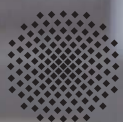


STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG

KONSTANTIN KONRAD

Verfahren zum semantisch unterstützten Anlagenanlauf von Montagesystemen



Universität Stuttgart



Fraunhofer

IPA

Herausgeber:

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

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

Prof. Dr.-Ing. Prof. e. h. Dr.-Ing. e. h. Dr. h. c. mult. Engelbert Westkämper

Konstantin Konrad

**Verfahren zum semantisch unterstützten
Anlagenanlauf von Montagesystemen**

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-00, Telefax 0711 970-1399
info@ipa.fraunhofer.de, www.ipa.fraunhofer.de

STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG**Herausgeber:**

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

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISSN: 2195-2892

ISBN: 978-3-8396-0455-7

D 93

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2012

Druck: Mediendienstleistungen des
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2012

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 800469, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-2500
Telefax 0711 970-2508
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 substantiell wahrgenommen werden und so die Produktionsforschung weltweit voranbringen.

Alexander Verl

Thomas Bauernhansl

Engelbert Westkämper

Verfahren zum semantisch unterstützten Anlagenanlauf von Montagesystemen

**Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung**

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Konstantin Konrad
aus Ulm

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Alexander Verl

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Michael Weyrich

Tag der mündlichen Prüfung: 27. September 2012

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und
Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart

2012

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Projektleiter in der Abteilung Reinst- und Mikroproduktion am Fraunhofer IPA in Stuttgart.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Alexander Verl danke ich für die wissenschaftliche Betreuung und Förderung dieser Arbeit und die Übernahme des Hauptberichts. Mein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Weyrich für die Durchsicht der Arbeit und die Übernahme des Mitberichts. Herrn Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Udo Gommel danke ich für die entgegengebrachte Unterstützung während der Promotionserstellung. Frau Heide Kreuzburg danke ich für die Organisation des Promotionsprozesses.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Michael Hoffmeister und Herrn Matthias Zapp für die hilfreichen Diskussionen und Anregungen während der Erstellung dieser Arbeit. Neben dem Erstellen dieses Beitrages war meine Arbeit durch interessante und fordernde Projekte geprägt, die zusammen mit verschiedensten motivierten Kollegen der Abteilung durchgeführt wurden. Mein besonderer Dank geht an meine beiden ‚Ziehväter‘ am IPA: Herrn Matthias Meier und Herrn Michael Hoffmeister, die mich auf eine sehr nette Art und Weise stets motiviert und angeleitet haben und von denen ich viel lernen konnte. Herrn Joachim Seidelmann danke ich für die ständige Unterstützung und das bereitwillige Entgegenkommen in den verschiedensten Belangen des Arbeitsalltages.

Insbesondere möchte ich mich bei Tanja Meyer bedanken, die mir neben dem Beseitigen unzähliger Rechtschreib- und Kommafehler sehr viel Verständnis entgegengebracht und enormen Rückhalt gegeben hat. Aus tiefstem Herzen widme ich diese Arbeit meiner ganzen Familie, meinen Eltern, meinen beiden Schwestern und ihren Familien.

Stuttgart, im Juni 2012

Konstantin Konrad

Kurzfassung

Der erfolgreiche Produktionsanlauf neuer Montagesysteme ist aufgrund der volatilen Marktanforderungen essentiell für eine rentable Fertigung. Dabei stellt der Anlauf für die Unternehmen, u.a. wegen hochkomplexer Produkte, technologisch herausfordernder Prozesse, einer variantenreichen Produktion und begrenzten Ressourcen, nach wie vor eine große Herausforderung dar. Auftretende Problematiken sind im Vorfeld meist nicht bekannt und müssen direkt vor Ort von den verantwortlichen Mitarbeitern gelöst werden. Dabei basieren nahezu sämtliche Lösungsansätze ausschließlich auf den Erfahrungen der eingesetzten Mitarbeiter.

Das Verfahren zum semantisch unterstützten Anlagenanlauf von Montagesystemen ermöglicht es das spezifische Wissen der Mitarbeiter über Systemzusammenhänge und auftretende Probleme und Lösungswege zu formalisieren und maschinenlesbar zu speichern. Überdies werden verfügbare heterogene Datenquellen wie Sensorwerte, Alarme oder Mitarbeitereingaben über die Mensch-Maschinen-Schnittstelle erfasst und gespeichert. Diese Informationsmenge wird nun gegen ein strukturiertes Modell der abgebildeten Montagedomäne referenziert und folglich integriert. Aus der so strukturierten und abgebildeten Informationsmenge können nun mit problemspezifischen Anfragen für die Produktionsmitarbeiter hilfreiche Datensätze extrahiert werden. Das entwickelte Verfahren beinhaltet eine iterative Vorgehensweise zur unternehmens- und problemspezifischen Erstellung, Nutzung und Wiederverwendung des Modells.

Im Rahmen eines Europäischen Forschungsprojektes wurde das Verfahren an zwei Beispielen der industriellen Praxis eingesetzt und erfolgreich erprobt. Formalisierte Anwendungsfälle beider Anlagenhersteller wurden spezifiziert, implementiert, in die IT-Umgebung der Unternehmen integriert und erfolgreich validiert.

Short Summary

The successful production ramp-up of new assembly systems is due to the volatile market requirements essential for a profitable manufacturing company. Parts of the entrepreneurial challenge are, amongst others, highly complex products, technologically challenging processes, a versatile production and limited resources. It is a common day-to-day phenomenon that previously unknown problems suddenly occur while ramping up new assembly systems, forcing responsible employees to deal with major challenges. Critical success factor for a prosperous ramp-up are the company employees involved and their ability to utilize experience gained through previous projects.

The method for the semantically supported ramp-up of assembly system enables the formalization of specific employees' knowledge concerning system relations, occurring ramp-up problems and approaches for solving them by using a machine-readable storage of this information. Moreover available data from heterogeneous sources like sensor values, alarms or operator input over the Human-Machine-Interface is recorded. All gathered information is referenced to a structural, graph-based model of the assembly domain and therefore integrated. Utilizing this modeled and structured amount of information, problem-specific queries enable the extraction of helpful information for the production employees. The developed method offers an iterative code of practice for the company- and problem-specific generation, utilization and enhancement of the models.

In the course of a European research project the developed method was implemented and successfully validated at two industrial companies. Formalized use cases of both machine manufacturers were specified, implemented, integrated in the IT-infrastructure of the companies and validated successfully.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Abkürzungen und Formelzeichen | 5 |
| 1. Einleitung | 7 |
| 1.1 Der Anlauf im Fokus..... | 8 |
| 1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit..... | 9 |
| 2. Ausgangssituation..... | 11 |
| 2.1 Begriffe und Definitionen | 11 |
| 2.1.1 Montage..... | 11 |
| 2.1.2 Anlage..... | 12 |
| 2.1.3 Wissen | 12 |
| 2.1.4 Ontologie | 13 |
| 2.2 Der Anlauf im Fabriklebenszyklus | 16 |
| 2.2.1 Produktionsanlauf..... | 18 |
| 2.2.2 Anlagenanlauf..... | 21 |
| 2.3 Ziele des Anlaufs..... | 23 |
| 2.4 Industriebedarf | 25 |
| 2.5 Fazit und Handlungsbedarf | 26 |
| 3. Analyse der Randbedingungen und Ableitung der Anforderungen..... | 27 |
| 3.1 Konfigurierbare modulare Montageanlagen | 27 |
| 3.1.1 Verkettung mehrerer Anlagen zu einem Montagesystem | 29 |
| 3.1.2 Spezifikation der Prozessstruktur..... | 30 |
| 3.1.3 Produktaufbau..... | 31 |
| 3.1.4 Abgeleitete Anforderungen und Abgrenzung des Systems..... | 32 |
| 3.2 Rahmenbedingungen des Anlagenanlaufs | 33 |
| 3.2.1 Montagephase..... | 33 |
| 3.2.2 Interne Inbetriebnahme..... | 33 |
| 3.2.3 Prozessqualifizierung | 34 |
| 3.2.4 Abnahme und externer Anlauf | 34 |
| 3.2.5 Abgeleitete Anforderungen für den Lösungsansatz | 35 |
| 3.3 Relevanz von Wissen in der Produktion | 36 |
| 3.3.1 Lerneffekte bei der Fertigung von Montageanlagen | 37 |
| 3.3.2 Wissen erfahrener Mitarbeiter | 39 |
| 3.3.3 Anforderungen an die Erfassung des Mitarbeiterwissens | 40 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.4 | Industrielle Erfolgsfaktoren großer Industrieunternehmen | 41 |
| 3.5 | Zusammenfassung der Anforderungen | 42 |
| 4. | Stand der Technik zur Beherrschung des Anlagenanlaufs | 44 |
| 4.1 | Methoden der Digitalen Fabrik zur Absicherung des Anlaufs..... | 44 |
| 4.1.1 | Absicherung durch virtuelle Inbetriebnahme | 45 |
| 4.1.2 | Absicherung durch Simulation des Materialflusses | 47 |
| 4.1.3 | Fazit Digitale Fabrik..... | 47 |
| 4.2 | Formalisiertes und automatisiertes Wissensmanagement | 48 |
| 4.2.1 | Überblick über semantische Technologien | 48 |
| 4.2.2 | Semantik in der Produktion | 53 |
| 4.2.3 | Fazit formalisiertes Wissensmanagement | 56 |
| 4.3 | Spezifische Methoden und Instrumente zur Beherrschung des Anlagenanlaufs..... | 56 |
| 4.3.1 | Standardisierung von Anlagen zur Risikominimierung | 57 |
| 4.3.2 | Einheitliche Bewertungs- und Vorgehensmodelle | 57 |
| 4.3.3 | Wissensbasierte Ansätze | 59 |
| 4.4 | Fazit Stand der Wissenschaft und Technik | 59 |
| 5. | Konzeption des Lösungsansatzes | 61 |
| 5.1 | Struktur des entwickelten Lösungsansatzes | 61 |
| 5.1.1 | Graphenbasierte Entwicklung des Strukturmodells | 64 |
| 5.1.2 | Konzeption des Ereignismodells | 66 |
| 5.1.3 | Fokussierung des Verhaltensmodells | 70 |
| 5.1.4 | Semantisches Integrationskonzept | 71 |
| 5.2 | Zusammenfassende Darstellung des Lösungsansatzes | 72 |
| 6. | Erstellung der einzelnen Teilmodelle | 74 |
| 6.1 | Modellierung der strukturellen Informationen..... | 74 |
| 6.1.1 | Hierarchisch strukturiertes Domänenmodell..... | 75 |
| 6.1.2 | Verteilt modellierte Konzepte | 77 |
| 6.2 | Abbilden des Expertenwissens..... | 78 |
| 6.2.1 | Manuell definierte Zusammenhänge | 78 |
| 6.2.2 | Automatisierung durch hinterlegtes Regelwerk | 82 |
| 6.3 | Modellierung der dynamischen Informationen | 89 |
| 6.4 | Integration der verschiedenen Modellteile | 90 |
| 6.5 | Verwertung der Wissensbasis | 91 |
| 6.5.1 | Typen von Systemanfragen | 92 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 6.5.2 | Modularität der Wissensverwertung..... | 93 |
| 7. | Modellontologie und Realisierung | 95 |
| 7.1 | Definition der Ontologie für den Anlagenanlauf | 95 |
| 7.1.1 | Struktur der semantisch annotierten Mindmap..... | 95 |
| 7.1.2 | Ontologie für das Strukturmodell..... | 100 |
| 7.1.3 | Ontologie für das Verhaltensmodell..... | 108 |
| 7.1.4 | Ontologie für das Ereignismodell..... | 111 |
| 7.1.5 | Integrativer Ontologieansatz | 114 |
| 7.1.6 | Hinterlegtes Regelwerk | 115 |
| 7.1.7 | Anfragen an die semantische Datenbank | 118 |
| 7.1.8 | Formale Bildungslogik erstellter Regeln und Anfragen..... | 119 |
| 7.1.9 | Parametrisierte Rollen in der Ontologie..... | 125 |
| 7.2 | Realisierung und Nutzung des Modells | 127 |
| 7.2.1 | Instanziierung des Modells und Speicherung im TripleStore ... | 128 |
| 7.2.2 | Aufzeichnen empfangener Daten | 128 |
| 7.2.3 | Aufnehmen auftretender Probleme..... | 129 |
| 7.2.4 | Hinterlegtes Regelwerk | 129 |
| 7.2.5 | Anfragen der Wissensbasis..... | 129 |
| 8. | Entwicklung des Verfahrens zum semantisch unterstützten Anlagenanlauf..... | 130 |
| 8.1 | Entwicklung des Verfahrens | 130 |
| 8.2 | Strategische Betrachtungen und Rahmenbedingungen | 131 |
| 8.3 | Zieldefinition und Anforderungsprofil..... | 134 |
| 8.4 | Systemanalyse und Erstellung der Teilmodelle | 135 |
| 8.4.1 | Strukturelle Informationen | 135 |
| 8.4.2 | Verhaltensmodell..... | 137 |
| 8.4.3 | Ereignismodell..... | 139 |
| 8.4.4 | Wissensverwertung..... | 140 |
| 8.5 | Modellüberprüfung..... | 141 |
| 8.5.1 | Validierung | 141 |
| 8.5.2 | Verifikation..... | 142 |
| 8.6 | Integration und Nutzung..... | 142 |
| 8.7 | Nachbereitung | 143 |
| 9. | Erprobung und Bewertung in der Praxis..... | 146 |
| 9.1 | Systembewertung am Fallbeispiel 1..... | 147 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 9.1.1 | Zieldefinition | 148 |
| 9.1.2 | Systemanalyse und Erstellung der Teilmodelle | 149 |
| 9.1.3 | Modellüberprüfung..... | 151 |
| 9.1.4 | Integration und Nutzung..... | 151 |
| 9.2 | Systembewertung am Fallbeispiel 2..... | 153 |
| 9.2.1 | Zieldefinition | 153 |
| 9.2.2 | Systemanalyse und Erstellung der Teilmodelle | 153 |
| 9.2.3 | Modellüberprüfung..... | 155 |
| 9.2.4 | Integration und Nutzung..... | 155 |
| 9.3 | Bewertung der Ergebnisse..... | 156 |
| 10. | Zusammenfassung und Ausblick..... | 158 |
| 11. | Summary & Outlook..... | 162 |
| | Literaturverzeichnis..... | 168 |

Abkürzungen und Formelzeichen

3D - Dreidimensional

ALC - Attribute Language with Complement

A-Box - Assertional Box

BRIC - Brasilien, Russland, Indien, China

CAD - Computer Aided Design

DB - Datenbank

DIN - Deutsches Institut für Normung e. V.

DL - Description Logic

EU - Europäische Union

F-Logic - Frame Logic

GUI - Graphical User Interface

HMI - Human-Machine-Interface

IT - Informationstechnik

i, j, k, l, m, n - Indizes

JDBC - Java Database Connectivity

OECD - Organization for Economic Co-operation and Development

OEM - Original Equipment Manufacturer

OWL - Web Ontology Language

R-Box - Role Box

R_{Bezeichnung}(A,B) - Rolle vom Typ *Bezeichnung* von A nach B.

RDF - Ressource Description Language

SPARQL - SPARQL Protocol And RDF Query Language.

SPS - Speicherprogrammierbare Steuerung

T-Box - Terminological Box

UID - Unique Identifier

UML - Unified Modeling Language

VDI - Verein Deutscher Ingenieure

W3C - World Wide Web Consortium

WT - Werkstückträger

? - Kennzeichnet einen Ausdruck innerhalb der Formel als optional

1. Einleitung

Die europäische Wirtschaft ist zu einem Großteil von der Wertschöpfung in der Produktion abhängig. So gehört der Maschinenbau mit derzeit rund 169.000 Unternehmen und 3,3 Millionen Beschäftigten zu den größten Wirtschaftszweigen der EU. Europa ist mit 36% des Weltmarktes der größte Maschinenbauer und –exporteur weltweit [EC 2011]. Allein in Deutschland sind in dieser Branche ca. 975.000 Menschen beschäftigt wobei die Betriebe typischerweise im Mittelstand angesiedelt sind [Pfeiffer 2011, Vieweg u.a. 2001]. Dabei erwirtschaften in der BRD der gesamte Sektor Produktion und zugehörige Bereiche mit insgesamt ca. 8,2 Millionen Beschäftigten allein über 50% des deutschen Bruttoinlandsproduktes [Bullinger u.a. 2006]. [Westkämper 2010] zufolge ist die Produktion der bedeutendste Sektor der deutschen Volkswirtschaft.

Aufgrund der rasanten Entwicklung der sogenannten BRIC-Staaten (Brasilien, Russland, Indien, China) ist diese Vormachtstellung, und damit auch der Wohlstand Europas und Deutschlands in Gefahr [Dolgikh u.a. 2009]. So warnt der OECD-Generalsekretär Ángel Gurría vor einem schwindenden Vorsprung Deutschlands im Maschinen- und Automobilbau [Exner 2010]. Bereits 2007 wurden in der Volksrepublik China 30.000 mehr Patente beantragt als in der BRD [IW 2011]. Zukünftig wird der chinesische Maschinenbau verstärkt exportieren und damit die Wettbewerbssituation weiter verschärfen [Itasse 2011]. Die im Vergleich relativ geringen Lohn- und Produktionskosten in sogenannten Niedriglohnländern haben zudem eine Verlagerung der wertschöpfenden Tätigkeiten produzierender Unternehmen in diese Länder bewirkt [Abele u.a. 2007].

Zur Sicherung deutscher Produktionsstandorte muss aktiv an der Weiterentwicklung der Produkte und Produktionskonzepte gearbeitet werden [Aghassi u.a. 2011]. Um den immer noch existierenden Vorsprung der deutschen Produktion zu erhalten beziehungsweise weiter auszubauen, werden immer vielfältigere Produkte in zahlreichen Varianten in kürzeren Entwicklungszeiten für den Markt bereitgestellt, die bereits nach einer kurzen Lebensdauer durch neue Produkte abgelöst werden [Arnoscht u.a. 2011, Lifang u.a. 2009, Li u.a. 2010, Stich 2011 Calantone u.a. 2000]. Die kostenbewusste Realisierung in der Produktion resultiert dabei je nach Markt und Unternehmensgröße in stark variie-

renden Produktionskonzepten [Hoffmeister u.a. 2011] wie Lean Manufacturing [Herron u.a. 2007], Agile Manufacturing [Zhengwen 2007] oder Mass Customization [Ismail u.a. 2007]. Durch die Vielzahl der Produkte und die kurze Lebensdauer kommt es bei allen Konzepten zu einer vermehrten Anzahl von Produktionsanläufen, deren Bedeutung in den letzten Jahren immer stärker in den Fokus der Forschung gerückt ist, und deren Beherrschung beteiligte Mitarbeiter auch in der heutigen Zeit vor eine Vielzahl von Problemen stellt.

1.1 Der Anlauf im Fokus

Die Produkteinführungszeit hängt wesentlich von einem erfolgreichen Produktionsanlauf (eng. ramp-up) ab [Hertrampf u.a. 2008]. Damit ist der Zeitraum zwischen abgeschlossener Produktentwicklung und dem Erreichen der vollen Produktionskapazität definiert. Da zu Beginn des Produktlebenszyklus die höchsten Preise und folglich die bedeutendsten Gewinnspannen erzielt werden, ist der Anlauf ausschlaggebend für eine rentable Produktion [Wiesinger u.a. 2002]. Die hohe Komplexität moderner Produktionssysteme, der Zeitdruck bei der Fertigstellung der Anlagen und häufige und späte Änderungen an den Prozessen oder Produkten sind nur einige der Gründe warum heutzutage immer noch eine Vielzahl ungelöster Problemstellungen in der Anlaufphase existieren.

„Die Phase des Produktionsanlaufes ist heute immer noch mit großen planerischen Unsicherheiten verbunden, da die Leistungsfähigkeit und Qualität der durchgängigen Produktionsprozesse erst am realen Fertigungssystem evaluiert werden können.“ [Denkena u.a. 2007].

Auftretende Problemstellungen sind meistens nicht im Voraus bekannt und stellen die Mitarbeiter vor unbekannt Situationen. Die Handlungen zur Problemlösung beruhen aufgrund der Komplexität und Unvorhersehbarkeit nahezu ausschließlich auf dem Erfahrungswissen der eingesetzten Mitarbeiter [Fleischer u.a. 2004]. Da Europa bei den Fähigkeiten und Qualifikationen der Mitarbeiter immer noch einen Vorsprung gegenüber asiatischen Wettbewerbern besitzt [Westkämper u.a. 2009] ist es das vorrangige

Ziel dieser Arbeit, die Mitarbeiter während des Produktionsanlaufs mit hilfreichen Informationen bestmöglich zu unterstützen, ihr intrinsisches Wissen teilweise zu erschließen und nachhaltig nutzbar zu machen.

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit entwickelt ein Verfahren zum semantisch unterstützten Anlagenanlauf, welches die Erfassung und automatische Verarbeitung des intrinsischen Wissens der Mitarbeiter während des Anlagenanlaufs unterstützt. Im Gegensatz zu reinen Wissensmanagementsystemen sollen dabei auch zusätzlich erfasste Maschineninformationen wie Sensordaten, Alarme oder Änderungen an den Einstellparametern berücksichtigt werden. Ziel ist es, den Mitarbeitern im Unternehmen aus dieser Informationsmenge hilfreiche Datensätze zur Problemlösung zielgerichtet zur Verfügung zu stellen.

Für diese Arbeit wird zunächst die Ausgangssituation analysiert und die Problemstellung ausgehend von dem Fabriklebenszyklus auf den Anlagenanlauf eingegrenzt. Anschließend werden für diese Phase die Randbedingungen analysiert und Anforderungen an das Modell und das Verfahren abgeleitet. Ausgehend von den ermittelten Anforderungen wird überprüft, ob aktuelle Ansätze zum wissensunterstützten Anlagenanlauf die geforderten Funktionen erfüllen. Anschließend wird der neu entwickelte Lösungsansatz mit den verschiedenen Teilbereichen konzeptioniert. Darauf aufbauend werden die einzelnen Entwicklungsschwerpunkte des Modells detailliert erläutert und die Realisierung als Ontologie vorgestellt. Das Verfahren zur Anwendung des Modells wird anschließend in den Fabriklebenszyklus eingeordnet und die Vorgehensweise zur Anwendung spezifiziert. Zur Validierung werden relevante Anwendungsfälle in der industriellen Praxis betrachtet.

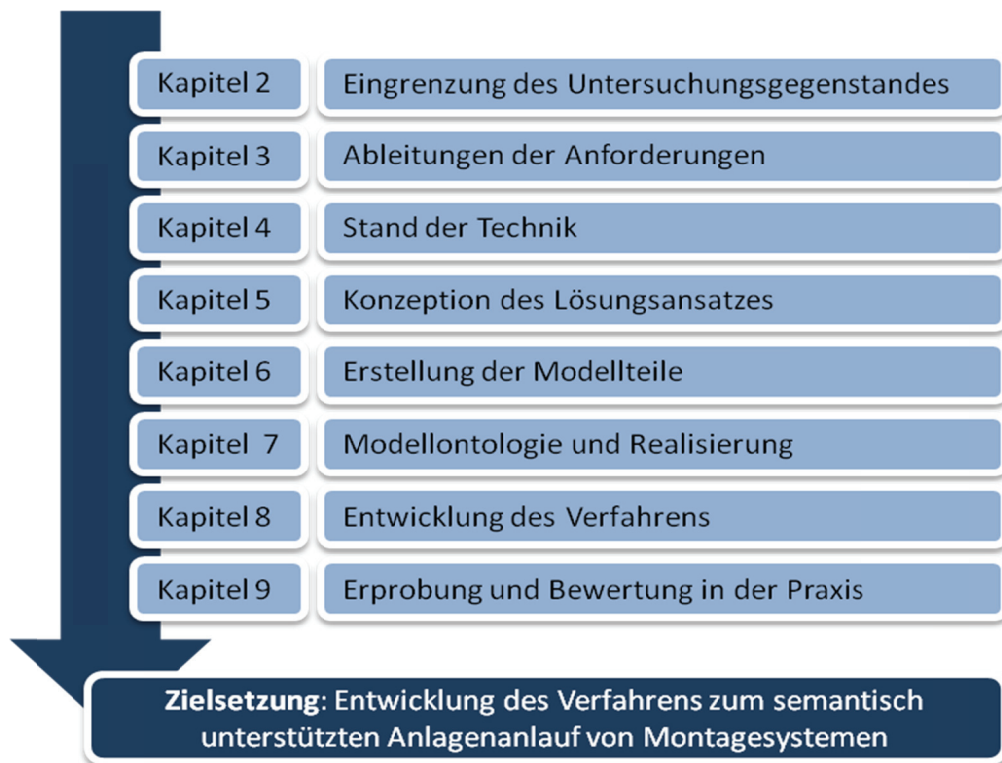


Abbildung 1: Struktur der Arbeit und notwendige Schritte zur Entwicklung und Erprobung des Verfahrens

2. Ausgangssituation

Nach der Definition der wesentlichsten Begriffe wird der Betrachtungsgegenstand in den Fabriklebenszyklus eingeordnet und sachdienlich eingegrenzt. Zudem wird der bestehende Industriebedarf nach einer ganzheitlichen Lösung aufgezeigt.

2.1 Begriffe und Definitionen

2.1.1 Montage

Die Montage ist nach [Seliger 2011] als die Gesamtheit aller Vorgänge definiert, die dem Zusammenbau von geometrisch bestimmten Körpern dienen. Eine Hauptfunktion der Montage ist das Schaffen einer Verbindung zwischen mehreren Teilen. Als letzte Stufe des Herstellungsprozesses ist sie eine der wichtigsten Optimierungspunkte des Fabrikbetriebs. Dabei ist die Montage als Schnittstelle zwischen Fertigung, der Entwicklung und Konstruktion und den Marktanforderungen angesiedelt (siehe Abbildung 2). Dies bedeutet, dass sich zeitliche Verzögerungen oder Qualitätsprobleme fast unmittelbar auf den Kunden auswirken.

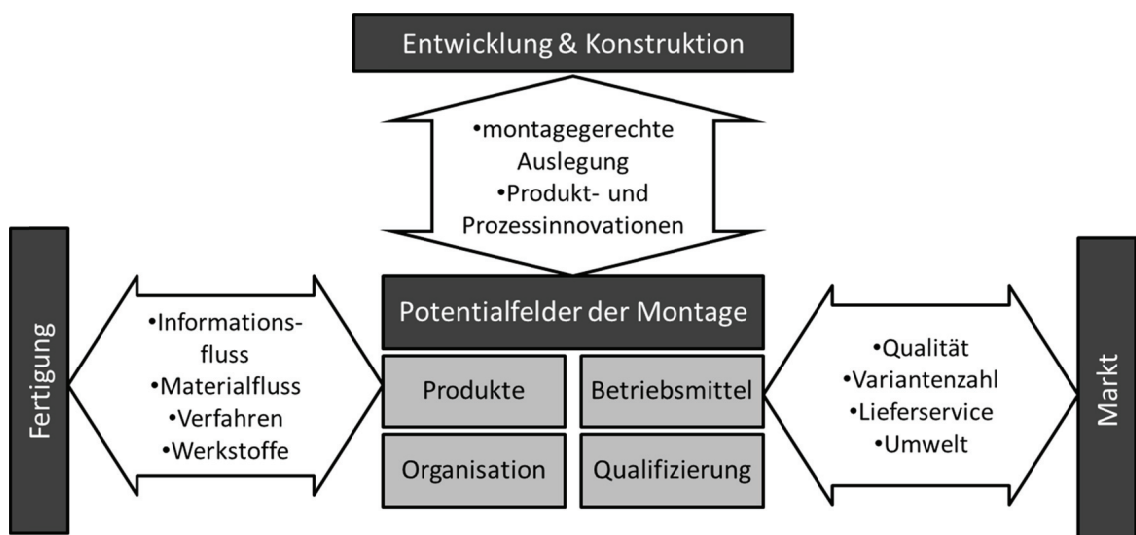


Abbildung 2: Schnittstellenfunktion der Montage [Seliger 2011]

2.1.2 Anlage

[Meier 2011] definiert eine Anlage als eigenständiges, vorwiegend ortsfestes Betriebsmittel, welches aus einer Menge an Teilsystemen (Komponenten) besteht. Dabei erfüllt die Gesamtheit aller Komponenten durch ihr gemeinsames Zusammenspiel bestimmte Funktionen die der Außenwelt über Schnittstellen zur Verfügung gestellt werden. Dies steht weitestgehend im Einklang zu der Maschinenrichtlinie des Europäischen Parlaments [Klindt 2006], die eine Maschine als anwendungsspezifische angetriebene Gesamtheit teilweise beweglicher Elemente definiert.

Ausgehend von den vorgestellten Definitionen ist für die Arbeit eine *Montageanlage* folgendermaßen definiert.

Eine Montageanlage ist ein eigenständiges, vorwiegend ortsfestes System welches modular aufgebaut ist und aus einer Menge an Teilsystemen besteht. Die Gesamtheit aller Teilsysteme erfüllt dabei vollautomatisch Funktionen die zum Zusammenbau geometrisch bestimmter Körper dienen.¹

Da Montageanlagen meist als letzter Fertigungsschritt zur Herstellung komplexer Produkte eingesetzt werden, wirken sich Herstellerverzögerungen bei der Lieferung von Anlagen oder Qualitätsprobleme wie bereits für die Montage beschrieben unmittelbar auf den Kunden aus. Dementsprechend hoch ist der Druck für Anlagenhersteller, diese Maschinen möglichst schnell in der geforderten Qualität bereit zu stellen.

2.1.3 Wissen

Derzeit existieren eine Vielzahl uneinheitlicher Definitionen von Wissen und Wissensmanagement [Cortada u.a. 2000]. Oftmals wird zur Eingrenzung und Definition ein dreiteiliges Pyramidensystem von Daten, Informationen und Wissen verwendet [z.B. Voigt 2010, Helm u.a. 2007, Girmscheid 2010]. Dabei sind *Daten* ungeordnete Elemente von Zeichen und können alleinstehend aufgrund fehlender Zusammenhänge nicht interpretiert werden. *Informationen* sind syntaktisch angeordnete Daten die einem be-

¹ Im Weiteren wird der Begriff *Maschine* auch synonym für eine Montageanlage verwendet.

stimmten Zweck dienen und eine gewisse Aussagekraft besitzen. *Wissen* wird als in Kontext gesetzte Informationen verwendet, welches es erlaubt, Schlussfolgerungen beispielsweise zur Problemlösung zu ziehen. So kann dieselbe Information bei der gleichen Person je nach Zusammenhang eine unterschiedliche Handlung bedingen.

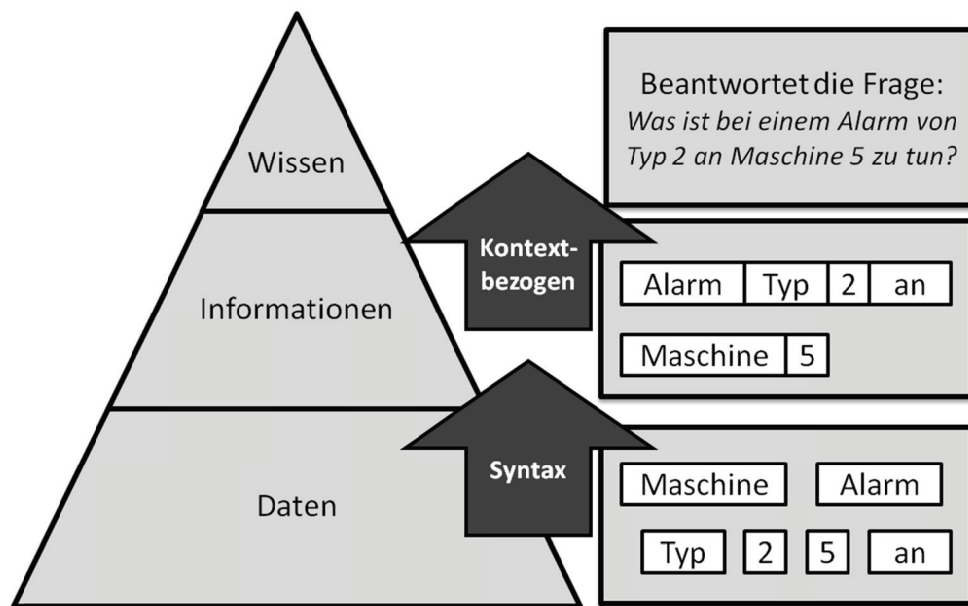


Abbildung 3: Dreistufige Wissenspyramide in Anlehnung an [Girmscheid 2010]

Dabei kann zwischen *explizitem* und *implizitem Wissen* unterschieden werden [Nonaka u.a. 2000, Cortada u.a. 2000]. *Explizites Wissen* ist systematisch dokumentierbares Wissen über das Menschen bewusst verfügen. *Implizites Wissen* dagegen ist individuell verwendbares Wissen, welches schwer formalisiert ausgedrückt werden kann. Es ist oftmals intuitiv abrufbar und resultiert beispielsweise in einer Handlungsanleitung. Ein einträgliches Beispiel für implizites Wissen ist das Fahren eines Rades, welches schwer formal beschreibbar ist. Wissensmanagement verfolgt unter anderem das Ziel, implizites Wissen zu explizitem zu transferieren.

2.1.4 Ontologie

Ontologien sind ein Mittel, um Wissen strukturiert mittels einer Kommunikationsplattform bereitzustellen, welche besonders zur verteilten, gemeinsamen und asynchronen Nutzung geeignet sind [Staab 2002]. Bei einer Ontologie handelt es sich nach der

bekanntesten Definition um eine „explicit specification of a conceptualization“ [Gruber 1993]. Darunter versteht man eine formale Spezifikation, welche maschinell interpretierbar ist und eine gemeinsam genutzte Beschreibung der Begrifflichkeiten des interessierenden Bereichs zur Verfügung stellt.

Eine Ontologie beschreibt folglich die Objekte, Eigenschaften und Beziehungen eines abgegrenzten Wissensbereichs mittels einer vereinheitlichten Terminologie definierter Begriffe. Das gemeinsame Wissen ist meist in der Form einer Taxonomie definiert. Diese monohierarchische Struktur enthält unter anderem Klassen, Relationen und Axiome [Hesse 2002]. Aus diesen Gründen kann mit Ontologien Wissen einer Domäne dargestellt und programmunabhängig verarbeitet werden. Sie beschreiben Konzepte und Beziehungen in einer maschinell interpretierbaren Art und Weise, um notwendige Vernetzung von Begriffen automatisiert vorzunehmen und eignen sich folglich für die Integration heterogener Daten [Blumauer u.a. 2006].

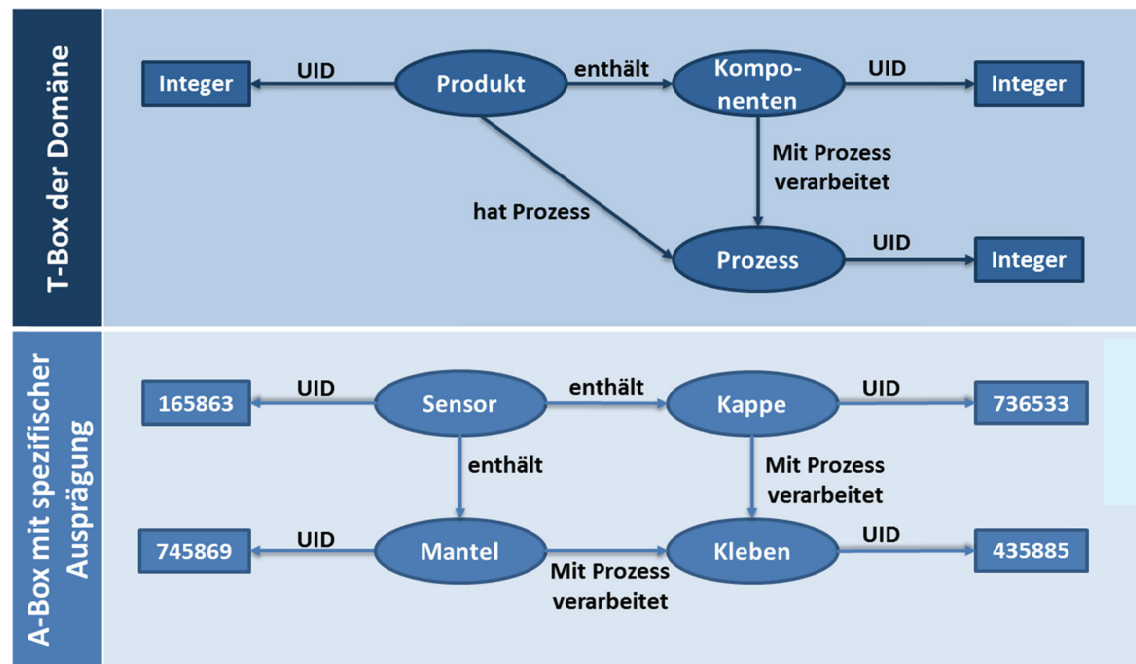


Abbildung 4: Beispielhafte, in A-Box und T-Box unterteilte Ontologie eines Montageproduktes und zugehörigem Prozess (in Anlehnung an [Lohse u.a. 2005]). Die Knoten und Kanten des gerichteten Graphen haben dabei eindeutige Bezeichnungen. Datenwerte sind dabei durch getypte *Literale* (rechteckiges Format), Konzepte und Instanzen durch Ovale dargestellt. Typisierte gerichtete Relationen werden durch beschriftete Verbindungspfeile abgebildet.

Ontologien sind in ein generisches Metamodell der Wissensdomäne (auch *Schemawissen* oder *terminological box*, kurz *T-Box*) und die spezifische Ausprägung der Instanzen (*assertional box*, kurz *A-Box*) eingeteilt. Die T-Box beschreibt also wie alle verfügbaren Systemkomponenten grundsätzlich zusammenhängen können und welche Eigenschaften sie besitzen, die A-Box hingegen stellt die jeweilige Ausprägung einzelner Objekte dar (auch Fakten) [Hitzler u.a. 2007].² Verbindungen zwischen Instanzen, Konzepten und Literalen werden im Weiteren allgemein als *Rollen* oder

² In komplexeren Ontologiesprachen und zugehörigen Beschreibungslogiken (siehe Kapitel 4.2.1.3) ist oftmals eine weitere Unterteilung von Rollen in eine eigene R-Box möglich. Dort werden (ähnlich wie in der T-Box für Konzepte) die allgemeingültigen Axiome und Beziehungen für die möglichen Rollen spezifiziert. Für den vorliegenden Beitrag ist diese Einteilung jedoch sekundär und wird im Weiteren nicht explizit betrachtet.

Relationen bezeichnet. Verbindungen zwischen Konzepten oder Instanzen zu Literalen (im Weiteren auch *Attribute* genannt) werden dabei als *Attributrelationen* definiert.

2.2 Der Anlauf im Fabriklebenszyklus

In den letzten Jahren wurde verstärkt die Planung von Produkten, Fertigungsprozessen und Fabriken in der Gesamtheit betrachtet [Westkämper 2009, Constantinescu u.a. 2006]. Dabei liegt der Fokus hauptsächlich in der Harmonisierung und Abstimmung der diversen Phasen der jeweiligen Lebenszyklen. In Abbildung 5 sind die Lebenszyklen der Fabriken und Produkten gegeneinander aufgetragen.

Dabei ist die Produktionsphase als kritischer Referenzpunkt anzusehen, bei dem alle vorherigen Planungsschritte ihre Nachweise hinsichtlich einer erfolgreichen Umsetzung erbringen müssen. In dieser Phase wird festgestellt, ob es möglich ist, unter den gesteckten Qualitäts-, Termin- und Kostenzielen zu produzieren [Constantinescu u.a. 2006].

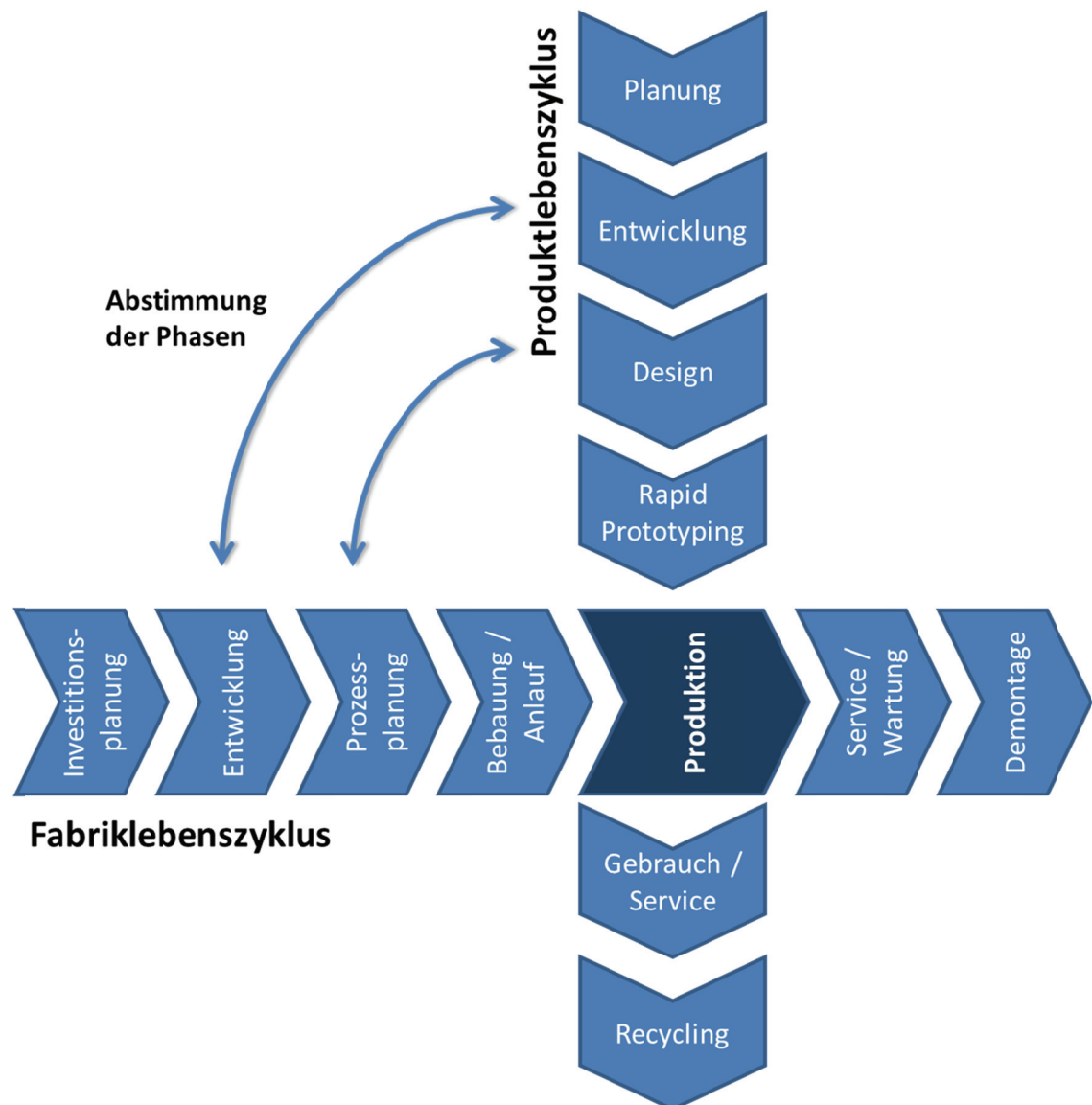


Abbildung 5: Produktion als Schnittstelle des Fabrik- und des Produktlebenszyklus [Constantinescu u.a. 2006]

Da die jeweiligen Lebenszyklen mehrmals durchlaufen werden (beispielsweise bei der Einführung neuer Produkte oder bei dem Ersatz bestehender Prozesse durch neue Technologien) kommt dem Produktionsanlauf ein besonderes Augenmerk zu, da auftretende Probleme in dieser Phase zuerst sichtbar werden. Der ursprüngliche Anlauf der Fabrik ist hier vor der eigentlichen Produktionsphase angesiedelt. Allerdings lässt sich der Anlauf wie er im nachfolgenden Kapitel verstanden und definiert wird, nicht einer einzelnen Phase zuordnen. In Abbildung 5 werden beispielsweise reale Produkte erst-

mals in der Produktionsphase hergestellt und bedingen aus diesem Grunde einen Anlauf wie er im vorliegenden Beitrag verstanden wird.

2.2.1 Produktionsanlauf

Der Produktionsanlauf wird in Anlehnung an [Wiesinger 2002] als der Zeitraum zwischen abgeschlossener Produktentwicklung und der vollen Kapazitätserreichung des Systems definiert. Während dieser Zeit wird ein Produktionsprozess oder -system von einem kleineren Laborumfeld in die Serienfertigung mit entsprechenden Anforderungen bezüglich Qualität, Prozesssicherheit und Durchsatz skaliert [Terwiesch u.a. 2004]. Dadurch stellt er das Bindeglied zwischen der Prozess- und Produktentwicklung und einer zuverlässigen und stabilen Serienproduktion dar [Voigt 2008].

Die Notwendigkeit eines Anlaufs ergibt sich nach [Heins 2010] aus folgenden Gründen:

- Einführung eines neuen Produktes, Derivates oder Variante
- Aufbau eines neuen Produktionssystems
- Reorganisation eines bestehenden Produktionssystems
- Behebung von Störungen
- Kombination der oben genannten Gründe

Aufgrund der derzeitigen Marktanforderungen, die kurze Lebenszyklen und steigende Variantenvielfalt bedingen, wird bei allen Varianten eines Anlaufes eine stetige Verkürzung der gesamten Anlaufdauer gefordert. Die vorrangige Priorität des Produktionsanlaufs ist es, die geforderte Ausbringung in möglichst kurzer Zeit zufriedenstellend zu erreichen [Harjes u.a. 2004].

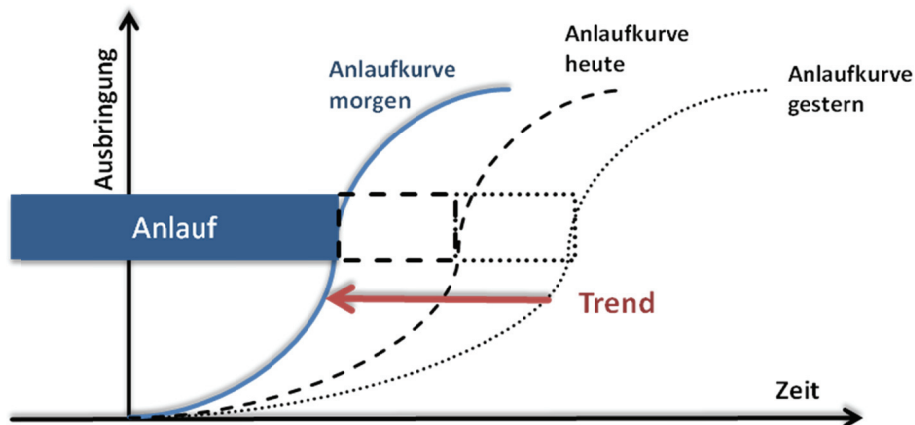


Abbildung 6: Tendenz zur steten Verkürzung der Anlaufphase in Anlehnung an [Harjes u.a. 2004]

Dabei lassen sich die notwendigen Umgestaltungen beispielsweise nach dem jeweiligen Neuerungsgrad des Produktes und des Produktionssystems klassifizieren, was exemplarisch am Beispiel des Automobilbaus demonstriert wird [Laick u.a. 2003]. Bei der Einführung neuer Produkte wird der Serienproduktion noch eine Pilotphase vorgeschaltet, in der die Produkte basierend auf den Phasen *Prototyp*, einer *Vorserie*, einer *Nullserie* und einer *Kleinserie* schrittweise und definiert in immer höheren Stückzahlen in die Produktion überführt werden. Die Nutzung neuartiger Produktionssysteme in der laufenden Fertigung bedingt die Vorschaltung einer Hochlaufphase in der bereits kundenfähige Produkte hergestellt werden und die Produktionsleistung systematisch bis zu einem zufriedenstellenden Niveau gesteigert wird. Geringfügig veränderte Produktionssysteme und Produkte bedingen nach dem untersuchten Ansatz keinen explizit definierten Übergang zwischen den einzelnen Phasen. Unerhebliche Änderungen werden als kontinuierlicher Verbesserungsprozess der laufenden Serienproduktion gesehen. Im Gegensatz zu Automobilherstellern liegt der Schwerpunkt im Anlagen- und Maschinenbau aufgrund der Kundenforderungen oftmals vorrangig in dem Bereich neuheitsbedingter Produktionsanläufe [Wiendahl u.a. 2002].

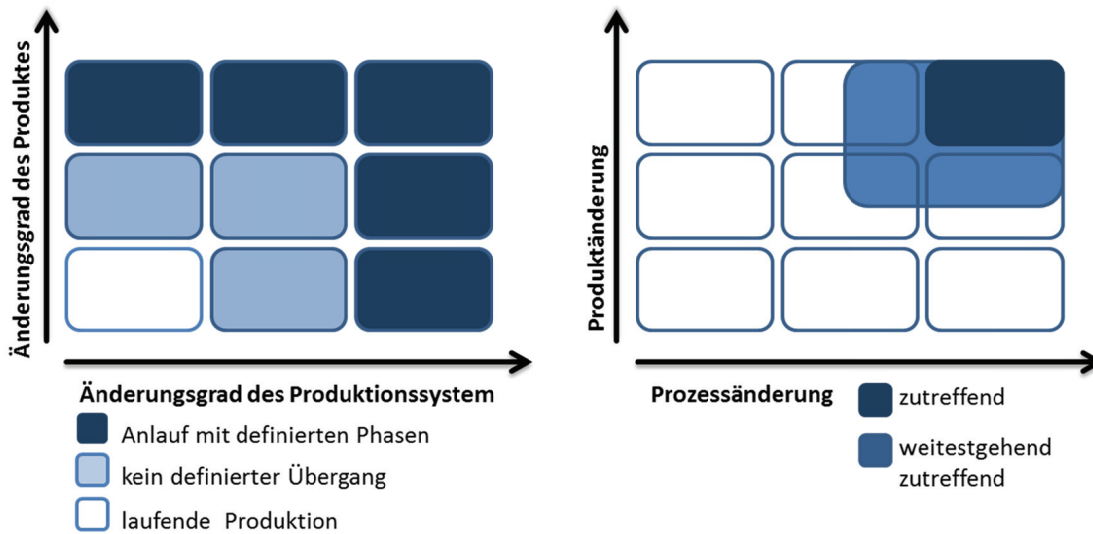


Abbildung 7: Klassifizierung der Anlaufart (links nach [Laick u.a. 2003]) und die branchentypische Ausprägung der Anlaufarten im Maschinen-und Anlagenbau (rechts nach [Wiendahl u.a. 2002]³). Dabei ist zu erkennen, dass im Anlagenbau sowohl produkt- als auch prozesseitig meist ein hoher Neuheitsgrad vorhanden ist.

Je nach Position in der Wertschöpfungskette oder Branche unterscheidet sich der Anlauf stark voneinander. So ist beispielsweise ein essentieller Unterschied vorhanden, ob man den Anlauf einer kompletten Produktionslinie bei einem Automobilhersteller, die Einführung neuer Produkte in der Halbleiterindustrie oder den Anlauf einzelner Produktionsanlagen betrachtet. Als Beispiel sei [Stirzel u.a. 2006] genannt, die den Produktionsanlauf bei Automobilherstellern und dessen Zulieferern vergleichen und die verschiedenen Phasen harmonisieren. Zur weiteren Eingrenzung des Betrachtungsgegenstandes wird im Folgenden der Anlagenanlauf neuer Montagesysteme näher untersucht.

³ [Wiendahl u.a. 2002] verstehen unter einer Prozessänderung eine Umgestaltung technischer oder organisatorischer Natur wie neue Technologien oder eine Neustrukturierung des Arbeitsplatzes.

2.2.2 Anlagenanlauf

Da gegenwärtig keine gültige VDI-Richtlinie oder DIN-Norm für den Anlauf von Anlagen oder Montagesystemen vorhanden ist, wird häufig die Phasenbeschreibung nach [Zeugtrager 1998] verwendet [z.B. Heins 2010, Winkler 2007, Konrad u.a. 2012].

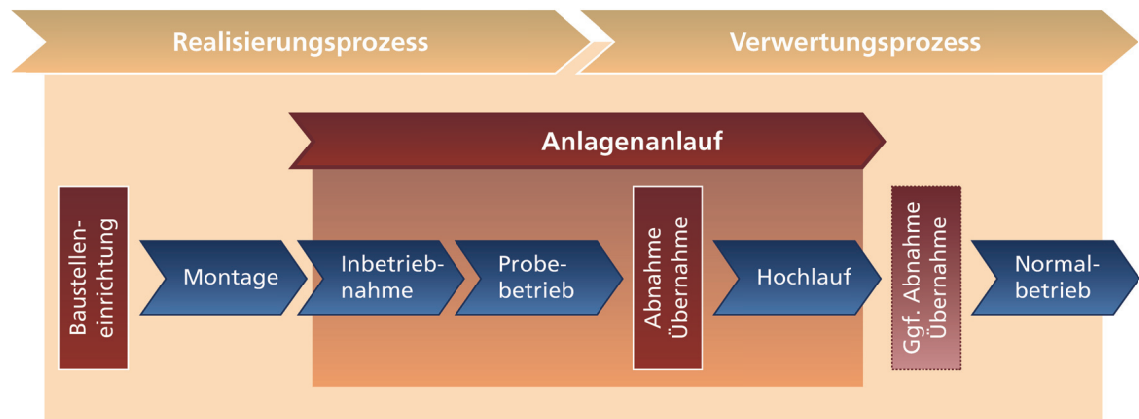


Abbildung 8: Phasenbeschreibung des Anlagenanlaufs nach [Zeugtrager 1998, Konrad u.a. 2012]

Der Anlagenanlauf umfasst dabei alle Aktivitäten nach der Montage der Anlagen bis zum Erreichen der geplanten Produktionsleistung unter den nominellen, personellen, technischen und organisatorischen Randbedingungen und ist dabei in die Phasen Inbetriebnahme, Probebetrieb und Hochlauf eingeteilt [Zeugtrager 1998].

Nach der Baustelleneinrichtung und der Montage der Anlage wird mit der *Inbetriebnahme* begonnen. Dabei handelt es sich um das „funktionsgerechte Einschalten der Anlage in Verbindung mit dem Prozess und Hochfahren auf das geforderte Niveau“ [Zeugtrager 1998]. Dabei werden die zuvor montierten Einzelkomponenten auf das funktionelle Zusammenwirken überprüft.

Im *Probebetrieb* wird die Leistungsfähigkeit der einzelnen Systemkomponenten und des Gesamtsystems verifiziert, welches anschließend in der *Abnahme* getestet und in Besitz des Kunden übergeht [Zeugtrager 1998]. In der *Abnahme* wird die Erfüllung der

Anforderung hinsichtlich vertraglich festgelegter Merkmale überprüft [Näser u.a. 2006]. Gegebenenfalls kann sie auch erst nach Abschluss der Hochlaufphase erfolgen.

In der *Hochlaufphase* die mit den ersten kundenfähigen Produkten beginnt und mehrere Monate dauern kann, wird das Produktionsverhalten der Anlage kontinuierlich optimiert und technische Unzulänglichkeiten und Frühausfälle behoben. Daran schließt sich der reguläre Betrieb (*Normalbetrieb*) der voll entwickelten und leistungsfähigen Anlage an.

Für Werkzeugmaschinenhersteller wurde von [Denkena u.a. 2007] ein spezifisches Anlaufmodell entwickelt, welches den Fokus auf die Prozessentwicklung, die Maschinen- und Anlagenkonfiguration sowie die Inbetriebnahme legt (siehe Abbildung 9). Dabei wird die Anlage zunächst beim Hersteller konstruiert, montiert, in Betrieb genommen und qualifiziert (Schritte 1-3). Nach erfolgreicher Kundenabnahme wird die Anlage demontiert und zum Kunden transportiert (Schritt 4) womit der *interne Anlauf* abgeschlossen ist. Beim Kunden wird die Anlage montiert und in die IT-Infrastruktur integriert. Nach erneuter Inbetriebnahme und Hochfahren auf die geforderten Stückzahlen wird die Leistungsfähigkeit unter definierten Rahmenbedingungen in einer erneuten Abnahme verifiziert. Anschließend geht das System in die Phase der Serienproduktion und damit üblicherweise in den Besitz des Kunden über. Die Schritte 5 bis 8 werden auch als *externer Anlauf* bezeichnet.

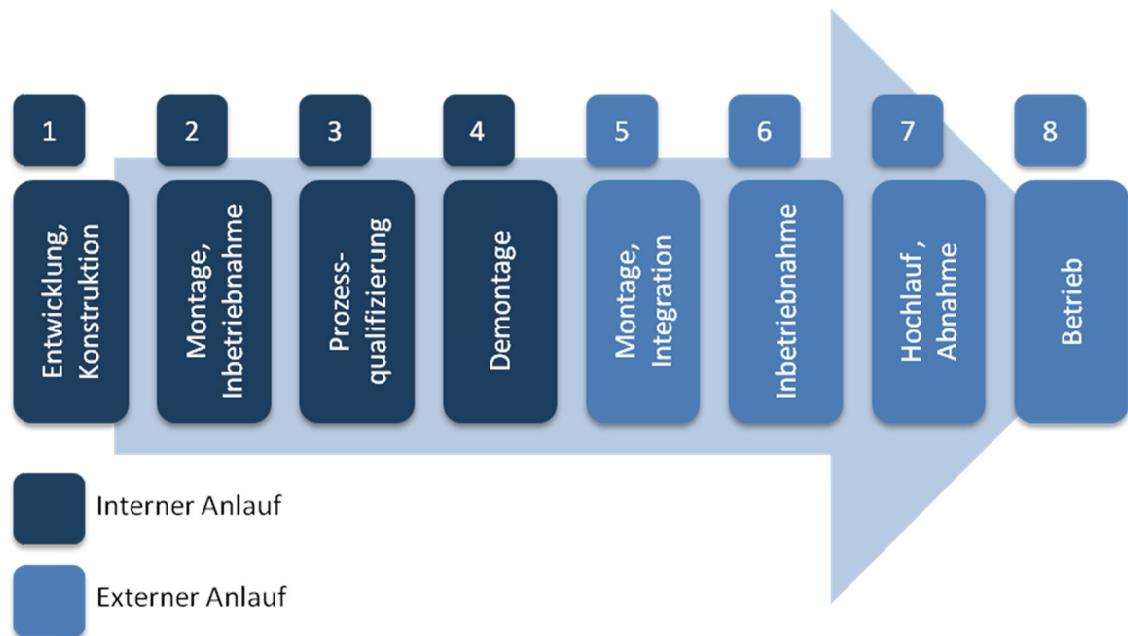


Abbildung 9: Produktionsanlauf aus Sicht eines Werkzeugmaschinenherstellers [Denkena u.a. 2007]

In der Realität überlagern sich je nach Projekterfordernissen und Rahmenbedingungen diverse Phasen bei beiden vorgestellten Modellen oftmals. Für den vorliegenden Beitrag wird im Weiteren das branchenspezifische Phasenmodell nach [Denkena u.a. 2007] verwendet. Ein Transfer des entwickelten Lösungskonzepts zu den Anlaufphasen nach [Zeugtrager 1998] ist jedoch ohne weitgehende Einschränkungen realisierbar.

2.3 Ziele des Anlaufs

Als wichtigste Zielgrößen des Produktionsanlaufs für Maschinenhersteller nennen [Denkena u.a. 2007]:

- die Qualität des Endproduktes,
- die Reduzierung der Anlaufkosten
- und Verringerung der Anlaufdauer.

Dabei umfasst der *Qualitätsbegriff* sowohl eine zufriedenstellende Qualität des herzustellenden Kundenproduktes, als auch des Produktionssystems im Sinne einer stabil funktionierenden Maschine. Die Erbringung einer zufriedenstellenden Qualität ist bei Produktionsanläufen nach [Schröder u.a. 2010] von hoher Bedeutung, da die ersten Exemplare einer neuartigen Produktgeneration oftmals maßgeblichen Einfluss auf das Image also den weiteren Absatz des Produktes besitzen. Zudem können Rückrufaktionen und eintretende Garantiefälle hohe Kosten verursachen.

Die *Anlaufkosten* bestehen aus Opportunitäts- und Qualitätskosten und ungeplante Ausgaben, welche beispielsweise durch unter Plan ausgelastete Anlagen oder zusätzlich benötigtes Personal entstehen.

Die *zeitliche Reduktion* des gesamten Anlaufs ist oft das primäre Ziel, da hierbei die höchsten Kosten entstehen (vergleiche dazu auch [Harjes u.a. 2004]).

[Wiendahl u.a. 2002] sehen den Anlauf projektbezogen und deklarieren Kosten und Zeit als kritische Zielgrößen. Da sowohl die zu erreichende Qualität als auch terminliche Fristen und Meilensteine des Projektes meist durch den Kunden vorgegeben werden, legen sie den Fokus auf den Kostenfaktor, welcher aufgrund der fehlenden Transparenz meist nur ungenau errechnet werden kann.

Von ca. 400 befragten mittelständischen Unternehmen gaben in einer Studie knapp 42% das Erreichen eines stabilen Prozessablaufs nach Projektabschluss als eigentliches Ziel des Anlaufs an. Als weitere Ziele werden die Einhaltung der festgelegten Meilensteine (zeitliche Optimierung), als auch die Kostenoptimierung des Anlaufs von jeweils knapp 30% der Befragten genannt [Sommer u.a. 2004].

Die Diskrepanz der unterschiedlichen Priorisierung der Zielgrößen lässt sich durch die unterschiedlichen Sichtweisen auf den Produktionsanlauf erklären. Wird von einer *projektbezogenen* Betrachtung eines **einzelnen Anlaufs** (in Anlehnung an [DIN 69900 2009, DIN 69901 2009]) ausgegangen, sind die Einhaltung der zeitlichen Meilensteine, das Erreichen der abgesprochenen Ausbringung von Gutteilen unter den festgelegten Rahmenbedingungen, wie auch die Minimierung der dabei notwendigerweise entstehen-

den Kosten als Zielgrößen deklariert. So ist beispielsweise eine Verkürzung der Anlaufdauer nur bedingt erstrebenswert, da hieraus keine unmittelbaren Vorteile für das Projekt entstehen. Bei einer *strategischen* Betrachtungsweise hingegen, wo nicht der einzelne Anlauf sondern die **Gesamtheit der Anläufe** eines Unternehmens im Vordergrund steht, sind die Verkürzung der Anlaufdauer, das schnelle Erreichen eines stabil fertigen Produktionssystems, wie auch die Minimierung aller Kostenarten als wichtigste Optimierungs- und Zielgrößen benannt.

2.4 Industriebedarf

Der Industriebedarf nach Forschungsaktivitäten in dem Bereich des Produktions- und Anlagenanlaufs ist unumstritten. Einer Studie über Potentiale im Produktionsanlauf entnehmen [Fleischer u.a. 2011], dass 82% der beteiligten Betriebe ihre angestrebten Qualitäts-, Zeit oder Kostenziele nicht erreichen. Nach [Denkena u.a. 2007] verfehlen in der Serienfertigung 33% aller Anläufe die wirtschaftlichen und 50% die technischen Zielsetzungen. Die Mehrheit der aufgenommenen Fehler lässt sich dabei der Phase *Inbetriebnahme* zuordnen (vgl. Abbildung 9), wobei die interne Inbetriebnahme allein einen Zeitanteil von ca. 15% der Gesamtdauer beansprucht.

[Wiesinger u.a. 2002] berichten von dem verzögerten Serienanlauf eines Automobilherstellers bei dem 50.000 Fahrzeuge nicht, beziehungsweise nur verspätet ausgeliefert werden konnten. Dadurch entgingen dem Unternehmen Gewinne in der Größenordnung von 15 Millionen Euro. [Schuh u.a. 2004] beschreiben eine potentielle Steigerung der Modellrendite durch einen gelungenen Anlauf im Automobilbau von 5 Prozentpunkten, bezogen auf die Gesamtlaufzeit der Produkte. Gegenwärtig werden zwischen 2% und 15% Modellrendite erzielt. In einem Benchmarking Projekt zum Anlaufmanagement bei Automobilzulieferern berichten in einer mehrstufigen Analyse 70% der befragten Unternehmen von der großen Relevanz des Anlaufmanagements [Schuh u.a. 2005].

[Berger u.a. 2006] sehen bedingt durch die hohen Investitionskosten von Montageanlagen, die zügige und störungsfreie Inbetriebnahme als Überlebensfrage für Unternehmen.

2.5 Fazit und Handlungsbedarf

Basierend auf vorigen Abschnitten lässt sich folgern, dass der Anlauf neuer Anlagen und Systeme eine essentielle Bedeutung für die Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen hat. Trotz der wirtschaftlichen und strategischen Tragweite kann der Produktionsanlauf offenbar immer noch nicht zufriedenstellend geplant, organisiert und kontrolliert werden. Anlaufverzögerungen aufgrund auftretender Problematiken können dabei einen erheblichen Einfluss auf die wirtschaftliche Lage der Unternehmen besitzen.

Aufgrund dieser ungelösten Herausforderungen wird im folgenden Kapitel der Anlagenanlauf neuer Montagesysteme hinsichtlich der wesentlichen Erfolgsfaktoren und Rahmenbedingungen analysiert und formale Anforderungen an einen ganzheitlichen Lösungsansatz abgeleitet.

3. Analyse der Randbedingungen und Ableitung der Anforderungen

Im Folgenden wird zunächst der Aufbau moderner Montageanlagen und verketteter Montagesysteme, welche die eigentlichen Produkte automatisiert zusammenfügen näher erläutert und Anforderungen hinsichtlich der Systemabgrenzung und -modellierung abgeleitet. Darauf aufbauend werden die Rahmenbedingungen des Anlagenanlaufs in Anlehnung an das vorgestellte Phasenmodell in Kapitel 2.2.2 analysiert. Abschließend wird vertieft auf die Relevanz erfahrener Mitarbeiter und anderer wesentlicher Erfolgsfaktoren für einen gelungenen Anlagenanlauf eingegangen. Zum Ende des Kapitels werden die in den Unterkapiteln ermittelten Kernanforderungen hinsichtlich eines ganzheitlichen Lösungsansatzes strukturiert zusammengefasst.

3.1 Konfigurierbare modulare Montageanlagen

Zur Begegnung der volatilen Produktionsanforderungen mit kurzen Produktlebenszyklen und vielen Varianten haben Anlagenhersteller mit der Realisierung modularer Plattformkonzepte reagiert, die schnell an sich ändernde Kundenwünsche angepasst und umgebaut werden können. Modularität, Standardisierung und Wiederverwendung ermöglichen unter anderem eine stufenweise Anpassung an sich im Laufe des Produktlebenszyklus ändernde Stückzahlen und Taktzeiten, wodurch Anfangsinvestitionen gesenkt und die Gewinnspannen früher erreicht werden [Lohse u.a. 2006, Schanz u.a. 2003, Yu u.a. 2003]. Bei konfigurierbaren Montageanlagen werden produktabhängige Prozessmodule einem standardisierten Grundgerüst hinzugefügt. Aufgrund der „Plug and Play“-Technologien müssen sie sich nicht bei jeder Anlage, jedem Produkt und jedem Prozess mit regelmäßig auftretenden Problemen z.B. der Integration von Modulen beschäftigen. Durch die komponentenbasierte Baukastenweise können sich die Entwickler folglich auf die projektspezifischen wertschöpfenden Prozesse zum Fertigung des Produktes konzentrieren.

Modulare Montageanlagen werden mittlerweile von einer Vielzahl industrieller Hersteller wie Rohwedder [Rohwedder 2012], Mikron [Mikron 2012], Sysmelec [Sysmelec 2012], oder Bosch Rexroth [Bosch Rexroth AG 2009] angeboten und sind dabei meist nach folgendem Schema aufgebaut [Schanz u.a. 2003, Frauenfelder 1999]:

Die *Plattform* stellt ein einheitliches skalierbares Basiskonzept der Montageanlage dar. Unter anderem sind Anschlüsse an externe Verbindungen (wie Druckluft oder Strom), die von mehreren Modulen benötigt werden, Schaltschränke und das Steuerungssystem bei allen Ausführungen soweit möglich identisch angebracht. Zu den *Prozessen* bieten sie standardisierte Schnittstellen und eine vereinheitlichte Anbindung an die Steuerung, was einen schnellen Umbau beziehungsweise den einfachen Ersatz vorhandener Module erlaubt.

Prozesse erfüllen dabei genau eine oder mehrere produktspezifische Arbeitsaufgaben aus dem Montagebereich. Hier findet die eigentliche wertschöpfende Tätigkeit statt, die aus Zusammenbauen und Überprüfen des Produktes besteht.

Der *Materialtransport* erfolgt vollautomatisch. Das Produkt wird dabei in einem freien Werkstückträger (kurz WT) von einem Prozessschritt zum nächsten transportiert und entsprechend des vorher festgelegten Arbeitsplans prozessiert. Die Taktung der WT kann dabei zeitparallel oder asynchron erfolgen. Zudem können je nach Ausführung der Plattform Leerplätze zwischen einzelnen WTs toleriert oder aber eine lückenlose Verbindung zwingend vorgegeben werden.

Das gefertigte Produkt wird an einer definierten Stelle automatisiert entnommen.

Über die *Mensch-Maschine-Schnittstelle* (englisch Human-Machine-Interface, kurz HMI) können Parametereinstellungen der Anlage verändert oder Daten wie Sensorwerte oder statistische Auswertungen angezeigt werden.

In der folgenden Abbildung ist exemplarisch ein schematischer Aufbau einer zyklischen vollautomatisierten Anlage für die Hochleistungsmontage dargestellt. Materialzuführungen oder standardisierte *Prozessmodule* der Plattform in welche die

einzelnen Prozesse integriert werden, sind dabei aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt.

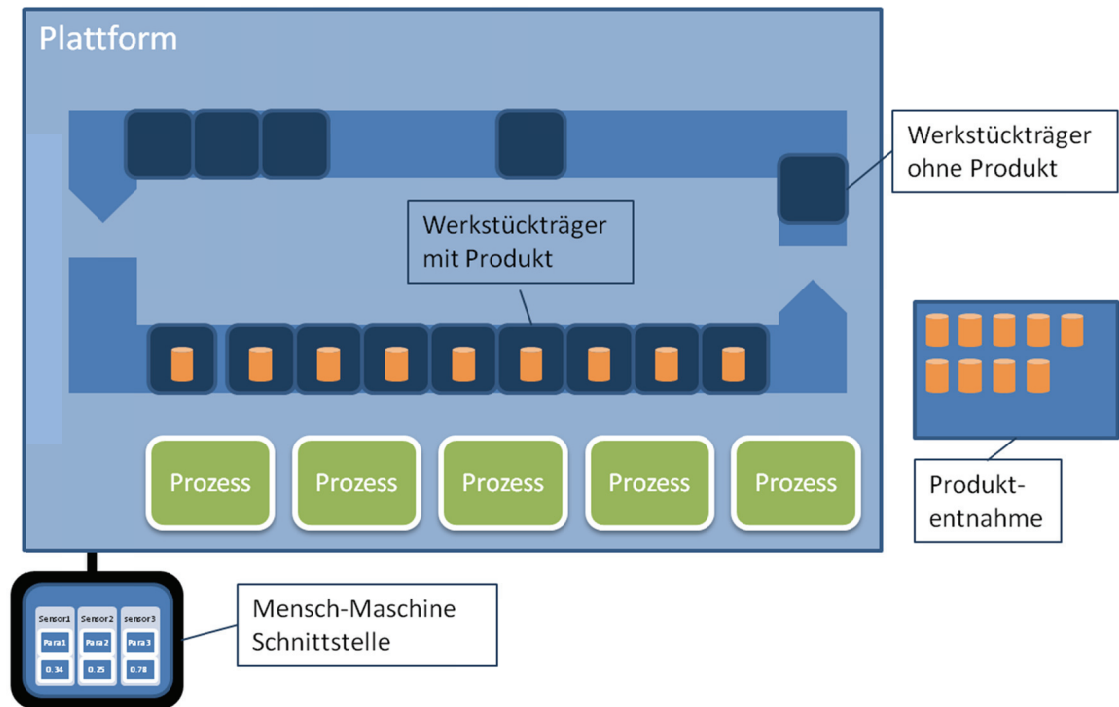


Abbildung 10: Beispielhafter struktureller Aufbau einer konfigurierbaren Montageanlage (in Anlehnung an [Frauenfelder 1999])

Bei der Struktur von Montageanlagen können je nach Plattformkonzept noch weitere Elemente wie Puffer, Materialzuführungen und -vereinzlungen, Sicherheitsblöcke oder Prozessmodule unterschiedlicher Breite betrachtet werden.

3.1.1 Verkettung mehrerer Anlagen zu einem Montagesystem

Abgeschlossene Anlagen bieten eine Produktflexibilität bezüglich der Spezifikation der eigentlichen Prozesse, hinsichtlich der Kapazität sind sie jedoch aufgrund der festgelegten Basisrahmen auf $1-n$ ($n \in \mathbb{N}, 1 < n$) Module begrenzt. Dies umgeht man, in dem man mehrere Montageanlagen zu einem Montageverbund oder –system koppelt.

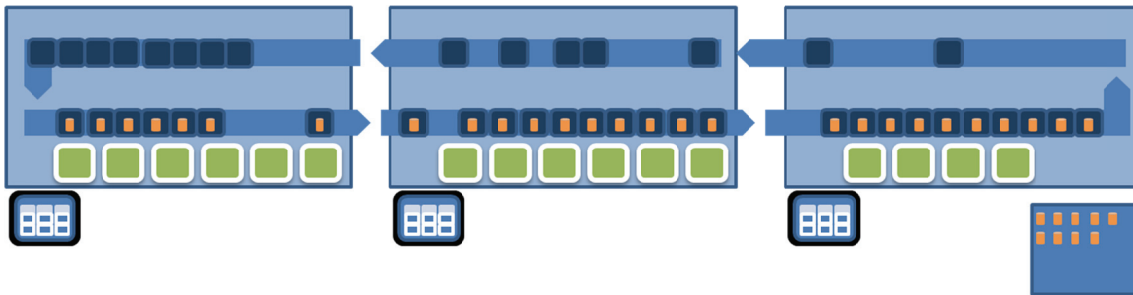


Abbildung 11: Modularer Aufbau eines verketteten vollautomatischen Montagesystems mit drei verbundenen Anlagen (in Anlehnung an [Frauenfelder 1999])

Dabei werden $2-m$ ($m \in \mathbb{N}, 2 < m$) Montageanlagen unterschiedlicher Ausprägung über den Materialtransport miteinander verkettet. Dadurch wird die Fertigung mehrteiliger Produkte mit vielen Prozessschritten realisiert, wobei die Verbindungsstrecke gleichzeitig als Pufferzone dienen kann. Die Austaktung aller beteiligten Anlagen zu einem ausgewogenen Gesamtsystem und die Darstellung produkt- oder qualitätsrelevanter Systemzusammenhänge über Anlagen hinweg, stellen dabei nur einige der Schwierigkeiten beim Produktionsanlauf dar.

3.1.2 Spezifikation der Prozessstruktur

Die betrachteten *Prozesse* lassen sich nach [DIN 8593 2003, VDI 2860 1990] der Montage zuordnen und bestehen aus verschiedenen Fügeverfahren einschließlich notwendiger Handhabungs- und Hilfsvorgänge inklusive des Prüfens und Messens von Qualitätskriterien. Die einzelnen Prozesse können dabei nach verschiedenen Kriterien wie des Typs der Verbindungserzeugung oder Art des Zusammenhalts geordnet und strukturiert werden.

Im Weiteren wird das modulare mehrstufige Prozessmodell nach [Sandin u.a. 2002] verwendet. Einzelne *Prozesse* können dabei bestimmten hierarchisch gegliederten *Oberklassen* (auch Prozesstypen) zugeordnet werden. Sie besitzen spezifische charakteristische *Attribute*, welche man einstellen oder ablesen kann. Das Gesamtkonzept wird in Abbildung 12 schematisch darstellen.

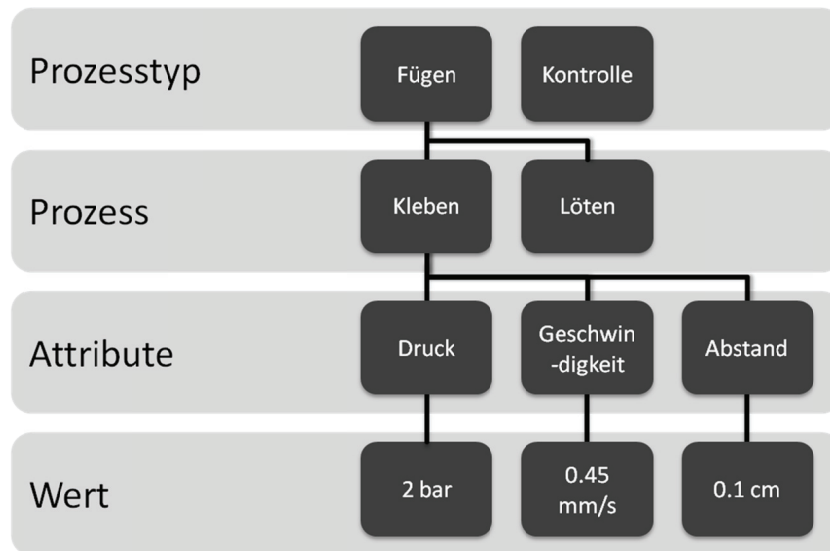


Abbildung 12: Mehrstufige exemplarische Darstellung der Prozessdetails (in Anlehnung an [Sandin u.a. 2002])

Durch die Darstellung der Prozessfähigkeiten anhand einer Baumstruktur können die Produkthanforderungen den spezifischen Prozessen strukturiert zugeordnet werden, was eine schnelle Überprüfung hinsichtlich der Montierbarkeit eines Produktes erlaubt [Tallinen u.a. 2003].

3.1.3 Produktaufbau

In der Montage werden üblicherweise mehrere *Varianten* einer *Produktfamilie* gefertigt. Dabei unterscheiden sich die jeweiligen Fabrikate meist nur in wenigen Merkmalen (z.B. in der Farbe) voneinander. Die Darstellung der einzelnen, nicht teilbaren Elemente und das Zusammenfügen lässt sich mittels einer Baumstruktur darstellen [Nan u.a. 2008, Tallinen u.a. 2003]. Da zahlreiche unterschiedliche Modellauslegungen existieren, wird im Weiteren die Definition und Struktur nach [Pierre u.a. 2003] verwendet, die den Fokus auf eine integrale Betrachtung der Produkt- und des Prozessaufbaus legt:

- Ein *Produkt* ist das Endprodukt, welches aus einzelnen Komponenten und Montagegruppen besteht, die mechanisch miteinander verbunden sind.
- *Komponenten* sind atomare nichttrennbare Elemente innerhalb der Konstruktion.

- *Montagegruppen* sind in sich geschlossenes Gebilde, welche aus mehreren Montagegruppen oder Komponenten besteht.
- *Verbindungen* bestehen zwischen zwei Komponenten oder Montagegruppen wenn mindestens eine mechanische Verbindung zwischen ihnen besteht.

Dadurch lassen sich das Produkt, seine Verbindungen und Bestandteile in einer Baumstruktur abbilden (siehe Abbildung 13). Varianten werden durch den Austausch einzelner oder mehrerer Knoten gebildet.

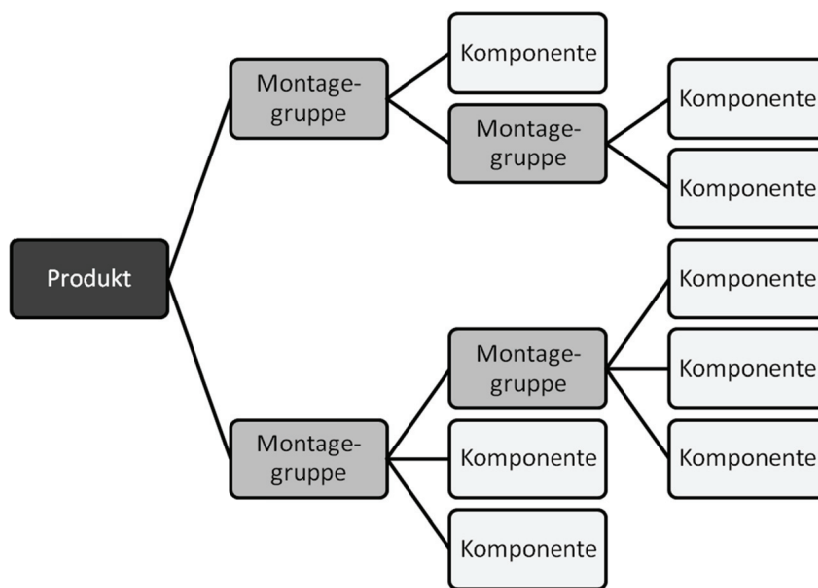


Abbildung 13: Beispielhafte Struktur einer vierstufigen Produkthierarchie

3.1.4 Abgeleitete Anforderungen und Abgrenzung des Systems

Das zu entwickelnde System muss die *Systemdomäne automatisierter Montageanlagen* realistisch und detailliert abbilden. Alle relevanten Informationen von Montageanlagen und -systemen, der Prozessstruktur und Produkte sollen in ausreichender Weise berücksichtigt und integrativ dargestellt werden.

Der *modulare konfigurierbare Aufbau* der vorgestellten Modelle soll in entsprechender Form beachtet werden. Teilmodelle sollen voneinander unabhängig gestaltet und untereinander flexibel miteinander vernetzt werden. Soweit möglich, soll sich an der vorgestellten Struktur der Modellierung orientiert werden.

3.2 Rahmenbedingungen des Anlagenanlaufs

Ausgehend von dem Phasenmodell in Abbildung 9 werden die Rahmenbedingungen des Anlagenanlaufs ermittelt. Dabei wird mit der Montagephase beginnend, die Anlage beim Hersteller zusammengebaut bis der Anlauf mit der Übernahme und Nutzung durch den Betreiber abgeschlossen ist. In diesem Kapitel werden dabei die Vorgehensweisen und typischen Problemstellungen vorwiegend aus den bei Industrie- und Forschungsprojekten gewonnenen Erfahrungen dargestellt.

Charakteristisch für einen Anlauf sind kaum strukturierte Abläufe und nicht standardisierte Aufgaben. Auftretende Probleme sind meist nicht bis sehr schwer vorhersehbar. Aus diesem Grunde können Strategien zur Problemlösung im Vorfeld nicht weiter festgelegt werden. Folglich müssen Probleme direkt vor Ort von den zuständigen Mitarbeitern aufgrund des Termindrucks in möglichst kurzer Zeit eigenverantwortlich gelöst werden [Housein u.a. 2002].

3.2.1 Montagephase

In der *Montagephase* liegt der Fokus dabei wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben auf dem Zusammenfügen der geometrisch bestimmten Elemente.

Auftretende Problemstellungen wie Ein- und Ausbauschwierigkeiten oder Kollisionen bei Montagevorgängen sind dabei größtenteils auf fehlerhafte CAD-Modelle bzw. eine mangelhafte Integration der verschiedenen Teilmodelle zurückzuführen. Durch Montagemitarbeiter oder Ingenieure vorgenommene Modifikationen zur Lösung auftretender Probleme sollten in den entsprechenden CAD-Modellen dokumentiert werden, was allerdings aus Ressourcenknappheit in der Realität oftmals nicht erfolgt.

3.2.2 Interne Inbetriebnahme

Bei der *internen Inbetriebnahme* wird das System auf das funktionelle Zusammenwirken hin geprüft und optimiert.

Dabei werden Prozesse, Sensoren oder Aktoren oftmals iterativ hinzu geschaltet und zunächst einzeln auf ihre Funktionalität geprüft. Bei Montageanlagen wird hierfür häufig ein „Trockenlauf“ der einzelnen Teilfunktionen durchgeführt. Dabei handelt es sich um den Testbetrieb einzelner Montageschritte, die mit oder ohne Produkte durchgeführt werden können. Anschließend werden iterativ die Prozesse zu dem Gesamtsystem hinzu geschaltet. Bei auftretenden Qualitätsproblemen wird ein bestehendes System nachträglich häufig um weitere Sensoren oder Prozesse erweitert [Konrad u.a. 2012].

3.2.3 Prozessqualifizierung

Bei der *Prozessqualifizierung* liegt der Fokus auf einer zufriedenstellenden Güte der Prozessleistung hinsichtlich Qualität und Quantität.

An dieser Stelle werden die Parameter der Prozesse reguliert, um für das Gesamtergebnis zufriedenstellende Feineinstellungen zu finden. Die vom Kunden für den Testbetrieb bereitgestellten Probeteile verursachen häufig Problemstellungen. Die verfügbaren Probeteile sind oft nur in unzureichender Menge oder mangelhafter Qualität vorhanden. Daher muss bei auftretenden Qualitätsproblemen der Ursprung der Fehler genau geklärt werden. Da allgemein die Menge fehlerhafte Produkte oftmals weniger als ein Prozent bezogen auf die Gesamtproduktion darstellt, ist das gezielte Replizieren eines Fehlers eine zeitintensive Herausforderung. Dennoch ist dies häufig notwendig, da die spezifische Fehlerursache oft nur durch Beobachtung bestimmt werden kann. Ein weiteres Problem stellt die Produktionsumgebung des Anlagenherstellers dar, bei der versucht wird, die späteren realen Betriebsbedingungen möglichst exakt nachzustellen. Dies ist jedoch aufgrund firmenspezifischer Restriktionen wie beispielsweise fehlender Reinraum- oder Klimatechnik nicht immer uneingeschränkt möglich. Aus diesen Gründen kann die Feineinstellung der Prozesse nur hinsichtlich der genannten projekt- und unternehmensspezifischen Einschränkungen erfolgen.

3.2.4 Abnahme und externer Anlauf

Nach der erfolgreichen *Abnahme* durch den Kunden wird die Anlage *demontiert* und beim Kunden *wieder aufgebaut* und in die bestehende IT Landschaft *integriert*.

Anschließend erfolgt die erneute Inbetriebnahme und der *Hochlauf* der Anlage, der mit einer *Abnahme* abgeschlossen wird.

Im Kontrast zu dem internen Anlauf werden nun häufig qualitativ hochwertige Produktkomponenten verwendet. Aufgrund dessen und der veränderten Umgebung kann es unter anderem wieder zu Schwierigkeiten beim Anlauf führen. Zudem fordern die Abnahmebedingungen einen meist zeitlich längeren zufriedenstellenden Betrieb der Anlage als bei der internen Abnahme.

Die Einbindung externer Montagearbeiter erfolgt üblicherweise während dem externen, kann aber auch bereits während des internen Anlaufs erfolgen. Da in diesen Phasen üblicherweise noch Qualitätsprobleme zu erwarten sind, werden die externen Mitarbeiter praxisnah in die Lösung bestehender Problematiken bei dieser Maschine eingeführt.

3.2.5 Abgeleitete Anforderungen für den Lösungsansatz

Zur Ableitung der Anforderungen hinsichtlich der Rahmenbedingungen werden alle genannten Punkte des Unterkapitels 3.2 berücksichtigt. Lediglich die Montagephase fließt nicht in die Betrachtungen ein, da CAD-Systeme ein sehr weites und komplexes Themenfeld darstellen, welches gesondert behandelt wird. Der Schwerpunkt der Betrachtung des vorliegenden Beitrages liegt in dem eigentlichen Überführen von Anlagen in einen zufriedenstellenden und stabilen Fertigungszustand, wobei die erfolgreiche Montage der Anlage nur die erste, in sich annähernd abgeschlossene Grundvoraussetzung darstellt.

Unbekannte Problemstellungen erfordern eine *hohe Flexibilität* hinsichtlich der Datenauswertung. Da auftretende Problemstellungen nicht im Voraus bekannt sind, ist es auch nicht zielführend, lediglich starre Formen der Wissensverwertung z.B. in Form von standardisierten Berichten zur Verfügung zu stellen. Daher sollen zu einem möglichst frühen Zeitpunkt anfallenden Daten erfasst werden können, weil zu Beginn nicht genau spezifiziert werden kann, welche Informationen von Bedeutung sind oder im weiteren Verlauf sein werden. Das Hinzufügen neuer Datenquellen ist zuzulassen. Dabei

ist es wichtig, die Mitarbeiter nicht mit allen verfügbaren Datensätzen zu verwirren, sondern zielgerichtet mit den extrahierten wesentlichen Informationen zu unterstützen.

Das System soll bei der *Identifikation* von *Fehlerursprüngen* hilfreich sein und den Mitarbeitern potentielle Ansatzpunkte zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Anlagen liefern.

Die *Erweiterungsmöglichkeit* und *Skalierbarkeit* des Systems muss vorhanden sein. Da Montageanlagen iterativ aufgebaut, vernetzt und erweitert werden, müssen existierenden Modellen mehr Informationen hinzugefügt werden. Modellerte Informationen sollen dabei (auch teilweise) zur Weiterverwendung in ähnlichen oder Nachfolgeprojekten verwendbar sein.

Die *Nutzungsmöglichkeit* der Lösung über alle Phasen des Anlagenanlaufs ist essentiell. Dazu soll die zu entwickelnde Lösung aufgrund der zeitlichen Restriktionen und geforderter Reaktivität *direkt im Produktionsbereich* zur Datenerfassung und -auswertung einsetzbar sein.

Aufgrund der zeitlichen Restriktionen sollen die Mitarbeiter vor Ort in der Lage sein, das System ohne Unterstützung durch spezielle IT Programmierer zu *konfigurieren*, beziehungsweise zur Lösung aktueller Probleme das System entsprechend anzupassen, um zu einer hilfreichen Informationsmenge zu gelangen.

Der Einsatz externer Mitarbeiter zwingt die Anlagenhersteller unternehmerische Entscheidungen hinsichtlich des *Schutzes ihrer Fachkenntnisse* zu treffen. Dabei sollen Mitarbeiter des Kunden möglichst gut in die Anlagenproblematik eingearbeitet werden, ohne jedoch zu viel betriebsinterne Expertise zu erlangen.

3.3 Relevanz von Wissen in der Produktion

Die Erschließung und Nutzung vorhandener Wissenspotentiale ist ein strategisch notwendiger Vorgang zur Standortsicherung produzierender Unternehmen in Deutschland. Die EU-Kommission sieht in ihrer Studie zur Wettbewerbsfähigkeit der Mitgliedsstaa-

ten das Schaffen und Nutzen von Wissen als strukturelle Herausforderung für den Wirtschaftsstandort Deutschland [BMWI 2011]. Einer branchenübergreifenden Studie des Fraunhofer Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation zufolge schätzen 96% der 300 befragten Unternehmen die Thematik als wichtig oder sehr wichtig ein. Die Mehrheit gab an, dass der Anteil der Wertschöpfung des Produktionsfaktors *Wissen* dabei bei über 50% liege [Rüger u.a. 2000].

Das effektive und effiziente Management der gemachten Erfahrungen mit Hilfe unterstützender Systeme ist folglich eine zukunftsweisende Notwendigkeit für erfolgreiche Unternehmen. Dabei geht es neben der Weitergabe vorhandener Erkenntnisse um die organisierte Erschließung individueller Wissenspotentiale und eine einheitliche Dokumentation. Ausschlaggebend für ein erfolgreiches Wissensmanagement sind neben extrinsischen Anreizen vielmehr intrinsische Motivationsfaktoren, wie beispielsweise Verantwortung, Einbindung und Freiraum der individuellen Mitarbeiter [Nolden 2011].

3.3.1 Lerneffekte bei der Fertigung von Montageanlagen

Mithilfe von Lernkurven lassen sich die Entwicklung von gemachten Erfahrungswerten und des organisatorischen Vergessens beschreiben [Berger u.a. 2009, Niemann u.a. 2005]. Es stellt sich heraus, dass die Stückkosten aufgrund festgestellter und empirisch erprobter Gesetzmäßigkeiten mit der Gewinnung von Erfahrungswerten bei der Produktion sinken. Nach Abschluss der Produktion erhöht sich die Stückkostenzahl mit zunehmender Zeit kontinuierlich, da die gesammelten Erfahrungen durch neue verdrängt werden und das erlangte Fertigungswissen verloren geht. Im Falle einer längeren Unterbrechung in der Fertigung eines bestimmten Produktes muss bei Wiederbeginn der Produktion mit höheren Stückkosten als zu Abschluss der letzten Charge gerechnet werden.

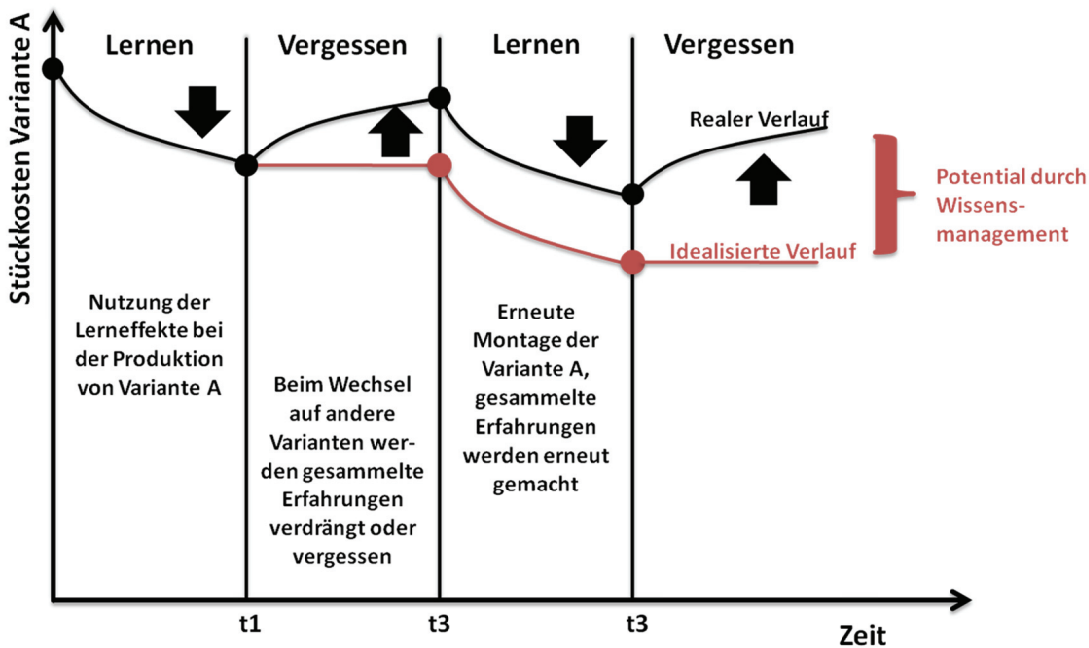


Abbildung 14: Entwicklung der Stückkosten in der Montage basierend auf Lerneffekten nach [Berger u.a. 2009]

Dieser zyklische Effekt des Lernen und Vergessens lässt sich auch auf den Anlagenanlauf transferieren. Essentielle Auswirkungen werden bei der Fertigung von ähnlichen Anlagen oder Nachfolgeprojekten deutlich, wo Mitarbeiter die erlangten Erfahrungen im Anlauf des speziellen Maschinentyps verdrängt oder verloren haben. Dies bedeutet, dass erneut auftretende Probleme nicht unverzüglich behoben werden, sondern erneut Zeit und Aufwand in die Findung einer zweckdienlichen Lösungsstrategie investiert werden muss. Hinzu kommt, dass bei der Bildung von Projektteams aufgrund unternehmerischer Gegebenheiten und projektspezifischer Konstellationen es nicht gewährleistet ist Mitarbeiter einzusetzen, die bereits Erfahrungen in Vorgängerprojekten gesammelt haben. Durch die Speicherung erlangter Erfahrungen und die unternehmensweite Verbreitung des gesammelten Wissens könnte man die Informationen Mitarbeitern zur Verfügung stellen und demzufolge die Herstellkosten im Anlagenanlauf für ähnliche oder Folgeprojekte senken.

Eine spezielle Betrachtung des Zeitraumes zwischen der internen und externen Inbetriebnahme kann aufgrund der geringen dazwischenliegenden Zeitspanne

vernachlässigt werden und hat damit keine besonderen Anforderungen an einen Lösungsansatz (vgl. Kapitel 2.2.2).

3.3.2 Wissen erfahrener Mitarbeiter

Es ist unbestritten, dass die bei einem Produktionsanlauf beteiligten Mitarbeiter einen entscheidenden Einfluss auf den Ablauf und Erfolg der Projekte besitzen. Die konsequente und durchgängige Nutzung von gesammelten Erfahrungen aus vergangenen Projekten sind der Schlüssel für einen effizienten Produktionsanlauf. Die erfolgreiche Behebung von im Anlauf auftretenden Problemen ist fast ausschließlich von der Erfahrung der beteiligten Mitarbeiter abhängig [Fleischer u.a. 2004, Konrad u.a. 2012b]. Die auftretenden und im Vorfeld unbekannt Probleme müssen direkt vor Ort durch improvisierte spontane Handlungen der Mitarbeiter gelöst werden, wobei diese Aktivitäten ohne geeignete Wiederverwendungsstrategie lediglich von einmaligem Nutzen für das Unternehmen sind. Der Großteil aller fehlgeschlagener Produktwechselfprojekten ist auf mangelnden Erfahrungsaustausch unter den Teammitgliedern oder innerhalb des Unternehmens zurückzuführen [Slamanig u.a. 2010].

Trotz der Relevanz der gewonnenen Kenntnisse findet eine strukturierte Dokumentation aufgrund des ständigen Termindrucks und anstehender Fristen kaum statt. Folglich steht das erlangte Wissen nicht zur Wieder- oder Weiterverwendung zur Verfügung. Essentielle Erfahrungen der Produktionsmitarbeiter bleiben dadurch in neuen Projekten ungenutzt, was wie im vorigem Kapitel beschrieben, die Herstellkosten erhöht und zur Verfehlung der gesteckten Anlaufziele beiträgt [Wiesinger u.a. 2002, Berger u.a. 2006, Konrad u.a. 2012].

Die Modellierung und Formalisierung des technischen Expertenwissens ist allgemein bisher unzureichend erschlossen und die Umwandlung impliziter Erfahrungen in explizite Formate ist als mangelhaft zu bewerten [Housein u.a. 2002, Berger u.a. 2006]. Als kritische Faktoren sind die zeitliche Belastung in produktionsnahen Bereichen, die Schwierigkeiten Erfahrungen explizit zu beschreiben und die Strukturierung des gesammelten Wissens anzusehen. Beispielsweise beschreiben [Walther und Verl 2007] den Menschen als überlegene Lösung zur Diagnose von Problemen bei

Werkzeugmaschinen. Allerdings ist es bisher nicht gelungen, diese Fähigkeiten formal zufriedenstellend zu beschreiben. Im technischen Umfeld ist für bestimmte Anwendungsfälle eine Beschreibung in Regelform (in der Form von „wenn-dann“-Beziehung) eine favorisierte Umsetzung [Berger u.a. 2006].

Die adäquate Erfassung, Nutzung und der Transfer von intrinsischem Mitarbeiterwissen ist folglich einer der wesentlichen Hindernisfaktoren für einen erfolgreichen Anlagenanlauf [Konrad u.a. 2012].

3.3.3 Anforderungen an die Erfassung des Mitarbeiterwissens

Die *Strukturierung* des erfassten Wissens in einer verständlichen und durchgängig geordneten Systematik ist Grundvoraussetzung für eine weitere Nutzung. Eine einheitliche Begriffsdefinition beugt dem subjektiven und individuell unterschiedlichen Abbilden von Erfahrungen vor.

Die *Erfassung* des Wissens ist ausschlaggebend für eine effiziente Nutzung. Zum einen muss es effizient genug sein, damit Produktionsmitarbeiter nicht von ihrer eigentlichen Arbeit abgehalten werden. Andererseits muss man die wesentliche Problematik erfassen und darstellen können. Eine *einheitliche Dokumentation* beugt dabei individuell unterschiedlichen Bewertungen gleicher Situationen vor.

Die *Verwertung* gesammelter Informationen muss zielgerichtet und für die Mitarbeiter in einer verständlichen Art und Weise geschehen. Der *Transfer* der erfassten Erfahrungen zu anderen Mitarbeitern ist essentiell für eine effektive Nutzung einer einheitlichen Wissensbasis. Dabei sollte das Wissen sowohl von einem Mitarbeiter an den Nächsten, als auch zwischen Projektteams zur Verfügung gestellt werden. Aufgrund der spezifischen Rahmenbedingungen des Anlaufs und der modularen Bauweise der Anlagen ist auch ein Transfer einzelner Teile des erfassten Wissens notwendig.

Für eine effiziente Nutzung ist auch die *automatisierte Verarbeitung* und *Erweiterung* des modellierten Wissens notwendig. Dies ermöglicht es, manuell eingegebene Informationen beispielsweise aufgrund vorselektierter Regeln oder Muster zu

vervielfältigen. Für eine wirtschaftliche Nutzung des Wissens soll die manuelle Dateneingabe soweit wie möglich minimiert werden.

3.4 Industrielle Erfolgsfaktoren großer Industrieunternehmen

Zudem existieren weitere übergreifende Systemanforderungen für den Anlagenanlauf [Konrad u.a. 2012, Konrad u.a. 2012b]:

- Produktionsrelevante Daten können von unterschiedlichsten Quellen (wie Anlagensensoren, Software-Systemen, HMI-Eingaben) und an verschiedenen Orten (beim Hersteller oder beim Kunden) entstehen. Das Erfassen und Zusammenführen dieser heterogenen Datensätze ermöglicht eine integrierte Sicht auf die Vielzahl existierender Informationen und vollbringt eine nachhaltige Vernetzung unterschiedlichster Datenquellen.
- Eine zielführende Filterung und Analyse erfasster Informationen bedingt einen geeigneten Kontext zur Extraktion relevanter Informationsmengen. Die Anpassung an die realen Gegebenheiten des erstellten Systems kann dabei u.a. durch die Verwendung eines entsprechenden Maschinemodells erfolgen, welche die wesentlichen Elemente der Anlage und ihre entsprechenden Verbindungen realistisch abbildet.
- Zur Leistungssteigerung der Anlage vorgenommene notwendige Parametermodifikationen und Änderungen sollen rückverfolgbar und transparent erfasst werden. Die Nutzung einer speziellen Versionierungssystematik erlaubt es, getätigte Änderungen nachzuschlagen und anfängliche Prozess- oder Maschineneinstellungen wiederherzustellen.
- Zu Beginn des Anlaufs werden oftmals fundamentale Problemstellungen gelöst. Generell ist dies eine Zeit hoher Aktivität des Anlagenherstellers und der beteiligten Mitarbeiter. Eine sehr frühe Verfügbarkeit des Gesamtsystems direkt in der

Produktionsstätte ist folglich notwendig, um essentielle Informationen zu erfassen und größtmöglichen Nutzen zu erbringen.

- Von [Hoffmeister u.a. 2011] wird ausdrücklich betont, dass eingesetzte Softwarelösungen kompatibel zu existierenden Standards sein müssen. Sollte dies nicht der Fall sein, ist eine langfristige Nutzung der Software für die Unternehmen nicht zu empfehlen.

3.5 Zusammenfassung der Anforderungen

Die ermittelten Anforderungen lassen sich dabei in zwei Gruppen einteilen. Zum einen betreffen sie die Entwicklung und den Einsatz des Modells, zum anderen stellen sie Ansprüche an das zu erarbeitende Verfahren und dessen nachhaltige Integration in den Anlagenanlauf.

| Themengebiet | Anforderungen an das Modell |
|--------------------------------------|---|
| Montagedomäne | <ul style="list-style-type: none">• Darstellung der Systemgrenzen des Anlagenanlaufs in der Montage mit allen relevanten Elementen (Maschine, Prozess, Produkt, Sensorwerte,...)• Orientierung der Modelle und Metamodelle am strukturellem modularem Aufbau |
| Wissensmanagement | <ul style="list-style-type: none">• Strukturiertes Erfassen, Nutzen und Transfer von Wissen der Produktionsmitarbeiter• Unterstützung bei der Identifikation von Fehlerursachen• Transparenz hinsichtlich vorgenommener Modifikationen• Einheitliche Dokumentation zur standardisierten Beschreibung |
| Rahmenbedingungen des Anlagenanlaufs | <ul style="list-style-type: none">• Erfassung und Integration verfügbarer Daten heterogener Quellen• Flexibilität hinsichtlich der Erfassung und Auswertung der Informationen |
| technische Anforderungen | <ul style="list-style-type: none">• Maschinenlesbare Modellierung und automatisierte Verarbeitung• Skalierbarkeit, Erweiterbarkeit und Kompatibilität von (Teil-) Modellen• Frühe Verfügbarkeit des Systems• Kompatibilität zu existierenden Standards |

Abbildung 15: Kernanforderungen an das Modell

| Themengebiet | Anforderungen an das Verfahren |
|----------------------|---|
| Strategische Nutzung | <ul style="list-style-type: none">• Schutz betriebsinterner Fachkenntnisse• Unternehmensspezifische Anpassung an Anwendungsfälle• Langfristig wirtschaftliche Nutzung des System durch kontinuierliche Optimierung |
| Operative Nutzung | <ul style="list-style-type: none">• Verfügbarkeit in der Produktionsstätte• Nutzung über alle Phasen des Anlagenanlaufs• Weitreichende Konfigurationsmöglichkeit der eingesetzten Lösung• Kurzfristig wirtschaftliche Nutzung des System durch Anwendbarkeit bei Problemstellungen |

Abbildung 16: Kernanforderungen an das Verfahren

4. Stand der Technik zur Beherrschung des Anlagenanlaufs

Zur Beherrschung des Anlagenanlaufs existieren eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze, wie beispielsweise die digitale Nachbildung und Absicherung von Anlagen, rein organisatorische Methoden oder strukturierte Bewertungsschemata und -berechnungen. Ein Großteil der realisierten Lösungsansätze mit Softwareunterstützung lassen sich dabei dem Umfeld der Digitalen Fabrik zuordnen. Nach eingehender und umfassender Betrachtung relevanter Methoden und Instrumente in diesem Bereich wird zudem ein spezieller Fokus bei der Betrachtung des aktuellen Standes der Wissenschaft und Technik auf das teilautomatisierte Wissensmanagement mit semantischen Methoden gelegt. Abschließend werden noch einige spezifische Techniken und Technologien zur Beherrschung des Anlagenanlaufs vorgestellt, die im weitesten Sinne für diesen Beitrag relevant sind oder ihn beeinflusst haben.

4.1 Methoden der Digitalen Fabrik zur Absicherung des Anlaufs

Die *Digitale Fabrik* [VDI 4499 Blatt 1 2008] zielt auf eine umfassende Synchronisierung und soweit möglich digitale Bearbeitung der Produkt- und Produktionsentstehungsprozesse ab. Der Begriff umfasst ein ganzheitliches Management aller Daten von den Entwicklungsprozessen bis zu dem virtuellen Betrieb der Produktion. Der *Digitale Fabrikbetrieb* stellt dabei einen Ausschnitt mit dem Fokus auf eine schnelle Inbetriebnahme und einen stetig verbesserten Betrieb der Produktion dar und ist nach [VDI 4499 Blatt 2 2011] folgendermaßen definiert:

„Der Digitale Fabrikbetrieb bezeichnet die Nutzung und das Zusammenwirken von Methoden, Modellen und Werkzeugen der Digitalen Fabrik, die bei der Inbetriebnahme einzelner Anlagen, dem Anlauf mehrerer Anlagen und der Durchführung realer Produktionsprozesse eingesetzt werden. Ziele sind die Absicherung

und Verkürzung des Anlaufs sowie die betriebsbegleitende und kontinuierliche Verbesserung der Serienproduktion.“

Der grundsätzliche Ansatz ist in der Realität auftretende Problemstellungen in dem virtuellen Abbild des betrachteten Systems darzustellen, um zweckmäßige Lösungsstrategien bereits im Vorfeld planen und absichern zu können. Dabei soll die vorhandene Datenbasis möglichst integriert über die Lebensphasen genutzt werden [Bracht u.a. 2011]. [Bracht u.a.2011b] geben einen Überblick über die Vielzahl an Methoden und Instrumente innerhalb der Digitalen Fabrik. Aufgrund der wirtschaftlichen Verbreitung und des Anwendungsfalls des Anlagenanlaufs sind im Besonderen die *virtuelle Inbetriebnahme* und die *Materialflusssimulation* hervorzuheben.

4.1.1 Absicherung durch virtuelle Inbetriebnahme

Bei der *virtuellen Inbetriebnahme* werden Modelle der Steuerung und der Maschine mit jeweils realen und digitalen Anteilen integriert getestet. Dies ermöglicht beispielsweise ein gefahrloses Testen des Systemverhaltens bei Grenzsituationen oder eine frühzeitige Optimierung der Taktzeit, bevor das reale Steuerungssystem oder die Maschine existieren. Da Modelle die Realität nur abstrahiert abbilden können, werden soweit möglich reale Elemente eingesetzt. Die virtuelle Inbetriebnahme lässt sich nach Ausprägung der Anlage und der Steuerung (real oder virtuell) klassifizieren. Je nach Anwendungsfall und Abgrenzung (also ob beispielsweise eine einzelnen Anlage oder eine komplette Fertigungslinie betrachtet wird) sind die Anforderungen hinsichtlich der digitalen Absicherung stark unterschiedlich [VDI 4499 Blatt 2 2011].

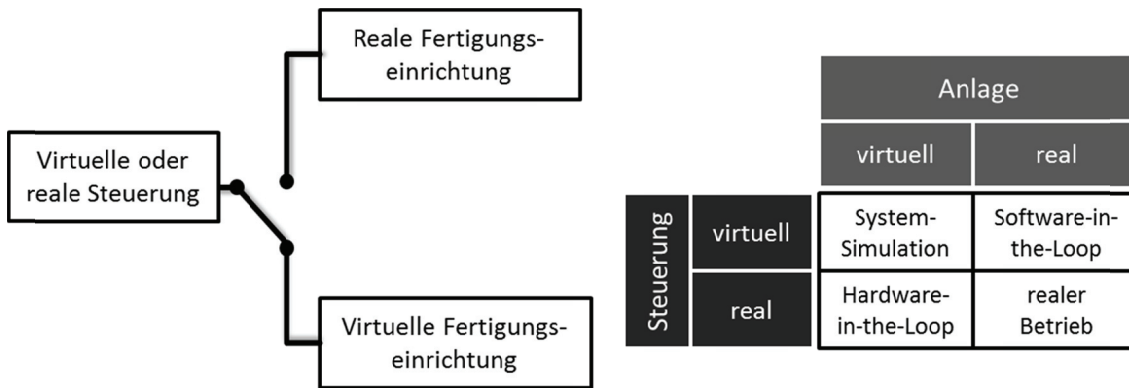


Abbildung 17: Prinzip der virtuellen Inbetriebnahme (links) und Klassifizierung der virtuellen Inbetriebnahme automatisierter Produktionsanlagen (rechts); beides nach [VDI 4499 Blatt 2 2011]

- Bei der *System-Simulation* (oder auch *Model-in-the-Loop*) findet eine vollständig digitale Erprobung der Steuerung und der Anlage statt, bevor eines der beiden Systeme realisiert wurde. Die Unabhängigkeit von Hardware-Komponenten ermöglicht ein schnelles Prüfen verschiedener Konfigurationen in einer frühen Entwicklungsphase [Cakmakci u.a. 2011].
- *Software-in-the-Loop* kennzeichnet das Umwandeln der Steuerungsalgorithmen in maschinenverständlichen Code und das Ausführen der Steuerung auf einem Entwicklungsrechner. Dabei werden sowohl die entwickelten Algorithmen als auch Integrationsaspekte berücksichtigt und getestet [Bonivento u.a. 2011].
- Bei *Hardware-in-the-Loop* wird das reale Steuerungssystem über den bestehenden Antriebsbus an eine virtuelle Anlage gekoppelt. Dabei wird für die Steuerung das Maschinenverhalten nachgebildet. Es werden die empfangenen Signale der Steuerung zur Berechnung des Systemzustandes der Anlage verwendet und realistisch errechnete Werte mit allen Laufzeiteffekten an das Steuersystem zurückgemeldet. Der Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung entsprechender Steuerungs- und Regelungsalgorithmen [Verl 2010].
- Im *realen Betrieb* können nun Teile oder komplette Elemente der Anlagen und des Steuerungssystems miteinander getestet werden.

4.1.2 Absicherung durch Simulation des Materialflusses

Simulation ist eine der meist genutzten Techniken zur Systemanalyse und Entscheidungsfindung [Riedel u.a. 2009] und bildet nach der VDI-Richtlinie 3633 [VDI 3633 Blatt 1 2000] das dynamische Verhalten des Systems in einem Modell nach. An diesem können dann Experimente vorgenommen werden, um Erfahrungen über das reale Systemverhalten zu erlangen. Die Nutzung erstreckt sich dabei von der Planung, über die Realisierungsphase bis zu dem Betrieb des betrachteten Systems. Beispielsweise können Engpässe im Materialfluss bereits vor der Realisierung der Maschine identifiziert, verschiedene Einstellmöglichkeiten der Prozesse und ihre Auswirkungen auf die Systemleistung verifiziert oder die Einführung neuer Varianten in eine bestehende Produktion analysiert werden. Auftretende Fragestellungen während des Anlagenanlaufs wie Kapitel 3 beschrieben, können bereits im Vorfeld modelliert und untersucht werden.

[Zapp 2010] beschreibt ein ganzheitliches schrittweises Vorgehensmodell zur simulationsbasierten Problemanalyse und Maßnahmenanalyse für Produktionsanlagen und verifiziert dieses Modell, fokussiert auf die Rekonfiguration existierender Fertigungsanlagen. Dabei werden empfangene Daten des Steuerungssystems zur Modellbildung und -validierung genutzt. [Sturm u.a. 2003] schildern wie der simulationsunterstützte Anlauf von Produktionssystemen zu einer verbesserten Produktionsleistung in produzierenden Unternehmen führen kann. Einen Ansatz zur Modellierung und Integration menschlicher Faktoren in zeitdiskrete Simulationsprojekte stellen [Riedel u.a. 2009] vor. Darin werden im Gegensatz zur Darstellung von Mitarbeitern mit rein attributiven Merkmalen, menschliche Verhaltensmuster und Entscheidungsfindungen modelliert und in dem Ablauf der Simulation berücksichtigt.

4.1.3 Fazit Digitale Fabrik

Wie bereits zu Beginn des Kapitels 4.1 beschrieben, werden die einzelnen Methoden der Digitalen Fabrik meist nicht isoliert eingesetzt, sondern es wird die Nutzung einer gemeinsamen Datenbasis angestrebt um mehrere Techniken miteinander zu vernetzen

und entstehende Synergien zu nutzen. Exemplarisch seien hier [Wurdig u.a. 2008] und [Verl u.a. 2010] genannt. Erstere beschreiben bei einem Automobilhersteller eine integrative Nutzung vorhandener CAD-Daten aus der modellierten Fördertechnik zur automatischen Generierung und Parametrisierung von Simulationsmodellen. Die generierten Bewegungsdaten der anschließenden Simulationsläufe können zusätzlich zur Bewegung von 3D-Objekten in der virtualisierten Fabrik genutzt werden. [Verl u.a. 2010] beschreiben einen Ansatz zur disziplin- und domänenübergreifenden Wiederverwendung von Simulationsmodellen in der virtuellen Inbetriebnahme. Einen allgemeinen Überblick über integrative Konzepte der Digitalen Fabrik gibt [Constantinescu 2009].

Derzeit existieren eine Vielzahl an Methoden und Techniken, mit denen sich das Risiko des Anlagenanlaufs reduzieren lässt. Dennoch ist es aus wirtschaftlichen und technologischen Gründen heutzutage nicht möglich, Anlagen so detailliert zu planen, dass an dem später realisierten System keine Probleme mehr auftreten [Bracht u.a. 2011]. Auch [Fleischer u.a. 2004] kommen zu dem Schluss, dass man nicht alle Problematiken im Vorfeld durch durchgängige Planung vermeiden kann und sich deshalb ebenso auf das schnelle Lösen auftretender Probleme fokussieren sollte.

4.2 Formalisiertes und automatisiertes Wissensmanagement

Neben dem formalen Syntax, also dem folgerichtigen Anordnen von erlaubten Sprachelementen erlaubt Semantik eine Interpretation dieser formalen Aussagen, bezogen auf eine spezifische Domäne und bestimmt damit ihre Bedeutung. Diese für Menschen selbstverständliche Handhabung von Informationen wird mithilfe semantischer Methoden streng formalisiert nachgeahmt.

4.2.1 Überblick über semantische Technologien

Grundlegendes Ziel semantischer Applikationen ist es, Informationen so darzustellen, dass Maschinen in einer für Menschen sinnvollen und nützlichen Art und Weise damit umgehen können. Dabei umfassen diese Grundsatztechnologien Wissensrepräsentationssprachen für Ontologien (im Weiteren auch Ontologiesprachen),

sowie Werkzeuge und Methoden zur Generierung, Anwendung und Wartung von Ontologien [Hitzler u.a. 2007].

In der Literatur wird die Anwendung semantischer Technologien für die Integration einer Vielzahl heterogener Datenquellen in modernen Produktionen und dem Einsatz in einem konstant veränderten Umfeld intensiv diskutiert. Diese versuchen, einen strukturierten Zugang zu Wissensgebieten zu gestalten [Konrad u.a. 2012]. Das World Wide Web Consortium (kurz W3C) gibt eine branchenübergreifende beispielhafte Übersicht über industrielle Applikationen, welche in einem Produktionsumfeld eingesetzt werden [W3C 2010].

Vorteile einer semantischen Modellierung sind allgemein nach [John u. Drescher 2006]:

- **„Präzision des Anwendungswissens“** – Eine strukturierte Darstellung des betrachteten Wissensbereiches (im Weiteren auch *Domäne*) ermöglicht eine automatisierte Verarbeitung und Interpretation komplexer Informationen.
- **„Kollaboration“** – Explizit dargestellte semantische Modelle erlauben ein kollaboratives Wissensmanagement, indem die flexible Darstellung rollenspezifische Sichtweisen auf die Daten gestattet.
- **„Anwendungs- und Informationsintegration“** – Die umfassende Integration heterogener Informationen und Anwendungen ermöglicht die Formalisierung impliziten Wissens. Dies basiert auf den verfügbaren zusätzlichen Informationen der betrachteten Elemente, welche durch die semantische Beschreibung erreicht werden.

4.2.1.1 Ontologien

Ontologien sind das zugrunde liegende Konzept semantischer Technologien und sind wie bereits in Kapitel 2.1.4 beschrieben zur Wissensrepräsentation geeignet. Dabei sind zusätzlich zu den vorangehend beschriebenen Definitionen und Abgrenzungen nach [Konrad 2012] ferner essentielle Gemeinsamkeiten zu der objektorientierten Programmierung vorhanden. Unter anderem sind Bestandteile oder Eigenschaften einer Ontologie:

- eine hierarchische Anordnung der Begriffsdefinitionen verwendeter Konzepte einschließlich zugehöriger Attribute (analog zur Klassenstruktur)
- kennzeichnende Verbindungen (*Beziehungen*) zwischen Konzepten
- spezifische Ausprägungen definierter Begriffe (analog zu Objekten einer Klasse)
- Vererbungsregeln, wobei je nach Semantiksprache auch multiple Vererbung möglich ist
- Möglichkeit zur Inferenz beziehungsweise logisches Schließen
- und Integrität also die Sicherstellung der Modellkonsistenz

Für die Gestaltung einer Ontologie existiert kein standardisiertes Vorgehen. Dennoch beschreiben die in [Staab 2002, Hitzler u.a. 2007, Stuckenschmidt 2011] vorgestellten Handlungsanleitungen ein einheitliches Muster und unterscheiden sich lediglich hinsichtlich einzelner Detailschritte. Allen Ansätzen gemeinsam ist, dass zunächst aus Sicht der späteren Anwender die zu lösenden Anwendungsfälle und Anforderungen für die Ontologie spezifiziert werden. Darauf aufbauend wird die Ontologie schrittweise verfeinert und formalisiert. In dieser iterativen Vorgehensweise wird wiederholt die Abdeckung der gestellten Anforderungen mit der derzeitigen Ausprägung der Ontologie überprüft. Abschließend wird die Ontologie hinsichtlich der syntaktisch und semantisch korrekten Ausprägung evaluiert.

Die Speicherung der semantischen Daten findet oftmals in sogenannten *TripleStores* statt. Diese Datenbanken sind dabei in der Form Subjekt-Prädikat-Objekt aufgebaut. Den Vorgang des Transfers der Ontologie in das lineare Zeichenformat eines TripleStores wird als Serialisierung bezeichnet. Aufgrund der relativ einfachen Grundstruktur lassen diese eine universelle Speicherung von Daten zu, ohne ein restriktives Tabellenmodell zu besitzen oder zu fordern. Die Herausforderung besteht vielmehr in dem schnellen Zusammenführen relevanter Datensätze, also dem effizienten Abfragen des Datenbestandes und dem logischen Schließen auf neue Zusammenhänge. Angefragt werden die Datenbanken in der jeweilig definierten Ontologiesprache wie z.B. SPARQL (Kurzform für SPARQL Protocol And RDF Query Language), wobei durch die Einhaltung relevanter Standards auch mehrere Sprachen auf den gleichen Datenstamm zugreifen können [Konrad u.a. 2012]. Für auf OWL DL (vergleiche Kapitel 4.2.1.3) basie-

rende Ontologien werden sogenannte *konjunktive Anfragen* als zugrundeliegender Formalismus betrachtet. Diese können komplexe zusammengesetzte Strukturen beschreiben mit denen ausdrucksstarke Anfragen möglich sind.

4.2.1.2 Realisierungen semantischer Technologien

Die Modellierung und Pflege von Ontologien kann mit gängigen Texteditoren, beispielsweise in RDF (Kurzform für Resource Description FrameWork) oder der Web Ontology Language (OWL)⁴ erfolgen. Wahlweise existiert eine Vielzahl kommerzieller oder open-source Modellierungsumgebungen wie beispielsweise OntoStudio [Ontoprise 2011], Protégé [Gennari u.a. 2003] oder TopBraid [TopBraid 2011]. [Bergmann 2012] bietet auf seiner Webseite eine geordnete Übersicht von ca. 140 gebräuchlichen Werkzeugen. Ferner kann man semantisch annotierte MindMaps verwenden, welche automatisiert in Ontologiesprachen übersetzt werden. Dabei wird die Graphenstruktur der Mindmap mit semantischen Metainformationen hinterlegt, welche den Knoten spezifische Eigenschaften zuweist. Dies ermöglicht eine Modellierung der Ontologie mit gebräuchlichen und in der Industrie alltäglichen Werkzeugen [Ontoprise 2011b, Busse 2011]. [Sarker u.a. 2008] vergleichen und bewerten in ihrer Veröffentlichung unterschiedliche Lösungsansätze für diese Art der Ontologiemodellierung.

Für die weitere Nutzung des erzeugten Domänenmodells existieren prinzipiell zwei Möglichkeiten.

1. Benötigte Funktionalitäten können direkt in die individuelle Software integriert werden, was zum Beispiel durch das Hinzufügen vorhandener Bibliotheken wie Jena [McBride 2002] oder Jess [Jess 2011] realisiert werden kann.
2. Die geforderte Funktionalität wird von einem zentralen IT-Service bereit gestellt mit dem sich andere Software-Module verbinden.

⁴ Einen Überblick über veröffentlichte W3C-Standards für den Semantikbereich findet man in [W3C 2011]. OWL Standards sind in zwei Versionen in jeweils drei Untergliederungen spezifiziert worden. Für den erstellten Beitrag ist OWL DL (Kurzform für Description Logic) aufgrund seiner Eigenschaften und industriellen Verbreitung vorwiegend interessant und maßgeblich für das Verständnis.

Existierende Softwarelösungen können beide Lösungen gleichzeitig realisieren. Beispielsweise kann OntoBroker [Ontoprise 2011c, Angele 2012] sowohl als eingebundene Bibliothek als auch als eigenständige Serverapplikation fungieren. Einen Vergleich über die Leistungsfähigkeit und Skalierbarkeit gängiger Systeme stellt beispielsweise [OpenRuleBench 2011, Liang u.a. 2009] zur Verfügung.

4.2.1.3 Relevante Standards und Logiken

Die Kompatibilität zu existierenden Standards ist für die Wartbarkeit und eine spätere Erweiterung des Lösungssystems, sowie für die erneute Nutzung des modellierten Wissens von essentieller Bedeutung im Produktionsbereich [Hoffmeister u.a. 2011]. Im Zuge der Entwicklung des Semantischen Webs bei dem existierende Daten mit beschreibenden Metadaten vernetzt werden, wurden vom W3C mehrere aufeinander aufbauende Standards definiert [W3C 2011, Breslin u.a. 2010]. Darin sind beispielsweise die eindeutige Identifizierung von Elementen innerhalb Ontologien, die formale Beschreibungssyntax und eine graphenbasierte Anfragesprache⁵ festgelegt. Durch Einhaltung der festgelegten Regeln wird die Kompatibilität verschiedener Ontologien auch über Softwarelösungen hinweg sichergestellt.

Semantische Sprachen beruhen dabei meist auf Beschreibungslogiken (englisch Description Logic, kurz DL). Dies sind Formalismen zur Wissensrepräsentation und meist als Fragmente der Prädikatenlogik erster Stufe, welche eine Erweiterung der Aussagenlogik darstellt, realisiert.⁶ Die strikte Formalisierung erlaubt dabei ein automatisiertes Schlussfolgern auf neue Informationen aufgrund eines bestehenden Informationsbestandes. Vereinfacht dargestellt werden dabei Aussagen getroffen, die je nach Ausprägung einen bestimmten Wahrheitswert (*wahr* oder *falsch*) besitzen und miteinander verkettet werden können. Beschreibungslogiken haben oftmals einen syste-

⁵ Die Begriffe *Anfrage* und *Abfrage* werden im Weiteren synonym verwendet.

⁶ Im Gegensatz zur Prädikatenlogik erster Stufe sind Beschreibungslogiken in der Regel entscheidbar. Es existiert folglich ein Algorithmus welcher in endlicher Zeit herausfinden kann, ob Elemente der Sprache bestimmte Eigenschaften besitzen oder nicht.

matisch aufgebauten Namen, von welchem sich die in ihr erlaubten Sprachkonstrukte ableiten lassen.

Eine im Semantikbereich häufig verwendete DL ist \mathcal{ALC} (Attribute Language with Complement). Sie ist die Grundlage für RDF, OWL 1 und OWL 2 und besitzt die Grundbausteine Klassen, Individuen und Rollen, die miteinander in Beziehung gesetzt werden können. Dabei können als *Junktoren* \wedge (Konjunktion), \vee (Disjunktion) und \neg (Negation) verwendet werden. Als *Quantoren* sind der Existenzquantor \exists (die getroffene Aussage ist für mindestens einen möglichen Wert der betrachteten Variablen gültig) und der Allquantor \forall (die Aussage ist für alle möglichen Werte der Variable gültig) definiert. Der für OWL DL benötigte Formalismus wird durch die DL $\mathcal{SHOIN}(\mathcal{D})$ abgedeckt. Diese beinhaltet alle Sprachelemente von \mathcal{ALC} und behandelt zusätzlich weitere Konstrukte wie Kardinalitäten, Gleichheit und Ungleichheit von Individuen oder Rollenkonstruktoren [Hitzler u.a. 2007]. Eine umfassende Einführung in Beschreibungslogiken bietet [Baader u.a. 2007].

4.2.2 Semantik in der Produktion

Aufgrund der bereits genannten Vorteile werden Ontologien auch im Produktionsbereich eingesetzt. So können Ontologien durch ihre Struktur und die flexible Ausprägung zur Darstellung eines Produktionssystems über die gesamte Lebensdauer genutzt werden. Das formal strukturierte Modell stellt dabei eine einheitliche Datenbasis für die zu verschiedenen Zeitpunkten eingesetzten Software-Werkzeuge über den Lebenszyklus der Anlage zur Verfügung [Spath u. Lentes 2009].

[Hoffmeister u. Zapp 2011, Hoffmeister u.a. 2011] beschreiben die Applikation eines Semantischen MediaWikis in der Photovoltaik-Branche. Anhand der Planung von Versuchsexperimenten werden beispielhaft der Einsatz und die Vorteile eines ontologiebasierten Wikisystems dargestellt.

⁷ Dabei steht S für \mathcal{ALC} und Rollentransitivität, \mathcal{H} für Unterrollenbeziehung, \mathcal{O} für abgeschlossene Klassen, \mathcal{I} für inverse Rollen, \mathcal{N} für Zahlenrestriktionen und \mathcal{D} für Datentypen [Hitzler u.a. 2007].

Eine Vielzahl aktueller Arbeiten fokussiert sich auf die Produktentwicklung. [Fujiwara u.a. 2011] verwenden semantische Technologien, um Daten für die Produktgestaltung automatisiert zu strukturieren und mit intrinsischen Erfahrungen zu verbinden. Die dabei entstandene adaptive Wissensplattform verknüpft und organisiert verschiedene Dokumententypen, die für die Gestaltung neuer Produkte relevant sind oder waren. [Yingzhong u. Xiaofang 2009] sehen ein essentielles Problem für kollaboratives Produktdesign oder der Wiederverwendung und Anpassung vorhandener Designs in der fehlenden Information hinsichtlich der menschlichen Beweggründe (wie beispielsweise Produzierbarkeit oder Produktfunktionalität) der Designer. Sie nutzen auf OWL basierende Ontologien, um die physikalische, meist digitale Produktbeschreibung mit erklärenden strukturierten Meta-Daten anzureichern.

4.2.2.1 Ontologien im Montagebereich

Auch in dem Bereich der Montage konzentrieren sich viele Beiträge auf den Produktbereich. Ein Fokus ist dabei die Integration der Produkt- und Produktionsentwicklung. Es wurden ausgehend von konzeptionellen Anforderungen mehrere ähnliche Lösungsansätze gemeinschaftlichen Designprozesses von Prozessen beziehungsweise von Anlagen und Produkten entwickelt. Die einzelnen Produktkomponenten und die jeweiligen Verbindungen mittels Fügeverfahren zwischen den Komponenten werden in einer Ontologie abgebildet. Dadurch wird es möglich Verbindungen und Restriktionen automatisiert zu planen und zu überprüfen [Tallinen u.a. 2003, Moon u.a. 2005]. Zudem existieren ganzheitlich orientierte Ansätze, in welchen [Changjiang u.a. 2010] beispielsweise ein ontologiebasiertes 3D-System für die wissensgestützte Modellierung von Montagefunktionen und -verbindungen entwickeln, [Weiguo u.a. 2009] hingegen konzentrieren sich auf die semantische Modellierung erlaubter Produkttoleranzen, bei denen die geforderten funktionalen Eigenschaften immer noch gewährleistet sind.

Neben dem allgemeinen Produktsektor existiert auch eine Vielzahl von spezifischen Anwendungen im Montagebereich beziehungsweise im Abbilden von Montageanlagen.

4.2.2.2 Abbildungen von Montagesysteme und -anlagen

Einen Ansatz zur Einbettung von semantischen Metainformationen in Web Services zur verteilten Montage stellen [Delamer u. Lastra 2006] vor. Die Ontologie ermöglicht ein unscharfes, also ungenaues Zuordnen von Diensten innerhalb einer Serviceorientierten Architektur, in welcher mehrstufig unterteilte Montagemaschinen, -prozesse und -produkte definiert sind. Um eine schnelle Rekonfiguration des Produktionssystems zu erlauben, bilden [Terzic u.a. 2008] modulare Montagesysteme mittels Ontologien ab, welche sie in die Grundkonzepte *Produkt*, *Prozess* und *Maschine* unterteilen. Durch die Integration in ein Multi-Agentensystem wird eine unterstützte und schnelle Rekonfiguration bestehender Maschinen ermöglicht. [Berger u.a. 2005] untergliedern in ihrem Beitrag ein Wissensmanagementsystem der Montagedomäne in die fünf Bereiche *Primärmontage*, *Sekundärmontage*, *Materialien*, *Produkt* und *Produktionsmittel*. Zudem werden Erfahrungen der Mitarbeiter mittels einer Ontologie gefiltert in Datenbanken gespeichert und abgerufen.

In einer Reihe von Veröffentlichungen [Lohse u.a. 2006, Lohse u.a. 2006b, Lohse u.a. 2005, Lohse u.a. 2005b, Lohse u.a. 2004] stellt Lohse mit jeweils unterschiedlichen Schwerpunkten seinen ganzheitlichen Ansatz zur semantischen Modellierung konfigurierbarer Montageanlagen vor. Dabei werden (teils webbasiert) ausgehend von der Projektzielsetzung über die Prozess- und Produktspezifikation mehrere konzeptuelle Anlagendesigns erstellt, die automatisiert evaluiert werden. Dies ermöglicht eine schnelle transparente Betrachtung mehrerer Designalternativen und dient zur Unterstützung einer schnellen und fundierten Entscheidungsfindung.

[Ratchev u.a. 2007, Hirani u.a. 2006] beschreiben einen Ansatz zur wissensbasierten Zusammensetzung konfigurierbarer Montagesysteme, bei dem zunächst Kundenanforderungen an das Gesamtsystem systematisch abgeleitet und formalisiert werden. Darauf basierend wird eine funktionale Spezifikation des Montagesystems vorgenommen, die abschließend in eine Konfiguration der eigentlichen Systemkomponenten auf konzeptueller Ebene transformiert wird.

4.2.3 Fazit formalisiertes Wissensmanagement

Der ermittelte Stand der Technik hat zu einer Vielzahl aufschlussreicher semantischer Ansätze im Produktionsbereich geführt. Ontologien stellen einen wichtigen Ansatz zur Erfassung und Strukturierung impliziten Wissens und der transparenten und modularen Integration heterogener Datenquellen dar. Meist wird den bereits vorhandenen und genutzten Daten implizites Wissen der Produktionsmitarbeiter hinzugefügt. Durch diese zusätzlichen Metainformationen können die Daten auf eine neue Art und Weise verwertet werden. Besonders hinsichtlich der Systemmodellierung existieren auf den jeweiligen Anforderungsfall zugeschnittene spezielle Lösungen mit spezifischen Ausprägungen und Abgrenzungen der jeweiligen Ontologie.

Ermittelte Lösungsansätze fokussieren sich dabei jedoch nur auf einzelne relevante Teilbereiche der betrachteten Problemstellung ohne die Anforderungen des Anlagenanlaufs im Ganzen zu betrachten. Besonders häufig werden semantische Systeme zur modularen Abbildung von Produktionsanlagen genutzt. Allerdings werden diese in den untersuchten Ansätzen als meist statische Modelle zur Abbildung der Systemfähigkeiten genutzt ohne diese fortwährend mit anfallenden Produktionsdaten zu verknüpfen. Auch die Nutzung impliziten Wissens beschränkt sich auf die Verknüpfung mit spezifischen meist statischen Modellen. Implementierte Systeme sind dabei entweder stark auf einzelne Funktionalitäten oder spezifische Phasen des für die Arbeit relevanten Ausschnittes fokussiert.

Es konnte keine realisierte integrative Lösung ermittelt werden, welche die in Kapitel 3 abgeleiteten Anforderungen für alle Phasen des Anlagenanlaufs ganzheitlich erfüllen kann.

4.3 Spezifische Methoden und Instrumente zur Beherrschung des Anlagenanlaufs

Im Folgenden werden noch einige aktuelle Techniken und Methoden vorgestellt, die in Ansätzen in den vorliegenden Beitrag mit eingeflossen sind oder diesen während des

Entstehungsprozesses beeinflusst haben. Zunächst werden standardisierte Ansätze bei der Anlagenintegration analysiert, bevor auf den Nutzen einheitlicher Bewertungsmethoden und Vorgehensmodelle eingegangen wird. Abschließend werden noch einige Ansätze vorgestellt die speziell auf den Wissenserwerb und die anschließende -nutzung abzielen.

4.3.1 Standardisierung von Anlagen zur Risikominimierung

Standardisierung ist in allen Branchen ein wichtiger Ansatz zur Reduzierung der Time-to-Market und Minimierung des Risikos von Anlaufverzögerungen. Im Bereich der Photovoltaik und der Halbleiterindustrie sind dort einige Entwicklungen und ihre Auswirkungen detailliert beschrieben. So wird das Potential einer vereinfachten Anlagenintegration durch standardisierte Anlagenschnittstellen verdeutlicht. Dies kann die Anzahl zu implementierender Schnittstellen erheblich vermindern, erlaubt eine strukturierte und standardisierte Vorgehensweise in der Beschaffung und Integration der Anlagen, reduziert das Risiko fehlerhafter Schnittstellenimplementierungen und ermöglicht eine schrittweise Erweiterung der Fabrik [Meier u. Konrad 2009, Erdmann u. Dreiss 2006, Konrad u.a. 2010, Meier u. a. 2007].

[Frauenfelder 1999] beschreibt ausgehend von standardisierten Modulen und klar definierten Schnittstellen, die schrittweise Automatisierung als ein Lösungskonzept zum schnellen Ramp-up von Hochleistungsmontagesystemen. Dabei wird ausgehend von einem Baukastenprinzip bei der Anlagenspezifikation als auch bei Realisierung der Steuerungssoftware eine etappenweise Automatisierung des Systems angestrebt, bei der schrittweise manuelle Arbeitsschritte und Materialzuführungen ersetzt werden.

4.3.2 Einheitliche Bewertungs- und Vorgehensmodelle

Neben der Betrachtung von rein wirtschaftlichen Kennzahlen zeigt eine standardisierte Methode zur Ermittlung der Anlaufeffizienz mögliches Verbesserungspotential auf. Dabei wird die maximal erreichbare Leistungsfähigkeit des Produktionssystems in einer transparenten Art und Weise ermittelt und zur derzeitigen Leistung in Bezug gesetzt. Daraus lassen sich fokussierte Maßnahmen ableiten, um den Missstand zu beheben. Die

Umsetzung beziehungsweise die Auswirkungen der abgeleiteten Handlungen lassen sich wieder messen und damit hinsichtlich erreichter Erfolge verifizieren. Neben der Bestimmung des derzeitigen Projektstandes erlaubt diese Methodik unter anderem einen Vergleich mehrerer Projekte [Stender u.a. 2004, Dombrowski u.a. 2008].

Einen ähnlichen Ansatz stellen Reifegradmodelle dar, die mittels eines gegliederten Fragebogens die Prozessfähigkeit gezielt ermitteln. Diese liefern dann je nach Anwendung Rückschlüsse über den Grad des Entwicklungsstands der betrachteten Elemente. Damit kann sowohl die Institutionalisierung von Geschäftsprozessen als auch die Integrationsfähigkeit von Prozessmodulen strukturiert analysiert und bewertet werden. Diese Vorgehensweise liefert Erkenntnisse über potentielle Schwierigkeiten und lässt eine proaktive Vorgehensweise zur Vermeidung von Problemsituationen zu [Konrad u.a. 2010].

Die Entwicklung eines komplexen Systems zur Beherrschung und Optimierung des Produktionsanlaufs wird in [Fleischer u.a. 2004] erläutert. Dabei werden zunächst anfallende Daten erfasst und verdichtet, bevor sie basierend auf den modellierten Wechselwirkungen analysiert werden. Anschließend werden aussagekräftige Kennzahlen mithilfe vorhandener Modelle prognostiziert. Darauf aufbauend ist es möglich, auf vordefinierte technische, qualifikatorische oder organisatorische Maßnahmen zur Verbesserung zurück zu greifen.

Neben dem Fokussieren auf eine ganzheitliche Verbesserung des Anlaufs wird auch die Spezialisierung auf einzelne Phasen oder wiederkehrende oder unterstützende Tätigkeiten betrachtet. Nach [Näser u.a. 2006] sind für Automobilhersteller das Vorbereiten, Durchführen und Nachbereiten von Anlagenabnahmen aufgrund der Komplexität, unklarer Kompetenzzuweisung, mangelnder Koordination und nicht festgelegter Abläufe schwer beherrschbare Geschäftsprozesse. Die Unterstützung durch externe Projektteams und die Nutzung standardisierter Prozesse und Dokumentation verbessern den Abnahmeprozess erheblich und stellen die notwendige Transparenz über die Prozessschritte dar.

4.3.3 Wissensbasierte Ansätze

[Greer 2008] beschreibt ein Datenbanksystem in dem Erfahrungen und bewährte Techniken gespeichert und wiederverwendet werden können. Dabei ist die Nutzung der Datenbank organisatorisch in den Projektablauf verankert und zielt auf einen Wissenstransfer zwischen Projektteams ab. Mithilfe vorgeschlagener Schlagwörter zur Projektklassifizierung kann eine effiziente Suche relevanter Informationen realisiert werden. [Gust Loh 2008] gibt einen, in Anlehnung an die Wissensbausteine von [Probst u.a. 2001] strukturierten Überblick über Wissensmanagementsysteme und –techniken, die speziell für kleine und mittelständische Unternehmen geeignet sind. Dabei werden von der Großindustrie abweichende Anforderungen wie Ressourcenknappheit oder Organisationsstrukturen berücksichtigt.

[Terwiesch u.a. 2004] beschreiben die von Intel entwickelte [McDonald 1997] und in der Halbleiterindustrie erfolgreich eingesetzte Methode “Copy Exactly”, bei der während des Anlaufs die Feineinstellungen der Produktionsprozesse nicht verändert und keine Neuerungen der Anlagen übernommen werden. Dadurch wird der Lerneffekt bei der Fertigung hochkomplexer Produkte nicht unterbrochen und es führt langfristig zu einer Verbesserung der Gesamtleistung der Fabrik.

4.4 Fazit Stand der Wissenschaft und Technik

Es existiert eine Vielzahl an potentiellen IT-Lösungen mit unterschiedlichsten Ansätzen, um die Problematik eines erfolgreichen und zielführenden Anlagenanlaufs zu beherrschen. Stark auf die Planung und Vermeidung von Problemen bei der realen Anlage fokussierte Ansätze des Digitalen Fabrikbetriebes wie die Virtuelle Inbetriebnahme oder die Absicherung durch Logistiksimulation führen bereits in frühen Phasen des Lebenszyklus zu einem leistungsfähigen Montagesystem. Die Risiken beim Anlauf werden durch die virtuelle Absicherung deutlich gesenkt. Dennoch können wie bereits dargestellt auftretende Problemstellungen während des Anlagenanlaufs nicht vollständig analysiert und abgedeckt werden. Um die ermittelten Anforderungen zu erfüllen und

während des laufenden Anlagenanlaufs zu reagieren, ist folglich ein anderer Ansatz zu wählen.

Die Technologie des semantischen Wissensmanagement wurde als vielversprechende Methode zur Integration heterogener Daten und Erfassung, automatisierten Verarbeitung und Transfer von implizitem Wissen identifiziert. Speziell in der Abbildung der Systemdomäne mit Ontologien existieren mehrere unterschiedliche und ausgereifte Ansätze und Abgrenzungen. Auch zur Integration heterogener Daten und zur Externalisierung menschlichen Wissens wurden mehrere Ansätze realisiert. Bestehende Lösungsansätze haben einen meist statischen oder manuellen Charakter und sind nur bedingt für die Nutzung über alle Phasen des Anlagenanlaufs geeignet. Lediglich einzelne geforderte Funktionalitäten lassen sich mit bestehenden Methoden verwirklichen. Ein integrativer Ansatz, wie er zur Erfüllung der in Kapitel 3.5 ermittelten Anforderungen notwendig ist, konnte nicht ermittelt werden.

Standardisierung hinsichtlich Anlagen und Vorgehensmodellen bildet eine wichtige Basis für eine effiziente und effektive wiederholte Nutzung bei Anlaufprojekten. Diese Betrachtungen fließen in das in Kapitel 8 entwickelte Verfahren mit ein. Durch ein einheitliches Vorgehensmodell wird eine nachhaltige und transparente Nutzung angestrebt.

Aus den genannten Gründen wird ein integratives Verfahren entwickelt, das alle Aspekte berücksichtigt und eine wirtschaftliche Nutzung ermöglichen soll. Zunächst wird in folgenden Kapiteln das dem Verfahren zugrunde liegende Modell inklusive aller Teilmodule näher erläutert, bevor in Kapitel 8 das eigentlich entwickelte Verfahren zur vollständigen und nachhaltigen Nutzung des Modells vorgestellt wird.

5. Konzeption des Lösungsansatzes

Die Zielsetzung des Beitrages ist die Entwicklung eines Verfahrens zum semantisch unterstützten Anlagenanlauf am Beispiel von Montagesystemen. In diesem Kapitel werden die gesonderten Teile des entwickelten Konzeptes und ihr Zusammenspiel dargestellt, bevor in Kapitel 6 detailliert auf die Funktionalität und Aufbau der einzelnen Teilmodelle und deren Integration zu einem gemeinsamen Modell eingegangen wird. Die entwickelte und realisierte Ontologie wird in Kapitel 7 erläutert. Das Verfahren zur Nutzung des vorgestellten Modells wird abschließend in Kapitel 8 erläutert.

5.1 Struktur des entwickelten Lösungsansatzes

Der entwickelte Lösungsansatz beruht auf semantischen Technologien. Basierend auf einem Systemmodell der Anlagendomäne werden sowohl implizite Erfahrungen der Montagemitarbeiter als auch verfügbare heterogene Maschinendaten erfasst, gespeichert und verarbeitet. Die nachhaltige Nutzung und Anwendung des Modells über alle Phasen des Anlagenanlaufs soll den Zeitraum der Leistungssteigerung verkürzen und den Anlagenherstellern Wettbewerbsvorteile sichern.

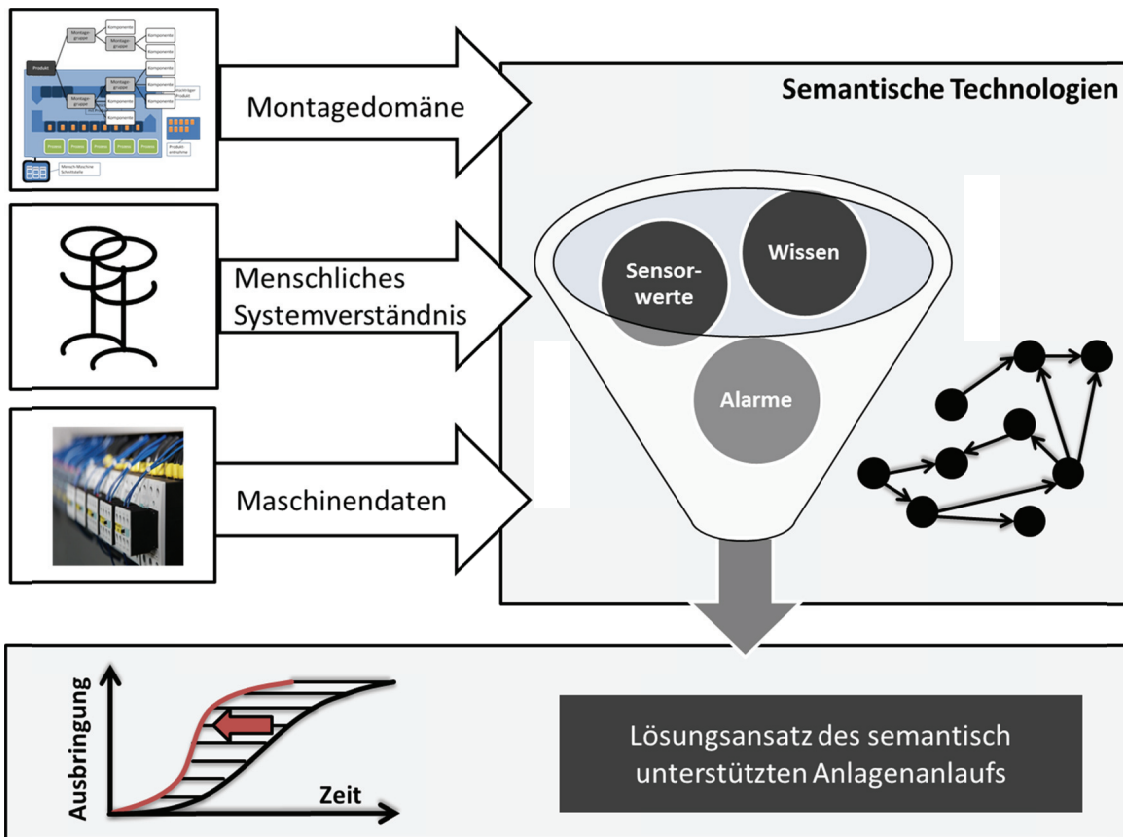


Abbildung 18: Lösungsansatz des semantisch unterstützten Anlagenanlaufs für Montagesysteme

Der entwickelte und auf aktuellen Standards basierende Ansatz lässt sich in fünf Basiselemente unterteilen. Die strukturellen Informationen der Montagedomäne über das Produkt oder die Maschine werden in einem überwiegend statischen Modell abgebildet (*Strukturmodell*). Implizite Erfahrungen der Produktionsexperten beispielsweise über Systemzusammenhänge oder Problemlösungsstrategien werden in einem *Verhaltensmodell* gespeichert. Dynamische Informationen wie Sensorwerte oder HMI-Eingaben der Mitarbeiter lassen sich in dem *Ereignismodell* darstellen und speichern. Alle abgebildeten Teilmodelle müssen zu einer gemeinsamen *Wissensbasis* integriert werden, welche abschließend von den Produktionsmitarbeitern flexibel genutzt werden kann (*Wissensverwertung*).

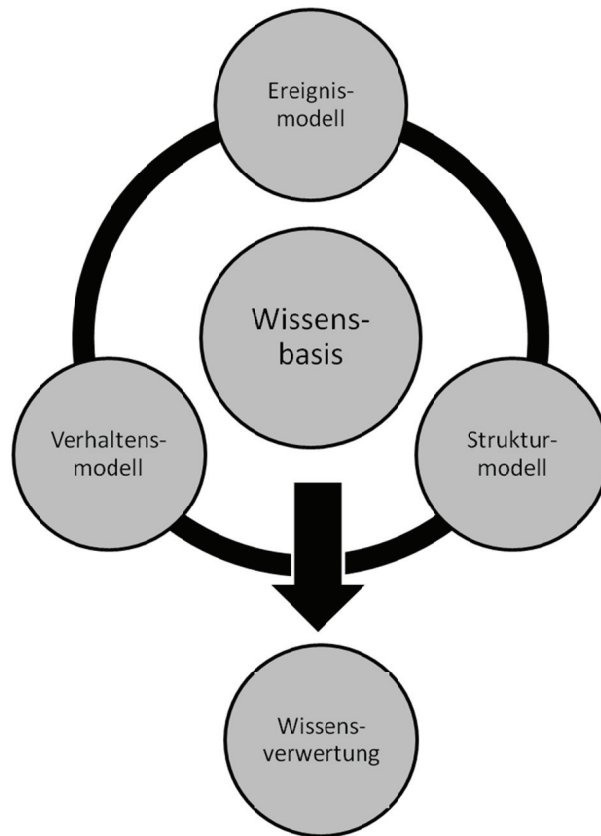


Abbildung 19: Schematischer Aufbau der entwickelten Teilmodelle des Lösungsansatzes

Der Aufbau des Gesamtsystems und die Untergliederung in nahezu selbstständige Teile garantiert die in Kapitel 3.5 geforderte Unabhängigkeit und Modularität der einzelnen Teile, sowohl bei der Modellierung, der Nutzung, als auch bei der Weiterverwendung und der Integration in andere Projekte.

Mit den vorgestellten Teilmodellen und ihrer Integration in ein nachhaltiges Gesamtkonzept ist eine Abdeckung der in Kapitel 3 abgeleiteten Anforderung an das Modell gewährleistet. Zudem wird durch die unabhängige Nutzung einzelner Systemteile eine frühe Verfügbarkeit der Lösung ermöglicht. Eine nachträgliche Integration einzelner Modellteile ist jederzeit durchführbar. Bevor nun die Modellteile explizit vorgestellt werden, sollen noch notwendige grundlegende Überlegungen zu einzelnen Teilen erläutert werden.

5.1.1 Graphenbasierte Entwicklung des Strukturmodells

Wie in Kapitel 4.2.1.1 beschrieben, existieren mehrere Möglichkeiten eine Ontologie zu generieren. Für die vorliegende Problemstellung ist der Einsatz einer an eine Mindmap angelehnten Struktur besonders geeignet, da diese Technik bei Produktionsexperten gerade zur Wissensstrukturierung oder Ideenfindung in der Gruppe oftmals bereits eingesetzt wird. Die Verwendung dieser Technik erlaubt der Nutzergruppe damit einen intuitiven Zugang zur Modellierung der Ontologie. Zur Realisierung dieses Ansatzes können grundsätzlich zwei leicht unterschiedliche Technologievarianten verwendet werden.

Variante 1- Die in [Sarker u.a. 2008] beschriebenen Ansätze zur Modellierung mit semantisch annotierten Mindmaps beruhen alle ausschließlich auf einer Erweiterung bestehender semantischer Softwaresysteme oder auf dem Einsatz spezifisch dafür entwickelter semantischer Lösungen. Die Funktionen, Einstellmöglichkeiten und Nutzung der untersuchten Lösungen erlauben je nach eingesetzter Software eine Vielzahl von unterschiedlichen Ausprägungen, welche alle auf die Darstellung der modellierten Semantik fokussiert sind. Durch die speziell auf die semantische Funktionalität hin entwickelte Software ist es möglich, einen hohen Funktionsumfang zu realisieren. So sind beispielsweise gefilterte Ansichten auf die Konzeptionshierarchie oder die Auflistung sämtlicher Instanziierungen spezifischer Konzepte möglich. Aufgrund der Bedienungskomplexität und der geringen Verbreitung in der Industrie sind sie für fachfremde Personen jedoch oftmals nicht intuitiv verständlich oder nutzbar.

Variante 2 - [Ontoprise 2011b, Busse 2011] hingegen entwickeln in ihren Ansätzen keine neuen speziellen Lösungen, sondern erweitern bereits bestehende Werkzeuge zur Wissensmodellierung mit semantischen Auszeichnungsfunktionen. Dadurch werden mit gängigen Werkzeugen generierte Mindmaps durch eine Erweiterung mit semantischen Metainformationen angereichert. Diese so entwickelte Ontologie wird anschließend mithilfe von Skripten in die jeweilige Ontologiesprache übersetzt. Durch die semantische Erweiterung industriell erprobter Softwaresysteme, mit denen die Modellierung der Mindmap erfolgt, wird ein relativ einfacher Zugang zur Ontologiemodellierung ermöglicht. Die Navigation erfolgt dabei intuitiv durch die Graphenstruktur der Mindmap.

Allerdings wird durch die Festlegung bereits bestehende Werkzeuge zu erweitern, die Möglichkeiten zur semantisch unterstützten Darstellung und Navigation erheblich eingeschränkt.

In Abbildung 20 sind beide Varianten hinsichtlich ihres semantischen Funktionsumfangs und ihres Verbreitungsgrades innerhalb der Industrie eingeordnet. Dabei wird der etwas umfangreichere Funktionsumfang von Variante 1 bei gleichzeitiger deutlich schlechter Verbreitung gegenüber Variante 2 erkennbar.

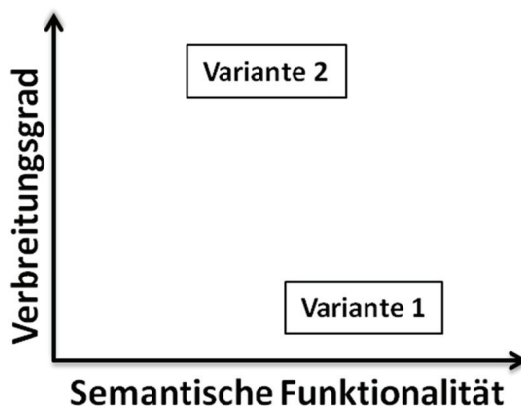


Abbildung 20: Einordnung der vorgestellten Varianten 1 und 2 im Vergleich

In Kapitel 3.3 verdeutlichen die abgeleiteten Anforderungen die entscheidende Bedeutung der Mitarbeiter für einen erfolgreichen Produktionsanlauf. Aus diesen Gründen wird **Variante 2** für den entwickelten Lösungsansatz gewählt. Es wird also zunächst bewusst auf verfügbare semantische Funktionalitäten verzichtet, um den beim Anlagenanlauf beteiligten Produktionsexperten einen möglichst einträglichen Zugang zu der entwickelten Lösung zu ermöglichen. Durch die Verwendung bereits bekannter Techniken und Systeme soll die Barriere zur eigenen Modellierung für Produktionsexperten möglichst weit gesenkt werden. Aus diesem Grund wird ein Ansatz gewählt, welcher auf in der Industrie bereits eingesetzte und bekannte Software zur Mindmap-Modellierung aufsetzt und diese etablierten Softwaresysteme mit semantischen Zusatzfunktionen versieht.

Aufgrund der Kompatibilität mit existierenden Standards ist auch ein Import des initial generierten Modells in andere Ontologieeditoren möglich. Mit diesen können dann vorhandene Zusatzfunktionen genutzt werden. Anschließend kann das modifizierte Modell mit dem in Variante 2 beschriebenen Lösungsansatz weiter verwendet werden. Diese Vorgehensweise ist in Kapitel 7.2 beschrieben.

5.1.2 Konzeption des Ereignismodells

Bei dem *Ereignismodell* tritt die Frage auf, in welchem Umfang Maschinendaten erfasst und in der Datenbank gespeichert werden sollen. Eventuell sind nicht alle anfallenden Daten von Belang für einen erfolgreichen Anlagenanlauf und werden im weiteren Verlauf nicht genutzt. Es kann zwischen einer Speicherung aller dynamischen Daten und der Extraktion und Speicherung der als relevant erachteten Datensätze variiert werden. Aufgrund der spezifizierten Anforderungen in Kapitel 3.5 werden drei Lösungsvarianten aufgestellt, beschrieben und bewertet.

Variante 1 beschreibt die Erstellung eines umfassenden Maschinenmodells⁸, das eine Erfassung und Zuordnung aller auftretenden Messwerte erlaubt. Anschließend werden relevante Daten für die jeweiligen Anwendungsfälle extrahiert und in der Datenbank (kurz DB) gespeichert. Die Extraktion ist als Datenfilter zu verstehen, der einmalig konfiguriert werden muss. Neu anfallende Daten werden im Weiteren automatisch gefiltert und entsprechend der vorgenommenen Einstellung gespeichert oder verworfen. Diese Methode bietet den Vorteil, prinzipiell alle verfügbaren Maschinendaten speichern zu können, was eventuell zu einem späteren Zeitpunkt relevant werden kann. Für das Hinzufügen beziehungsweise Ausschließen von Datensätzen ist lediglich eine Anpassung des Extraktionsautomatismus erforderlich. Gleichzeitig wird aber nur der derzeit interessierende und damit für eine spätere Verwertung tatsächlich benötigte und

⁸ Unter einem umfassenden Modell versteht man hier die detaillierte Modellierung aller verfügbaren Datenquellen. So werden alle Sensoren und Parameter die in der Anlage installiert sind und alle verfügbaren Messgrößen modelliert, auch wenn sie scheinbar für einen erfolgreichen Anlagenanlauf vordergründig wenig Relevanz besitzen. Dabei erlaubt die Modellierung der Datenquellen eine spätere Zuordnung erfasster Daten zu den jeweiligen Elementen des Maschinenmodells. Für nicht modellierte Elemente können folglich Daten lediglich erfasst, aber nicht zugeordnet werden, was eine weitere Verwendung verhindert.

genutzte Datenbestand persistent gespeichert. Nachteilig wirken sich der hohe Modellierungsaufwand zur Erstellung des Maschinenmodells und der manuelle Aufwand zur Datenextraktion aus.

Variante 2 umfasst die Erstellung eines umfassenden Maschinenmodells und die vollständige Erfassung, Zuordnung und Speicherung aller dynamischen Daten. Erst bei Zugriff auf den vollständigen Datenbestand werden diese auf wesentliche Daten beschränkt oder verdichtet ausgegeben. Dieses Konzept bietet den Vorteil, alle empfangenen Daten nachhaltig zu speichern. Dabei können auch nicht primär benötigte Datensätze zu einem späteren Zeitpunkt verwertet werden. Es ist möglich, neu auftretende oder für ein Folgeprojekt relevante Fragestellungen anhand der erfassten und zunächst nicht betrachteten Daten zu untersuchen. Unvorteilhaft wirkt sich hier der ebenso hohe Modellierungsaufwand zur Modellerstellung wie in Variante 1 aus. Zusätzlich ist noch ein sehr hoher Speicherbedarf für die persistente Sicherung aller anfallenden Daten notwendig. Vordergründig fällt die Extraktionskonfiguration weg, allerdings muss immer noch für jeden Anwendungsfall der benötigte Datenbestand identifiziert werden, was einen ähnlich hohen Aufwand nach sich zieht.

Variante 3 beschränkt bereits das Maschinenmodell auf relevante Datenquellen. Folglich können auch nur diese erfasst und gespeichert werden. Vorteilhaft sind die Reduzierung des Modellierungsumfangs und die geringere benötigte Speicherkapazität für erfasste Datensätze. Allerdings muss das Modell bereits zu Beginn auf den jeweiligen Einsatz hin erheblich eingeschränkt werden, was nur in einer subjektiven Art und Weise möglich ist. Zudem sind für nicht abgebildete Objekte erfasste Daten nicht zuordenbar und eine spätere Änderung des Modells ist nur unter größerem Aufwand möglich.

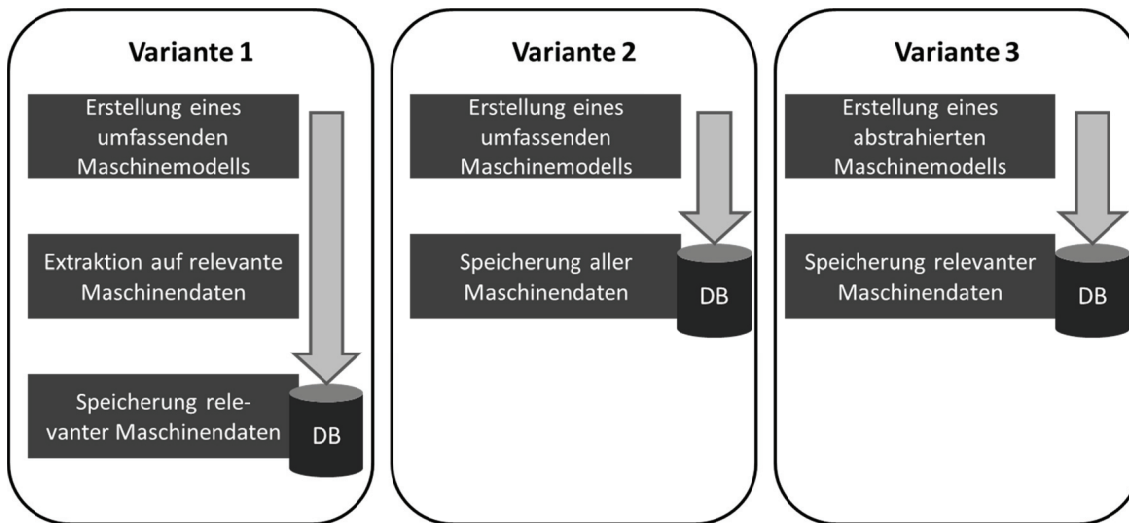


Abbildung 21: Drei unterschiedliche Möglichkeiten der Datenerfassung, -extraktion und -speicherung

Ausschlaggebend für die Bewertung der beschriebenen und in Abbildung 21 dargestellten Varianten sind dabei vor allem die **Komplexität des Maschinenmodells (a)** als auch die **Menge anfallender Daten (b)** über den Anlagenanlauf.

- a. Aufgrund der Vielfalt an möglichen Maschineneinstellungen allein in der Speicherprogrammierbaren Steuerung (kurz SPS) ist eine komplette Abbildung aller Einstell- und Auswertemöglichkeiten mit semantischen Technologien weder wirtschaftlich möglich noch zielführend. Exemplarisch wird eine, in [Beckhoff 2012] vorgestellte industrielle Lösung untersucht, welche zur Steuerung und Regelung von Achsen oder synchronisierter Achsgruppen verwendet wird. Dabei sind allein über 70 verschiedene Fehlercodes für die direkte Achssteuerung dokumentiert. Zusammen mit weiteren Fehlerarten wie Regler- oder Antriebsfehler stellt allein die Vielfalt bereitgestellter Fehlercodes eine für die betrachtete Problemstellung nicht zielführende Menge an Informationen zur Verfügung. Zudem können betrachtete Montagesysteme aus einer Vielzahl unabhängiger SPS-Steuerungen bestehen.
- b. Da in der Realität der Anlagenanlauf von Montagesystemen mehrere Monate dauern kann und dabei schon allein aufgrund der einzelnen Achsbewegungen sehr viele Daten anfallen, ist es nicht zweckmäßig, den Datenbestand in seiner Gesamtheit zu

speichern.⁹ Zudem ist der Informationsgehalt einzelner Datensätze sehr unterschiedlich zu bewerten. Bei einem vergleichsweise eingeschwungenen System bringen Informationen über jede Ein- und Ausfahrbewegung aller montierten Achsen nicht notwendigerweise neue Erkenntnisse und müssen deshalb nicht aufgezeichnet werden. Allerdings ist beispielsweise das Erfassen der wichtigsten Alarme essentiell, um Wissen über den Zustand der Anlagen und der Systemzusammenhänge zu erlangen. Wesentliche Ereignisse können dabei für alle Maschinenelemente auftreten.

Aus diesen genannten Gründen der praktischen Anwendbarkeit wird **Variante 3** gewählt und für die online-Erfassung von Daten im Späteren genutzt. Dabei ist eine zusätzliche Reduzierung des manuellen Modellierungsaufwandes anzustreben, um eine wirtschaftliche Nutzung des Modells zu ermöglichen.¹⁰

Neben der Erfassung und Speicherung der Maschinendaten wurden HMI-Eingaben der Mitarbeiter - wie Änderungen einzelner Parameter oder Rückmeldungen bei Ereignissen wie Alarmen - und weitere Softwaresysteme als potentielle Datenquellen identifiziert. Eine Verwertung der dort bereitgestellten Informationen wird innerhalb des Ereignismodells realisiert.

⁹ Nach [Frauenfelder 1999] haben Anlagen in der Hochleistungsmontage eine Taktzeit von bis zu einer Sekunde und fertigen über 3 Millionen Produkte pro Jahr. Eingesetzte einzelne Montagezellen haben bei dem vorgestellten Beitrag jeweils bis zu 42 Prozesse, bei denen jeweils bis zu vier Werte gleichzeitig überprüft werden. Dies kann im Extremfall allein bei den betrachteten Inspektionswerten bereits bei drei verketteten Zellen zu einer Datenrate von über 1.8 Millionen Daten pro Stunde führen. Hinzu kommen weitere Daten, wie alle gemessenen Werte der einzelnen Achsbewegungen, was zusammenfassend zu einer Vielzahl an verfügbaren Daten führt.

¹⁰ Hier ist zu erkennen, dass die Abgrenzung der Teilmodelle unscharf ist, da Sensoren und Parameter, die als relevant identifiziert werden, im Strukturmodell modelliert werden müssen, allerdings für den Inhalt und Umfang des Ereignismodells maßgeblich sind. Auftretende Ereignisse zu den jeweiligen Parametern und Sensoren werden im vorgegebenen Format ausschließlich in dem Ereignismodell gespeichert und zu ihrer zugehörigen Modellentität im Strukturmodell referenziert.

5.1.3 Fokussierung des Verhaltensmodells

An diesem Punkt muss zunächst der Fokus des Verhaltensmodells geklärt werden. Für den Anlagenanlauf sind insbesondere die jeweiligen Beziehungen zwischen Maschinenelementen von Bedeutung. Dieses Wissen über die Wechselwirkung innerhalb der Montagedomäne wird mittels zweier grundlegender Techniken modelliert.

- **Systembeziehungen zwischen Elementen des Strukturmodells** – Hierbei werden typisierte Verbindungen zwischen zweien oder mehreren Elementen generiert. Diese Art und Weise erlaubt es, Produktionsmitarbeitern ihr Wissen über die jeweilige Anlage, die Produkte und Prozesse und ihre Beziehungen untereinander explizit zu formulieren. Da die Modellierung der Fakten vorwiegend von Mitarbeitern direkt an der Maschine vorgenommen wird, ist eine zweiteilige Lösung favorisiert. Zum einen ist die Modellierung von Systembeziehungen direkt innerhalb des Strukturmodells erlaubt. Zum anderen können auch Relationen während des Anlagenanlaufs direkt in der Softwarelösung instanziiert werden ohne im Strukturmodell explizit angegeben zu werden.
- **Regeln für automatisiertes Schlussfolgern** – Wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben und in Kapitel 3.3.3 gefordert, wird die automatische Wissensgenerierung mittels logischen Schlussfolgerns realisiert. Über ein spezifiziertes Regelwerk wird die existierende Struktur der T-Box und die Fakten der A-Box analysiert und neue Elemente generiert. Durch Regeln sind Produktionsmitarbeiter in der Lage aufgrund definierter Prämissen allgemeingültige Folgerungen formalisiert auszudrücken. Aufgrund der Komplexität wird die Modellierung direkt in der jeweiligen Ontologiesprache vorgenommen, um die volle Mächtigkeit der Sprache zu nutzen. Zudem ist aufgrund der Vielschichtigkeit davon abzuraten, Regeln ad-hoc während der betriebenen Maschine zu ändern oder zu implementieren. Dennoch muss aufgrund der geforderten Flexibilität die Einspielung neuer oder aktualisierter Regeln zu beliebigen Zeitpunkten innerhalb des Anlagenanlaufs möglich sein.

5.1.4 Semantisches Integrationskonzept

Ontologien können in verteilten Systemen getrennt entwickelt und anschließend zusammengeführt werden. Dabei kann für jedes Teilmodell spezifisches Vokabular der jeweiligen Experten verwendet werden. Allerdings ist die Integration in eine gemeinsame Ontologie aufgrund unterschiedlich verwendeter Definitionen und ungleichem strukturellem Aufbau immer noch relativ aufwändig und komplex. Derzeit existieren für dieses Vorgehen eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden mit spezifischen Vor- und Nachteilen [Kai u. Steele 2009].

Zur Umgehung des Problems wird eine gemeinsam geteilte Ontologie erstellt, welche die Teilmodelle abbildet und von allen gemeinschaftlich verwendet wird. Dabei bauen alle einzelnen modularen Teilmodelle auf einer gemeinsamen T-Box auf und verwenden soweit möglich auch dieselben Fakten der A-Box. Durch die Vernetzung wird auf eine komplette Separierung der einzelnen Modelle verzichtet¹¹, jedoch wird durch dieses Vorgehen die integrative Nutzung der semantischen Elemente über alle Modelle gewährleistet. Eine graphische Aufteilung der einzelnen Modelle kann dennoch über die Anordnung und Strukturierung innerhalb der Mindmap vorgenommen werden. So werden die jeweiligen Modelle in separaten Zweigen des Graphen modelliert.

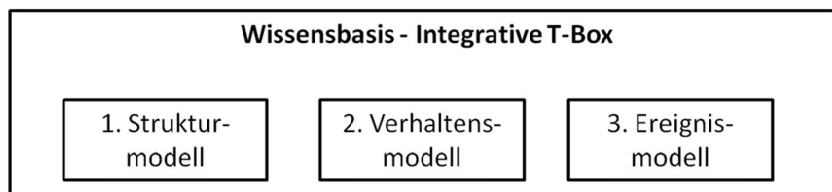


Abbildung 22: Gemeinsam verwendete T-Box als semantisches Integrationskonzept der drei vorgestellten Modelle.

¹¹ Dies bedeutet, dass eine Änderung in einem Modell (z.B. Strukturmodell) auch gewisse Auswirkungen auf andere Modelle (z.B. Verhaltensmodell) hat.

5.2 Zusammenfassende Darstellung des Lösungsansatzes

Die **Wissensverwertung** der gesammelten Informationen erfolgt mit Hilfe von *konjunktiven Anfragen* in der jeweiligen Ontologiesprache. Da eine möglichst hohe Flexibilität benötigt wird, ist die volle zur Verfügung stehende semantische Funktionalität notwendig. Zudem erlaubt dies, wie in Kapitel 4.2.1.1 beschrieben, ausdrucksstarke Strukturen, mit denen die in Abbildung 23 dargestellten Teilmodelle einzeln oder integriert angefragt werden können.

In Abbildung 23 sind die durchgeführten und erläuterten Schritte zur konzeptuellen Spezifikation des Lösungsansatzes zusammenfassend dargestellt.

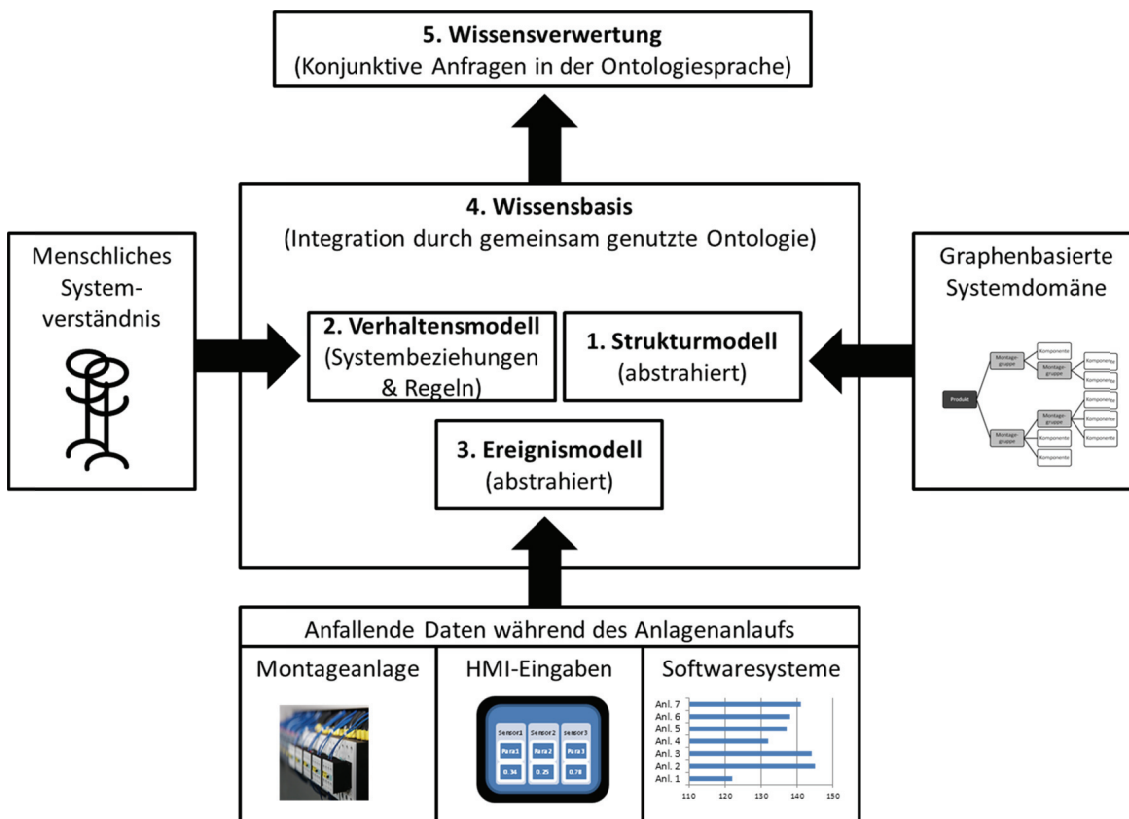


Abbildung 23: Konzeptuelle Darstellung des entwickelten Lösungsansatzes

Ausgehend von diesen Festlegungen wird in Kapitel 6 die Abgrenzung und grundsätzliche Funktionsweise der Teilmodelle detailliert erläutert, bevor im anschließenden Kapi-

tel 7 die spezifische Ausprägung mit den semantischen Sprachen und Werkzeugen dargestellt wird.

6. Erstellung der einzelnen Teilmodelle

Dieses Kapitel fokussiert sich auf die prinzipielle Sichtweise und Inhalt der Modelle und die Abgrenzung untereinander. Da die Ausprägung der eigentlichen Ontologie relativ stark von der eingesetzten semantischen Sprache abhängig ist, kann man dieses Kapitel als abstrahierte Erläuterung zu im weiteren Verlauf angewandten Modellierungsprinzipien verstehen, welche auch auf andere Sprachen transferiert werden können. Lediglich beim Aufbau des Regelwerkes wird bereits auf die eingesetzte Ontologiesprache Bezug genommen. Die eigentlich entwickelte Ontologie und Realisierung mit semantischer Middleware wird in Kapitel 7 detailliert erläutert.

In folgenden Unterkapiteln wird ausgehend von den bereits erläuterten konzeptionellen Überlegungen zunächst das Strukturmodell dargestellt, bevor auf das Verhaltens- und das Ereignismodell eingegangen wird. Anschließend wird die Integration der Modelle in einer gemeinsamen Wissensbasis und die Verwertung der gespeicherten Informationen erläutert.

6.1 Modellierung der strukturellen Informationen

Wie in Kapitel 3.1 dargestellt, ist es notwendig, die Systemdomäne für den Anlagenanlauf inklusive aller relevanten Informationen zielgerichtet darzustellen und modular abzubilden. Diese strukturellen Informationen stellen dabei den Kontext für alle weiter modellierten oder empfangenen Daten wie formalisierte Mitarbeitererfahrungen oder dynamische Sensorinformationen bereit. In dem *Strukturmodell* sind alle statischen Informationen, welche sich nicht ständig während der Produktion verändern, beinhaltet. Beispiele sind Produktdefinitionen und zugehörige Arbeitspläne, Maschinenspezifikationen inklusive Sensoren und die eigentlich wertschöpfenden Montageprozesse. Der gesamte Aufbau ist dabei modular gegliedert, um eine Integration weiterer Modellteile oder den Austausch einzelner oder mehrerer Komponenten zu ermöglichen.

6.1.1 Hierarchisch strukturiertes Domänenmodell

Das statische Modell der Montagedomäne bildet die drei essentiellen Kernkomponenten *Produkt*, *Prozess* und *Maschine* (im weiteren Verlauf wird auch der Begriff *System* synonym dazu verwendet) mehrstufig strukturiert ab. Die Grundstruktur ist in ein Domänenmodell, welches hierarchisch geordnet ist (Produkt, Prozess, System; dabei ist die Konzeption an [Lohse u.a. 2005b] angelehnt) und in verteilt modellierte Konzepte (Datenwerte, Parameter) untergliedert.

In Abbildung 24 ist das Gesamtkonzept des strukturellen Domänenmodells dargestellt. Für jedes der spezifizierten Konzepte ist eine Vielzahl an spezifischen Ausprägungen expliziter Instanzen möglich. Zwischen allen modellierten Elementen existiert eine Vielzahl an Verbindungen innerhalb gleicher und unterschiedlicher Granularitätsstufen was durch die $k:l$ und $n:m$ -Beziehung (wobei $k, l, n, m \in \mathbb{N}$) verdeutlicht wird. Es können also anhand einer vorgegebenen Grundstruktur eine Vielzahl an Produkten, Prozessen und Maschinen modelliert und in Beziehung gesetzt werden.

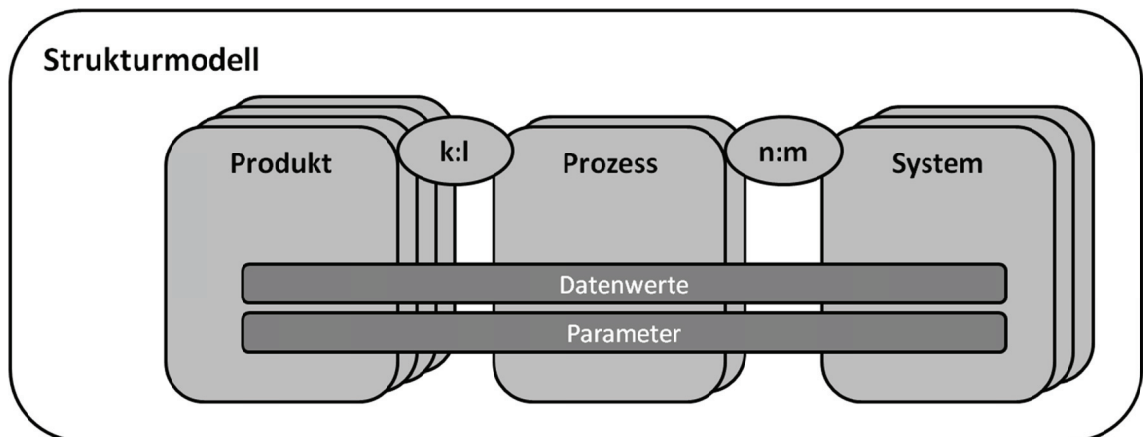


Abbildung 24: Konzeptionelle Darstellung des entwickelten Domänenmodells für den Anlagenanlauf

6.1.1.1 Produktdefinition

An diesem Punkt wird eine hierarchische Repräsentation der Produkte, ihrer Varianten und jeweiligen Komponenten abgebildet. Die Verbindung zwischen zwei oder mehreren Komponenten wird stets durch einen Montageprozess hergestellt. Produktspezifische Qualitätskennzahlen oder -merkmale wie Dimensionsspezifikationen oder Merkmalscharakteristika können je nach Ausprägung quantitativ oder qualitativ abgebildet werden. Die finale Repräsentation der Produktspezifikation resultiert in einem Arbeitsplan in Form einer einfach verketteten Liste, die zur Fertigung notwendige Sequenz atomare Prozessschritte, inklusive erforderlicher produktspezifischer Einstellungen der jeweiligen Komponenten beinhaltet.

6.1.1.2 Darstellung der Prozesse

Innerhalb dieser Konzepte werden die diversen Füge-, Handhabungs- und Inspektionsprozesse dargestellt und die jeweilig notwendigen oder erlaubten Einstellmöglichkeiten spezifiziert. Prozesse werden entsprechend ihrer charakteristischen Merkmale in Prozessklassen (beispielsweise Inspektions- oder Montageprozess) klassifiziert. Prozessklassen an sich können hierarchisch unter Einbeziehung der Vererbung aufgebaut werden.

6.1.1.3 Maschinendefinition

An dieser Stelle wird der reale Maschinenaufbau im Sinne von Kapitel 3, Abbildung 11 modelliert. Dabei wird die physikalische modulare Struktur der Montageanlagen mit ihren Sensoren und Aktoren in einem hierarchischen Modell nachgebildet. Ausgehend von dem Gesamtsystem (im Weiteren auch *System* genannt) werden einzelne *Anlagen* (im Weiteren auch *Stationen*) entsprechend Abbildung 10 miteinander verbunden, die eine separate Montageanlage repräsentieren. Innerhalb einer Montageanlage befinden sich dann mindestens eine, meist mehrere *Prozessstationen*, die eine modulare Integrationshülle inklusive Steuerungstechnik für einen oder mehrere wertschöpfende Prozesse bereitstellen. Eine Betrachtung des automatisierten Materialflusses ist auf-

grund der gesonderten Problemstellung nicht notwendig und deshalb nur indirekt durch Sensorwerte oder Achsbewegungen möglich.¹²

6.1.2 Verteilt modellierte Konzepte

Neben den abgegrenzten, bereits vorgestellten Konzepten zur Darstellung der Montage-domäne werden auch verteilt modellierte Konzepte für empfangene Informationen (*Datenwerte*) und Einstellmöglichkeiten (*Parameter*) benötigt. Diese können auf unterschiedlichen Hierarchiestufen angesiedelt sein und einen Bezug zu einzelnen oder mehreren der bereits vorgestellten Konzepte besitzen. Sowohl Parameter als auch Datenwerte sind dabei verteilt modellierbar und können zu den jeweiligen Elementen des Steuerungssystems verbunden werden. Dadurch wird eine automatisierte Zuordnung der empfangenen Werte zu dem Maschinenmodell realisiert. Die verteilte Modellierung ermöglicht den Produktionsmitarbeitern ein für sie intuitives Gliedern und Abbilden der jeweilig relevanten Informationen innerhalb der einzelnen Teilmodelle. Je nach Anwender kann der gleiche Parameter Modellierungen in unterschiedlichen Domänen bedingen. Beispielsweise kann ein einzelner Parameter für einen Prozessingenieur entscheidend für eine hohe Reproduzierbarkeit eines Prozesses, für einen Produktioningenieur aber ein entscheidendes Qualitätskriterium eines Produktes darstellen. Durch die verteilte Modellierung wird es ermöglicht, dass die Nutzer in der jeweiligen Konzeptdomäne den für sie relevanten Teil abbilden. Die Integration der jeweiligen Teilmodelle in ein konsistentes Gesamtmodell erfolgt dabei automatisiert nach der Modellierung.

6.1.2.1 Datenwerte

Als Datenwerte (im weiteren auch Messwerte genannt) werden alle empfangenen Daten des Systems, der Maschine, der Prozesse oder umgebender Systeme definiert, welche nur gelesen und empfangen werden, folglich nicht direkt gesetzt werden können. Exemplarisch können hier Resultate eines Inspektionsprozesses genannt werden, bei

¹² Die Einzelverfolgung von Produkten wird in Kapitel 7.1.2.1 skizziert, was auch einen Rückschluss auf den Materialtransport erlaubt. Lediglich Förderbänder und Werkstückträger werden nicht weiter betrachtet da sie für den Anlagenanlauf meist eine von der restlichen Anlage gesonderte Problematik darstellen.

denen das Qualitätsergebnis des Prüfungsprozesses lediglich empfangen und interpretiert werden kann. Aber auch alle weiteren Sensoren welche lediglich als Datenquelle dienen und nur indirekt beeinflusst werden können, sind in diesem Konzept angesiedelt.

6.1.2.2 Parameter

Als Parameter werden im Folgenden alle Einflussfaktoren oder Steuergrößen definiert, welche sich einstellen lassen oder kontrolliert beeinflusst werden können. Darunter fallen sowohl Einstellmöglichkeiten einzelner Prozesse wie Klebedauer oder Greifhöhe, systemweite Konfigurationsmöglichkeiten für die ganze Maschine wie zentraler Luftdruck, aber auch produkt- und variantenabhängige Spezifikationen wie die Breite einzelner Klebelinien oder die Anzahl der Klebepunkte. Zudem können auch imaginäre Parameter wie die Aggregation mehrerer Werte oder bestimmte Qualitätsmerkmale als Parameter definiert werden. Die Justierung kann in unterschiedlichen Granularitätsstufen erfolgen. Es ist möglich, sowohl skalare Konfigurationen $\{1,2,3,\dots,10\}$ als auch attributive Einstellungen (A_n oder A_{us}) abzubilden.

Zur Festlegung produktspezifischer Parameter lassen sich die Werte in parametrisierten Attributrelationen speichern. Die weitere Nutzung der modellierten Informationen kann je nach Anwendungsfall produktunabhängig als auch produktspezifisch erfolgen.

6.2 Abbilden des Expertenwissens

Bei der Abbildung impliziten und expliziten Wissens der Produktionsmitarbeiter werden die Schwerpunkte auf der Darstellung realer Systemzusammenhänge und die Definition von Regeln zur automatisierten Wissensverwertung gelegt. Mit dem hinterlegten Regelwerk ist eine weitere Nutzung manuell spezifizierter Informationen möglich.

6.2.1 Manuell definierte Zusammenhänge

Relationen zwischen einzelnen Konzepten oder Instanzen werden mit typisierten Verbindungen abgebildet. Dabei können Instanzen gleicher oder unterschiedlicher Kon-

zepte aller Granularitäts- und Hierarchiestufen miteinander verbunden werden. Auch sind mehrere unterschiedliche Beziehungen zwischen denselben Instanzen möglich. Relationen ausschließlich auf Konzeptebene oder ausschließlich zwischen Instanzen sind ebenfalls realisierbar. Abbildung 25 illustriert einen Ausschnitt eines Strukturmodells mit drei Instanzen (*Produkt 1*, *Prozess 1*, *System 1*), zugehörigen Attributen und unterschiedlichen Datenwerten und Parameter.

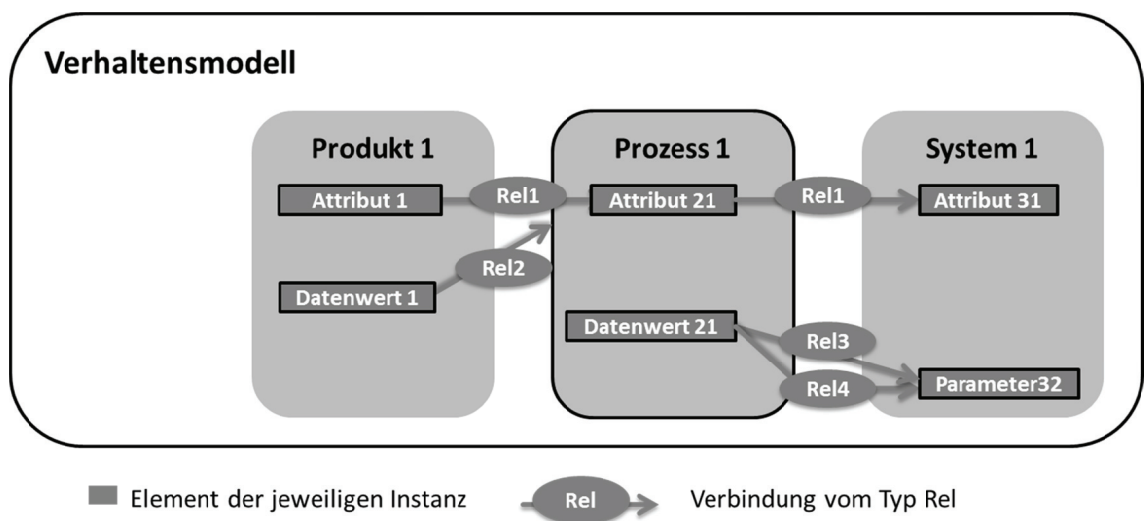


Abbildung 25: Exemplarische Darstellung möglicher Systemzusammenhänge bei denen die gleiche Relation zwischen verschiedenen Instanzen beziehungsweise Attributen verwendet wird (*Rel 1*), unterschiedliche Hierarchiestufen miteinander verbunden werden (*Rel 2*) und mehrere Verbindungen zwischen denselben Elementen definiert sind (*Rel 3* und *4*) [Konrad u.a. 2012b].

6.2.1.1 Schemata konzeptspezifischer Verbindungen

Die Ausprägung möglicher Verbindungen zwischen Instanzen kann mittels Schemata bereits im Vorfeld definiert und festgelegt werden. Dafür werden erlaubte Verbindungstypen für die jeweiligen Konzepte definiert. Sämtliche Instanzen der Konzepte können dann nur die spezifizierten Verbindungstypen realisieren. In der Ontologie ist dies durch Festlegung in der T-Box (vgl Kapitel 2.1.4) möglich.

Beispielsweise können zwischen Inspektions- und Montageprozessen vordefinierte Relationen, welche den Zusammenhang zwischen Herstellungs- und Überprüfungsort

erzeugen, festgelegt werden. Dies ermöglicht ein zielgerichtetes und objektives Modellieren der Systemzusammenhänge.

Frei definierbare Relationen sind auch realisierbar, führen aber nach [Konrad u.a. 2012] zu einer Reihe von Nachteilen:

- Tipp- und Schreibfehler führen zu ungleichen Verbindungen. Diese werden dann bei Regeln oder der Verwertung als unterschiedliche Relationen interpretiert.
- Da kein standardisiertes Vokabular vorhanden ist, beeinflusst das subjektive Empfinden des jeweiligen Mitarbeiters die Art der Modellierung ausschlaggebend.
- Die Verwertung der modellierten Relationen und Filterung auf relevante Informationen ist aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Ausprägungen nur schwer möglich.

Aus diesen Gründen wird im Weiteren die ausschließliche Verwendung vordefinierter Relationen zwischen den Instanzen genutzt. Das Nutzen einer Kommentarfunktion lässt genug Freiraum für das Hinzufügen individueller Informationen.

6.2.1.2 Beziehungen zwischen mehreren Elementen

Relationen können ebenso zwischen mehr als zwei Elementen auftreten. Dies lässt sich aber nicht mithilfe der bereits vorgestellten Relationen realisieren. In der Ontologie beschreibt *Reifikation* den Vorgang, Relationen zwischen mehreren Elementen in eigenständige Ontologiekonzepte umzuwandeln. Dadurch werden mehrstufige Beziehungen ermöglicht, mit denen man Aussagen beschreiben kann, in denen auf andere Verbindungen Bezug genommen wird (auch „Aussagen über Aussagen“ genannt). Ein typisches Beispiel ist der Kommentar einer Verbindung zweier Strukturelemente [Hitzler u.a. 2007]. Das Prinzip der Umwandlung in ein neues eigenständiges Konzept ist in Abbildung 26 dargestellt.



Abbildung 26: Schematische Darstellung von kommentierten Beziehungen (links) und semantisch korrekter Darstellung nach Umwandlung in ein neues eigenständiges Konzept (rechts).

Die Methode der Reifikation kann dabei mehrfach angewandt werden, es können also mehrstufige Beziehungsgeflechte auftreten und entsprechend modelliert werden. Durch die Modularität können die so abgebildeten Daten eigenständig weiter verarbeitet werden.

Dieses Konzept wird für den Anlauf von Montagesystemen stets dann eingesetzt, wenn komplexere Beziehungen zu modellieren sind, also mehrere Instanzen zu einer Aussage zusammengefasst wurden. Ein Beispiel ist die Modellierung von Problemlösungen, welche von mehreren Faktoren (wie Problemquelle, Problementdeckung, Lösungsweg) abhängig ist.

6.2.1.3 Parametrisierte Verbindungen

Für die Definition spezifischer Verbindungen können auch parametrisierte Relationen und Attributrelationen modelliert werden. Dies bietet sich an, wenn eine weitere Strukturierung beispielsweise projektspezifischer Verbindungen realisiert werden soll. Ein typischer Einsatz innerhalb der Montagedomäne ist die produkt- und variantenspezifische Einstellung der Anlage. Da oftmals mehrere Varianten auf einer Anlage gefertigt werden, welche meist eine nur wenig unterschiedliche Konfiguration der gesamten Maschine erfordern, ist dies ein sinnvoller Anwendungsfall für dieses Mo-

dellierungsprinzip. Auf diese Weise können auf den Fakten aufbauende Techniken wie Regeln oder Anfragen auf eine generische Art produktunabhängig gestaltet werden.

Da diese Funktionalität von der verwendeten semantischen Sprache und der Modellierung der Ontologie abhängig ist, wird sie erst in Kapitel 7.1.9 detailliert vorgestellt.

6.2.2 Automatisierung durch hinterlegtes Regelwerk

Wie bereits erwähnt, ermöglicht das maschinenlesbare Format semantischer Informationen eine automatisierte Verarbeitung manuell eingegebener Daten. Durch die Beschränkung auf vordefinierte Relationen können modellierte Verbindungen beispielsweise automatisch auf weitere Instanzen erweitert werden. Hierzu wird ein hinterlegtes Regelwerk verwendet, welches den Systemzustand analysiert und bei zutreffenden Regeln weitere Verbindungen oder neue Instanzen definiert. Die generierten Objekte können entweder bei Auswertungen der Datenbasis ad-hoc erzeugt und nach Beantwortung der Anfrage verworfen werden (imaginäre Verbindungen) oder sie werden ausmaterialisiert, das heißt es werden neue dauerhafte Instanzen oder Verbindungen generiert. Die automatisierte Generierung oder Veränderung (hauptsächlich von Fakten der A-Box) wie Verbindungen oder Instanzen bezeichnet man als *Schlussfolgern* (englisch *Reasoning*). Dies ist beispielhaft in Abbildung 27 dargestellt.

Modellinhalt bzw. die getätigten Eingaben verifizieren. In folgender Abbildung ist dargestellt, wie der spezifizierte Zielwert von Parametern mit den maximal beziehungsweise minimal erlaubten Werten abgeglichen und bei Über- bzw. Unterschreitung der Grenzwerte eine neue Verbindung *istKeinGueltigerZielWert* zwischen dem Parameter und dem Zielwert generiert wird.

```
//REGEL NichtInSpezifikation:  
?Z[istKeinGueltigerZielWert -> ?X]:-  
?Z:Parameter[hatZielWert-> ?X]@M  
and ((?Z[hatMinimalWert-> ?Y]@M and ?Y > ?X )  
or (?Z[hatMaximalWert-> ?Y]@M and ?Y < ?X )).
```

Abbildung 28: Exemplarische Regeldefinition in ObjectLogic

Zur Veranschaulichung wird die vorgestellte Regel und verwendete Symbolik ausführlich und schrittweise erläutert. Eine formale Erläuterung der Zusammensetzung wird in Kapitel 7.1.8 gegeben.

Tabelle 1: Beispielhafte Erläuterung der spezifizierten Regel zur Validierung der Setzung der Parameterwerte

| Semantischer Code | Erläuterung |
|--|---|
| //REGEL NichtInSpezifikation: | Auskommentierter Name der Regel |
| ?Z[istKeinGueltigerZielWert -> ?X]:- | Regelkopf – Falls die Regel zutrifft werden Rollen vom Typ <i>istKeinGueltigerZielWert</i> von der Variable Z zur Variable X gezogen. |
| ?Z:Parameter[hatZielWert-> ?X]@M | Variable Z ist vom Konzept Parameter und hat eine Verbindung <i>hatZielWert</i> auf eine Variable X bezogen auf den Namensraum M |
| and (((() or())) | Zusätzlich dazu muss mindestens eine der beiden durch Klammern abgegrenzten Aussagen zutreffen um die gesamte Aussage wahr zu machen |
| ?Z[hatMinimalWert-> ?Y]@M and ?Y > ?X | Von Z auf Y existiert eine Attributrelation <i>hatMinimalWert</i> und der Wert von Y ist größer als X. (Dies bedeutet das der Z zugeordnete Minimalwert größer als der derzeitige Zielwert ist) |
| ?Z[hatMaximalWert-> ?Y]@M and ?Y < ?X) | Von Z auf Y existiert eine Verbindung <i>hatMaximalWert</i> und der Wert von Y ist kleiner als X (Dies bedeutet, dass der Z zugeordnete Maximalwert kleiner als der derzeitige Zielwert ist) |

Die vorsezifizierten Relationen sind in dem vorgestellten Beitrag auf die Anforderungen des Anlagenanlaufs in der Montage angepasst. Dabei wird zum Beispiel einem Inspektionsschritt ein bestimmter Montageprozess mit der Verbindung „*potentielleFehlerquelle*“ zugeordnet. Diese Verbindung kann bei einfachen Anlagen trivial ersichtlich sein, ist jedoch bei mehreren miteinander gekoppelten Anlagen mit insgesamt mehreren hundert Prozessschritten ein komplexes und oftmals zeitaufwendiges Problem für die Mitarbeiter.

6.2.2.2 Mehrstufiger Reasoning Prozess

Ein Beispiel für die Mächtigkeit von Regeln ist die Fortpflanzung möglicher Fehlerquellen innerhalb des Systems. Dabei werden ausgehend von einem untersuchten Prozess die unmittelbaren Fehlerquellen oder beeinflussende Prozesse gefunden (Fehler

1. Ordnung). Ausgehend von den identifizierten Prozessen werden nun weitergehende Fehlerursachen und einwirkende Prozessschritte identifiziert (Fehler 2. Ordnung). Dies kann bis zu einer gewünschten Ordnungsanzahl (auch *Stufe*) fortgeführt werden. Auf diese Weise werden neben den unmittelbaren Fehlerquellen auch diejenigen gefunden, die über bestimmte Relationen mit dem untersuchten Prozess verbunden sind. Dies ermöglicht ein zielgerichtetes Suchen der eigentlichen Fehlerursache für die Produktionsmitarbeiter.

Verwirklicht wurde diese Funktionalität indem mithilfe des Regelwerkes ausgehend von der interessierenden Instanz eine neue Verbindung zu der übernächsten Instanz geschaffen wird. Das Prinzip ist in Abbildung 29 dargestellt. Dabei sind Instanzen über eine festgelegte Relation (hier *Relation 1*) miteinander verbunden. Mithilfe der spezifizierten Regeln wird nun die *Relation j* $j \in \mathbb{N}, 0 < j < (\text{Anzahl der spezifizierten Stufen} + 1)$ generiert, welche eine direkte Verbindung zur übernächsten Instanz schafft. Darauf aufbauend kann, mithilfe einer weiteren Regeln die von *Instanz 3* ausgehende Relation genutzt werden und eine neue Verbindung (*Relation j+1*) zur übernächsten Instanz geschaffen werden. Dieses Vorgehen lässt sich nun bis zu der gewünschten Stufe fortsetzen.¹³

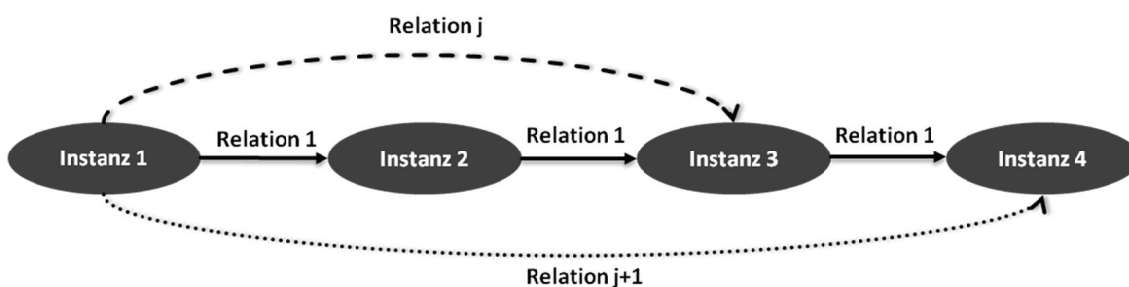


Abbildung 29: Exemplarische Darstellung eines möglichen mehrstufigen Reasoning-Prozesses wie er in der entwickelten Lösung verwendet wurde.

¹³ Relation 3 könnte auch ohne Realisierung von *Relation 2* direkt generiert werden, da es möglich ist, mehrere Instanzen in einer Regel miteinander zu verketteten. Allerdings wäre dies in der Regelspezifikation sehr unübersichtlich und besonders bei mehreren realisierten Stufen schwierig zu überblicken.

Wie ein Kapitel 4.2.1.3 erwähnt, lassen sich die meisten semantischen Ausdrücke mithilfe der Prädikatenlogik erster Stufe darstellen. Dementsprechend formalisiert wird das beschriebene Prinzip wie eine Relation des Types *Bezeichnung* von A nach B (formal auch $\mathbf{R}_{\text{Bezeichnung}}(\mathbf{A}, \mathbf{B})$) folgendermaßen gebildet:

Formel 1 Erste Stufe des automatisierten Schließens

$$\forall(x, z) [R_j(x, z) \rightarrow \forall(y) R_1(x, y) \wedge R_1(y, z)]$$

Wobei das logische Schließen nach folgender Formel definiert ist:

Formel 2 Aussagenlogisch äquivalente Bezeichnung der materiellen Implikation

$$A \rightarrow B := \neg A \vee B$$

Die stufenweise Fortsetzung der generierten Verbindung wird nun weiter genutzt:

Formel 3 Definition aller weiteren Stufen des automatisierten Schließens

$$\forall(x, z) [R_{j+1}(x, z) \rightarrow \forall(x, y, z) R_j(x, y) \wedge R_1(y, z)]$$

Neben der Realisierung dieser limitierenden Funktionalität bei dem Relationen vergleichbar zur Transitivität jedoch streng limitiert erweitert werden, wurde dasselbe Prinzip auch für den Einsatz vermengter Relationen verwendet. In Abbildung 30 ist dargestellt, dass ausgehend von *Instanz 2* aufgrund der Relationen *1* und *2* eine neue Relation *j* zu beiden verbundenen Instanzen erzeugt wird.

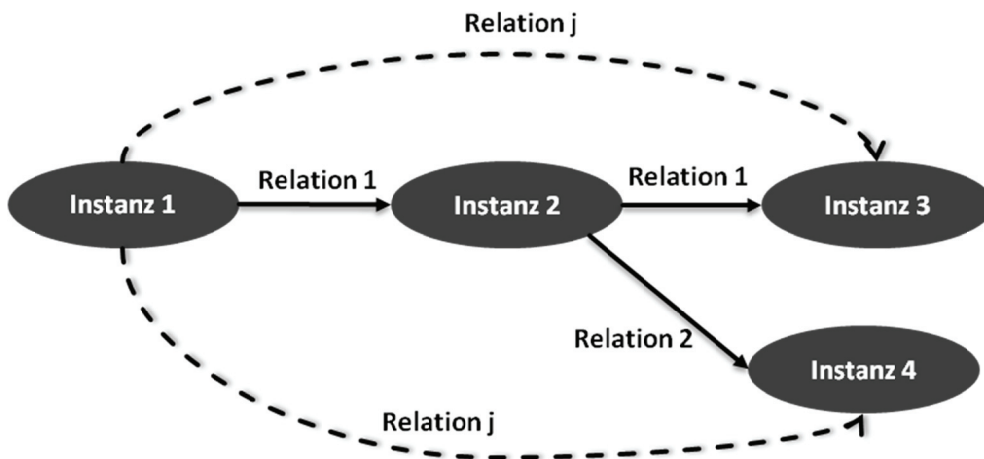


Abbildung 30: Exemplarische Darstellung des mehrstufigen Reasoning-Prozesses mit vermengten Relationen

Formel 4 Erste Stufe automatisierten Schließens mit vermengten Relationen

$$\forall(x, z) [R_j(x, z) \rightarrow \forall(y) (R_1(x, y) \wedge R_1(y, z)) \vee (R_1(x, y) \wedge (R_2(y, z)))]$$

Und folglich:

Formel 5 Definition aller weiteren Stufen automatisierten Schließens mit vermengten Relationen

$$\forall(x, z) [R_{j+1}(x, z) \rightarrow \forall(y) R_j(x, y) \wedge (R_1(y, z) \vee R_2(y, z))]$$

In der Theorie ist der Einsatz von transitiven Regeln ein sehr mächtiges Instrument. Allerdings ist der Einsatz von Transitivität über eine unbegrenzte Anzahl von Stufen beim Montageanlauf oftmals nicht zweckdienlich, da in der Praxis Verbindungen über sehr viele Objekte und Stufen meist keine relevanten Informationen mehr liefern und die Produktionsmitarbeiter durch die Vielzahl bereitgestellter Informationen meist eher verwirren als unterstützen. Mit der nach vorgestelltem Prinzip spezifizierten automatisierten Verbindung, wird die Generierung neuer Relationen strikt auf eine festgelegt Anzahl von Stufen begrenzt. Dadurch wird eine Fokussierung bei dazugehöri-

gen Anfragen ermöglicht und eine Bereitstellung von sehr vielen jedoch wenig hilfreichen Informationen vermieden.¹⁴

6.3 Modellierung der dynamischen Informationen

Als dynamische Informationen werden im Folgenden alle Daten deklariert, welche während des Anlagenanlaufs zu einem eindeutig definierten Zeitpunkt anfallen. Dies können heterogene Datentypen von unterschiedlichsten Quellen sein. Beispielhaft können sich ändernde oder abgefragte Sensorinformationen, Daten über Achsbewegungen der Maschine, Eingaben der Produktionsmitarbeiter über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle oder Daten anderer Softwaresysteme wie Condition Monitoring oder Statistische Prozesskontrolle genannt werden. Diese Datensätze können als einzelne diskrete *Ereignisse* modelliert und in asynchroner Weise auftreten und empfangen werden. Zur Darstellung des generischen Datenformats wurde ein ereignisorientiertes einheitliches Format definiert, welches eine Kapselung relevanter Informationen erlaubt.

Charakteristisch für alle empfangenen Datensätze ist, dass sie zu dem in Kapitel 6.1 vorgestelltem strukturellem Modell eine gewisse Beziehung besitzen. Dabei können auftretende Ereignisse zu einzelnen oder mehreren Elemente des strukturellen Modells in Beziehung stehen. Die Verbindungen werden, wie bereits beschrieben durch Rollen abgebildet, die sich auf einzelne oder mehrere Konzepte, Instanzen, Attribute oder denkbare Mischformen beziehen können (siehe Abbildung 31).

¹⁴ Sollte der Einsatz transitiver Relationen doch erforderlich sein, ist eine Kategorisierung in eine entsprechende Regelgruppe zu empfehlen. Daraus ist für den Produktionsmitarbeiter sofort ersichtlich, dass die Informationen über mehrere Knoten und Kanten eines Graphen ermittelt wurden. Dies kann beispielsweise durch eine spezielle Namensgebung bzw. eine Voranstellung eines Präfixes an den Regelnamen erfolgen.

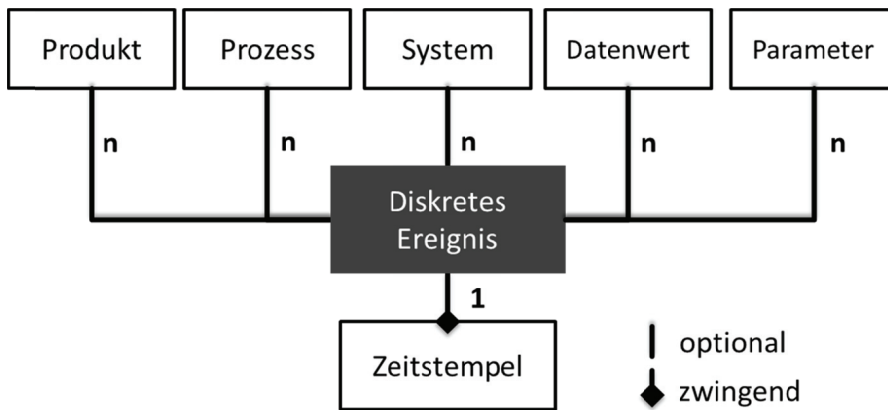


Abbildung 31: Konzeptuelle Darstellung eines relevanten Ereignisses in UML-Notation. Zu beachten ist, dass jedes Ereignis genau einem bestimmten Zeitstempel und einer beliebigen Anzahl an Elementen des Strukturmodells zugeordnet ist.¹⁵

6.4 Integration der verschiedenen Modellteile

Alle vorgestellten Modelle in den Kapiteln 6.1 bis 6.3 können separat gebildet und modifiziert werden. Für die effiziente Auswertung der generierten Informationen ist aber eine integrierte Betrachtungsweise in einer gemeinsamen Wissensbasis notwendig (siehe Abbildung 32).

Die Integration geschieht dabei durch die Nutzung und Teilung einer gemeinsam definierten Ontologie. Das darin festgelegte Vokabular ermöglicht eine einheitliche und systematische Zuordnung verfügbarer Informationen. Durch Verwendung derselben Konzepte, Instanzen und Rollen werden heterogene Daten unterschiedlichster Quellen miteinander verflochten. Dynamische Daten werden dabei je nach Kontext zu einem oder mehreren Elementen der Ontologie verlinkt. So können empfangene Informationen je nach Ursprung und Bedeutung für unterschiedlichste Anwendungsfälle und damit semantischen Objekten relevant sein. Auf diese Art und Weise ist es möglich ohne Änderung der Objektstruktur, Ereignisse wie Alarme anlagen-, modul- oder prozessspezifisch zuzuordnen.

¹⁵ UML steht für *Unified Modeling Language* und ist eine standardisierte Modellierungssprache für Softwaresysteme.

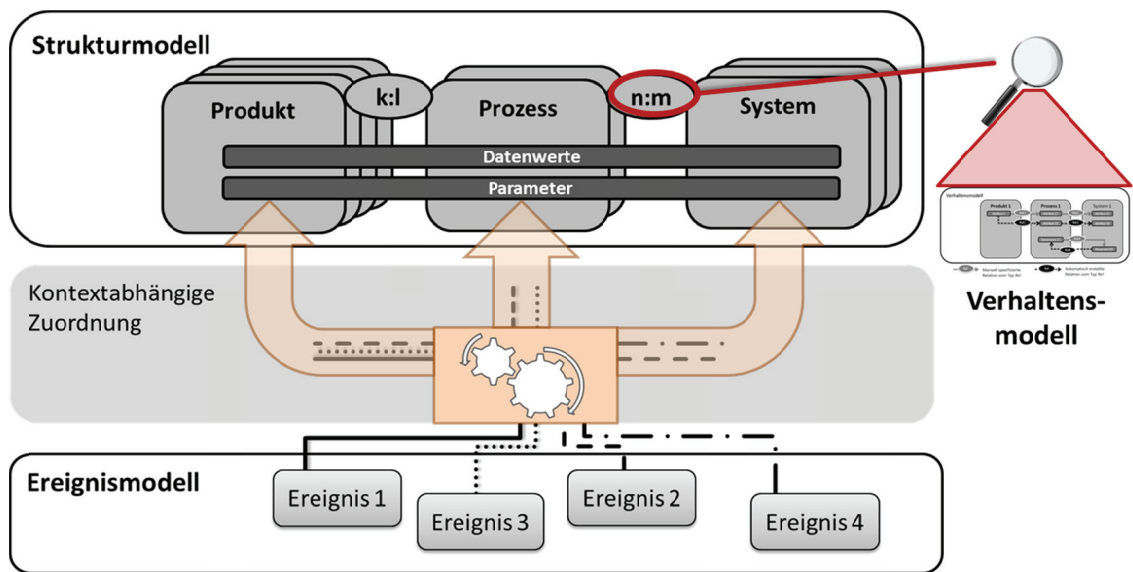


Abbildung 32: Konzeptuelle Darstellung der integrierten Wissensbasis mit dem Struktur-, Ereignis- und Verhaltensmodell. Das kontextabhängige Zuordnen von Ereignissen basiert dabei auf der Nutzung des gemeinsamen, mithilfe der Ontologie definierten Vokabulars.

Durch dieses Integrationskonzept wird zudem eine frühere Verfügbarkeit der Lösung ermöglicht, da einzelne Modellteile erst zu einem späteren Zeitpunkt integriert werden können. Zur Verwertung müssen lediglich die betreffenden Systemanfragen entsprechend erweitert werden, um auch die neuen Informationen nutzen zu können.

6.5 Verwertung der Wissensbasis

Zur Verwertung der Wissensbasis wurden Anfragen entwickelt, welche die dringlichsten Anwendungsfälle der Montagemitarbeiter beim Anlagenanlauf abdecken. Dabei werden Strukturen wie die Vererbungshierarchie in die Spezifikation der Systemanfragen eingebaut. Die Ausgabe der Anfrage kann auf eine Untermenge der verwendeten Elemente

limitiert werden. Modifikatoren können zudem die Ausgabe umgestalten, was ein Festlegen der Form und des Umfangs der Ergebnisliste ermöglicht.¹⁶

6.5.1 Typen von Systemanfragen

An dieser Stelle erfolgt eine anwendungsorientierte Eingruppierung der Anfragen. Abhängig von der notwendigen Benutzerinteraktion zur Anfragespezifikation wird zwischen vordefinierten, parametrisierbaren und freien Abfragen unterschieden.

- **Vordefinierte Anfragen** - Hierbei wird die aktuelle Wissensbasis mit fest vorgegebenen und vordefinierten Abfragen ausgewertet. Dabei umfassen die Anfragen hauptsächlich allgemeine Frage- und Problemstellungen und geben einen Überblick über relevante Ereignisse oder Einstellungen des Systems.
- **Parametrisierte Abfragen** - Ein Großteil der vordefinierten Abfragen kann auf verschiedenen Granularitätsstufen parametrisiert werden. Dadurch können Systemanfragen zunächst relativ allgemein definiert und dann auf den jeweiligen interessierenden Bereich zugeschnitten werden. Von der Parametrisierung anhand allgemein definierter Basiskonzepte bis zur feingranularen Filterung auf der Ebene einzelner Instanzen ist ein stufenloser Übergang, als auch unterschiedlichste Mischformen innerhalb einer Anfrage möglich.
- **Freie Abfragen** - Neben der Nutzung vorgefertigter Systemanfragen können auch freie Abfragen in der jeweilig eingesetzten semantischen Sprache spezifiziert werden. Für das Schreiben eigenständiger Anfragen wird jedoch ein gewisses Systemverständnis benötigt, um nichttriviale Querbeziehungen erfragen zu können.

¹⁶ Oftmals sind zur Herstellung komplexer Zusammenhänge Hilfskonzepte notwendig, die nicht direkt angefragt wurden. Diese können direkt wieder verworfen beziehungsweise gar nicht erst ausgegeben werden. Mögliche Modifikatoren sind beispielsweise die numerische Beschränkung ausgegebener Ergebnisse, die Sortierung nach bestimmten Kriterien oder das Auslassen einer definierten Ergebnismenge (Offset). Je nach verwendeter Anfragesprache unterscheiden sich jedoch die Möglichkeiten erheblich voneinander.

6.5.2 Modularität der Wissensverwertung

Es können sowohl einzelne als auch mehrere Teilmodelle des entwickelten Lösungsansatzes (vgl. Abbildung 19) separat oder integriert angefragt werden. Einschränkungen auf gewünschte Teilmodelle können dabei explizit in der jeweiligen Anfrage definiert werden. Dies kann unter anderem durch im Vorfeld festgelegte Namensräume geschehen. Mehrere Einschränkungen in einer Abfrage können durch logische Operanden verknüpft werden.

Die vollautomatische Verbindung von Teilmodellen mithilfe des hinterlegten Regelwerkes ist ebenso durchführbar. Dies wird an dem Beispiel der Abfrage eines spezifischen Parameterwertes verdeutlicht (siehe Abbildung 33). Dieser wird zu Beginn der Modellierung in dem initialen Strukturmodell mit einem Wert vorkonfiguriert. Der Parameter ist dabei durch die Attributrelation *hatZielWert* mit seinem Wert verbunden. Bei Modifikation dieses Wertes im Laufe des Anlagenanlaufs wird dies in den dynamischen Daten des Ereignismodells gespeichert. Mit einer vordefinierten Regel kann nun überprüft werden, ob für den gewünschten Parameter ein Wert in dem Ereignismodell vorhanden ist. Ist dies der Fall, wird die Attributrelation *hatZielWert* zu dem neuen Wert gezogen, ansonsten bleibt sie bei dem Initialwert. Zudem wird mit einer weiteren Regel das letzte aufgetretene Ereignis einer Wertmodifikation identifiziert, um den jeweils aktuellsten Wert zu erlangen.

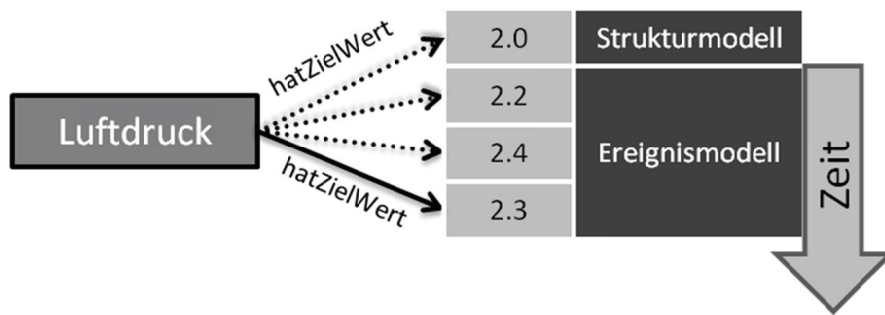


Abbildung 33: Automatismus durch hinterlegtes Regelwerk bei der Abfrage des aktuellen Parameterwertes. Die Attributrelation *hatZielWert* wird immer auf den aktuellen Wert des Parameters gesetzt. Geänderte Parameterwerte werden nicht verworfen, sondern sind rückverfolgbar und geordnet abrufbar.

Nach der konzeptuellen Erläuterung und Abgrenzung der einzelnen Teilmodelle und ihrem integrativen Zusammenwirken wird in folgendem Kapitel 7 die eigentliche semantische Realisierung vorgestellt.

7. Modellontologie und Realisierung

In diesem Kapitel wird die Realisierung der Teilmodelle als Ontologie im Detail erläutert, bevor die Implementierung der entwickelten Applikation vorgestellt wird. Die Nutzung des ganzheitlichen Modells wird in Kapitel 8 beschrieben.

7.1 Definition der Ontologie für den Anlagenanlauf

Wie bereits beschrieben, wurde eine Ontologie für den Anlagenanlauf definiert. Diese beinhaltet neben der Definition des strukturellen Modells, das Ereignis- und das Verhaltensmodell. Im Weiteren wird vorwiegend die T-Box der Ontologie also der prinzipielle Aufbau ausführlich erläutert.¹⁷ Aufgrund der hohen Anzahl realisierter Instanzen und zahlreicher ungleicher Realisierungsmöglichkeiten werden nur einzelne charakteristische Auszüge der A-Box exemplarisch dargestellt und erklärt. Zunächst ist für das weitere Verständnis eine kurze Einführung über die grundsätzliche Funktionsweise semantisch annotierter Mindmaps notwendig, da diese zur Modellierung der Ontologie verwendet wurden.

7.1.1 Struktur der semantisch annotierten Mindmap

Für die Verbindung von Elementen wird die Graphenstruktur der Mindmap genutzt. Da dies für eine semantische Verarbeitung noch eine unzureichende Informationsmenge darstellt, werden noch semantisch annotierte Symbole (im Weiteren auch *Icons*) verwendet, um die jeweiligen Textbegriffe mit Metadaten anzureichern und den spezifi-

¹⁷ Da im Laufe der Arbeit mehrere, geringfügig unterschiedliche Varianten der Ontologie entstanden sind, wird eine vereinheitlichte und möglichst generische Version der Ontologie erläutert. In einzelnen Beispielen sind deshalb unter Umständen kleinere Unterschiede erkennbar, worauf jedoch stets hingewiesen wird. Parametrisierte Rollen werden nicht explizit innerhalb der verwendeten Ontologie beschrieben, da es sich hierbei lediglich um eine Ausprägungsvariante mit wenig inhaltlichen Unterschieden zum vorgestellten Konstrukt handelt. Aufgrund der Relevanz in der praktischen Umsetzung wird die prinzipielle Vorgehensweise dennoch in Kapitel 7.1.9 beschrieben.

schen Typ (wie Konzept, Instanz, Relation, Attributrelation, Literal) des Elementes des Graphen zu definieren.

Zunächst werden einige wesentliche Symbole und ihre Bedeutung kurz anhand einer einfachen Beispielontologie erläutert. Für eine ausführliche Erklärung der verwendeten und weiterer erlaubten Symbole und des eigentlichen Prinzips sei auf [Busse 2011] verwiesen, dessen Entwicklungen und Vorgehensweise in diesem Beitrag verwendet wurden.

Die Symbole spezifizieren Elemente, welche man entweder der T-Box (das Metamodel) oder der A-Box (Instanziiertes Model) zuordnen kann (vgl. Kapitel 2.1.4). Die Namen der jeweiligen Elemente werden direkt über die eindeutige Bezeichnung in der Mindmap festgelegt.

Tabelle 2: Darstellung vorwiegend verwendeter Icons zum semantischen Annotieren innerhalb der Mindmap (T-Box, basierend auf [Busse 2011]).











| Icon - T-Box | Bedeutung |
|---|--|
|  | Kennzeichnet ein Konzept innerhalb der Ontologie. Konzepte können hierarchisch aufgebaut sein und Rollen zu anderen Konzepten, Instanzen und Literalen besitzen. |
|  | Dieses Icon symbolisiert eine Relation zwischen zwei Konzepten. Nur so spezifizierte Relationen können anschließend auch instanziiert werden. |
|  | Das Symbol charakterisiert eine Attributrelation zu einem Literal. Diese können dabei numerischen Werte oder Zeichenketten enthalten. |
|  | Kennzeichnet ein numerisches Literal. |
|  | Charakterisiert ein Literal vom Typ String. |

Tabelle 3: Darstellung vorwiegend verwendeter Icons zum semantischen Annotieren innerhalb der Mindmap (A-Box, basierend auf [Busse 2011])

| Icon - A-Box | Bedeutung |
|---|--|
|  | Kennzeichnet eine Instanz innerhalb der Ontologie. Jeder Instanz ist genau ein Konzept zugeordnet und es können beliebig viele Instanzen jedes Konzepts erstellt werden. |
|  | Charakterisiert eine Relation zwischen zwei Instanzen. Die Anzahl instanzierter Relationen mit identischen Namen ist dabei nicht beschränkt. |
|  | Das Icon symbolisiert eine instanziierte Attributrelation zu einem Literal. Attributrelationen ohne zugehöriges Literal werden nicht betrachtet. |
|  | Hierbei handelt es sich um ein instanziiertes numerisches Literal. |
|  | Durch das Symbol wird ein instanziiertes Literal vom Typ String identifiziert. |

Anhand einer einfachen Ontologie soll das Zusammenspiel der graphenbasierten Informationen der Baumstruktur und der semantischen Icons in Abbildung 34 verdeutlicht werden. Elemente mit demselben Namen und Icon verweisen grundsätzlich auf dieselben Objekte. Dabei kann jedes Element im Graph beliebig oft auftreten.

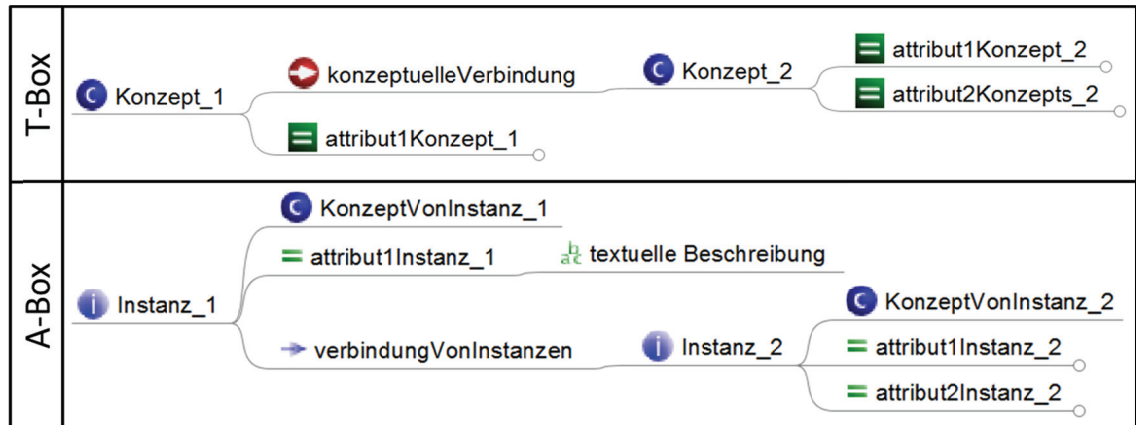


Abbildung 34: Einfaches Ontologiebeispiel einer semantisch annotierten Mindmap mit selbsterklärenden Beschreibungen der verwendeten Icons.

In dem oberen Zweig (ausgehend von *Konzept_1*) ist das Metamodell also die T-Box der Ontologie dargestellt. In ihr ist grundsätzlich definiert, welche Elemente überhaupt auftreten und welche Verbindungen und Attribute die Elemente besitzen können. Der untere Kasten (ausgehend von *Instanz_1*) stellt dabei die A-Box mit den spezifischen Ausprägungen der Elemente dar. Die Zuordnung der jeweiligen Elemente geschieht durch die jeweilige Anordnung in der Graphenstruktur, die Symbole definieren den entsprechenden Typ des Objektes. Es ist zu beachten, dass in vorliegendem Beispiel die A-Box zu Demonstrationszwecken nicht übereinstimmend mit der T-Box ist. Im Weiteren darf die A-Box lediglich Rollen mit den in dem Metamodel definierten Namen instanziiieren. Auch die verwendeten Konzepte in der A-Box müssen bereits in der T-Box definiert sein.

Dabei ist die tatsächliche Anordnung der Elemente nur von untergeordneter Bedeutung. Die T-Box im obigen Beispiel kann auch wie in Abbildung 35 dargestellt modelliert werden. Auch können wie bereits in Kapitel 6.1.2 beschrieben, Konzepte und Instanzen verteilt modelliert werden. Mit gleichem Symbol annotierte und mit identischen Namen bezeichnete Objekte stellen dasselbe Element dar. Die Informationen für diese Elemente werden bei der anschließenden Transformation in die semantische Sprache zusammengfügt.



Abbildung 35: Alternative gleichwertige Darstellung der T-Box mit mehrfacher Nutzung von Elementen (*Konzept_2*) zur Demonstration der verteilten Modellierungsmöglichkeit.

In vorgestelltem Beitrag werden lediglich direkt miteinander verkettete Konzepte als hierarchische vererbte Elemente interpretiert, die in Abbildung 36 prinzipiell dargestellt sind. In diesem Beispiel erbt *Konzept_3* die Eigenschaften von *Konzept_2* und das wiederum die Eigenschaften von *Konzept_1*. Folglich ist jede Instanz von *Konzept_3* auch eine Instanz von *Konzept_2* und *Konzept_1*. Eine Instanz von *Konzept_2* ist jedoch keine Instanz von *Konzept_3*.

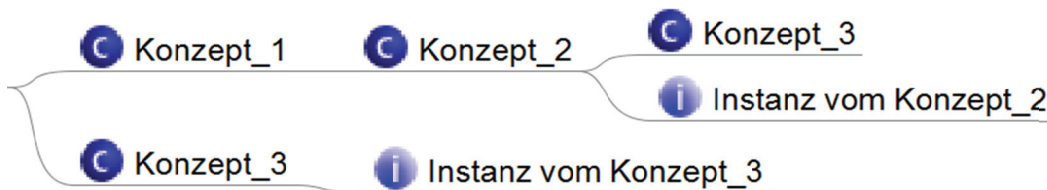


Abbildung 36: Exemplarische Darstellung der Vererbungshierarchie

Weiterhin gilt zu beachten, dass bei der Generierung von Instanzen Attributrelationen (Relationen zu Literalen) der jeweiligen Konzepte maximal einfach, Relationen zu anderen Instanzen hingegeben beliebig oft ausgeprägt werden können.

7.1.2 Ontologie für das Strukturmodell

Wie in Kapitel 6.1 beschrieben wurden die hierarchisch gegliederten Konzepte und Unterkonzepte für die Produkte, die Prozesse und die Montagesysteme inklusive aller ausschließlich empfangener oder einstellbarer Informationen erstellt. Im Strukturmodell definierte Relationen fokussieren sich dabei auf die statischen oder real vorhandenen

Systemzusammenhänge. Es wird beispielsweise definiert, an welchem Modul man bestimmte Werte ablesen (Datenwert) oder einstellen (Parameter) kann, welche Prozessmodule in welcher Station integriert und wie sie in dem Gesamtsystem angeordnet sind. Dabei ist zu untersuchen, welche Produktkomponenten, Prozesse und Anlagenteile in der Verantwortung des Anlagenherstellers liegen und welche von Zulieferern bereit gestellt werden, folglich also nicht betrachtet werden müssen. Maßgeblich für den Aufbau der Ontologie ist die Orientierung an der realen Ausprägung der betrachteten Domäne.

7.1.2.1 Produktontologie

Die **Produktontologie** besteht aus den Konzepten *Produkt*, *ProduktVariante*, *Komponente* und *Arbeitsplan*. Produkte können über Attribute beschrieben und einer Produktfamilie zugeordnet werden (vgl. hierzu Kapitel 3.1.3). Über Relationen sind sie mit den für die Montage notwendigen Komponenten (atomare nichttrennbare Teile, vergleiche Kapitel 3.1.3) verbunden. Produktspezifische Einstellungen oder qualitätsrelevante Datenwerte können über die *mit*-Verbindung spezifiziert werden. Jedem Produkt ist ein *Arbeitsplan* zugeordnet, der den Ablauf der Fertigungsschritte festlegt. *Produktvarianten* erben ihre Eigenschaften dabei vollständig von dem Konzept *Produkt*, da im Gegensatz zu Produktfamilien davon ausgegangen wird, dass nur geringfügige Änderungen in einen bis wenigen charakteristischen Eigenschaften vorliegen.¹⁸ Komponenten besitzen eine weiterführende Beschreibung und können über Datenwerte oder Parameter entsprechend spezifiziert werden.

¹⁸ Je nach Definition und Eingrenzung von Produktfamilien ist selbstverständlich auch hier die Festlegung einer hierarchischen Struktur sinnvoll und zweckmäßig.

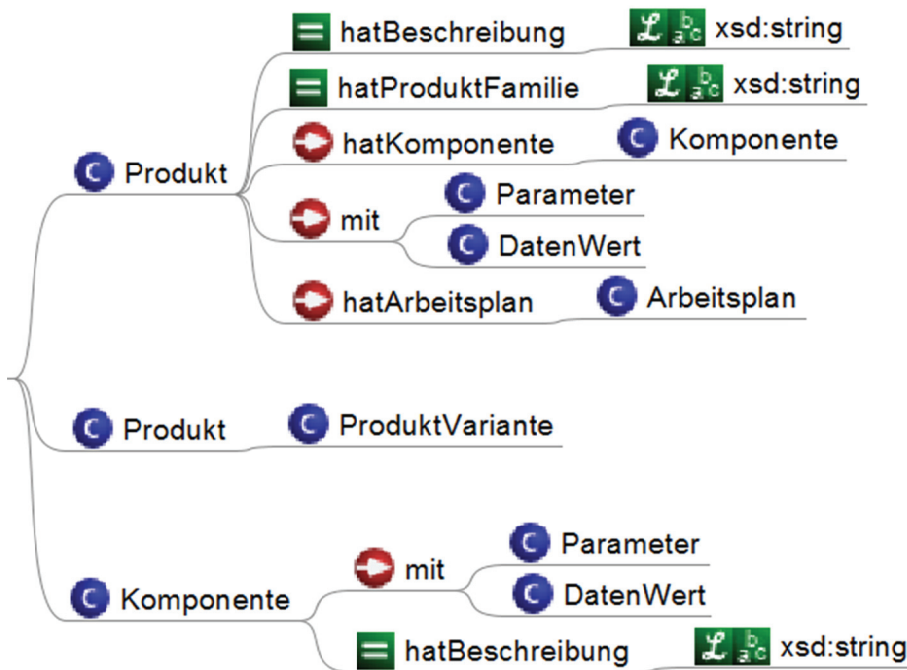


Abbildung 37: Darstellung der Konzepte *Produkt*, *ProduktVariante* und *Komponente* inklusive aller Rollen. Der Aufbau ist dabei an die bereits in Abbildung 13 vorgestellte Struktur angelehnt.

Je nachdem, ob man mehrere Produktfamilien und –varianten auf der Anlage herstellt und ob man jedes einzeln gefertigte Stückgut modellieren und überwachen möchte, ist ein unterschiedlicher Ansatz zu wählen. Letzteres bedingt das Anlegen einzelner Instanzen für jedes gefertigte Stückgut, welche über einen *Unique Identifier* (kurz UID) eindeutig identifiziert werden können.



Abbildung 38: Das Anlegen einzelner Produktinstanzen ermöglicht das Zuordnen von Informationen zu einzelnen Produktionsgütern und ermöglicht somit die transparente Verfolgung einzelner Produktentitäten.

Die Festlegung und Reihenfolge einzelner Arbeitsschritte erfolgt innerhalb des Konzeptes *Arbeitsplan*. Die notwendigen Prozessschritte sind in einzelne Arbeitsvorgänge unterteilt, über die wiederum der verwendete Prozess und der nachfolgende Arbeits-

schritt festgelegt ist. Dies realisiert eine einfach verkettete Liste erforderlicher Prozesse.¹⁹



Abbildung 39: Festlegen der zur Montage notwendigen Arbeitsschritte

Eine mögliche Ausprägung für die Definition produktspezifischer Attribute wird in folgendem Beispiel der A-Box dargestellt. Das Produkt besteht dabei lediglich aus zwei Komponenten und einen produktspezifischen Parameter *Klebedruck*.

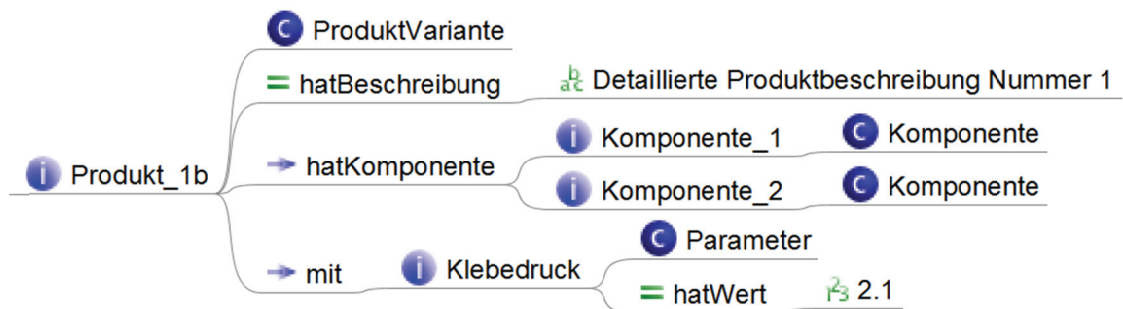


Abbildung 40: Auszug der Instanziierung einer Produktvariante mit zwei Komponenten und einer Belegung des Parameters *Klebedruck* mit dem Wert 2.1.

7.1.2.2 Prozessontologie

Die **Prozessontologie** setzt sich in Anlehnung an Abbildung 12 aus einer klassifizierenden Konzeptionshierarchie und einer allgemeingültigen Spezifikation für alle Prozessstypen

¹⁹ Mehrfaches Anfahren des gleichen Prozesses kann mit diesem Schema zwar abgebildet werden. Aufgrund einer möglichen Schleifenbildung wird dies allerdings nicht weiter betrachtet. Zudem bedingt dies auch die Festlegung produktspezifischer Einstellung für die jeweiligen Prozessschritte, was wieder einen geringfügig anderen Aufbau der Ontologie erfordert.

zusammen. Je nach Prozesscharakteristik erfolgt die Klassifizierung und Einordnung in fünf vordefinierte Gruppen. *Montageprozesse* sind dadurch charakterisiert, dass sie mehrere Komponenten zu einer im weiteren Produktionsablauf nicht mehr getrennten Einheit zusammenfügen. *Inspektionsprozesse* führen Qualitätskontrollen anhand eines oder mehrerer bezeichnender Merkmale durch. *Logistikprozesse* sind Bewegungen des systeminternen Materialtransportes. *Bearbeitungsprozesse* beeinflussen Produktkomponenten, schaffen jedoch keine bleibende Verbindung zwischen ihnen. *Zuführprozesse* vereinzeln zu verbauende Produktkomponenten und stellen diese definiert zur Montage bereit. Die unterschiedlichen Prozesstypen werden im Weiteren, beispielsweise im Verhaltensmodell oder bei der Verwertung der Wissensbasis verwendet. Alle definierten Prozesstypen können Verbindungen zu Produktkomponenten besitzen und diese für eine erfolgreiche Ausführung benötigen oder beeinflussen. Dabei können wieder prozessspezifische Einstellungen mithilfe der verfügbaren Parameter und Datenwerte vorgenommen werden.

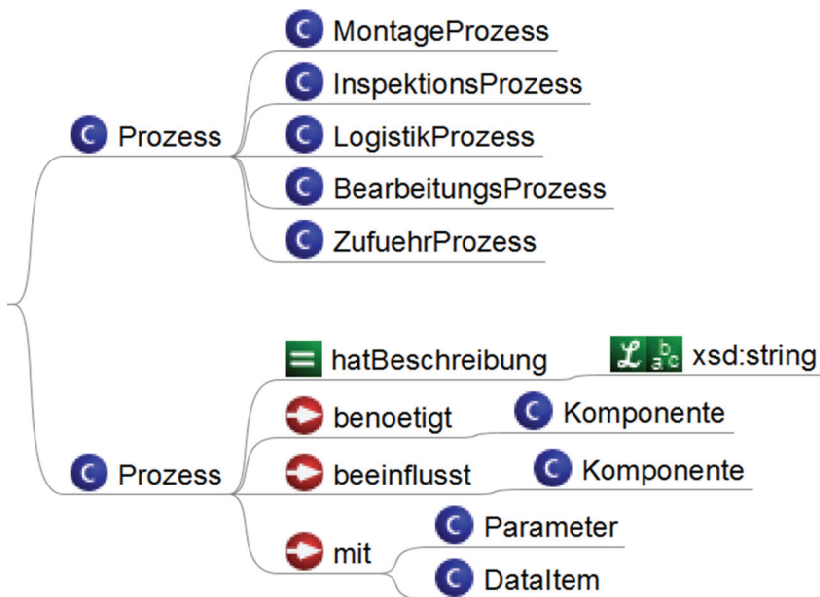


Abbildung 41: Darstellung der Prozesshierarchie und –details.²⁰

²⁰ Alternativ zur Vererbungshierarchie kann der Prozesstyp dem jeweiligen Prozess auch über eine Relation zugeordnet werden. Dies kann je nach Anwendungsfällen vorteilhaft für die Nutzung und Implementierung sein und wurde beispielsweise in dem ersten betrachteten Anwendungsfall auf Seite 147 implementiert.

7.1.2.3 Systemontologie

Die **Systemontologie** besteht aus den Konzepten *System*, *Station* (siehe Abbildung 42) und *Prozessmodul* (siehe Abbildung 43). *System* ist im Sinne von Abbildung 11 als mit Transportsystemen verkettetes Montagesystem mit mehreren Anlagen definiert, wobei eine *Station* eine einzelne Anlage in Anlehnung an Abbildung 10 darstellt. Prozessmodule stellen auf der Montageplattform die „Integrationshülle“ dar, in welche die eigentlichen wertschöpfenden Prozesse installiert werden. Relevante Parameter und Sensorwerte können auf jeder Konzeptebene angelegt werden. Die generische Relation *hatTeilSystem* definiert sowohl Verbindungen zwischen *Systemen* und *Stationen* als auch zwischen *Stationen* und *Prozessmodulen*.

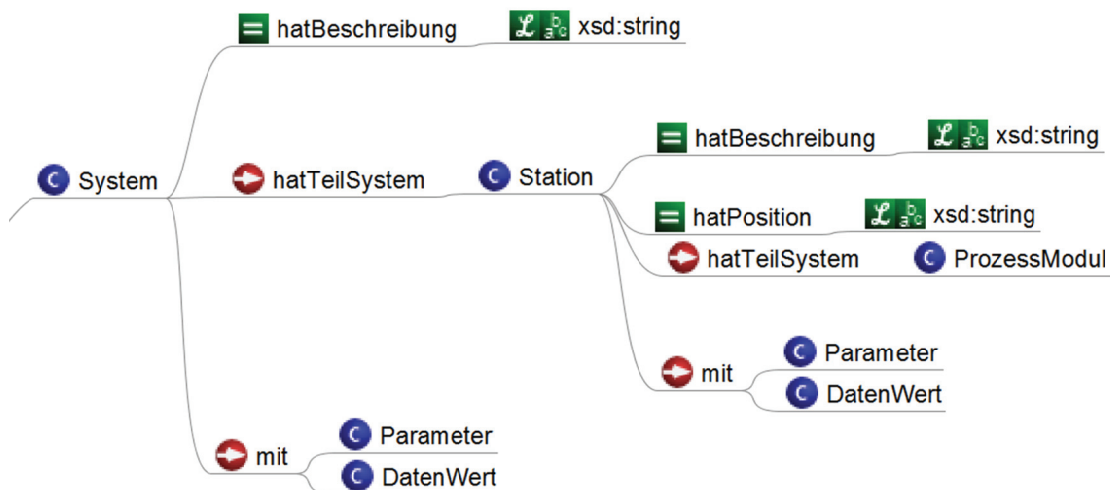


Abbildung 42: Darstellung der definierten Konzepte *System* und *Station* des eigentlichen Montagesystems.

Stationen und Prozessmodule besitzen zusätzlich ein Attribut mit dem die Anordnung, jeweils auf das übergeordnete System bezogen, festgelegt werden kann. Für einen starr verketteten und linearen Materialfluss kann bereits dadurch eine mögliche Bearbeitungsreihenfolge festgelegt werden. Ob allerdings alle angefahrenen Prozesse bei der Produktfertigung auch eingesetzt werden, definiert sich ausschließlich über den Arbeitsplan. Beispielsweise kann es erforderlich sein, für bestimmte Produktvarianten einzelne oder mehrere Prozessschritte zu überspringen. Aufgrund der

Plattformrestriktionen hinsichtlich des Materialflusses werden diese oftmals dennoch angefahren und prozessieren lediglich das Erzeugnis nicht.

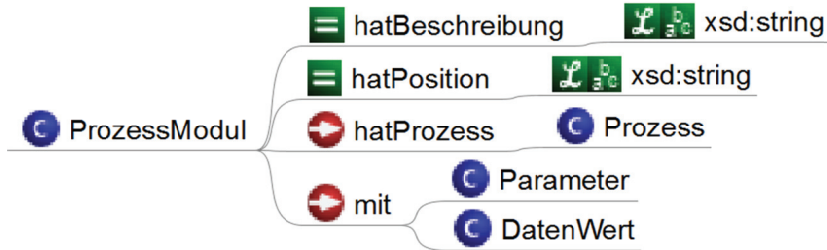


Abbildung 43: Ontologiedefinition der Prozessmodule.

Die Notwendigkeit und Verwendung konzeptübergreifender Elemente wurde bereits durch die Einführung der Konzepte *Parameter* und *Datenwerte* an mehreren Beispielen verdeutlicht. Mittels einer generischen Relation können verschiedenste Konzepte mit ihnen verbunden werden.

7.1.2.4 Datenwerte

Das Datenkonzept in Abbildung 44 besitzt neben einer Beschreibung einen aktuellen Wert, der zunächst im Strukturmodell als Ausgangswert spezifiziert werden kann. In der weiteren Nutzung der Ontologie wird dieses Attribut (*hatWert*) bei entsprechenden Ereignissen automatisiert aktualisiert (vgl dazu Abbildung 33, bei der dasselbe Prinzip für Parameter beschrieben ist). Für empfangene Werte können neben der Einheit des betrachteten Messwertes die Ziel-, Minimal- und Maximalwerte bereits im Vorfeld angegeben werden. Im Zusammenspiel mit den aktuellen empfangenen Maschinenwerten können über einfache Regeln bei Über- oder Unterschreiten der jeweiligen Attribute dadurch entsprechende Handlungen automatisiert ausgelöst werden.

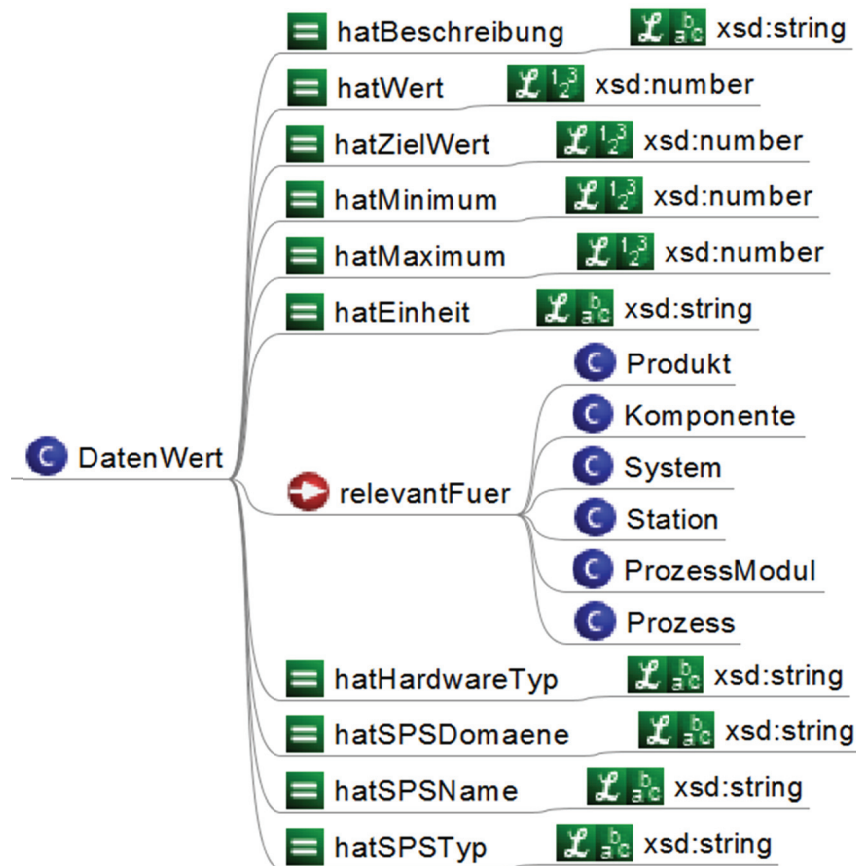


Abbildung 44: Festlegung der Ontologie für Datenwerte

Verbindungen sind zu fast allen bisher vorgestellten Konzepten über die generische Relation *relevantFuer* realisierbar. Dabei wurde auf das Anlegen typisierter Verbindungen für die einzelnen Konzepte bewusst verzichtet, um einen möglichst allgemeinen Ansatz zu verwirklichen. Über die weiteren vier Attribute wird der Anschluss des Sensors zu der SPS der Anlage spezifiziert. Dabei kann der Typ des Sensors (*hatHardwareTyp*), die SPS Domäne (*hatSPSDomaene*), der Name (*hatSPSName*) und der Datentyp (*hatSPSTyp*) näher bestimmt werden.

Datenwerte können noch weiter je nach ihrer Ausprägung klassifiziert werden. Dabei wurden für die drei vordergründigen Ziele Zeit, Kosten und Qualität (siehe Kapitel 2.3) entsprechende Konzepte generiert. Zusätzlich steht eine weitere Kategorie *Kennzahlen* zur Verfügung. Hier werden branchen- und unternehmensspezifische Kennzahlen zur Leistungsüberwachung definiert, die automatisiert aus anderen empfangenen Werten

berechnet werden. Diese imaginären Werte können mithilfe des auf Seite 82 vorgestellten Regelwerkes berechnet oder von anderen Systemen zur Verfügung gestellt werden.

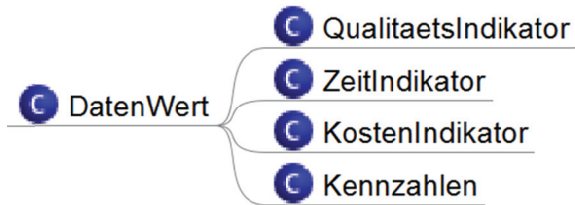


Abbildung 45: Ordnungsstruktur für Datenwerte

7.1.2.5 Parameter

Parameter können über die SPS, über die Maschinen-HMI oder über Einstellmöglichkeiten am Montagesystem direkt gesetzt werden. Dabei ist der Aufbau der Ontologie sehr ähnlich zu dem in Abbildung 44 vorgestelltem Muster. Lediglich auf das Attribut *Zielwert* wurde verzichtet, da der gewünschte Wert direkt eingestellt werden kann und somit empfangene Werte nicht vom spezifizierten abweichen können. Über ein weiteres Attribut kann zudem der Einstelltyp des Parameters definiert werden. Hierbei kann festgelegt werden, ob die Wertmodifikation automatisch von Softwaresystemen gesetzt wird oder ob es manueller Einstellungen bedarf. Im Gegensatz zu Datenwerten wurde keine Ordnungsstruktur implementiert.

7.1.3 Ontologie für das Verhaltensmodell

Dieser Modellteil konzentriert sich auf die Darstellung nicht offensichtlicher und auf Erfahrung basierender Zusammenhänge zwischen diversen Systemkomponenten. Dabei sind die Produktionsexperten in der Lage, unmittelbar in dem initialen Strukturmodell Beziehungen zwischen einzelnen Elementen zu spezifizieren oder dies direkt während des laufenden Betriebs im Anlagenanlauf vorzunehmen. Innerhalb des Regelwerkes spezifizierte Beziehungen werden in Verbindung mit der Anfragenspezifikation auf Seite 115 vorgestellt, da beides nicht in der Minmap, sondern direkt in der semantischen Sprache implementiert wurde. Bei der Realisierung innerhalb der Ontologie wurde eine Unterteilung in ein Statisches und ein Dynamisches Relationsmodell vorgenommen.

Dies hat implementierungstechnische Gründe, da die statischen Relationen vorwiegend in der Mindmap festgelegt werden, wobei für das dynamische Modell eine extra GUI²¹ angelegt wurde, um die Eingabe für die Produktionsmitarbeiter zu erleichtern.

7.1.3.1 Statisches Relationsmodell

In diesem Modellteil sind Verbindungen abgelegt, die von erfahrenen Produktionsexperten meist unmittelbar angegeben werden können (vergleiche Abbildung 46). Der Fokus liegt hierbei nicht nur in der reinen Explizierung, also der Erfassung des impliziten Wissens, sondern in einer weiteren automatischen Verarbeitung der manuell angegebenen Informationen mithilfe des hinterlegten Regelwerkes. Aufgrund der relativ geradlinigen Zusammenhänge können die erstellten Relationen im Zusammenspiel mit den nicht direkt ersichtlichen Verbindungen (siehe nächstes Unterkapitel) effizient kombiniert und genutzt werden.

Informationen zum statischen Relationsmodell können auch während aller Lebenszyklusphasen des Anlagenanlaufs eingegeben werden, da keine scharfe Trennung der einzelnen Teilontologien stattfindet. Allerdings haben Verbindungen des dynamischen Relationsmodells den Fokus eher auf der flexiblen Erfassung und Darstellung nicht einfach ersichtlicher, sondern unvermittelt auftretender oder eben erst ermittelter Ereignisse. Ein weiterer Aspekt stellen Implementierungsgründe dar, da für die Erfassung von Relationen während des Anlagenanlaufs eine spezielle Maske als Eingabehilfe empfehlenswert ist.

²¹ Kurzform von *Graphical User Interface*. Dies ist die englische Bezeichnung für eine grafische Benutzeroberfläche.

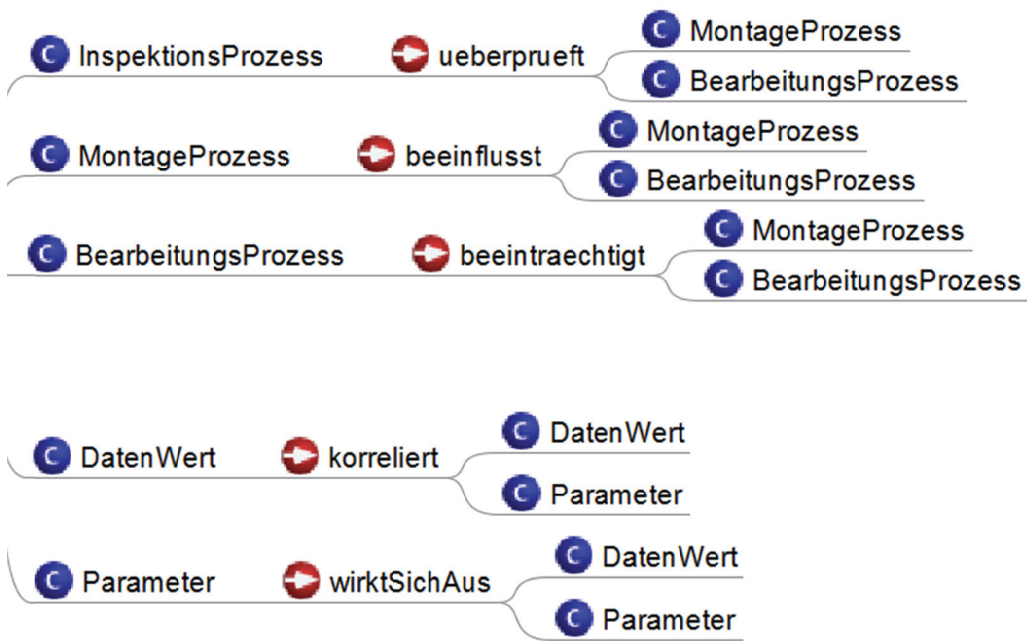


Abbildung 46: Auszug des statischen Relationsmodells, bei dem je nach Konzeptklasse typisierte Relationen zu anderen Konzepten definiert sind. Inspektionsprozesse überprüfen direkt das Resultat eines Bearbeitungs- oder Montageprozesses, wobei die Prozesse sich auch untereinander direkt beeinflussen können. Datenwerte und Parameter haben ebenfalls Auswirkungen aufeinander.

7.1.3.2 Dynamisches Relationsmodell

Das dynamische Relationsmodell deckt zahlreiche auftretende Anwendungsfälle während des Anlagenanlaufs ab. Nichttriviale Relationen, welche den Produktionsexperten nur bei Auftreten ersichtlich werden, sind der Fokus dieses Teilmodells. Dabei sind lediglich die Konzepte in der T-Box spezifiziert und nicht in der A-Box des vorgestellten graphenbasierten Strukturmodells abgebildet. Die Instanziierung neuer Relationen erfolgt ausschließlich über eine Eingabemaske, welche die Fakten direkt in dem TripleStore der Middleware in der A-Box speichert.

Weil zu lösende Problemstellungen meist nicht im Vorfeld bekannt sind, wird eine flexible Kommentierung der Problemstellungen durch den Mitarbeiter vorgesehen. Diese eingegebenen Bemerkungen können zu einem späteren Zeitpunkt gefiltert abgefragt werden.



Abbildung 47: Darstellung einer kommentierten Verbindung von Fehlerquelle und -entdeckungsort (Auszug aus dem dynamischen Verhaltensmodells). In dem ersten betrachteten Anwendungsfall in Kapitel 9.1 wurde dieses Konzept realisiert, implementiert und erprobt.

Typische betrachtete Problemstellungen während des Anlagenanlaufs sind beispielsweise die Klassifikation auftretender Fehlerarten²², die Zuordnung von Fehlerentdeckung und -entstehungsort²³ (siehe Abbildung 47), Feineinstellungen der Prozesse und Module und ihre weiteren Auswirkungen über Anlagen hinweg oder die Behebung von auftretenden Störungen an Prozessen.

7.1.4 Ontologie für das Ereignismodell

Für die Ablage der Ereignisse wurde eine anpassungsfähige Form realisiert, die je nach Erfordernissen mehr oder weniger Information beinhalten kann. Dabei werden u.a. Informationen wie die Quelle eines Ereignisses oder die Maßeinheit des Primärwertes gespeichert.

Die primär interessierenden Informationen wurden soweit durchführbar in den Attributen des Ereigniskonzeptes definiert, wodurch diese unmittelbar verwertet werden können. Dabei ist wie in Abbildung 48 dargestellt jedes auftretende Ereignis diskret in der Zeit (*hatEreignisZeit*), über eine UID (*hatUID*) eindeutig identifizierbar und kann

²² Auftretende Qualitätsprobleme bei einem Prozess können unter Umständen auf mehrere unabhängige Ursachen zurückzuführen sein. Selbst wenn die genaue Ursache nicht bekannt ist, liefert eine erste Klassifikation in potentielle Fehlerklassen oft weitere hilfreiche Informationen.

²³ Bei sehr komplexen Produkten und Systemen oder nachgelagerten funktionalen Prüfungen (beispielsweise der Dichtheit montierter Bauteile) ist dies oft nicht mehr trivial lösbar.

bereits einem System, einer Station und einem Prozessmodul (*hatQuellSystem*, *hatQuellStation*, *hatQuellProzessModul*) zugeordnet werden. Unterschiedliche Ereignistypen können klassifiziert werden (*hatHauptTyp*), und der primär interessierende Wert des Ereignisses kann mit seiner Einheit sowohl numerisch als auch als String direkt gespeichert werden (*hatPrimaerWert*, *hatPrimaerWertStr*, *hatPrimaerWerteinheit*). Zusätzlich zu dem exakten Zeitstempel kann noch eine Zuordnung zu einem speziellen Maschinenzyklus²⁴ (*hatZyklusID*, *hatZyklusBeginn*, *hatZyklusDauer*) erfolgen.

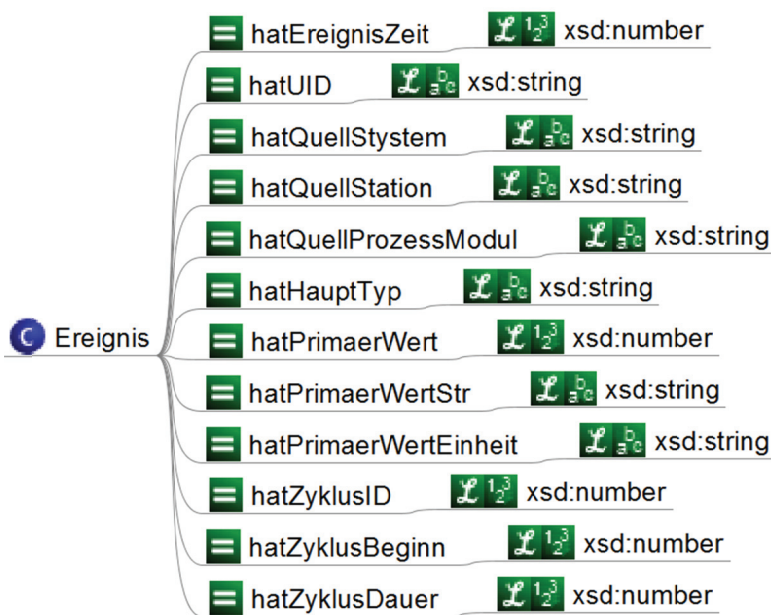


Abbildung 48: Attributrelationen der Ereignisontologie

Neben der attributiven Speicherung der primären Ereignischarakteristika können beliebig viele Informationen über vorsezifizierte Relationen angegeben werden (siehe Abbildung 49). Dabei können Verbindungen zu Produkten (*Produkt*, *Komponente*), zu Prozessen (*Prozess*) oder der eigentlichen Anlage (*System*, *Station*, *ProzessModul*) hergestellt werden. Selbstredend kann auch ein Zusammenhang zu Parametern und

²⁴ Dies ermöglicht beispielsweise bei zentral angetriebenen, kurvenscheibengesteuerten Maschinen eine zeitliche Zuordnung mehrerer dynamischer Ereignisse zu einem spezifischen Zyklus oder einen Vergleich weiterer auftretender Geschehnisse verschiedener Zyklen.

Sensoren (*Parameter*, *DatenWert*) hergestellt werden. Weitere gekapselte Informationen können über das Konzept *Zusatzwerte* angegeben werden.

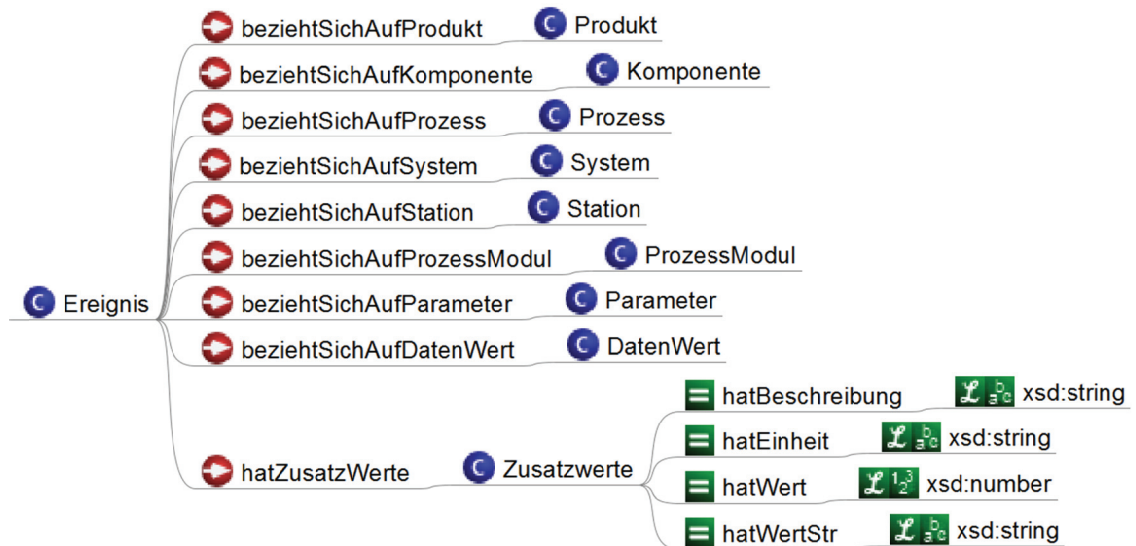


Abbildung 49: Relationale Charakteristika eines Ereignisses

Alternativ kann auch ein anderes Format gewählt werden, welches auf die jeweiligen Erfordernisse angepasst ist. Zudem kann es auch vorteilhaft sein, das Ereignisformat in einer programmiertypischen Form für andere Softwareentwickler zu beschreiben. In Abbildung 50 ist eine sehr ähnliche Definition beispielhaft in einer grafischen Modellierungssprache für Software-Systeme dargestellt, welche auch verwendet werden kann.

Im Laufe des Anlagenanlaufs empfangene Informationen von Sensoren, Eingaben der Montagearbeiter oder eingesetzter Softwaresysteme (wie z.B. Statistische Prozesskontrolle oder Condition Monitoring) werden in dieser Ereignisform in dem semantischen Datenbanksystem gespeichert.

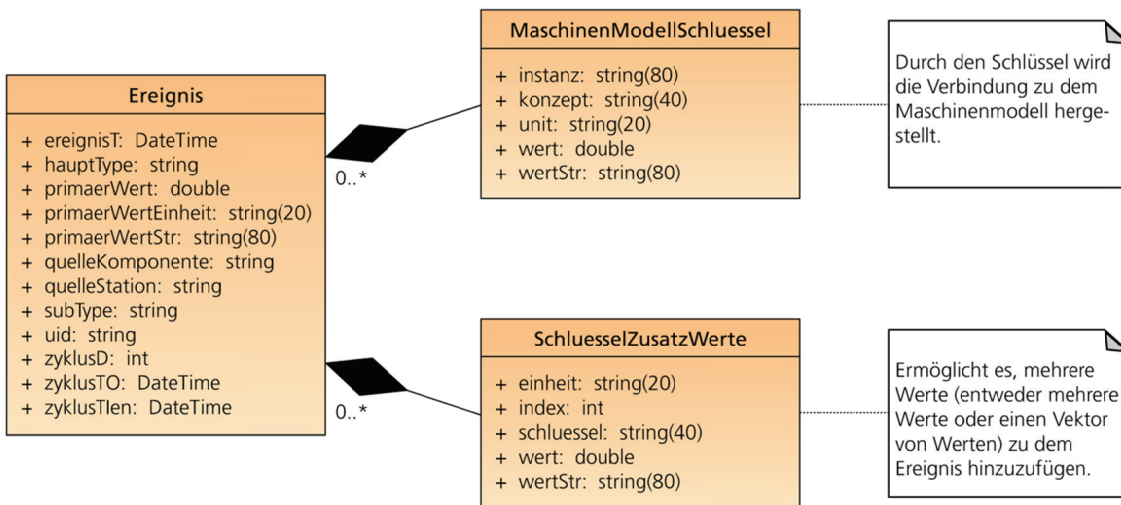


Abbildung 50: UML-Darstellung der Ereignisstruktur. Die Beziehung des Ereignisses zu dem existenten Maschinenmodell wird durch eine oder zahlreiche Verbindungen (*MaschinenModellSchluessel*) erstellt. Dadurch können alle auftretenden Geschehnisse ebenso keinem, genau einem oder aber gleichzeitig sehr vielen Elemente des erstellten strukturellen Modells zugeordnet werden [Konrad u.a. 2012].

7.1.5 Integrativer Ontologieansatz

Wie in Kapitel 6.4 beschrieben, wird die Integration durch eine gemeinsam genutzte T-Box und A-Box erreicht. Dadurch wird die schematische Struktur des Struktur-, des Verhaltens- und des Ereignismodells festgelegt. Die Vernetzung wird durch die Verwendung gleicher Begriffe in allen Modellen automatisch erreicht. Alle Modelle können direkt, wie in Abbildung 51 gezeigt, in der semantisch annotierten Mindmap abgebildet werden. Wie bereits in Kapitel 5.1.4 beschreiben, sind die jeweiligen Modelle in separaten Zweigen modelliert.

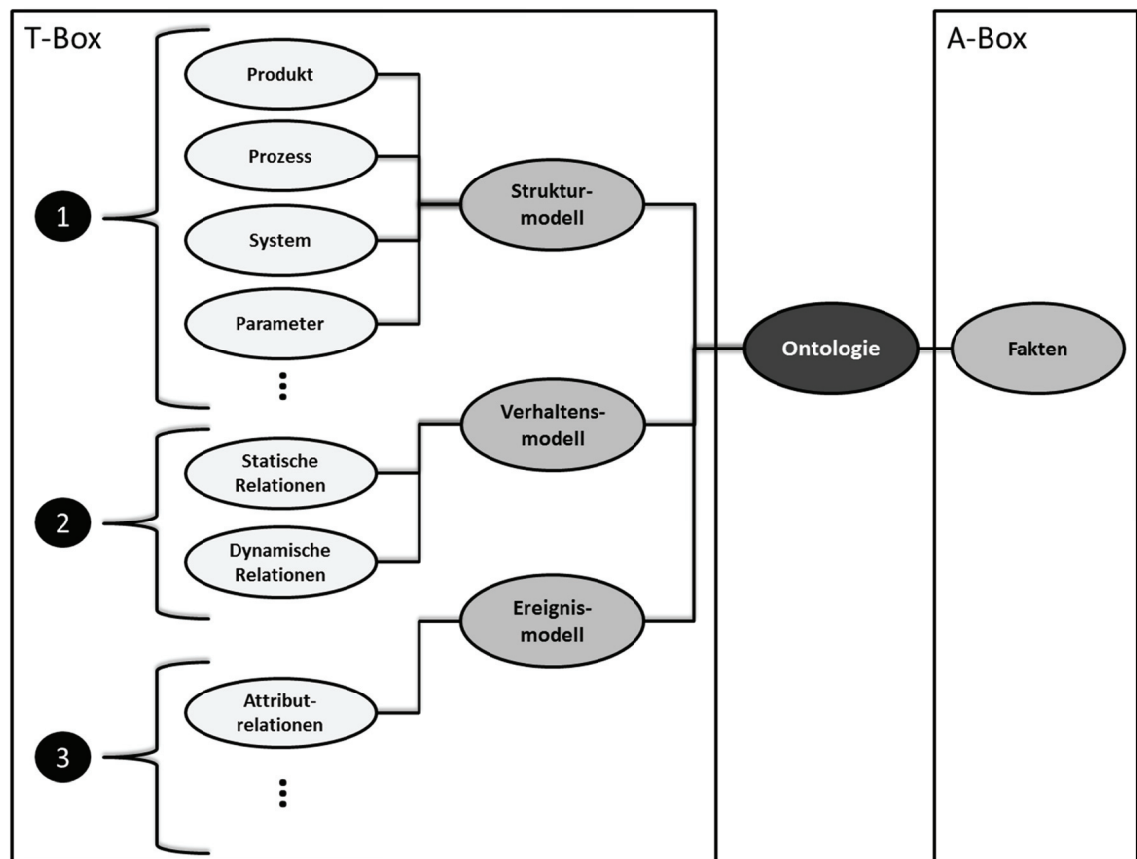


Abbildung 51: Schematische Darstellung der Integration des Strukturmodells (1), des Verhaltensmodells (2) und des Ereignismodells (3) durch eine gemeinsame T-Box. Zusätzlich ist auch die A-Box aufgrund der hohen Anzahl instanzierter Elemente eingefaltet dargestellt, weswegen Instanzen in der Abbildung nicht gezeigt werden. Die T-Box und die A-Box sind dabei strukturiert in unterschiedliche Zweige aufgeteilt.

7.1.6 Hinterlegtes Regelwerk

Die Entwicklung und Dokumentation des erstellten Regelwerkes und der Anfragen der Datenbasis sind auch innerhalb der Ontologie möglich (vgl. Abbildung 52). Allerdings ist die Definition speziell von komplexeren Regeln und Abfragen keineswegs einfach zu lesen oder für Produktionsexperten intuitiv verständlich und anpassbar. Zudem steht, wie bereits erwähnt, innerhalb der Mindmap nicht die volle semantische Funktionalität zur Verfügung. Aus diesen Gründen wurde auf die Beschreibung der Regeln und Abfragen direkt in der jeweiligen semantischen Sprache zurückgegriffen.

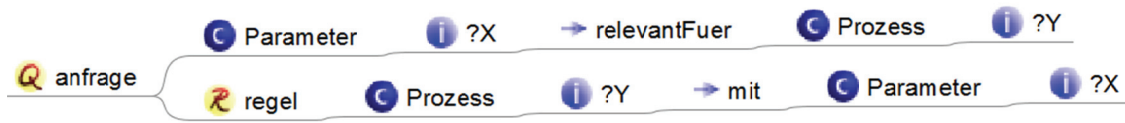


Abbildung 52: Exemplarische Spezifikation von Regeln und Abfragen innerhalb der semantisch annotierten Mindmap. Variablen sind durch den Präfix ? gekennzeichnet. Der untere Zweig (*regel*) repräsentiert den Regelrumpf, der obere den Regelkopf. Innerhalb der Regel wird eine antisymmetrische Relation (*relevantFuer*) von Parametern zu Prozessen erstellt, wenn die Prozesse bereits über die Relation *mit* zu den Parametern verbunden sind. Die Anfrage umfasst dabei nur den oberen Zweig, welcher gleichzeitig auch den Regelkopf darstellt. Es werden also alle Parameter erfragt, welche die Relation *relevantFuer* zu Prozessen besitzen. Grundgedanke des obigen Konstrukts ist, dass für jede Regel gleichzeitig eine Anfrage spezifiziert wird, welche die generierten Informationen erfragt.

Dabei wurden verschiedenste für den Montageprozess, die Systembetrachtung und speziell hinsichtlich der potentiellen Anwendungsfälle relevante Regeln definiert. Teilweise wird hierbei lediglich auf Daten des Strukturmodells zurückgegriffen und unter anderem eine Reihe symmetrischer, transitiver²⁵ und inverser Relationen spezifiziert, die eine Flexibilität hinsichtlich des benötigten manuellen Inputs erlauben. Neben einstufigen direkten Relationen wurden auch mehrstufige komplexere Verbindungen generiert. Die Schwierigkeit in der Regelspezifikation liegt in der Ziehung allgemeingültiger Schlussfolgerungen und der expliziten Definition aller Ausnahmen. Dies ist für direkte einfache Zusammenhänge leichter zu gestalten, als für verkettete schwer überschaubare Relationen. Eine Möglichkeit dies zu umgehen besteht darin, unsichere Verbindungen einer bestimmten Relationsklasse zuzuordnen, die abgeleitete Information als potentiell wahrscheinlich einordnet.

Das auf Seite 85 vorgestellte Prinzip zu einem mehrstufigen Reasoning-Prozess wurde auf die Montageanforderungen hin angewandt. In Abbildung 53 wird die automatisierte Fehlerfortpflanzung über mehrere Prozesse hinweg exemplarisch veranschaulicht. Da-

²⁵ Konform zur Erläuterung in Kapitel 6.2.2.2 wurden diese lediglich in sehr begrenzter Zahl und strikt eingegrenzt implementiert. Auf diese Weise wurde sichergestellt, dass keine Informationen generiert werden, die nicht zielführend oder sogar verwirrend sind.

bei werden ausgehend von einem qualitätskritischen Prozess (*Quelle*) mögliche Fehlerursprünge gesucht. Prozesse sind über direkte Relationen miteinander verbunden, wenn sie sich beeinflussen (Relation *beeinflusst*) oder wenn sie bereits als potentielle Fehlerquelle für diesen Prozess identifiziert wurden (Relation *potentielleFehlerquelle*). Mithilfe dieser beiden Relationen werden nun über mehrere Stufen automatisiert weitere Verbindungen (Relation *abgeleiteteFehlerquelleStufe1*, *abgeleiteteFehlerquelleStufe2*, ...) erstellt, die auf weitere denkbare Fehlerquellen und -arten hindeuten. Je mehr Stufen in die Betrachtung mit einbezogen werden, desto unwahrscheinlicher ist es, dass die generierte Relation den tatsächlichen Fehlerursprung darstellt. Dennoch liefert diese Vorgehensweise in den ersten Stufen eine sehr gute Eingrenzung des Betrachtungsgegenstandes und liefert in den weiteren Stufen noch zusätzliche Hinweise, welche dem Produktionsmitarbeiter eventuell weiterhelfen können.

werte für welche im Laufe des Anlagenanlaufs keinerlei Werte empfangen werden, können identifiziert werden und weisen auf eine fehlerhafte Verbindung oder eine falsche Darstellung im Modell hin. Die Validierung ist dabei mehrstufig innerhalb der Regelstruktur implementiert aufgebaut und wird durch eine finale Relation angegeben und eine einzige Anfrage durchgeführt.

- **Modular beschränkte Systemanfragen** – Darunter sind alle einfachen Anfragen an das Struktur-, Verhaltens- oder Ereignismodell definiert, die mit einfachen logischen Operatoren verbunden werden können. Dies können beispielsweise die Anfrage nach den vorhandenen Sensoren eines bestimmten Moduls, nach allen spezifizierten Verbindungen zwischen zwei Prozessen oder alle empfangenen Alarme ab einem bestimmten Zeitpunkt sein.
- **Verkettete Systemanfragen** – Abfragen, die zwei oder mehrere Modelle miteinander kombinieren, dienen der Verkettung vorhandener Datenbestände. Dabei können beispielsweise Ereignisse nicht nur auf den Typ (z.B. Alarme) sondern gleichzeitig auch auf Instanzen und Konzepte des strukturellen Modells (z.B. Modul 1 und Modul 5) eingeschränkt werden. Zudem können in dieser Anfragegruppe alle zur Verfügung stehenden Informationen sämtlicher Teilmodelle genutzt und kombiniert werden.
- **Manuelle vs. automatisierte Informationen** – Falls durchführbar, kann die Anfrage auf die manuell dokumentierten Informationen eingeschränkt werden. Mithilfe des hinterlegten Regelwerkes spezifizierte Elemente und gewonnene Erkenntnisse werden dabei explizit nicht betrachtet. Je nach Struktur benötigen allerdings einige Anfragen Regeln weshalb diese Funktionalität nicht für alle Anfragen möglich ist.

7.1.8 Formale Bildungslogik erstellter Regeln und Anfragen

Wie in Kapitel 4.2.1.3 erläutert, beruhen semantische Standards auf Beschreibungslogiken und lassen sich meist mithilfe der Prädikatenlogik erster Stufe beschreiben. Die Regeln sind bei den eingesetzten semantischen Sprachen nach der gleichen Logik wie Anfragen aufgebaut. Dabei handelt es sich um *konjunktive Anfragen* mit denen beispielsweise im Gegensatz zu SPARQL oder OWL DL ausdrucksstarke

Strukturen möglich sind. Allerdings existiert noch keine normative Syntax, da es sich nicht um eine spezifizierte Sprache handelt [Hitzler u.a. 2007]. Einen ersten Ansatz zur formalen Spezifikation konjunktiver Regeln und Anfragen stellen [Krötzsch u.a. 2008] vor.

In der vorgestellten Lösung wurden zwei Ontologiesprachen verwendet, welche auf einer vollständigen formalen Sprachdefinition aufbauen. Für eine genau formulierte und vollständige Erläuterung der Sprachsyntax und -semantik wird auf die entsprechende Literatur verwiesen. In dem vorliegenden Kapitel soll lediglich eine daran angelehnte, zusammengefasste und vorwiegend anwendungsorientierte Bildungsvorschrift der implementierten Regeln und Anfragen gegeben werden. Diese bauen auf den in [Fensel u.a. 1998, Decker u.a. 1998, Decker u.a. 1999] skizzierten Ansatz auf und erweitern, formalisieren und generalisieren diesen hinsichtlich der formalen Beschreibung der verwendeten Anfragen- und Regelstruktur. So wird eine allgemeingültige Formalisierung der verwendeten Anfrage- und Regelkomplexe entwickelt, welche für beide Ontologiesprachen gültig ist. Dadurch wird der Einsatz des Regel- und Anfragewerkes für den Anlagenanlauf von Montagesystemen vollständig beschrieben, was eine weitere Verwendung in anderen Domänen oder Phasen vereinfacht.

Für die Spezifikation von Regeln und Anfragen in F-Logic (Frame Logic) [Kifer u.a. 1995] und ObjectLogic [Angele 2012, Ontoprise 2012] wurden folgende zur Verfügung stehende Junktoren und Quantoren verwendet²⁷:

²⁷ Im Gegensatz zu F-Logic ist derzeit für ObjectLogic keine vollständig Formalisierung der Sprache verfügbar, sondern es existiert lediglich eine praxisnahe Einführung in Form eines Tutorials. Dennoch weisen beide Sprachen große Ähnlichkeiten auf, da ObjectLogic auf F-Logic aufbaut.

Tabelle 4: Genutzte Symbole zur Regel- und Anfragespezifikation

| Symbol | Definition | Bedeutung |
|--------------------------------|------------------------------|---|
| v_1, v_2, \dots | Variablen | Variablen werden als Prädikate innerhalb von Aussagen verwendet. Ist für einen zulässigen Variablenwert die Aussage wahr, ist die Variable eine gültige Belegung. |
| \vee | Disjunktion | Verknüpft zwei Aussagen mit einem logischen Oder. |
| \wedge | Konjunktion | Verknüpft zwei Aussagen mit einem logischen Und. |
| \neg | Negation | Kehrt den Wahrheitsgehalt der Aussage um. |
| \forall | Allquantor | Die Aussage muss für alle möglichen Variablen gültig sein |
| \exists | Existenzquantor | Es muss mindestens eine mögliche Variable existieren, damit die Aussage gültig ist. |
| $C(a)$ | Instanziierung | Das Objekt a ist eine Instanz der Klasse C . |
| $C \sqsubseteq B$ | Subsumption (auch Vererbung) | C ist dabei eine Unterkonzept von B , besitzt folglich alle Eigenschaften von B . |
| $R_{\text{Bezeichnung}}(A, B)$ | Rollen | <i>Bezeichnung</i> ist eine Rolle von A nach B ²⁸ . |

²⁸ Im Gegensatz zu den meisten anderen Spezifikationen wird bei der semantischen Sprache nicht unterschieden, ob die Rolle auf ein Literal oder eine Instanz verweist. Im Weiteren wird diese Unterscheidung zum besseren Verständnis jedoch wieder vorgenommen.

Tabelle 5: Entsprechung der Symbole in F-Logic und ObjectLogic

| Symbol | F-Logic Ausprägung | ObjectLogic Ausprägung |
|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| v_1, v_2, \dots | ? $v_1, ?v_2, \dots$ | ? $v_1, ?v_2, \dots$ |
| \wedge | AND | AND |
| \vee | OR | OR |
| \neg | NOT | NOT |
| \forall | FORALL | Standarddeklaration aller Variablen |
| \exists | EXISTS | EXIST |
| $C(a)$ | A:C | A:C |
| $C \sqsubseteq B$ | C::B | C::B |
| $R_{\text{Bezeichnung}(A,B)}$ | A[Bezeichnung \rightarrow B] | A[Bezeichnung \rightarrow B] |

Neben den spezifizierten Symbolen existieren noch Gliederungszeichen wie Klammern oder Kommata. Aussagen können dabei mit Klammern weiter strukturiert, untergliedert und damit zu komplexen Ausdrücken zusammengefasst werden. Kommata dienen vorrangig zur verkürzten Beschreibung eines Sachverhaltes. Zudem können noch Komparatoren (*größer als*, *kleiner als*) für den datenspezifischen Vergleich von Literalen und einfache arithmetische Ausdrücke (wie etwa Summenbildung) verwendet werden.

Die Verwendung von Variablen in den Aussagen realisierter *Anfragen* oder *Regelkörpern* lassen sich dabei in folgende grundlegende Gruppierungen einteilen:

- **Instanziierende Aussage I:** Die instanzierende Aussage $I(I_1, K_1)$ überprüft, ob eine Instanz I_1 vom Konzept K_1 ist.

- **Literale Aussage L:** Durch den Vergleich zweier atomarer oder komplexer Literale L_1 und L_2 wird der Wahrheitswert der Aussage $\mathbf{L}(L_1, L_2)$ gebildet. Komplexe Literale können dabei aus arithmetischen Ausdrücken mehrerer atomarer Literale bestehen.
- **Relationale Aussage R:** Bei dem Aussagentyp $\mathbf{R}_{Bezeichnung}(I_1, I_2)$ wird überprüft, ob eine Relation *Bezeichnung* von der Instanz I_1 zu der Instanz I_2 vorhanden ist.
- **Attributrelationen RA:** Der Aussagentyp $\mathbf{RA}_{Bezeichnung}(I_1, L_1)$ überprüft, ob eine Attributrelation *Bezeichnung* von der Instanz I_1 zu dem Literal L_1 vorhanden ist.

Bei den Aussagentypen I und L können Variablen lediglich in die Klammerwerte eingesetzt werden, bei den Gruppen R und RA können auch die Rollen selbst Variablen sein.

Die spezifizierten Aussagen lassen sich nun mit Junktoren $J (\wedge, \vee)$ miteinander verketten, mit Gliederungszeichen strukturieren, mit Quantoren $Q (\exists, \forall)$ einschränken und mit der Negation $N (\neg)$ negieren. Angelehnt an den Syntax regulärer Ausdrücke wird durch das vorangestellte Fragezeichen ? der nachfolgende Ausdruck als optional gekennzeichnet.

Die verwendeten Anfragen kann man formalisiert folgendermaßen ausdrücken:

Formel 6 Bildungsvorschrift für einfache Anfragen Γ

$$\Gamma: ?I(I_1, K_1) \wedge ?(Q?(N)[R_{Bezeichnung1}(I_1, I_2)]) \wedge ?(Q?(N)[RA_{Bezeichnung1}(I_1, L_1)]) \wedge ?(Q?(N) [L(L_1, L_2)])$$

Formel 7 Bildungsvorschrift komplexer Anfragen Θ

$$\Theta: \bigwedge_{0 < i < n} \Gamma_i$$

Zur Veranschaulichung der Bildungsvorschrift ist in nachfolgender Abbildung 54 eine komplexe Anfrage beispielhaft in die einzelnen beinhalteten Aussagen unterteilt, die konjunktiv miteinander verknüpft sind. Daran anschließend werden weitere implementierte Anfragen in Abbildung 55 dargestellt.

| |
|---|
| Anfrage: ?Z:Parameter[lastTargetValue-> ?X]@M and ?Z[hasMinimumValue-> ?Y]@M and ?Y > ?X |
| Aussagen: <i>Instanziierende Aussage</i> (?Z:Parameter); <i>Attributrelation</i> (?Z[lastTargetValue-> ?X]); <i>Attributrelation</i> (?Z[hasMinimumValue-> ?Y]); <i>Literale Aussage</i> (?Y > ?X) |

Abbildung 54: Beispielhafte Aufteilung einer Anfrage in einzelne beinhaltete Aussagetypen.

| |
|---|
| <p>1 ?PRODUKT:Produkt[hatBeschreibung->?PRODBESCHREIBUNG, hatProduktFamilie->?PRODFAMILIE, hatKomponente-> ?KOMPONENTE [hatBeschreibung -> ?KOMPBECHREIBUNG], mit-> ?PARA:Parameter, mit->DATA:DatenWert]@M</p> |
| <p>2 ?X:DatenWert@M and not (EXIST ?EREIGNIS ?EREIGNIS:Ereignis[beziehtSichAufDatenWert -> ?X]@E)</p> |
| <p>3 ?EREIGNIS:Ereignis[hatEreignisZeit ->?EREIGNISZEIT, hatUID ->?UID, hatQuellStation ->?QUELLSTATION, hatQuellSystem ->?QUELLSYSTEM, hatHauptTyp->?MAINT, hatPrimaerWert ->?PRIMWERT, hatPrimaerWertStr ->?PRIMWERTSTR, hatPrimaerWertEinheit ->?PRIMEINHEIT, hatZyklusID ->?ZYKLUSID, hatZyklusBeginn->?ZYKLUSBEGINN, hatZyklusDauer ->?ZYKLUSDAUER]@M and ? EREIGNIS[beziehtSichAufParameter->?PARA]@E and not (EXIST ?EREIGNIS2, ?EREIGNISZEIT2 ?EREIGNIS2 :Ereignis[hatEreignisZeit-> ?EREIGNISZEIT2, beziehtSichAufParameter->?PARA]@M and (? EREIGNISZEIT2 > ? EREIGNISZEIT)).</p> |

Abbildung 55: Exemplarische Darstellung dreier implementierter Anfragen. *Anfrage 1* erfragt Beschreibungen der Produkte und diverser Attributrelationen und Relationen, *Anfrage 2* überprüft, ob zu einem Datenwert auch zugeordnete Ereignisse existieren und *Anfrage 3* erfragt zu dem jeweils aktuellsten Ereignis der Parameter relevante Werte.²⁹

Wie bereits erwähnt, werden Regeln nach dem gleichen Muster gebildet. Zusätzlich zu dem vorgestellten Muster werden lediglich im *Regelkopf* für alle möglichen Variablenbelegungen entsprechend den Spezifikationen neue Konzepte, Instanzen oder Rollen erzeugt.

Grundvoraussetzung für die Erfüllbarkeit der Regeln ist die *Stratifizierbarkeit* der Regeln. Dabei werden Aussagen so in einzelne Schichten geordnet, dass der Wahrheitsgehalt der Aussage einer Ebene nur von untergeordneten Schichten abhängt. Durch dieses Vorgehen wird beispielsweise die Nutzung von Rekursionen eingeschränkt [Eckert u.a. 2011]. Im Unterschied zu Anfragen können Regeln andere Regeln aufrufen, weswegen der Stratifizierung besondere Bedeutung zukommt.

²⁹ Die Anfragen sind dabei verkürzt hinsichtlich ihres aussagenlogischen Teils wiedergegeben.

7.1.9 Parametrisierte Rollen in der Ontologie

Neben der rein funktional gestalteten und vorgestellten Ontologie kann es durchaus zweckmäßig sein, eine andere Ausprägungsvariante zu wählen (siehe dazu auch Kapitel 8.4). Als technische Möglichkeit soll noch die Modellierung parametrisierbarer Relationen und Attributrelationen exemplarisch vorgestellt werden. Dabei werden Rollen mit einem weiteren Element (beispielsweise Instanzen) parametrisiert.

Für eine Vielzahl von Anwendungen ist die parametrisierte Gestaltung konzept- oder instanzspezifischer Verbindungen verwendbar und vorteilhaft. Dies bietet die Möglichkeit, in der weiteren Modellspezifikation auf die generischen Rollennamen zugreifen zu können, die für alle Objekte identisch sind. In dem in Kapitel 2.2.2 vorgestellten und in 3.2 analysierten Phasenmodell ist insbesondere die projektspezifische und produktabhängige Zuordnung von Information relevant. Abbildung 56 demonstriert die Verwendung produktspezifischer Einstellungen³⁰.

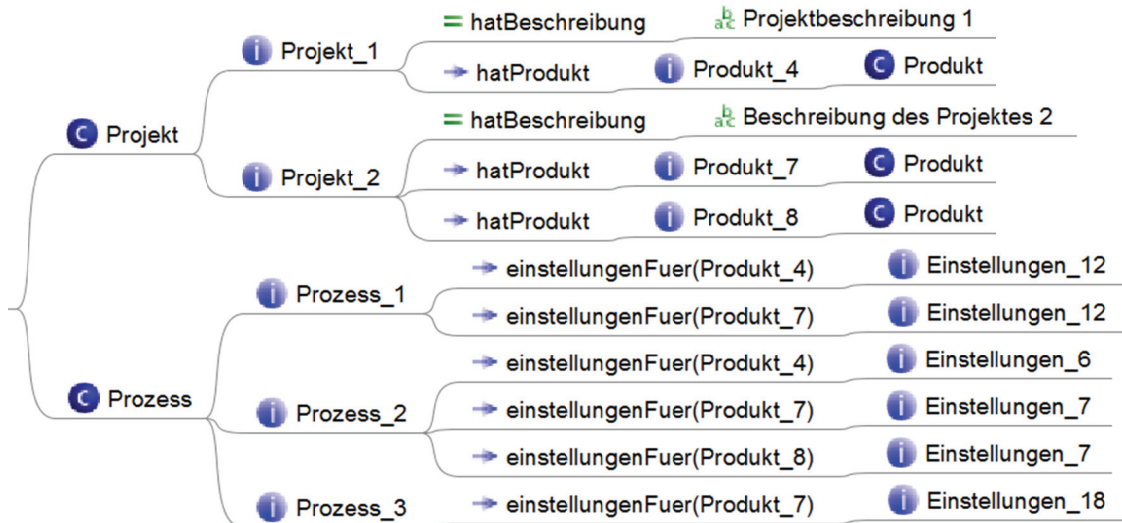


Abbildung 56: Ausschnitt einer Ontologie zur Demonstration instanzspezifischer Verbindungen

³⁰ Diese sind dabei in den mit *Einstellung*- beginnenden Instanzen gespeichert. Das zugrunde liegende Konzept, welches eine attributive Zuordnung der produktspezifischen Parameter beinhaltet und die Instanz, welche die jeweilige Ausprägung der Einstellungen darstellt, wird nicht näher erläutert.

In dem vorgestellten Beispiel werden in zwei Projekten (*Projekt_1* und *Projekt_2*) mehrere Produkte (*Produkt_4*, *Produkt_7*, *Produkt_8*) gefertigt. Den dafür benötigten Prozessen wird in einem weiteren Schritt eine produktspezifische Einstellung zugeordnet. Dabei kann auch für mehrere Produkte die gleiche Einstellung (siehe *Prozess_1*) oder verschiedene Konfigurationen (siehe *Prozess_2*) verwendet werden. Wie in allen vorangegangenen Relationen ist auch hier die Anzahl der Ausprägungen optional (*Prozess_3*).

In der zugehörigen Anfrage kann dann zunächst die Variable für das Produkt besetzt und anschließend in die Relation eingesetzt werden.

```
?Projekt:Projekt[hatProdukt-> ?Produkt]
AND ?Prozess:Prozess[einstellungenFuer(?Produkt)-> ?Einstellungen]
```

Abbildung 57: Quellcode-Auszug aus der spezifizierten Anfrage bei der Produkte über die Relation *hatProdukt* identifiziert werden und weiter in der Verbindung *einstellungenFuer()* genutzt werden³¹

Für Attribute ist dasselbe Prinzip anwendbar. Es muss lediglich beachtet werden, dass stets die Verbindung unmittelbar vor dem geänderten Wert parametrisiert werden muss (vgl. Abbildung 58).

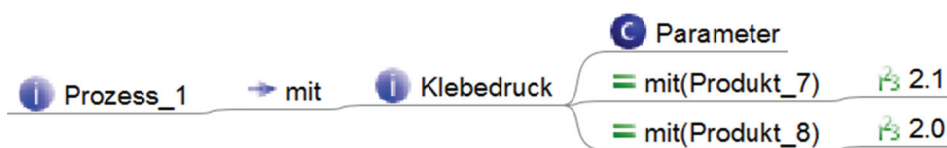


Abbildung 58: Exemplarisch instanziierte Attributrelation für spezifische Werte für zwei Produkte (*Produkt_7*, *Produkt_8*)

³¹ Die Anfrage verwendet dabei keine parametrisierten Rollen im strengeren Sinne, da hier lediglich der softwareinterne Umgang von *Strings* genutzt wurde. Die Relation *einstellungenFuer(Produkt_7)* wird komplett als durchgängiger String gespeichert und nicht als eine instanziierte Relation an sich erkannt. Allerdings kann durch die geschickte Verkettung bei der Abfrage eine Parametrisierung nachgebildet werden. Dazu wird zunächst das parametrisierte Element festgelegt (in unserem Fall *?Produkt*) und lediglich in die Verbindung *einstellungenFuer(?Produkt)* eingesetzt.

Dieses Prinzip ist bei der Maschinen- und Anlagenindustrie des weiteren dahingehend interessant, da oftmals auf derselben Maschine unterschiedliche Varianten gefertigt werden, die meist eine produktabhängige Anlagenspezifikation erfordern. Zudem können projekt- oder mitarbeiterspezifische Informationen auf diese Weise gruppiert werden.

Die dargestellte Ontologie wurde hinsichtlich der im weiteren Verlauf genutzten Werkzeuge entwickelt und angepasst. Nach der detaillierten Vorstellung der generierten Ontologie werden im Folgenden die verwendeten Technologien vorgestellt. Bei einer Nutzung anderer Softwarelösungen ist je nach Funktionsumfang eine Anpassung der vorgestellten Struktur eventuell erforderlich.

7.2 Realisierung und Nutzung des Modells

Bei der Implementierung wurde für die Erstellung des initialen Struktur und Verhaltensmodells eine semantisch annotierte MindMap mit *Freemind* [FreeMind 2011] und *Freeplane* [Freeplane 2012] verwendet. Diese werden mit *mm2flo* [Ontoprise 2011b] und *semAuth* [Busse 2011] in die Ontologiesprachen *Frame-Logic* und *ObjectLogic* übersetzt. Die dabei generierte Datei hat die Daten in dem Format der Ontologiesprache angeordnet. Diese kann nun unmittelbar in die semantische Middleware *Ontobroker* [Ontoprise 2011c]³² eingelesen und gespeichert werden. Hinzukommende Daten des Ereignis- und des Verhaltensmodells werden ab dann direkt im Ontobroker gespeichert.

Durch die Verwendung von Standards wie RDF (Kurzform für Resource Description Framework) oder OWL können auch alternative Softwarelösungen eingesetzt werden, welche konform zu dem in Kapitel 4.2.1.3 vorgestellten Standards sind. Die Transformation von F-Logic oder ObjectLogic in eine andere Sprache kann direkt von der eingesetzten Middleware übernommen werden (vgl. Abbildung 59).

³² Die Middleware wurde dabei in den Versionen 5.1 und 6.0 installiert und getestet. Die erstgenannte Version basiert dabei auf F-Logic. Ontobroker 6.0 baut auf ObjectLogic auf und unterstützt dabei die *SHIQ(D)* Teilmenge von OWL DL (siehe dazu Kapitel 4.2.1.3). OWL 2 wird mit wenigen Einschränkungen unterstützt.

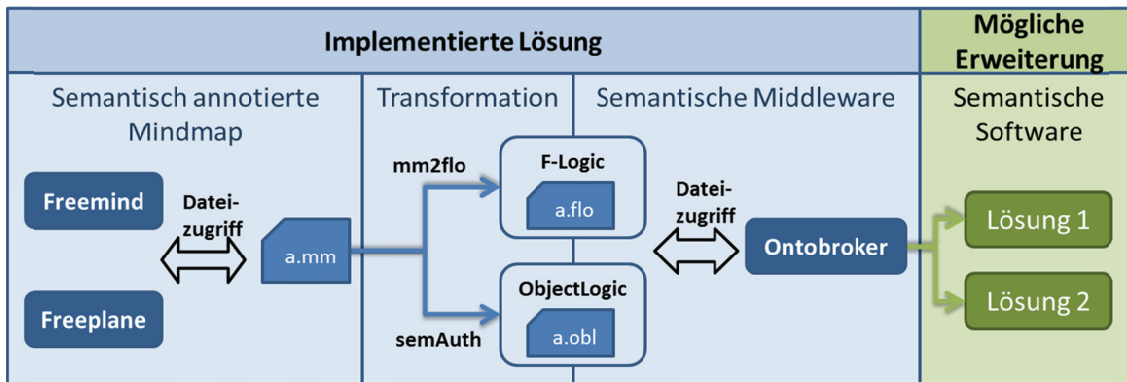


Abbildung 59: Werkzeugkette und Dateiaustausch der vorgestellten Lösung inklusive potentieller weiterer Integrationsmöglichkeit standardkonformer Softwarelösungen.

7.2.1 Instanziierung des Modells und Speicherung im TripleStore

Das vorgestellte Strukturmodell kann nun anhand der definierten Produkt-, Prozess- und Maschinenspezifikation instanziiert werden. Dabei können Produktionsmitarbeiter dies manuell in der Mindmap vornehmen. Bei Maschinen- und Anlagenherstellern wird für Anlaufprojekte oftmals eine strukturierte Maschinenspezifikation erstellt. Mit der entwickelten Lösung ist es möglich, diese vorhandenen Informationen einzulesen und anhand der definierten Ontologie Instanzen automatisiert zu erzeugen. Ein Datenimport kann mit gängigen Datenbanklösungen (Oracle, SQL, MySQL oder DB2) oder mit der auf Java basierenden Datenbankschnittstellen JDBC (Java Database Connectivity) vollzogen werden.

7.2.2 Aufzeichnen empfangener Daten

Zur umfassenden Nutzung des entwickelten Lösungsansatzes muss das System in die Produktions-IT integriert werden. Ansonsten können keinerlei Daten der Maschine, HMI-Eingaben der Mitarbeiter oder Informationen anderer Software-Systeme erfasst werden. Die Integration kann mittels Web Services erfolgen. Zusätzlich bietet Ontobroker noch eine Programmierschnittstelle in Java und .Net an. Alle empfangenen Daten werden dabei direkt im Ontobroker gespeichert.

7.2.3 Aufnahmen auftretender Probleme

Informationen von den Produktionsmitarbeitern können über HMI-Eingaben direkt an den Ontobroker gesandt und gespeichert werden. Dabei werden die in der Ontologie (vgl. Kapitel 7.1.3.2) vordefinierten Schemata verwendet. Diese können dann zusätzlich durch Freitexte ergänzt werden

7.2.4 Hinterlegtes Regelwerk

Das hinterlegte Regelwerk kann in Form einer Textdatei eingesehen und modifiziert werden. Ontobroker erzeugt im Gegensatz zu anderen open-source Systemen einen gerichteten Regelgraph und arbeitet die Regeln sequentiell in der benötigten Reihenfolge ab. Das bedeutet, bei der Regelspezifikation in einer hierarchischen Art und Weise muss nicht auf die richtige Abfolge der Regeln geachtet werden, da die notwendige Ausführungsordnung automatisiert durch die Software erfolgt.

7.2.5 Anfragen der Wissensbasis

Die Wissensbasis kann jederzeit von beteiligten Produktionsmitarbeitern in den Sprachen F-Logic oder ObjectLogic abgefragt werden³³. Es können alle in Kapitel 6.5 erläuterten Möglichkeiten einer Datenbankabfrage genutzt werden. Dabei können die Ergebnisse in Tabellenform angezeigt oder in Form ereignisdiskreter Events (vgl. Kapitel 6.3) zur automatischen Verarbeitung durch zusätzliche Softwaresysteme ausgegeben werden. Zudem stehen eine Reihe von Einschränkungen oder Ausgabeoptionen für spezifizierte Suchanfragen zur Verfügung. So kann die maximale Anzahl ausgegebener Ergebnisse im Vorfeld festgelegt, die Ausgabe nach bestimmten Kriterien sortiert oder nicht gesetzte Werte (auch *Nullwerte*) bei den Ergebnissen ignoriert werden. Bei der Verwendung von *Nullwerten* werden folglich Platzhalter für einzelne Variablen zugelassen, was auch bei unvollständiger Variablenbelegung zu einer Ausgabe mit entsprechenden Leerstellen führt.

³³ SPARQL kann dabei von Ontobroker auch direkt als Abfragesprache verwendet werden, da es auf das RDF-Format aufsetzt. Von dieser Funktionalität wurde jedoch im vorliegenden Beitrag nicht Gebrauch gemacht.

8. Entwicklung des Verfahrens zum semantisch unterstützten Anlagenanlauf

Für eine effektive und effiziente Nutzung des vorgestellten Modells muss die Erstellung, Nutzung und Wiederverwendung erfolgreich in den Ablauf des Anlagenanlaufs integriert werden. Da die Phasen des Anlaufs je nach Unternehmen unterschiedlich ausgeprägt sind und auftretende Problematiken beziehungsweise Fragestellungen je nach Zielmarkt oder Anlagentyp beträchtlich variieren, ist dies eine essentielle Voraussetzung, um die genannten Vorteile des entwickelten Modells nutzen zu können. Aus diesen Gründen soll in folgendem Kapitel die systematische Konfiguration der einzelnen Teilmodelle erläutert werden. Dabei ist der vorgestellte Ablauf mehrfach iterativ zu durchlaufen, da nicht alle Rahmenbedingungen und Querbeziehungen im Vorfeld absehbar sind. So kann beispielsweise die Modellierung einzelner Komponenten zur Zielerreichung von Produktionsexperten gefordert werden, aufgrund des hohen Modellierungsaufwandes aber nicht wirtschaftlich sein.

8.1 Entwicklung des Verfahrens

Wie bereits in Kapitel 4.2.1.1 erläutert, hat sich im Gegensatz zur etablierten Softwareentwicklung keine standardisierte Vorgehensweise bei der Entwicklung von Ontologien gebildet. Grundlegend bei der Gestaltung einer Ontologie ist der Einsatz einer iterativen Vorgehensweise zur schrittweisen Verbesserung.

Die Schritte in Kapitel 8 sind an [Stuckenschmidt 2011] angelehnt, der einen pragmatischen und anwendungsorientierten Gestaltungsleitfaden von Ontologien beschreibt. Diese Vorgehensweise wurde nun auf die Rahmenbedingungen und Anforderungen des entwickelten Modells für den Anlagenanlauf adaptiert und in ein entsprechendes Vorgehen eingearbeitet. Dabei werden insgesamt sechs Verfahrensschritte zur nachhaltigen Verwendung des Lösungsansatzes vorgestellt (vgl. Abbildung 60). Nach der Festlegung der *Rahmenbedingungen* für die Verwendung des Modells (Schritt 1) müssen die zu erreichenden *Ziele* klar definiert werden (Schritt 2). Anschlie-

End kann das eigentliche *Modell* für den Anlagenanlauf basierend auf einer Systemanalyse erstellt und iterativ verbessert werden (Schritt 3). Nach erfolgreicher *Überprüfung* des Modells (Schritt 4) muss es an die IT-Infrastruktur angebunden werden, bevor es schlussendlich *genutzt* werden kann (Schritt 5). Mit der *Nachbereitung* der modellierten Informationen wird das entwickelte Verfahren abgeschlossen (Schritt 6). Am Ende jedes Kapitels wird eine tabellarische Übersicht mit den wichtigsten Punkten gegeben.

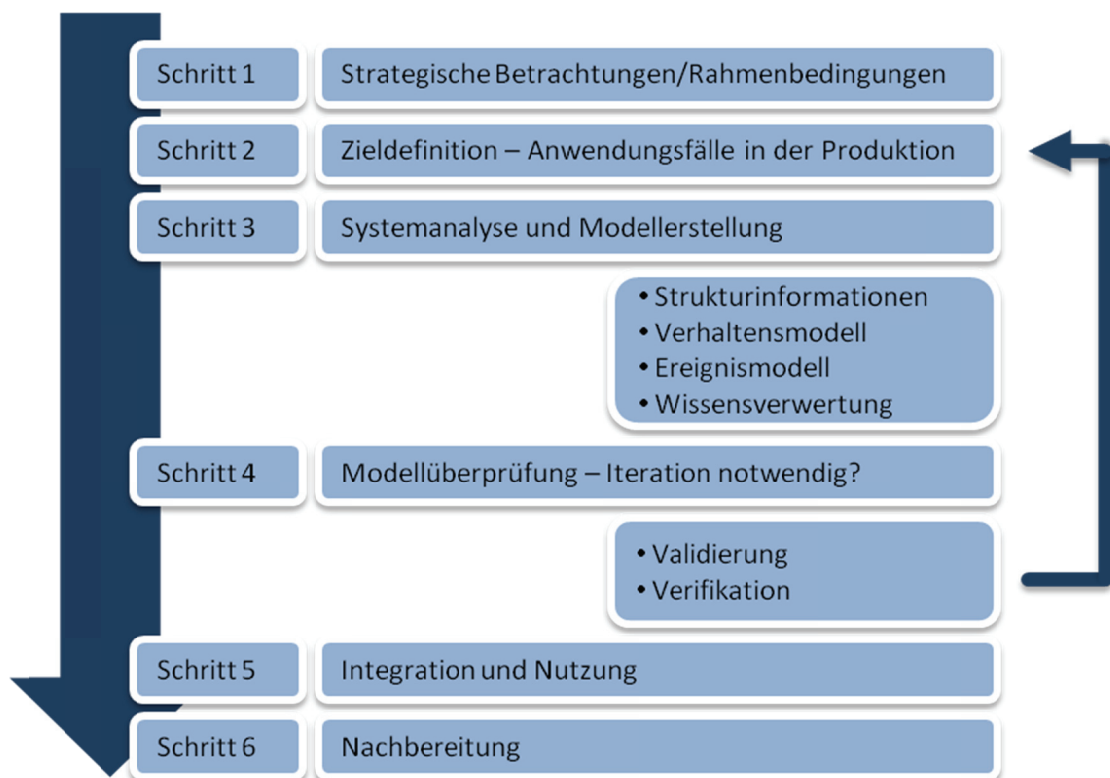


Abbildung 60: Schrittweiser Ablauf des Verfahrens zum semantisch unterstützten Anlagenanlauf

8.2 Strategische Betrachtungen und Rahmenbedingungen

Ausgangspunkt für die Nutzung des vorgestellten Modells und aller zugehörigen Komponenten ist eine strukturierte und dokumentierte Einsatzanalyse innerhalb des Unternehmens. Je nach gewähltem Geschäftsmodell, strategischen Überlegungen und

Rahmenbedingungen wie Geheimhaltungsvereinbarungen mit Kunden oder der Schutz innerbetrieblichen Knowhows, kann dies stark variieren. Gemäß den Kundenforderungen werden beispielsweise externe Mitarbeiter bereits an noch nicht fertig gestellten Montageanlagen oder -systemen geschult. Da zu diesem Zeitpunkt der fehlerfreie Betrieb noch nicht gewährleistet oder erreicht ist, bietet diese Vorgehensweise den Vorteil Montagemitarbeiter des Kunden bereits während der Fertigstellung der Anlagen einzuarbeiten. Dies stärkt ihr Systemverständnis und sie werden frühzeitig mit einer Vielzahl auftretender Problematiken vertraut, die in einem stabilen System unter Umständen nur sehr selten auftreten.

Bei dem in Kapiteln 5, 6 und 7 vorgestellten Modell bietet sich die Möglichkeit, Erfahrungen und Daten ähnlicher oder bereits fertiggestellter Systeme für weitere Projekte wiederzuverwenden. Betreffen diese Projekte den gleichen Kunden, ist es höchstwahrscheinlich unproblematisch; sollten allerdings ähnliche Anlagen für konkurrierende Unternehmen gefertigt werden, müssen die jeweiligen Rahmenbedingungen hinsichtlich eines möglichen Transfers von Projektergebnissen und Erfahrungen beachtet werden. Eine weitere Fragestellung ist die Einbindung externe Mitarbeiter in den vorwiegend internen Prozess der Wissensgenerierung und -verwertung.

Zur Lösung der vorgestellten Problematik kann das generierte Wissen aufgrund der spezifizierten Anforderungen weiter kategorisiert werden. Basierend auf den in Kapitel 3.2 betrachteten Rahmenbedingungen des Anlagenanlaufs wurden vier grundlegende Kategorien festgelegt:

- **Freies Wissen** - In diesem Modul spezifizierte Informationen werden zur weiteren freien Nutzung gekennzeichnet. Das gesammelte Wissen kann sowohl über Kunden, Projekte als auch externe und interne Mitarbeiter geteilt und verbreitet werden.
- **Intern** – In diesem Modul werden alle Informationen gesammelt, die nur intern genutzt werden. Dies umfasst vorwiegend Erfahrungen, die aus dem internen Anlauf (vgl. Kapitel 2.2.2) gewonnen werden. Erfahrungen aus dem externen Anlauf können aufgrund der Rahmenbedingungen des externen Personals nur sehr bedingt verwendet werden.

- **Kundenspezifisch** – Bei langfristigen Kundenbeziehungen bietet sich die Einbindung externer Mitarbeiter in die Wissensgenerierung und -verwertung an. Dabei können zusätzlich zu dem frei verfügbaren Wissen Erfahrungen vergangener und gegenwärtiger Kundenprojekte genutzt werden. Aufgrund der Vielzahl an Maschinen ist hier ein Nutzwert zu erwarten.
- **Projektspezifisch** – Aufbauend auf frei verfügbarem Wissen wird spezifisch für ein Projekt der Lösungsansatz eingesetzt. Generiertes Wissen ist dabei an das Projekt gebunden und kann folglich nicht mehr eingesetzt werden. Da ein relativ hoher Aufwand für eine einmalige Nutzung vorliegt, ist dieses Vorgehen nur bei komplexen Projekten zu empfehlen. Auch empfiehlt sich zur Reduzierung des Aufwands eine enge Eingrenzung der zu lösenden Anwendungsfälle in folgendem Kapitel 8.3.

Diese Einteilung und entsprechende Anwendung der Lösung kann sowohl einmal grundlegend für alle Projekte vorgenommen werden oder in verschiedenen Mischformen vorkommen. Zweites bedingt die Einteilung der Teilmodelle in weitere charakteristische Module, wobei dies bei der ersten Einteilung nicht notwendig ist. Dabei muss zwischen der Verwendung existierenden Wissens und der Speicherung neuer Erfahrungen unterschieden werden. So kann frei verfügbares Wissen auch für den Anlauf von Montagesystemen mit strikter Geheimhaltungsvereinbarung genutzt werden, wobei das erlangte Wissen in dem Anlauf jedoch nicht zur freien Verfügung steht.

Für eine nachhaltige Nutzung erstellter Modelle und erfolgreiche Wiederverwendung einzelner Modellteile in anderen Anlaufprojekten ist eine gemeinschaftliche Festlegung auf verwendete Begriffe und Definitionen eine notwendige Voraussetzung. Die Verwendung unterschiedlicher Wortbedeutungen in Anlaufprojekten erhöht den Aufwand zur nachträglichen Integration einzelner Teile immens. Zudem ist der effiziente Wissenstransfer zwischen Projektteams und Mitarbeitern erheblich gehemmt, wenn stets projektspezifisches Vokabular verwendet wird. Neben dem einheitlichen Vokabular sollte auch der grundsätzliche Aufbau der Modelle soweit möglich standardisiert strukturiert sein. Für alle weiteren Überlegungen in folgenden Kapiteln wird von diesen Vorüberlegungen ausgegangen.

Tabelle 6: Notwendige Schritte bei Strategischen Betrachtungen

| Verfahrensschritt | Notwendige Schritte |
|----------------------------|--|
| 1 Strategische Betrachtung | <ul style="list-style-type: none"> • Kategorisierung der Teilmodelle oder generelle Entscheidung zur Nutzung der Lösung • Gemeinsames Vokabular und Modellstruktur |

Nach Beantwortung dieser vorrangig strategischen Fragestellungen zur Nutzung der Lösung wird im Weiteren auf die eigentlichen Anwendungsfälle eingegangen.

8.3 Zieldefinition und Anforderungsprofil

Nach Festlegung der auf unternehmerischen Entscheidungen beruhenden strategischen Rahmenbedingungen gilt es, die eigentlichen Anforderungen und Problemstellungen der Produktionsmitarbeiter zu definieren. Sind schon Anforderungen und Anwendungsszenarien von Vorgängerprojekten definiert, können diese als Ausgangsbasis verwendet und adaptiert werden. Zur Erhebung der Anforderungen können unterschiedliche Techniken verwendet werden. Ein oft genutztes Mittel ist die Beschreibung *rollenbasierter Anwendungsfällen* aus denen anschließend gemeinsame Anforderungen abgeleitet werden [Kleuker 2011].

Hierbei werden die verschiedenen Verantwortlichkeitsbereiche aller beteiligten Mitarbeiter beim Anlagenanlauf definiert (z.B. Techniker, Ingenieure, Projektleiter etc.). Diese definieren dann ihre interessierenden Anwendungsfälle bei denen sie von dem vorgestellten Modell unterstützt werden möchten. Bei der Festlegung der Anwendungsfälle ist hauptsächlich die Frage zu beantworten, welche Datensätze oder Informationen in welchem Zusammenhang hilfreich bei der Problemanalyse des derzeitigen Anlagenanlaufs oder zukünftiger Anlaufprojekte sind oder sein könnten. Zusätzlich sollten noch typische Problemfälle des Anlagenanlaufs bei dem vorliegenden Montagesystem betrachtet werden. Aus den so spezifizierten Anwendungsfällen lassen sich dann

systematisch Anforderungen an das Modell ableiten. Unter anderem bietet sich eine Priorisierung der Anforderungen für die weitere Verwendung an.

Tabelle 7: Vorgehen bei der Zieldefinition

| Verfahrensschritt | Notwendige Schritte |
|-------------------|--|
| 2 Zieldefinition | <ul style="list-style-type: none"> • Festlegung rollenbasierter Anwendungsfälle • Ableitung der Anforderungen • Priorisierung der Anforderungen |

Basierend auf der Zieldefinition werden die einzelnen Teilmodelle analysiert und modelliert. Dabei ist die ganzheitliche Betrachtungsweise und Analyse hinsichtlich der gesetzten Zieldefinition zu betrachten.

8.4 Systemanalyse und Erstellung der Teilmodelle

In diesem Kapitel wird das zu betrachtende System von seiner Umwelt abgegrenzt. Alle für einen späteren Zeitpunkt wesentlichen Elemente müssen hier abgebildet und modelliert werden.

8.4.1 Strukturelle Informationen

Für die Modellierung struktureller Informationen kann sich an den in vorigen Kapiteln vorgestellten Konzepten *Produkt*, *Prozess* und *Systemhardware* orientiert werden. Allerdings können je nach gewünschter Anwendung des Modells auch andere Systemgrenzen zielführend werden. Beispiele sind Materialzuführungen und Vereinzelungen, Werkstückträger, elektrische Komponenten oder die detaillierte Darstellung einzelner Softwaresysteme.³⁴ Bei verfügbaren Sensoren und Parametern des Montagesystems muss aufgrund der Anzahl, wie in Kapitel 5.1.2 beschrieben eine Unterteilung in rele-

³⁴ In Kapitel 3.1 sind mehrere mögliche Betrachtungsweisen und Ansätze genannt, die als Ausgangsbasis dienen können.

vante und nicht betrachtete Elemente vorgenommen werden. Ausschlaggebend für eine Abgrenzung des Strukturmodells ist es, die Anzahl der möglichen Datenquellen und Einstellmöglichkeiten auf den für den Anlagenanlauf interessierenden Teil zu reduzieren. Sollte zu einem späteren Zeitpunkt festgestellt werden, dass weitere Informationen notwendig sind, können diese immer noch hinzugefügt werden.

Um doppelte Datenhaltung zu vermeiden und den manuellen Aufwand möglichst gering zu halten, ist die Verwendung bestehender Datensätze für die Initialisierung des strukturellen Modells anzustreben. Falls schon Strukturmodelle aus Vorgängerprojekten vorhanden sind, ist zu prüfen ob und in welcher Weise diese verwendet werden können. Eine grundlegende Aufbereitung existierender Ontologien ist oftmals aufwendiger als die Neugestaltung [Stuckenschmidt 2011], weshalb bei Abweichungen lediglich ein Import von sehr ähnlichen Teilmodellen oder essentiellen Informationen empfohlen wird.

Nach Festlegung der relevanten Betrachtungselemente in einem gemeinsamen Workshop ist die Frage der Modellierung und Vererbungshierarchie zu klären. Dies wird im Wesentlichen von dem tatsächlichen Aufbau der betrachteten Produkte, Prozesse und Montagesysteme vorgegeben. Strukturelle Relationen lassen sich aus dem Aufbau der Elemente ableiten und in dem System dokumentieren.

Zudem sind auch die zu lösenden Anwendungsfälle und die Anfragestrategie, also die anschließende Wissensverwertung für die Modellierungsstruktur maßgeblich. Grundsätzlich ist zu klären, welche Elemente in welcher Granularität dargestellt werden sollen und welche Datenaggregationen und Abfragen man später durchführen möchte.

Durch die Verwendung einer graphenbasierten Ontologie kann das Strukturmodell initial in einer Mindmap gemeinsam im Rahmen eines Workshops gestaltet werden. Auch die notwendige Granularitätsstufe lässt sich von erfahrenen Produktionsexperten meist intuitiv festlegen. Eine einfache Grundregel stellt die Frage dar, ob solche Elemente hilfreich sind bzw. in früheren Projekten bei Problemen schon genutzt wurden oder ob sie kaum betrachtet werden. Die semantischen Metadaten können direkt wäh-

rend der Modellierung oder nachträglich von den Produktionsexperten selbst eingefügt werden. Hierfür ist lediglich eine kurze Einführung notwendig.

Tabelle 8: Definition des Strukturmodells

| Verfahrensschritt | Notwendige Schritte |
|--------------------------------|--|
| 3.1 Strukturelle Informationen | <ul style="list-style-type: none"> • Festlegung der Systemdomäne³⁵ • Erhebung welche Informationen schon verfügbar sind und ggf. importiert werden können • Ausprägung der Ontologie |

8.4.2 Verhaltensmodell

Für die Modellierung der Systemzusammenhänge ist es zunächst wichtig zu unterscheiden, welche Verbindungen trivial ersichtlich sind, welche Zusammenhänge man im laufenden Betrieb erfassen muss und welche Regeln man zur automatischen Verarbeitung der erfassten Informationen aufstellen kann. Trivial ersichtliche Relationen ergeben sich bereits aus dem Aufbau des Montagesystems, dem verwendeten Produkt und der eingesetzten Prozesse. Dieser Verbindungstyp ist aufgrund der unternehmensweiten Standardisierung meist relativ starr vereinheitlicht und formalisiert. Die Erfassung während des laufenden Betriebs dient indessen hauptsächlich der Dokumentation auftretender Probleme, Beobachtungen und Lösungsstrategien. Auftretende Geschehnisse sollen dabei kategorisiert und soweit möglich mit relevanten Daten verknüpft werden. Grundsätzlich empfiehlt sich hier das vorwiegende Anbieten und Verwendung von Freitext. Damit können Produktionsexperten ihre Informationen flexibel und nicht starr gebunden dokumentieren. Der gesetzte Kontext und eine Kategorisierung ermöglichen ein zielgerichtetes Bündeln und Wiederfinden relevanter Angaben.

³⁵ [Stuckenschmidt 2011] empfiehlt den Gebrauch sogenannter *Competency Questions*, welche von der Ontologie zu lösende Fragen darstellen. Zu dem entwickelten Vorgehensmodell transferiert, sind dies im Prinzip die Anwendungsfälle, welche sich mithilfe der Ontologie lösen lassen sollen.

Ein besonderer Fokus sollte auf die Verknüpfung von Ereignissen und Beobachtungen während des Anlagenanlaufs gelegt werden. Erfahrungsgemäß sind dies die bedeutendsten und hilfreichsten Informationen und sollten aus diesem Grunde möglichst vielseitig genutzt werden. Ausgehend von den Anwendungsfällen und bereits erfahrenen Problematiken beim Anlagenanlauf sind Konzepte zu definieren, mit welchem man die jeweiligen Informationen einfach und übersichtlich darstellen kann. Da aufgrund der in Kapitel 3.2 erläuterten Rahmenbedingungen bezüglich der Ressourcenknappheit nur sehr wenig Zeit für eine detaillierte Erfassung verwendet werden soll, ist eine automatische Verbindungserstellung mit weiteren relevanten Objekten der Wissensbasis anzustreben. Dies wurde zum Beispiel in Kapitel 6.2.2.2 skizziert.

Basierend auf den Erfahrungen der Produktionsmitarbeiter werden allgemeingültige Regeln formuliert, welche die abgebildeten Informationen automatisch weiter verarbeiten. Aufgrund der Komplexität der Regelformalisierung bietet es sich an, zunächst die Regeln natürlich sprachlich zu formulieren und zu einem späteren Zeitpunkt zu formalisieren. Speziell wenn keine Erfahrungen vergangener Projekte oder Modelle verwendet werden können, ist dort zu Projektbeginn von relativ vielen Änderungen auszugehen. Bei einfachen direkten Relationen (wie Antisymmetrie oder Transitivität) muss beachtet werden, die manuell erfassten Informationen nicht zu stark mit allen anderen Modellentitäten zu vernetzen. Bereits mit wenigen Regeln ist ein verworrenes Beziehungsgeflecht unzähliger Verbindungen realisierbar, was aufgrund der Unübersichtlichkeit allerdings keinen weiteren praktischen Nutzen für die Produktionsmitarbeiter liefert. Aus diesen Gründen soll der Fokus auf einer maßvollen und zielgerichteten Verwendung des Regelwerkes gesetzt werden.

Tabelle 9: Festlegung des Verhaltensmodells

| Verfahrensschritt | Notwendige Schritte |
|----------------------|---|
| 3.2 Verhaltensmodell | <ul style="list-style-type: none"> • Spezifizierung trivialer Relationen • Spezifikation beobachtbarer komplexer Relationen • Formulierung von Regeln • Formalisierung von Regeln |

Essentiell für Überlegungen sind zum Einen die spezifizierten Anwendungsfälle, da mit dem Systemverhalten das wesentliche Knowhow der Mitarbeiter modelliert wird, was später zu einer Problemlösung dienen soll. Zum Anderen muss auf eine mitarbeiterfreundliche Einbindung der beteiligten Produktionsexperten geachtet werden. Ein zu hoher manueller Aufwand zur Wissensmodellierung und -eingabe ist aufgrund der in Kapitel 3.2 ermittelten Rahmenbedingungen des Anlagenanlaufs unbedingt zu vermeiden.

8.4.3 Ereignismodell

Wie bereits in Kapitel 6.3 beschrieben, werden Maschinendaten, HMI-Eingaben und Informationen weiterer eingesetzter Softwarelösungen als Ereignisse in das semantische System übermittelt. Dabei ist die Frage verwendeter Datentypen, des Datenvolumens und des Datentransfers zu berücksichtigen. Je nach definierter Zielsetzung und Rahmenbedingungen kann auch eine zu Kapitel 5.1.1 unterschiedliche Variante gewählt werden.

Zunächst müssen interessierende Softwaresysteme (wie Condition Monitoring oder SPC) identifiziert werden. Sollten sie hilfreiche Informationen für den Anlauf bereitstellen, sind diese im Weiteren zu beachten. Anschließend muss eine Analyse hinsichtlich der Anzahl zu beobachtender Datenquellen und Einschätzungen hinsichtlich des zu erwartenden Datentransfers gemacht werden. Wie bereits in Kapitel 5.1.2 erwähnt, muss eine Abstraktion bzw. Filterung aller verfügbaren Daten erfolgen um ein sinnvolles Niveau zu erreichen.

Nach der Festlegung auf ausschlaggebende Datenquellen und -typen muss ein geeignetes Ereignisformat festgelegt werden. Generell muss darauf geachtet werden, dass die Ereignisstruktur modular genug ist um auch eine Vielzahl bereitgestellter Zusatzinformationen zu den jeweiligen Ereignissen darstellen zu können. Allerdings sollten die wesentlichen Informationen möglichst direkt in Form von Attributen ersichtlich sein. Je nach Rahmenbedingungen kann man sich auf eine gemeinsame Struktur oder mehrere spezifische Formate festlegen.

Tabelle 10: Spezifikation des Ereignismodells

| Verfahrensschritt | Notwendige Schritte |
|--------------------------|---|
| 3.3 Ereignismodell | <ul style="list-style-type: none">• Identifikation relevanter Softwaresysteme• Analyse hinsichtlich Anzahl der Datenquellen und Höhe des Datentransfers• Notwendiger Abstraktionsschritt• Definition des Ereignisformats |

8.4.4 Wissensverwertung

Wie alle bisher analysierten Komponenten geht auch die Wissensverwertung von der Zielsetzung in Phase 2 des Vorgehensmodells aus. Dabei ist die Bereitstellung möglichst vieler vordefinierter Abfragen anzustreben, was in einer effizienten Nutzung durch die Mitarbeiter resultiert. Parametrisierbare Abfragen reduzieren durch eine Filterung und hierarchische Navigation der zurückgegebenen Daten diese auf den wesentlichen Informationsgehalt. Pro erstelltem Anwendungsfall ist mindestens eine Abfrage zu erstellen, welche die hilfreichen Informationen aggregiert bereitstellt. Eine Klassifikation von Systemanfragen beispielsweise in Anlehnung der in Kapitel 6.5.1 definierten Kategorien erleichtert den Mitarbeitern den Zugang zu relevanten Fragekomplexen.

Freie Anfragen sind auch möglich, allerdings sind hierfür eine Schulung und ein vertieftes Systemverständnis nötig und aus diesen Gründen nicht anzustreben und nur zur

tiefergehenden Problemanalyse geeignet. Sollte diese Funktionalität dennoch standardmäßig gefordert werden, empfiehlt sich die Verwendung einer speziellen HMI-Oberfläche für die graphisch unterstützte Anfragenspezifikation, um die Mitarbeiter bestmöglich darin zu unterstützen.

Tabelle 11: Erstellung der Anfragen

| Verfahrensschritt | Notwendige Schritte |
|-----------------------|---|
| 3.4 Wissensverwertung | <ul style="list-style-type: none"> • Identifikation hilfreicher Anfragen zur Lösung der Anwendungsfälle • Formalisierung der Anfragen |

8.5 Modellüberprüfung

Die Modellüberprüfung ist in Anlehnung an [VDI 3633 Blatt 1 2000] in die Schritte der *Validierung* und der *Verifikation* unterteilt. Es soll also zunächst festgestellt werden, ob das erstellte Modell die Realität hinreichend abbildet und die Anforderungen erfüllt, bevor die formale Korrektheit untersucht wird.

8.5.1 Validierung

An diesem Punkt gilt es zu überprüfen, ob alle gestellten Anforderungen erfüllt werden können oder ob die Ausbildung des Struktur-, Ereignis- oder Verhaltensmodells im Zusammenspiel mit der Wissensverwertung einige Vorgaben nicht umsetzen konnte.³⁶ Bei der Validierung wird kontrolliert, ob das entwickelte Modell in der erstellten Ausprägung in der Lage ist, die gestellten Anforderungen im praktischen Einsatz ganzheitlich und zielorientiert zu erfüllen. Sollte dies nicht der Fall sein, sind die auf Seite 134 definierten Ziele kritisch zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen. Darauf aufbauend

³⁶ Exemplarisch kann die Funktionalität der Produktverfolgung einzelner Stückgüter genannt werden, was üblicherweise einen sehr hohen Datendurchsatz verursacht. Je nach Einsatzszenario kann der notwendige Aufwand zur Implementierung und Betrieb den tatsächlich erzielbaren Nutzen übersteigen.

müssen alle in Abschnitt 8.3 und 8.4 erläuterten Schritte erneut durchlaufen werden, bis ein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt wird.

8.5.2 Verifikation

Nach zufriedenstellender Verfeinerung und Abstimmung aller Teilmodelle müssen diese auf richtige Funktionsweise und Modellierung verifiziert werden. Dabei sind die Modelle zunächst einzeln und anschließend hinsichtlich eines integrativen Zusammenspiels einzelner oder aller Modellentitäten zu prüfen. Die Modellkonsistenz ist zwar grundsätzlich meist durch die verwendete Middleware sichergestellt, allerdings beinhaltet die automatische Überprüfung nur die fehlerhafte Modellierung oder die Verwendung anders spezifizierter Funktionen. Inhaltlich falsche Modellierungen oder Verbindungen hingegen können damit nicht überprüft werden.

Da keine sicherheitsrelevanten Themen behandelt werden, ist eine vollständige Überprüfung nicht notwendig und wirtschaftlich meist ohnehin nicht sinnvoll. Dadurch ist eine exemplarische Überprüfung der Richtigkeit anhand einiger definierter Szenarien oder beispielhafter Datensätze zur Sicherstellung der Richtigkeit bei der hauptsächlichen Funktionsweise ausreichend. Sollten im laufenden Betrieb fehlerhafte Ausführungen festgestellt werden, können diese immer noch behoben und eingespielt werden.

Tabelle 12: Validierung und Verifikation zur Modellüberprüfung

| Verfahrensschritt | Notwendige Schritte |
|---------------------|---|
| 4 Modellüberprüfung | <ul style="list-style-type: none">• Validierung des Modells• Verifikation des Modells (Stichprobenartig) |

8.6 Integration und Nutzung

Nach Fertigstellung der Modelle muss die Lösung in die bestehende IT-Infrastruktur integriert werden, um entsprechende Daten zu empfangen. Dabei muss darauf geachtet

werden, alle in Betracht gezogenen Software Komponenten korrekt einzubinden. Abschließend sollten erneut mehrere Tests durchlaufen werden, um die Richtigkeit der Modelle und der Funktionsweise zu überprüfen. Dazu können unter anderem wieder vordefinierte Szenarien nachgestellt und überprüft werden.

Die eigentliche Nutzung des Modells erfolgt dann praxisnahe hauptsächlich bei Problemen oder ungelösten Fragestellungen während des Anlagenanlaufs. So sind zusätzliche Informationen zu interessierenden Modellkomponenten oder Ereignissen abrufbar. Essentiell für eine nachhaltige Nutzung ist die vollständige und ausnahmslose Dokumentation umgesetzter und erfolgreicher Lösungsstrategien.

Sollte festgestellt werden, dass für spezifische Problemstellungen zusätzliche Informationen notwendig sind, welche derzeit noch nicht in dem Modell abgebildet werden, können diese nachträglich integriert werden. Dies ist für alle in Kapitel 8.4 erläuterten Teilmodelle realisierbar.

Tabelle 13: Vorgehen zur Modellanbindung und -nutzung

| Verfahrensschritt | Notwendige Schritte |
|-------------------------|---|
| 5 Integration & Nutzung | <ul style="list-style-type: none"> • Anbindung externer Softwaresysteme & Verifikation • Nutzung der Semantischen Software & Dokumentation aller Problemfälle und Lösungsstrategien • Einbindung nachträglicher Verbesserungen |

8.7 Nachbereitung

Die nachträgliche Aufbereitung der gesammelten Informationen und des modellierten Produktionswissens der beteiligten Mitarbeiter ist wesentlich für eine weitere wirtschaftliche Nutzung der verfügbaren Daten.

Grundsätzlich muss die Frage beantwortet werden, welche modellierten und gesammelten Informationen einen Mehrwert in Nachfolgeprojekten erzielen werden. Dabei kann zwischen der Erstellung des Struktur- und Ereignismodells zur Wiederverwendung und des Verhaltensmodells, welche hauptsächlich das intrinsische Wissen der Produktionsmitarbeiter darstellt unterschieden werden.

Dabei sollten die einzelnen erstellten Teile des Struktur- und Ereignismodells hinsichtlich der Verwendung und des Nutzens überprüft werden. Eine umfangreiche Speicherung aller Ereignisse ist sicherlich nicht zielführend und sollte auf spezifische Szenarien, welche an die vorab definierten Anwendungsfälle angelehnt werden, beschränkt werden. Die Bewertung der erstellten Informationen des Strukturmodells dient zu einer kontinuierlichen Verbesserung der Montageontologie. Basierend auf den Rückmeldungen aus der Produktion können Daten hinzugefügt oder weggelassen werden. Nach mehreren Projektdurchläufen kann davon ausgegangen werden, dass hauptsächlich relevante Datensätze abgebildet und gespeichert werden. Dadurch wird der Aufwand zielgerichtet auf Wirtschaftlichkeit hin optimiert.

Das Verhaltensmodell hingegen ist schwieriger dokumentierbar, da stations- und vor allem themenübergreifend unterschiedlichste Relationen spezifiziert sind. Zu unterscheiden ist die Instanziierung dokumentierter Erfahrungen, also das eigentliche Anlegen betrachteter Relationen und das Anlegen und Speichern des Regelwerkes.

Verbindungstypen sollten generell zunächst dahingehend überprüft werden, ob sie überhaupt genutzt, das bedeutet instanziiert und abgefragt wurden. Gar nicht oder nur selten verwendete Relationen sind auf eine weitere Verwendung hin kritisch zu überprüfen. Verwendete Verbindungen sind hinsichtlich ihrer Funktionalität zu kontrollieren und gegebenenfalls in neuen Projekten zu ändern. Eine weitere Fragestellung ist, ob die vorhandenen Relationstypen ausreichen um alle auftretenden Fälle zu beschreiben oder ob neue hinzugefügt werden müssen. Das eingesetzte Regelwerk ist auf seinen Nutzen und Anwendbarkeit hin kritisch zu bewerten und zu dokumentieren. Dabei empfiehlt sich aufgrund der Überschaubarkeit meist die manuelle Kommentierung und Bewertung erstellter Regeln und verwendeter Relationstypen.

Die erstellten Abfragen sind analog wie die Regeln hinsichtlich der Verwendungshäufigkeit und des Nutzens zu bewerten. Existierende Abfragen sollen hinsichtlich einer künftigen Nutzung optimiert und weiter verfeinert oder generalisiert werden. Auftretende Fragestellungen welche mit den erstellten Systemabfragen nicht beantwortet werden können, sind zu dokumentieren.

Die dokumentierten und somit instanziierten Informationen müssen so strukturiert wie möglich gespeichert werden. Dabei ist eine möglichst integrative Speicherung der verfügbaren Datensätze anzustreben, um eine spätere Wiederverwendung und Integration in andere Projekte aufgrund vorhandener Strukturen und Daten zu ermöglichen.

Tabelle 14: Aufbereitung und Dokumentation der gesammelten Informationen

| Verfahrensschritt | Notwendige Schritte |
|--------------------------|--|
| 6 Nachbereitung | <ul style="list-style-type: none">• Qualitative & quantitative Auswertung• Dokumentation relevanter Teilmodelle |

9. Erprobung und Bewertung in der Praxis

Das entwickelte Modell und Verfahren wurde im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes FRAME (Fast Ramp-up and Adaptive Manufacturing Environment, [FRAME 2011a]) an zwei Beispielen in der industriellen Praxis eingesetzt und erprobt. In beiden Demonstrationsprojekten durchlaufen die Produkte auf Werkzeugträgern ein vollautomatisiertes Montagesystem und werden von mehreren Montageprozessen im Sinne der Beschreibung in Kapitel 3.1.2 schrittweise bearbeitet.

Eine der Zielsetzungen des Projektes war die Definition einer allgemeingültigen Ontologie für den Anlagenanlauf von Montagesystemen. Die Verwendung eines gemeinsam genutzten Vokabulars wurde mithilfe dieser definierten Ontologie sichergestellt. Die Begriffe wurden standardisiert und gemeinschaftlich festgelegt, wie auf Seite 13 beschrieben und in Kapitel 3.5 gefordert. Aus diesem Grund wurde mithilfe eines Fragebogens eine Ontologie im Voraus erstellt und in beiden Projekten gemeinschaftlich verwendet. In dem ganzheitlichen Fragebogen zur Systemabgrenzung wurden beispielsweise Details zu den Produkten (Produktstruktur, Qualitätsmerkmale, Aufbau), Prozessen (Einstellmöglichkeiten, Leistungsindikatoren), Maschinenspezifikationen (Aufbau, Sensoren, Aktoren), Mitarbeitertätigkeiten, relevante Softwaresysteme und Kommunikationswege ermittelt. Dies ist geringfügig abweichend zu dem ersten Schritt des in Kapitel 8 vorgestellten Verfahren, hat allerdings nur einen nebensächlichen Einfluss auf die Erprobung und Bewertung des erstellten Lösungsansatzes. In der Anwendung bei den jeweiligen Industriepartnern wurden beispielsweise noch spezifische Relationen zur Darstellung erweiterter Systemzusammenhänge hinzugefügt. Dies ist prinzipiell vergleichbar zur Situation aus Vorgängerprojekten eine schon ähnliche Spezifikation einer Ontologie zu besitzen, die noch auf die aktuellen Systemanforderungen angepasst werden muss.

Der Fokus der Installationen lag in der erfolgreichen Demonstration des eigentlichen Mehrwerts des Verfahrens für den semantisch unterstützten Anlagenanlauf, also der Erfüllung spezifizierter Anwendungsfälle. Die generelle Anwendbarkeit des Verfahrens zur hilfreichen Spezifikation, Verknüpfung und Nutzung heterogener Datentypen und

intrinsischer Mitarbeitererfahrungen in der Montagedomäne sollte aufgezeigt werden. Aus diesem Grund wurden beispielsweise alle erstellten Relationen einzeln und im Zusammenspiel hinsichtlich Anwendbarkeit getestet, was eine qualitative Nachbereitung in Anlehnung an dem auf Seite 143 vorgestellten Vorgehen erschwert. Da es sich um zwei unterschiedliche Unternehmen handelt, ist von einer Speicherung und Wiederverwendung instanzierter Objekte des Ereignismodells zwischen den Unternehmen aufgrund der Rahmenbedingungen ohnehin abzusehen.

Aufgrund des prototypischen Charakters der entwickelten Lösung wurde zudem auf eine Einordnung in das strategische Gesamtkonzept des Unternehmens verzichtet. Einschränkende Rahmenbedingungen, die durch den Einsatz externer Mitarbeiter entstehen können, wurden folglich nicht betrachtet. Auf den Prozessschritt der Nachbereitung wurde aufgrund der bereits genannten Gründe ebenfalls verzichtet.

9.1 Systembewertung am Fallbeispiel 1

Um das entwickelte Verfahren zu testen, wurde das System bei einem Zulieferer der Kraftfahrzeugindustrie an eine Labor-Linie angeschlossen. Hierbei handelt es sich um eine Demonstrationslinie mit drei Prozessen aus der Montagetechnik, die durch Förderstrecken vollautomatisiert miteinander verbunden sind. Dabei wird die Fertigungskette eines realen Produktes für die Automobilindustrie partiell nachgestellt.

Abbildung 61 zeigt das reale System in der Produktionsumgebung. Dabei werden die Werkstückträger freistehend auf den Förderbandanlagen durch die Anlage bewegt und vor die jeweiligen Prozesse platziert.

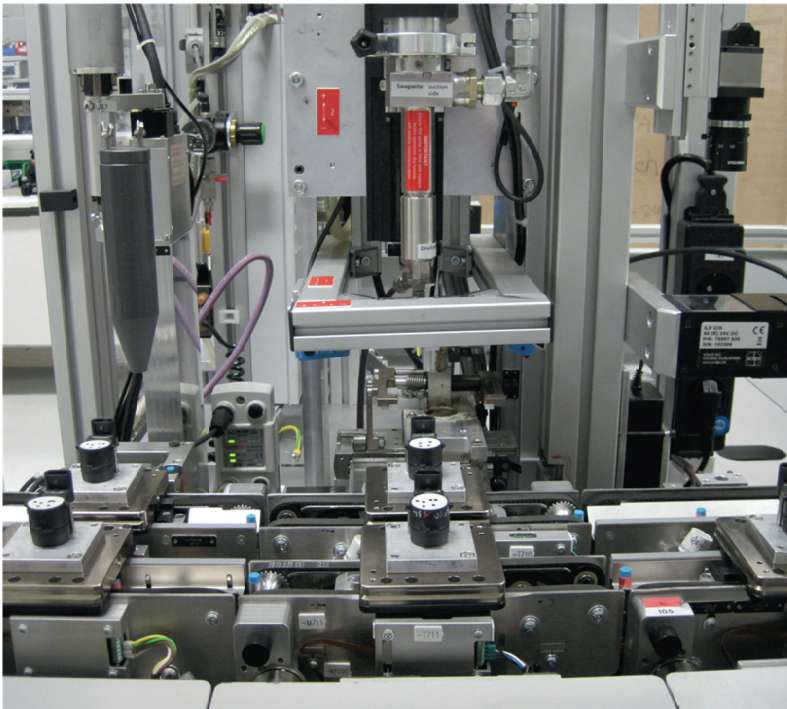


Abbildung 61: Erster Demonstrator zur automatisierten Montage von Produkten für die Automobilindustrie. Zu sehen sind Produkte auf Werkstückträgern mit simulierten Klebepunkten auf einer planaren Oberfläche [FRAME 2011b].

9.1.1 Zieldefinition

Zur Festlegung der beteiligten Akteure und spezifischen Anforderungen wurden mehrere rollenspezifische und inhaltlich abgeschlossene Anwendungsfälle festgelegt. Einen abstrahierten Auszug der definierten Fälle ist in Abbildung 62 zu sehen.

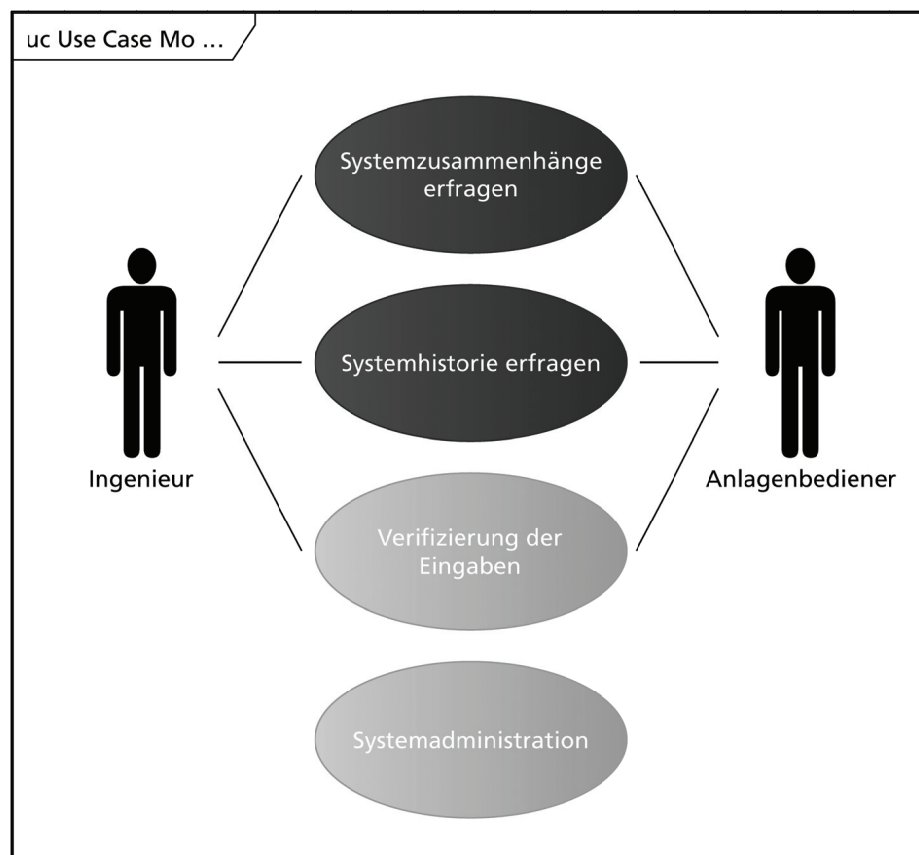


Abbildung 62: Auszug der Anwendungsfälle der Semantischen Infrastruktur [Konrad u.a. 2012]

Nach der Spezifikation der zu betrachtenden Anwendungsfälle wurden systematisch die Systemanforderungen abgeleitet, strukturiert und priorisiert.

9.1.2 Systemanalyse und Erstellung der Teilmodelle

Die Systemanalyse fand, wie Anfangs des Kapitels erwähnt, größtenteils mithilfe eines erstellten Fragebogens statt. Bei der betrachteten Maschine wird jedes Prozessmodul von einer separaten SPS gesteuert. Zudem können einzelne Parameter eingestellt und relevante Sensorwerte betrachtet werden. Eine Übersicht einiger Systemkomponenten des eingesetzten Montagesystems ist aus Tabelle 15 ersichtlich.

Tabelle 15: Demonstrator Spezifikation [Konrad u.a. 2012]³⁷

| | Modul 1 | Modul 2 | Modul 3 |
|------------------------------------|---|---|--|
| Prozess | Kleben | Füllen | Bilderfassung, automatische Inspektion |
| Steuerungssystem | Bosch-Rexroth L40 (Hutschiene- SPS), Yamaha Roboter, Förderbandanlage | Bosch-Rexroth VPP21 (PC-basierte SPS) mit drei Ach- sen-Kontrollern, Förderbandanlage | PC mit Bilderfassung, Förderbandanlage |
| Software | OpCon/Indralogic | OpCon/Indralogic | OpCon/Indralogic |
| SPS-Kernel (Echt- zeit) | CoDeSys | CoDeSys | CoDeSys |
| Stations- B&B | | VPP21 | |
| B&B | Bosch-Rexroth VEP 30 (Kommunikation über TCP/IP) | | |

Aufgrund der definierten Anwendungsfälle wurden die einzelnen Modelle der Anlage abstrahiert und vorrangig manuell erstellt. Dabei wurden die in Kapitel 5, 6 und 7 vorgestellten Ansätze verwendet. Die eingesetzten Prozesse, die Maschinenstruktur und -aufbau und die gefertigten Produkte wurden semantisch instanziiert (vgl. Abbildung 63).

³⁷ Zu beachten ist, dass trotz eines echtzeitfähigen Steuerungssystems diese Funktionalität bei dem vorgestellten Lösungsansatz nicht gefordert und folglich auch nicht realisiert ist. Hinsichtlich der Leistungsfähigkeit muss lediglich sichergestellt werden, dass auftretende Daten des Ereignismodells auch in der Middleware gespeichert werden können. Die jeweiligen Systemanfragen sind zeitunkritisch, sollten jedoch aufgrund der Nutzerfreundlichkeit innerhalb einer angemessenen Zeitspanne beantwortet werden.

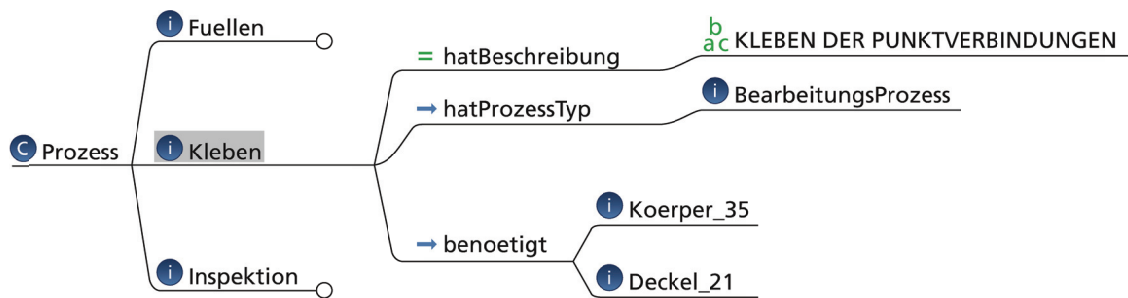


Abbildung 63: Auszug des graphenbasierten Maschinenmodells mit den Prozessen „Füllen“, „Kleben“ und „Inspektion“. *Kleben* ist dabei als Bearbeitungsprozess definiert, da in dem Ausschnitt der Fertigungslinie keine unmittelbare Verbindung zwischen Komponenten geschaffen wurde. Für eine Durchführung des Prozesses werden zwei Komponenten (*Körper_35* und *Deckel_21*) benötigt, auf welche die Klebepunkte aufgetragen werden [Konrad u.a. 2012].

9.1.3 Modellüberprüfung

Nach Erstellen aller relevanten Modellentitäten wurden diese auf Konsistenz und inhaltliche Richtigkeit überprüft. Die Abstimmung der Teilmodelle mit den gesetzten Anforderungsfällen wurde vorgenommen. Zur Verifikation wurden einzelne Szenarien wie Änderung von Parametern stichprobenartig und erfolgreich durchgeführt.

9.1.4 Integration und Nutzung

Nach erfolgter Anbindung an die Maschinen-IT konnten zur Überprüfung und Erprobung des entwickelten Lösungsansatzes die vordefinierten Szenarien und Anwendungsfälle verwendet werden. Im Weiteren werden exemplarisch zwei Anwendungsfälle im Detail erläutert.

Systemhistorie erfragen – Im vorgestellten Anwendungsfall sollen die wesentlichen Systemeinstellungen rückverfolgbar und transparent versioniert werden. Fragestellungen nach signifikanten Prozess-, System- oder Modulkonfigurationen zu definierten Zeitpunkten lassen sich dadurch beantworten. Realisiert wurde diese Anforderung durch eine vordefinierte parametrisierbare Systemabfrage (siehe folgende Abbildung 64).

```
@{q,options[fillNull, sort(?PARAMETER,?EREIGNISZEIT),outorder(?PARAMETER,?INITIALWERT,
?EREIGNISZEIT, ?EREIGNIS, ?MAINT, ?SUBT, ?PRIMWERT)]} ?-
?PARAMETER:Parameter[hatZielWert-> ?INITIALWERT]@M
and ?EREIGNIS:Ereignis [referenziertParameter-> ?PARAMETER]@E
and ?EREIGNIS[hatHauptTyp-> ?MAINT, hatSubTyp-> ?SUBT, hatEreignisZeit-> ?EREIGNISZEIT,
hatPrimaerWert-> ?PRIMWERT]@E .
```

Abbildung 64: Beispielhafte Anfrage der Systemhistorie in ObjectLogic. Die Verwendung der Option *fillNull* lässt Leerstellen bei der Ausgabe zu, gleichzeitig müssen aber alle Variablen gebunden sein.

Bei dieser Abfrage handelt es sich um eine verkettete Systemanfrage bei der dynamische Ereignisdaten und Informationen des strukturellen Maschinenmodells miteinander verknüpft und im Sinne von Kapitel 7.1.5 und 7.1.8 angefragt werden. Die Antwort der vorgestellten Lösung listet alle geänderten Parameter und ihre Werte in Tabellen- oder Ereignisformat auf (siehe Abbildung 65).

| PARAMETER | INITIALWERT | EREIGNISZEIT | EREIGNIS_UID | MAINT | SUBT | WERT |
|-------------------|-------------|-------------------|------------------|--------------------|-------------------|------|
| Luftdruck_71 | 7 | 1.317990514686... | EV11100716289... | "AdjustmentErei... | "HardwareAdjus... | 7.3 |
| Luftdruck_71 | 7 | 1.317990624127... | EV11100716296... | "AdjustmentErei... | "HardwareAdjus... | 7.22 |
| Luftdruck_71 | 7 | 1.317991522892... | EV11100716296... | "AdjustmentErei... | "HardwareAdjus... | 7.25 |
| KameraPosition... | 23 | 1.317990540511... | EV11100716318... | "AdjustmentErei... | "HardwareAdjus... | 25 |
| KameraPosition... | 23 | 1.317990564214... | EV11100716321... | "AdjustmentErei... | "HardwareAdjus... | 26 |
| KlebeDruck_12 | 1.73 | 1.317990531735... | EV11100716614... | "AdjustmentErei... | "HardwareAdjus... | 1.69 |

Abbildung 65: Tabellarische Darstellung der Systemantwort (Anwendungsfall: Systemhistorie erfragen) [Konrad u.a. 2012]

Systemzusammenhänge erfragen – Der zweite vorgestellte Anwendungsfall beschreibt die Modellierung dynamischer Systemzusammenhänge, welche anschließend mithilfe des spezifizierten Regelwerkes auf andere Objekte automatisiert erweitert werden. Um eine spätere Filterung der eingegebenen Datensätze zu erlauben, erfolgt die Abbildung der Zusammenhänge nach einem in der Ontologie vordefinierten Schema. Modellierte Relationen lassen sich noch mit Kommentaren versehen, was eine zusätzliche Informationsquelle darstellt. Wie bereits in Kapitel 6.2.1.2 erläutert, wird dies mit einer Reifikation realisiert. In der Montagedomäne stellt die Verbindung eines Inspektionsschritts, bei dem ein Fehler identifiziert wird (*FehlerEntdeckung*) und der Ursprung des Fehlers (*Fehlerquelle*) eine mögliche Relation dar. Kommentare können

Anweisung zur vorgenommenen Problemlösung oder ähnliches enthalten (vgl. hierzu Abbildung 47).

Die tabellarische Systemantwort des Anwendungsfalls ist in Abbildung 66 dargestellt. Wie erkennbar, ist die eigentliche Problemlösung in dem Kommentar dokumentiert. Mithilfe des erstellten Maschinenmodells lassen sich diese Informationen gezielt für interessierende Problemstellungen (einzelne Prozesse, Module oder Stationen) analysieren.

| FEHLERENTDECKUNG | FEHLERQUELLE | WAHRSCHEINLICHKEIT | KOMMENTAR |
|------------------|--------------|--------------------|--|
| Inspektion | Kleben | Hoch | "durch Änderung des Klebedrucks zu beheben" |
| Inspektion | Kleben | Niedrig | "Verschmierungen der Klebepunkte können durch Einstellen der Klebe..." |
| Kleben | Fuellen | Niedrig | "Wenn Füllmaterial auf den Klebeflächen ist kann dies durch Anpassun..." |

Abbildung 66: Tabellarische Darstellung der Systemantwort (Anwendungsfall: Systembeziehungen erfragen) [Konrad u.a. 2012]

9.2 Systembewertung am Fallbeispiel 2

Das vorgestellte System wurde bei einem Maschinenhersteller eingesetzt, welcher auf Kurvenscheiben aufbauende Hochleistungsmontagesysteme herstellt und vertreibt. Das betrachtete Montagesystem umfasst eine Produktionsumgebung mit Zuführ-, Montage- und Inspektionsprozessen wie sie typisch ist für die Montage medizinischer Produkte wie beispielsweise Injektionsstifte.

9.2.1 Zieldefinition

Auch in dem zweiten Industriebereich wurde eine Anforderungsanalyse basierend aus Anwendungsfällen und detaillierten Anforderungen durchgeführt. Diese weichen nur in wenigen Punkten von den bereits ermittelten Fällen aus Kapitel 9.1.1 ab.

9.2.2 Systemanalyse und Erstellung der Teilmodelle

Das betrachtete Montagesystem besteht aus modularen standardisierten Bausteinen und nutzt die primären Bewegungen einer Kurvensteuerung mit welcher die Bewegung der

Montageeinheiten und der Werkstückträger synchronisiert werden. Die Gesamtanlage ist für bis zu 100 Takte in der Minute ausgelegt und fertigt parallel drei gleiche Produkte oder Varianten derselben Produktfamilie [Mikron 2012].



Abbildung 67: Abbildung der Produktlinie, welche für den zweiten Demonstrator zur simulierten Montage medizinischer Injektionsnadeln eingesetzt wurde [FRAME 2011b].

In dem abgebildeten System sind insgesamt 16 Prozesse implementiert, wobei immer ein Montage- und der zugehörige Inspektionsprozess eine sich abwechselnde Einheit bilden [Frauenfelder 1999]. Es wird zunächst montiert und anschließend sofort das Ergebnis überprüft. Für jeden Prozessschritt werden dabei bis zu 72 primäre Parameter oder Datenwerte modelliert und erfasst. Zusammen mit verfügbaren Daten der SPS stehen insgesamt also mehrere tausend Datenquellen und Einstellmöglichkeiten zur Verfü-

gung. Um eine effektive und effiziente Nutzung zu ermöglichen, wurden daraus die wesentlichen Datensätze identifiziert.

Die strukturellen Modelle wurden aufgrund des hohen manuellen Arbeitsaufwandes vorwiegend automatisiert erstellt. Dabei wurde die unternehmensinterne XML-basierte Dokumentation der Montageanlage genutzt.

9.2.3 Modellüberprüfung

Bei dem Validierungsschritt war es ausschlaggebend, den vorgenommenen Abstraktionslevel der zur Verfügung stehenden Informationen hinsichtlich der Anforderungen zu überprüfen. Aufgrund der automatisierten Modellerstellung verringerte sich der zur Verifikation notwendige Aufwand erheblich. Lediglich wenige manuell abgebildete Entitäten (wie das Produkt) und ihre entsprechenden Rollen mussten kontrolliert werden.

9.2.4 Integration und Nutzung

Das erstellte semantische Modell wurde mit der zentralen Anlagen-IT erfolgreich integriert und genutzt. Im Vorfeld definierte Anwendungsfälle und Szenarien wurden verifiziert. Beispielhaft sind die *Modellinstanziierung* und die *Fehler- und Einflusspropagation* erläutert.

Modellinstanziierung – Aufgrund der hohen Menge an Messwerten und Einstellmöglichkeiten wurde eine halbautomatische Instanziierung des semantischen Modells implementiert. Ausgehend von den in der Ontologie definierten Schemata wurden basierend auf der existierenden Maschinenspezifikation die Werte eingelesen und die entsprechenden semantischen Instanzen automatisiert erzeugt. Die Korrektheit konnte nach erfolgter Integration verifiziert werden, da empfangene Daten fehlerfrei empfangen und ordnungsgemäß zugeordnet wurden.

Fehler- und Einflusspropagation – Dieser Anwendungsfall beschreibt die durch Regeln hergestellte Verknüpfung und Identifizierung mehrstufiger Fehlerursprünge und Darstellung nichttrivialer Systemeinflüsse. Wie in Kapitel 6.2.2.2 und 7.1.6 beschrie-

ben, wurden zunächst sich gegenseitig beeinflussende Prozesse zusammen verbunden. Zudem wurden Inspektions- und primär zugehörige Produktionsprozesse jeweils paarweise miteinander verkettet. Über das Regelwerk wurden die manuell spezifizierten Relationen automatisiert mehrstufig miteinander verknüpft. Ist nun ein Problem bei einem Inspektionsprozess vorhanden und der primär zugeordnete Montageprozess wird als Fehlerquelle ausgeschlossen, können über die generierten Relationen weitere Prozesse identifiziert werden, welche den Inspektionsprozess indirekt beeinflussen und folglich das Qualitätsproblem potentiell verursachen können. Mit diesem Vorgehen kann die Fehlersuche auch bei komplexen Systemen zielgerichtet erfolgen. Die Stufen der Propagation sind im Vorfeld auf die jeweiligen Anforderungen der Anlage frei spezifizierbar.

9.3 Bewertung der Ergebnisse

Bei beiden erörterten Fallbeispielen wurde gezeigt, dass das Verfahren zum semantisch unterstützten Anlagenanlauf praktikabel angewandt werden und einen Beitrag zu einem effektiveren und effizienteren Anlauf leisten kann. Die gewählten Anwendungsfälle demonstrieren den Einsatz und Nutzen des Verfahrens in unterschiedlichen Projekten. Es wurde aufgezeigt, wie mithilfe semantischer Technologien vorhandene heterogene Datensätze (z.B. Sensorinformationen) und intrinsisches Erfahrungswissen verknüpft, maschinell verarbeitet und weiter verwendet werden können. Die erfolgreiche Anwendung des Verfahrens und der einzelnen Teilmodelle an zwei verschiedenartigen Anlagenkonzepten für unterschiedliche Applikationsszenarien demonstriert die generische Anwendbarkeit in dem betrachteten Industriesektor der Montageanlagen.

Die in Kapitel 3 ermittelten Anforderungen für das generierte Modell und das entwickelte Verfahren wurden umgesetzt und evaluiert. In folgender Abbildungen ist dies noch einmal zusammengefasst illustriert, wobei Abbildung 68 die Abdeckungsanalyse des Modells aufzeigt und Abbildung 69 dasselbe für das Verfahren darstellt.

| Themengebiet | Anforderungen an das Modell |
|--------------------------------------|---|
| Montagedomäne | <ul style="list-style-type: none"> • Darstellung der Systemgrenzen des Anlagenanlaufs in der Montage mit allen relevanten Elementen (Maschine, Prozess, Produkt, Sensorwerte,... (→ Kapitel 6.1, 7.1.1) • Orientierung der Modelle und Metamodelle am strukturellem modularem Aufbau (→ Kapitel 6.1, 7.1.1) |
| Wissensmanagement | <ul style="list-style-type: none"> • Strukturiertes Erfassen, Nutzen und Transfer von Wissen der Produktionsmitarbeiter (→ Kapitel 6.2, 7.1.2) • Unterstützung bei der Identifikation von Fehlerursachen (→ Kapitel 7.1.3) • Transparenz hinsichtlich vorgenommener Modifikationen (→ Kapitel 6.5.2) • Einheitliche Dokumentation zur standardisierten Beschreibung (→ Kapitel 7.1) |
| Rahmenbedingungen des Anlagenanlaufs | <ul style="list-style-type: none"> • Erfassung und Integration verfügbarer Daten heterogener Quellen (→ Kapitel 6.3, 7.1.4) • Flexibilität hinsichtlich der Erfassung und Auswertung der Informationen (→ Kapitel 6.5, 7.1.5) |
| technische Anforderungen | <ul style="list-style-type: none"> • Maschinenlesbare Modellierung und automatisierte Verarbeitung (→ Kapitel 6.2.2, 7.1.5) • Skalierbarkeit, Erweiterbarkeit und Kompatibilität von (Teil-) Modellen (→ Kapitel 5, 6.4) • Frühe Verfügbarkeit des Systems (→ Kapitel 5, 6.4) • Kompatibilität zu existierenden Standards (→ Kapitel 7.2) |

Abbildung 68: Abdeckungsanalyse der ermittelten Modellanforderungen.

| Themengebiet | Anforderungen an das Verfahren |
|----------------------|--|
| Strategische Nutzung | <ul style="list-style-type: none"> • Schutz betriebsinterner Fachkenntnisse (→ Kapitel 8.1) • Unternehmensspezifische Anpassung an Anwendungsfälle (→ Kapitel 8.2) • Langfristig wirtschaftliche Nutzung des System durch kontinuierliche Optimierung (→ Kapitel 8.6) |
| Operative Nutzung | <ul style="list-style-type: none"> • Verfügbarkeit in der Produktionsstätte (→ Kapitel 7.2) • Nutzung über alle Phasen des Anlagenanlaufs (→ Kapitel 8) • Kurzfristig wirtschaftliche Nutzung des System durch Anwendbarkeit bei Problemstellungen (→ Kapitel 8.3, 8.5) |

Abbildung 69: Abdeckungsanalyse der ermittelten Verfahrensanforderungen.

Für einen industriellen Einsatz durch Anlagenhersteller ist die Verwendung der eingesetzten semantischen Werkzeuge auf Wirtschaftlichkeit und mögliche Alternativen hin zu überprüfen. Dies kann allerdings erst geschehen, wenn die strategischen Betrachtungen und die Zieldefinition abgeschlossen sind, die den benötigten Funktionsumfang der semantischen Software im Wesentlichen festlegen. Erst anschließend kann der entwickelte Prototyp in eine konkrete Produktivumgebung überführt und integriert werden.

10. Zusammenfassung und Ausblick

Zur Sicherung der europäischen Vormachtstellung produzierender Unternehmen und insbesondere deutscher Produktionsstandorte sind eine stetige Verbesserung der Produktionsfähigkeiten und eine schnelle flexible Anpassung an die Kundenwünsche erforderlich. Die unternehmerische Herausforderung liegt in der Beherrschung einer verkürzten Produkteinführungszeit oder einer äußerst variantenreichen Produktion bei gleichzeitig geringen Kosten und einem hohen Qualitätsanspruch.

Ausgehend von dem Fabriklebenszyklus werden heutzutage Produktionssysteme auf allen Granularitätsstufen vermehrt ganzheitlich und integrativ betrachtet. Dabei wurde der Anlauf neuer Produktionssysteme als eine wesentliche Kernkomponente für eine wirtschaftlich erfolgreiche Produktion identifiziert. Aufgrund mangelnder Standards wurden verschiedene relevante phasenbezogene Beschreibungen des *Anlagenanlaufs* detailliert analysiert. Nach der Herleitung branchenspezifischer Ziele und der Gegenüberstellung strategischer und projektbezogener Betrachtungsweisen, wurde der vorhandene Industriebedarf verdeutlicht. Ein zufriedenstellender und störungsfreier Ablauf des Anlagenanlaufs ist für produzierende Unternehmen nach wie vor eine ungelöste Problematik. Unvermittelt auftretende und im Vorfeld unbekannt Problemstellungen beim Anlauf neuer Montagesysteme sind alltäglich und stellen die verantwortlichen Mitarbeiter vor große Herausforderungen.

Die Anforderungsanalyse an eine ganzheitliche Systemlösung umfasste sowohl das Umfeld der betrachteten Montageanlagen, die Rahmenbedingungen während dem eigentlichen Anlauf, als auch wissenschaftlich belegte Erfolgsfaktoren für einen erfolgreichen Anlagenanlauf. Auf der Grundlage etablierter modularer Konzepte der Montageindustrie wurde die Systemdomäne systematisch analysiert. Basierend auf den betrachteten Phasenmodellen wurden branchentypische Problem- und Fragestellungen während des Anlagenanlaufs betrachtet. Dabei kristallisierten sich neben weiteren Einflüssen die eingesetzten Mitarbeiter und ihre Erfahrung aus früheren Projekten als wesentlicher Erfolgsfaktor für Unternehmen heraus. Charakteristisch für den Anlauf von Montageanlagen sind nicht standardisierte und im Detail oftmals unorganisierte Abläufe

und ad hoc auftretende Problemstellungen, welche direkt vor Ort von den eingesetzten Mitarbeitern gelöst werden müssen. Um dies zu erleichtern, sollen diverse relevante Informationen der Montageanlagen (wie Sensorinformationen oder Daten weiterer Softwaresysteme) mit den intrinsischen Erfahrungen der Mitarbeiter verknüpft werden und zielgerichtet zur Problemlösung verfügbar sein.

Die ermittelten Anforderungen und Rahmenbedingungen für einen erfolgreichen Anlauf von Montageanlagen wurden in den Stand der Forschung und Technik eingeordnet. Als eine der wichtigsten Strömungen zur Beherrschung der Komplexität beim Produktionsanlauf und ein auf die Inbetriebnahme fokussierter Ausschnitt der *Digitalen Fabrik* wurde der *Digitale Fabrikbetrieb* näher untersucht. Exemplarisch wurden die *virtuelle Inbetriebnahme* und die *Simulation des Materialflusses* eingehend analysiert. Zusätzlich wurde der Einsatz semantischer Techniken zur Wissensmodellierung und -strukturierung innerhalb der Produktionsdomäne untersucht. Im speziellen wurden derzeitige auf W3C-Standards basierende Ansätze im Montagebereich und insbesondere zur Abbildung von Montageanlagen analysiert. Es konnten weder ein Verfahren noch ein zeitgemäßer Ansatz identifiziert werden, die das ermittelte Anforderungsprofil ausreichend und ganzheitlich erfüllen.

Der entwickelte Lösungsansatz besteht aus einem auf semantischen Technologien basierenden Modell zur Wissensmodellierung und zur Integration heterogener Datensätze und einem Verfahren zur nachhaltigen und integrativen Nutzung aller Modellteile. Das generierte Modell erlaubt eine gemäß den Anforderungen ermittelte Abbildung relevanter Elemente der Montagedomäne. Darunter fallen die eigentliche Anlage und ihr modularer plattformspezifischer Aufbau, die wertschöpfenden Prozesse der Montagetechnik und die zu fertigenden Produkte. Neben diesen strukturellen Informationen werden heterogene Datensätze der Maschinensensoren, externer Softwaresysteme oder Eingaben der Produktionsmitarbeiter über die Mensch-Maschinen-Schnittstelle der Anlage gespeichert. Abschließend wird als drittes Teilmodell die maschinenlesbare Spezifikation intrinsischen Mitarbeiterwissens über Systembeziehungen ermöglicht. Verbindungen zwischen diversen Modellentitäten und die Formulierung allgemeingültiger Schlussfolgerungen sind möglich. Aus diesem so abgebildeten anlagenrelevanten Wissensreservoir können mittels spezifizierter Anfragen

speziell für die Produktionsmitarbeiter hilfreiche und zielführende Datensätze extrahiert werden. Um eine möglichst intuitive Nutzung zu ermöglichen, wurde die Modellrealisierung praxisnah und benutzerorientiert implementiert. Zur Modellbildung wurden in der Industrie bereits etablierte Techniken zur graphischen Wissensmodellierung eingesetzt. Die Verwendung standardkompatibler Software ermöglicht eine wirtschaftliche Systemwartung und gestattet die einfache Integration weiterer semantischer Werkzeuge.

Das entwickelte Verfahren zum semantisch unterstützten Anlagenanlauf bietet einen iterativen Leitfaden zur zweckmäßigen Generierung, Anwendung und Weiterentwicklung des so spezifizierten Systems. Neben der möglichen Festlegung unternehmensspezifischer Rahmenbedingungen wurde auch die Definition unterschiedlicher plattform- oder projektspezifischer Zielsetzungen betrachtet, was eine generische Anwendbarkeit für diesen Industriesektor der Montageanlagen ermöglicht. Die institutionalisierte Aufbereitung anlagenrelevanten Wissens nach Projektende dient als Grundlage eines erfolgreichen Wissenstransfers und erlaubt eine nachhaltige Nutzung des Verfahrens.

Innerhalb eines Forschungsprojektes wurde das entwickelte Verfahren bei zwei europäischen Industrieunternehmen erprobt und validiert. Formalisierte Anwendungsfälle und Anforderungen der Industriepartner wurden erfolgreich spezifiziert, implementiert und getestet.

Das entwickelte Verfahren bietet durch die ganzheitliche Erfüllung der abgeleiteten Anforderungskriterien eine breite Basis für die Weiterentwicklung zukünftiger Forschungsthemen:

- Da die Akzeptanz der Lösung eine essentielle Voraussetzung für eine erfolgreiche Nutzung darstellt, sollte basierend auf dieser Arbeit die Nutzerinteraktion mit am Produktionsanlauf beteiligten Mitarbeitern intuitiver gestaltet und besser in den vorhandenen Arbeitsablauf integriert werden. Dies umfasst im speziellen die Weiterentwicklung bestehender semantischer Modellierungswerkzeuge und die Komplexitätsreduzierung in der anschließenden Anwendung.

- Die Interaktion mit externen Systemen ist in der beschriebenen Art und Weise zwar hilfreich, allerdings wird die Verbindung (Speicherung von Daten) lediglich in eine Richtung genutzt. Hier kann ein Verfahren getestet werden, welches es erlaubt, Informationen des semantischen Modells in Anwendungen wie SPC oder Condition Monitoring weiter zu verwenden. Dies ermöglicht eine integrative Nutzung statistisch ermittelter und menschlich spezifizierter Korrelationen.
- Die technologischen Möglichkeiten semantischer Systeme können noch besser auf die Produktionsdomäne hin angepasst bzw. weiter entwickelt werden. So sind Möglichkeiten zur produkt- oder projektspezifischen Dokumentation über parametrisierbare Verbindungen nur sehr eingeschränkt realisierbar.

11. Summary & Outlook

A method for the semantically supported ramp-up of assembly system

In order to secure the European predominance of production companies and especially German manufacturing locations, a steady improvement of the production capabilities as well as fast and flexible adaption to changing customer requirements are required. The entrepreneurial challenge is to establish a shorter time to market and master versatile production requirements, while keeping costs low and quality levels high at the same time.

Today's manufacturing systems are viewed holistically and integrated into all granularity levels of a factory life cycle. As a result, the ramp-up of new manufacturing systems was recognized as one of the most critical phases of an economical production. Due to the lack of standards, the ramp-up procedure was analyzed based on typical phase-oriented description models. After deriving sector-specific targets and comparing strategic and project-oriented approaches, the industry needs for a coherent solution was pointed out. However, the successful and trouble-free ramp-up of production systems remains a complicated task for manufacturing companies. It is a common day-to-day phenomenon that previously unknown problems suddenly occur while ramping up new assembly systems, forcing responsible employees to deal with major challenges.

The analysis of requirements for a holistic system solution included the environment of the assembly systems considered, the boundary conditions during the actual ramp-up as well as scientifically-proven success factors for the successful ramp-up of assembly systems. On the basis of established modular concepts used in the assembly industry, the system domain was comprehensively analyzed. Based on the phase-oriented ramp-up models consulted, typical problems and queries arising during ramp-up procedures were considered. Among other influences, one critical success factor for a prosperous ramp-up is the company employees involved and their ability to utilize experience gained through previous projects. Typical problems encountered during assembly system ramp-ups include non-standardized and, on closer inspection, often badly-

organized working procedures as well as ad-hoc problems which have to be solved by the employees directly on-site.

To be more specific, requirements derived for the model are:

- **Correct representation of assembly system entities** - this includes the manufacturing system and associated subsystems, sensors and actuators, the products (including several variants) and assembly processes with their product-specific configurations. The complete representation should have a modular structure, which is typical for this sector of industry.
- **Management of intrinsic knowledge** – one of the most important requirements is the structured acquisition, utilization and transfer of employee knowledge. The employees should be enabled to manage knowledge about system behavior and general conclusion describing the assembly system in order to facilitate e.g. the identification of potential failure sources or draw conclusions about past and future system modifications.
- **Integration of heterogeneous data sources** – during ramp-up, data from several highly different sources has to be taken into consideration. Examples include machine-related data, external software systems and input from employees entered into the human-machine interface of the assembly system. The solution developed must integrate all this information in a coherent way, combining it with modeled intrinsic knowledge and relating it to system entities.
- **Technical requirements** – in order to enable acquired information to be further processed automatically, the model representation needs to be in a format which can be machine-read. Compatibility with existing standards is a must for the sustainable long-term usage of software.

Requirements of the method include:

- **Integration into the machine life cycle** – the developed solution must be able to be sustainably integrated into the assembly system ramp-up procedure.

- **Company-specific customization and economic usage** – companies must be able to protect derived internal knowledge against usage by external staff or even between different project teams. The creation of company-specific use cases for the developed solution must be facilitated. Additionally, long-term optimization should be established through the re-usage of knowledge and continuous optimization of the modeled information.

The derived requirements and general conditions for the successful ramp-up of assembly systems were then placed in context with several state-of-the-art approaches. One of the major approaches for managing complexity during ramp-up was the detailed analysis of digital factory operations (using methods such as virtual commissioning and material flow simulation). The utilization of semantic technologies for knowledge representation and structuring within the production domain was also analyzed. A focus was placed on investigating current standards-based approaches which target the assembly sector and depict assembly systems. However no acceptable solution or approach could be identified which fulfills all requirements in a coherent manner.

The developed solution consists of a model based on semantic technologies for knowledge modeling and a method to enable the integrated and sustainable usage of all parts of the model. The model can be structured in separate modules, each targeting a specific aspect of the developed approach. It allows relevant entities of the system domain to be modeled according to the requirements derived. The *Structural Model* contains the actual assembly system and its modular platform-specific structure, the value-adding assembly processes and the products to be manufactured. As well as this structural information, heterogeneous data sources of the machine sensors, external software systems and staff input entered into the HMI are gathered inside the *Event Model*. The third part of the model (*Behavior Model*) enables the machine-readable specification of intrinsic employee knowledge about relationships between miscellaneous model entities as well as the formulization of general conclusions. From the integrated *Knowledge Base* relevant to the ramp-up and documented in this way, specific useful sets of information are generated for production employees (*Knowledge Utilization*).

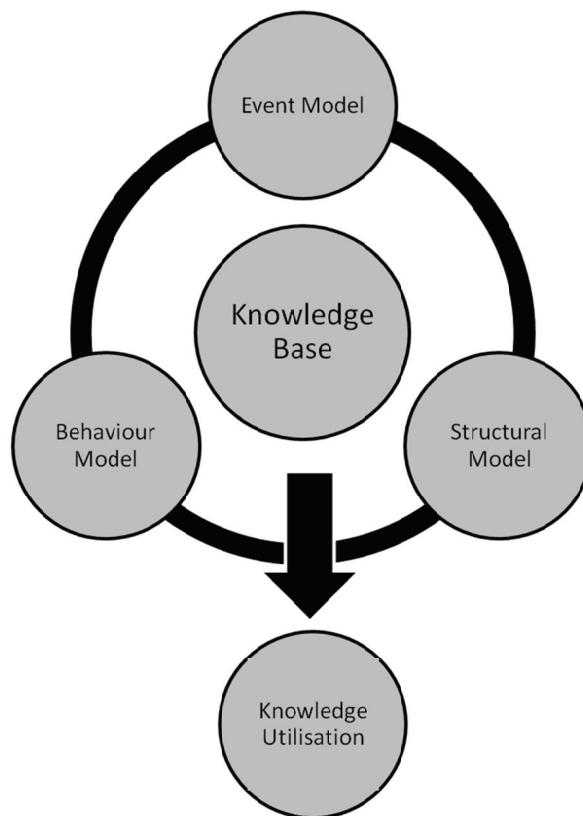


Figure 1 Modular concept of the developed approach

In order to facilitate intuitive usage, the model was realized in a practical and user-oriented manner. Where feasible, established industrially-proven graphical knowledge modeling techniques were applied to construct the model. The implementation of current standards enables cost-effective maintenance and easy extension using other semantic tools.

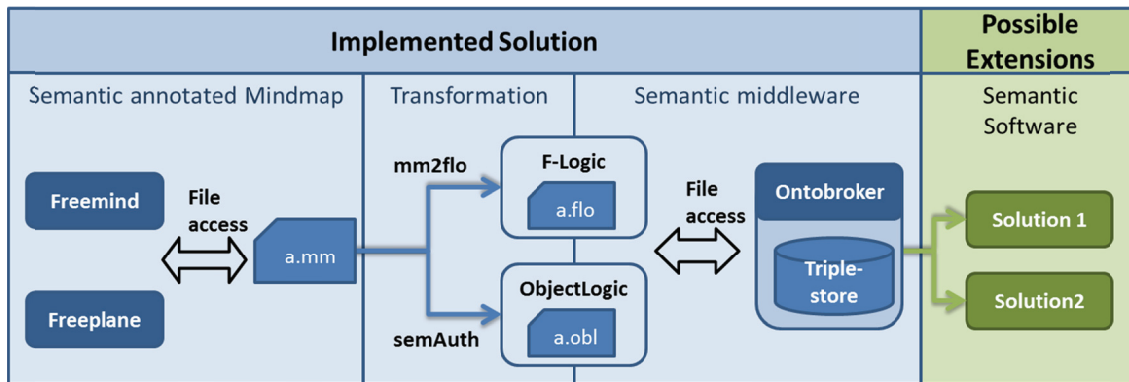


Figure 2 Tool chain, file access and transformation of the developed solution, including a possible extension for external software tools conforming to current standards

The developed method for the semantically supported ramp-up of assembly system offers an iterative code of practice for the focused generation, utilization and enhancement of the model discussed. As well as taking possible customization respecting company-specific boundary conditions into account, the definition of miscellaneous platform- and project-specific objectives is considered. This realizes a generic application which is suitable for industrial assembly systems. The institutionalized wrap-up of equipment-specific knowledge on project completion forms the basis of a successful knowledge transfer and enables the developed method to be used in the long-term.

In the course of a research project, the developed method was implemented and validated at two industrial companies. Formalized use cases and requirements were hereby successfully specified, implemented and tested.

Through the sustainable coverage of the requirements derived, the developed method provides a broad basis for further enhancing the following research considerations:

- As user acceptance of the solution is an essential precondition for its successful usage, user interaction with employees involved in the ramp-up needs be improved and designed more intuitively. This especially concerns the enhancement of existing tools and a less complex usage of semantic applications.

- Interaction with external systems is indeed helpful. However, only a one-directional data flow (storage of information) is provided in the manner described. Here, a method could be tested which allows information provided by the semantic infrastructure to be used in applications such as *Statistical Process Control* or *Condition Monitoring*.
- The technological possibilities of semantic systems need to be further adapted to make them more suitable for use in the manufacturing world. At the moment, product- or project- specific documentation using parametric relations is only possible to a very limited extent.

Literaturverzeichnis

- [Abele u.a. 2007] Abele, Eberhard; Dervisopoulos, Marina; Liebeck, Tobias: Globalisierung der Produktion - (k)ein Buch mit sieben Siegeln?! How to globalize production. In: *Industrie Management* 23 (2007) H. 1, S. 14-18.
- [Aghassi u.a. 2011] Aghassi, Susanne; Bauhoff, Fabian; Brecher, Christian; Fuchs, Sascha; Jeschke, Sabina; Jooß, Claudia et al. : Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. In: Christian Brecher (Hg.): Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer: Berlin; Heidelberg: Springer, 2011 (VDI-Buch), S. 17-81.
- [Angele 2012] Jürgen Angele: OntoBroker - Mature and approved semantic middleware. Online verfügbar unter http://www.semantic-web-journal.net/sites/default/files/swj195_0.pdf, zuletzt geprüft am 10.04.2012
- [Arnoscht u.a. 2011] Arnoscht, Jens; Behr, Marek; Bohl, Arne; Lenders, Michael; Brecher, Christian; Buchbinder, Damien et al. : Individualisierte Produktion. In: Christian Brecher (Hg.): Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer: Berlin; Heidelberg: Springer, 2011 (VDI-Buch), S. 83-255.
- [Baader u.a. 2007] Baader, Franz; Calvanese, Diego; McGuinness, Deborah L.; Nardi, Danielle; Patel-Schneider, Peter F. : The description logic handbook. Theory, implementation, and applications. 2nd. Edition Cambridge; New York: Cambridge University Press. 2007
- [Beckhoff 2012] Beckhoff Information System - German. Online verfügbar unter <http://infosys.beckhoff.com/index.php?content=../content/1031/tcncerrcode/html/tcncerrorcodesaxis.htm&id=19844>, zuletzt geprüft am 16.03.2012.
- [Berger u.a. 2009] Berger, S.; Mangold, C.; Meyer, S.; Westkämper, E.; Zahn, E.: Das Stuttgarter Unternehmensmodell in der Theorie - Wissen im Kontext der. In: E. Westkämper und E. Zahn (Hg.): Wandlungsfähige Produktionsunternehmen. Das Stuttgarter Unternehmensmodell. Berlin: Springer, 2009, S. 186-201
- [Berger u.a. 2006] Berger, Ulrich; Thiebus, Sven : Wissensmanagement in der Planungsphase. Research concerning knowledge management for development of complex sub-assemblies in the automotive industry. In: *Industrie Management* 22 (2006) H. 6, S. 39-41.
- [Berger u.a. 2005] Berger, Stefan; Mangold, Christoph; Meyer, Sebastian: Ontologiebasiertes Wissensmanagement in der Montage. Wissen in turbulenten Zeiten strukturiert einsetzen. Ontology based knowledge management for assembly. In: *Industrie Management* 21, 2005 H. 3, S. 49-52.
- [Bergmann 2012] Bergmann, Michael K.: The Sweet Compendium of Ontology Building Tools. Online verfügbar unter <http://www.mkbergman.com/862/the->

sweet-compedium-of-ontology-building-tools/, zuletzt aktualisiert am 18.03.2012, zuletzt geprüft am 19.03.2012.

- [Berners-Lee 1998] Berners-Lee, T. : Semantic Web roadmap. Online verfügbar unter <http://www.w3.org/DesignIssues/Semantic.html>, zuletzt aktualisiert am 14.10.1998, zuletzt geprüft am 05.01.2012.
- [Blumauer u.a. 2006] Blumauer, Andreas; Tassilo, Pellegrini: Semantic Web und semantische Technologien: Zentrale Begriffe und Unterscheidungen. In: Andreas Blumauer und Pellegrini Tassilo (Hg.): Semantic Web. Wege zur vernetzten Wissensgesellschaft. Berlin; Heidelberg: Springer, 2006, S. 9-25.
- [BMWi 2011] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie; Referat Öffentlichkeitsarbeit: Schlaglichter der Wirtschaftspolitik (Monatsbericht Dezember), 2011
- [Bonivento u.a. 2011] Bonivento, C.; Cacciari, M.; Paoli, A.; Sartini, M.: Rapid prototyping of automated manufacturing systems by software-in-the-loop simulation. In: 50th IEEE Conference on Control and Decision Conference, 23-25 May 2011, Orlando, Florida, USA, S. 3968-3973.
- [Bosch Rexroth AG 2009] Bosch Rexroth AG : Produktionsanlagen im Miniformat: Desktop Factory - Linear Motion and Assembly Technologies. Online verfügbar unter http://www.boschrexroth.com/business_units/brl/de/produkte/desktop_factory/index.jsp, zuletzt aktualisiert am 02.04.2009, zuletzt geprüft am 09.02.2012.
- [Bracht u.a. 2011] Bracht, Uwe; Geckler, Dieter; Wenzel, Sigrid: Anwendungsfelder der Digitalen Fabrik im Überblick. In: Digitale Fabrik. Berlin; Heidelberg: Springer, 2011 (VDI-Buch), S. 25-49.
- [Bracht u.a.2011b] Bracht, Uwe; Geckler, Dieter; Wenzel, Sigrid: Methoden und Modelle in der Digitalen Fabrik. In: Digitale Fabrik. Berlin; Heidelberg: Springer, 2011 (VDI-Buch), S. 79-161.
- [Breslin u.a. 2010] Breslin, John G.; O'Sullivan, David; Passant, Alexandre; Vasiliu, Laurentiu: Semantic Web computing in industry. In: *Computers in Industry* 61 (2010) No. 8, S. 729-741.
- [Bullinger u.a. 2006] Bullinger, Hans-Jörg; Stender, Siegfried; Modrich, Kai-Udo: Innovationen für eine Produktion 2020 in Deutschland. Innovations for manufacturing in Germany 2020. In: *Industrie Management* 22 (2006) H. 1, S. 39-43
- [Busse 2011] Busse, Johannes: Semantic Authoring with semAuth. In: *10th International Semantic Web Conference*, October 23rd - 27th 2011, Bonn, Germany

- [Cakmakci u.a. 2011] Cakmakci, M.; Yonghua Li; Shuzhen Liu: Model-in-the-loop development for fuel cell vehicle. In: American Control Conference, 2011, S. 2462-2467.
- [Calantone u.a. 2000] Calantone, R.J; Di Benedetto, C.A: Performance and time to market: accelerating cycle time with overlapping stages. In: IEEE Transactions on Engineering Management, Vol. 47 (2000) No. 2, S. 232-244.
- [Changjiang u.a. 2010] Changjiang Wan; Biao Gu; Yongjian Sun; Jianneng Chen: Assembly oriented product semantic modeling. In: International Conference on Computer Application and System Modeling, 22-24. October 2010, Taiyuan, China, S. V10-325 - V10-329.
- [Constantinescu 2009] Constantinescu, Carmen: Digitale Fabrik - Systematisches und durchgängiges Engineering von Fabriken, Anlagen und Prozessen In: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA: 50 Jahre IPA: Wir produzieren Zukunft. Vorträge Industrietag, 2. Juli 2009. Stuttgart, 2009, 25 Folien.
- [Constantinescu u.a. 2006] Constantinescu, Carmen ; Hummel, Vera ; Westkämper, Engelbert: Approach for a Service-oriented Factory Planning Environment. In: Teti, Roberto (Hrsg.) ; CIRP: Intelligent Computation in Manufacturing Engineering : 5th CIRP International Seminar, 25-28 July, 2006, Ischia, Italy. Neapel, Italien, 2006, 6 S.
- [Cortada u.a. 2000] Cortada, James W.; Woods, John A.: The Knowledge management yearbook. Boston; Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000
- [Decker u.a. 1999] Stefan Decker; Michael Erdmann; Dieter Fensel; Rudi Studer : Ontobroker: Ontology based Access to Distributed and Semi-Structured Information. In: Database Semantics: Semantic Issues in Multimedia Systems. Bosten: Kluwer Academic Publishers, 1998, S. 351-369.
- [Decker u.a. 1998] Decker, Stefan; Fensel, Dieter; Erdmann, Michael; Studer, Rudi : The technical core of Ontobroker. URN urn:nbn:de:swb:90-AAA47982, zuletzt geprüft am 10.04.2012.
- [Delamer u. Lastra 2006] Delamer, I.M; Lastra, J.L.M: Ontology Modeling of Assembly Processes and Systems using Semantic Web Services. In: IEEE International Conference on Industrial Informatics, 16-18 August 2006, Singapore, S. 611-617.
- [Denkena u.a. 2007] Denkena, Berend; Brecher Christian (Hg.): Ramp-Up-2-Anlaufoptimierung durch Einsatz virtueller Fertigungssysteme. Frankfurt, Main: VDMA-Verlag, 2007
- [DIN 69900 2009] Norm DIN 69900 2009-01: Projektwirtschaft Netzplantechnik

- [DIN 69901 2009] Norm DIN 69901 2009-01: Projektmanagement, Projektmanagementsysteme
- [DIN 8593 2003] Norm DIN 8593 Teil 0 2003-09: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 0: Allgemeines - Einordnung, Unterteilung, Begriffe
- [Dolgikh u.a. 2009] Dolgikh, E.; Kokin, S.: The Chinese economy and the other BRIC countries: The comparative analysis. In: International Conference on Management Science and Engineering, 14-16 September 2009, Moscow, Russia S. 885-889.
- [Dombrowski u.a. 2008] U. Dombrowski, S. Wesemann: OEE-Kennzahl im Anlagenhochlauf bei KMU. Steigerung der Gesamtanlageneffektivität im Anlagenhochlauf bei KMU mittels der OEE-Kennzahl. In: *Werkstattstechnik online* 98 (2008), S. 628-633.
- [EC 2011] Europäische Kommission: Maschinenbau - Unternehmen und Industrie. Online verfügbar unter http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/mechanical/index_de.htm, zuletzt aktualisiert am 14.12.2011, zuletzt geprüft am 14.12.2011.
- [Eckert u.a. 2011] Eckert, Michael; Bry, François; Brodt, Simon; Poppe, Olga; Hausmann, Steffen: Two Semantics for CEP, no Double Talk: Complex Event Relational Algebra (CERA) and Its Application to XChange^{EQ}. In: Sven Helmer, Alexandra Poulouvasilis und Fatos Xhafa (Hg.): Reasoning in Event-Based Distributed Systems. Berlin; Springer, 2011 (Studies in Computational Intelligence No. 347), S. 71-97.
- [Erdmann u. Dreiss 2006] Erdmann, Barbara; Dreiss, Philipp: Tool Supported Capability Management for Semiconductor High Volume. In: 5. Requirements Engineering Tagung 6-9 März 2006 München: Gesellschaft für Systems Engineering e.V., 2006, 41 S.
- [Exner 2010] Exner, Thomas: OECD-Generalsekretär Ángel Gurría: Deutschland muss die Einwanderung stärken - Nachrichten Wirtschaft - WELT ONLINE. Online verfügbar unter <http://www.welt.de/wirtschaft/article6949986/Deutschland-muss-die-Einwanderung-staerken.html>, zuletzt aktualisiert am 27.03.2010, zuletzt geprüft am 14.12.2011.
- [Fensel u.a. 1998] Fensel, Dieter; Decker, Stefan; Erdmann, Michael; Studer, Rudi: Ontobroker: The Very High Idea. In: Eleventh International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference. 18-20 Mai 1998, Florida USA, S.131-135.
- [Fleischer u.a. 2011] Fleischer, Jürgen; Ender, Thomas; Mössner, Andreas: Ressourcenmanagement für erfolgreiche Produktionsanläufe. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 102 (2011) H. 1-2 , S. 42-45.

- [Fleischer u.a. 2004] Fleischer, Jürgen; Wawerla, Marc; Nyhuis, Peter; Winkler, Helge; Liestmann, Volker: Proaktive Anlaufsteuerung von Produktionssystemen entlang der Wertschöpfungskette. Proactive controlling of production ramp-ups along the value chain. In: *Industrie Management* 20 (2004) H. 4 Seite 29-32.
- [FRAME 2011a] University of Nottingham. *FRAME – Fast Ramp-up and Adaptive Manufacturing Environment*. Online verfügbar unter <http://www.frame-eu.org/>, zuletzt aktualisiert am 07.11.2011, zuletzt geprüft am 03.02.2012.
- [FRAME 2011b] University of Nottingham. *Project Newsletter (April 2011)*. Online verfügbar unter <http://www.frame-eu.org/content/downloads/frame-flyer.pdf>, zuletzt aktualisiert am 07.11.2011, zuletzt geprüft am 30.04.2012.
- [Frauenfelder 1999] Frauenfelder, M.: Anpassungsfähige Anlagenkonzepte für die Großserienmontage. In: *Stückzahlflexible Montagesysteme: Lösungen für eine bedarfsgerechte Montage*, Seminarbericht des IWB, 1999/02, Bd. 42. München: Utz, 1999, S. 4-19.
- [FreeMind 2011] FreeMind. Online verfügbar unter http://freemind.sourceforge.net/wiki/index.php/Main_Page, zuletzt aktualisiert am 09.04.2011, zuletzt geprüft am 17.10.2011.
- [Freeplane 2012] Freeplane - free mind mapping and knowledge management software. Online verfügbar unter http://freeplane.sourceforge.net/wiki/index.php/Main_Page, zuletzt aktualisiert am 19.01.2012, zuletzt geprüft am 30.01.2012.
- [Fujiwara u.a. 2011] Fujiwara, R.; Kitamura, A.; Mutoh, K.: Ontology-based manufacturing knowledge navigation platform. In: *9th IEEE International Symposium on Intelligent Systems and Informatics*, 8-10 September 2011, Subotica, Serbien, S. 175-179.
- [Gennari u.a. 2003] Gennari, John H.; Musen, Mark A.; Fergerson, Ray W.; Grosso, William E.; Crubézy, Monica; Eriksson, Henrik et al.: The evolution of Protégé: an environment for knowledge-based systems development. In: *International Journal of Human-Computer Studies* 58 (2003), S. 89-123.
- [Girmscheid 2010] Girmscheid, Gerhard (2010): Wissensmanagement. In: *Strategisches Bauunternehmensmanagement*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2010 (VDI-Buch), S. 975-1048.
- [Greer 2008] Greer, Stephen: A lessons-learned knowledge management system for engineers. In organizational lessons-learned system facilitates the transfer of knowledge from one project team to another. Ein Wissensmanagementsystem auf Basis der gelernten Lektion für Ingenieure. Ein organisatorisches System der gelernten Lektion erleichtert die Wissensübertragung von einem Projektteam zum anderen. In: *Chemical Engineering* Vol. 115 (2008) No. 8, S. 50-52.

- [Gruber 1993] Gruber, Thomas R. (1993): A translation approach to portable ontology specifications. In: *Knowledge Acquisition* 5 (1993) H. 2, S. 199-220.
- [Gust Loh 2008] Gust Loh, Sonja von: Wissensmanagement und Informationsbedarfsanalyse in kleinen und mittleren Unternehmen. Teil 2: Wissensmanagement in KMU. Knowledge management and information needs analysis in small and medium sized enterprises. Part 2: Knowledge management in SME. In: *Information - Wissenschaft & Praxis* 59 (2008) H. 2, S. 127-135.
- [Harjes u.a. 2004] Harjes, Ive-Marko; Bade, Birgitt; Harzer, Florian: Anlaufmanagement - Das Spannungsfeld im Produktentstehungsprozess. Ramp-up management - Area of conflict in the product development process. In: *Industrie Management* 20 (2004) H. 4, S. 45-48.
- [Helm u.a. 2007] Helm, Roland; Meckl, Reinhard; Sodeik, Nicole: Systematisierung der Erfolgsfaktoren von Wissensmanagement auf Basis der bisherigen empirischen Forschung. In: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft* 77 (2007), S. 211-241.
- [Heins 2010] Heins, Michael: Anlauffähigkeit von Montagesystemen. Hannover, Univ., Diss, 2010
- [Herron u.a. 2007] Herron, C.; Braiden, P.M: Defining the foundation of lean manufacturing in the context of its origins (Japan). In: IET International Conference on Agile Manufacturing, 9-11 Juli 2007, Durham, UK, S. 148-157.
- [Hertrampf u.a. 2008] Hertrampf, Frauke; Nickel, Rouven; Stirzel, Martin: Produktionsanläufe als Erfolgsfaktor zur Einhaltung der Time-to-Market. Planung mit einem Anlaufreferenzmodell. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 103 (2008) H. 4, S. 236-239.
- [Hesse 2002] Hesse, Wolfgang: *Ontologie(n)*. In: *Informatik-Spektrum* 25 (2002), S. 477-480.
- [Hirani u.a. 2006] Hirani, Hitendra; Ratchev, Svetan; Lohse, Niels; Valtchanov, George: Methodology for knowledge enriched requirements specification for assembly system reconfiguration. In: *Assembly Automation* 26 (2006) H. 4, S. 307-314.
- [Hitzler u.a. 2007] Hitzler, Pascal; Krötzsch, Markus; Rudolph, Sebastian; Sure, York: *Semantic Web: Grundlagen* 1. Aufl. Berlin; Heidelberg: Springer, (eXamen.press) 2007
- [Hoffmeister u.a. 2011] Hoffmeister, M.; Zapp, M.; Konrad, K.; Angele, J.; Verl, A. (2011): Schlankes Wissensmanagement für agile Produktionssysteme: Semantisches Wikisystem für das Management von Spezifikationen, Maschinendaten und Expertenwissen. In: *wt Werkstattstechnik online* 101 (2011) H. 9, S. 611-616.

- [Hoffmeister u. Zapp 2011] Hoffmeister, M.; Zapp, M.: Performing experiments in photovoltaic manufacturing using knowledge management technologies. In: *Photovoltaics International* (2011) H. 12, S. 21-29.
- [Housein u.a. 2002] Housein, G.; Lin, B.; Wiesinger, G.: Der Mitarbeiter im Fokus des Produktionsanlaufes. Management von Wissen, Qualifikation und Beziehungen als Garant für einen schnellen Produktionslauf. In: *wt Werkstattstechnik online* 92 (2002) H. 10, S. 509-513.
- [Ismail u.a. 2007] Ismail, H.; Reid, I. R.; Mooney, J.; Poolton, J.; Arokiam, I.: How Small and Medium Enterprises Effectively Participate in the Mass Customization Game. In: *IEEE Transactions on Engineering Management*, 54 (2007) H. 1, S. 86-97.
- [Itasse 2011] Itasse, Stéphane: China verschärft weltweiten Maschinenbau-Wettbewerb drastisch. Vogel Business Media GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/automatisierung/fertigungsautomatisierung_prozessautomatisierung/articles/309364/, zuletzt aktualisiert am 30.03.2011, zuletzt geprüft am 14.12.2011.
- [IW 2011] Institut der deutschen Wirtschaft Köln: Patente - Tüfteln, testen – und was dann? Online verfügbar unter <http://www.iwkoeln.de/Publikationen/iwd/Archiv/tabid/122/articleid/24484/Default.aspx>, zuletzt geprüft am 14.12.2011.
- [Jess 2011] Jess, the Rule Engine for the Java Platform. Online verfügbar unter <http://www.jessrules.com/jess/index.shtml>, zuletzt geprüft am 02.08.2011.
- [John u. Drescher 2006] John, Michael; Drescher, Jörg: Semantische Technologien im Informations- und Wissensmanagement: Geschichte, Anwendungen und Ausblick. In: Tassilo Pellegrini und Andreas Blumauer (Hg.): *Semantic Web*: Berlin; Heidelberg: Springer, 2006 (X.media.press), S. 241-255.
- [Kai u. Steele 2009] Kai Yang; Steele, R.: Ontology mapping based on concept classification. In: 3rd IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies, 1-3 June 2009, Istanbul, Turkey, S. 656-661.
- [Kifer u.a. 1995] Kifer, Michael; Lausen, Georg; Wu, James: Logical foundations of object-oriented and frame-based languages. In: *Journal of the ACM* 42 (1995), S. 741-843.
- [Kleuker 2011] Kleuker, Stephan: Anforderungsanalyse. In: *Grundkurs Software-Engineering mit UML: Der pragmatische Weg zu erfolgreichen Softwareprojekten*. Vieweg und Teubner, 2011, S. 51-85.
- [Klindt 2006] Klindt, Thomas: *Die neue EG-Maschinenrichtlinie 2006*. 1. Auflage Berlin; Wien; Zürich: Beuth. 2006

- [Konrad u.a. 2012] Konrad, Konstantin; Hoffmeister, Michael ; Verl, Alexander ; Dreiss, Philipp: Produktionswissen im Anlagenanlauf einsetzen : Semantische Infrastruktur für das Wissensmanagement von Maschinendaten und Expertenwissen beim Produktionsanlauf; In: wt Werkstattstechnik online. 102 (2012), Nr. 3, S. 130-137.
- [Konrad u.a. 2012b] Konrad, Konstantin ; Hoffmeister, Michael ; Zapp, Matthias ; Verl, Alexander ; Busse, Johannes: Enabling Fast Ramp-Up of Assembly Lines through Context-Mapping of Implicit Operator Knowledge and Machine-Derived Data. In: Ratchev, Svetan (Ed): 6th IFIP WG 5.5 International Precision Assembly Seminar, Chamonix, France, February 12-15, 2012. Heidelberg u.a.: Springer, 2012, S. 163-174.
- [Konrad u.a. 2010] Konrad, K.; Gerhardt, P.; Wertz, R.: Suitable process maturity model for PV thin film production. In: 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, München: WIP-Renewable Energies, 2010 S. 3657-3660.
- [Konrad u.a. 2009] Konrad, K.; Böttinger, F.; Seidelmann, J.: Design for fab scalability. In: *Photovoltaics International* (2009) No. 3, S. 12-15.
- [Krötzsch u.a. 2008] Krötzsch, M.; Rudolph, S.; Hitzler, P.: Description logic rules. In: Proceeding of the 2008 conference on ECAI 2008: 18th European Conference on Artificial Intelligence. Patras, Greece: IOS Press, 2008, S. 80-84.
- [Laick u.a. 2003] Laick, T.; Warnecke, G.; Aurich, J. C.: Hochlaufmanagement. Sicherer Produktionshochlauf durch zielorientierte Gestaltung und Lenkung des Produktionsprozesssystems. Ramp-up management - fail-safe production ramp-up by target-oriented design and guidance of the production-process-system. In: *PPS Management* 8 (2003) H. 2, S. 51-54.
- [Liang u.a. 2009] Liang, Senlin; Fodor, Paul; Wan, Hui; Kifer, Michael: OpenRuleBench: an analysis of the performance of rule engines. In: Proceedings of the 18th international conference on World wide web.20-24 April 2009, Madrid, Spanien, S. 601-610.
- [Li u.a. 2010] Li Hongjun; Shou Tiancheng: Research on Concurrent Engineering in Product Design. In: International Conference on Management and Service Science (MASS), 24-26 August 2010, Wuhan, China, S. 1-3.
- [Lifang u.a. 2009] Lifang Wu; Matta, R. de; Lowe, T.J: Updating a Modular Product: How to Set Time to Market and Component Quality. In: *IEEE Transactions on Engineering Management* 56 (2009) Vol. 2, S. 298-311.
- [Lohse u.a. 2006] Lohse, N.; Ratchev, S.; Barata, J.: Evolvable Assembly Systems - On the role of design frameworks and supporting ontologies. In: IEEE International Symposium on Industrial Electronics 4 (2006) S. 3375-3380.

- [Lohse u.a. 2006b] Lohse, Niels; Schäfer, Christian; Ratchev, Svetan: Towards an integrated assembly process decomposition and modular equipment configuration. *Integrale Methode für Montageprozesszerlegung und modulare Anlagenkonfigurierung*. In: *Precision Assembly Technologies for Mini and Micro Products* Vol. 198 (2006) H.3, S. 215-225.
- [Lohse u.a. 2005] Lohse, N.; Hirani, H.; Ratchev, S.; Turitto, M.: An ontology for the definition and validation of assembly processes for evolvable assembly systems. In: *The 6th IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning: From Nano to Macro Assembly and Manufacturing*, (2005), Montreal, Canada, S. 242-247.
- [Lohse u.a. 2005b] Lohse, Niels; Hirani, Hitendra; Ratchev, Svetan: Equipment ontology for modular reconfigurable assembly systems. In: *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 17 (2005), S. 301-314.
- [Lohse u.a. 2004] Lohse, Niels; Ratchev, Svetan; Valtchanov, George: Towards Web-enabled design of modular assembly systems. In: *Assembly Automation* 24 (2004) H. 3, S. 270-279.
- [McBride 2002] McBride, B.: Jena: a semantic Web toolkit. In: *IEEE Internet Computing* 6 (2002) No. 6, S. 55-59.
- [McDonald 1997] McDonald, C.J: Copy EXACTLY! A paradigm shift in technology transfer method. In: *IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop*, 10-12 Sept 1997, Cambridge, Massachusetts, USA, S. 414-417.
- [Meier 2011] Meier, Matthias: Verfahren zum emulationsgestützten MES-Engineering für die Photovoltaikindustrie, Heimsheim: Jost-Jetter Verlag (IPA-IAO Forschung und Praxis 508) Stuttgart, Univ., Diss., 2011.
- [Meier u. Konrad 2009] Meier, M.; Konrad, K.: PVECI - a new PV standard supporting efficient and effective production. In: *Photovoltaics International 2009* Vol. 4, S. 30-35.
- [Meier u. a. 2007] Meier, Matthias; Dreiss, Philipp; Seidelmann, Joachim: Möglichkeiten und Grenzen der Standardisierung produktionsnaher IT In: *PPS Management* 12 (2007) H. 4, S. 16-19.
- [Mikron 2012] Mikron: MIKRON - Mikron G05. Online verfügbar unter http://www.mikron.com/mikron/internet.nsf/id/Mikron_G05_DE, zuletzt geprüft am 03.02.2012.
- [Moon u.a. 2005] Moon, S.K; Kumara, S.R.T; Simpson, T.W: Knowledge representation for product design using Techspecs Concept Ontology. In: *IRI -*

2005 IEEE International Conference on Information Reuse and Integration, 15-17 August 2005, Las Vegas, Nevada, USA, S. 241-246.

- [Näser u.a. 2006] Näser, P.; Müller, E.: Ganzheitliches Anlaufmanagement in der Serienfertigung. Externe Unterstützungsteams als innovative Organisationsform. Holistic approach of ramp up management in serial production. In: *wtWerkstattstechnik online* 96 (2006) H. 4, S. 207-212.
- [Nan u.a. 2008] Nan Gao; Wei Da Chen: A genetic algorithm for disassembly scheduling with assembly product structure. In: IEEE International Conference on Service Operations and Logistics and Informatics, 12-15 October 2008, Beijing, China, S. 2238-2243.
- [Niemann u.a. 2005] Niemann, Jörg; Österle, Michaela; Westkämper, Engelbert: Erfahrungskurvenbasierte Investitionsplanung. Integration industrieller. In: *wt Werkstattstechnik online* 95 (2005) H. 7/8, S. 564-568.
- [Nolden 2011] Nolden, Matthias: Wissensmanagement. Zwischen Fachkräftemangel und Innovationsdruck. In: *Management und Qualität* 46 (2011) H. 1/2, S. 18-20.
- [Nonaka u.a. 2000] Nonaka, Ikujiro¹; Takeuchi, Hirotaka¹; Umemoto, Katsuhiko: A theory of organizational knowledge creation. In: *International Journal of Technology Management* Vol. 11 (1996) No. 7-8, S. 833-845
- [Ontoprise 2011] Ontoprise: ontoprise: OntoStudio. Online verfügbar unter <http://www.ontoprise.de/en/products/ontostudio/>, zuletzt geprüft am 02.08.2011.
- [Ontoprise 2011b] Ontoprise: ontoprise: Freemind to F-logic (mm2flo). Online verfügbar unter <http://www.ontoprise.de/en/downloads/freemind-to-f-logic-mm2flo/>, zuletzt geprüft am 02.08.2011.
- [Ontoprise 2011c] Ontobroker Version 5.1 - Product Documentation. Hrsg. v. Ontoprise. Online verfügbar unter http://www.ontoprise.de/fileadmin/user_upload/Produktdoku_EN/Productdocumentation_OntoBroker_5.1_en.pdf, zuletzt aktualisiert am 15.05.2008, zuletzt geprüft am 02.08.2011.
- [Ontoprise 2012] ObjectLogic Tutorial. Online verfügbar unter http://www.ontoprise.de/fileadmin/user_upload/Publications_EN/ObjectLogic_Tutorial.pdf, zuletzt aktualisiert am 23.07.2010, zuletzt geprüft am 08.03.2012.
- [OpenRuleBench 2011] OpenRuleBench - Benchmarks for Semantic Web Rule Engines. Online verfügbar unter <http://rulebench.projects.semwebcentral.org/>, zuletzt aktualisiert am 12.03.2011, zuletzt geprüft am 19.10.2011.
- [Pfeiffer 2011] Dr. Sabine Pfeiffer: Der Maschinenbau und seine Fachkräfte - Struktur und Stimmung. Online verfügbar unter

http://www.matching.org/downloads/ISF-News_02.pdf, zuletzt aktualisiert am 04.09.2009, zuletzt geprüft am 14.12.2011.

- [Pierre u.a. 2003] Pierre De Lit; Danloy, J.; Delchambre, A.; Henrioud, J.-M: An assembly-oriented product family representation for integrated design. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* Vol. 19 (2003) No. 1, S. 75-88.
- [Probst u.a. 2001] Probst, G. J. B.; Wiedemann, C.; Armbruster, H.: Wissensmanagement umsetzen: drei Instrumente in der Praxis. In: *new management* 70 (2001) H. 10, S. 37-43.
- [Ratchev u.a. 2007] Ratchev, Svetan; Hirani, Hitendra; Bonney, Maurice: Knowledge based formation of re-configurable assembly cells. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 18 (2007), S. 401-409.
- [Riedel u.a. 2009] Riedel, R.; Mueller, E.; Weth, R. von der; Pflugradt, N.: Integrating human behaviour into factory simulation- a feasibility study. In: IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 8-11 Dezember 2009, Hong Kong, China, S. 2089-2093.
- [Rohwedder 2012] Rohwedder Macro Assembly GmbH | Rohwedder Micro Assembly GmbH. Online verfügbar unter <http://www.rohwedder.de/>, zuletzt geprüft am 09.02.2012.
- [Rüger u.a. 2000] Rüger, M. ; Ohlhausen, P: Wissensmanagement - der Erfolgsfaktor der Zukunft. In: *Werkstattstechnik online* 90 (2000) H. 3, S. 81-82.
- [Sandin u.a. 2002] Sandin, E.; Grondahl, P.; Onori, M.: A process-oriented product design based on an assembly module platform. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 11-15 Mai 2002, Washington, DC, USA, S. 4179-4184.
- [Sarker u.a. 2008] Sarker, Biplab K.; Wallace, Peter; Gill, Will: Some observations on mind map and ontology building tools for knowledge management. In: *Ubiquity* (2008) Nr.3, S. 1-9.
- [Schanz u.a. 2003] Schanz, R.; Frede, A.: Konfigurierbare modulare Montagesysteme. In: Gesellschaft für Fertigungstechnik: Stuttgarter Impulse, Zukunft gestalten - Zeichen setzen, FtK, Fertigungstechnisches Kolloquium Stuttgart, Stuttgart, 2003, S. 77-87.
- [Schröder u.a. 2010] Schröder, Delia; Maier, Achim: Wie lassen sich "Kinderkrankheiten" vermeiden? Ein Ansatz zur Verbesserung der Qualität im Produktionsanlauf. How to prevent 'teething problems'? - An approach to improve the production ramp-up. In: *Industrie Management* 26 (2010) H. 4, S. 29-32.

- [Schuh u.a. 2005] Schuh, Günther; Kampker, Achim; Franzkoch, Bastian:
Anlaufmanagement. Kosten senken - Anlaufzeit verkürzen - Qualität sichern.
Ramp-up management: Cutting costs - reducing ramp-up time - ensuring quality.
In: *wt Werkstattstechnik online* 95 (2005) H. 5, S. 405-409.
- [Schuh u.a. 2004] Schuh, Günther; Franzkoch, Bastian: Fast Ramp-up.
Anlaufstrategien, Deviationsmanagement und Wissensmanagement für den
Anlauf. Fast ramp-up. Ramp up strategies, deviation and knowledge
management for the ramp-up. In: *Zeit gewinnen durch flexible Strukturen,*
Jahrestagung Automobillogistik, Düsseldorf. VDI-Verlag (VDI-Berichte), 2004
H. 5, Bd. 1849, S. 69-79.
- [Seliger 2011] Seliger, G.: Montage und Demontage. In: Karl-Heinrich Grote und Jörg
Feldhusen (Hg.): *Dubbel*: Berlin; Heidelberg: Springer, 2011, S. 97-103.
- [Slamanig u.a. 2010] Slamanig, Michael; Winkler, Herwig: Wissensmanagement bei
Produktwechselprojekten. Knowledge management in product change projects.
In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 105 (2010) H. 10,
S. 893-900.
- [Sommer u.a. 2004] Sommer, L.; Hinschläger, M.; Haug, M.; Plankenhorn, A.:
Produktionsanläufe bei mittelständischen Unternehmen. Eine empirische
Untersuchung des Anlaufmanagements. Production start-ups in medium-sized
companies. An empirical examination. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen
Fabrikbetrieb* 99 (2004) H. 1/2, S. 22-24.
- [Spath u. Lentjes 2009] Spath, Dieter; Lentjes, Joachim: Ontologiegestützte
kontinuierliche Produktionssystemplanung. Ontology-based continuous planning
of production systems. In: *wt Werkstattstechnik online* 99 (2009) H. 3,
S. 111-118.
- [Staab 2002] Staab, Steffen: Wissensmanagement mit Ontologien und Metadaten. In:
Informatik-Spektrum 25 (2002), S. 194-209.
- [Stender u.a. 2004] Stender, Siegfried; Uffmann, Jörg; Heinzle, Ulrike: Potenzialcheck
Produktneuanlauf. Auffinden von Optimierungspotenzialen zur
Effizienzsteigerung von Produktneuanläufen. Potential analysis of product ramp-
up. In: *Industrie Management* 20 (2004) H. 4, S. 38-40.
- [Stich 2011] Stich, Volker; Kompa, Stefan; Meier, Christoph; Cuber, Stefan:
Produktion am Standort Deutschland. Faktoren für eine nachhaltige
Wettbewerbssicherung. Germany as a production location for industry. Factors
for a sustainable competitiveness. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen
Fabrikbetrieb* 106 (2011) H. 10, S. 731-735.
- [Stirzel u.a. 2006] Stirzel, Martin; Hüntelmann, Jörg: Erfolgsfaktoren für das
unternehmensübergreifende Anlaufmanagement. Eine empirische Studie.

Stuttgart: IPRI International Performance Research Institute, 2006 (Research paper / IPRI, International Performance Research Institute, Nr. 7).

- [Stuckenschmidt 2011] Stuckenschmidt, Heiner Erstellen von Ontologien. In: O. Güther, W. Karl, R. Lienhart und K. Zeppenfeld (Hg.): Ontologien: Berlin; Heidelberg; Springer, 2011, S. 155-205.
- [Sturm u.a. 2003] Sturm, R.; Dorner, J.; Reddig, K.; Seidelmann, J.: Simulation-based evaluation of the ramp-up behavior of waferfabs. In: ASMC 2003, the 14th annual IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing., 2003, Piscataway, NJ, USA, S. 111-117.
- [Sysmelec 2012] Sysmelec. Equipment Machines. Online verfügbar unter <http://www.sysmelec.ch/page.asp?id=44&parentid=0>, zuletzt geprüft am 09.02.2012.
- [Tallinen u.a. 2003] Tallinen, T.; Osuna, R.V; Lastra, J.L.M; Tuokko, R.: Product model representation concept for the purpose of assembly process modelling. In: Proceedings of the IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning, 10-11 Juli 2003, S. 222-227.
- [Terzic u.a. 2008] Terzic, I.; Merdan, M.; Zoitl, A.; Hegny, I.: Modular assembly machine - ontology based concept. In: *13th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, 15-18 September 2008, Hamburg S. 241-244.
- [Terwiesch u.a. 2004] Terwiesch, C.; Yi Xu (2004): The copy-exactly ramp-up strategy: trading-off learning with process change. In: *IEEE Transactions on Engineering Management* Vol. 51 (2004) No. 1, S. 70-84.
- [TopBraid 2011] TopBraid Composer. Online verfügbar unter http://www.topquadrant.com/products/TB_Composer.html, zuletzt geprüft am 17.10.2011.
- [VDI 4499 Blatt 2 2011] VDI- Richtlinie 4499 Blatt 2 2011-05: Digitale Fabrik - Digitaler Fabrikbetrieb.
- [VDI 4499 Blatt 1 2008] VDI-Richtlinie 4499 Blatt 1 2008-02: Digitale Fabrik - Grundlagen.
- [VDI 3633 Blatt 1 2000] VDI-Richtlinie: VDI 3633 Blatt 12000-03 Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen - Grundlagen (Entwurf)
- [VDI 2860 1990] VDI- Richtlinie 2860 1990-05: Montage und Handhabungstechnik - Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole.

- [Verl 2010] Verl, Alexander: Quo vadis Automatisierung an der Werkzeugmaschine : Potenziale modellbasierter Regelungstechnik in der Steuerungstechnik, In: mav. (2010), Nr. 5, S. 39-41.
- [Verl u.a. 2010] Verl, Alexander; Müller, Verena: Wieder verwendbare Modelle zur disziplin- und domänenübergreifenden. In: Hybride Technologien in der Produktion. Düsseldorf: VDI Verlag, 2010, S. 9-21.
- [Vieweg u.a. 2001] Vieweg, H.-G; Hofmann, H.; Stork, R.; Dreher, C.; Kinkel, S.; Lay, G.; Schmoch, U.: Der mittelständische Maschinenbau am Standort Deutschland Chancen und. München: IFO-Institut für Wirtschaftsforschung, 2001
- [Voigt 2010] Voigt, Harald: Den Nutzen von Wissensmanagement realisieren. Making tangible the benefit of knowledge management. In: *Industrie Management 26* (2010) H. 1, S. 17-20.
- [Voigt 2008] Voigt, Kai-Ingo: Industrielles Management. Industriebetriebslehre aus prozessorientierter Sicht. Berlin: Springer, 2008
- [W3C 2010] W3C, Semantic Web Case Studies and Use Cases. Online verfügbar unter <http://www.w3.org/2001/sw/sweo/public/UseCases/>, zuletzt aktualisiert am 06.10.2010, zuletzt geprüft am 02.08.2011.
- [W3C 2011] W3C, Publications of the W3C Semantic Web Activity. Online verfügbar unter <http://www.w3.org/2001/sw/Specs>, zuletzt aktualisiert am 07.11.2011, zuletzt geprüft am 01.03.2012.
- [Walther und Verl 2007] Walther, Michael; Verl, Alexander: Maschinendiagnose auf Basis von Antriebssignalen. In: *Zuverlässigkeit und Diagnose in der Produktion*. Düsseldorf: VDI Verlag, 2007, S. 39-55.
- [Weiguo u.a. 2009] Weiguo Wang; Huawei Zhong; Guangrong Yan; Yi Lei: A Product Tolerance Information Model in OWL/SWRL. In: *Fifth International Conference on Semantics, Knowledge and Grid* 12-14 Oktober 2009, Zhuhai China, S. 444-445.
- [Westkämper 2010] Westkämper, E.: ManuFuture BW - Lernen als Chance für die Produktionstechnik. In: *Stuttgarter Impulse - Fertigungstechnik für die Zukunft*. Stuttgart: Gesellschaft für Fertigungstechnik, 2010, S. 29-47.
- [Westkämper 2009] Westkämper, E.: Digitale Produktion - Herausforderung und Nutzen. In: *Handbuch Unternehmensorganisation*. Berlin: Springer, 2009, Kap.8.1, S. 515-529.
- [Westkämper u.a. 2009] Westkämper, E.; Carpanzano, E.; Constantinescu, C.; Decubber, C.; Elsner, P.; Groothedde, R. et al.: The proactive initiative

ManuFuture roadmap. In: The ManuFuture Road. Berlin: Springer, 2009, S. 123-147.

[Wiendahl u.a. 2002] Wiendahl, H. P.; Hegenscheidt, M.; Winkler, H.: Anlaufrobuste Produktionssysteme. Ramp-up-sturdy production systems. In: *wt Werkstattstechnik online* 92 (2002) H. 11/12, S. 650-655.

[Wiesinger u.a. 2002] Wiesinger, G.; Housein, G.: Schneller Produktionsanlauf von Serienprodukten. Wettbewerbsvorteile durch ein anforderungsgerechtes Anlaufmanagement. In: *Werkstattstechnik online* 92 (2002), S. 505-508.

[Winkler 2007] Winkler, Helge: Modellierung vernetzter Wirkbeziehungen im Produktionsanlauf. Dissertation, Universität Hannover. PZH, Produktionstechnisches Zentrum, Garbsen. 2007

[Wurdig u.a. 2008] Wurdig, Thomas J.; Wacker, Roland: Generische Simulationslösung für Fördertechnik. Unter Mitarbeit von Daimler AG. In: *Advances in Simulation for Production and Logistics Simulation*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2008, S. 11-21.

[Yingzhong u. Xiaofang 2009] Yingzhong Zhang; Xiaofang Luo: Ontology-based design meta-intent representation. In: *IEEE 10th International Conference on Computer-Aided Industrial Design Conceptual Design*, 26-29 November 2009, Wenzhou, China, S. 923-928.

[Yu u.a. 2003] Yu, J.; Yin, Y.; Sheng, X.; Chen, Z.: Modelling strategies for reconfigurable assembly systems. In: *Assembly Automation* 23 (2003) Vol. 3, S. 266-272.

[Zapp 2010] Zapp, M.: Simulationswerkzeuge zur Rekonfiguration von Produktionsanlagen. In: *Productivity management* 15 (2010) H. 1, S. 35-38.

[Zeugtrager 1998] Zeugtrager, Karsten (1998): Anlaufmanagement für Grossanlagen. Hannover, Univ., Diss., Düsseldorf: VDI-Verlag, 1998.

[Zhengwen 2007] Zhengwen Zhang; Sharifi, H.: Towards Theory Building in Agile Manufacturing Strategy mdash; A Taxonomical Approach. In: *IEEE Transactions on Engineering Management* 54 (2007), Vol. 2, S. 351-370.

Das entwickelte Verfahren enthält ein mit semantischen Technologien abgebildetes Modell der Montagedomäne (Anlage, Prozess, Produkt). Dabei werden die strukturellen Informationen modelliert, und zusätzlich heterogene Konfigurations- und Messdaten ‚online‘ erfasst und gespeichert. Als weiteres Teilmodell werden Erfahrungen verantwortlicher Mitarbeiter maschinenlesbar abgelegt. Diese Modellteile können integriert angefragt werden und stellen somit für den Anlagenanlauf hilfreiche Datensätze problemspezifisch zur Verfügung. Das dazugehörige Verfahren bietet eine schrittweise Handlungsanleitung zur Spezifikation, Erzeugung, Integration und nachhaltigen Nutzung eines solchen Systems.

ISBN 978-3-8396-0455-7



FRAUNHOFER VERLAG