werden können. Im vorhergehenden Kapitel wurden dazu die im Vorfeld für eine Inbetriebnahme relevanten Tätigkeiten analysiert und modelliert.

8.1 Generierung von Inbetriebnahmeabläufen

Zentraler Aspekt bei der Automatisierung der Inbetriebnahme ist die automatisierte Ableitung und die automatisierte Generierung eines Inbetriebnahmeverfahrens unter Einbeziehung der in der Maschine vorhandenen Informationen. Damit die automatisierte Generierung eines Inbetriebnahmeverfahrens stattfinden kann, müssen die dafür relevanten Informationen aus der Maschine angesammelt und verarbeitet werden. Im Verlauf der Inbetriebnahme muss u.a. eine Parametrierung für alle in der Maschine befindlichen mechatronischen Module generiert werden. Die generierten Parametrierungen müssen dabei in die Module der Maschine geschrieben oder vom Inbetriebnehmer manuell eingestellt werden, sofern dies durch die Konstruktion der Maschine bedingt ist. Danach werden alle relevanten Teilfunktionen in Kooperation mit dem Inbetriebnehmer getestet. Abbildung 8.1 stellt einen Vergleich zwischen manueller und automatisierter Inbetriebnahme vor.

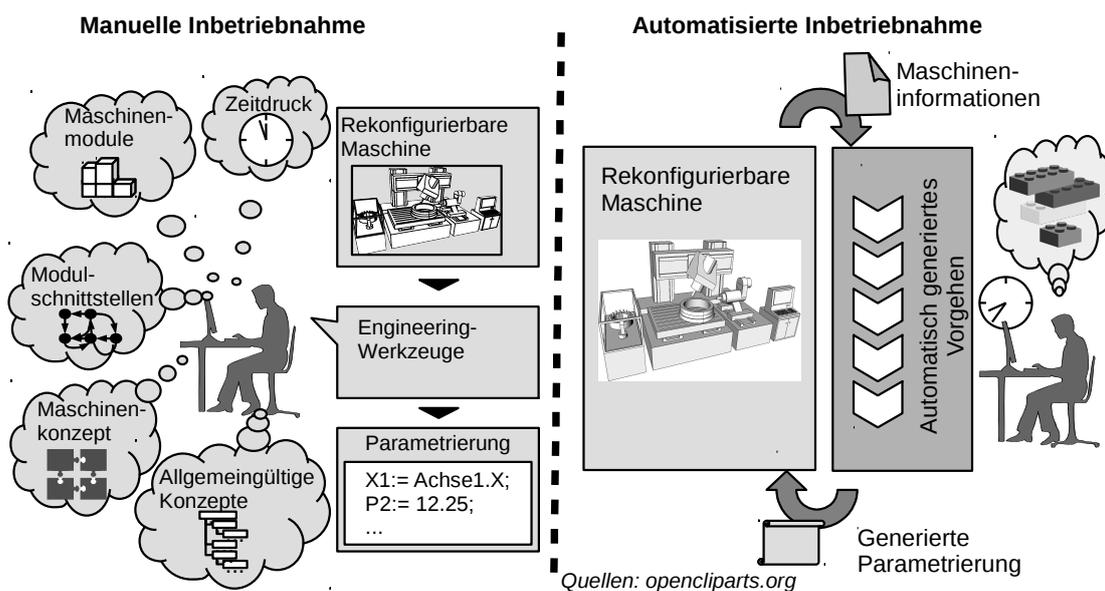


Abbildung 8.1: Vergleich zwischen manueller und automatisierter Inbetriebnahme

Im Gegensatz zu einer manuellen Inbetriebnahme, bei der die gesamte Planung und Ausführung des Inbetriebnahmeprozesses dem Inbetriebnehmer obliegt, kann im Rahmen einer automatisierten Ausführung der Inbetriebnahme ein Vorgehen automatisch erzeugt werden. Die Erzeugung des Vorgehens stützt sich dabei auf Informationen aus der Maschine und generiert auf Basis dieser Informationen eine gültige Parametrierung. Der Inbetriebnehmer wird dadurch entlastet und kann sich anderen, konzeptionelleren Problemstellungen widmen.

Als Basis für die Erstellung einer Methodik zur Inbetriebnahme dient eine aus mechatronischen Modulen aufgebaute Maschine nach (TFB 59) (Westkämper 2008), wobei die im SFB 467 entwickelten Module zum Einsatz kommen (Westkämper 2006) (siehe auch Abbildung 8.2).

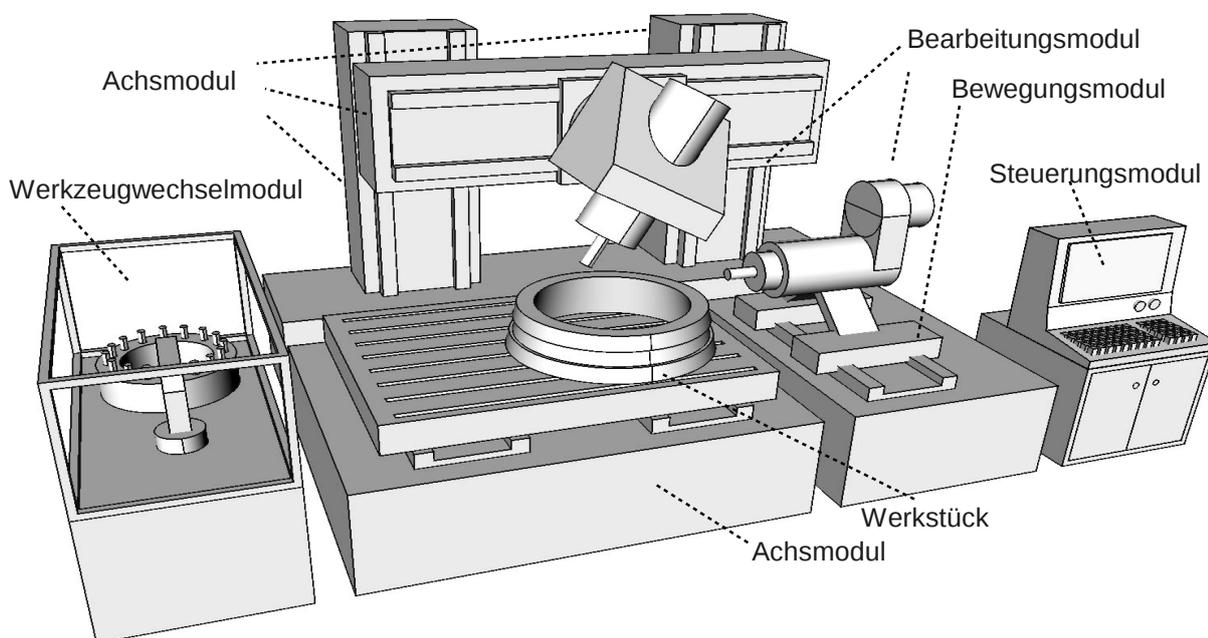


Abbildung 8.2: Rekonfigurierbare Maschine aus mechatronischen Modulen

Als Module dienen beispielhaft: ein Steuermodul mit graphischer Benutzeroberfläche (GUI); eine Spindel als Bearbeitungsmodul, welche mit mehreren Achsmodulen bewegt wird; ein weiteres Bearbeitungsmodul sowie ein Werkzeugwechselmodul.

Während einer Inbetriebnahme müssen verschiedene Tätigkeiten durchgeführt werden (siehe Kapitel 7). Die Reihenfolge der Durchführung ist dabei von entscheidender Bedeutung. In Relation zueinander stehende Inbetriebnahmetätigkeiten können gruppiert werden. Dies dient zum Einen der Reduktion von Komplexität und zum Anderen der Abgrenzung von Phasen der Inbetriebnahme gegeneinander. Abbildung 8.3 zeigt eine gruppierte und chronologisch geordnete Übersicht des Inbetriebnahmeprozesses, welcher an ein mögliches Vorgehen des Inbetriebnehmers angelehnt ist.

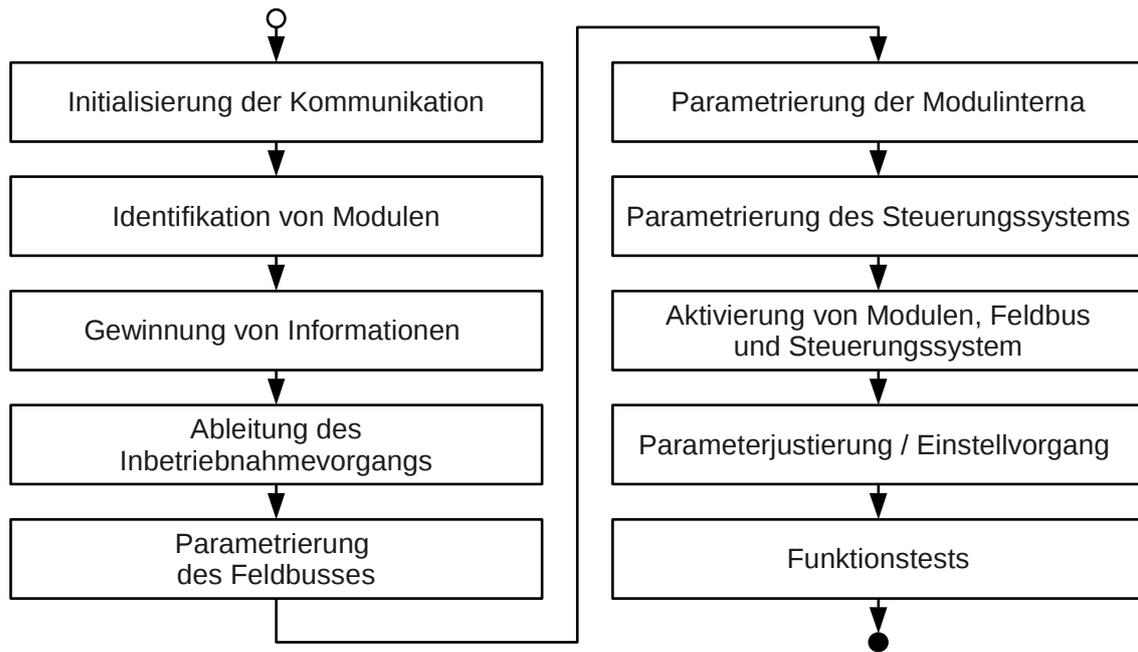


Abbildung 8.3: Ablauf bei der Inbetriebnahme einer modularen Maschine

Der an die Vorgehensweise des Inbetriebnehmers angelehnte Vorgang berücksichtigt bisher noch nicht, dass das konkrete Vorgehen an die aktuelle Konfiguration der Maschine angepasst werden muss. Daher müssen die Reihenfolge und die Art der Inbetriebnahmetätigkeiten abhängig von der aktuellen Konfiguration der Maschine erzeugt werden. Zudem müssen weitere Zusammenhänge aufgelöst werden, welche in Relation zur wandlungsfähigen Produktion stehen. Dies ist Gegenstand der folgenden beiden Abschnitte.

8.1.1 Wechselwirkungen mit dem wandlungsfähigen Umfeld

Eine rekonfigurierbare Maschine wird idealerweise im Kontext eines wandlungsfähigen Produktionsumfeldes eingesetzt (Westkämper und Zahn 2009). In welcher Form Maschinen auf- oder umgebaut werden und für welche Produktionsaufgaben diese benutzt werden, ist mit der Auftragslage des Unternehmens gekoppelt. Die Identifikation des Wandlungsbedarfs geschieht mittels externer und interner Wandlungstreiber anhand eines methodischen Vorgehens (Robert Schmitt 2012).

Maschinen werden folglich, abhängig von den zu fertigenden Produkten, aus einem Fundus von Modulen aufgebaut (siehe Kapitel 3). Die Modulkonfiguration sowie die Produktionsaufgaben werden dabei von organisatorischen Ebenen im Unternehmen determiniert. Abbildung 8.4 stellt die Integration von rekonfigurierbaren Maschinen in den organisatorischen Rahmen der wandlungsfähigen Fabrik vor.

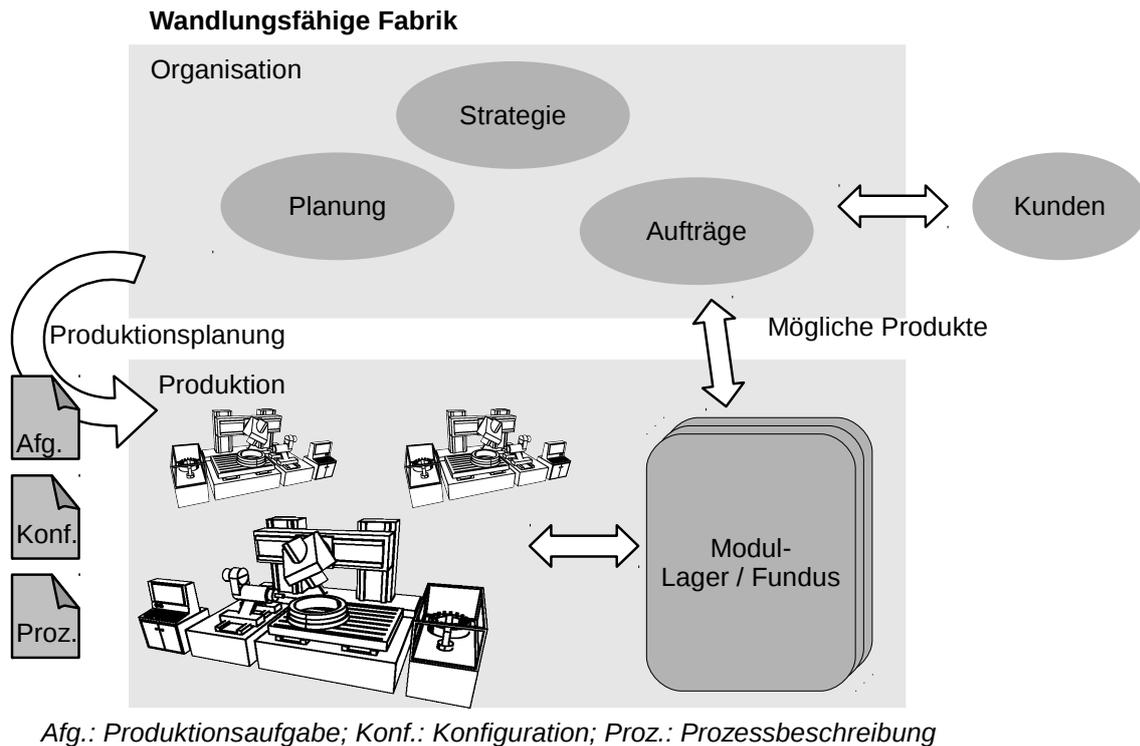


Abbildung 8.4: Die rekonfigurierbare Maschine im Kontext der wandlungsfähigen Fabrik

Die Produktion in der Fabrik wird abhängig von der aktuellen Auftragslage angepasst. Dazu werden unter anderem die in naher Zukunft anstehenden Produktionsaufgaben und die benötigten Maschinenkonfigurationen aus der Produktionsplanung an die Produktion übergeben. Bevor die Bearbeitung eines Auftrages beginnt, werden die Maschinen entsprechend den Produktionsanforderungen rekonfiguriert.

Die Beschreibung der Maschinenkonfiguration sowie die Beschreibung der angestrebten Produktionsprozesse sind für die Inbetriebnahme der rekonfigurierbaren Maschinen essentielle Dokumente, da aus diesen Rückschlüsse darüber gezogen werden können, welche Funktionalitäten benötigt werden und wie die Maschinen in Betrieb zu nehmen sind.

Die automatisierte Generierung eines Inbetriebnahmeprozesses sowie die automatisierte Ausführung des Vorgangs können nur dann erfolgreich stattfinden, wenn bestimmte Bedingungen erfüllt sind. Die für eine Generierung notwendige Menge an Vorbedingungen sind im Folgenden zusammengefasst.

Vorbedingungen für die Generierung eines Inbetriebnahmeprozesses:

- Alle für die Generierung relevanten Daten müssen an geeigneter Stelle maschinenlesbar gespeichert werden.
- Die zur Beschreibung der Maschineninformationen genutzten Datenstrukturen müssen untereinander vernetzt sein, damit Zusammenhänge abgeleitet werden können.
- Es wird eine Prozessbeschreibung benötigt, welche die auszuführenden Prozesse und die notwendige Maschinenfunktionalität spezifiziert.

- ➔ Eine Beschreibung der Maschinenkonfiguration muss Informationen über die Bauweise der Maschine und die eingesetzten Module enthalten.
- ➔ Für jedes mechatronische Modul muss eine Modulbeschreibung mit Spezifikation der Modulfunktionalität, eine Beschreibung der Schnittstellen sowie eine Inbetriebnahmebeschreibung vorliegen.

8.1.2 Generierung von Vorgängen

Wichtige Bedingungen bei der Generierung eines Inbetriebnahmevorgangs sind das Vorhandensein von sowie der Zugriff auf für die Inbetriebnahme relevanten Informationen. Auf der Basis dieser Informationen kann das Vorgehen für eine Inbetriebnahme automatisiert erstellt werden.

Eine Inbetriebnahmeautomatisierung muss fähig sein, aus vorhandenen Informationen und einem bekannten **Ist-Zustand** der Maschine einen gewünschten **Soll-Zustand** zu ermitteln. Daraus ergibt sich ein Handlungsbedarf, aus welchem Inbetriebnahmetätigkeiten abgeleitet werden können. Idealerweise stützt sich ein Automatisierungssystem für die Inbetriebnahme, ebenso wie der Inbetriebnehmer (siehe Abbildung 7.4), auf ein Lösungsmuster für die Ausführung von Inbetriebnahmetätigkeiten (siehe Abbildung 8.5).

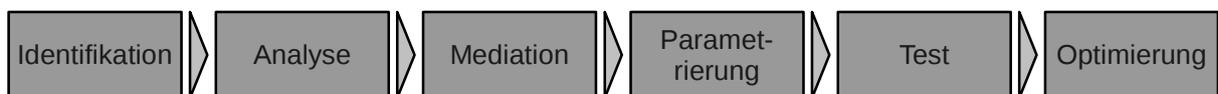


Abbildung 8.5: Wiederkehrende Muster bei der Inbetriebnahme

Die Generierung eines Ablaufs wird ermöglicht, da die durchzuführenden Tätigkeiten ähnlich sind und einem wiederkehrenden Muster folgen. Zu Beginn muss eine Problemstellung identifiziert und analysiert werden. Die Ermittlung des **Handlungsbedarfes** geschieht durch Abgleich des Sollzustandes mit dem Ist-Zustand (**Mediation**). Eine Umsetzung der dazu notwendigen Tätigkeiten findet statt, indem die zuvor identifizierten Inbetriebnahmestritte ausgeführt werden. Dazu werden zu ändernde Parameter eingestellt, welche den gewünschten Effekt hervorrufen. Im Anschluss muss die Parametrierung getestet werden. Falls notwendig, kann im Rahmen einer Optimierung eine Feinjustierung stattfinden.

8.2 Sichtweise aus der Informationstechnik

In diesem Abschnitt werden Anforderungen an eine Inbetriebnahmeautomatisierung aus Sicht der Informationstechnik bestimmt und eine geeignete Basis-Methodik für die automatisierte Inbetriebnahme einer Bearbeitungsmaschine gewählt.

In einer rekonfigurierbaren Maschine befindet sich eine Menge unterschiedlicher und naturgemäß heterogener Komponenten. Wird die Maschine in standardisierte, mechatronische Module untergliedert, entsteht eine einheitliche Systemstruktur, in der Komponenten mit einheitlichen, peripheren Schnittstellen zum Einsatz kommen. Werden weiterhin Module eingesetzt, die über lokale Rechenkapazität mit eigenem Speicherplatz sowie über eigene Kommunikationsschnittstellen verfügen, kann das resultierende System aus einem erweiterten Blickwinkel betrachtet werden. Bei genauerer Betrachtung der informationstechnischen Architektur einer solchen rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschine findet man darin Komponenten, die über Kommunikationssysteme untereinander verbunden sind. Diese Komponenten sind aus informationstechnischer Sicht Rechnersysteme mit Kommunikationsschnittstellen. Betrachtet man folglich ein solches Maschinensystem aus der Sichtweise der Informationstechnik, gleicht diese Struktur dem Aufbau eines verteilten Rechnersystems.

Aus diesem Grund liegt es nahe, für die Steuerung und Kontrolle der komplexen Abläufe innerhalb einer rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschine Methoden aus den verteilten Systemen einzusetzen.

Besondere Bedeutung kommt dabei der Ablaufsteuerung für die Ausführung von Inbetriebnahmevorgängen innerhalb der Maschine zu. Hierbei müssen zwischen den Modulen in der Maschine Datensätze ausgetauscht und Inbetriebnahmetätigkeiten ausgeführt werden. Die Ablaufsteuerung hat darin die Aufgabe, die Vorgänge innerhalb der Maschine zu koordinieren. Da es sich dabei um verteilt ablaufende Vorgänge handelt, ist ein verteiltes Ausführungsmodell zur Koordination der Abläufe notwendig.

Im Fachbereich der Informationstechnik und Kommunikationstechnik existieren verschiedene Methoden und Technologien, um Vorgänge innerhalb eines verteilten Systems kontrolliert auszuführen. Weiterhin bestehen verschiedene Möglichkeiten, um Informationen zwischen Rechnersystemen auszutauschen. Im Folgenden werden Anforderungen an ein verteiltes Ausführungsmodell vorgestellt, die zur Auswahl einer geeigneten Methodik zur Automatisierung von Inbetriebnahmeabläufen in rekonfigurierbaren Maschinen dienen sollen.

Anforderungen an ein verteiltes Ausführungsmodell:

- Basiert auf etablierter Standardtechnologie
- Ist herstellerunabhängig anwendbar
- Ist für heterogene Systemlandschaften geeignet
- Besitzt große Flexibilität
- Eignet sich zur Kontrolle verteilter Abläufe
- Bietet eine anerkannte Entwurfsmethodik
- Weist einen zentralen Kontrollfluss oder zentral kontrollierte Abläufe auf

Bei dem Aufbau eines verteilten Systems können verschiedene Technologien für den Transport von Daten eingesetzt werden. Die eingesetzte Kommunikationstechnologie ist dabei allerdings nur ein Mittel zur Umsetzung eines verteilten Architekturparadigmas. Im Nachfolgenden werden verschiedene Paradigmen auf ihre Einsatzfähigkeit im benötigten Kontext untersucht. Tabelle 8.1 stellt verschiedene Konzepte gegenüber und bewertet diese nach den zuvor abgeleiteten Anforderungen.

| Paradigmen | Anforderungen | | | | | | |
|--------------------------------------|------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------|-------------------|-------------------------|--------------------------|
| | Standardisierung | Herstellerunabhängigkeit | Eign. für heterog. Systeme | Große Flexibilität | Verteilte Abläufe | Exist. Entwurfsmethodik | Zentrale Ablaufsteuerung |
| Manuelle Programmierung von Abläufen | - | + | - | - | - | + | - |
| Holonische Systeme | o | + | + | + | + | o | - |
| Agentensysteme | o | + | + | + | + | + | - |
| Serviceorientierung (Choreographie) | + | + | + | + | + | + | - |
| Serviceorientierung (Orchestrierung) | + | + | + | + | + | + | + |

Legende: +: erfüllt; -: nicht erfüllt; o: teilweise erfüllt

Tabelle 8.1: Paradigmen für den Entwurf von verteilten Systemen mit Ablaufsteuerung

Demnach bestehen prinzipiell verschiedene Möglichkeiten, um Abläufe innerhalb eines verteilten Systems zu koordinieren, respektive zu dirigieren. Auf Agenten oder Holonen basierende Systeme setzen vorrangig auf Prinzipien der Selbstorganisation. Allerdings ist die Organisation der Inbetriebnahme einer Maschine eher ein Problem, das von autonomen Einheiten nicht in Selbstorganisation gelöst werden kann, sondern eher eine, von einer zentralen Instanz aus zu lösende, Problemstellung (Abel, Klemm et al. 2011), (Abel 2011). Im Gegensatz zu Agenten sind Dienste vorteilhafter, da eine zentrale Ablaufsteuerung für interne Vorgänge genutzt werden kann. Aus diesem Grund eignet sich Serviceorientierung als Entwurfparadigma für eine Inbetriebnahmeautomatisierung mit zentraler Ablaufsteuerung für verteilt ablaufende Vorgänge.

Das Konzept der Orchestrierung stellt eine Steuerungsinstanz dar, welche die Inbetriebnahme von zentraler Stelle aus koordinieren kann. Diese wird im Folgenden auch als **Orchestration Engine** bezeichnet. Der Entwurf der Abläufe für eine automatisierte Inbetriebnahme kann folglich über Geschäftsprozesse geschehen, mit deren Hilfe das Inbetriebnahmevergehen des Zielsystems modelliert wird. Weiterhin können bereits existierende Systeme un-

kompliziert in die Architektur eingebunden werden (Karnouskos, Bangemann et al. 2009), (Jammes und Smit 2005). Aus diesen Gründen werden im Folgenden serviceorientierte Paradigmen für die Inbetriebnahmeautomatisierung eingesetzt.

8.3 Konzept zur Verteilung des Inbetriebnahmeverfahrens auf Dienste

Im Rahmen einer serviceorientierten Modellierung werden in diesem Abschnitt zunächst eine serviceorientierte Analyse und anschließend der Entwurf eines Dienstinventars für die automatisierte Inbetriebnahme vorgenommen. Zentrales Element während der Analyse und des Entwurfs ist die Ausrichtung des Vorgehens an verteilt ablaufenden Geschäftsprozessen, welche im zu modellierenden System notwendig sind. Dazu wird im Folgenden zunächst ein Dienstinventar mit zu berücksichtigenden Diensten entworfen. Ziel ist die Abbildung des Inbetriebnahmeverfahrens auf einen ausführbaren Geschäftsprozess im SOA-Sinn, wodurch dieser sowohl beschreibbar und auch ausführbar wird.

Die traditionell in einer Bearbeitungsmaschine genutzten Softwaresysteme bleiben zwar in ihrer Basisfunktion erhalten, werden jedoch um Funktionalitäten für eine automatisierte Inbetriebnahme erweitert. Zusätzlich benötigte Funktionalität wird in Form von Diensten hinzugefügt. Für die Inbetriebnahmeautomatisierung wird ein auf den Paradigmen der Serviceorientierung basierendes Inbetriebnahmesystem eingeführt. Wie bereits in Kapitel 7 hergeleitet, kann die Inbetriebnahme dazu als eine Folge von Tätigkeiten betrachtet werden und als ein verteiltes Ausführungsmodell oder als ein Prozessmodell dargestellt werden.

Der Einsatzbereich der serviceorientierten Inbetriebnahmeautomatisierung im Vergleich zu den traditionell in Maschinen vorhandenen Softwaresystemen erstreckt sich von dem Beginn bis zum Ende der Inbetriebnahme. Wobei der Anteil der Nutzung während der Inbetriebnahme abnimmt, weil sukzessive weitere Teilsysteme innerhalb der Maschine in Betrieb genommen werden. Der Anteil muss dabei nicht zwingend gänzlich verschwinden, wenn die Infrastruktur beispielsweise für Logging-Aufgaben weiter genutzt wird (siehe Abbildung 8.6).

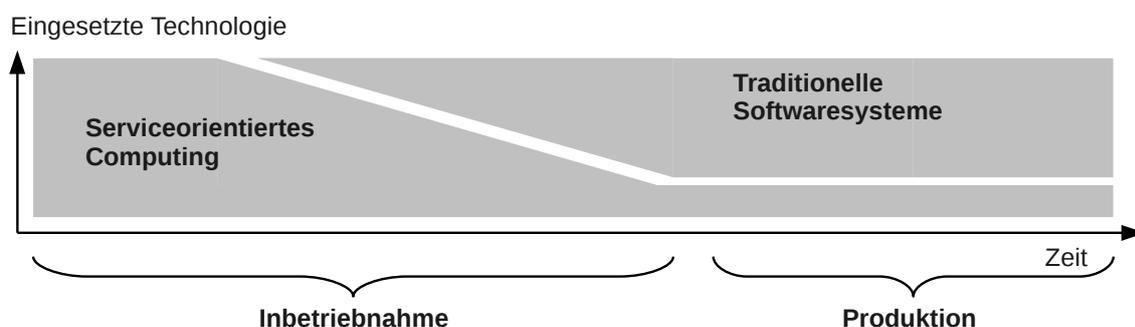


Abbildung 8.6: Einsatzbereich des serviceorientierten Computings bei der Inbetriebnahme

Im weiteren Verlauf der serviceorientierten Analyse wird in den folgenden Abschnitten zunächst ein systemweiter Geschäftsprozess für die Inbetriebnahme modelliert und anschließend die Blaupause eines Dienstinventars aufgestellt, in welchem später zu kombinierende Dienste beherbergt werden. Die Ausführung der Geschäftsprozesse wird in den folgenden Abschnitten weiter verfeinert.

8.3.1 Modellierung eines systemweiten Geschäftsprozesses für die Inbetriebnahme

Die Abbildung von Inbetriebnahmetätigkeiten in einem ausführbaren Modell stellt einen zentralen Aspekt der Automatisierung dar. Ein systemweiter Geschäftsprozess für die Inbetriebnahme stellt dabei den Rahmen zur Ausführung einzelner Inbetriebnahmetätigkeiten mit einer Orchestration-Engine. Er beginnt mit der ersten Aktivierung der Maschine und endet, sobald die Maschine in einem produktionsbereiten Zustand ist. Als Basis zur Modellierung dient u.a. das in Abschnitt 8.1.2 vorgestellte Muster für die Ausführung von Inbetriebnahmetätigkeiten.

Dieser systemweite Geschäftsprozess ist in separate Phasen untergliedert, welche im Folgenden kurz vorgestellt werden:

Identifikation: Während dieser Phase wird die Basiskommunikation initialisiert und alle in der Maschine integrierten Module identifiziert.

Analyse: In der Analysephase werden die im Vorfeld identifizierten Module auf ihre Funktionalität hin analysiert. Vorhandene Funktionsbeschreibungen und Informationen werden abgerufen, gespeichert und untersucht.

Mediation: Während dieser Phase wird vorhandene Funktionalität mit benötigter Funktionalität abgeglichen und der notwendige Handlungsbedarf ermittelt, um einen produktionsbereiten Zustand zu erreichen. Des Weiteren werden Seiteneffekte und Abhängigkeiten, die für die Inbetriebnahme relevant sind, analysiert und die Reihenfolge des Vorgehens bei der Ausführung von Inbetriebnahmetätigkeiten festgelegt.

Generierung: Nachdem im vorherigen Schritt der Handlungsbedarf für eine Inbetriebnahme identifiziert wurde, wird in dieser Phase ein konkretes Inbetriebnahmeverfahren abgeleitet und generiert.

Parametrierung: In dieser Phase wird das Inbetriebnahmeverfahren ausgeführt. Notwendige Parameter werden in die Module geschrieben, für die Inbetriebnahme notwendige Dokumente, Parametrierungsanweisungen und Konfigurationsdateien werden generiert und in die zugehörigen Softwaresysteme geladen. Manuelle Anpassungen an Maschinenteilen können dabei auch vom Inbetriebnehmer vorgenommen werden.

Aktivierung: Nachdem alle für die Funktion der Maschine relevanten Parametrierungen in die Module geladen und die Softwaresysteme entsprechend eingerichtet wurden, kann die Maschine schrittweise der Wirkungskette nach gestartet werden.

Test: Während der Testphase werden alle relevanten Teilfunktionalitäten in Kooperation mit dem Inbetriebnehmer getestet. Zudem werden bereits erste Werkstücke gefertigt.

Optimierung: Zum Abschluss startet ein Optimierungsprozess, während dessen die prozessrelevante Funktion der Maschine untersucht wird und die Vorgänge und Bewegungen nach Möglichkeit optimiert werden.

Abbildung 8.7 zeigt ein Ablaufdiagramm des systemweiten Geschäftsprozesses.

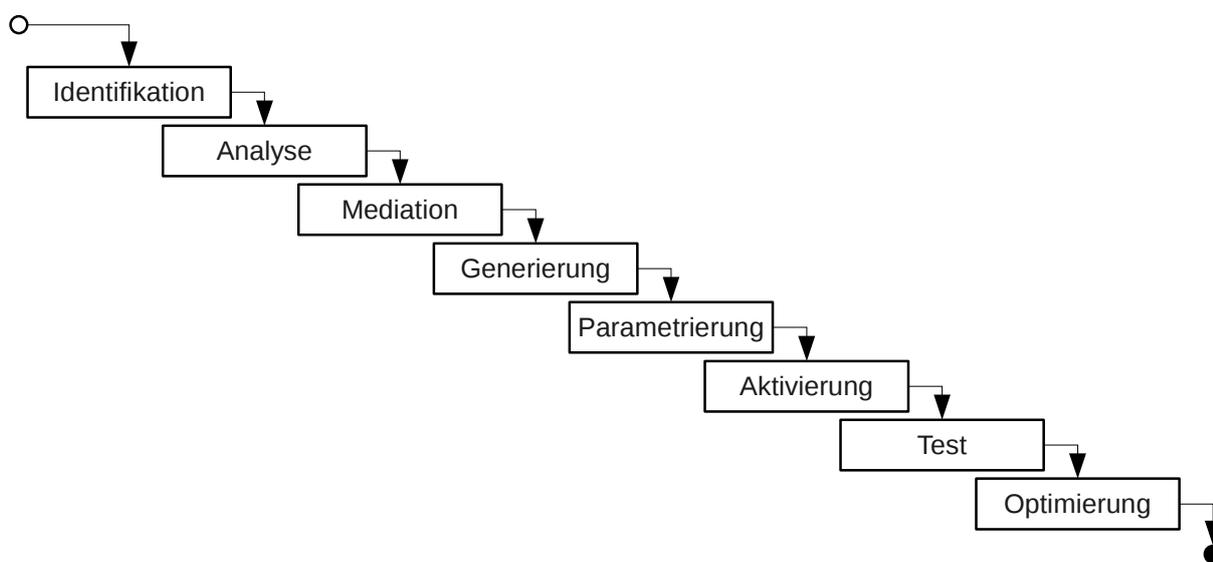


Abbildung 8.7: Systemweiter Geschäftsprozess

Der im Vorfeld hergeleitete maschinenweite Geschäftsprozess beschreibt das gesamte Inbetriebnahmevergehen in abstrakter Weise. Daher wird das Vorgehen in den folgenden Abschnitten weiter konkretisiert. Im folgenden Abschnitt wird zunächst eine Blaupause von Diensten vorgestellt, welche die Ausführung des Inbetriebnahmevergehens unterstützen.

8.3.2 Erstellung einer konzeptionellen Blaupause des Dienstinventars

Auf Basis der im vorhergehenden Abschnitt bestimmten maschinenweiten Abfolge von Inbetriebnahmetätigkeiten und deren Darstellung als Geschäftsprozess wird in diesem Abschnitt eine Blaupause für ein Serviceinventar vorgestellt. Dieses stellt die Grundlage für eine Dienstlandschaft bereit und wird in den folgenden Abschnitten sukzessive erweitert. Die in der Blaupause enthaltenen Dienste sollen die während der Inbetriebnahme notwendige Funktionalität bereitstellen. Diese können untereinander kombiniert werden und

erlauben so die Ausführung von Inbetriebnahmetätigkeiten. Zur Erstellung des Inventars dienen vier unterschiedliche Modelle für Dienste mit vergleichbarer Funktionalität (siehe Abbildung 8.8).

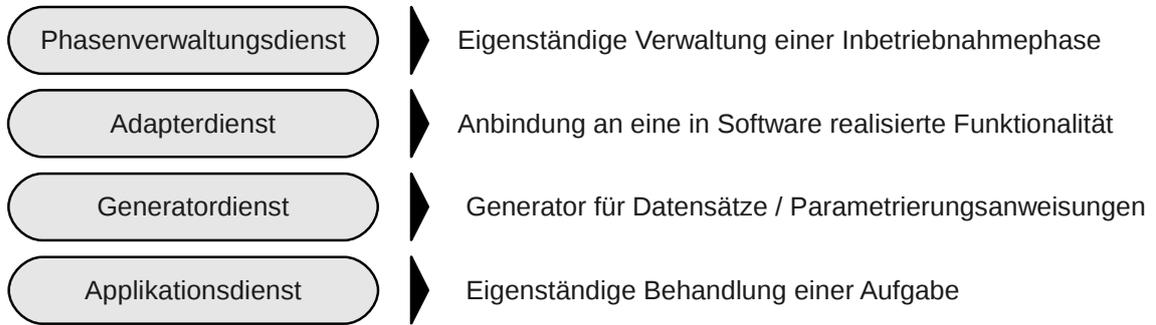


Abbildung 8.8: Modelle für Inbetriebnahmedienste

Die in einer Inbetriebnahmephase notwendigen Vorgänge werden jeweils von einem Phasenverwaltungsdienst (PVD) umgesetzt. Dieser greift wiederum auf Applikationsdienste (APD) und Generatordienste (GD) zurück. Während Applikationsdienste die im Verlauf der Inbetriebnahme notwendigen Aufgaben erledigen, dienen Generatordienste zur Erstellung von Datensätzen, Parametrierungsanweisungen und Konfigurationsdateien. Beauftragungen an konkrete Module oder Softwarebestandteile werden über Adapterdienste (AD) vorgenommen (siehe Abbildung 8.9).

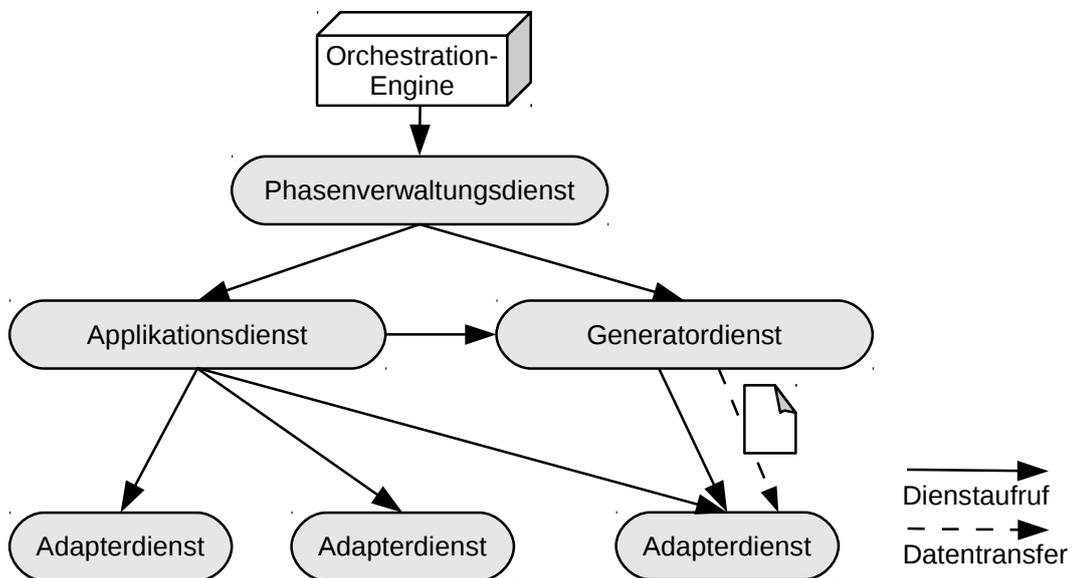
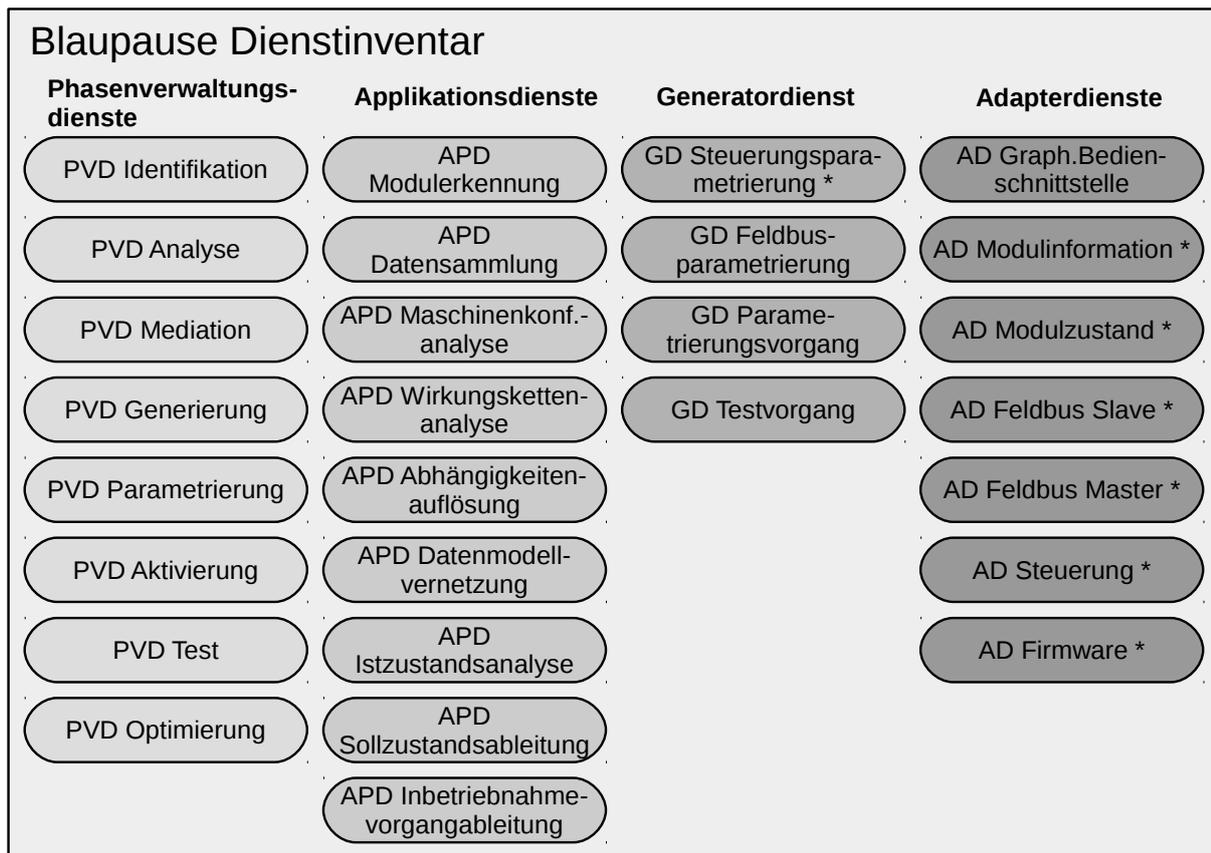


Abbildung 8.9: Modelle von Inbetriebnahmediesten

Abbildung 8.10 zeigt eine konzeptionelle Blaupause des Dienstinventars. Mit einem Stern gekennzeichnete Dienste sind in jedem mechatronischen Modul einmal enthalten.



AD: Adapterdienst; APD: Applikationsdienst; GD: Generatordienst; PVD: Phasenverwaltungsdiens

Abbildung 8.10: Konzeptionelle Blaupause des Serviceinventars

Jede Phase des systemweiten Geschäftsprozesses wird von einem Phasenverwaltungsdienst umgesetzt. Inbetriebnahmerelevante Vorgänge werden von den Applikationsdiensten abgebildet. Diese realisieren Funktionalitäten wie: die Erkennung von Modulen in der Maschine, die Sammlung von Moduldaten, die Analyse der aktuellen Maschinenkonfiguration und der Funktionalitäten zum Auflösen von internen Abhängigkeiten sowie die beschreibungsübergreifende Vernetzung von Maschinendaten. Weiterhin werden Applikationsdienste zur Analyse der Maschinenkonfiguration und für die Ableitung des Inbetriebnahmeverfahrens benötigt.

Die Generierung von Parametrierungsanweisungen und Datensätzen fällt in die Zuständigkeit der Generatordienste. Neben Konfigurationsdateien für Softwarebestandteile wie das Steuerungssystem und die Feldbus-Adapter sind Generatordienste darüber hinaus für die Generierung automatisiert ablaufender Vorgänge vorgesehen.

Zur Anbindung weiterer Funktionalität an das Inbetriebnahmesystem werden Adapterdienste genutzt. Auf diese Weise wird auch das graphische Bediensystem für den Inbetriebnehmer mit eingebunden. Mit Hilfe der Feldbusadapterdienste wird das maschineninterne Kommunikationssystem bedient. Der Steuerungsadapterdienst stellt eine geeignete Schnittstelle zum Steuerungssystem dar. In jedem mechatronischen Modul wird weiterhin ein Adap-

terdienst ausgeführt, mit welchem Moduldaten nach außen kommuniziert werden. Zudem bietet jedes Modul einen Adapterdienst für die Verwaltung des Modulzustandes.

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Dienste dienen als Funktionsbausteine für eine automatisierte Inbetriebnahme. In welcher Weise die Dienste zur Automatisierung von Vorgängen eingesetzt werden, stellen die folgenden Abschnitte vor.

8.4 Lösungslogik für eine verteilte Vorgehensweise der Inbetriebnahme

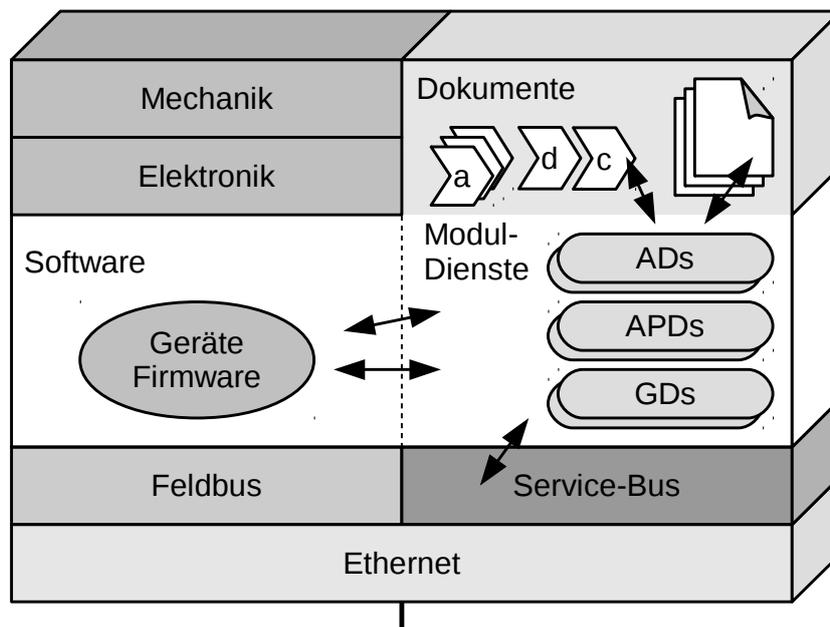
Eine Besonderheit eines rekonfigurierbaren Systems ist, dass das System während seiner Lebenszeit verändert wird. Daher können keine starren Parametrierungen für Einstellungen gewählt werden, sondern alle Annahmen und Parametrierungen müssen bei jeder durchgeführten Inbetriebnahme erneut geprüft, abgeändert, verworfen oder neu erstellt werden. Folglich muss eine Inbetriebnahmeautomatisierung diese Änderungen während Ihrer Lebenszeit durchführen können und flexibel auf eine neue Konfiguration der Maschine reagieren können.

Da Module nicht nur funktional, sondern auch informationstechnisch autark sein sollen, müssen daher in einem mechatronischen Modul alle Informationen und Vorgehensbeschreibungen gespeichert werden, die für die Nutzung des Moduls relevant sind. Eine modulinterne Speicherung der für die Inbetriebnahme relevanten Dokumente erleichtert weiterhin einen herstellerübergreifenden Einsatz der Module. Dadurch müssen keine Dokumente zusätzlich zu den Modulen transportiert und übergeben werden. Alle relevanten Parametrierungen müssen von Diensten im Modul angepasst werden können, außer solche, die nur mittels manueller Eingriffe verändert werden können.

Die Forderung nach informationstechnisch autarken Modulen hat für die bisher vorgestellte Inbetriebnahmesystematik zur Folge, dass die Module selbst ihre eigene **Inbetriebnahmebeschreibung** enthalten müssen. Diese Beschreibungen werden in Teilstücken in den Modulen gespeichert, damit diese leichter in das Inbetriebnahmeverfahren der Maschine eingebunden werden können. Diese Teilstücke werden im Folgenden als **Workflow-Fragmente** bezeichnet. Sie müssen die Inbetriebnahme eines Moduls vollständig abdecken und nach außen kommuniziert werden können.

Weiterhin bedeutet die Forderung nach autarken Modulen, dass, um eine einheitliche Sicht auf das System zu gewährleisten, alle für die Inbetriebnahme relevanten Funktionalitäten eines Moduls über Dienste nach außen bereitgestellt werden müssen. Des Weiteren müssen sich Dienste an einem Dienstverzeichnis anmelden, damit deren Auffindbarkeit gewährleistet ist.

Abbildung 8.11 zeigt eine um Workflow-Fragmente, Dienste und Beschreibungsdokumente erweiterte Übersicht eines mechatronischen Moduls.



AD: Adapterdienst; APD: Applikationsdienst; GD: Generatordienst

Abbildung 8.11: Erweitertes Modell eines mechatronischen Moduls (nach (Abel 2011))

Nach dem initialen Aktivieren der Maschine nach einer Rekonfiguration müssen zuerst Informationen über die in der Maschine vorhandenen Module abgefragt werden. Erst dann kann bestimmt werden, welche Schritte im weiteren Verlauf durchgeführt werden müssen, um die Maschine zur Funktion zu bringen. Dazu dient eine verteilte und adaptive Vorgehensweise, bei welcher nach einer ersten Initialisierung das weitere Vorgehen auf Basis der in der Maschine vorgefundenen Module festgelegt wird. Dabei werden in der Analysephase die in den Modulen gespeicherten Workflow-Fragmente abgefragt und in den Inbetriebnahme-Geschäftsprozessen eingebunden. Hierzu wird in der Generierungsphase ein Geschäftsprozess zusammengesetzt, welcher der Parametrierung der Maschinenmodule sowie der maschinen-internen Softwaresysteme (Steuerungssysteme etc.) dient. Das Vorgehen zur Komposition von Geschäftsprozessen ist in Abbildung 8.12 dargestellt.

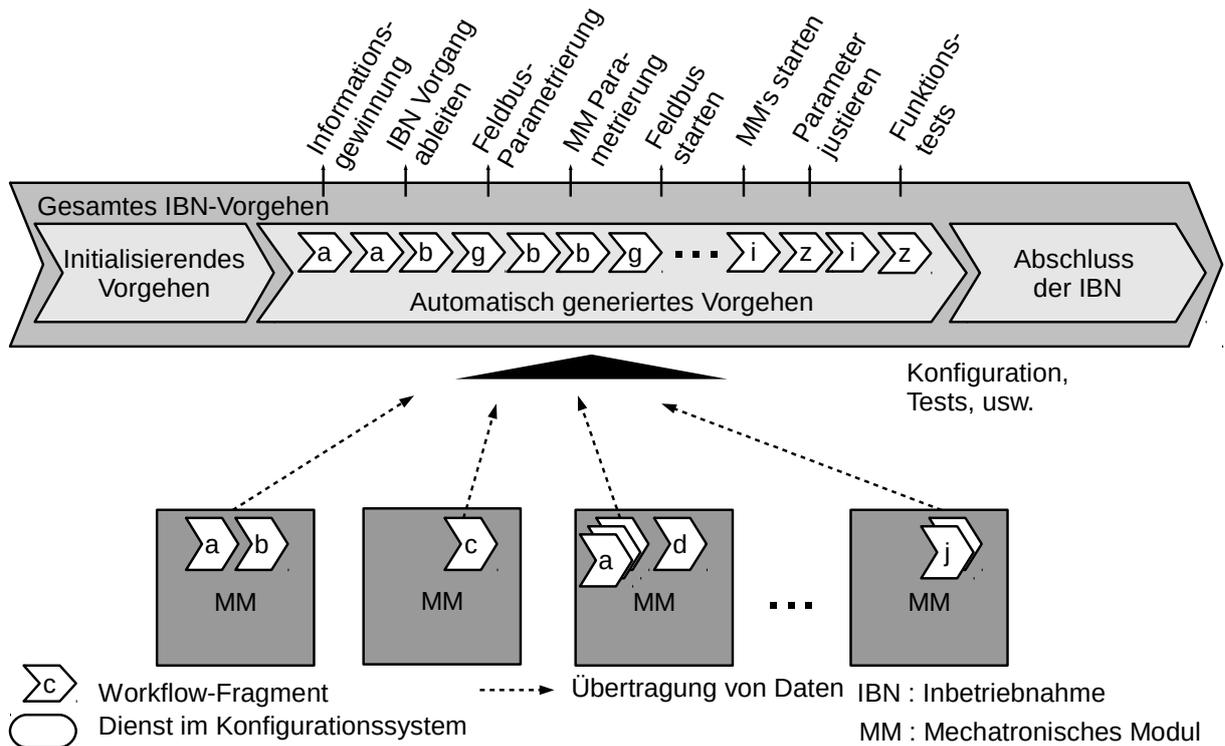


Abbildung 8.12: Komposition des Geschäftsprozesses für die Inbetriebnahme

Nach einem initialisierenden Vorgehen werden die Workflow-Fragmente der einzelnen Module abgefragt und deren Inhalt analysiert. Etwaige Abhängigkeiten zwischen den Inbetriebnahmeschritten werden in der Mediationsphase aufgelöst und die ursprünglich separaten Teile des Geschäftsprozesses in der Generierungsphase automatisch zu einem gesamten Ablauf zusammengefügt. Im weiteren Verlauf der Parametrierungsphase wird der automatisch generierte Ablauf ausgeführt. Zum Schluss folgt eine Phase für Funktionstests.

Durch die vorgestellte Vorgehensweise wird die Adaptivität bezüglich Änderungen im Aufbau der Maschine sichergestellt. Dies geschieht, indem weitgehend auf eine zentrale Informationshaltung verzichtet wird und stattdessen dynamische Informationen aus den autarken Modulen genutzt werden, um das Vorgehen zur Inbetriebnahme der Maschine zu generieren.

8.5 Erweiterung und Modellierung der inneren Abläufe

Zur Umsetzung des gesamten Inbetriebnahmeprozesses werden die in der Maschine vorhandenen Dienste in einer geeigneten Folge aufgerufen, um die Inbetriebnahmetätigkeiten auszuführen. Die Anwendungsfälle dazu sind: die Generierung von Parametrierungen und Vorgängen mit einem Generatordienst; die Aktivierung von Vorgängen (beispielsweise die Erstellung oder das Laden einer Feldbus-Konfiguration mittels eines Adapterdienstes); der Transfer von Datensätzen (beispielsweise Beschreibungsdokumente oder Softwarebestandteile); das Abfragen und Setzen von Parametern über einen Adapterdienst.

Die allgemeinen Applikationsdienste übernehmen dabei zentrale, für die Steuerung der Inbetriebnahme relevante Aufgaben wie die Abfrage von Modulinformationen und die sukzessive Ableitung eines Inbetriebnahmeverfahrens. Adapterdienste stellen Funktionalität mit einem lokalen Bezug bereit wie die Vorhaltung von konkreten Modulbeschreibungen und den Zugriff auf modulinterne Hardware. Darüber hinaus können Module Generatordienste bereitstellen, die technologieabhängige Funktionalität realisieren, die wiederum, je nach Modul, unterschiedlich ist. Ein Beispiel hierfür sind Dienste zur Ableitung einer Parametrierung für das Steuerungssystem oder für die Anwendung eines speziellen Bearbeitungsprozesses. Indem diese Dienste in das Inbetriebnahmeverfahren eingebunden werden, ist zudem eine Erweiterbarkeit an neue Anforderungen gewährleistet.

Abbildung 8.13 zeigt den Zugriff auf Dienste von der Phase „Identifikation“ bis zur Phase „Optimierung“ beispielhaft. In mechatronischen Modulen enthaltene Dienste sind in jedem Modul und damit mehrfach vorhanden.

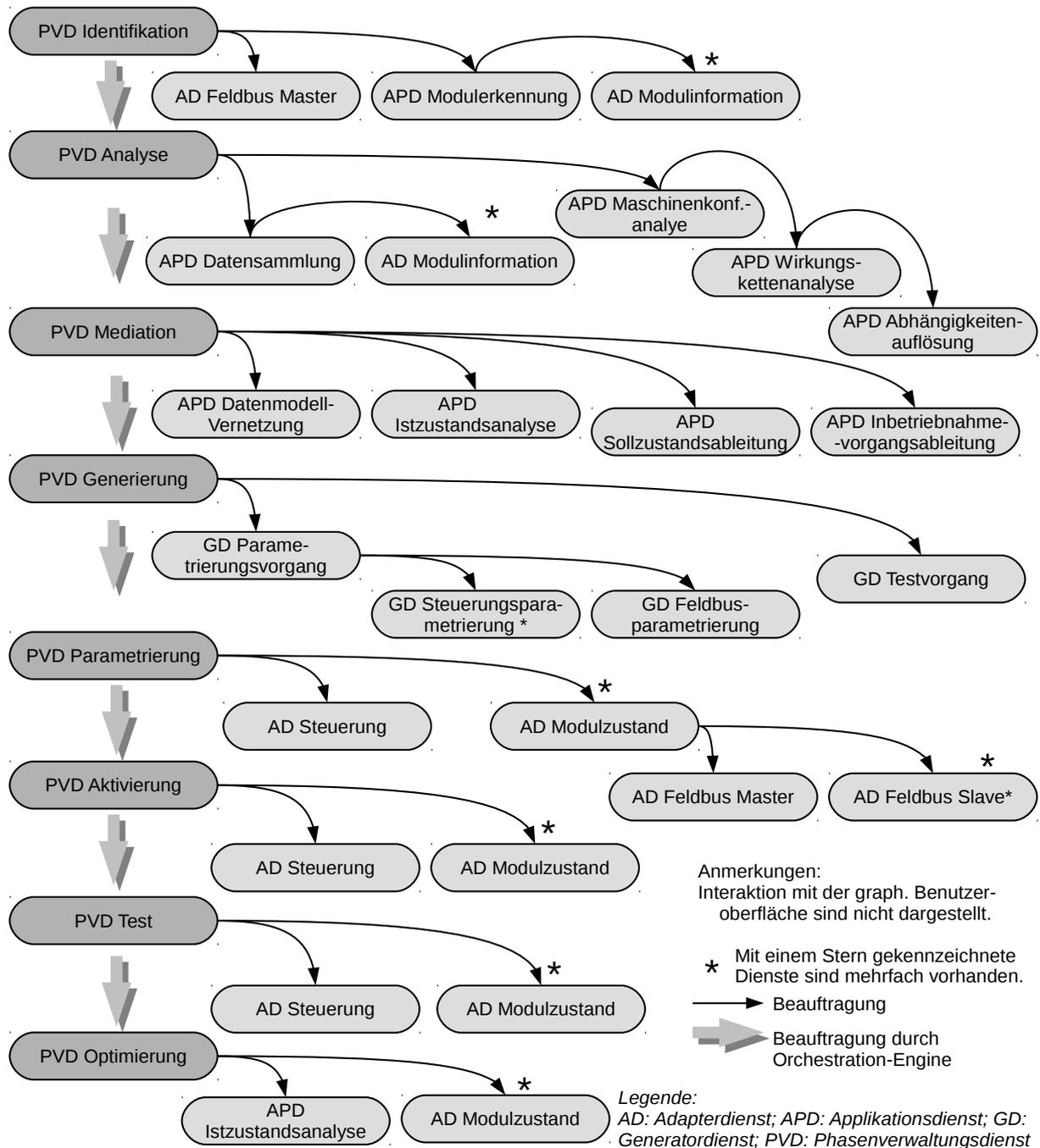


Abbildung 8.13: Übersicht zum Ablauf des systemweiten Inbetriebnahmegeschäftsprozesses

In jeder Phase findet eine Interaktion mit der graphischen Benutzeroberfläche statt, um dort Statusmeldungen anzuzeigen. Falls notwendig, kann der Inbetriebnehmer hinzugezogen werden, um manuelle Einstellungen vorzunehmen, Bewegungen zu überwachen oder Informationen einzugeben, die den Inbetriebnahmeprozess beeinflussen. Zugriffe und Transaktionen mit der graphischen Bedienoberfläche sind in der Abbildung oben der Übersichtlichkeit halber nicht dargestellt.

Mit Hilfe des „Adapterdienst Feldbus Master“ wird das maschineninterne Kommunikationssystem aktiviert. In jedem mechatronischen Modul wird ein „Adapterdienst Modulinfo“

formation“ ausgeführt, mit welchem Moduldaten nach außen kommuniziert werden. Diese werden zudem von dem „Applikationsdienst Modulerkennung“ genutzt, um die in der Maschine befindlichen Module zu erkennen.

In der Analysephase werden mit Hilfe des „Applikationsdienst Datensammlung“ Dokumente von den Modulen abgeholt. Der Inhalt der Dokumente wird anschließend mit dem „Applikationsdienst Maschinenkonfigurationsanalyse“ verarbeitet. In Folge werden weitere Applikationsdienste zur Auflösung von Wirkungsketten und Abhängigkeiten beauftragt.

Zu Beginn der Mediationsphase werden die bisher aus der Maschine gewonnenen Informationen mit dem „Applikationsdienst Datenmodellvernetzung“ untereinander vernetzt. Daraufhin wird der aktuelle Ist-Zustand, in dem sich die Maschine aktuell befindet, untersucht. Auf dieser Basis wird ein Soll-Zustand abgeleitet, welcher dem produktionsbereiten Zustand der Maschine entspricht. Anschließend wird mit dem „Applikationsdienst Inbetriebnahmevorgangsableitung“ ein Vorgehen abgeleitet, mit dem die Maschine in einen produktionsbereiten Zustand versetzt werden kann.

Aus diesen abgeleiteten Informationen werden in der Generierungsphase die notwendigen Parametrierungsanweisungen und das zur Einstellung notwendige Vorgehen zur Inbetriebnahme generiert. Dabei finden Zugriffe auf die Dienste „Generatordienst Parametrierungsvorgang“, „Generatordienst Steuerungsparametrierung“ und „Generatordienst Feldbusparametrierung“ zur Ableitung konkreter Parametrierungen statt.

Nach dem Generieren eines Inbetriebnahmevorgehens, wird das Vorgehen in der Parametrierungsphase ausgeführt. Dazu wird auf die jeweiligen Adapterdienste zugegriffen, um Parameter zu setzen und um Datensätze zu laden.

Im Anschluss werden die Subsysteme der Maschine sukzessive gestartet und während der Testphase mit Hilfe des „Adapterdienst Steuerung“ und „Adapterdienst Modulzustand“ die notwendige Funktionalität der Maschine getestet. Zum Abschluss der Inbetriebnahme wird die Maschinenfunktionalität in der Optimierungsphase analysiert, um Potential für Verbesserungen zu erkennen und umzusetzen.

8.6 Zentrale Ablaufsteuerung und sukzessive Generierung

Automatisiert ablaufende Vorgänge sind ein zentrales Element einer Inbetriebnahmeautomatisierung. Zur Automatisierung von Vorgängen wird, wie in Abschnitt 8.2 abgeleitet, das Konzept der Orchestrierung von Diensten eingesetzt. Dazu dient ein in der Maschine verteilt ablaufender systemweiter Geschäftsprozess.

Allerdings stehen nicht alle notwendigen Informationen zu Beginn des Prozesses zur Verfügung. Vielmehr müssen einige Vorgänge an den Aufbau der Maschine, die Anzahl von

verfügbaren Modulen und deren Funktionalität angepasst werden. Dieses wird erreicht, indem einerseits Teile des Geschäftsprozesses in Form von Workflow-Fragmenten in den Prozess eingebunden werden und andererseits, indem innerhalb einer Inbetriebnahmephase die Vorgänge der nächsten Phase generiert werden. Abbildung 8.14 zeigt das Vorgehen beispielhaft anhand der Generierungsphase.

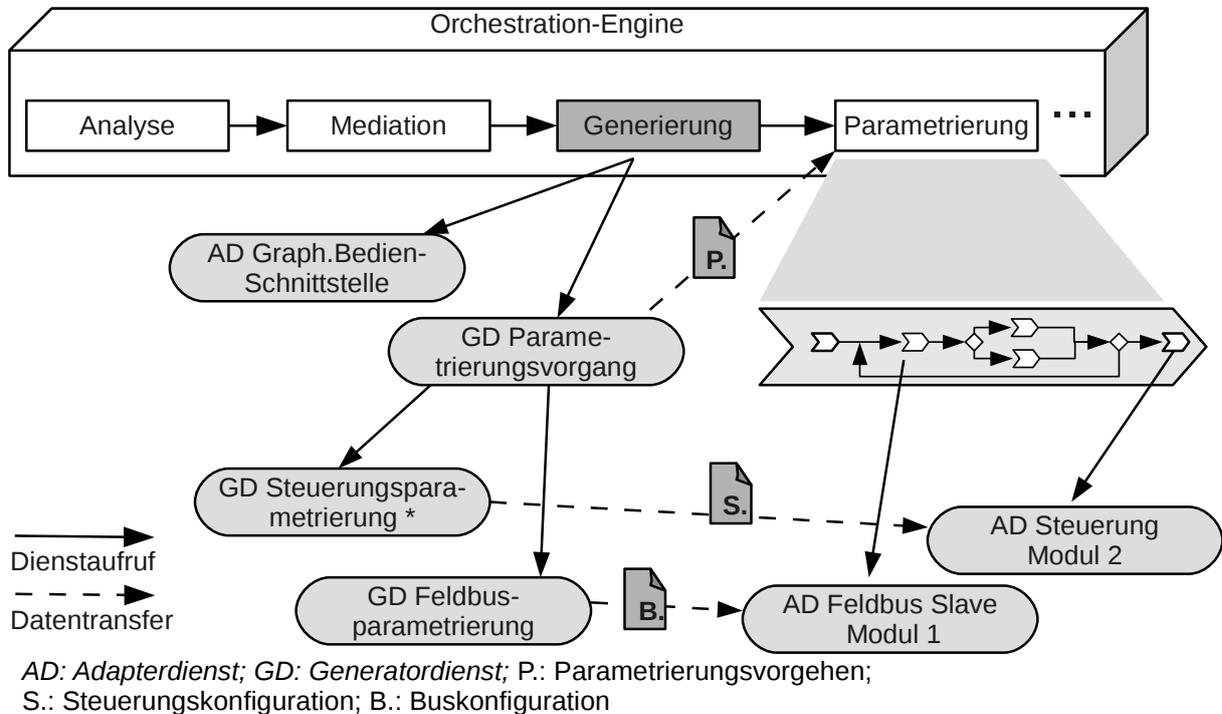


Abbildung 8.14: Zentrale Ablaufsteuerung und Generierung des Vorgehens für die Parametrierungsphase

In der Generierungsphase werden, auf Basis des in der Mediationsphase generierten Sollzustandes der Maschine, Vorgänge erzeugt, um diesen Zustand zu erreichen. Dazu bedient sich der Generatordienst für den Parametrierungsvorgang weiterer, in der Maschine vorhandener Dienste. Dabei wird eine Parametrierungsanweisung generiert, die zur Ableitung des in der Parametrierungsphase auszuführenden Geschäftsprozesses dient. Zum Abschluss der Generierungsphase wird der für die nächste Phase notwendige Geschäftsprozess generiert.

Auf diese Weise wird der gesamte für die Inbetriebnahme der Maschine benötigte Geschäftsprozess ausgeführt und dabei sukzessive und abhängig von den benötigten Maschinenfunktionalitäten automatisch generiert.

Kapitel 9

Systemarchitektur für die automatisierte Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen

In diesem Kapitel wird eine Systemarchitektur vorgestellt, welche alle Basisfunktionalitäten bereitstellt, um eine rekonfigurierbare Maschine in Betrieb zu nehmen. Da der Ansatz dieser Architektur serviceorientierten Prinzipien folgt, ist die Architektur damit per se flexibel und erweiterbar. Das Konzept der Architektur ist dabei so ausgebildet, dass die Grundfunktionalitäten für eine automatisierte Inbetriebnahme gewährleistet sind. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf Allgemeingültigkeit und Erweiterbarkeit gelegt. Zusätzliche, während der Inbetriebnahme benötigte Funktionalitäten (beispielsweise Erweiterungen für neue technologische Funktionen) können daher mit wenig Aufwand nachgerüstet werden.

Der Entwurf der Architektur nutzt die in Kapitel 8 vorgestellte Methode zur automatisierten Generierung eines Inbetriebnahmeverfahrens für rekonfigurierbare Bearbeitungsmaschinen. Dort wurde bereits ein Serviceinventar hergeleitet, das alle wichtigen und für die Inbetriebnahme relevanten Dienste enthält.

9.1 Entwurf einer maschinenweiten Systemarchitektur

Auf Basis der im vorhergehenden Kapitel hergeleiteten Methode für die automatisierte Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen wird in diesem Kapitel eine Systemarchitektur entworfen, mit der die benötigten Funktionalitäten für eine Automatisierung der Inbetriebnahme umgesetzt werden können.

Eine rekonfigurierbare Maschine besteht aus mechatronischen Modulen, die informationstechnisch über einen Feldbus verbunden sind (siehe auch Abbildung 8.2). Die Funktionalität der Maschine entsteht dabei durch die Kombination der in den Modulen vorhandenen mechanischen, elektronischen und informationstechnischen Funktionalitäten. Zusätzlich zu den bereits in den Modulen vorhandenen Softwaresystemen werden weitere Softwarebestandteile benötigt, die allgemeine Funktionalitäten in der Maschine bereitstellen. Dazu gehören für die Inbetriebnahmeautomatisierung relevante Dienste wie eine Orchestration-Engine, Dienste zum Auflösen von internen Abhängigkeiten sowie zur Generierung eines Inbetriebnahmeablaufs. Da diese Funktionalitäten eng miteinander gekoppelt sind, werden allgemeine Dienste in einem separaten und zentralen Serviceinventar zusammengefasst. Die Aufgabe der hier gesammelten Dienste ist die Koordination der Inbetriebnahme der Bearbeitungsmaschine. Daher wird diese Sammlung von Diensten (inklusive der zur Ausführung

notwendigen Orchestration-Engine und einer Datenbank zur Datenhaltung) im Gesamten als **Inbetriebnahme Koordinator System (IKS)** bezeichnet.

Weiterhin erhält jedes mechatronische Modul ein eigenes separates Inventar mit Moduldiensten. Diese Dienste verwalten Modulfunktionalität und sind mit entsprechenden Schnittstellen zur Firmware des Moduls ausgestattet. Für die Kommunikation von Diensten innerhalb der Maschine ist es notwendig, eine sichere und flexible Kommunikationsmöglichkeit zwischen den Modulen in allen Betriebszuständen zu gewährleisten. Daher ist der Aufbau eines Kommunikationssystems, das diese Anforderungen erfüllt, eines der vorrangigen Ziele. Für Dienste innerhalb der Maschine ist die Möglichkeit Botschaften und Informationen untereinander auszutauschen von entscheidender Bedeutung.

Wie in Kapitel 4 bestimmt, sollen bei dem Entwurf der Architektur vorrangig etablierte Standardtechnologien zum Einsatz kommen. Aufgrund dessen sowie aufgrund der großen Verbreitung von Web-Services als Kommunikationsmittel werden in dieser Arbeit Dienste mit Hilfe der **Web-Services Standards** umgesetzt. Daher werden Dienste im Folgenden als Web-Services umgesetzt, welche SOAP verwenden, WSDL als Schnittstellenbeschreibung nutzen und HTTP als Transportmechanismus einsetzen.

Zur Gewährleistung einer zuverlässigen Kommunikationsstrecke zwischen den Modulen der Maschine ist es notwendig, dass die Kommunikation per HTTP sichergestellt ist. Da HTTP in der Regel wieder auf TCP und IP als Transportmechanismus zurückgreift, kann durch Realisierung einer Kommunikation über selbige ein Austausch von Botschaften zwischen den Diensten gewährleistet werden.

Aus diesem Grund wird in der Systemarchitektur neben der reinen Kommunikation über den Feldbus eine zweite Kommunikationsmöglichkeit über das IP-Protokoll eingeführt. Dadurch entsteht eine zweite logische Kommunikationsschicht mit der beliebige, auf dem IP-Protokoll aufbauende Verbindungen zwischen den Modulen realisiert werden können. Dies ermöglicht eine zusätzliche und zuverlässige Kommunikation zwischen den Diensten.

Da der zum Feldbus separate Kommunikationskanal vorrangig als Kommunikationsmedium für Dienste dient und somit auch die eigentlichen technologischen Aspekte der Kommunikation zwischen den Diensten im Sinne eines klassischen Middlewaresystems verbirgt, wird dieser Kommunikationskanal im Weiteren auch als Service-Bus bezeichnet. Da der Feldbus im Normalfall erst während der Inbetriebnahme parametrierbar und gestartet wird, ist es notwendig, dass der Service-Bus genutzt werden kann, bevor der Feldbus vollständig betriebsbereit ist. Der Service-Bus muss somit direkt nach dem Aktivieren der Energieversorgung verfügbar sein, damit der Zugriff auf alle Module der Maschine sowie deren Parametrierung stattfinden kann.

Abbildung 9.1 zeigt die resultierende Übersicht der Systemarchitektur für eine rekonfigurierbare Bearbeitungsmaschine, welche um das Inbetriebnahmekoordinatorssystem (IKS) und den Service-Bus erweitert wurde.

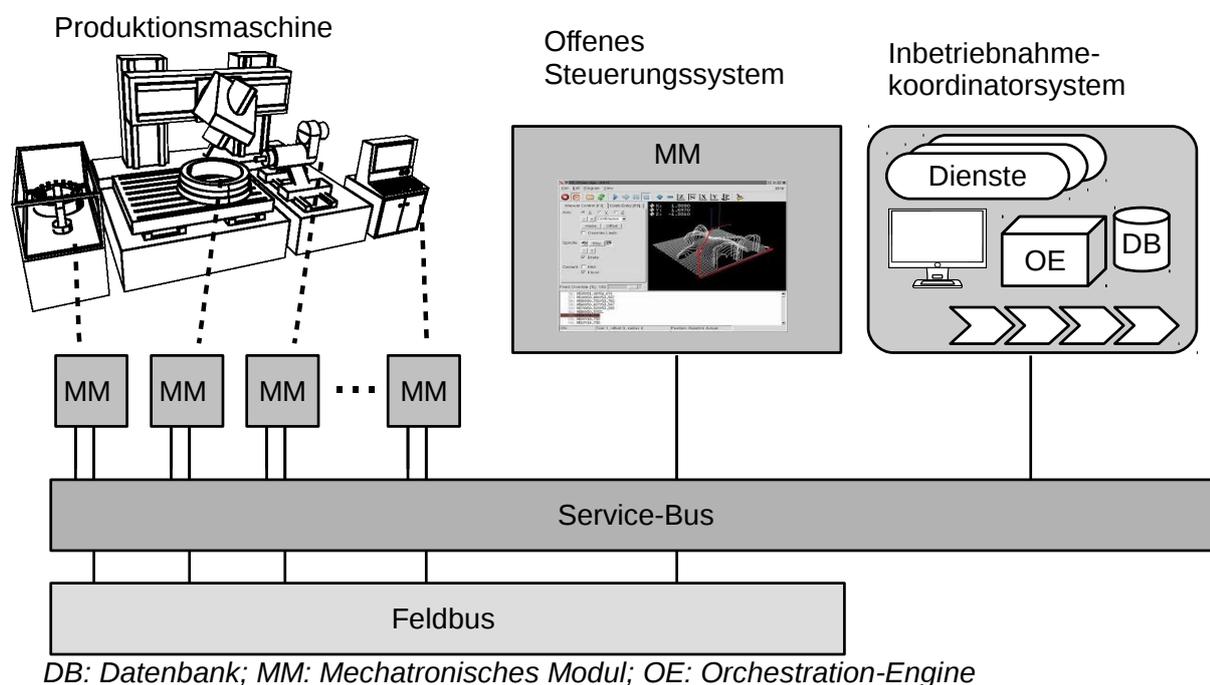


Abbildung 9.1: Übersicht: Systemarchitektur mit Service-Bus und Inbetriebnahmekoordinatorssystem

Als positiver Nebeneffekt dieses Systementwurfs ist der physikalische Speicherort und Ausführungsort eines Dienstes für das Auffinden und den Aufruf des Dienstes nun nicht mehr relevant. Dienste, welche nicht an bestimmte Hardwarevoraussetzungen gebunden sind, können so an einem beliebigen Ort im System ausgeführt werden. Dies gilt auch für das IKS. Dieses kann auf einem separaten Rechnersystem sowie auf einem mit ausreichender Rechenleistung ausgestatteten mechatronischen Modul in der Maschine physikalisch platziert werden, sofern keine Hardwareabhängigkeit vorliegt. Für die Integration von rechen schwachen mechatronischen Modulen können rechenintensive Dienste überdies auch vor dem eigentlichen Start von einem Modul auf ein anderes transferiert und dort ausgeführt werden. In den folgenden Abschnitten werden die im Entwurf der Architektur enthaltenen Komponenten näher vorgestellt.

9.2 Entwurf der internen Kommunikationssysteme

Ein Feldbussystem innerhalb einer Maschine hat vorrangig die Aufgabe die Komponenten der Maschine zyklisch mit Sollwerten vom Steuerungssystem zu versorgen sowie die aktuellen Istwerte zurück an das Steuerungssystem zu übertragen. Des Weiteren können durch

azyklische Kanäle weitere, über den zyklischen Datenverkehr hinausgehende, Zugriffe erfolgen.

Sollen Dokumente übertragen oder weitere, parallele und flexible Kommunikationsmethoden eingesetzt werden, sind die im Feldbusprotokoll spezifizierten Zugriffsmethoden nicht mehr ausreichend. Einige Feldbussysteme erlauben daher die Übertragung von Ethernet- oder IP-Telegrammen zusätzlich zur eigentlichen Feldbuskommunikation auf einem Nicht-Echtzeit-Kanal. Dies ist auch bei sercos III der Fall (Sercos International 2012b). Dadurch können beliebige, weitere, auf Ethernet oder TCP/IP basierende Kommunikationsprotokolle benutzt werden. In der Praxis wird aus Gründen der Hardwarekonsolidierung oft auf eine Vernetzung von mehreren, parallelen Bussystemen verzichtet. Dies soll auch hier zur Anwendung kommen. Als Transportmedium für die Kommunikation der Dienste innerhalb der Maschine wird daher ein nicht echtzeitfähiger Kommunikationskanal innerhalb des Feldbussystems als Service-Bus genutzt. Der HTTP-Transfer für Web-Services erfolgt hierbei, wie in der Informationstechnik üblich, per TCP und IP.

Da die Web-Service Kommunikation während der Inbetriebnahme der Maschine als wichtige Grundfunktion genutzt wird, muss diese in allen Betriebszuständen verfügbar sein. Dazu ist es erforderlich, dass diese Funktionalität ebenfalls vom Feldbussystem in allen relevanten Betriebszuständen unterstützt wird. Der Automations-Bus sercos III (Sercos International 2012a) erlaubt eine NRT-Kommunikation in allen Betriebszuständen über den Unified Communication Channel (UCC). Dieser Kommunikationskanal ist daher als Basis für einen Service-Bus zur Vernetzung von mechatronischen Modulen geeignet.

Damit nach dem Aktivieren der Maschine eine Kommunikation über Web-Services genutzt werden kann, ist eine initialisierende Sequenz erforderlich. Diese muss automatisch durchlaufen werden und die Subsysteme der Maschine in geeigneter Weise initialisieren. Im Anschluss können beide Kommunikationsmethoden parallel genutzt werden. Abbildung 9.2 zeigt die Schritte, die von der Initialisierung des Bussystems bis hin zur Produktion notwendig sind am Beispiel von sercos III.

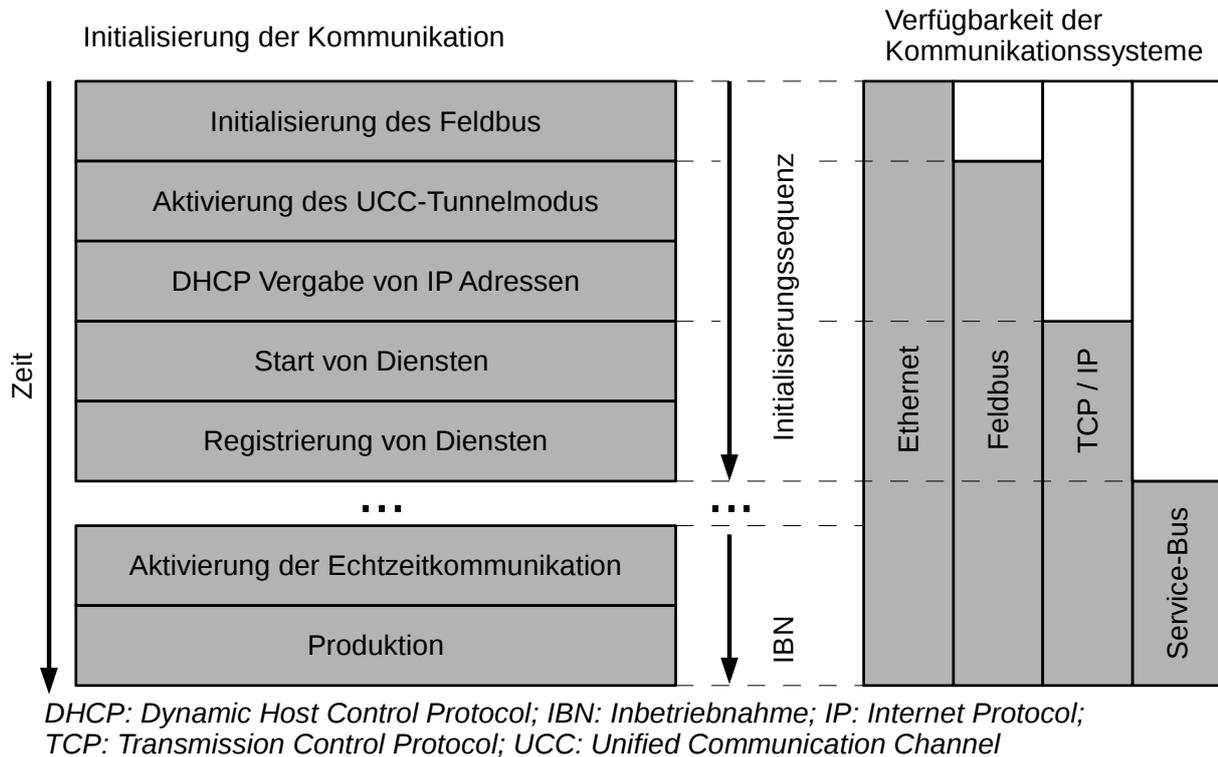


Abbildung 9.2: Initialisierung der Kommunikation in der Forschungsplattform

Zu Beginn werden der Feldbus und der UC-Kanal automatisch aktiviert. Die IP-Adressvergabe kann anhand der sercos Adressen geschehen. Dienste werden gestartet und registrieren sich an einem Service Repository. Nachdem alle Dienste aktiv und erreichbar sind, kann mit der weiteren Inbetriebnahme der Maschine fortgefahren werden.

Web-Service Kommunikation dient ausschließlich der Nicht-Echtzeit-Kommunikation. Der Aufbau von Verbindungen für Echtzeitdaten im Feldbussystem findet jeweils über die Firmware der Feldbusschnittstelle eines mechatronischen Moduls statt. Die dazu notwendige Parametrierung der Verbindungen kann über die Adapterdienste für Feldbus-Master und -Slaves beauftragt werden. Dies erlaubt den Aufbau von beliebigen, echtzeitfähigen Verbindungen, sobald der Feldbus betriebsbereit ist (siehe auch Abbildung 9.3).

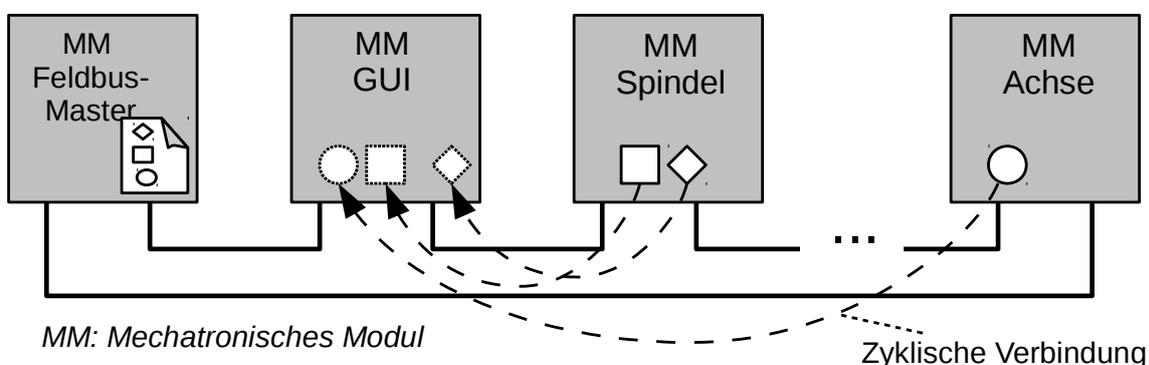


Abbildung 9.3: Parametrierung von Echtzeitdatenverbindungen zwischen mechatronischen Modulen

Moduldienste können den „Adapterdienst Feldbus-Master“ beauftragen, um Datenverbindungen zu parametrieren. Im Beispiel werden ein Spindelmodul sowie ein Achsmodul als Datenquellen und die graphische Bedienoberfläche als Datensenke parametriert.

Die in diesem Abschnitt konzeptionieren Kommunikationsmethoden fließen in den Entwurf von mechatronischen Modulen ein. Der Entwurf dieser ist Gegenstand des folgenden Abschnitts.

9.3 Erweiterung des Architekturkonzepts mechatronischer Module

Idealerweise dient ein mechatronischer Baukasten als Grundlage zur Erstellung mechatronischer Module. In dieser Weise können modulinterne Dokumente, die für eine spätere Funktion essentiell sind, generiert werden (vgl. (Lewek 2005)). Damit können die Inbetriebnahmebeschreibung des Moduls und das zugehörige informationstechnische Modell aus den vorhandenen Unterkomponenten generiert werden. Im Anschluss kann dieses mit zusätzlichem, domänenspezifischem Wissen des Modulherstellers angereichert werden.

Der folgende Systementwurf ist prinzipbedingt generisch und damit für verschiedene Ausprägungen von Modulkonzepten nutzbar. Da das erstellte Konzept nicht direkt von der baulichen Struktur der Module abhängt, sind verschiedene Modulkonzepte möglich. Es existieren verschiedene mechanische Baukastensysteme für den Aufbau von rekonfigurierbaren Maschinen (siehe auch Abschnitt 3.5.5). Als Referenz dient in dieser Arbeit das im SFB 467 (Westkämper 2006) erarbeitete Modularisierungskonzept. Das Modell ist im Ausgangszustand unzureichend für die Modellierung weiterer, informationstechnischer Funktionalität (beispielsweise zur Integration einer Inbetriebnahmeautomatisierung) geeignet. Daher wird es im Folgenden um die notwendige Funktionalität erweitert (siehe Abschnitt 8.4).

9.3.1 Bestimmung der internen Informationstechnik von mechatronischen Modulen

In diesem Abschnitt wird eine verfeinerte Systemarchitektur für den Entwurf von mechatronischen Modulen vorgestellt. Besondere Beachtung findet dabei der Entwurf der informationstechnischen Funktionalität, da diese für die Automatisierung von verteilten Abläufen essentiell ist.

Damit die in Kapitel 8 entworfene Methode für die Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen erfolgreich eingesetzt werden kann, wurde die Architektur eines mechatronischen Moduls bereits um Workflow-Fragmente, modulinterne Dienste und beschreibende Dokumente erweitert.

Diese Erweiterungen erfordern das Vorhandensein von interner Rechenkapazität und Speicherplatz. Die in Abschnitt 9.2 hergeleiteten Anforderungen machen weiterhin die Existenz einer Feldbusschnittstelle, eines TCP/IP-Protokollstapels sowie eines echtzeitfähigen Verhaltens notwendig. Folglich wird ein Echtzeitbetriebssystem im zentralen Steuerungssystem eines mechatronischen Moduls benötigt. Damit wird es möglich neben der Feldbuskommunikation auch TCP/IP- Kommunikation im UC-Kanal über den Protokollstapel des Betriebssystems zu nutzen (Abel und Klemm 2013a). Dazu wird die Feldbusschnittstelle an den TCP/IP-Protokollstapel des Betriebssystems angebunden. In Folge können die auf den mechatronischen Modulen ausgeführten Programme ohne Modifikationen TCP-Verbindungen zu weiteren Modulen aufbauen. Dies eröffnet die Möglichkeit zur Ausführung von Diensten auf mechatronischen Modulen mit Feldbusschnittstelle.

Nicht alle Funktionalitäten innerhalb eines mechatronischen Moduls können direkt aus einem Steuerungssystem heraus genutzt werden. Da mechanische Effekte nur über elektronische Wirkung von einem Steuerungsrechner ausgelöst und genutzt werden können (vgl. Abschnitt 7.2), resultiert daraus eine hierarchische Steuerungsarchitektur. Funktionalitäten, welche nicht steuerungstechnisch umgesetzt werden können, müssen bei einer Inbetriebnahme manuell vom Inbetriebnehmer bedient werden. Abbildung 9.4 zeigt die steuerungstechnische Hierarchie am Beispiel der Übertragung eines Effektes mit einem Servo-Antrieb, einer Welle und einem Zahnriemen.

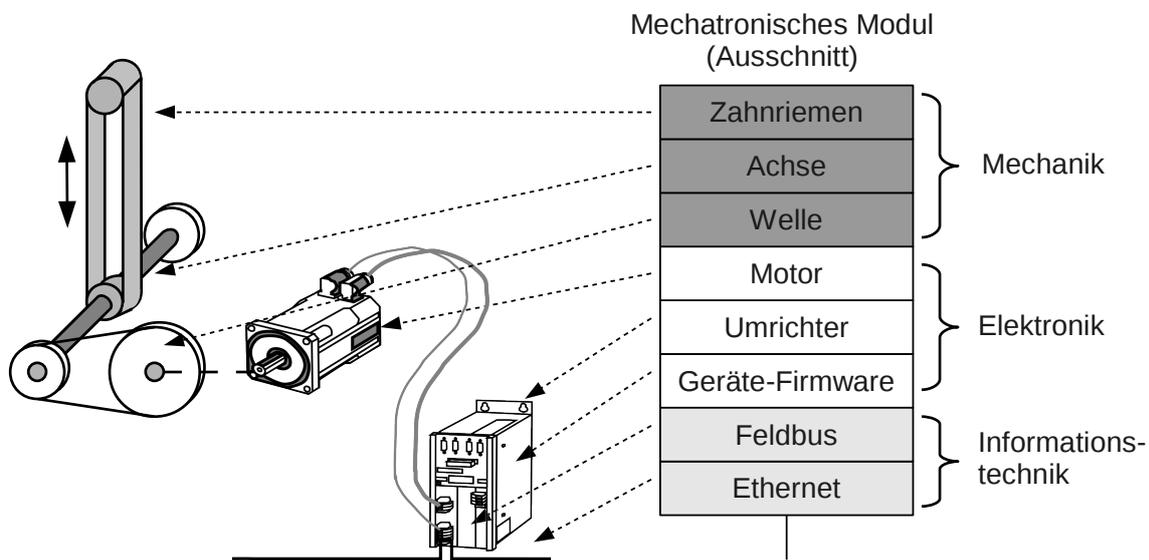


Abbildung 9.4: Steuerungstechnische Hierarchie am Beispiel eines Servo-Antriebes

Für die Integration eines mechatronischen Moduls in ein mittels eines Feldbussystems vernetztes Gesamtsystem ist primär die informationstechnische Schnittstelle zu anderen Modulen relevant. In einer Maschine sind nicht zwingend alle Komponenten mit mechanischer, elektronischer und informationstechnischer Funktionalität ausgestattet. Für die Repräsentation als mechatronisches Modul ist es jedoch notwendig, dass zumindest die informati-

onstechnische Anbindung und die modulinternen Dienste für die Kommunikation mit der Peripherie vorhanden sind. Damit ist es denkbar, dass mechatronische Module nicht zwingend mechanische oder leistungselektronische Funktionalitäten bereitstellen müssen. Folglich sind auch softwarezentrierte Komponenten wie Steuerungssysteme und andere primär auf Software basierende Komponenten mit diesem Ansatz vereinbar. Für die Anbindung eines Moduls über ein Feldbussystem macht dies keinen direkten Unterschied, da die informationstechnische Schnittstelle nach außen von den mechanischen und elektronischen Eigenschaften eines Moduls nicht beeinflusst wird. Abbildung 9.5 zeigt drei mögliche Modulvarianten: Mit dieser Betrachtungsweise können neben Modulen mit Mechanik und Elektronik (a), auch reine Software- / Firmwaresysteme (c) oder elektronische Systeme (b) als Module in die Maschine integriert werden. Die informationstechnische Schnittstelle bleibt dabei unverändert.

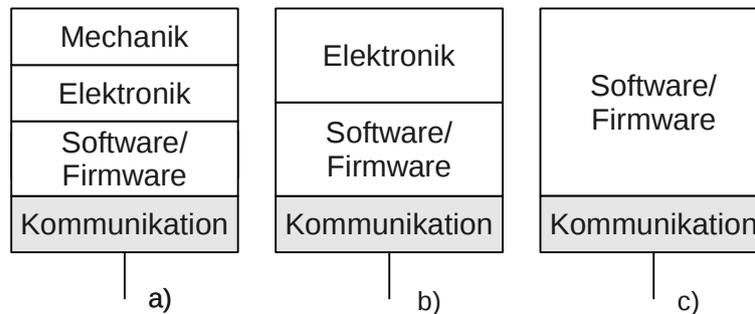


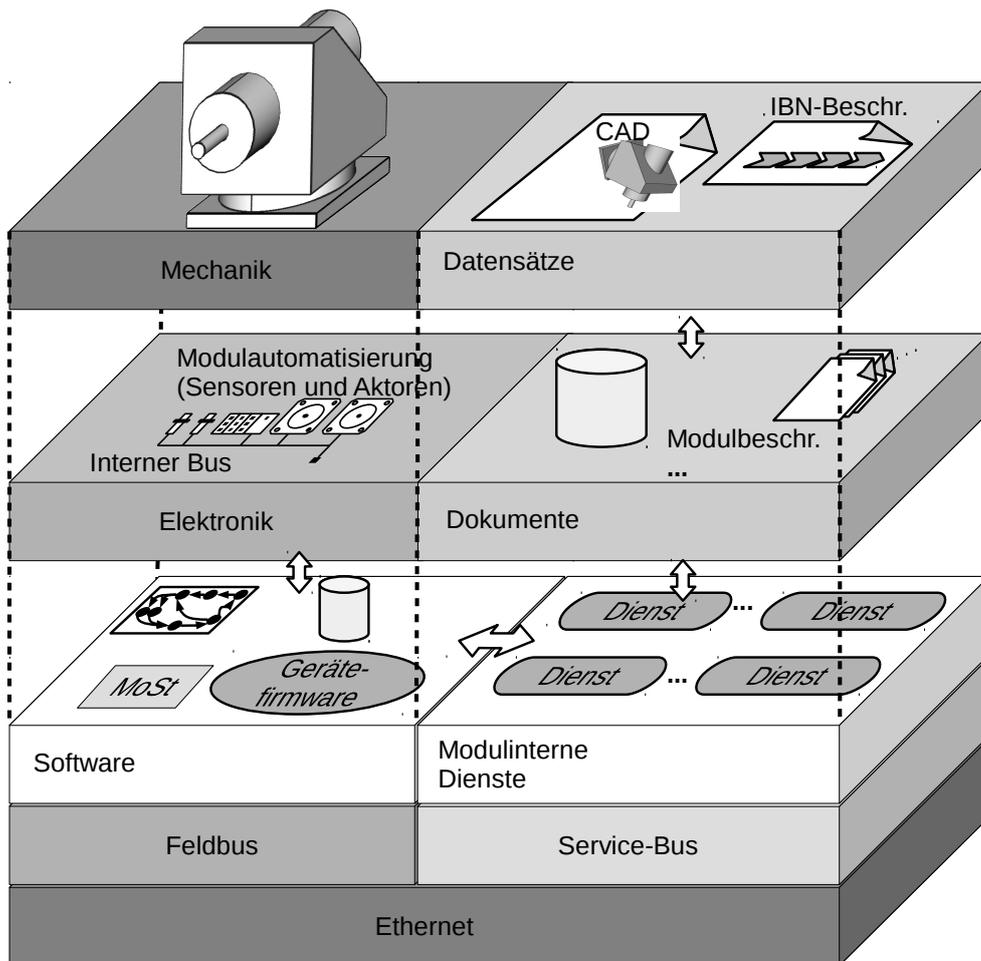
Abbildung 9.5: Architekturvarianten von mechatronischen Modulen (nach (Abel 2011))

Mit dieser Sichtweise auf die Architektur eines Moduls wird die Schnittstelle nach außen stark vereinheitlicht. Somit bleibt auch der Ansatz zur Homogenisierung von peripheren Schnittstellen erhalten (siehe auch (Westkämper 2008) im Teilprojekt T3).

Während der Inbetriebnahme müssen verschiedene Informationen zwischen dem IKS und den mechatronischen Modulen ausgetauscht werden. Dazu gehören einzelne Parametrierungen und Beschreibungsdokumente. Aus diesem Grund werden innerhalb eines mechatronischen Moduls elektronisch lesbare Dokumente gespeichert, die während der Inbetriebnahme benötigt werden. Auf welche Dokumente zugegriffen wird, hängt dabei vom Einsatzzweck des Moduls ab sowie davon, welche Dokumente das IKS benötigt, um die Maschine in Betrieb zu nehmen. Des Weiteren hängen Anzahl und Umfang der benötigten Dokumente vom finalen Automatisierungsgrad des IKS ab.

Zur Realisierung der für die Produktion relevanten Funktionalitäten eines Moduls dient die Firmware der Modulsteuerung. Diese ermöglicht die Nutzung der Modulfunktionen über das Feldbussystem in Echtzeit und interagiert mit der elektronischen Peripherie. Zum Anschluss von modulinternen Komponenten an das Steuerungssystem des Moduls können weiterhin, abhängig von der Modulkonstruktion, unterlagerte Feldbussysteme eingesetzt werden.

Zudem werden in einem Modul Dienste für die Automatisierung der Inbetriebnahme benötigt sowie für den Austausch von Informationen mit der Außenwelt. Damit Dienste mit der Firmware des Moduls interagieren können, sind Schnittstellen notwendig, die einen Informationsaustausch zwischen beiden Systemen ermöglichen. Dies ermöglicht u.a. eine Parametrierung der Feldbusschnittstelle vor dem Start des Feldbussystems. Abbildung 9.6 zeigt die um interne Dienste und Dokumente erweiterte informationstechnische Architektur eines mechatronischen Moduls.



Beschr.:Beschreibung; IBN: Inbetriebnahme; MoSt: Modulsteuerungssystem

Abbildung 9.6: Erweitertes Architekturkonzept für mechatronische Module

Auf der linken Seite sind die traditionell in Bearbeitungsmaschinen genutzten Elemente dargestellt. Die mechanische Konstruktion, welche die Eigenschaften des Moduls wesentlich bestimmt, ist stark vereinfacht dargestellt. Nach unten hin sind die mechanischen Elemente über Sensoren und Aktoren an die Modulautomatisierung angebunden. Je nach Modulkonzept können hier auch unterlagerte Bussysteme zum Einsatz kommen. Die Steuerung der elektronischen Elemente findet über die Modulfirmware im Modulsteuerungssystem (MoSt) statt. Hier befinden sich auch die Zustandsautomaten, welche den Modulzustand

beeinflussen. Eine kleine Datenbank dient zur Verwaltung der über den Feldbus les- und beschreibbaren Parameter.

Auf der rechten Seite sind die zusätzlich für die Inbetriebnahmeautomatisierung notwendigen Elemente dargestellt. Dokumente, die der Selbstbeschreibung des Moduls dienen, wie Modul- und Schnittstellenbeschreibungen, CAD-Modelle und Inbetriebnahmebeschreibungen werden in der Moduldatenbank oder separat als Datensatz gespeichert. Der Zugriff auf die Dokumente erfolgt über Adapterdienste. Diese befinden sich im moduleigenen Inventar und ermöglichen zudem den Zugriff auf modulinterne Funktionalitäten.

Mit Hilfe des Service-Bus kann früher auf modulinterne Funktionalität zugegriffen werden als über den Feldbus. Damit ist die Möglichkeit zur Parametrierung der Modulsteuerung und der Feldbusschnittstelle gegeben, bevor diese für Steuerungsaufgaben bereit sein müssen.

9.3.2 Beschreibung (und Nutzung) von Modulfunktionalität

Die Beschreibung von Informationen ist eine Herausforderung in der Informationstechnik. Auch in der rekonfigurierbaren Produktion spielt die Beschreibung von Informationen zu Maschinencharakteristika und internen Zusammenhängen eine entscheidende Rolle. Zur Beschreibung von Modulinformationen bieten sich, neben domänenspezifischen Beschreibungssprachen, auch solche an, welche wie AutomationML aus mehreren Formaten zusammengesetzt und untereinander vernetzt sind. Der dadurch entstehende Vorteil ist, dass sich durch die Vernetzung von Informationen eine vollständigere Beschreibung der mechatronischen Maschinenfunktionalität ergibt.

Indem eine Datenbank zur Speicherung von Moduldokumenten eingesetzt wird, können dort beliebige Dokumente integriert werden. Dadurch können Dokumente, welche beispielsweise neue integrierte Maschinenfunktionalitäten betreffen, hinzugefügt werden, ohne dass hierzu konzeptionelle Änderungen notwendig sind. Zur Verarbeitung der Dokumente und zur Gewinnung von Inbetriebnahmeinformationen müssen gegebenenfalls, abhängig vom Maschinenmodell, weitere Dienste in die Module sowie in das IKS integriert werden.

Zur Abbildung von gespeicherten Dokumenten wurde das Strukturmodell eines mechatronischen Moduls erweitert. Moduldienste dienen darin als Schnittstelle für Abruf und Ablage von Dokumenten sowie für deren Verarbeitung. Abbildung 9.7 zeigt das erweiterte Strukturmodell eines mechatronischen Moduls.

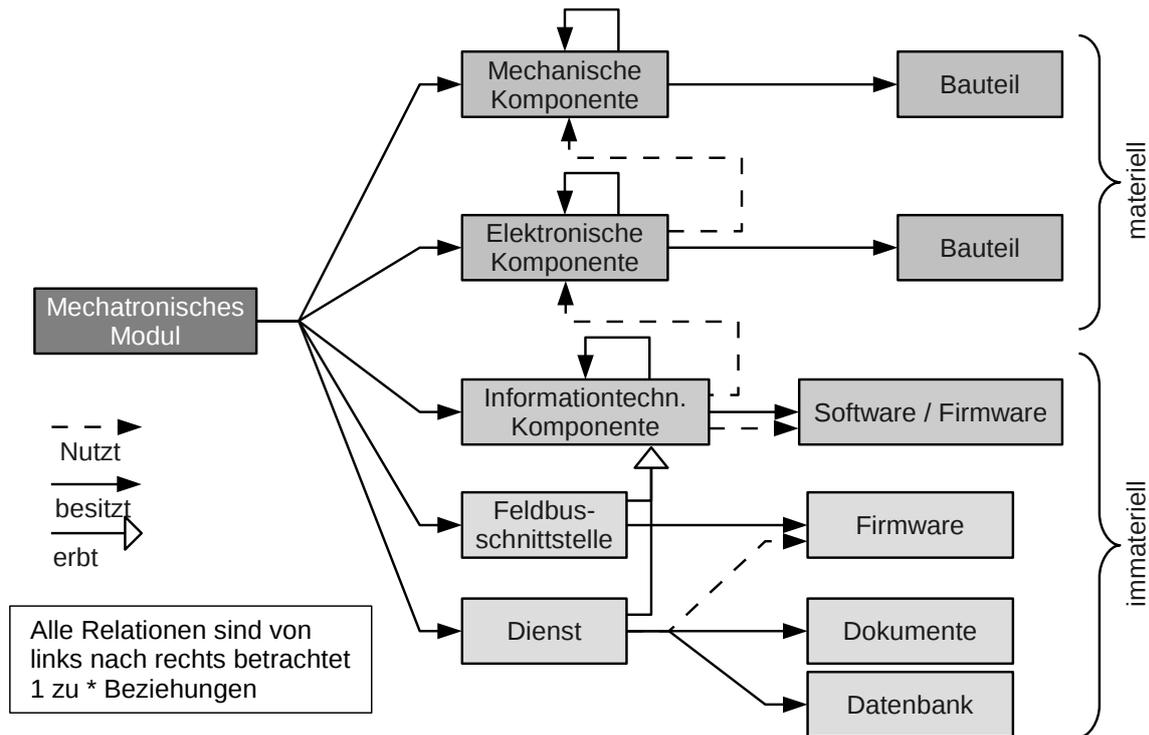


Abbildung 9.7: Strukturmodell eines mechatronischen Moduls

Damit die Funktionalitäten des Moduls von außen genutzt werden können, müssen Beschreibungen der informationstechnischen Schnittstellen vorliegen. Als Formate zur Spezifikation der Modulcharakteristika dienen daher mindestens:

- Eine Web-Service Schnittstellenbeschreibung als WSDL-Dokument
- Eine Inbetriebnahmebeschreibung des Moduls in Form von Workflow-Fragmenten
- Eine Beschreibung der funktionalen Feldbusschnittstelle in Form einer sercos III SDDML-Beschreibung
- Eine Modulbeschreibung im XML-Format

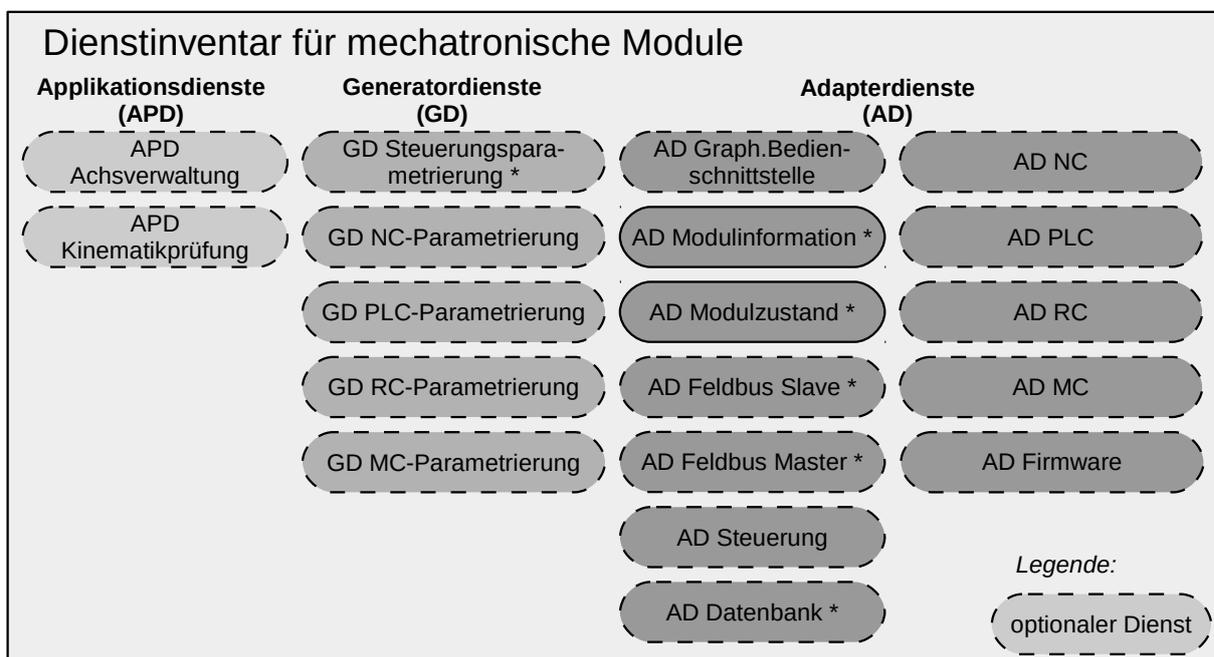
Darüber hinaus können in Modulen auch weitere Formate zur Beschreibung von Struktur, Funktion etc. genutzt werden. Des Weiteren können in der Datenbank neben Dokumenten auch beliebige andere Datensätze und Dateien gespeichert werden. Beispiele für mögliche Datensätze und Erweiterungen sind:

- Formale Beschreibung der Modulfunktionalität
- AutomationML Beschreibung (für Verhalten, Topologie und Geometrie)
- CAD-Modell / Kinematikmodell
- Treiber für die Anbindung von Software an Modulhardware
- Schalt-, Stromlauf-, Fluid- und Hydraulikpläne
- Informationen über den Energie- und Medienverbrauch des Moduls
- Informationen über die Einsatzhistorie des Moduls und Wartungsintervalle
- Dynamisch generierte Informationen aus Firmware, Software und Diensten

Mit der in diesem Abschnitt um Dokumente, Datenbank und Dateien erweiterten Modulstruktur können erweiterte Funktionalitäten für eine automatisierte Inbetriebnahme integriert werden. Der Einsatz dieser Funktionalitäten wird im folgenden Abschnitt vorgestellt.

9.3.3 Modulinterne Dienste für die Inbetriebnahmeunterstützung

Zur Repräsentation der moduleigenen Funktionalitäten werden separate Dienste innerhalb der mechatronischen Module benötigt. Diese Dienste besitzen Schnittstellen zur Firmware des Moduls und haben Zugriff auf die im Dateisystem oder in der internen Datenbank gespeicherten Dokumente. Es ist daher erforderlich, dass bestimmte Dienste direkt innerhalb eines mechatronischen Moduls gespeichert und ausgeführt werden. Die Funktionsweise entspricht damit dem eines Adapters für Zugriffe von außen. Zu diesem Zweck ist in jedem Modul ein separates Inventar enthalten. Neben den in jedem Modul verfügbaren Diensten, wie dem Datenbank- und dem Firmwareadapter, können, je nach Modultyp, auch weitere Dienste enthalten sein. Einen Überblick über die im Modul enthaltenen Funktionalitäten geben die Modulbeschreibung sowie der Modulinformationsdienst. Abbildung 9.8 zeigt das Serviceinventar im Überblick mit einigen Diensten sowie mit Kandidaten für weitere Dienste.



NC: Numeric Control; RC: Robot Control; PLC: Programmable Logic Controller; MC: Motion Control

Abbildung 9.8: Übersicht: Dienstinventar für mechatronische Module

Die Anzahl sowie die Art der Dienste unterscheiden sich je nach Funktionalität eines Moduls (optionale Dienste sind im Bild gestrichelt eingezeichnet). Ein als numerisches Steuerungssystem geartetes Modul enthält demnach Dienste für die Inbetriebnahme des Steuerungssystem.

systems sowie zur Erstellung einer Steuerungskonfiguration. Ein Modul, das beispielsweise als Verbund von Bewegungsachsen mit Sensoren, Aktoren und mechanischer Peripherie gestaltet ist, beinhaltet hingegen Dienste für die Einstellung und Justierung seiner internen Komponenten.

9.4 Feinentwurf des Inbetriebnahmekoordinator-systems

Das Inbetriebnahmekoordinator-system (IKS) nimmt eine zentrale Rolle bei der Inbetriebnahme einer rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschine ein. Es besteht aus einer Sammlung von Diensten zur Verarbeitung von Inbetriebnahmeinformationen und stellt damit das wichtigste Element bei der automatisierten Inbetriebnahme dar. Neben den zentralen Diensten beinhaltet es zudem die Orchestration-Engine zur Automatisierung von internen Aufgaben. Zusätzlich sind das graphische Bediensystem (GUI) und eine Datenbank zur Speicherung von Informationen enthalten. Darüber hinaus können Dienste, welche in Modulen ausgeführt werden, ein logischer Bestandteil des IKS sein. Dies ist beispielsweise bei einem Applikationsdienst der Fall, wenn dieser in einem Modul Funktionalitäten zur Steuerungskonfiguration bereitstellt. Aus informationstechnischer Sicht handelt es sich bei dem IKS um eine Menge von in der Bearbeitungsmaschine verstreuten Diensten, die über einen Service-Bus in Verbindung stehen (siehe Abbildung 9.9).

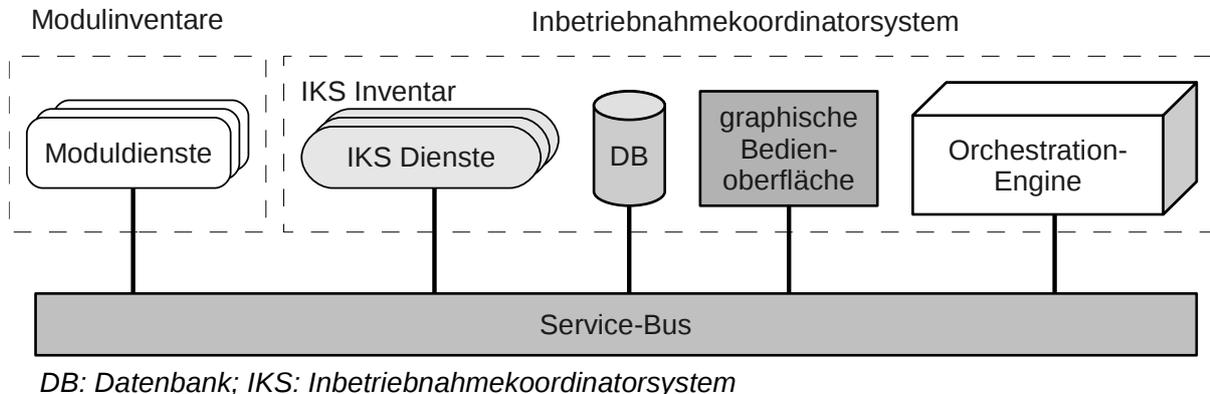
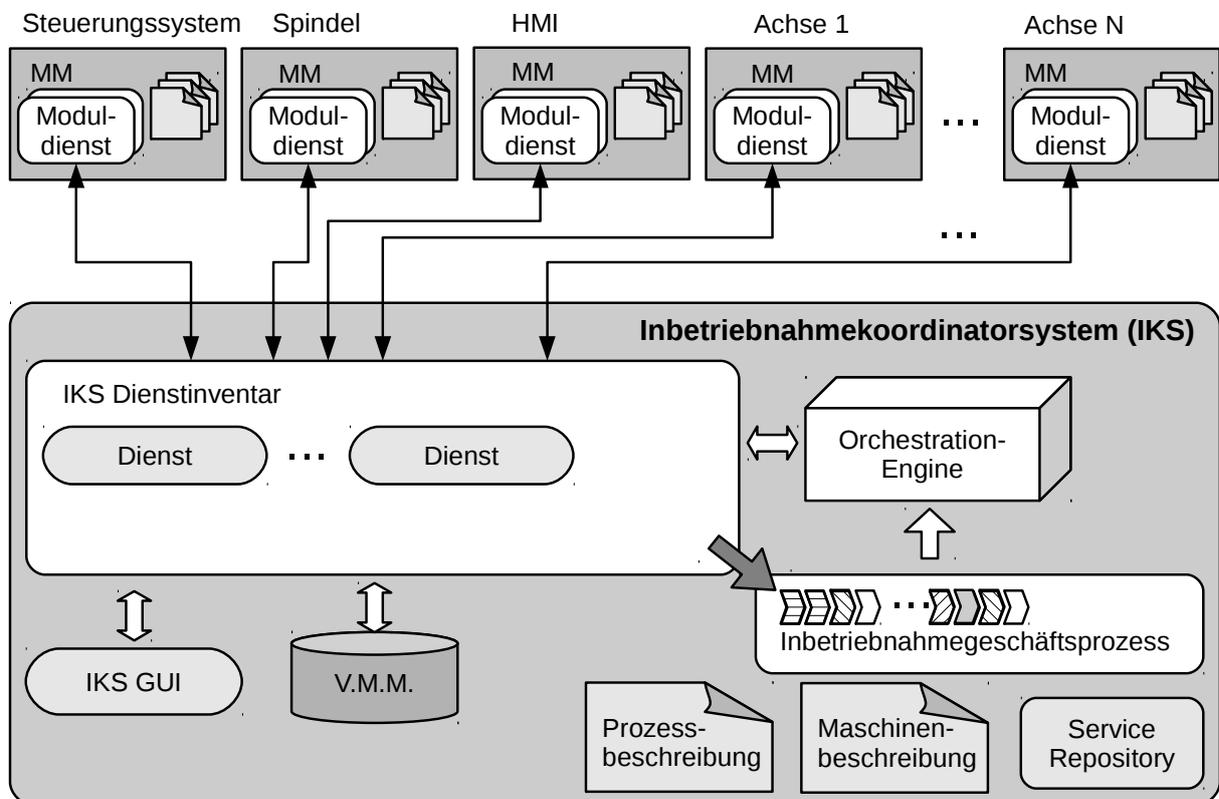


Abbildung 9.9: Diensthierarchie aus Sicht des Service-Bus

Von der Orchestration-Engine aus wird auf die im IKS enthaltenen Dienste sowie auf die in den mechatronischen Modulen gespeicherten Dienste zugegriffen. Die Hierarchie für den Zugriff ist flach und erfolgt, indem eine direkte Kommunikationsverbindung aufgebaut wird. Eine Sonderstellung nimmt die Bedienoberfläche für die Inbetriebnahme ein. Über diese werden die in der Orchestration-Engine laufenden Inbetriebnahmevorgänge gestartet und überwacht.

Neben den in den mechatronischen Modulen gespeicherten Beschreibungsdokumenten werden weitere Dokumente und Informationen benötigt (siehe Abschnitt 8.1.1). Die Aufgabe

der Maschinen- und Konfigurationsbeschreibungen ist es, die Funktionalität der Maschine in maschinenlesbarer Form darzustellen. Eine Prozessbeschreibung enthält zusätzliche Informationen über den Herstellungsprozess, den die Maschine ausführen soll. Beide Informationssammlungen dienen der Ausrichtung der Inbetriebnahme der Maschine auf den gewünschten Anwendungsfall. Je nachdem, welche Maschinenfunktionalität benötigt wird, muss die Inbetriebnahme in einer unterschiedlichen Weise erfolgen. Dies betrifft nicht nur mechanische Bewegungen, die je nach Aufbau der Maschine in einer unterschiedlichen Weise geplant werden müssen, sondern u.a. auch kinematische Berechnungen, Modulparametrierungen sowie die Vernetzung von Steuerungsfunktionen. Die Dienste müssen entsprechend flexibel und allgemeingültig konzipiert werden oder in verschiedenen Ausprägungen verfügbar sein, um verschiedene Anwendungsfälle abzudecken. Abbildung 9.10 zeigt eine Übersicht der Architektur des IKS inklusive einiger mechatronischer Module.



GUI: Graphisches Bediensystem; HMI: Human Machine Interface; V.M.M.: Virtuelles Maschinenmodell; IKS: Inbetriebnahmekoordinator-system; MM: Mechatronisches Modul

Abbildung 9.10: Übersicht: Architektur des Inbetriebnahmekoordinator-systems

Der Vorgang der Inbetriebnahme richtet sich nach dem in Abschnitt 8.3.1 abgeleiteten mehrphasigen Geschäftsprozess für die Inbetriebnahme. Nach der Registrierung aller Dienste im Service-Repository werden beschreibende Dokumente sowie die Inbetriebnahmedokumentation aus den Modulen abgefragt. Diese werden im weiteren Verlauf der Inbetriebnahme von den Diensten im IKS-Dienstinventar analysiert und weiter verarbeitet. Die in den Modulen enthaltenen Workflow-Fragmente werden in den Geschäftsprozess für die Inbetriebnahme

integriert. Dieser Geschäftsprozess wird daraufhin von der Orchestration-Engine abgearbeitet. Bei diesem Ablauf werden Dienste im IKS sowie in den Modulen beauftragt, um Parametrierungen vorzunehmen oder Konfigurationsdateien für Softwaresysteme wie dem Steuerungssystem oder der graphischen Oberfläche zu generieren.

Eine Datenbank im IKS dient zur Ablage von Informationen, Zwischenergebnissen und Parametrierungsanweisungen. In den einzelnen Phasen des Inbetriebnahme-Geschäftsprozesses werden Daten abgefragt oder generiert, die für die nachfolgenden Phasen von Interesse sind. Die Datenbank dient daher als temporärer Informationsspeicher sowie zur Speicherung des **virtuellen Maschinenmodells** (vgl. Abschnitt 9.4.3), welches die im Verlauf der Inbetriebnahme angesammelten und generierten Informationen enthält. Abbildung 9.11 zeigt den Daten- und Informationsfluss innerhalb des IKS.

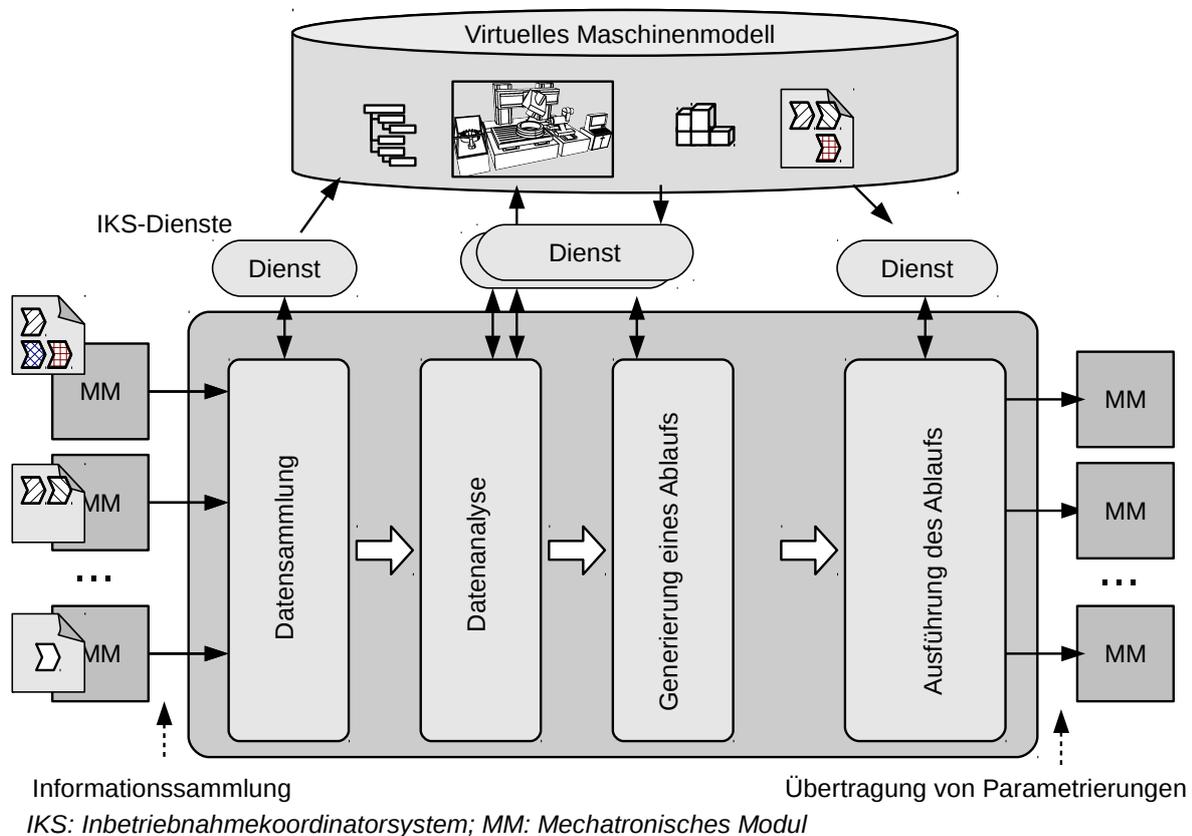


Abbildung 9.11: Daten- und Informationsfluss im Inbetriebnahmekoordinatorssystem

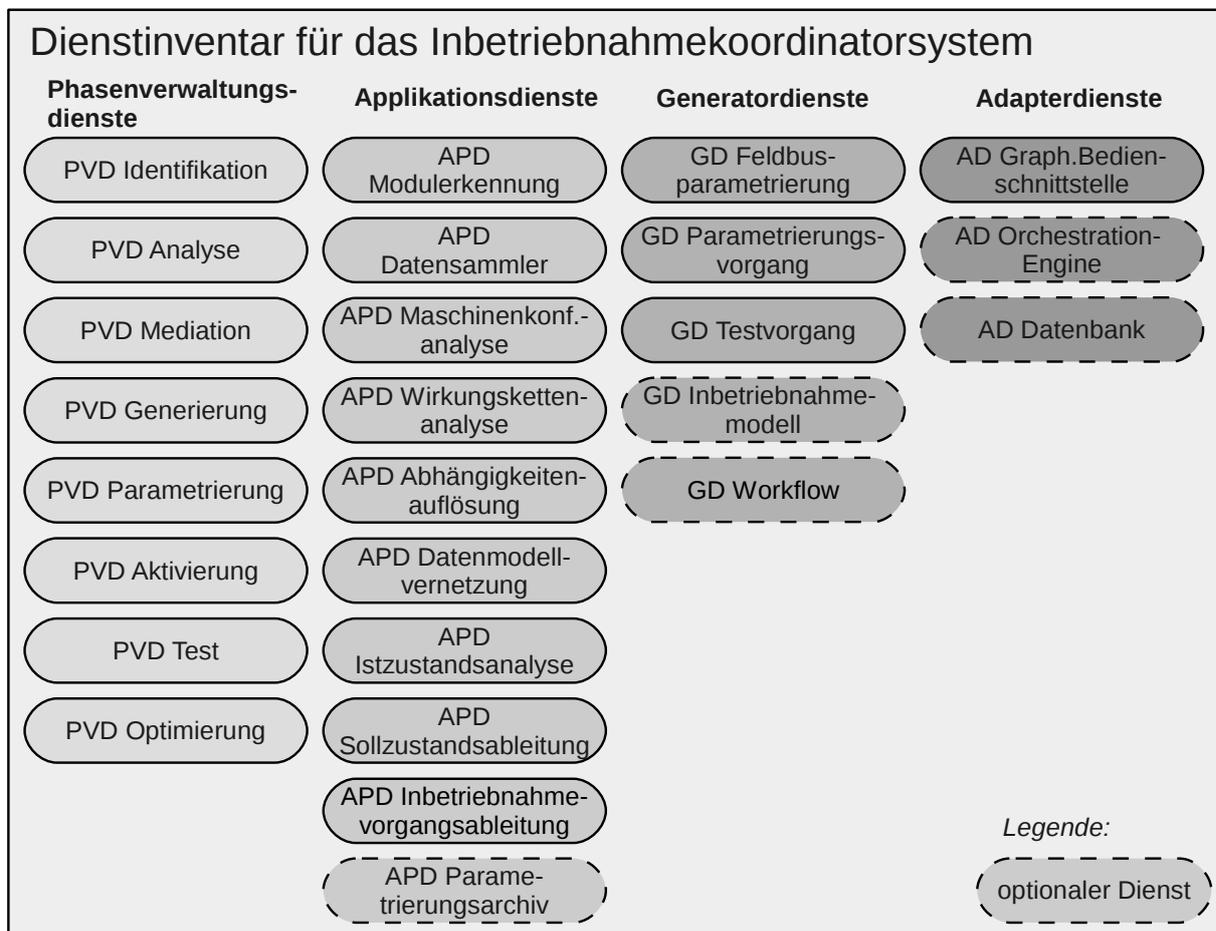
Zu Beginn der Inbetriebnahme werden Daten und Dokumente von den Modulen abgefragt. Diese werden im weiteren Verlauf im IKS verarbeitet. Ein kontinuierlicher Datenabgleich findet mit der internen Datenbank sowie mit der graphischen Oberfläche statt. Zum Abschluss der Inbetriebnahme werden Daten in Form von Parametrierungen oder Datensätzen wieder in die Module geschrieben.

Die Zusammenhänge zwischen den im IKS benötigten Diensten, der Ablaufsteuerung und dem Vorgang der Mediation werden in den folgenden Unterkapiteln vorgestellt.

9.4.1 Dienste im Inbetriebnahmekoordinator-system

Im Inbetriebnahmekoordinator-system werden die für die Inbetriebnahme einer rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschine benötigten Dienste beherbergt. Durch die Separation des Problems der Inbetriebnahme in kleinere, einfacher zu beherrschende Einheiten entsteht ein Inventar von Diensten. Diese Dienste werden im Verlauf einer automatisierten Inbetriebnahme flexibel in das Inbetriebnahmeverfahren eingebunden. Der Aufruf eines Dienstes kann dabei direkt durch die Orchestration-Engine erfolgen oder durch einen anderen im System vorhandenen Dienst.

Abbildung 9.12 zeigt das erweiterte Dienstinventar des Inbetriebnahmekoordinator-systems.



AD: Adapterdienst; APD: Applikationsdienst; GD: Generatordienst; PVD: Phasenverwaltungsdienst

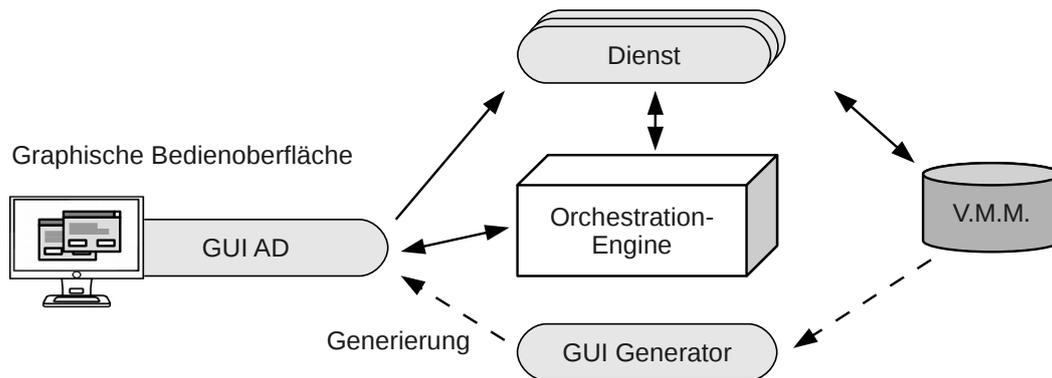
Abbildung 9.12: Übersicht: Dienstinventar für das IKS

Im Inventar sind neben den Diensten für die Phasenverwaltung des Inbetriebnahmeverfahrens Applikationsdienste zur Analyse von Maschinenfunktionalität und zur sukzessiven Ableitung des Inbetriebnahmeverfahrens beherbergt. Ebenfalls enthalten sind Generator- und Adapterdienste (optionale Dienste sind gestrichelt eingezeichnet).

9.4.2 Orchestration-Engine und graphische Bedienoberfläche

Während der Inbetriebnahme kooperiert der Inbetriebnehmer mit dem IKS. Das IKS führt dabei alle automatisierbaren Inbetriebnahmetätigkeiten aus und erledigt wiederkehrende Aufgaben. Die Rolle des Inbetriebnehmers liegt vor allem in dem Einsatz seiner kognitiven Fähigkeiten und Problemlösungskompetenz bei wichtigen Entscheidungen im Inbetriebnahmevergehen sowie in der Kontrolle und Überwachung der Ausführung. Im besten Fall sind keine wesentlichen Tätigkeiten oder Problemstellungen mehr vom Inbetriebnehmer durchzuführen bzw. zu lösen. Es ist allerdings, abhängig vom zugrundeliegendem Maschinenmodell, davon auszugehen, dass mechanische Justierungen vom Inbetriebnehmer vorzunehmen sind.

Die graphische Oberfläche im Konfigurationssystem dient als Schnittstelle zum Inbetriebnehmer und als Informationssystem für die Inbetriebnahme. Die Inhalte der graphischen Oberfläche werden vom GUI-Generator generiert, indem direkt auf Dienste zugegriffen wird oder indem Vorgänge in der Orchestration-Engine angestoßen werden. Anweisungen wie die Generierung von Dokumenten oder der Start von Inbetriebnahmephasen sowie deren Ausführung können hier gestartet und überwacht werden (siehe Abbildung 9.13).



AD: Adapterdienst; GUI: Graphische Bedienoberfläche; V.M.M. Virtuelles Maschinenmodell

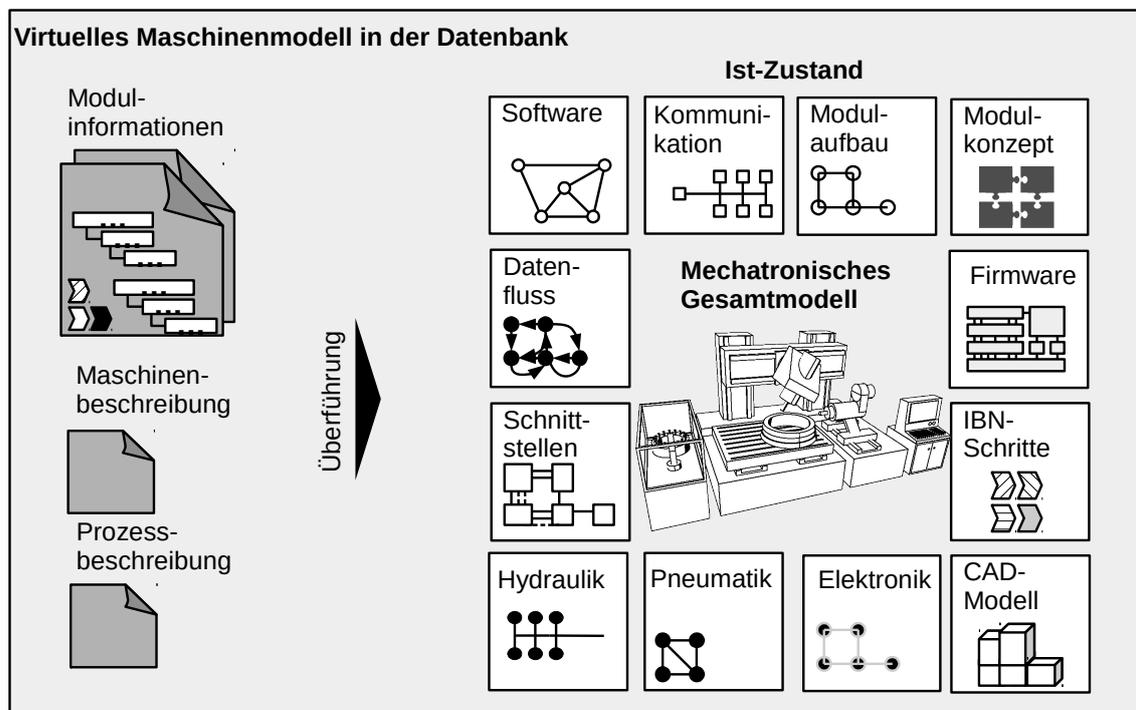
Abbildung 9.13: Graphisches Bediensystem für die Inbetriebnahme

Während dem automatisierten Inbetriebnahmevergehen wird dem Benutzer ein menügeführtes Bediensystem angezeigt. Treten Probleme bei der Ausführung auf oder wird ein manueller Eingriff in die Maschinenkonstruktion notwendig, wird der Inbetriebnehmer über das Bediensystem informiert. Je nach Inbetriebnahmevergang sind bestimmte Schritte manuell vorzunehmen und zu überwachen. Diese können beispielsweise mechanische Justierungen oder das Einfahren von Bewegungsachsen sein. Dazu werden dem Inbetriebnehmer die notwendigen Zusatzinformationen auf der Oberfläche angezeigt. Etwaige Meldungen oder Handlungsanweisungen können hier ebenfalls quittiert werden.

9.4.3 Mediation und Maschinenmodell

Der Begriff Mediation beschreibt den Vorgang, bei welchem die in der Maschine vorhandene Funktionalität mit der für die angestrebte Produktionsaufgabe benötigten Funktionalität abgeglichen wird. Aus dem Ergebnis des Vergleichs wird ein Handlungsbedarf für die Inbetriebnahme der Bearbeitungsmaschine ermittelt.

Im Vorfeld der Mediationsphase wird in der Analysephase ein Abbild der Maschine erstellt und als virtuelles, mechatronisches Maschinenmodell in der Datenbank im IKS gespeichert. Dieses Modell stellt die zentrale Informationsbasis dar und wird in den nachfolgenden Phasen der Inbetriebnahme sukzessive mit Informationen über Maschine, Module und Vorgehen erweitert. Das **virtuelle Maschinenmodell** dient somit der Speicherung von vernetzten Informationen und der Zusammenführung von Modul- und Maschinendaten sowie als zentrale Datenbasis für abgeleitete Informationen (siehe Abbildung 9.14).



CAD: Computer Aided Design; IBN: Inbetriebnahme

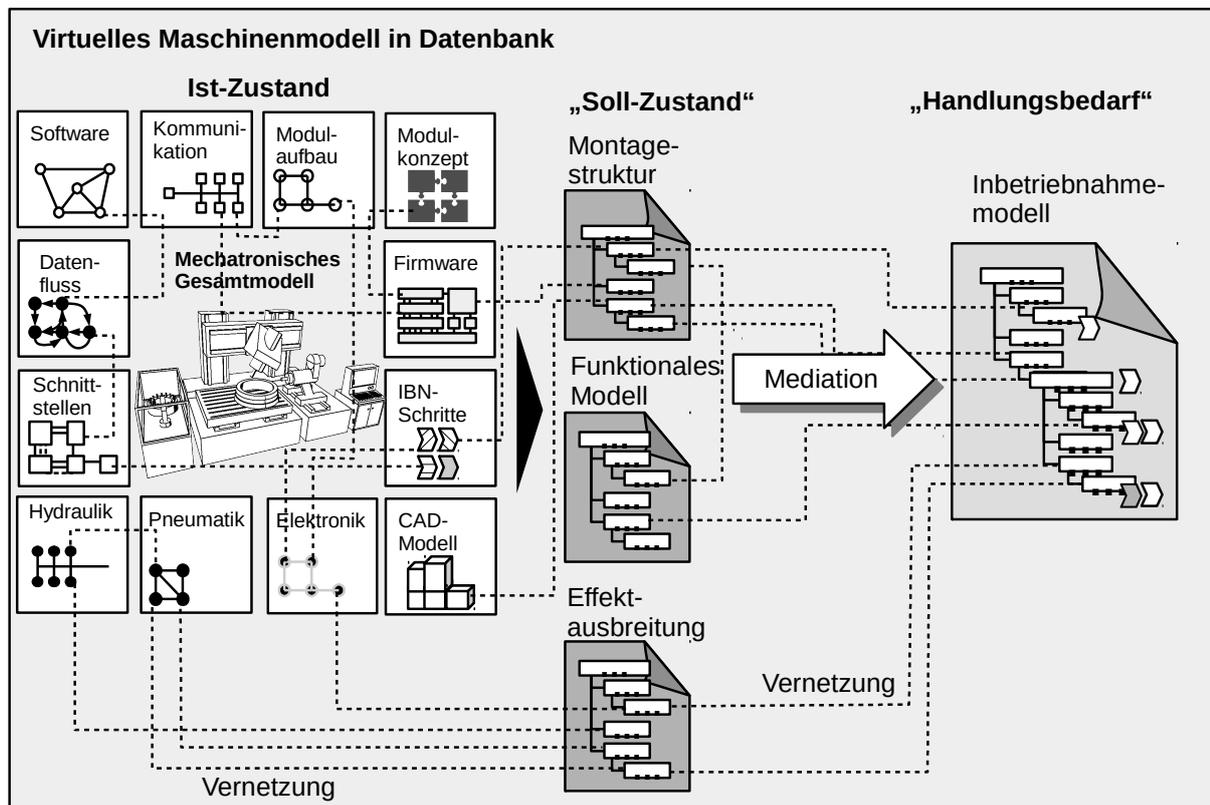
Abbildung 9.14: Virtuelles Maschinenmodell in der Datenbank

Im virtuellen Maschinenmodell werden die in den Modulen vorgefundenen Informationen sowie die Maschinen- und Prozessbeschreibung, zu einem mechatronischen Gesamtmodell zusammengesetzt. Dieses besteht aus einem funktionalen Modell, einer Montagestruktur, einer Beschreibung für Wirkungsketten sowie aus weiteren Modellen.

Die Modelle werden untereinander mit Verweisen und Relationen vernetzt, um redundante Informationshaltung zu vermeiden sowie um den Informationsgehalt zu erhöhen. Dadurch können Informationen über die Vernetzung von Medienleitungen wie Pressluft, Hydraulik

und elektrische Energie abgebildet werden ebenso wie der bei der Produktion notwendige Fluss von Echtzeit- und Nicht-Echtzeitdaten. Weiterhin kann beispielsweise aus den Teil-CAD-Modellen der mechatronischen Module ein CAD-Modell der Maschine zusammengesetzt werden. Falls sich die Arbeitsräume von Bewegungsachsen in Modulen überlagern, können diese Informationen beispielsweise zur Vermeidung von Kollisionen genutzt werden. Das Vorgehen zur Vernetzung von Informationsmodellen wird auch erfolgreich in der AutomationML eingesetzt.

Das virtuelle Maschinenmodell stellt die Informationsbasis für die Mediation dar. Während der Mediation wird untersucht, welche Funktionalitäten für die vorgesehene Produktionsaufgabe benötigt werden und das Resultat wird mit den in der Maschine vorgefundenen Informationen abgeglichen. Aus der Differenz zwischen benötigter und vorhandener Funktionalität wird der Handlungsbedarf für die Inbetriebnahme ermittelt. Auf dieser Basis wird im nächsten Schritt das Inbetriebnahmemodell erstellt (siehe Abbildung 9.15).



CAD: Computer Aided Design; IBN: Inbetriebnahme

Abbildung 9.15: Beispielhafte Ableitung des Inbetriebnahmемodells

Das Inbetriebnahmемodell beschreibt den zur Inbetriebnahme der Maschine notwendigen Handlungsbedarf in Form von auszuführenden Inbetriebnahmetätigkeiten. Durch die bestehende Vernetzung mit den weiteren vorhandenen Informationsmodellen kann ein Zugriff auf alle für eine Inbetriebnahme notwendigen Informationen stattfinden. Damit dient die-

ses Modell als Informationsbasis für die Ableitung eines konkreten und ausführbaren Geschäftsprozesses in der Phase Generierung. Dieses ist Gegenstand des folgenden Abschnitts.

9.4.4 Generierung und Ausführung der Geschäftsprozesse

Aus dem im vorhergehenden Abschnitt erstellten Inbetriebnahmemodell wird im nächsten Schritt ein konkreter Geschäftsprozess für die Inbetriebnahme abgeleitet. Dazu wird in der Generierungsphase bestimmt, welche Parameter in den Modulen eingestellt und welche Dokumente generiert werden müssen. Weiterhin wird bestimmt, in welcher Weise IKS-Dienste und Moduldienste bedient werden müssen, um zum gewünschten Ergebnis zu gelangen.

Basierend auf dem in Abschnitt 8.4 erstellen Vorgehen wird ein übergreifender Inbetriebnahmeablauf erstellt, indem die aus den mechatronischen Modulen stammenden Workflow-Fragmente zu einem übergreifenden Geschäftsprozess für die Inbetriebnahme kombiniert werden.

Die Generierung des in Abschnitt 8.3.1 vorgestellten übergreifenden Geschäftsprozesses findet separiert nach Inbetriebnahmephasen statt. Abbildung 9.16 zeigt die Generierung der Abläufe beispielhaft für die Parametrierungsphase und die anschließende Testphase.

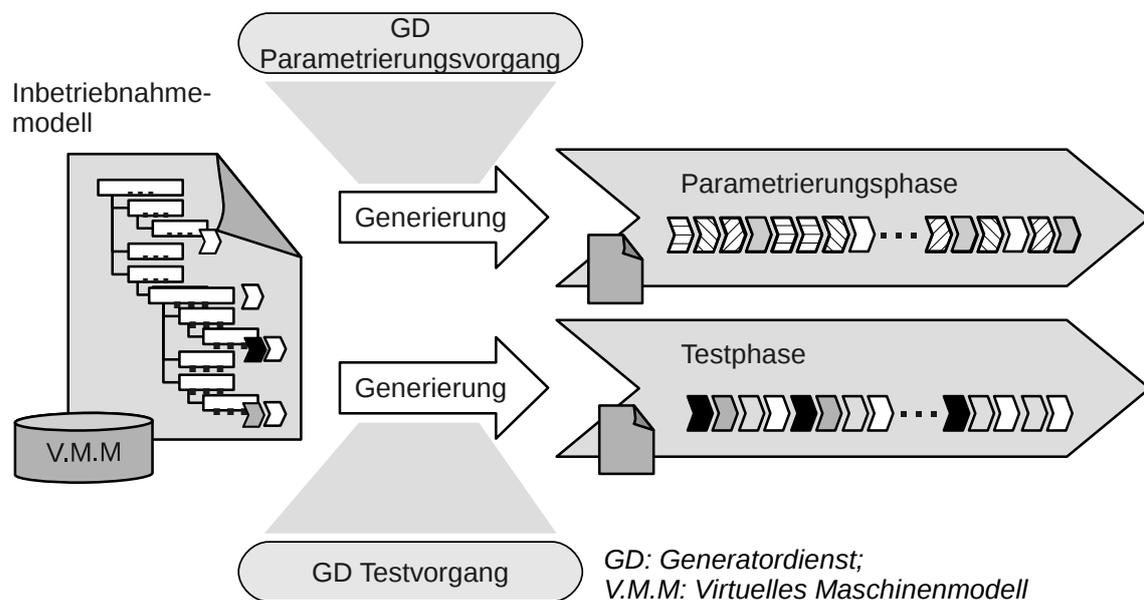
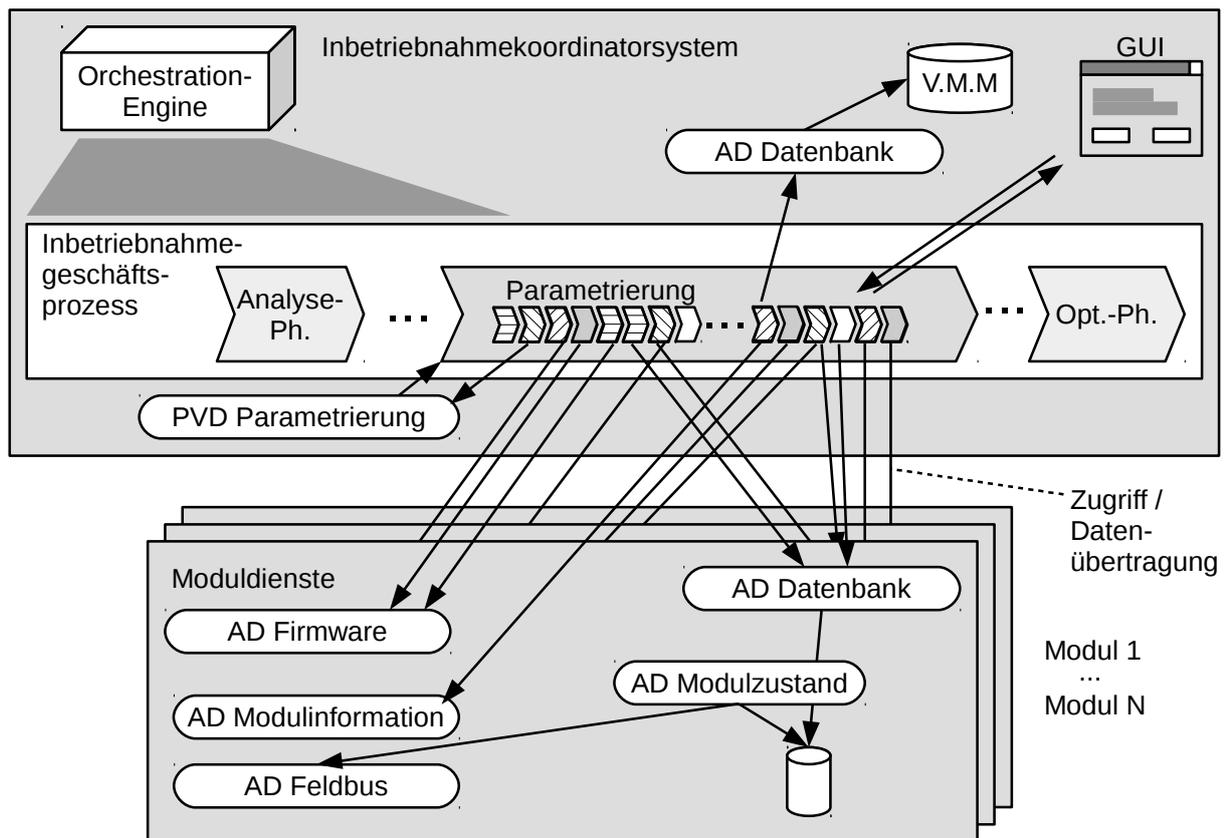


Abbildung 9.16: Generierung von Geschäftsprozessen

Die Abläufe für die Parametrierungsphase und für die Testphase werden jeweils von den Diensten Generierungsverwaltung und Testverwaltung entsprechend generiert. Beide Dienste nutzen das in der Mediationsphase generierte Inbetriebnahmemodell und stützen sich auf weitere Informationen aus dem virtuellen Maschinenmodell.

Zur Ausführung der Abläufe werden diese in die Orchestration-Engine geladen und dort „deployed“. Der Start der Abläufe wird vom Inbetriebnahme-Geschäftsprozess aus eingeleitet.

Während der Ausführung dieses Geschäftsprozesses wird wiederum auf die im IKS und in den Modulen enthaltenen Dienste zugegriffen. Indem auf die in den Diensten vorhandene Funktionalität zurückgegriffen wird, findet eine sukzessive Inbetriebnahme der Bearbeitungsmaschine statt. Abbildung 9.17 stellt dieses Vorgehen beispielhaft für Zugriffe während der Parametrierungsphase dar.



AD: Adapterdienst; GUI: Graphisches Bediensystem; Opt.: Optimierung; Ph.: Phase; PVD: Phasenverwaltungsdienst; V.M.M: Virtuelles Maschinen Modell

Abbildung 9.17: Beispielhafte Ausführung der Parametrierungsphase

Während der Parametrierungsphase findet neben den Zugriffen auf die Moduldienste auch eine Interaktion mit der graphischen Bedienoberfläche statt. Hiermit wird die Schnittstelle zum Inbetriebnehmer umgesetzt. Durch die Kooperation von Inbetriebnehmer und Inbetriebnahmekoordinatorssystem können sowohl automatisierte als auch manuell vorzunehmende Inbetriebnahmetätigkeiten gleichermaßen behandelt werden. Ist beispielsweise eine mechanische Einstellung vorzunehmen, so wird dem Inbetriebnehmer dazu die Handlungsanweisung angezeigt. Nach der Ausführung quittiert der Inbetriebnehmer den Vorgang und die automatisierte Inbetriebnahme kann fortgesetzt werden.

Kapitel 10

Entwurf und Realisierung einer Forschungsplattform für die Evaluierung der automatisierten Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen

In diesem Kapitel wird eine Forschungsplattform mit dem Ziel der Evaluierung von automatisierten Inbetriebnahmestrategien für rekonfigurierbare Bearbeitungsmaschinen entworfen. Einsatzgebiet der Plattform ist die praxisnahe Erprobung der im vorhergehenden Kapitel entworfenen Systemarchitektur. Der Entwurf soll zudem als Referenz für weitere Forschungsaktivitäten im Feld der automatischen Generierung von Inbetriebnahmeprozessen für rekonfigurierbare Bearbeitungsmaschinen dienen.

10.1 Motivation und Konzept einer Forschungsplattform

Für die Evaluierung eines Aufbaukonzeptes für rekonfigurierbare Produktionsmaschinen müsste ein umfangreicher, mechatronischer Modulbaukasten entworfen und umgesetzt werden, welcher für eine rasche Inbetriebnahme und zügige Wiederinbetriebnahme geeignet ist (vgl. Kapitel 4). Ein wesentlicher Anteil des Aufwandes würde dabei in die Entwicklung von geeigneten, mechanischen Strukturen, interoperablen Schnittstellen, modulinternen Softwaresystemen und in die Inbetriebnahmeautomatisierung fließen. Die Herausforderung im Entwurf eines solchen Modulbaukastens besteht unter anderem darin, die vielen internen Abhängigkeiten zwischen mechanischen, elektronischen und informationstechnischen Subsystemen in Einklang zu bringen. Bisher hat noch kein Unternehmen ein vergleichbares Konzept in die Praxis umgesetzt. Dies liegt mit großer Wahrscheinlichkeit daran, dass der initiale Aufwand zur Umsetzung eines Konzeptes für eine automatisierte Inbetriebnahme relativ groß ist. Gründe dafür sind die Interdisziplinarität und Komplexität der Thematik sowie die Vielzahl der zu berücksichtigenden Abhängigkeiten.

Weiterhin hat die für die Inbetriebnahme gewählte Strategie (vgl. Abschnitt 7.6) einen wesentlichen Einfluss auf das gesamte Vorgehen während der Inbetriebnahme. Ausschlaggebend hierfür ist, dass das Inbetriebnahmeprozess und das für den Aufbau der Maschine gewählte Konzept eng miteinander korrelieren. Dies betrifft beispielsweise Aspekte zur Dezentralisierung oder Zentralisierung von Funktionalität, die Festlegung von Modulgrenzen sowie die Verteilung der Modulfunktionalitäten. Weitere Fragestellungen sind der Entwurf von geeigneten Beschreibungsformaten, Schnittstellen und Dienstverträgen sowie die Gestaltung der Lösungslogik von Diensten.

Der Entwurf eines Maschinenkonzeptes kann daher nicht entkoppelt von der Inbetriebnahmestrategie betrachtet werden und sollte somit zeitgleich erfolgen. Diesem Umstand kann im ersten Schritt durch die Wahl eines evolutionären Ansatzes entgangen werden. Es empfiehlt sich daher ein iteratives Vorgehen, um von einem Basiskonzept sukzessive ein finales Konzept abzuleiten, indem Maschinenkonzept und Inbetriebnahmestrategie abwechselnd überarbeitet werden. Abbildung 10.1 illustriert diesen Ansatz beim Entwurf eines neuen Konzeptes für rekonfigurierbare Bearbeitungsmaschinen.

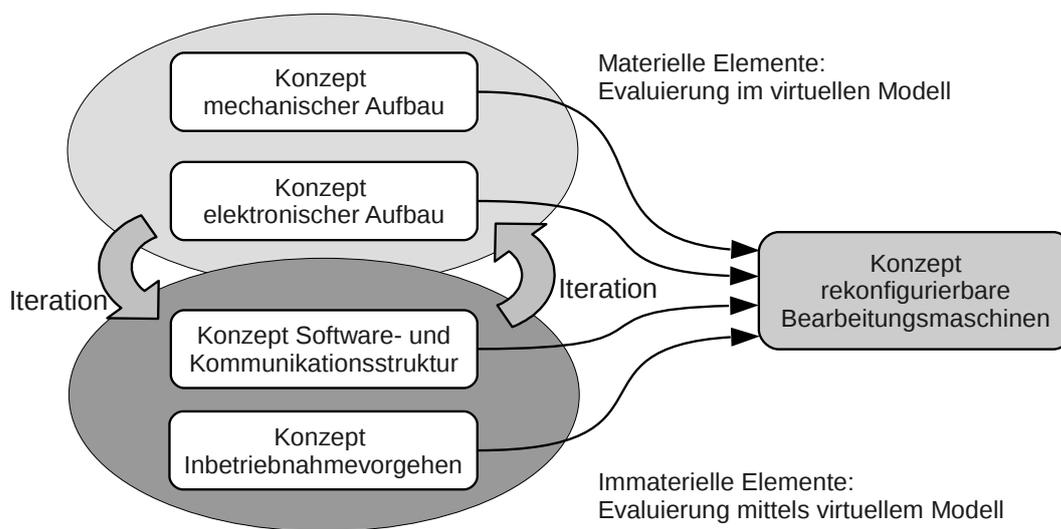


Abbildung 10.1: Iterative Ableitung eines Konzeptes für rekonfigurierbare Bearbeitungsmaschinen

Zur Gewinnung eines finalen Gesamtkonzeptes müssen einerseits Konzepte für den mechanischen und elektronischen Aufbau erstellt werden, andererseits ist es erforderlich, die Konzepte der eingesetzten Software und der Kommunikationsmethoden auf das Inbetriebnahmevorgehen anzupassen.

Als Mittel zur Reduktion von Aufbaukosten und Erprobungszeit eignet sich die Erprobung anhand eines Simulationsmodells der materiellen Komponenten einer Maschine (Röck 2011). Neben der Unterstützung während der Steuerungsentwicklung können so anhand eines simulierten Maschinenmodells auch Maschinenkonzepte auf Tauglichkeit überprüft werden. Auf diese Weise kann das Zusammenspiel von materiellen und immateriellen Maschinenkomponenten im Voraus evaluiert und verfeinert werden, ohne dass wesentliche Aufbaukosten für mechanische Komponenten entstehen.

Zur Evaluierung von Maschinenkonzepten und den dazugehörigen Inbetriebnahmestrategien wurde in dieser Arbeit eine rekonfigurierbare und an verschiedene Anwendungsfälle adaptierbare Forschungsplattform entworfen. Diese Plattform soll während der Erstellung des Maschinenkonzeptes als Vorstufe zu einer realen Maschine dienen. Abbildung 10.2 stellt die Rolle der Forschungsplattform bei Erstellung eines geeigneten Maschinenkonzeptes vor.

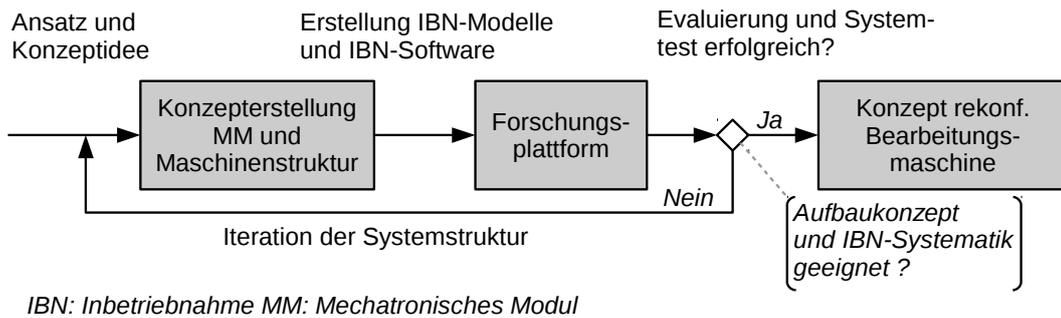
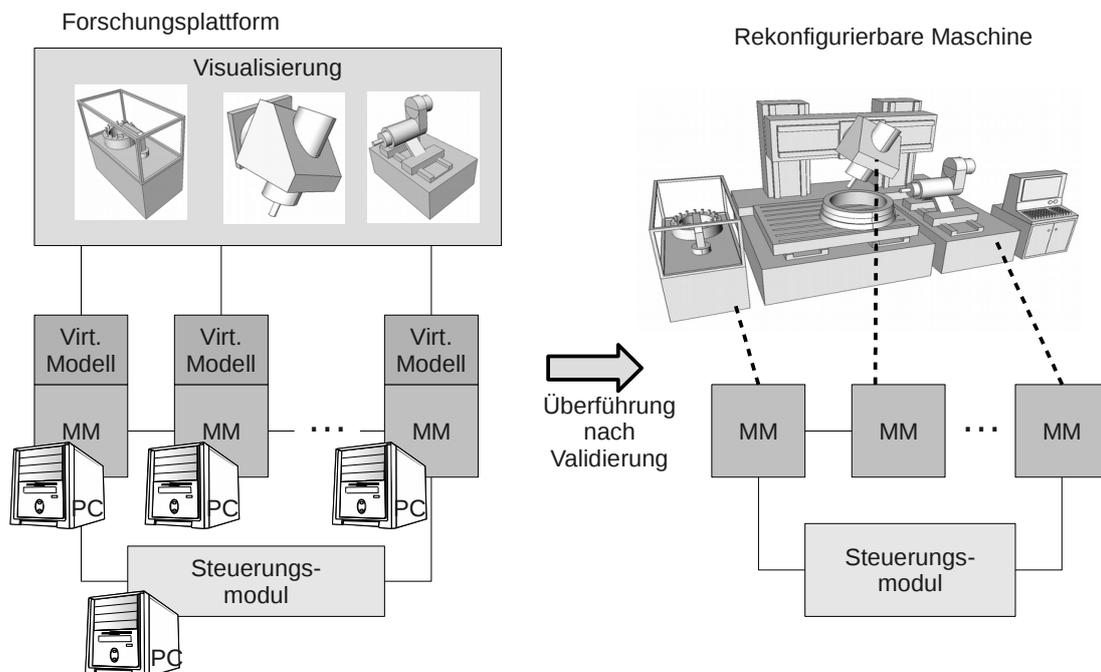


Abbildung 10.2: Vorgehen für die Generierung eines Maschinenkonzeptes

Ausgehend von einem initialen Ansatz wird die Maschinen- und Modularchitektur mithilfe der Forschungsplattform iteriert, bis Maschine und Inbetriebnahmesystematik optimal aufeinander abgestimmt sind. Die Forschungsplattform dient somit als Mittel zur Validierung eines Inbetriebnahmekonzeptes (siehe hierzu auch Abbildung 7.17 in Abschnitt 7.6).

Da die Forschungsplattform der Evaluierung von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen und Aufbaukonzepten dient, muss die Forschungsplattform ebenfalls die Eigenschaften dieses Maschinentyps aufweisen. Im Rahmen der Forschungsplattform genügt es daher vorerst die informationstechnischen Schnittstellen zu bedienen, da mechanische Konstruktion und elektronische Komponenten von mechatronischen Modulen anhand von Modellen simuliert werden. Mechatronische Module werden folglich in der Forschungsplattform mittels voneinander separierter Rechnerknoten dargestellt (Abel und Klemm 2013a). Abbildung 10.3 zeigt eine beispielhafte Konfiguration der Forschungsplattform in Relation zu einer späteren Realisierung als rekonfigurierbare Bearbeitungsmaschine.



MM: Mechatronisches Modul; PC: Personal Computer (Quellen: Opencliparts.org)

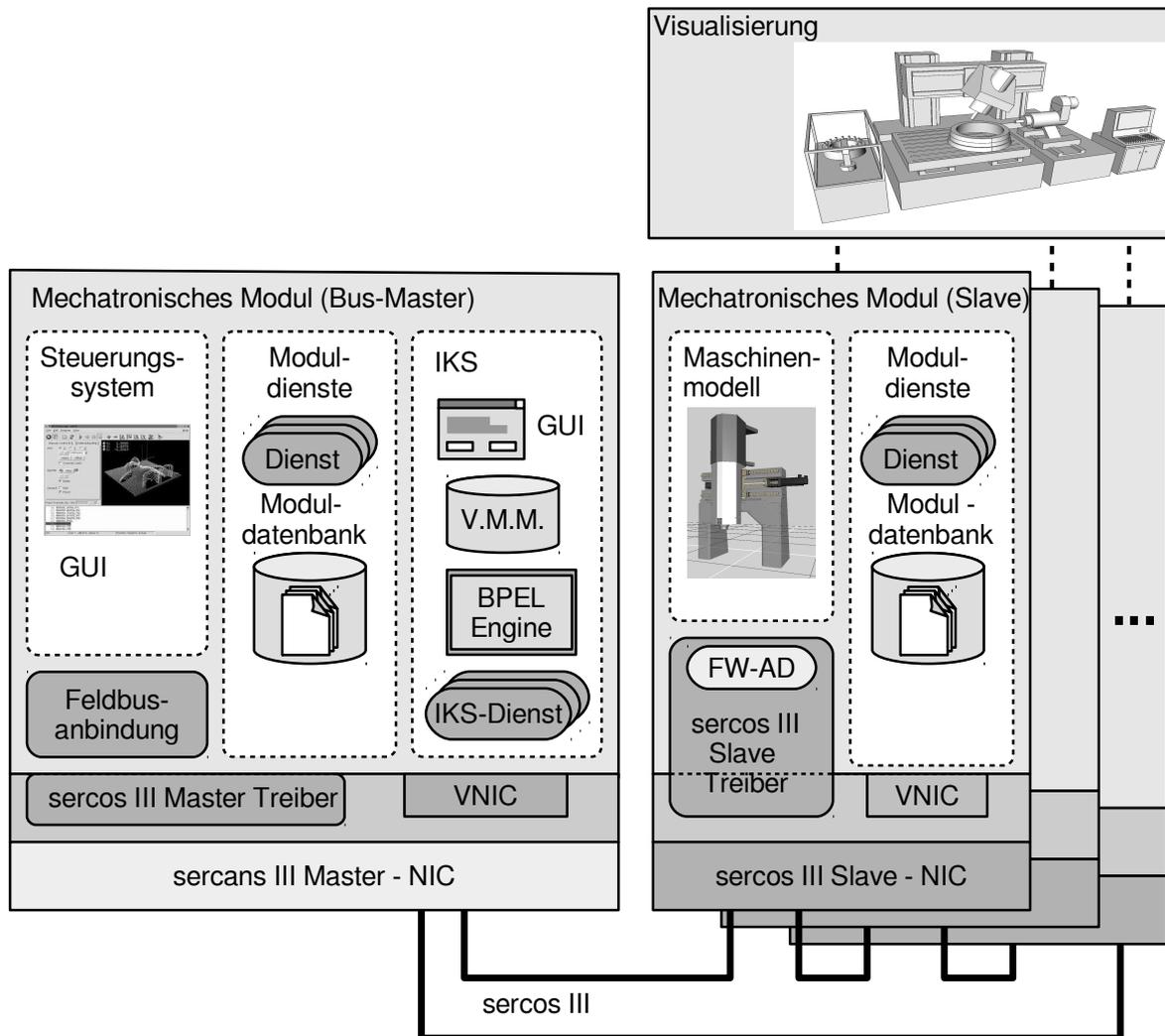
Abbildung 10.3: Forschungsplattform mit unterstützenden Simulationsmodellen (nach (Abel und Klemm 2013a))

Eine rekonfigurierbare Bearbeitungsmaschine wird in der Forschungsplattform als eine Menge von separaten und vernetzten mechatronischen Modulen in Form von Personal Computern (PC) dargestellt. Die Module sind über ein Feldbussystem untereinander vernetzt und jeweils mit für Produktionsumgebungen geeigneter Soft- und Firmware ausgestattet. Dadurch wird auch das zeitliche Verhalten der internen Kommunikation praxisnah gestaltet. Jedes Modul verfügt über ein separates Echtzeitsimulationsmodell zur Modellierung der mechanischen und elektronischen Komponenten. Durch den Einsatz von Simulationstechnik können somit schnell neue Konzepte für rekonfigurierbare Bearbeitungsmaschinen evaluiert werden. Des Weiteren können produktionsrelevante Softwarebestandteile und das Inbetriebnahmeverfahren an einem virtuellen Maschinenmodell getestet werden, bevor eine reale Maschine aufgebaut wird. Um eine herstellerübergreifende Interoperabilität sicherzustellen, ist es ferner möglich, Kombinationen von Modulen von verschiedenen Herstellern vorab im Verbund zu testen.

10.2 Entwurf der Architektur der Forschungsplattform

Die Forschungsplattform umfasst eine Umsetzung des Inbetriebnahmekoordinator-systems sowie eine Menge von mechatronischen Modulen in Form von flexibel einsetzbaren und separaten, PC-basierten Rechenknoten. Jedes mechatronische Modul wird von einem PC mit sercos-III-Felddbusanbindung abgebildet (Abel und Klemm 2013a). Jeweils eines der Module ist mit einem sercos-III-Master ausgestattet und fungiert als Steuerungssystem. Alle weiteren Module werden als Slave-Geräte an den Bus angebunden. Als Dienste werden Web-Services eingesetzt. Gerätezentrierte Dienste werden dabei mithilfe des Devices Profile for Web-Services (DPWS) (Zeeb, Moritz et al. 2010) umgesetzt. Die übrigen Dienste werden als Standard Web-Services mit dem gSOAP-Toolkit (van Engelen und Gallivany 2002) erstellt.

Der Nachrichtentransfer des Service-Bus wird, wie in Abschnitt 9.2 vorgestellt, innerhalb des UC-Kanals in der sercos-III-Kommunikationsstrecke vorgenommen. Die Module beherbergen zusätzliche Software- und Firmwarebestandteile inklusive der für eine automatisierte Inbetriebnahme notwendigen Dienste. Durch den Einsatz von produktionsnaher Software und der Verwendung von standardisierten und etablierten Technologien wird eine spätere Integration in die Praxis vorbereitet. Dies gilt insbesondere für den Einsatz von Kommunikationsmitteln, der Automatisierung von Produktionsvorgängen sowie für die Inbetriebnahmeautomatisierung. Außerdem wird dadurch auch ein zu realen Bearbeitungsmaschinen vergleichbares und deterministisches Zeitverhalten erreicht. Abbildung 10.4 zeigt ein detailliertes Konzept der Forschungsplattform mit eingebetteten Simulationsmodellen und einer gemeinsamen Visualisierung mechanischer Elemente.



AD: Adapterdienst; BPEL: Business Process Execution Language; IKS: Inbetriebnahmekoordinatoriensystem; FW: Firmware; (V)NIC: (Virtual) Network Interface; GUI: Graphical User Interface; V.M.M.: Virtuelles Maschinenmodell

Abbildung 10.4: Übersicht der Forschungsplattform

Die Forschungsplattform besteht aus einem Bus-Master-Modul, mehreren über sercos-III angebotenen Slave-Modulen sowie einer separaten Visualisierung. Das mechatronische Bus-Master Modul beinhaltet das Steuerungssystem, die zentralen Bestandteile des IKS sowie zusätzliche Moduldienste. Weiterhin wird auf jedem der mechatronischen Slave-Module das zugehörige mechatronische Modulmodell für die Simulation von Elektronik und Mechanik ausgeführt (Abel und Klemm 2013b). Als Simulationswerkzeug dient Virtuos der Firma ISG Steuerungstechnik (ISG 2015). Die Visualisierung der Modelle wird auf einem separaten PC dargestellt. Inbetriebnahmekoordinatoriensystem und graphisches Bediensystem werden auf einem beliebigen mechatronischen Modul ausgeführt. Bedingt durch den flexiblen Aufbau der Plattform kann eine Rekonfiguration rasch durch den Tausch von Modulen erfolgen.

Module in der Forschungsplattform können zudem schnell zu anderen Modulen umgerüstet werden, wenn zu Testzwecken variierende Moduleigenschaften benötigt werden. Eine Um-

rüstung erfolgt dabei durch einen Austausch der Moduldienste, der Datenbank, eventuell weiterer, enthaltener Soft- und Firmware sowie des Modulmodells.

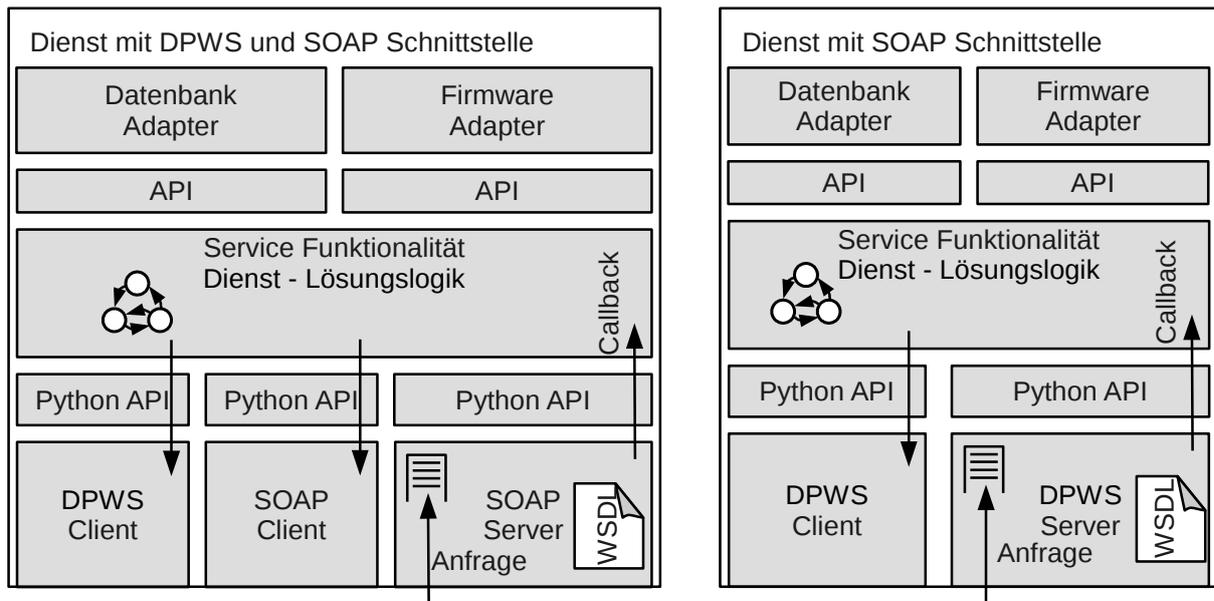
Mit der in Abschnitt 9.2 entworfenen Kommunikationsmethode ist der physikalische Ausführungsort eines Dienstes beliebig, sofern keine Hardwareabhängigkeiten bestehen. Die Dienste des Inbetriebnahmekoordinator-systems werden daher auf einem der mechatronischen Module ausgeführt. Die Realisierung von Diensten, des Inbetriebnahmekoordinator-systems sowie der mechatronischen Module innerhalb der Forschungsplattform wird in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

10.2.1 Realisierung der Dienste

Die Konzeption der Inbetriebnahmeautomatisierung folgt serviceorientierten Entwurfsprinzipien. Die Herausforderung der Inbetriebnahme wurde daher auf verschieden geartete Dienste mit spezifischer Funktionalität verteilt. In Abschnitt 9.3.3 wurde hierzu bereits ein Dienstinventar für die automatisierte Inbetriebnahme vorgestellt.

Zur Realisierung von Diensten innerhalb der Forschungsplattform dient ein generischer Entwurf. Einem Dienst ist es erlaubt, sowohl Anfragen von außen zu akzeptieren, als auch selbst Anfragen an andere Dienste zu senden. Daher besitzt ein Dienst stets einen Web-Service Client und einen Web-Service-Server, welche unabhängig voneinander arbeiten können. Dieses Prinzip erlaubt die Evaluierung von Konzepten zur Orchestrierung von Diensten sowie die Evaluierung von Konzepten zur Umsetzung einer Choreographie von Diensten innerhalb der Forschungsplattform. Erreicht wird dieses, indem einerseits die Kompositionsfähigkeit der Dienste gefördert wird und andererseits die Autonomie der Funktionalität gewahrt bleibt.

Zur Gewährleistung der Erreichbarkeit von Diensten, aus Richtung der Orchestration-Engine, werden Dienste in zwei Protokollvarianten eingesetzt: Dienste mit SOAP Nachrichtenformat und Dienste mit DPWS-Erweiterung. Abbildung 10.5 stellt die Realisierung von Diensten in beiden Varianten vor.



*API: Application Programming Interface; DPWS: Devices Profile for Web-Services
WSDL: Web-Services Description Language*

Abbildung 10.5: Architektur eines SOAP-Dienstes und eines DPWS-Dienstes in der Forschungsplattform

Der Kern der Funktionalität eines Dienstes liegt in der Umsetzung der Lösungslogik. Als Schnittstelle zu anderen Diensten wird ein Web-Service Client und ein Web-Service Server mit Dienstvertrag in Form eines WSDL-Dokuments eingesetzt. Weiterhin sind notwendige Schnittstellen zur Moduldatenbank sowie zur Firmware des Moduls integriert. Ein nahezu symmetrischer Aufbau findet sich in der Umsetzung von Diensten auf DPWS-Basis.

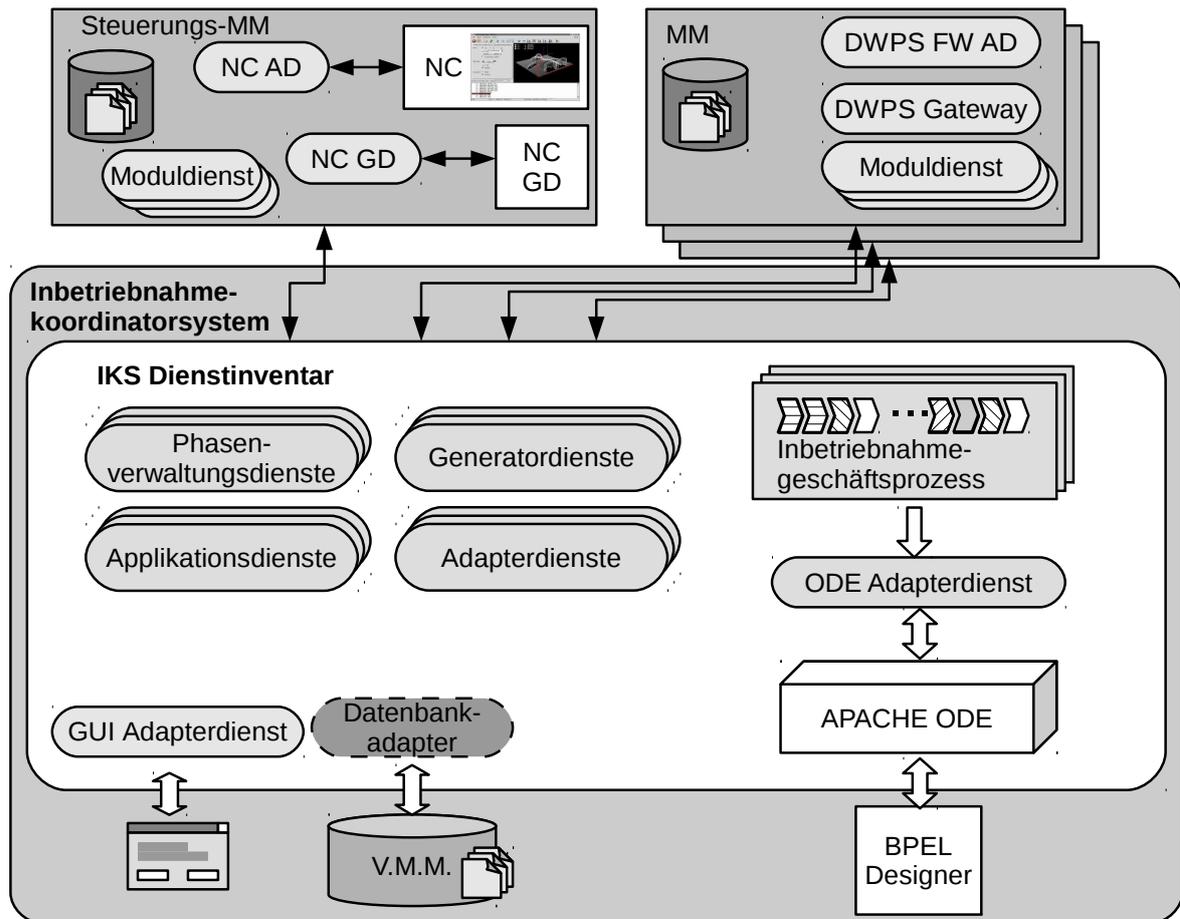
Einige als DPWS-Dienste in die Forschungsplattform integrierte Funktionalitäten müssen aus der Orchestration-Engine über sogenannte Gateway-Dienste angesprochen werden. Gründe hierfür sind Inkompatibilitäten zwischen den Web-Service Standards WS-BPEL und DPWS, welche zum aktuellen Zeitpunkt eine direkte Integration erschweren (Bohn, Bobek et al. 2008), (Timm und Schmutzler 2009), (Bohn 2009). Daher werden innerhalb der Forschungsplattform, sofern notwendig, Gateway-Dienste eingesetzt, welche bei Bedarf eine Protokolltransformation durchführen. Wie in Abbildung 10.5 dargestellt, können Web-Service Dienste mit einer DPWS-Client Schnittstelle ausgerüstet sein, um Anfragen an DPWS-Server Dienste senden.

Ein Service-Repository ist in der Forschungsplattform bisher nur bedingt im Einsatz, da Dienste vorerst auf fest vorgegebene TCP-Portnummern und einheitliche Ressourcen-IDs (URI) setzen. Dazu enthält die Modulbeschreibung eine Liste der in den Modulen vorhandenen Dienste, welche vom IKS in der Identifikationsphase ausgelesen wird. Die Vergabe von IP-Adressen für Module erfolgt über einen DHCP-Server innerhalb eines vorgegebenen Adressbereichs. Dienstverträge können aus der Datenbank des jeweiligen mechatronischen Moduls mithilfe des Modulinformationsdienstes abgefragt werden.

10.2.2 Realisierung des Inbetriebnahmekoordinatorsystems in der Forschungsplattform

Das IKS bildet den Kern des nach serviceorientierten Prinzipien gestalteten Automatisierungssystems für die Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen. Es ist, wie zuvor in Abschnitt 9.4 dargestellt, funktional nach unterschiedlichen Einheiten gegliedert. Durch die konsequente Modularisierung entsteht ein leichter wartbares und erweiterbares Gesamtsystem. Eine Separation in getrennte Verantwortlichkeiten erhöht weiterhin die Kompositionsfähigkeit der enthaltenen Dienste. Kommunikation und Datenaustausch innerhalb des IKS sind nur über im Voraus spezifizierte und mit Serviceverträgen standardisierten Schnittstellen und Datenformate möglich. Zur Erhöhung der Autonomie und Wiederverwendbarkeit ist jeder Dienst nur für einen bestimmten Einsatzbereich und Anwendungsfall vorgesehen. Ein Dienst innerhalb des IKS löst somit eine in sich geschlossene und funktional abgegrenzte Aufgabe.

Die vom IKS realisierte Funktionalität kann durch das Hinzufügen oder das Entfernen von Diensten leicht verändert werden. Werden beispielsweise, induziert durch einen Technologiesprung, weitere oder abweichende Funktionalitäten benötigt, können diese leicht durch zusätzliche Dienste hinzugefügt werden. Gerade im Rahmen einer Forschungsplattform spielt diese Flexibilität eine wesentliche Rolle, da somit bei der Evaluierung von Inbetriebnahmestrategien verschiedene Vorgehensweisen auf ihre Praxistauglichkeit hin analysiert und evaluiert werden können. Abbildung 10.6 zeigt eine statische Übersicht des IKS in der Forschungsplattform mit den für eine automatisierte Inbetriebnahme erforderlichen Komponenten.



AD: Adapterdienst; APD: Applikationsdienst; BPEL: Business Process Execution Language;
 DPWS: Devices Profile for Web-Services; GD Generatordienst; MM: Mechatrisches Modul;
 NC: Numeric Control; ODE: Orchestration Director Engine; V.M.M.: Virtuelles Maschinenmodell

Abbildung 10.6: Übersicht: Struktur des Inbetriebnahmekoordinator systems in der Forschungsplattform

Zentrales Element im IKS ist die Apache „Orchestration Director Engine“ (ODE) (Apache 2014), welche als Orchestration-Engine eingesetzt wird und die Aufgabe zur Ausführung von Inbetriebnahmevorgängen in Form von BPEL-Dokumenten übernimmt. Als Plattform für die Ausführung der ODE dient eine separate virtuelle PC-Umgebung, um dem Konfigurationsmanagement für die Softwareumgebung der ODE Sorge zu tragen.

Als Basis für das Dienstinventar dient das in Abbildung 9.12 vorgestellte Inventar. Die konkrete Umsetzung der Lösungslogik der Dienste ist von der Inbetriebnahmestrategie und dem Maschinenkonzept abhängig. Der Ablauf der Inbetriebnahmevorgänge kann von dem grafischen Bediensystem aus überwacht werden. Dieses zeigt die aktuellen Vorgänge an und dient als Instrument für Benutzereingaben. Weiterhin dient das Bediensystem als Mittel, um in den Inbetriebnahmevorgang einzugreifen und zur Justierung von Einstellparametern im virtuellen Maschinenmodell sowie in den mechatronischen Modulen. Zudem können Dienste zu Testzwecken kontrolliert gestartet und beendet werden. Der ODE-Adapterdienst wird

dabei für einen automatisierten Zugriff auf die ODE eingesetzt, um beispielsweise Vorgänge zu laden oder zu starten. Neben dem ODE-Adapterdienst kann der auf Eclipse (Eclipse Foundation 2014b) basierende BPEL-Designer (Eclipse Foundation 2014a) zur Analyse und Kontrolle des ODE-Zustandes während der Entwicklung und des Tests von Geschäftsprozessen genutzt werden. Abbildung 10.7 zeigt das graphische Bediensystem des IKS zusammen mit dem BPEL-Designer in einem exemplarischen Anwendungsfall.

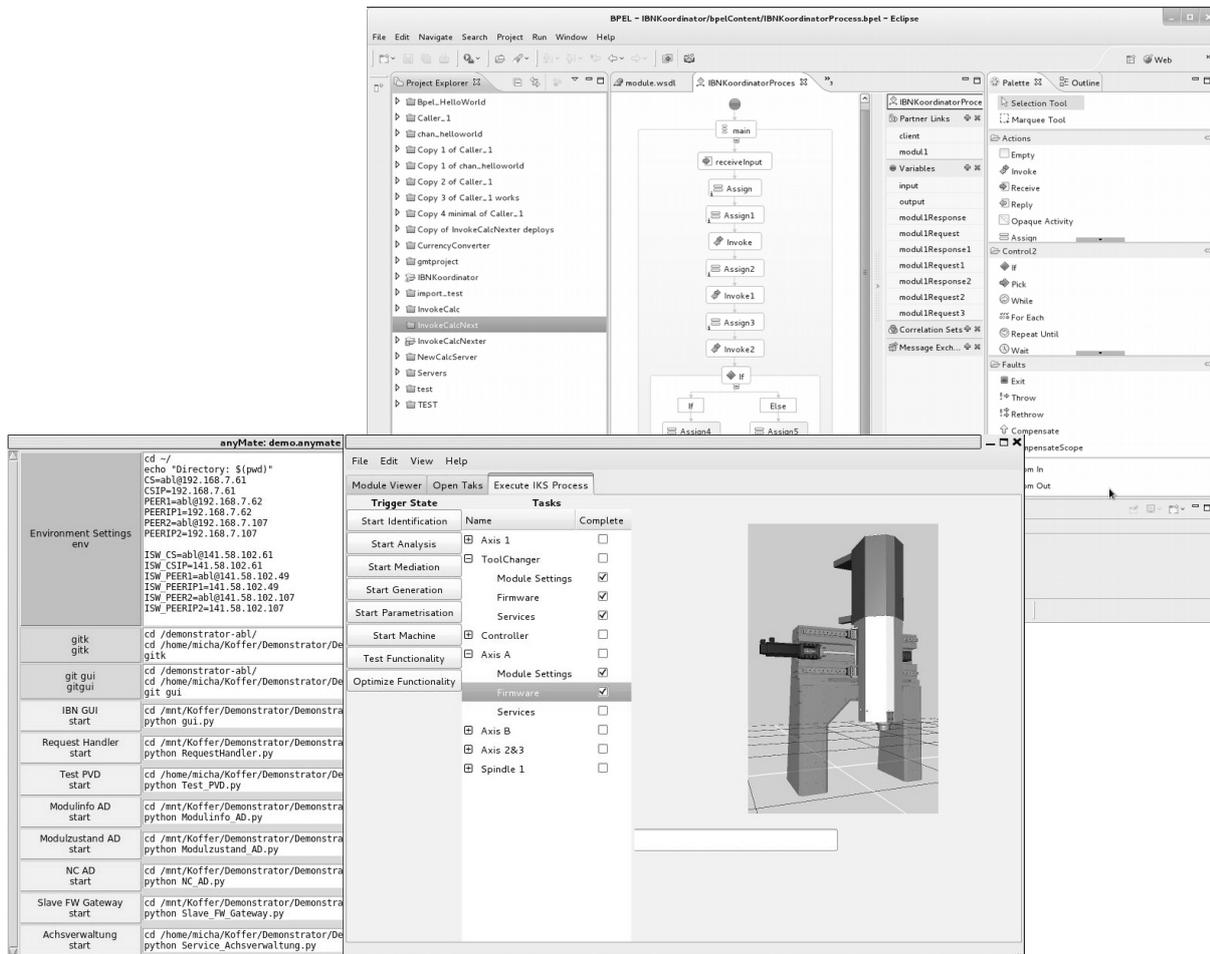


Abbildung 10.7: Graphisches Bediensystem des IKS und BPEL-Designer

Die Datenbank dient zur Speicherung des virtuellen Maschinenmodells und wird daher als zentrale Informationsbasis während den frühen Inbetriebnahmephasen genutzt. Das Dienstinventar ist in Phasenverwaltungs-, Adapter-, Applikations- und Generatordienste aufgeteilt. Wobei die beiden Letzteren auch in mechatronischen Modulen beherbergt sein können (siehe Abschnitt 9.3.1). Dies ist notwendig, wenn Module eigene, als Dienste mit in den Inbetriebnahmeprozess zu integrierende, Funktionalität besitzen. Dies ist in Abbildung 10.6 in Form des NC-Generatordienstes für die LinuxCNC angedeutet.

Der Informationsfluss gestaltet sich wie bereits in Abbildung 9.11 in Abschnitt 9.4 angedeutet. Zu Beginn der Abläufe werden die Datensätze zur Maschinenstruktur und zur

Maschinenfunktionalität gesammelt. Diese werden im Anschluss in der Mediationsphase verarbeitet und anschließend werden die für den Inbetriebnahmevorgang notwendigen Datensätze generiert. Diese werden dann in die Module transferiert und dort angewandt. Die Maschinenbeschreibung wird als Datensatz im XML-Format in der Datenbank abgelegt und bei Bedarf über den Datenbankadapter abgerufen.

Wie in Abbildung 10.6 angedeutet, wird der Firmware-Adapterdienst über einen Gateway-Dienst angesprochen, welcher zwischen WS- und DPWS-Protokollspezifika übersetzt. Auf diese Weise wird der Adapterdienst über die ODE in das Inbetriebnahmeverfahren integriert.

Softwaresysteme, welche keine von außen ansprechbare Web-Service Schnittstelle haben, wurden um entsprechende Schnittstellen erweitert. Dies gilt insbesondere für die NC-Adapterschnittstelle sowie den Firmware-Adapterdienst.

Abbildung 10.8 zeigt eine beispielhafte Übersicht zu den in der Forschungsplattform ablaufenden, von Inbetriebnahme-Geschäftsprozessen gestützten Vorgängen. Der Übersichtlichkeit halber sind nur die Dienstklassen nach Abbildung 8.9 dargestellt.

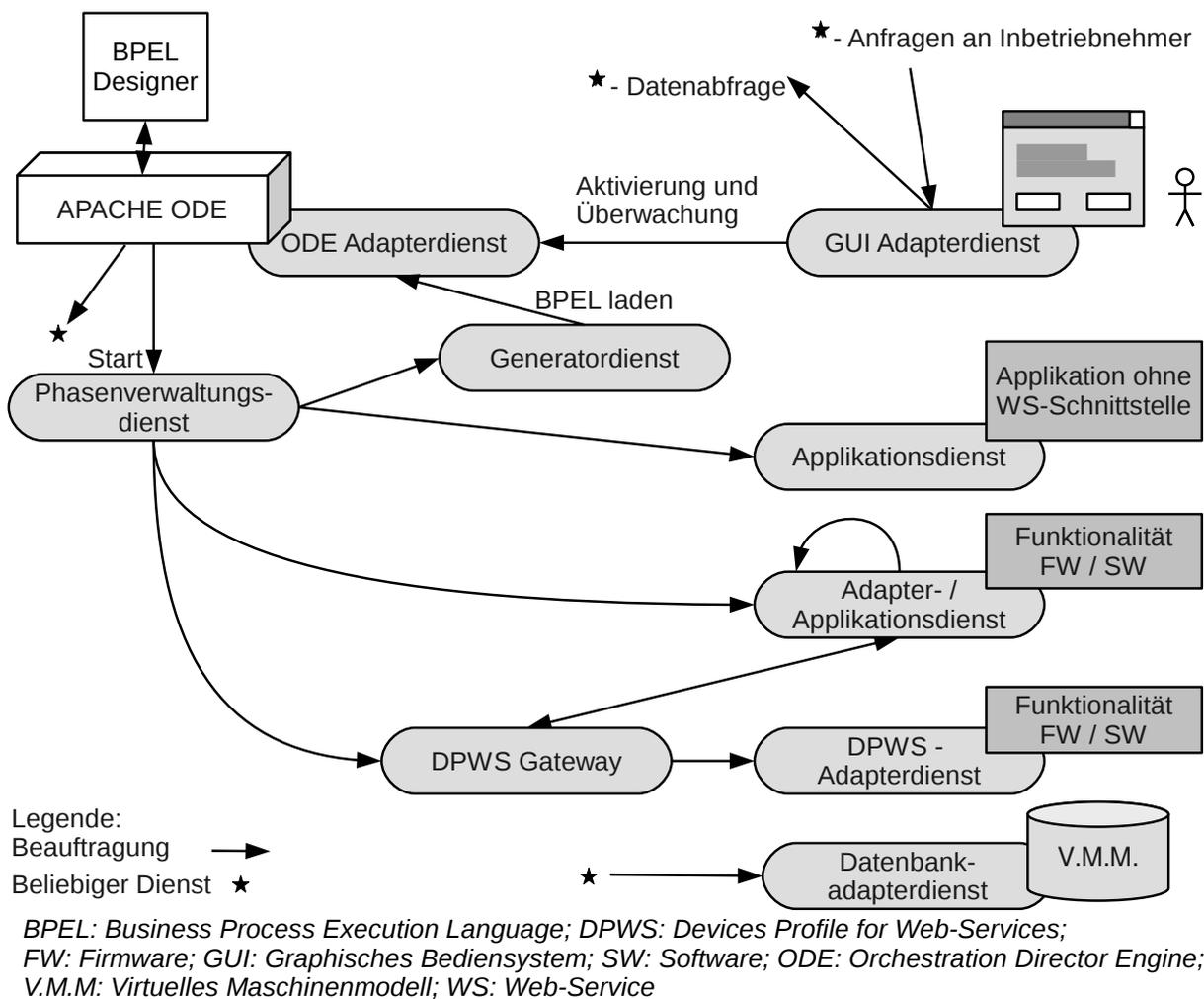


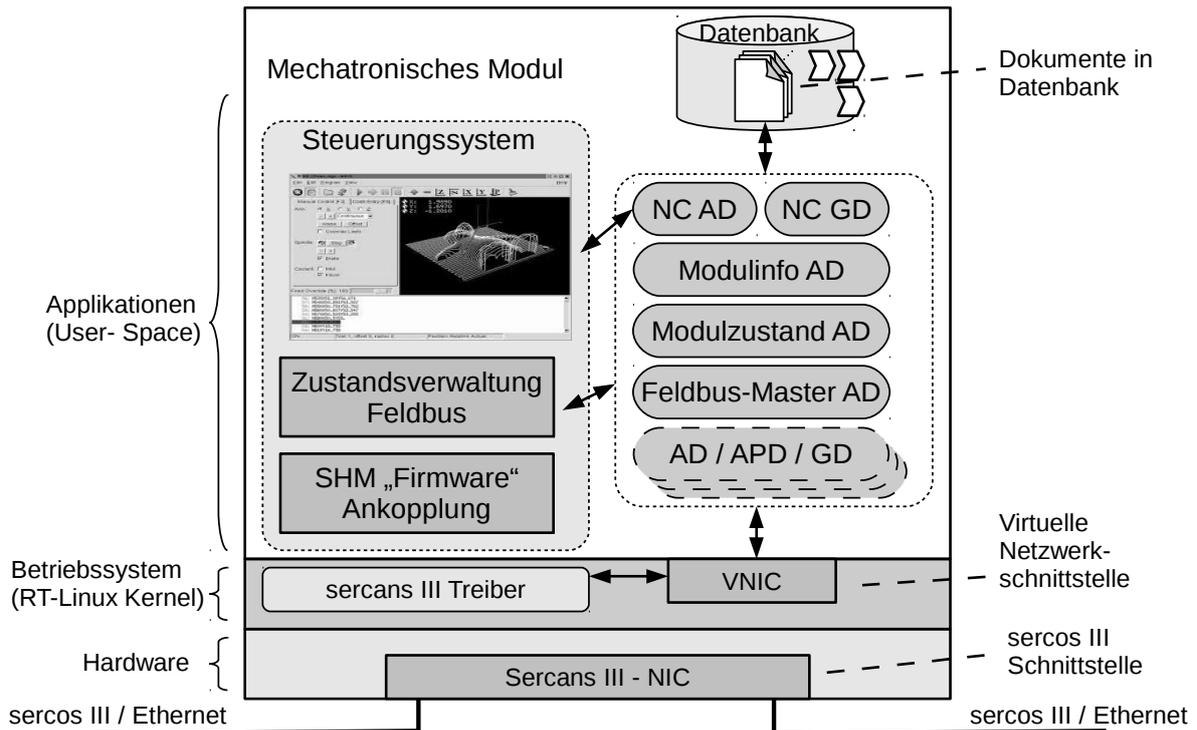
Abbildung 10.8: Übersicht der vereinfachten Dienstkommunikation in der Forschungsplattform

Exemplarisch dargestellt sind die hierarchischen Zugriffe auf die verschiedenen Dienstklassen; im Besonderen der Zugriff auf in DPWS-Dienste implementierte Funktionalität über Gateway-Dienste sowie der Zugriff auf weitere Applikationen über applikationsspezifische Dienste. In der Abbildung ist zudem eine Variante der Aufrufhierarchie dargestellt, bei welcher, neben der Orchestrierung von Vorgängen, auch Elemente einer Choreographie vorkommen. In welcher Form diese Hierarchie genutzt wird, ist wiederum von der zum Einsatz kommenden Inbetriebnahmestrategie und dem Aufbaukonzept des Maschinensystems abhängig. Mit einem Stern gekennzeichnete Anfragen sind von jedem Dienst aus erreichbar bzw. können an jeden Dienst gerichtet werden.

10.2.3 Realisierung der mechatronischen Module in der Forschungsplattform

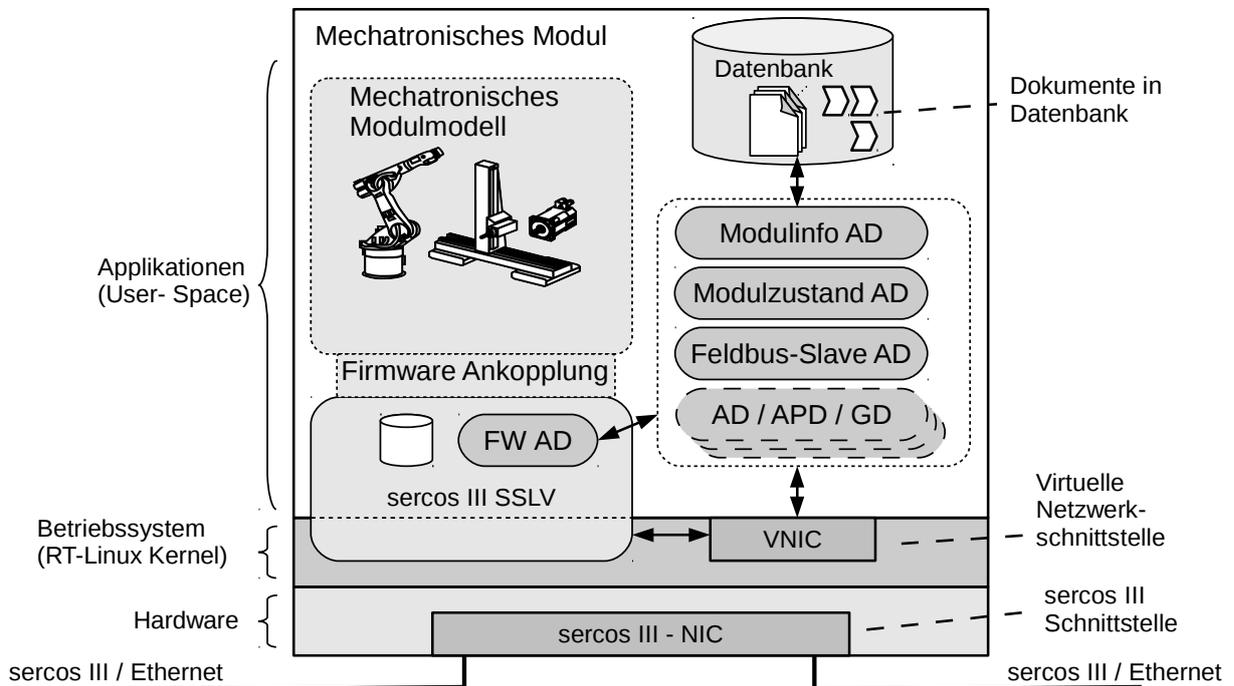
Mechatronische Module werden in der Forschungsplattform anhand ihrer informationstechnischen und kommunikationstechnischen Funktionalität dargestellt. Mechanische und elektronische Komponenten werden daher mittels eines Simulationsmodells abgebildet. Zur Anwendung kommt dabei das in Abschnitt 9.3 vorgestellte Architekturkonzept für mechatronische Module.

Wie im Abschnitt 10.1 erläutert, werden mechatronische Module in der Forschungsplattform mit PCs abgebildet. Diese sind entweder mit einer sercos-III-Master- oder mit einer Slave-PCI-Karte für die Feldbuskommunikation ausgestattet. Als sercos-Master-Anbindung dient eine Sercans-III-Karte von Bosch Rexroth. Als Basis für die Treiberanbindung dient der quelloffene Treiber `sercansiii` (Bock 2013). Passive sercos-III-Karten der Firma Automata dienen als Slave-Anbindungen. Die zugehörige Firmware wird als Echtzeitanwendung im Betriebssystem ausgeführt und basiert auf dem „sercos Slave Driver“ (SSLV) von Automata. Abbildung 10.9 und Abbildung 10.10 stellen die Realisierungen der beiden Modulvarianten in der Forschungsplattform dar.



AD: Adapterdienst; APD: Applikationsdienst; GD: Generatordienst; DPWS: Devices Profile for Web-Services; FW: Firmware; NC: Numeric Control; (V)NIC: (Virtual) Network Interface; SHM: Shared Memory

Abbildung 10.9: Mechatronisches Modul in der Forschungsplattform als Feldbus-Master



AD: Adapterdienst; APD: Applikationsdienst; GD: Generatordienst; FW: Firmware; (V)NIC: (Virtual) Network Interface; RT: Real-Time; SSLV: Sercos Slave Driver

Abbildung 10.10: Mechatronisches Modul in der Forschungsplattform als Feldbus-Slave ((Abel und Klemm 2013b))

Als Betriebssystem dient Linux mit RT-Preempt Erweiterung (OSADL 2015). Dies ermöglicht neben der Ausführung von Standardanwendungen auch die Ausführung von Echtzeitanwendungen. Dadurch ist die deterministische Ausführung des internen, mechatronischen Simulationsmodells sowie die zuverlässige Bedienung der Feldbusschnittstelle gewährleistet.

Als prototypisches Steuerungssystem kommt die LinuxCNC (LinuxCNC 2015) auf dem Feldbus-Master-Modul zum Einsatz. Zur Realisierung einer Feldbusanbindung wurde die LinuxCNC um ein Shared-Memory-Modul für Echtzeitdatenverkehr erweitert (Abel 2013). Die Generierung einer Steuerungskonfiguration wird vom NC-Generatordienst auf Basis der aktuellen Maschinenkonfiguration vorgenommen und mithilfe des NC-Adapterdienstes angewandt.

Zur Realisierung der in Abschnitt 9.2 konzeptionierten, auf TCP/IP aufsetzenden Kommunikationsmethode wurde die Netzwerkanbindung der passiven sercos-III-Slave Karte entsprechend erweitert. Dazu wurde ein TAP-Adapter für ein virtuelles Netzwerkgerät integriert (Krasnyansky 2015) (siehe Abbildung 10.11).

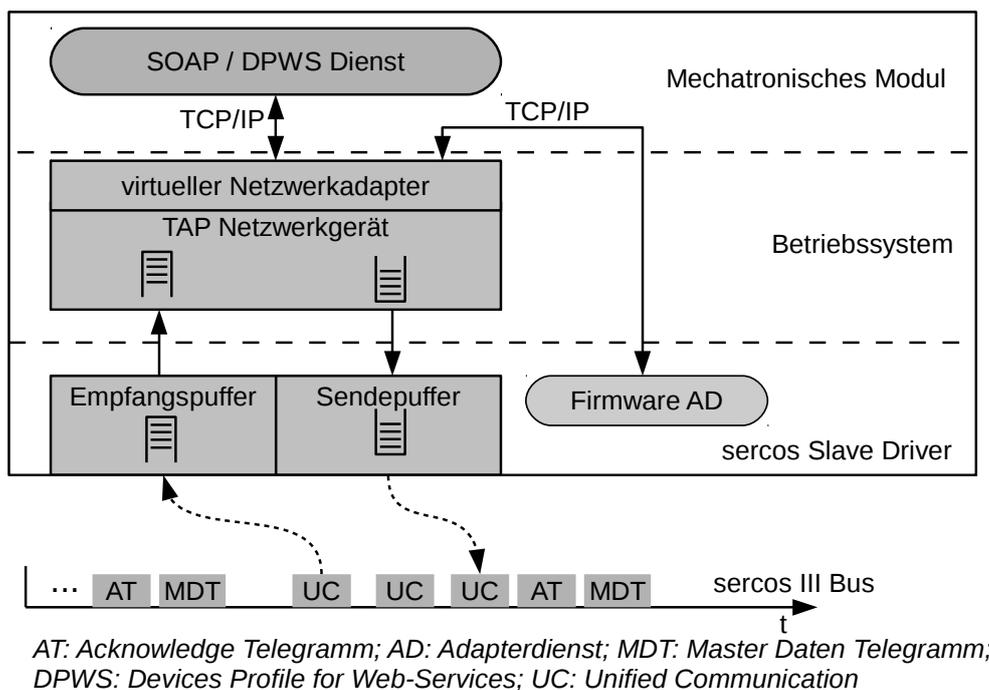


Abbildung 10.11: Anbindung an den virtuellen Netzwerkadapter in den Slave-Modulen

Der TAP-Netzwerkadapter dient der Emulation eines Ethernet-Netzwerkgerätes auf ISO-/OSI Schicht 2. Mit dieser Anpassung erscheint die Kommunikationsverbindung über den sercos UC-Kanal als separate Netzwerkverbindung zu anderen mechatronischen Modulen am Bus und kann für die Dienstkommunikation genutzt werden. Um einen Zugriff auf interne Zustandsinformationen zu erhalten, wurde ein Firmwareadapterdienst in den sercos-III-Slave-Treiber integriert. Die Netzwerkanbindung dieses Dienstes wurde aus Gründen der

Standardisierung wieder durch die TAP-Anbindung geleitet. Im Treiber des sercos-Masters ist bereits eine vergleichbare Anbindung integriert.

Die Übertragung von Echtzeitdaten folgt dem sercos-III-Standard. Demnach werden bei der Parametrierung der Feldbus-Adapter zyklische Datenverbindungen für sercos-Parameter eingestellt. Je nach Typ des zu konfigurierenden Datums werden dabei sowohl Standardparameter, als auch gerätespezifische Parameter als Echtzeitdaten konfiguriert.

Abhängig von der Ausprägung eines mechatronischen Moduls kann die durch sercos-Parameter abgebildete Schnittstelle im SSLV automatisch angepasst und mit den im Simulationsmodell des Moduls ausgetauschten Datensätzen informationstechnisch vernetzt werden. Abbildung 10.12 zeigt die informationstechnische Vernetzung von Daten aus dem Steuerungssystem mit Datensätzen aus dem Modulmodell über den Feldbus.

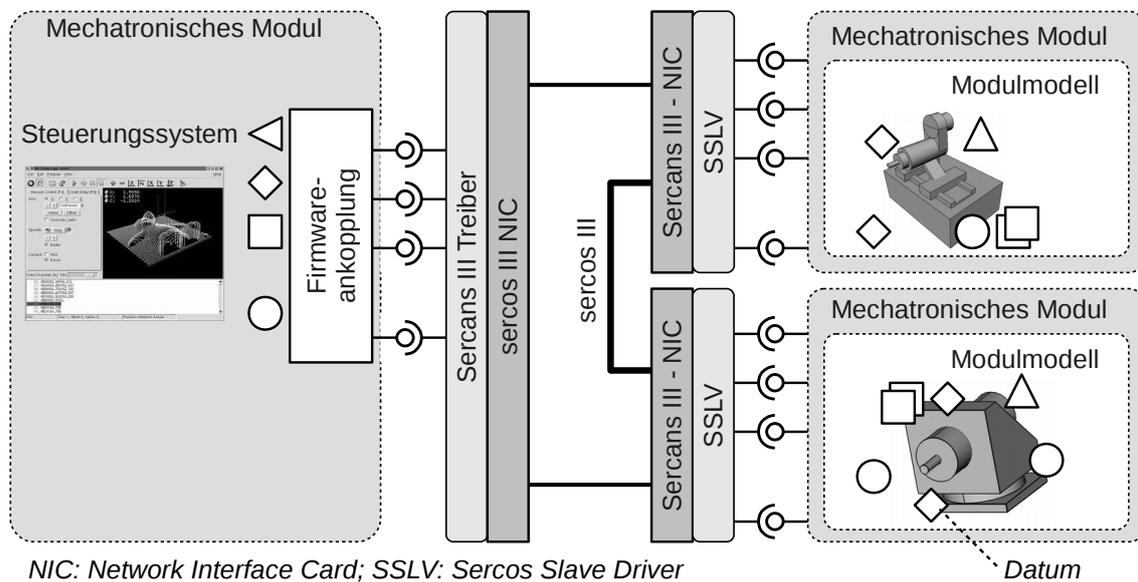


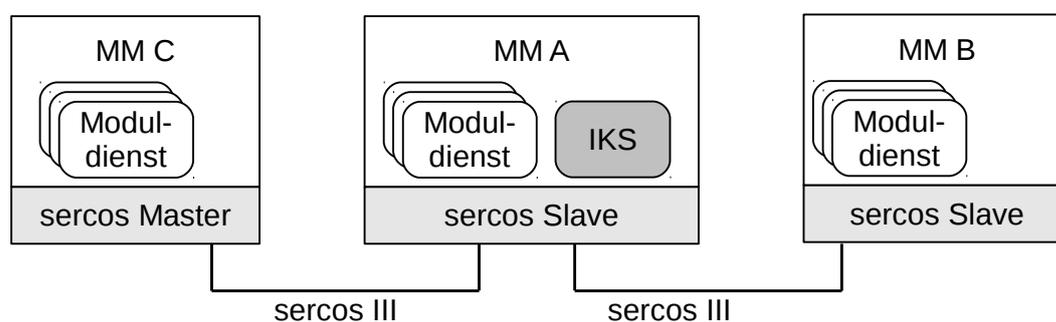
Abbildung 10.12: Echtzeitdatenverbindungen zwischen Master-Modul und Slave-Modulen

Die Festlegung der Verbindungskonfiguration erfolgt auf Basis der aktuellen Maschinenkonfiguration durch einen Abgleich der Datensinken und Datenquellen innerhalb der Maschine. Daraus wird vom Generatordienst für die Feldbusparametrierung eine Verbindungsliste erstellt und im sercos-III-Master angewandt. Auf der Seite des Steuerungssystems werden zu vernetzende Datensätze über die Firmware-Ankopplung mit dem Treiber der Sercans-III-Karte ausgetauscht. In den mechatronischen Modulen mit Simulationsmodell werden diese Datensätze wiederum transparent zum Modulmodell übergeben.

10.3 Exemplarische Vorgänge und Anwendungsfälle

10.3.1 Bereitstellung der Basiskommunikation

Zur Validierung der in Abschnitt 9.2 konzeptionierten, maschineninternen Kommunikationsmethodik wurde ein, logisch zum Feldbus gesehen, zweiter Kommunikationskanal eingeführt. Dieser für die Dienstkommunikation vorgesehene Kommunikationskanal ist in allen Betriebsphasen des Feldbussystems einsatzfähig. Als Basis dient der UC-Kanal innerhalb der sercos-Kommunikation. Zur Validierung der Funktionalität wurde ein Aufbau aus drei mechatronischen Modulen (MM A, MM B und MM C), welche untereinander per sercos-III vernetzt sind, eingesetzt (siehe Abbildung 10.13).



IKS: Inbetriebnahmekoordinatorssystem MM: Mechatronisches Modul

Abbildung 10.13: Anwendungsfall mit drei mechatronischen Modulen

Durch den Einsatz von virtuellen Netzwerkadaptoren in Master- und Slave-Modulen und den Transport der Netzwerkpakete über den UC-Kanal wird die reale Struktur des Bussystems verborgen. Folglich ist der Ausführungsort der Dienste innerhalb der rekonfigurierbaren Maschine unerheblich, sofern keine Abhängigkeiten zu Hardware bestehen (siehe auch Abschnitt 9.3.1). Das Inbetriebnahmekoordinatorssystem befindet sich im Beispiel in Modul A, welches im Beispiel aus Sicht des Feldbusses ein Slave-Modul darstellt.

Abbildung 10.14 zeigt eine Messung der Zeit zur Beantwortung einer Anfrage mit dem Internet Control Message Protocol (ICMP) in den relevanten sercos-Phasen (CP) zwischen drei mechatronischen Modulen. Die eingestellte Buszykluszeit beträgt 1 ms. Die Zykluszeit der Bustreiber liegt ebenfalls bei 1 ms.

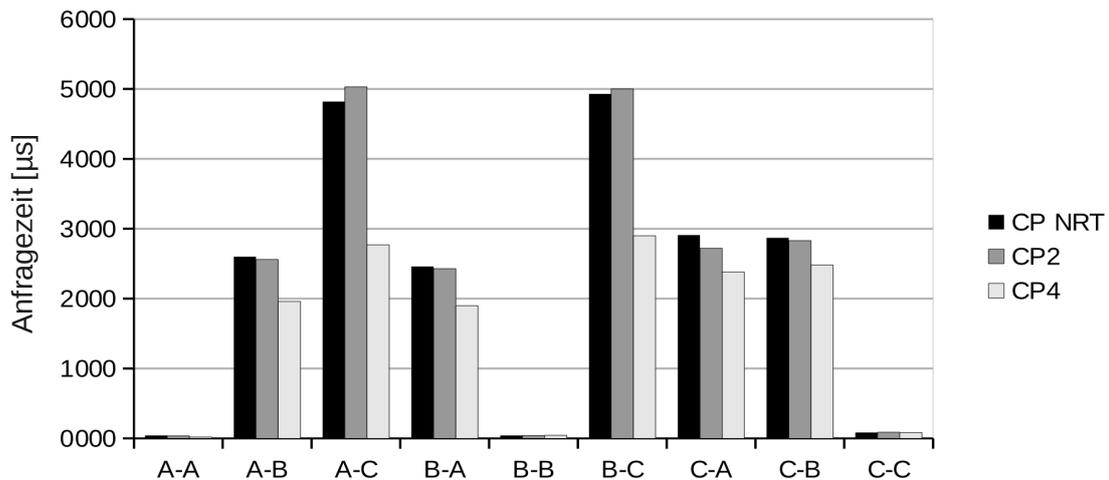


Abbildung 10.14: Gemittelte ICMP Antwortzeiten zwischen den Modulen A, B und C in CP NRT, CP 2 und CP 4

Antwortzeiten innerhalb der Module fallen erwartungsgemäß kurz im Rahmen von einigen μs aus. Antwortzeiten von nicht lokalen Anfragen liegen in der Größenordnung von etwa zwei Buszyklen. Die Antwortzeiten von den beiden Slave-Modulen zum Master-Modul dauern im Mittel in CP NRT und CP 2 doppelt so lange. Der Grund hierfür liegt vermutlich darin, dass die Verarbeitung der Netzwerkpakete in diesem Fall (eingehende Richtung im Master) einen Buszyklus länger dauert.

Abbildung 10.15 zeigt die Übertragungszeit einer SDDML-Beschreibung im XML-Format mit einer Größe von 27KB von den beteiligten mechatronischen Modulen zum IKS.

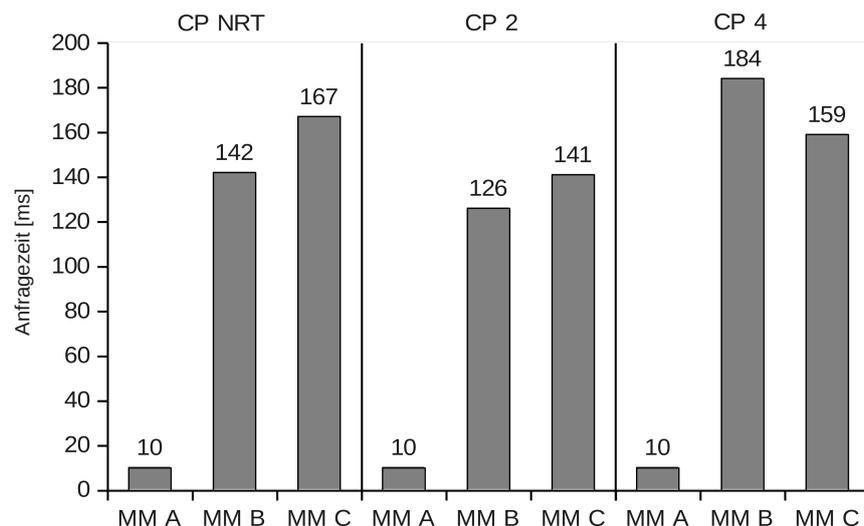


Abbildung 10.15: Übertragungszeit einer SDDML-Beschreibung zwischen den Modulen (Quelle: (Abel und Klemm 2013b))

Die Übertragungszeit vom Modul A zum IKS ist erwartungsgemäß kurz und liegt im Bereich von 10 ms. Die Übertragungszeit von den anderen beiden Modulen zum IKS ist länger und liegt zwischen 120 ms und 190 ms. Die Übertragung des Dokuments ist langsamer als in der Kommunikationstechnik üblich. Der Grund hierfür liegt darin, dass die zum Dokument gehörenden Datenpakete auf einem mit begrenzter Bandbreite behafteten Übertragungsweg mehrfach von zyklisch arbeitender Software und Firmware verarbeitet werden.

10.3.2 Adaption der Feldbusschnittstelle

Geräte mit Feldbusanbindung haben in der Regel eine statisch erstellte Feldbusschnittstelle. Für die Abbildung mechatronischer Module ist es allerdings notwendig, diese Schnittstelle, zumindest teilweise, dynamisch an die aktuell benötigte Methodik des internen Datenaustausches anzupassen (vgl. Abbildung 10.12). Innerhalb der Forschungsplattform findet diese Dynamik unter anderem Anwendung bei dem Umrüsten der Firmware und Software eines mechatronischen Moduls, damit mit einer PC-Plattform ein anderes Modul dargestellt werden kann. Zur Realisierung dieser Funktionalität wurde ein Firmwareadapterdienst in den SSLV integriert. Dieser nutzt die Möglichkeit zur Manipulation und zum Zugriff auf die SSLV-interne Datenbank mit sercos-Parametern (siehe Abbildung 10.16).



AD: Adapterdienst; FW: Firmware; IKS: Inbetriebnahmekoordinatorsystem

Abbildung 10.16: Transparente Adaption der Feldbusschnittstelle von einem externen Dienst

Neben der Erstellung und Veränderung von sercos-Parametern in sercos-Phase 2 können diese in weiteren sercos-Phasen zusammen mit ihren Attributen gelesen werden. Die Zugriffsmöglichkeit auf die SSLV-interne Datenbank wird über die Schnittstelle des Dienstes eingeräumt und steht somit für den maschinenweiten Einsatz bereit.

Damit ist die Anpassung der Feldbusschnittstelle zur Laufzeit des Inbetriebnahmevorgangs möglich. Je nach benötigter Verbindungskonfiguration auf dem Feldbus, kann eine Anpassung der in Echtzeit zu kommunizierenden Daten erfolgen. Dies ist zugleich die Grundlage für eine Adaption der Feldbusschnittstelle, bevor das Bussystem gestartet wird.

10.3.3 Anwendungsfall Kalibrierlauf eines Moduls mit Achsverbund

Befinden sich in einem mechatronischen Modul Bewegungsachsen, welche mechanisch mit weiteren Modulen der Maschine gekoppelt sind, so müssen diese Bewegungssachsen während der Inbetriebnahme der Maschine neu parametrieren werden. Dazu gehört die Justierung von Einstellparametern des Messsystems sowie von physikalischen Achsparametern, um ein ideales Bewegungsverhalten der Achsen zu gewährleisten. Einstellungen zur Kollisionsvermeidung wie Endschalterpositionen und nicht erlaubte Bewegungsbereiche müssen ebenfalls parametrieren werden.

Bevor eine Bewegungsachse genutzt werden kann, muss diese während des Inbetriebnahmeprozesses erkannt, analysiert und eingerichtet werden. Daraufhin folgt die Bestimmung des benötigten und erlaubten Verfahrbereiches. Vorbedingungen sind, dass das Modul mit Achsverbund während der Parametrierungsphase bereits erkannt wurde, parametrieren ist und für einen Probelauf vorbereitet wurde. Dies bedeutet, dass der Feldbus bereits gestartet wurde, die notwendigen Soll- und Istwerte zyklisch über den Bus übertragen werden sowie dass die relevanten Achsfreigaben gesetzt sind. Voraussetzung ist ebenfalls, dass eine informationstechnische Vernetzung der Achsinformationen mit dem Steuerungssystem stattgefunden hat sowie dass das Steuerungssystem einsatzbereit ist. Zusätzlich müssen physikalische Achsparameter, wie Einstellungen für Geschwindigkeit und Beschleunigung, so gesetzt sein, dass die Achsen zumindest bewegungsfähig sind. Eine Feinjustierung findet während des Kalibrierlaufes statt. Abbildung 10.17 zeigt die exemplarisch umgesetzten Vorgänge während des Kalibrierlaufes.

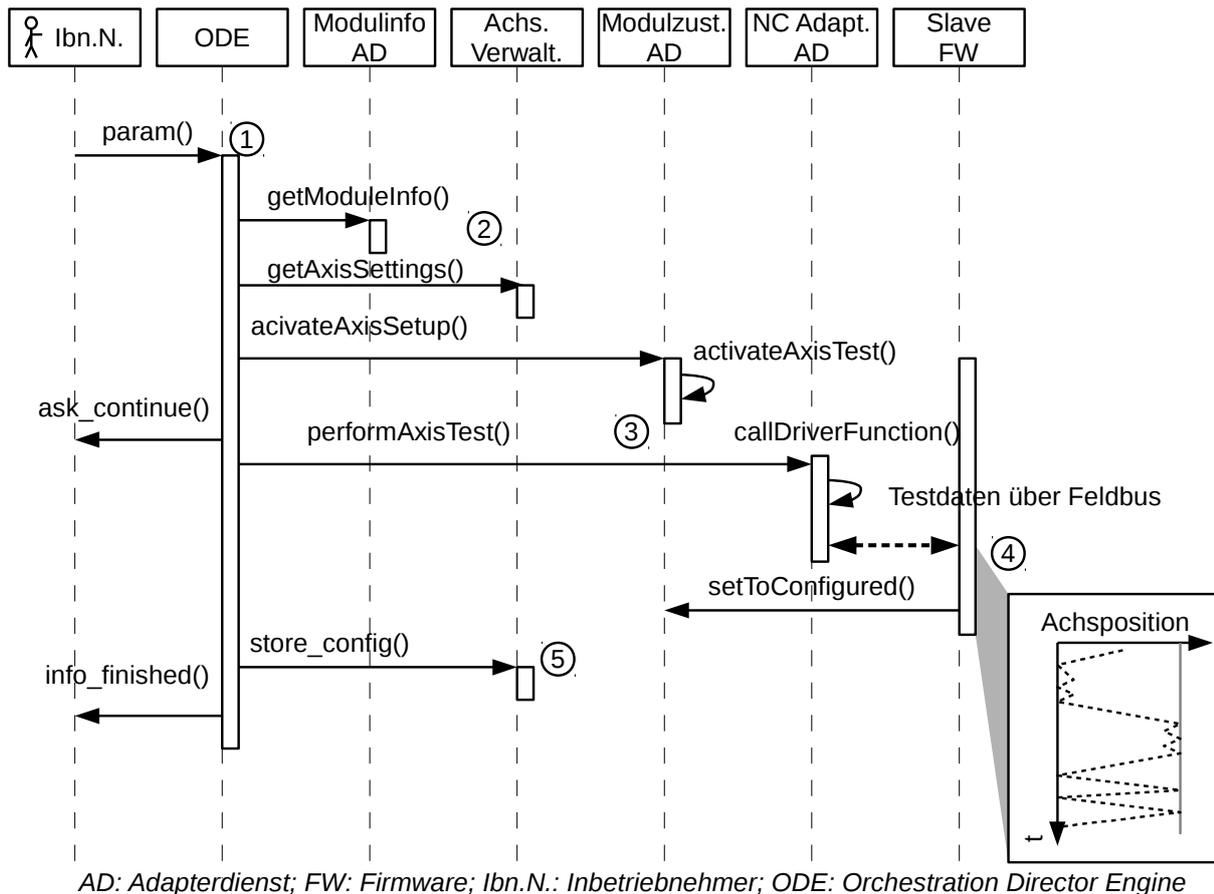


Abbildung 10.17: Kalibrierlauf für eine separate Achse

Der Aufruf zum Kalibrierlauf wird im vorgestellten Anwendungsfall vom Inbetriebnehmer mittels des IKS-Bediensystems initiiert. Der Aufruf wird von der ODE entgegengenommen und von dort aus schrittweise an weitere Dienste delegiert, welche die direkte Kommunikation mit den Adapterdiensten übernehmen (1). Im weiteren Verlauf werden Informationen zur Achseinstellung aus dem „Adapterdienst Modulinformation“ und der Achsverwaltung abgefragt (2). Im Anschluss wird der Achsverbund aktiviert, indem über den „Adapterdienst Modulzustand“ die für eine Bewegung notwendigen Regler- und Bewegungsfreigaben gesetzt werden. Da bereits gültige Sollaten über den Feldbus übertragen werden, können diese, nach einer Validitätsprüfung, als Eingabewerte für die Bewegungssteuerung auf dem Modul dienen. Dazu wird im Vorfeld Rücksprache mit dem Inbetriebnehmer gehalten, damit dieser darüber informiert ist, dass nun einige Achsen einem Kalibrierlauf unterzogen werden. Der Inbetriebnehmer kann in Folge den Bewegungsvorgang überwachen und im Fehler- oder Problemfall korrigierend eingreifen oder den Vorgang abbrechen.

Sind diese Schritte erfüllt, kann das zuvor in das Steuerungssystem geladene Kalibrierprogramm ausgeführt werden (3). Dazu wird die ursprünglich aus dem Modul entnommene Bewegungsfolge zur Kalibrierung des Achsverbundes verwendet und deren Ausführung überwacht (4). Diese beinhaltet zuerst langsame Bewegungen, um die gegebenenfalls wäh-

rend des Aufbaus der Maschine neu eingestellten Endschalterpositionen zu bestimmen, die Messsysteme einzustellen und den Verfahrbereich des Moduls zur Kollisionsvermeidung entsprechend zu beschränken. Daraufhin werden schnellere Bewegungen ausgeführt, um die Parameter der Achsregelung und des Messsystems zu justieren und um gegebenenfalls auftretende Schwingungen durch veränderte Massenverhältnisse zu detektieren.

Am Ende des Kalibrierlaufes sind die Achsen in Betrieb genommen, die Endschalterpositionen sind eingestellt und der Verfahrbereich ist, falls notwendig, weiter eingeschränkt worden. Zum Schluss werden die genutzten Achsparameter und Einstellungen in der Achsverwaltung und dem virtuellen Maschinenmodell gesichert (5).

10.4 Bewertung von Entwurf und Realisierung der Forschungsplattform

Die in diesem Kapitel vorgestellte Forschungsplattform stellt die Basisfunktionalitäten für eine automatisierte Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen zur Verfügung. Die Funktion der Forschungsplattform wurde anhand von exemplarischen Anwendungsfällen evaluiert.

Einige Bestandteile des Vorgehens müssen in weiteren Arbeiten noch präzisiert werden: Dazu gehört die Frage, wie viel Inbetriebnahmefunktionalität in BPEL-Fragmente eingebettet werden kann oder in Form einer Choreographie von Diensten ablaufen muss; weiterhin werden präzisere, interne Beschreibungsformate und Informationsmodelle für die Maschinenbeschreibungen und das virtuelle Maschinenmodell benötigt. Die Konzepte zur Mediation, d.h. zur Ableitung eines konkreten Vorgehens auf der Basis von Maschineninformationen und Inbetriebnahmeschritten, sollten ebenfalls verfeinert werden. Bedingt durch die starke Interdisziplinarität der Thematik sowie aufgrund der Vielzahl von Abhängigkeiten zwischen Inbetriebnahmestrategie und Maschinenkonzept sind des Weiteren noch viele Details zur Ableitung eines konkreten Vorgehens zu klären.

Die Forschungsplattform mit dem nach serviceorientierten Prinzipien gestalteten Inbetriebnahmekoordinatorssystem kann im Weiteren zur Evaluierung eines Maschinenkonzeptes in Verbindung mit einem Inbetriebnahmekonzept herangezogen werden. Mögliche dazu notwendige Erweiterungen können leicht durch weitere Dienste oder verfeinerte Lösungslogik der Dienste eingepflegt werden.

Durch die Bereitstellung eines Inbetriebnahmekonzeptes in Verbindung mit einer Forschungsplattform zur Evaluierung der raschen Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen stellt diese Entwicklung einen weiteren Schritt in Richtung wandelbarer Produktionssysteme dar.

Kapitel 11

Zusammenfassung und Ausblick

11.1 Zusammenfassung

Die Inbetriebnahme einer rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschine muss nicht nur bei dem initialen Aufbau der Maschine erfolgen, sondern muss auch bei jeder Rekonfiguration derselben wiederholt werden. Zur Beschleunigung der ansonsten zeitintensiven Aufgabe der Inbetriebnahme bietet sich eine Automatisierung der Vorgänge an. Der im Vorfeld, im Rahmen der Entwicklung, notwendige erhöhte Aufwand ist mit einer signifikanten Zeitersparnis bei häufigen Rekonfigurationen zu rechtfertigen. Die Automatisierung der Inbetriebnahme ist damit umso lohnender, je häufiger eine Maschine umgebaut, sprich rekonfiguriert, wird.

Diese Arbeit stellt daher ein Konzept zur raschen automatisierten Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen vor sowie eine Methodik zur Evaluierung derselben. Die Konfiguration der Maschine erfolgt dabei durch die Kombination von mechatronischen Modulen, welche die Funktionalität der Maschine bereitstellen.

Am Anfang der Arbeit wird eine Analyse und Systematisierung von Tätigkeiten während der Inbetriebnahme vorgenommen. Auf dieser Basis wird ein Informationsmodell der Inbetriebnahme abgeleitet. Danach wird ein Konzept zur automatisierten Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen entwickelt. Das Konzept sieht die Modellierung der maschineninternen Informationstechnik als serviceorientierte Architektur vor. Dadurch wird die Generierung eines Geschäftsprozesses für die Inbetriebnahme auf der Basis der aktuellen Konfiguration der Maschine ermöglicht. Im Anschluss wird eine für die automatisierte Inbetriebnahme geeignete Systemarchitektur abgeleitet. Den Kern dieser Architektur stellen innerhalb der mechatronischen Module der Maschine verteilte Dienste in Kombination mit einem Inbetriebnahmekoordinatorssystem dar. Das Inbetriebnahmekoordinatorssystem ist nach serviceorientierten Prinzipien entworfen und nutzt eine Orchestration Engine zur Ausführung von als Geschäftsprozesse modellierten Inbetriebnahmetätigkeiten. Abschließend wird eine Forschungsplattform mit dem Ziel der Evaluierung von Inbetriebnahmestrategien für rekonfigurierbare Bearbeitungsmaschinen vorgestellt. Die Forschungsplattform dient einerseits der praxisnahen Erprobung des entwickelten Inbetriebnahmekonzepts und andererseits der Evaluierung von Aufbaukonzepten und den daraus resultierenden Inbetriebnahmestrategien.

Eine rasche Inbetriebnahme ist für rekonfigurierbare Maschinen unabdingbar, da dieser Maschinentyp erst dadurch zu einem wirtschaftlichen Einsatz in der Praxis befähigt wird. Das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept für eine automatisierte Inbetriebnahme soll daher dazu beitragen, dass rekonfigurierbare Maschinensysteme ein kommerzieller Erfolg werden

und damit dem Konzept der wandelbaren Produktionssysteme weiterer Auftrieb verleihen wird.

11.2 Ausblick

Bei der Automatisierung der Inbetriebnahme handelt es sich um ein komplexes Forschungsfeld, welches auch mit der vorliegenden Arbeit nicht abschließend behandelt werden konnte. Für zukünftige Forschungsvorhaben innerhalb dieses Themenkomplexes steht daher noch genügend Raum für eine Fortsetzung zur Verfügung.

Lohnende Felder für eine Fortführung sind: Entwicklung von geeigneten Beschreibungssprachen für die Beschreibung von Modul- und Maschinenfunktionalität, welche die für eine Automatisierung notwendigen Informationen bereitstellen. Weiterhin werden tragfähige Methoden und Algorithmen benötigt, um diese Informationen verarbeiten zu können und um aus diesen Schlüsse für das weitere Vorgehen ziehen zu können. Dasselbe gilt für eine präzisere Modellierung des virtuellen Maschinenmodells, da dieses als zentrale Informationsbasis dient. Daher kommt auch der Anreicherung und Verarbeitung dieser Datensätze ein hoher Stellenwert zu. Weiterer Aufmerksamkeit bedarf es bei der Erstellung von Modul- und Maschinenkonzepten, welche für eine rasche Inbetriebnahme geeignet sind. Dabei gilt es auch die Abhängigkeiten zwischen Aufbaukonzept und Inbetriebnahmekonzept zu beachten, die in gegenseitiger Wechselwirkung zueinander stehen.

Literaturverzeichnis

- Abel (2011) Abel, Michael, 2011. Serviceorientierte Architektur für die Konfiguration und Inbetriebnahme von Produktionsmaschinen: Universal Plug and Produce, In: *Tagungsband AALE 2011*, Oldenburg: Industrie Verlag, S. 111–120, ISBN 978-3-8356-3238-7
- Abel (2013) Abel, Michael, 2013. *RT-Preempt enhanced LinuxCNC*, URL <https://www.gitorious.org/emc-rt-preempt/emc-rt-preempt.git/>, zuletzt besucht: 2016
- Abel und Heinze (2013) Abel, Michael und Heinze, Tobias, 2013. Die rekonfigurierbare (Werkzeug-) Maschine, *Computer & Automation Jg. 09*(2013) S. 36–41
- Abel und Klemm (2013a) Abel, Michael und Klemm, Peter, 2013. Flexible Plattform für die Erforschung von automatisierten Inbetriebnahmeprozessen für rekonfigurierbare Produktionsmaschinen nach dem Konzept: Universal Plug and Produce, In: *Tagungsband zur AALE-Tagung 2013*, München: Deutscher Industrieverlag, S. 101–110, ISBN 978-3-8356-3364-3
- Abel und Klemm (2013b) Abel, Michael und Klemm, Peter, 2013. Flexible SOA based Platform for Research on Start-up Procedures for Reconfigurable Production Machines, In: *Advances in Sustainable and Competitive Manufacturing Systems*, Berlin: Springer Verlag, S. 493–505, ISBN 978-3-319-00556-0
- Abel, Klemm et al. (2011) Abel, Michael, Klemm, Peter, Silcher, Stefan, und Mínguez, Jorge, 2011. Start-up of Reconfigurable Production Machines with a Service-Oriented Architecture, *21st International Conference on Production (ICPR)*, 31. Juli bis 4. August 4 2011
- Abele und Wörn (2004) Abele, Eberhard und Wörn, Arno, 2004. Chamäleon im Werkzeugmaschinenbau Rekonfigurierbare Mehrtechnologiemaschinen, *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb Jg. 99*(4) S. 152–156

- Abele und Wörn (2009) Abele, Eberhard und Wörn, Arno, 2009. Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems, Berlin: Springer, Kap. Reconfigurable Machine Tools and Equipment, S. 111–125, ISBN 978-1-84882-066-1
- Abele, Versace et al. (2006) Abele, Eberhard, Versace, A., und Wörn, Arno, 2006. Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories, Berlin: Springer, Kap. Reconfigurable Machining System (RMS) for Machining of Case and Similar Parts in Machine Building, S. 327–339, ISBN 3-540-29391-4
- Abele, Wörn et al. (2007) Abele, Eberhard, Wörn, Arno, Fleischer, Jürgen, Wieser, Jan, Martin, Patrick, und Klopper, Robert, 2007. Mechanical Module Interfaces for Reconfigurable Machine Tools, *Prod. Eng. Res. Dev.* **Jg. 2007**(1) S. 421–428
- Apache (2014) Apache, 2014. *Apache Orchestration Director Engine* The Apache Software Foundation, URL <https://ode.apache.org>, zuletzt besucht: 2016
- AutomationML (2009) AutomationML, 2009. *AutomationML Specification - Part 1 - Architecture and General Requirements, v1.1*, URL <http://www.automationml.org>
- Balzert (2011) Balzert, Helmut, 2011. *Lehrbuch der Softwaretechnik: Entwurf, Implementierung, Installation und Betrieb*, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 3. Aufl., ISBN 978-3-8274-1706-0
- Bi, Lang et al. (2008) Bi, Z. M., Lang, S. Y. T., Shen, W., und Wang, L., 2008. Reconfigurable manufacturing systems: the state of the art, *International Journal of Production Research* **Jg. 46**(4) S. 967–992
- Bock (2013) Bock, Hans-Peter, 2013. *Sercans III Linux Kernel Driver*, URL <http://sercansiii.sourceforge.net>, zuletzt besucht: 2014
- Bohn (2009) Bohn, Hendrik, 2009. *Web Service Composition for Embedded Systems WS-BEPEL Extension for*

-
- DPWS*, Dissertation, IMD, Univ. Rostock, Göttingen: Sierke Verlag
- Bohn, Bobek et al. (2008) Bohn, Hendrik, Bobek, Andreas, und Golatowski, Frank, 2008. WS-BPEL Process Compiler for Resource-Constrained Embedded Systems, *22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications - Workshops (AINA workshops 2008)*, 25-28 März 2008, S. 1387–1392, ISBN 978-0-7695-3096-3
- Brockhaus (2006) Brockhaus, 2006. *Brockhaus Enzyklopädie*, 21, Leipzig: Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG, ISBN 3-7653-4101-0
- Böger (1998) Böger, Frank Hermann, 1998. *Herstellerübergreifende Konfigurierung modularer Werkzeugmaschinen*, Dissertation, Univ. Hannover, Düsseldorf: VDI Verlag, ISBN 3-18-346202-8
- Cachapa, Harrison et al. (2011) Cachapa, Daniel, Harrison, Robert, und Colombo, Armando, 2011. Configuration of SoA-based devices in virtual production cells, *International Journal of Production Research* **Jg. 49**(24) S. 7397–7423
- Candido, Jammes et al. (2010) Candido, Goncalo, Jammes, Francois, de Oliveira, Jose Barata, und Colombo, Armando W., 2010. SOA at Device level in the Industrial domain: Assessment of OPC UA and DPWS specifications, *Industrial Informatics (INDIN), 2010 8th IEEE International Conference*, 13.-16. Juli, Osaka, S. 598 – 603, ISBN 978-1-4244-7298-7
- Daniel (1996) Daniel, Christian, 1996. *Dynamisches Konfigurieren von Steuerungssoftware für offene Systeme*, Dissertation, ISW, Univ. Stuttgart, Berlin: Springer Verlag, ISBN 3-540-60423-5
- Daščenko (2006) Daščenko, Anatolij (Hrsg.), 2006. *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*, Berlin: Springer Verlag, ISBN 3-540-29391-4

- Dominka (2007) Dominka, Sven, 2007. *Hybride Inbetriebnahme von Produktionsanlagen - von der virtuellen zur realen Inbetriebnahme*, Dissertation, Univ. München, Göttingen: Sierke Verlag, ISBN 978-3940333407
- Drabow und Woelk (2004) Drabow, Gregor und Woelk, Peer-Oliver, 2004. Wandlungsfähige Fabrik der Zukunft Modulare Struktur- und Steuerungskonzepte, *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* **Jg. 99**(3) S. 90–94
- Drath (2010) Drath, Rainer, 2010. *Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML*, Berlin: Springer Verlag, ISBN 978-3642046735
- Eclipse Foundation (2014a) Eclipse Foundation, 2014. *BPEL Designer Project*, URL <https://eclipse.org/bpel/>, zuletzt besucht: 2016
- Eclipse Foundation (2014b) Eclipse Foundation, 2014. The Eclipse Foundation: Eclipse Plattform, URL <https://eclipse.org>, zuletzt besucht: 2016
- Erl (2006) Erl, Thomas, 2006. *Service-oriented architecture: concepts, technology, and design*, New Jersey: Prentice Hall, ISBN 0-13-185858-0
- Erl (2008) Erl, Thomas, 2008. *SOA: Entwurfsprinzipien für serviceorientierte Architektur*, Boston: Addison-Wesley, ISBN 978-3827329844
- EU (2006) EU, 2006. "Maschinenrichtlinie", *Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG.*, Amtsblatt der Europäischen Union
- Finger und Zeppenfeld (2009) Finger, Patrick und Zeppenfeld, Klaus, 2009. *SOA und WebServices*, Berlin: Springer Verlag, ISBN 978-3-540-76990-3

- Fukaya (2004) Fukaya, Tomohiro, 2004. *HIPARMS and Highly Productive and Reconfigurable Manufacturing and System, Final Report*, IMS Intelligent Manufacturing Systems, URL <http://www.ims.org/wp-content/uploads/2011/11/2.4.14.2-Final-Report-HIPARMS.pdf>, zuletzt besucht: 2016
- Gartzen (2012) Gartzen, Thomas, 2012. *Diskrete Migration als Anlaufstrategie für Montagesysteme*, Dissertation, Univ. Aachen, Aachen: Apprimus-Verlag, ISBN 978-3-86359-100-7
- Gilart-Iglesias, Maciá-Pérez et al. (2007) Gilart-Iglesias, Virgilio, Maciá-Pérez, Francisco, Marcos-Jorquera, Diego, und Mora-Gimeno, Francisco Jose, 2007. Industrial Machines as a Service: Modelling Industrial Machinery Processes, *Industrial Informatics, 2007 5th IEEE International Conference on*, 23.- 27. Juli, ISBN 978-1-4244-0851-1
- Glanzer, Schmidt et al. (2003) Glanzer, Klaus, Schmidt, Thomas, Wippel, Gerald, und Dutzler, Christoph, 2003. Integration of Shop Floor Holons with Automated Business Processes, In: *Holonc and Multi-Agent Systems for Manufacturing, Lecture Notes in Computer Science*, Berlin: Springer Verlag, S. 146–155, ISBN 978-3-540-40751-5
- Grote und Feldhusen (2011) Grote, Karl-Heinrich und Feldhusen, Jörg, 2011. *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*, Berlin: Springer Verlag, ISBN 978-3-642-17305-9
- Gruver, Kotak et al. (2003) Gruver, William A., Kotak, Dilip B., van Leeuwen, Edwin H., und Norrie, Douglas, 2003. Holonic Manufacturing Systems: Phase II, In: *Holonc and Multi-Agent Systems for Manufacturing, Lecture Notes in Computer Science*, Berlin: Springer Verlag, S. 1–14, ISBN 978-3-540-40751-5

- GSaME (2015) GSaME, 2015. *Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME)*, URL <http://www.gsame.uni-stuttgart.de>, zuletzt besucht: 2016
- Hedrick und Urbanic (2009) Hedrick, R. und Urbanic, J., 2009. Managing Change and Reconfigurations of CNC Machine Tools, In: ElMaraghy, H.A. (Hrsg.), *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*, London: Springer Verlag, S. 285–300, ISBN 978-1-84882-066-1
- Heisel (2004) Heisel, 2004. Heisel, U.; Meitzner, M.: Rekonfigurierbare Bearbeitungssysteme, *wt Werkstattstechnik online* **Jg. 94**(10) S. 517 – 520
- Heisel und Meizner (2006) Heisel, U. und Meizner, M., 2006. Progress in Reconfigurable Manufacsystems Systems, In: Daščenko, Anatolij (Hrsg.), *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*, Berlin: Springer Verlag, S. 47–62, ISBN 3-540-29391-4
- Heisel und Michaelis (1998) Heisel, U. und Michaelis, M., 1998. Rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen, *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* **Jg. 93**(10) S. 506–507
- Hernández (2002) Hernández, Morales Roberto, 2002. *Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung*, Dissertation, Univ. Hannover, Berlin: VDI-Verlag, ISBN 3-183-14916-8
- Hoffmeister (2013) Hoffmeister, Michael, 2013. *Modelle zur aufgabengeführten Produktionsausführung in der wandlungsfähigen Produktion*, Dissertation, Univ. Stuttgart, Stuttgart: Fraunhofer Verlag, ISBN 978-3-8396-0530-1
- IEEE (2012) IEEE, 2012. *IEEE 802.3 - 2012 – IEEE Standard for Ethernet*, International Telecommunication Union: ITU

- INDEX (2014) INDEX, 2014. *RatioLine Hochleistungs-Dreh-Fräszentren Produktprospekt*, INDEX-Werke GmbH & Co. KG, URL http://www.index-werke.de/fileadmin/user_upload/INDEX/G400/INDEX_G250_G400_EN.pdf, zuletzt besucht: 2016
- ISG (2015) ISG, 2015. Industrielle Steuerungstechnik GmbH, Germany, URL <http://www.isg-stuttgart.de>, zuletzt besucht: 2016
- ISO (1994) ISO, 1994. *Open Systems Interconnection ISO/IEC 7498-1*, International Organization for Standardization (ISO)
- Jammes und Smit (2005) Jammes, François und Smit, Harm, 2005. Service-oriented Paradigms in Industrial Automation, *IAS-TED 23rd International Multi-Conference: Parallel and Distributed Computing and Networks*, 15.-17 Februar, Innsbruck
- Jammes, Smit et al. (2005) Jammes, François, Smit, Harm, L., Jose, Lastra, Martinez, und Delamer, Ivan M., 2005. Orchestration of Service-Oriented Manufacturing Processes, *Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA 2005. 10th IEEE Conference Catania*, S. 624–632, ISBN 0-7803-9401-1
- Jovane, Westkämper et al. (2009) Jovane, Francesco, Westkämper, Engelbert, und Williams, David, 2009. *The Proactive Initiative ManuFuture Roadmap*, Berlin: Springer Verlag, ISBN 978-3-540-77011-4
- Karnouskos, Bangemann et al. (2009) Karnouskos, Stamatis, Bangemann, Thomas, und Diedrich, Christian, 2009. Integration of Legacy Devices in the Future SOA-based Factory, *13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, 3.-5. Juni, Moskau
- Ketterer (1995) Ketterer, Gunter, 1995. *Automatisierte Inbetriebnahme elektromechanischer, elastisch gekoppelter Bewegungsachsen*, Dissertation, ISW, Univ. Stuttgart, Berlin: Springer Verlag, ISBN 3-540-59031-5

- Kircher (2011) Kircher, Christian, 2011. *Selbstadaptierende NC-Steuerung für rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen*, Dissertation, ISW, Univ. Stuttgart, Heimsheim: Jost-Jetter Verlag, ISBN 978-3-939890-79-9
- Kircher und Wurst (2006) Kircher, Christian und Wurst, Karl-Heinz, 2006. Modulkonzept für rekonfigurierbare Bearbeitungs- und Steuerungssysteme, *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* **Jg. 101**(6) S. 360–365
- Kircher, Seyfarth et al. (2004) Kircher, Christian, Seyfarth, Michael, und Wurst, Karl-Heinz, 2004. Modellbasiertes Rekonfigurieren von Werkzeugmaschinen, *wt Werkstattstechnik online* **Jg. 94**(5) S. 179–183
- Kircher, Seyfarth et al. (2006) Kircher, Christian, Seyfarth, Michael, Wurst, Karl-Heinz, und Pritschow, Günter, 2006. Self-Adapting Control Systems for RMS, In: Daščenko, Anatolij (Hrsg.), *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*, Berlin: Springer Verlag, ISBN 3-540-29391-4
- Konrad, Hoffmeister et al. (2012) Konrad, K., Hoffmeister, M., Zapp, M., Verl, A., und Busse, J., 2012. Enabling Fast Ramp-Up of Assembly Lines through Context-Mapping of Implicit Operator Knowledge and Machine-Derived Data, In: *Precision Assembly Technologies and Systems*, Berlin: Springer Verlag, S. 163–174, ISBN 978-3-642-28162-4
- Koren, Heisel et al. (1999) Koren, Y., Heisel, U., Jovane, F., Moriwaki, T., Pritschow, G., Ulsoy, G., und Brussele, H. Van, 1999. Reconfigurable Manufacturing Systems, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* **Jg. 48**(2) S. 527–540
- Koren (2006) Koren, Yoram, 2006. General RMS and Characteristics. Comparison and with Dedicated and Flexible Systems, In: Daščenko, Anatolij (Hrsg.), *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*, Berlin: Springer Verlag, ISBN 3-540-29391-4

- Koren und Shpitalni (2010) Koren, Yoram und Shpitalni, Moshe, 2010. Design of reconfigurable manufacturing systems, *Journal of Manufacturing Systems* **Jg. 29**(4) S. 130–141
- Krasnyansky (2015) Krasnyansky, Maxim, 2015. *Virtual Tunnel for TCP/IP Networks with Traffic Shaping, Compression and Encryption*, URL <http://vtun.sourceforge.net>, zuletzt besucht: 2016
- Krug (2012) Krug, Stefan, 2012. *Automatische Konfiguration von Robotersystemen (Plug&Produce)*, Dissertation, Univ. München, München: Herbert Utz Verlag, ISBN 978-3-8316-4243-4
- Kufner (2012) Kufner, Annika, 2012. *Automatisierte Erstellung von Maschinenmodellen für die Hardware-in-the-Loop-Simulation von Montagemaschinen*, Dissertation, ISW, Univ. Stuttgart, Heimsheim: Jost-Jetter Verlag, ISBN 978-3-939890-94-2
- Lacour (2012) Lacour, Frederic-Felix, 2012. *Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen*, Dissertation, Univ. München, München: Herbert Utz Verlag, ISBN 978-3-8316-4162-8
- Lechler, Schmitz et al. (2007) Lechler, Armin, Schmitz, Stefan, Kircher, Christian, und Wurst, Karl-Heinz, 2007. Flexible Reconfiguration and Maintenance Through Mechatronic Modules in Manufacturing Systems, *19th International Conference on Production Research, ICPR*, 29. Juli 29 - 02. August
- Lewek (2005) Lewek, Jörg, 2005. *Adaptierbares Informationssystem zur Erstellung baukastenbasierter Fertigungseinrichtungen*, Dissertation, ISW, Univ. Stuttgart, Heimsheim: Jost-Jetter Verlag, ISBN 3-936947-46-5
- Liebhart (2007) Liebhart, Daniel, 2007. *SOA goes real - Serviceorientierte Architekturen erfolgreich planen und ein-*

- führen*, München: Hanser Verlag, ISBN 978-3-446-41319-1
- LinuxCNC (2015) LinuxCNC, 2015. *LinuxCNC: an open source CNC machine controller*, URL <http://www.linuxcnc.org>, zuletzt besucht: 2016
- Lorenzer, Weikert et al. (2007) Lorenzer, T., Weikert, S., Bossoni, S., und Wegener, K., 2007. Modeling and evaluation tool for supporting decisions on the design of reconfigurable machine tools, *Journal of Manufacturing Systems* **Jg. 26**(3-4) S. 167–177
- Lorenzer (2007) Lorenzer, Thomas, 2007. Umrüstbarkeit macht flexibel, *WB: Werkstt und Betrieb* **Jg. 2007**(3) S. 18–23
- Lorenzer (2010) Lorenzer, Thomas, 2010. *Wandelbarkeit in der Serienfertigung and durch rekonfigurierbare and Werkzeugmaschinen*, Dissertation, Univ. Zürich, Düsseldorf: VDI Verlag, ISBN 978-3-18-319916-7
- Lutz und Sperling (1997) Lutz, Peter und Sperling, Wolfgang, 1997. OSA-CA - the vendor neutral Control Architecture, In: Fichtner, Dieter (Hrsg.), *Facilitating Deployment of Information and Communications Technologies for Competitive Manufacturing, Proceedings of the European Conference on Integration in Manufacturing (iM'97)*, Dresden: Selbstverlag der TU Dresden, ISBN 3-86005-192-X
- Lutz (1999) Lutz, Rainer, 1999. *Softwaretechnik für maschinen-nahe Steuerungsfunktionen bei Fertigungseinrichtungen*, Dissertation, ISW, Univ. Stuttgart, Heimsheim: Jost-Jetter Verlag, ISBN 3-931388-24-7
- Mathes, Gärtner et al. (2009) Mathes, Markus, Gärtner, Jochen, Dohmann, Helmut, und Freisleben, Bernd, 2009. SOAP4IPC: A Real-Time SOAP Engine for Industrial Automation,

-
- 17th Euromicro International Conference on Parallel, Distributed and Network-based Processing*, S. 220–226, ISBN 978-0-7695-3544-9
- Mehrabi, Ulsoy et al. (2000) Mehrabi, M. G., Ulsoy, A. G., und Koren, Y., 2000. Reconfigurable manufacturing systems Key and to future manufacturing, *Journal of Intelligent Manufacturing* **Jg. 11** S. 403–419
- Mehrabi, Ulsoy et al. (2002) Mehrabi, M. G., Ulsoy, A. G., Koren, Y., und Heytler, P., 2002. Trends and perspectives in flexible and reconfigurable manufacturing systems, *Journal of Intelligent Manufacturing* **Jg. 13** S. 135–146
- Mendes, Leitão et al. (2008) Mendes, Marco, Leitão, Paulo, Colombo, Armando W., und Restivo, Francisco, 2008. Service-Oriented Control and Architecture for and Reconfigurable Production and Systems, The IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN 2008), Daejeon Korea
- Mesa (2008) Mesa, 2008. *SOA in Manufacturing Guidebook, White Paper 27; A MESA International, IBM Corporation and Capgemini co-branded white paper*, URL <http://www.mesa.org>, zuletzt besucht: 2016
- Meteor (2004) Meteor, 2004. Projekt Meteor 2010 - Rekonfigurierbare Werkzeugmaschine, *VDI-Z Integrierte Produktion* **Jg. 2004**(10)
- Michaelis (2002) Michaelis, Michael, 2002. *Flexibilitätssteigerung in der Fertigung durch rekonfigurierbare Bearbeitungssysteme*, Dissertation, Univ. Rostock, Birstadt: MVK Medien-Verlag, ISBN 3-935625-23-5
- Moon (2006) Moon, Y. M., 2006. Reconfigurable Machine Tool Design, In: Daščenko, Anatolij (Hrsg.), *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*, Berlin: Springer Verlag, ISBN 3-540-29391-4
- Mínguez (2012) Mínguez, Jorge, 2012. *A Service-oriented Integration Platform for Flexible and Information Pro-*

- visioning and in the Real-time Factory*, Dissertation, Univ. Stuttgart, doi:<http://dx.doi.org/10.18419/opus-2873>
- Neugebauer, Denkena et al. (2007) Neugebauer, R., Denkena, B., und Wegener, K., 2007. Mechatronic Systems for Machine Tools, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* **Jg. 56**(2) S. 657–686
- Neuhaus (2003) Neuhaus, Jörn, 2003. *Umkonfigurieren von Werkzeugmaschinen durch Plug & Play mechatronischer Module*, Dissertation, Univ. Aachen, Aachen: Shaker Verlag, ISBN 3-8322-1677-4
- OASIS (2007) OASIS, 2007. *Web Services Business Process Execution Language Version 2.0 OASIS Standard Organization for the Advancement of Structured Information Standards (OASIS)*, URL <http://www.oasis-open.org>, zuletzt besucht: 2016
- OASIS (2009) OASIS, 2009. *Devices Profile for Web Services Version 1.1 Organization for the Advancement of Structured Information Standards (OASIS)*, URL <http://www.oasis-open.org>, zuletzt besucht: 2016
- OMG (2011) OMG, 2011. *OMG Unified Modeling Language (UML), Infrastructure Object Management Group (OMG)*, URL <http://www.omg.org>, zuletzt besucht: 2016
- OMG (2013) OMG, 2013. *Meta and Object Facility and (MOF) Core and Specification Object Management Group (OMG)*, URL <http://www.omg.org>, zuletzt besucht: 2016
- Onori, Lohse et al. (2012) Onori, Mauro, Lohse, Niels, Barata, Jose, und Harnisch, Christoph, 2012. The IDEAS project: plug & produce at shop-floor level, *Journal of Assembly Automation* **Jg. 2**(32) S. 124–134

- OSACA e.V. (1997) OSACA e.V., 1997. OSACA-Handbook, *Open System Architecture for Controls with Automation Systems (OSACA)*, OSACA e.V. Eigenverlag
- OSADL (2015) OSADL, 2015. *Realtime Linux - Open Source Automation Development Lab (OSADL)*, URL <http://www.osadl.org/Realtime-Linux.projects-realtime-linux.0.html>, zuletzt besucht: 2016
- Pasek (2006) Pasek, Z. J., 2006. Challenges in the Design of Reconfigurable Machine Tools, In: Daščenko, Anatolij (Hrsg.), *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*, Berlin: Springer Verlag, ISBN 3-540-29391-4
- Phaithoonbuathong, Monfared et al. (2010) Phaithoonbuathong, Punnuluk, Monfared, Radmehr, Kirkham, Thomas, Harrison, Robert, und West, Andrew, 2010. Web services-based automation for the control and monitoring of production systems, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing Jg. 23*(2) S. 126–145
- Pritschow, Wurst et al. (2003) Pritschow, G., Wurst, K.-H., Seyfarth, M., und Bürger, T., 2003. Requirements for Controllers in Reconfigurable Machining Systems, In: ElMaraghy, Hoda A. (Hrsg.), *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*, Springer, S. 111–125, ISBN 978-1-84882-066-1
- Pritschow, Kircher et al. (2006) Pritschow, G., Kircher, C., Kremer, M., und Seyfarth, M., 2006. Control Systems for RMS and Methods of their Reconfiguration, In: Daščenko, Anatolij (Hrsg.), *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*, Berlin: Springer Verlag, ISBN 3-540-29391-4
- Quade und Mächtel (2012) Quade, Jürgen und Mächtel, Michael, 2012. *Moderne Realzeitsysteme kompakt, Eine Einführung mit*

- Embedded Linux*, Heidelberg: dpunkt.verlag, ISBN 978-3-89864-830-1
- Reinhart, Krug et al. (2010) Reinhart, G., Krug, S., Hüttner, S., Mari, Z., Riedelbauch, F., und Schlögel, M., 2010. Automatic Configuration (Plug & Produce) of Industrial Ethernet and Networks, *9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON 2010*, ISBN 978-1-4244-8008-1
- Robert Schmitt (2012) Robert Schmitt, Henrik Glöckner, 2012. Identifikation von Wandlungsbedarf, *wt Werkstattstechnik online* **Jg. 102**(11/12) S. 801 – 806
- Rupp und Queins (2012) Rupp, Chris und Queins, Stefan, 2012. *UML 2 glasklar: Praxiswissen für die UML-Modellierung*, München: Hanser Verlag, ISBN 978-3-446-43057-0
- Röck (2011) Röck, Sascha, 2011. Hardware in the loop simulation of production systems dynamics, *German Academic Society for Production Engineering (WGP)* **Jg. 5**(3) S. 329–337
- Schaich (2001) Schaich, Christoph, 2001. *Informationsmodell zur fachübergreifenden Beschreibung von intelligenter Produktionsmaschinen*, Dissertation, Univ. München, München: Herbert Utz Verlag, ISBN 978-3-8316-0080-9
- Scrimieri, Oates et al. (2013) Scrimieri, Daniele, Oates, Robert F., und Ratchev, Svetan M., 2013. Learning and reuse of engineering ramp-up strategies for modular assembly systems, *Journal of Intelligent Manufacturing* **Jg. 26**(6) S. 1063–1076
- Selig (2011) Selig, Andreas, 2011. *Informationsmodell zur funktionalen Typisierung von Automatisierungsgeräten*, Dissertation, ISW, Univ. Stuttgart, Heimsheim: Jost-Jetter Verlag, ISBN 978-3-939890-74-4
- Sercos International (2012a) Sercos International, 2012. *sercos III Communication Specification 1.3 Bus Specification*. Sercos Inter-

-
- national e.V.*, URL <http://www.sercos.org>, zuletzt besucht: 2016
- Sercos International (2012b) Sercos International, 2012. *The sercos guide to the UC Channel Bus Specification*. Sercos International e.V., URL <http://www.sercos.org>, zuletzt besucht: 2016
- Sirena Project (2005) Sirena Project, 2005. SIRENA EU Project, URL <http://www.sirena-itea.org>, zuletzt besucht: 2014
- Socrades Project (2009) Socrades Project, 2009. SOCRADES EU Project, zuletzt besucht: 2014, <http://www.socrades.eu>
- Soda Project (2008) Soda Project, 2008. SODA EU Project, URL <http://www.soda-itea.org>, zuletzt besucht: 2014
- de Souza, Spiess et al. (2008) de Souza, Luciana Moreira Sa, Spiess, Patrik, Guinard, Dominique, Köhler, Moritz, Karnouskos, Stamatis, und Savio, Domnic, 2008. SOCRADES: A Web Service based Shop Floor Integration Infrastructure, In: *The Internet of Things*, Zürich, S. 50–67, ISBN 978-3-540-78730-3
- Sperling (1999) Sperling, Wolfgang, 1999. *Modulare Systemplattformen für offene Steuerungssysteme*, Dissertation, ISW, Univ. Stuttgart, Berlin: Springer Verlag, ISBN 3-540-65698-7
- Steuer (1991) Steuer, M., 1991. *Entwicklung von Softwarewerkzeugen zur wissensbasierten Inbetriebnahme von komplexen Serienmaschinen*, Dissertation, Univ. Karlsruhe, Berlin: Springer Verlag
- Tanenbaum und van Steen (2008) Tanenbaum, Andrew S. und van Steen, Maarten, 2008. *Verteilte Systeme: Prinzipien und Paradigmen*, München: Pearson Verlag, ISBN 978-3-8273-7293-2
- Thoben und Fritz (2003) Thoben, Klaus D. und Fritz, Sebastian, 2003. Fit für die Maßgeschneiderte Massenfertigung durch agile,

- rekonfigurierbare Fertigungssysteme, In: *Proceedings of the National Workshop within the ARMMS Projekt*, Stuttgart, ISBN 978-3-89653-973-1
- Timm und Schmutzler (2009) Timm, Constantin und Schmutzler, Jens, 2009. Dynamic Web Service Orchestration applied to the Device Profile for Web Services in Hierarchical Networks, *COMSWARE '09 Proceedings of the Fourth International ICST Conference on COMMunication System softWare and middlewaRE*, New York: ACM, ISBN 978-1-60558-353-2
- Toonen, Lappe et al. (2014) Toonen, Christian, Lappe, Dennis, Scholz-Reiter, Bernd, und Freitag, Michael, 2014. Kapazitätsanpassungen durch Werkzeugmaschinen, *wt Werkstattstechnik online Jg. 104*(4) S. 244–249
- Trautmann und Lanfer (2010) Trautmann, Andreas und Lanfer, Alfred, 2010. Der Lebenszyklus eines Internet der Dinge Materialflusssystem: Inbetriebnahme und Hochlauf, In: Günthner, Willibald und Hompel, Michael (Hrsg.), *Internet der Dinge in der Intralogistik*, Berlin: Springer Verlag, S. 217–227, ISBN 978-3-642-04895-1
- Tücks (2010) Tücks, Gregor, 2010. *Ramp-Up Management in der Automobilindustrie*, Dissertation, Univ. Aachen, Aachen: Apprimus Verlag, ISBN 978-3-940565-40-2
- Ullrich (2006) Ullrich, Gork, 2006. *Konfigurierbare Steuerungssoftware für modulare Transfermaschinen auf Basis offener Steuerungssysteme*, Dissertation, Univ. Aachen, Aachen: Shaker Verlag, ISBN 3-8322-5085-9
- van Engelen und Gallivany (2002) van Engelen, Robert A. und Gallivany, Kyle A., 2002. The gSOAP Toolkit for Web Services and Peer-To-Peer Computing Networks, In: *Proceedings of the 2nd IEEE/ACM International Symposium on Cluster Computing and the Grid (CCGRID 02)*, ISBN 0-7695-1582-7

- VDI (1990) VDI, 1990. *Inbetriebnahme komplexer Maschinen und Anlagen*, Berlin: VDI-Verlag, ISBN 3-18-090831-9
- VDI (1994) VDI, 1994. *Flexible Fertigung FFS*, Berlin: VDI-Verlag, ISBN 3-18-401040-6
- VDI (2004) VDI, 2004. *Methodisches Entwerfen technischer Produkte VDI 2223* VDI Richtlinie: 2223:2004-01, Berlin: Beuth Verlag
- VDI (2013) VDI, 2013. *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme - Design methodology for mechatronic systems - VDI 2206* VDI Richtlinie: 2206:2004-06, Berlin: Beuth Verlag
- W3C (2001) W3C, 2001. *Web Services Description Language (WSDL) 1.1*, URL <http://www.w3.org>, zuletzt besucht: 2016
- W3C (2007) W3C, 2007. *SOAP Version 1.2*, URL <http://www.w3.org>, zuletzt besucht: 2016
- W3C (2014) W3C, 2014. *Extensible Markup Language (XML) 1.0*, URL <http://www.w3.org>, zuletzt besucht: 2016
- Weber (2006) Weber, Klaus H., 2006. *Inbetriebnahme verfahrenstechnischer Anlagen: Praxishandbuch mit Checklisten und Beispielen*, Berlin: Springer Verlag, ISBN 978-3-540-34317-2
- Weber (2007) Weber, Matthias, 2007. *Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme*, Dissertation, Univ. Erlangen-Nürnberg, Bamberg: Meisenbach Verlag, ISBN 978-3-87525-269-9
- Westkämper (2006) Westkämper, Engelbert, 2006. *Abschlussbericht des Sonferforschungsbereichs 467 - Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen für die variantenreiche Serienproduktion*, Stuttgart, universität-Stuttgart Eigenverlag

- Westkämper (2008) Westkämper, Engelbert, 2008. *Wandlungsfähigkeit in der variantenreichen Serienfertigung - Transferbereich 059 - Abschlussbericht 2005-2008*, Stuttgart: Universität-Stuttgart Eigenverlag
- Westkämper und Zahn (2009) Westkämper, Engelbert und Zahn, Erich, 2009. *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen - Das Stuttgarter Unternehmensmodell*, Berlin: Springer Verlag, ISBN 978-3-540-21889-0
- Wikipedia e.V. (2015) Wikipedia e.V., 2015. *Freie Enzyklopädie Wikipedia*, URL <http://www.wikipedia.org>, zuletzt besucht: 2016
- Winkler, Heins et al. (2007) Winkler, Helge, Heins, Michael, und Nyhuis, Peter, 2007. *A controlling system based on cause-effect relationships for the ramp-up of production systems*, German Academic Society for Production Engineering (WGP), *Prod. Eng. Res. Devel.* S. 103–111
- Wulfsberg (2014) Wulfsberg, Jens, 2014. *DFG-Schwerpunktprogramm SPP 1476 „Kleine Werkzeugmaschinen“*, URL <http://www.spp1476.de>, zuletzt besucht: 2016
- Wulfsberg, Verl et al. (2013) Wulfsberg, Jens-Peter, Verl, Alexander, Wurst, Karl-Heinz, Grimske, Silka, Batke, Christoph, und Heinze, Tobias, 2013. *Modularity in Small Machine Tools*, *Prod. Eng. Res. Devel.* **Jg. 7**(5) S. 483–490
- Wurst, Heisel et al. (2006) Wurst, K.-H., Heisel, U., und Kircher, C., 2006. *(Re)konfigurierbare Werkzeugmaschinen – notwendige Grundlage für eine flexible Produktion*, *wt Werkstattstechnik online* **Jg. 96**(5) S. 257 – 265
- Wörn (2009) Wörn, Arno, 2009. *Ein Beitrag zur Gestaltung mechanischer Modulschnittstellen für rekonfigurierbare Mehrtechnologie-Werkzeugmaschinen*, Dissertation, Univ. Darmstadt, Aachen: Shaker Verlag, ISBN 978-3-8322-8457-2
- Wünsch (2008) Wünsch, Georg, 2008. *Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme*

- me*, Dissertation, Univ. München, München: Herbert Utz Verlag, ISBN 3831607958
- Zeeb, Moritz et al. (2010) Zeeb, Elmar, Moritz, Guido, Timmermann, Dirk, und Golatowski, Frank, 2010. WS4D: Toolkits for Networked Embedded Systems Based on the Devices Profile for Web Services, *39th International Conference on Parallel Processing Workshops (ICPPW)*, New York: IEEE, ISBN 978-1-4244-7918-4
- Zhang, Liu et al. (2006) Zhang, G., Liu, R., Gong, L., und Huang, Q., 2006. An Analytical Comparison on Cost and Performance among DMS, AMS, FMS and RMS, In: Daščenko, Anatolij (Hrsg.), *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*, Berlin: Springer Verlag, ISBN 3-540-29391-4

Diese Arbeit stellt ein Konzept zur automatisierten Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen mit serviceorientierten Paradigmen vor. Damit soll die ansonsten zeitintensive Aufgabe der Inbetriebnahme dieser Maschinen wesentlich beschleunigt werden. Eine rasche Inbetriebnahme ist für rekonfigurierbare Maschinen unabdingbar, da dieser Maschinentyp erst dadurch zu einem wirtschaftlichen Einsatz in der Praxis befähigt wird.

