

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Tag der mündlichen Prüfung: 22.11.2013

Vorsitzende des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Marion Merklein

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke
Prof. Dr.-Ing. Reinhard German

Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose

Der Technischen Fakultät

der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von
Markus Michl
aus Amberg

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Mein herzlicher Dank gilt dem ehemaligen Lehrstuhlinhaber Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann für das in mich gesetzte Vertrauen und die eingeräumte Möglichkeit zur Promotion. Seinem Nachfolger Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke danke ich für die weitere engagierte Betreuung meiner wissenschaftlichen Arbeit und die fortwährende Unterstützung. Beiden Professoren danke ich für die Freiräume zum selbstständigen und kreativen Arbeiten, die ich während meiner Zeit am Lehrstuhl genießen durfte. Zudem bedanke ich mich für die jederzeit angenehme Zusammenarbeit und die konstruktiven Anmerkungen, die mir die genannten Herren haben zuteilwerden lassen.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Reinhard German, Inhaber des Lehrstuhls für Rechnernetze und Kommunikationssysteme, für die wohlwollende Übernahme des Koreferats. Darüber hinaus geht mein Dank an Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes sowie an Herrn Prof. Dr.-Ing. Lothar Pfitzner als weiteres Mitglied des Prüfungskollegiums.

Allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl FAPS danke ich für die hervorragende Arbeitsatmosphäre sowie die Vielzahl an gemeinsamen Aktivitäten während und außerhalb der Arbeitszeit. Besonderer Dank gilt Herrn M.Comp.Sc. Jochen Bauer, Herrn Dipl.-Ing. Matthias Brossog, Herrn Dipl.-Inf. Christian Fischer und Herrn Dipl.-Inf. Jochen Merhof für die intensiven fachlichen Diskussionen und Anregungen, die immens zur Entstehung der Arbeit beigetragen haben. Ferner bedanke ich mich bei allen Studierenden, die mich während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl unterstützt haben und somit einen wichtigen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet haben.

Der letzte Dank gilt meinen Freunden sowie meinen Eltern Maria und Guido für die Motivation und Unterstützung, die ich auf meinem bisherigen Lebensweg erfahren habe.

Ammerthal, im Dezember 2013

Markus Michl

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Technische Diagnose im Umfeld automatisierter Produktion	4
2.1	Aktuelle Situation im Produktionsumfeld	4
2.2	Betrieb und Kennzahlen automatisierter Produktionsanlagen.....	7
2.2.1	Begriffe zur Analyse des Betriebsverhaltens automatisierter Produktionsanlagen	8
2.2.2	Kennzahlen zur Analyse des Betriebsverhaltens automatisierter Produktionsanlagen	8
2.2.3	Abläufe bei der Fehlerbeseitigung an automatisierten Produktionsanlagen	11
2.2.4	Betriebsverhalten automatisierter Produktionsanlagen	12
2.2.5	Bewertung des Leistungsstands automatisierter Produktionsanlagen	13
2.3	Strukturierung und Einordnung der technischen Diagnose	14
2.3.1	Phasenmodell der technischen Diagnose	15
2.3.2	Klassifikation von Softwaresystemen der technischen Diagnose	16
2.3.3	Technische Diagnose und Instandhaltung.....	17
2.4	Stand der Technik bei der Überwachung	18
2.4.1	Betriebsdatenerfassung (BDE) und daraus ableitbare Kennzahlen.....	19
2.4.2	Stand der Technik und Handlungsbedarf im Bereich der Überwachung von Produktionsanlagen	21
2.4.3	Überblick über relevante technologische Befähiger aus dem IuK-Umfeld für die Überwachung.....	24
2.4.4	Applikation technologischer Befähiger aus dem IuK-Umfeld bei der Überwachung	24
2.5	Stand der Technik bei der Diagnose und Therapie	25
2.5.1	Grundlegender Aufbau und Arbeitsweise von Expertensystemen.....	26
2.5.2	Stand der Technik und Handlungsbedarf im Bereich der Expertensysteme für produktionstechnische Anwendungen ...	28

2.5.3	Grundlagen agentenbasierter Systeme	29
2.5.4	Stand der Technik und Handlungsbedarf im Bereich agentenbasierter Systeme für produktionstechnische Anwendungen.....	32
2.5.5	Überblick über relevante technologische Befähiger aus dem IuK-Umfeld für die Diagnose und Therapie.....	33
2.5.6	Applikation technologischer Befähiger bei der Diagnose und Therapie	34
2.6	Lösungsweg und Zielsetzung der Arbeit	37
3	Entwicklung anpassungsfähiger Softwarelösungen zur Überwachung von Produktionsanlagen	40
3.1	Grundlegende Systemarchitektur und Nachrichtenformate des Überwachungssystems webMon.....	40
3.1.1	Entwurf einer flexiblen Systemarchitektur für das Backend von webMon	40
3.1.2	Konzeption einer generischen Datenstruktur für webMon	42
3.1.3	Systemarchitektur des Frontends von webMon.....	43
3.1.4	Nachrichtentypen und -formate in webMon	44
3.2	Flexible Informationsvisualisierung für die Werksebene in webMon	46
3.2.1	Vergleich und Bewertung von Technologien zur zwei- dimensional-interaktiven Informationsdarstellung im Web.....	47
3.2.2	Konzeption und Umsetzung einer flexiblen Informations- visualisierung auf Werksebene auf Basis von SVG.....	48
3.2.3	Anzeige aktueller Betriebsdaten von Geräten auf Basis des SVG-basierten Werksüberblicks.....	51
3.3	Leistungsfähige Informationsvisualisierung auf Zellenebene durch Webtechnologien zur 3D-Darstellung in webMon	52
3.3.1	Vergleich und Bewertung von Gestaltungsalternativen zur webbasierten Informationsvisualisierung auf Zellenebene	52
3.3.2	Vergleich und Bewertung von Technologien zur drei- dimensional-interaktiven Informationsdarstellung im Web.....	54
3.3.3	Auswahl eines geeigneten Frameworks zum Aufbau einer WebGL-basierten Visualisierungslösung.....	56
3.3.4	Systemkonzept einer webbasierten 3D- Visualisierungslösung auf Basis von WebGL für webMon.....	58

3.3.5	Erstellung dynamischer Anlagenmodelle in X3D zur Verwendung in webMon	59
3.3.6	Dynamische Visualisierung der aktuellen Fertigungssituation in webMon	62
3.3.7	Modellierung von Montagevorgängen in webMon	65
3.3.8	Erweiterte Analysemöglichkeiten für webMon durch Integration eines HUD (Head-up-Display)	70
3.3.9	Fehleranalyse mit webMon durch historischen Modus	71
3.4	Zusammenfassung.....	72
4	Optimierung menschenzentrierter Diagnose- und Therapiestrategien durch webbasierte Ansätze.....	74
4.1	Wissen und dessen Management	74
4.1.1	Begriffseingrenzung Wissen	75
4.1.2	Explizites versus implizites Wissen	75
4.1.3	Begriffseingrenzung Wissensmanagement	76
4.1.4	Stand der Technik und Handlungsbedarf im Bereich des Wissensmanagements für die menschenzentrierte Diagnose und Therapie	78
4.2	Bewertung von Softwaretechnologien des Wissensmanagements	79
4.3	Strukturierter Wiki-Einsatz zur Unterstützung von Diagnose und Therapie	82
4.3.1	Grundkonzept und Funktionen von Wikis	82
4.3.2	Sammlung und Strukturierung diagnoserelevanter Wissens Elemente im Produktionsumfeld zur Integration ins Diki	83
4.3.3	Konzeption und Umsetzung einer geeigneten Architektur für Diki zur Verwaltung diagnoserelevanter Wissens Elemente im Produktionsumfeld	84
4.4	Einsatz semantischer Wikis zur Erweiterung des Diki-Ansatzes	94
4.4.1	Semantisches Web und Ontologien	94
4.4.2	Grundprinzip semantischer Wikis	96
4.4.3	Semantische Annotation in Wiki-Seiten	96
4.4.4	Anwendung semantischer Wikis zur Unterstützung der Diagnose und Therapie auf semDiki-Basis.....	97

4.4.5	Bewertung von Strategien zur semantischen Annotation von semDiki-Inhalten	99
4.5	Aufwandsreduktion des Diki-Einsatzes	100
4.6	Zusammenfassung.....	103
5	Aufbau effizienter wissensbasierter Diagnosesysteme durch Applikation webbasierter Ansätze.....	104
5.1	Expertensystemeinsatz zur Unterstützung der rechnergeführten Diagnose und Therapie	104
5.1.1	Vergleich und Bewertung innovativer Ansätze zur Gestaltung von Expertensystemen	104
5.1.2	Aufbau eines Expertensystems zur Unterstützung der technischen Diagnose des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion	109
5.1.3	Effizienter Aufbau und Pflege von Wissensbasen für Expertensysteme unter Rückgriff auf Mass-Collaboration	114
5.1.4	Zusammenfassung	115
5.2	Agentenbasierte Systeme zur autonomen Diagnose	116
5.2.1	Vergleich und Bewertung neuartiger Ansätze zur Gestaltung agentenbasierter Systeme	117
5.2.2	Architekturentwurf von DiMAS zur Unterstützung der technischen Diagnose von komplexen Montagezellen	123
5.2.3	Aufwandsarmer Einsatz von DiMAS im Produktionsumfeld...	132
5.2.4	Zusammenfassung	134
6	Strategien zur nachhaltigen Integration von Diagnosesystemen ins Unternehmensumfeld	136
6.1	Betriebliche Organisationsmodelle zur Förderung der technischen Diagnose	137
6.1.1	Klassische und wissensfördernde Primärorganisationen	137
6.1.2	Klassische und wissensfördernde Sekundärorganisationen..	142
6.2	Humanorientierte Aspekte zur Förderung der technischen Diagnose im Fertigungsumfeld.....	144
6.2.1	Unternehmenskultur	144
6.2.2	Führungskultur.....	146

6.3	Konzeption eines Modellumfelds für die wissensorientierte Diagnose unter Berücksichtigung organisatorischer und humaner Aspekte	150
6.4	Entwicklung eines Stufenkonzepts zur nachhaltigen Einführung und Anwendung rechnergestützter Diagnosesysteme	153
6.4.1	Stufe 1: Einführung webbasierter Überwachungssysteme	154
6.4.2	Stufe 2: Aufbau von Systemlösungen zur Unterstützung menschenzentrierter Diagnose und Therapie.....	155
6.4.3	Stufe 3: Einführung rechnergeführter Diagnosesysteme	155
6.4.4	Stufe 4: Einführung autonomer Überwachungs- und Diagnosesysteme	156
6.4.5	Gesamtkonzept	157
6.5	Zusammenfassung.....	158
7	Zusammenfassung	160
8	Summary	163
9	Abkürzungsverzeichnis.....	166
10	Literatur	169

1 Einleitung

Seit mehreren Jahrzehnten wirken vielfältige Einflüsse auf die Produktionstechnik. Die Globalisierung erhöht den Wettbewerbsdruck auf die Unternehmen. Zudem führt weltweit zunehmender Wohlstand zu einem neuen Konsumverhalten, das seinen Schwerpunkt auf kundenindividuelle Produkte legt. Dies hat diversifizierte globale Märkte einhergehend mit dynamisierten Produktlebenszyklen zur Folge. Parallel dazu schreitet der technische Fortschritt mit hoher Innovationsgeschwindigkeit voran. Hieraus ergibt sich eine Vielzahl an Produkt- und Prozessinnovationen, die für eine Anwendung im Produktionsumfeld zur Verfügung stehen. Konsequenz dieser Entwicklungen sind häufige Prozessanpassungen, eine steigende Variantenvielfalt sowie eine immense Zunahme des erforderlichen Wissens zur Beherrschung der Innovationen. Auf nationaler Ebene werden diese Entwicklungen durch den demografischen Wandel und einen Mangel an Nachwuchskräften im Ingenieurbereich zusätzlich verschärft. [1][189]

Unternehmen reagieren auf diese Entwicklungen mit dem Aufbau von Produktionsstrukturen, deren Grundstein automatisierte, wandlungsfähige Anlagen darstellen. Dadurch werden sie in die Lage versetzt, die vielschichtigen Anforderungen zu erfüllen, die sich aus den Veränderungen im Produktionsumfeld ergeben [231]. Um mit diesen Anlagen wirtschaftlich produzieren zu können, sind kurze und seltene Ausfallzeiten sowie geringe Ausschussraten gefordert [230]. Hierbei kommt rechnergestützten Diagnosesystemen eine gesteigerte Bedeutung zu, da aufgrund der kontinuierlichen Zunahme des Wissens zum Anlagenbetrieb dieses nur noch schwer von einzelnen Experten vollständig beherrschbar ist. Diagnosesysteme werden begleitend zu Produktionsanlagen betrieben und stehen dem Anwender bei Ursachenfindung und Maßnahmenauswahl im Rahmen der Störungsbehandlung unterstützend zur Seite [38]. Angesichts des hochdynamischen Marktumfelds, auf das sich die Produktion durch Rückgriff auf wandlungsfähige Strukturen einstellt, sind Überwachungs- und Diagnosesysteme erforderlich, die flexibel anpassbar und nutzbar sind sowie eine effiziente Wissensverwaltung erlauben. Nur so können sie eine wirtschaftliche Produktion unterstützen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, dem Trend in Richtung eines dynamischen und variantenreichen Produktionsumfelds Rechnung zu tragen und Diagnosesysteme zu entwickeln, die sich hieraus ergebende Anforderungen umfassend erfüllen. Dazu werden in Kapitel 2 zunächst die eingangs angesprochenen Veränderungen im Produktionsumfeld detailliert untersucht und ihre Auswirkung auf kritische Leistungskennzahlen automatisierter Produktionsanlagen ermittelt. Ebenso wird der Diagnosebegriff anhand eines Phasenmodells systematisiert, um darauf aufbauend den Stand der Technik in den einzelnen Teildisziplinen erarbeiten zu können. Für die dabei identifizierten Defizite wie der Verbreitung von Insellösungen bzw. dem hohen Aufwand zum Aufbau und zur Pflege der Systeme werden anschließend geeignete Lösungsstrategien aufgezeigt.

Dies erfolgt unter Rückgriff auf innovative Technologien aus dem IuK-Umfeld und hier insbesondere aus dem Webumfeld wie offene Webstandards, Social Software, Cloud-Computing oder dem Mass-Collaboration-Ansatz. Diese werden in den folgenden Kapiteln zur Gestaltung anforderungsgerechter Überwachungs- und Diagnosesysteme herangezogen. Das Potential der entwickelten Systemlösungen wird jeweils an Anwendungsbeispielen demonstriert. Eine besondere Betrachtung schenken alle Kapitel dabei jeweils dem Aspekt, wie die aufgezeigten Ansätze gemeinsam von mehreren Akteuren vorangetrieben werden können, um Synergien nutzbar zu machen.

In diesem Kontext wird in Kapitel 3 eine Systemlösung konzipiert und umgesetzt, die eine Unterstützung aller kritischen Aspekte der Überwachung bietet. Dies beinhaltet die Forderung nach einer universell einsetzbaren, anpassungsfähigen Systemlösung, die auch auf mobilen Endgeräten nutzbar ist und transparente und umfassende Visualisierungsmöglichkeiten bietet. Für den Bereich der Betriebsdatenerfassung wird als Lösungsansatz dabei ein modularer, flexibler Architekturansatz in Verbindung mit generischen Datenformaten und -strukturen unter Verwendung offener Standards wie XML erarbeitet. Für die Bereiche der Datenanalyse und Fehlermeldung werden basierend auf den beiden Kerntechnologien SVG (Scalable Vector Graphics) und WebGL (Web Graphics Library) leistungsstarke Visualisierungsmöglichkeiten entwickelt, die verschiedene betriebliche Abstraktionsebenen abbilden und zudem ubiquitär nutzbar sind.

Zur Gewährleistung einer zielsicheren und schnellen Behandlung von detektierten Fehlern werden in Kapitel 4 Lösungsansätze untersucht und vergleichend bewertet, die dem Anwender eine effiziente Unterstützung für die Teilschritte der Diagnose und der Therapie bieten. Angesichts der Wissensintensität dieser Phasen erfolgt eine Analyse, inwiefern Softwaresysteme aus dem Bereich des Wissensmanagements hier unterstützen können. Mit Wikis wird ein geeigneter Systemansatz identifiziert, der seinen Ursprung im Webumfeld hat und konsequent den Web 2.0 Gedanken verfolgt. Vor diesem Hintergrund wird im Anschluss eine Wiki-basierte Systemlösung umgesetzt und mit weiteren Konzepten kombiniert, die die Strukturierung diagnoserelevanten Wissens verbessern. Dabei wird auf Portalseiten, One-Point-Lessons und FMEA-Analysen (Failure Mode and Effects Analysis) zurückgegriffen. Die Einsatzmöglichkeiten dieses Ansatzes werden exemplarisch anhand ausgewählter Beispiele demonstriert. In Erweiterung des Wiki-Prinzips werden auch semantische Wikis in die Betrachtung mit einbezogen. Diese weisen aufgrund einer integrierten semantischen Annotation das Potential auf, Wissen in maschinell zu verarbeitender Form zu hinterlegen, was die Effizienz der Wissensnutzung weiter steigert.

Ausgehend von den umfangreichen Wissensbasen, die durch menschenzentrierte Diagnose- und Therapieansätze auf Wiki-Basis bereitstehen, werden in Kapitel 5 wissensbasierte Systemlösungen erstellt, die auf diesen Informationsquellen aufbauen können. Hierbei wird mit Experten- und Agentensystemen auf Systemklassen der künstlichen

Intelligenz zurückgegriffen. Durch den Rückgriff auf die in Kapitel 4 erstellten Wissenssammlungen erfährt der für den Einsatz wissensbasierter Systeme kritische Aspekt des effizienten Aufbaus einer Wissensbasis bereits Unterstützung. Weitere Defizite wie der hohe Aufwand zum Aufbau und zur Pflege des Systems sowie die mangelnde Benutzerfreundlichkeit werden wiederum durch Applikation technologischer Befähiger eliminiert. Dabei wird auf neuartige Webtechnologien und -paradigmen wie Mass-Collaboration, serviceorientierte Architekturen und Cloud-Computing zurückgegriffen, die mit den jeweiligen Basissystemen fusioniert werden, um die Defizite zu beseitigen. Die Umsetzung der Lösungsstrategien wird jeweils an Anwendungsbeispielen demonstriert und evaluiert.

Einhergehend mit einer gesteigerten Wissensintensität der technischen Diagnose rücken neben der technischen Umsetzung von Diagnosesystemen weitere Aspekte in den Fokus. Wissensarbeit ist neben der Bereitstellung der technischen Voraussetzungen auch stark von den Gestaltungsdimensionen Organisation und Mensch abhängig [25]. Angesichts dieser Voraussetzung ist die Einführung und Nutzung von Systemen der technischen Diagnose durch passende organisatorische und humane Begleitmaßnahmen zu unterstützen. Nur so wird das vollständige Potential der technischen Systemlösungen wirksam. Diese Anforderung wird in Kapitel 6 mit der Entwicklung eines betrieblichen Modellumfelds zur Nutzenoptimierung technischer Diagnosesysteme berücksichtigt. Dazu werden in einem vorgelagerten Schritt diverse klassische und wissensorientierte betriebliche Organisationsmodelle, Unternehmens- sowie Führungskulturen hinsichtlich ihrer Einsatzeignung in diesem Kontext analysiert. Darauf aufbauend wird abschließend ein Stufenkonzept zur schrittweisen Einführung der Systeme entwickelt, dass die betriebliche Applikation der in den Kapiteln 3 bis 5 vorgestellten Überwachungs- und Diagnosesysteme erlaubt. Im Hinblick auf die hohe und zukünftig weiter steigende Wissensintensität der technischen Diagnose bezieht das Konzept dabei alle drei Gestaltungsdimensionen - Mensch, Organisation und Technik - mit ein. Damit wird Anwendern eine Roadmap aufgezeigt, wie ausgehend vom identifizierten Status quo (vgl. Kapitel 2) die sukzessive Evolution von technischen Diagnosesystemen zu Systemlösungen realisierbar ist, die aktuelle Anforderungen umfassend erfüllen.

Die vorliegende Arbeit betrachtet somit nicht nur die einzelnen Phasen der technischen Diagnose ganzheitlich, sondern ebenso die Einbettung der technischen Lösungsansätze in die weiteren Gestaltungsdimensionen Organisation und Mensch. Bestehende Defizite in den einzelnen Phasen der technischen Diagnose werden identifiziert und unter Rückgriff auf innovative webbasierte Ansätze beseitigt. Fortan stehen anpassungsfähige und leistungsstarke Systemlösungen zur Verfügung, die zentralen Anforderungen des heutigen Produktionsumfelds wie dem Wandel zu einer Wissensgesellschaft und der Vision einer dezentralen, intelligenten Produktionsumgebung Rechnung tragen.

2 Technische Diagnose im Umfeld automatisierter Produktion

In Folgenden wird aufgezeigt, welchen Herausforderungen sich produzierende Unternehmen im aktuellen Umfeld zu stellen haben und wie sie auf diese reagieren. In diesem Zusammenhang werden Kriterien zur Bewertung des Betriebs komplexer automatisierter Produktionsanlagen vorgestellt. Auf Basis dieser Kenngrößen wird der Status quo im Produktionsumfeld analysiert. Zudem werden Gründe für die mangelnde Zielerreichung eruiert. Mit der technischen Diagnose steht ein Ansatz zur Beseitigung ermittelter Defizite zur Verfügung, der im Anschluss systematisiert und hinsichtlich seines Stands der Technik bewertet wird. Aus dem dabei identifizierten Handlungsbedarf sowie aufgezeigten potentiellen Lösungsstrategien wird schließlich die Zielsetzung der Arbeit abgeleitet.

2.1 Aktuelle Situation im Produktionsumfeld

Mit dem Wandel des gesellschaftlichen und technologischen Umfelds ergibt sich auch eine Veränderung der Anforderungen, die an produzierende Unternehmen gestellt werden. In der heutigen Konsumgesellschaft steht für Kunden nicht mehr nur die Funktionserfüllung ihrer erworbenen Produkte im Vordergrund. Vielmehr sollen diese in der Regel auch das Weltbild und den Lebensstil des Konsumenten zum Ausdruck bringen, was zu einer Individualisierung der Nachfrage führt [181]. Ein sich beschleunigender technischer Fortschritt begleitet diese Entwicklungen und unterstützt dabei auch die Erfüllung der Kundenanforderungen. [178]

Dieser Trend lässt sich sehr gut am Beispiel von Mobiltelefonen nachvollziehen (vgl. Tabelle 1). Im Jahr 2001 kam mit dem Siemens SX45 einer der ersten PDA mit Mobiltelefonfunktion auf dem Markt, der heutigen Smartphones ähnelt. Er bietet ein Farbdisplay mit 65000 Farben und ist mit einem resistiven Touchscreen ausgestattet, welche eine Auflösung von 240 x 320 Pixel hat. Die Bedienung erfolgt mit einem speziellen Eingabestift oder den Fingerspitzen. Neben den auch damals bereits üblichen Funktionen Mobiltelefonie und SMS-Dienst ist er ferner mit der Möglichkeit der Datenübertragung via GPRS ausgestattet. Dies erlaubt den Zugriff auf HTML-basierte Internetseiten sowie den Empfang und Versand von E-Mails. Interner Speicher und Prozessor sind ausreichend zum Speichern und Betrachten von Office-Dokumenten sowie zur Nutzung einfacher Spiele. [133][149]

Innerhalb von nur einem Jahrzehnt entwickelte sich die Technologie in diesem Bereich bis zu aktuellen Geräten wie dem Samsung Galaxy S 2 weiter. In einer kompakteren Bauform als das Siemens SX45 bietet es ein größeres und höher auflösendes Display. Des Weiteren ist es ohne Eingabestift bequem per Multi-Touch-fähigem Bildschirm bedienbar, was die Interaktion mit den auf dem Gerät laufenden Anwendungen erleichtert.

Darüber hinaus verfügt es über vielfältige Möglichkeiten, Internetverbindungen mit den unterschiedlichsten Datenraten aufzubauen. Zusätzlich weist es einen leistungsstarken 1,2 GHz Dual-Core Prozessor, umfangreichen internen Speicher, Komponenten zur GPS-gestützten Navigation sowie eine hochauflösende Kamera auf. Dies erlaubt in Verbindung mit der zuvor genannten Ausstattung zahlreiche neue Anwendungsfelder, welche zu Beginn des Jahrtausends nicht möglich waren. [147]

Tabelle 1: Technologische Entwicklung am Beispiel Mobiltelefon [133][147][149]

Kriterium	Siemens SX 45	Samsung Galaxy S2
Marktstart	2001	2011
Abmessungen	13,4 x 8,7 x 2,6 cm	12,5 x 6,6 x 0,8 cm
Volumen	Ca. 303 cm ³	Ca. 66 cm ³
Displayauflösung	240 x 320 Pixel	480 x 800 Pixel
Displaygröße	5,8 x 7,7 cm	5,6 x 9,3 cm
Datenübertragung	GPRS	GPRS, EDGE, UMTS, HSDPA, WLAN, Bluetooth
Prozessor	0,15 GHz	1,2 GHz Dual-Core
Speicher	32 MB	16 GB
Eingabeschnittstelle	Resistiver Touchscreen mit Stiftbedienung	Kapazitiver Touchscreen mit Multi-Touch
Extras	<ul style="list-style-type: none"> ▪ E-Mail (ohne Anhänge) ▪ Office-Document-Viewer ▪ Spiele ▪ MP3-Player 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Office-Document-Viewer ▪ PDF-Reader ▪ E-Book-Reader ▪ Kamera (8 MP) ▪ GPS-Navigation ▪ UKW/FM-Radio ▪ Multimedia-Player (Audio, Video) ▪ 3D-Spiele ▪ Android-Market ▪ Sensorik (Bewegung, Näherung und Helligkeit)

Telefonie und SMS rücken bei Verwendung von Smartphones immer mehr zugunsten neuer Anwendungsfelder in den Hintergrund. Vielmehr dienen diese Geräte aktuell als Multimedia-Player zur mobilen Nutzung umfangreicher Musik- und Videosammlungen, mobiles Navigationssystem, Internetzugangspunkt, Kamera, Camcorder, mobile Spielekonsole oder als mobiler PC-Ersatz. Durch die vielfältigen Möglichkeiten des Internetzugriffs aufgrund eines kontinuierlichen Ausbaus der mobilen Datennetze ermöglichen es diese Geräte das Lebensgefühl der Always-on-Gesellschaft auszufüllen. Die Verbin-

dung zu privaten Kontakten und Geschäftspartnern kann so jederzeit über E-Mail, Instant Messenger oder die Nutzung sozialer Netze aufrecht erhalten werden [158]. Des Weiteren existieren diverse leistungsfähige Betriebssysteme für Smartphones, wie in diesem Beispiel Android, die über eine Integration von Anwendungsmärkten verfügen. Dies erlaubt eine freie Personalisierung der Endgeräte an die Wünsche der jeweiligen Nutzer. [147]

Ein weiteres Beispiel, das die sich verändernden Rahmenbedingungen des Produktionsumfelds deutlich aufzeigt, ist die Automobilherstellung. Bis in die 80er-Jahre hinein konnten mit einer Palette von zwei oder drei Modellen die Anforderungen des Marktes abgedeckt werden. Heutzutage sind hingegen mehr als ein Dutzend Modelle, die zudem in diversen Ausstattungslinien und Karosserieformen angeboten werden, erforderlich, um die individuellen Wünsche der Käufer zu erfüllen. So erweiterte z. B. Mercedes Benz Cars seine C- und E-Klasse umfassende Modellpalette aus den 80er-Jahren in eine breit gefächerte Modellpalette, die mehr als zehn Klassen aus den Kategorien Limousine, Geländewagen, Van und Coupé bzw. Cabrio umfasst. Zudem erfährt die Modellpalette in kurzen Zyklen Aktualisierungen, um permanent technisch aktuelle Produkte bieten zu können. Dieses Vorgehen ist in Verbindung mit einer hohen Produktqualität notwendig, um im heutigen Marktumfeld bestehen zu können. [196]

Der technische Fortschritt wird dabei von neuen Entwicklungen im Bereich der Mikroelektronik getragen, welche die zunehmende Funktionsintegration in Geräte durch die Bereitstellung immer kleinerer und leistungsfähiger Komponenten erlauben [190]. Die Konsequenz hieraus sind leistungsstarke, miniaturisierte Produkte mit hoher Komplexität, die zudem geringe Fertigungstoleranzen erfordern. Diese Veränderungen des Wettbewerbsumfelds bedingen auch einen Wandel des Produktionsumfelds. Hier muss auf automatisierte Produktionsanlagen zurückgegriffen werden, um die notwendigen hohen Stückzahlen bei gleichzeitig steigenden Qualitätsansprüchen erzeugen zu können [230]. Dies schlägt sich in einem steigenden Automatisierungsgrad im industriellen Umfeld nieder. Dieser hat gemäß Umfragen gegen Ende 2004 mittlerweile 79 % erreicht [207].

Insbesondere für den Standort Deutschland ergeben sich hieraus Chancen, die wirtschaftliche Position zu verteidigen und auszubauen. Die industrielle Produktion stellt hier einen bedeutenden Wirtschaftszweig dar, der sich für ca. 25 % des deutschen Bruttoinlandsprodukts verantwortlich zeichnet [121]. 7,8 Millionen von insgesamt 40,5 Millionen erwerbstätigen Personen sind diesem Bereich zuzuordnen [126][167]. Gerade in einem Hochlohnland wie Deutschland können Marktanteile und Arbeitsplätze in der Produktion dauerhaft nur durch eine automatisierte Fertigung gesichert und ausgebaut werden. Nur so ist die erforderliche Produktqualität und Wirtschaftlichkeit erreichbar, die es erlaubt in einem Umfeld mit global verteilten Produktionsstandorten und Absatzmärkten zu bestehen [112]. Ein weiterer zu beachtender Aspekt ist die demografische Ent-

wicklung, die dazu führt, dass dem deutschen Arbeitsmarkt in den nächsten Jahrzehnten weniger Arbeitskräfte zur Verfügung stehen [115]. Aus diesem Grund ist es für in Deutschland ansässige Unternehmen zwingend erforderlich den Automatisierungsgrad auch zukünftig zu steigern, sofern sie ihre Marktpositionen verbessern wollen [190]. Darüber hinaus sind Ansätze zu schaffen, wie das immer umfangreichere Wissen, das zum effizienten Betrieb von Produktionsanlagen erforderlich ist, verwaltet werden kann. Dieser Punkt bekommt durch den sich in Deutschland vollziehenden demographischen Wandel besondere Bedeutung [1]. Durch das zunehmende Durchschnittsalter der Belegschaft besteht die Gefahr, dass in den nächsten Jahren sehr viel implizit vorhandenes Wissen erfahrener Fertigungsmitarbeiter verloren geht [4]. Diese Faktoren führen in Verbindung mit einem Rückgang des Arbeitskräftepotentials dazu, dass Wissen zukünftig nicht mehr von erfahrenen an unerfahrene Mitarbeiter weitergegeben werden kann, sondern in IT-Systeme zu integrieren ist.

Neben der Bedeutung für die gesamte industrielle Produktion stellt die Automatisierungstechnik schon für sich alleine einen wichtigen Wirtschaftsfaktor für Deutschland dar. So ist Deutschland mit einem Anteil von 14 % an der weltweiten Herstellung von Automatisierungstechnik - einem Markt mit 228 Milliarden Volumen in 2006 - beteiligt. Ein Großteil davon wird ins Ausland vertrieben, was Deutschland zum weltgrößten Exporteur von Automatisierungsprodukten macht. Im Zuge steigender Ressourcenkosten sowie strenger Umweltschutzgesetze sind zudem Maßnahmen erforderlich, welche die Ressourceneffizienz automatisierten Anlagen erhöhen. Im Sinne einer wirtschaftlichen Produktion in einem hochkompetitiven Wettbewerbsumfeld kommt auch der Reduktion von Fehler-, Energie- und Personalkosten eine gesteigerte Bedeutung zu. [112]

2.2 Betrieb und Kennzahlen automatisierter Produktionsanlagen

Wie im vorausgegangenen Abschnitt herausgestellt, ist die Automatisierung ein entscheidender Einflussfaktor, wenn es darum geht, die internationale Stellung des Standorts Deutschland zu stärken. Nur durch sie ist es möglich, Güter wirtschaftlich zu produzieren und dem herrschenden Kostendruck standzuhalten [207]. Im Vergleich zu Produktionsumgebungen mit manuellen Tätigkeiten zeigen automatisierte Produktionsanlagen ein charakteristisches Betriebsverhalten, welches im Folgenden analysiert wird [193]. Dazu werden im Vorfeld wichtige Begriffe und Kennzahlen definiert, bevor diese im Anschluss für eine Bewertung der Effizienz des Anlagenbetriebs zur Anwendung kommen. Der Bewertung automatisierter Anlagen anhand von Produktionskennzahlen kommt ein hoher Stellenwert zu, da sie die Basis für eine Anlagenoptimierung darstellt und somit Grundvoraussetzung für eine wirtschaftliche Produktion ist [31].

2.2.1 Begriffe zur Analyse des Betriebsverhaltens automatisierter Produktionsanlagen

Für eine strukturierte Analyse des Betriebsverhaltens automatisierter Produktionsanlagen sind zuerst in diesem Umfeld wichtige Begriffe zu definieren. Dies beinhaltet den Begriff der Zuverlässigkeit, des Fehlers, der Störung sowie des Ausfalls. Sie alle sind Gegenstand verschiedener Normen und Richtlinien. Im Folgenden wird für die Zuverlässigkeit die Definition gemäß DIN EN ISO 12100 sowie für die anderen drei Begriffe die Festlegung gemäß VDI/VDE-Norm 3542 verwendet. Letztere ist speziell für Maschinen respektive Automatisierungssysteme erstellt und trifft somit den Fokus der vorliegenden Arbeit:

- **Zuverlässigkeit:** Fähigkeit einer Maschine, eine geforderte Funktion unter festgelegten Bedingungen und für einen vorgegebenen Zeitraum zu erfüllen [124]
- **Fehler:** Nichterfüllung mindestens einer Anforderung an ein erforderliches Merkmal einer Betrachtungseinheit [165]
- **Störung:** Aussetzen der Ausführung einer geforderten Funktion einer Betrachtungseinheit [165]
- **Ausfall:** Beendigung der Ausführung einer geforderten Funktion einer Betrachtungseinheit [165]

Der Fehler ist in diesem Kontext ein Zustand, der durch die Ereignisse Störung oder Ausfall ausgelöst wird. Treten im für die Zuverlässigkeitsbetrachtung vorgegebenen Zeitraum Störungen oder Ausfälle auf, ist die Zuverlässigkeit nicht gegeben [124].

2.2.2 Kennzahlen zur Analyse des Betriebsverhaltens automatisierter Produktionsanlagen

In diesem Abschnitt wird auf wichtige Kennzahlen zur Bewertung des Betriebsverhaltens automatisierter Anlagen eingegangen. Ebenso wie bei der Festlegung der Begriffe zur Analyse des Betriebsverhaltens, existieren auch für die Kennzahlen vielfältige Richtlinien und Normen. Für die nachfolgende Definitionen werden deshalb wiederum bevorzugt Definitionen herangezogen, die ihren Fokus auf dem Betrieb von Maschinen und Anlagen haben und somit dem Kontext dieser Arbeit entsprechen.

Verfügbarkeit und Nutzungsgrad

Gemäß VDI-Norm 4004 gehören Verfügbarkeitskenngrößen zu den Zuverlässigkeitskenngrößen technischer Systeme bzw. Systemkomponenten. Das Verfügbarkeitsverhalten ist Resultat des Instandhaltungs- und Ausfallverhaltens technischer Systeme [161]. Die VDI-Norm 3423 definiert die Begriffe der Verfügbarkeit und des Nutzungsgrads von ausgewählten Betrachtungseinheiten. Hierbei kann es sich um Einzelmaschinen, Systemkomponenten oder um Fertigungssysteme handeln. Ausgangspunkt

der Berechnungen ist dabei die Belegungszeit, bei deren Festlegung im Betrachtungszeitraum anfallende nicht geplante sowie nicht belegte Zeiträume keine Berücksichtigung finden (vgl. Abbildung 1). Die Belegungszeit wird in verschiedene Zeitbereiche unterteilt, wobei sich Wartungszeiten auch in nicht belegte Zeiten ausdehnen können. [160]

Betrachtungszeitraum (z. B. Jahr, Monat, Schicht)				
Belegungszeit T_B			Nicht belegte Zeit (z. B. Auftragsmangel)	Nicht geplante Zeit (z. B. Sonn- und Feiertage)
Nutzungszeit T_N	Organisatorische Ausfallzeit T_O	Technische Ausfallzeit T_T	Wartungszeit T_W	

Abbildung 1: Zeitanteile beim Betrieb automatisierter Produktionsanlagen (in Anlehnung an [160])

Basierend auf diesen Zeitbereichen ergibt sich für die Belegungszeit unter der Voraussetzung, dass nur der Zeitanteil der Wartungszeit berücksichtigt wird, der die Belegungszeit beeinflusst [160]:

$$T_B = T_N + T_O + T_T + T_W \quad 2.1$$

mit	Belegungszeit	T_B
	Nutzungszeit	T_N
	Organisatorische Ausfallzeit	T_O
	Technische Ausfallzeit	T_T
	Wartungszeit	T_W

Unter Verwendung dieser Zeitbereiche ist der Gesamtnutzungsgrad festzulegen, der ein Maß für die Effektivität der Nutzung einer Betrachtungseinheit ist. Dabei wird die Nutzungszeit in Bezug zur Belegungszeit gesetzt. [160]

$$N_G = \frac{T_N}{T_B} = \left(1 - \frac{T_O + T_T + T_W}{T_B}\right) \times 100 \% \quad 2.2$$

mit	Gesamtnutzungsgrad	N_G
-----	--------------------	-------

Eine weitere wichtige Kennzahl, die auf Basis dieser Informationen definiert ist, stellt die technische Verfügbarkeit bzw. der technische Nutzungsgrad dar [160]:

$$V_T = N_T = \left(1 - \frac{T_T}{T_B}\right) \times 100 \% \quad 2.3$$

mit	Technische Verfügbarkeit	V_T
	Technischer Nutzungsgrad	N_T

Die technische Verfügbarkeit gibt den prozentualen Anteil der Belegungszeit an, in dem die Betrachtungseinheit ohne technischen Mangel für die Produktion zur Verfügung steht [160]. Sie ist von großer wirtschaftlicher Bedeutung, da sie üblicherweise bei Vereinbarungen über die Anlagenleistungsfähigkeit zwischen Herstellern und Betreibern zur Anwendung kommt [232].

Overall Equipment Effectiveness (OEE)

Eine weitere verbreitete Möglichkeit die Produktivität von automatisierten Produktionsanlagen zu bewerten, stellt die Overall Equipment Effectiveness bzw. Gesamtanlageneffektivität (GAFF) dar. In der Literatur findet keine einheitliche Verwendung dieses Begriffs statt und es ist darüber hinaus die Bezeichnung Overall Equipment Efficiency in Verwendung [31]. Im Vergleich zu den im vorausgegangenen Abschnitt vorgestellten Kenngrößen werden hier auch Leistungs- und Qualitätsverluste in die Betrachtung mit einbezogen. Sollen betriebsinterne Optimierungsziele auch in dieser Hinsicht bewertet werden, bietet sich die OEE-Kennzahl als sinnvolle Ergänzung an, da sie auch diese Verlustanteile beinhaltet [160]. Bei der Verwendung der OEE-Kennzahl ist allerdings zu beachten, dass diese nicht benchmarkfähig ist. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die neben den zeitbezogenen Größen zur Anwendung kommenden Qualitäts- und Leistungsgrade in hohem Maße produkt- und betriebsbezogen sind [52].

		Verfügbare Zeit (z. B. Jahr, Monat, Schicht)	
Verfügbarkeit	A	Mögliche Produktionszeit	
	B	Tatsächliche Produktionszeit	Verfügbarkeitsverluste
Leistung	C	Theoretische Ausbringung	
	D	Tatsächliche Ausbringung	Leistungsverluste
Qualität	E	Tatsächliche Ausbringung	
	F	Einwandfreie Produkte	Qualitätsverluste

Abbildung 2: Einflussfaktoren bei der Ermittlung der OEE-Kennzahl (in Anlehnung an [88][100])

Unter Verwendung der in Abbildung 2 dargestellten Strukturierung können drei für die Ermittlung der OEE wichtige Größen, der Verfügbarkeits-, Leistungs- und Qualitätsgrad, abgeleitet werden [88][100]:

$$\text{Verfügbarkeitsgrad} = V = \frac{B}{A} \times 100 \% \quad 2.4$$

$$\text{Leistungsgrad} = L = \frac{D}{C} \times 100 \% \quad 2.5$$

$$\text{Qualitätsgrad} = Q = \frac{F}{E} \times 100 \% \quad 2.6$$

Jede dieser Größen kann für sich alleine genommen bereits ein Indikator für Ineffizienzen in einem der Betrachtungsbereiche sein. So wird der Verfügbarkeitsgrad von Zeitverlusten durch Fehler und Wartezeiten negativ beeinflusst. In letztere Kategorie fallen dabei Verluste aufgrund von fehlendem Personal oder Material sowie Rüstzeit. Ein reduzierter Leistungsgrad deutet auf eine verringerte Geschwindigkeit der Anlage gegenüber dem Normzyklus, Leerlauf oder Kurzstillstände hin. Einbußen beim Qualitätsgrad sind ein Anzeichen für nicht beherrschte Prozesse, die Ausschuss und Nacharbeit zur Folge haben. Aus der Multiplikation dieser drei Größen wird dann die OEE berechnet, die in einer Kennzahl eine Aussage über die Produktivität der Anlage gibt. [88][100]

$$OEE = V \times L \times Q \quad 2.7$$

2.2.3 Abläufe bei der Fehlerbeseitigung an automatisierten Produktionsanlagen

Die Beseitigung auftretender Fehler an automatisierten Produktionsanlagen verursacht Zeitanteile, die die beiden zuvor definierten Kenngrößen der Verfügbarkeit und der OEE negativ beeinflussen (vgl. Abbildung 3). Die Zeitdauer der einzelnen Phasen ist dabei situationsabhängig starken Variationen unterworfen. So kann z. B. die Zeitdauer bis zur Fehlererkennung signifikant steigen, wenn kein Bediener an der Maschine anwesend ist und auch kein softwaregestütztes automatisches Meldewesen existiert. Die Zeitdauer bis zur Ursachenfindung hingegen ist abhängig von der Komplexität der betrachteten Anlage und davon, ob externe Spezialisten in den Prozess eingebunden werden müssen. Der Zeitanteil für die Maßnahmendurchführung zur Eliminierung des Fehlers wird letztlich stark davon beeinflusst, ob erforderliche Instandhaltungsmittel und Ersatzteile vor Ort verfügbar oder erst zu beschaffen sind. [41]

Abbildung 3 strukturiert ferner mit der TBF (Time Between Failure) und TTR (Time To Repair) zwei Zeitbereiche, welche für die Festlegung weiterer wichtiger Leistungskenngrößen relevant sind. Es ergeben sich hieraus die MTBF (Mean Time Between Failure) sowie die MTTR (Mean Time To Repair) zu [232]:

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} TBF_n}{n} = \frac{T_N}{n} \tag{2.8}$$

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} TTR_n}{n} = \frac{T_T}{n} \tag{2.9}$$

mit Anzahl der Fehler n
 Nutzungszeit T_N (vgl. Formel 2.1)
 Technische Ausfallzeit T_T (vgl. Formel 2.1)

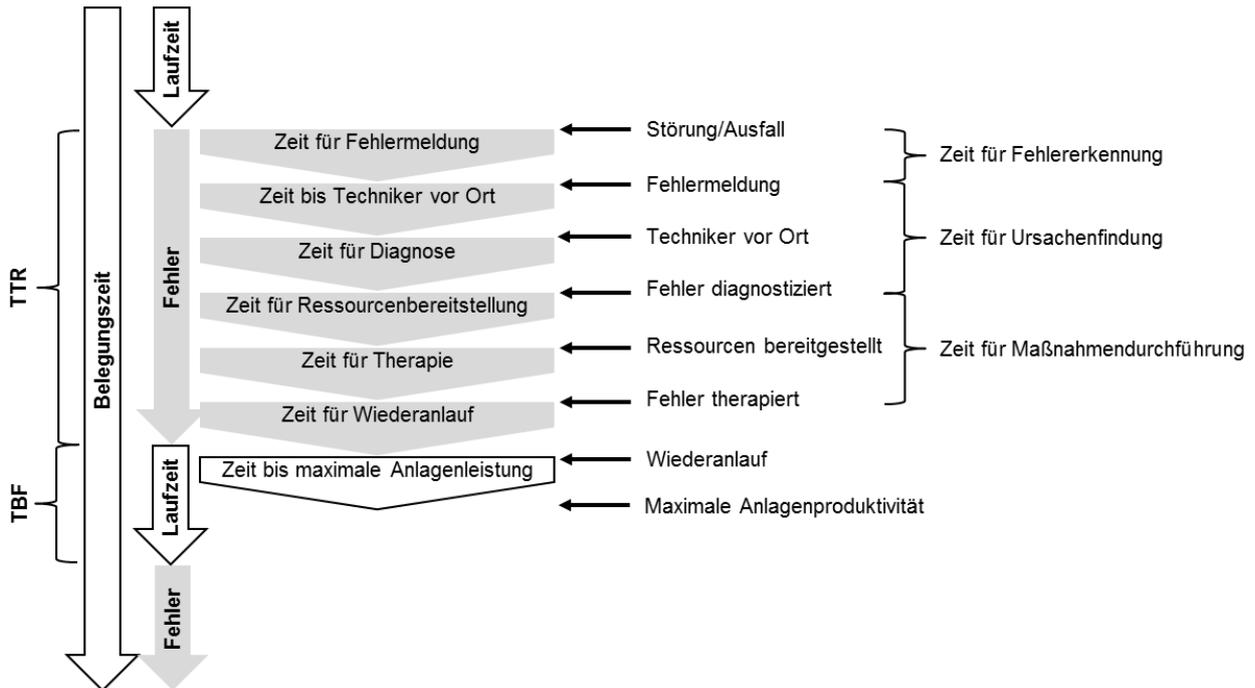


Abbildung 3: Zeitanteile bei einem typischen Workflow zur Beseitigung von Fehlern [6][41]

2.2.4 Betriebsverhalten automatisierter Produktionsanlagen

Die VDI-Norm 4008 definiert ein boolesches Modell zur Analyse der Funktionsfähigkeit von Systemen, das auch zur Analyse des Betriebsverhaltens einer automatisierten Produktionsanlage anwendbar ist [162]. Für die anschließende Betrachtung wird dazu folgende Modellierungsbeziehung in Anlehnung an [162] verwendet:

$$P(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t) \tag{2.10}$$

mit Zeitpunkt t
 Wahrscheinlichkeit der Funktionserfüllung des Gesamtsystems P
 Wahrscheinlichkeit der Funktionserfüllung der Komponente p
 Anzahl der Komponenten i

Unter den Voraussetzungen, dass Anlagen zunehmend komplexer werden und aus einer Vielzahl an - in der Regel nicht redundant vorhandenen - Komponenten bestehen (vgl. [45]), ist gemäß Formel 2.10 eine kritische Feststellung unmittelbar ablesbar. Die Wahrscheinlichkeit der Funktionserfüllung einer automatisierten Produktionsanlage ist stark von der Anzahl der enthaltenen Komponenten abhängig, auch wenn die Einzelkomponenten eine hohe Zuverlässigkeit aufweisen. Weiterführende Modellierungen für Anlagen, die vollständig oder in Teilen redundant aufgebaut sind, können [162] entnommen werden.

Über die Betrachtung einer automatisierten Produktionsanlage hinaus sind für Produktionsumgebungen auch Analysen relevant, welche die Auswirkungen von Fehlern auf ein Gesamtsystem, das aus mehreren Produktionsanlagen besteht, beschreiben. Hierbei sind die Art der Verkettung der einzelnen Anlagen und die sich daraus ergebenden Pufferkapazitäten von großer Bedeutung. Detaillierte Betrachtungen für die verschiedenen Szenarien der starren, losen und elastischen Verkettung erfolgen in [232], wobei vor allem das Szenario der elastischen Verkettung die höchste Praxisrelevanz besitzt. Hauptaussagen aus der Analyse dieses Falles sind:

- Eine geringere MTBF der Stationen bedingt eine Verringerung der technischen Verfügbarkeit des Gesamtsystems.
- Eine höhere MTTR der Stationen bedingt eine Verringerung der technischen Verfügbarkeit des Gesamtsystems.
- Eine höhere Anzahl an verketteten Stationen bewirkt eine Verringerung der technischen Verfügbarkeit des Gesamtsystems. [232]

2.2.5 Bewertung des Leistungsstands automatisierter Produktionsanlagen

Eine Umfrage im Bereich der Investitionsgüterindustrie führt zu dem Ergebnis, dass 85 % aller Maschinen und Anlagen keine technischen Verfügbarkeitswerte von größer als 95 % erreichen [62]. Eine Grenze von ca. 95-97 % gilt für die Verfügbarkeit als anzustrebender Wert, da bis dahin der Nutzen verfügbarkeitssteigernder Maßnahmen größer ist, als die damit verbundenen Kosten. Somit leisten diese Maßnahmen einen Beitrag zu minimalen Stückkosten und einer daraus resultierenden wirtschaftlich optimalen Produktion. [235] Insbesondere komplexe automatisierte Produktionsanlagen, die im Zuge steigender Ansprüche an Flexibilität und Qualität zunehmend an Bedeutung erlangen, sind von technischen Verfügbarkeitswerten von größer 95 % weit entfernt [230]. Sie erreichen durchschnittlich nur ca. 76 % [230].

Untersuchungen auf Basis der OEE-Kennzahl ergeben, dass die weltweit durchschnittlich erreichte Gesamtanlageneffektivität lediglich 60 % beträgt. Anzustreben sind bei dieser Kennzahl Verfügbarkeitswerte größer 90 %, Leistungsgrade über 95 % sowie Qualitätsraten von mehr als 99 %. Die konkreten Zielsetzungen können dabei in Ab-

hängigkeit von der jeweiligen Anlage und dem darauf laufenden Produkt unterschiedlich sein. Aus diesen Einzelwerten ergibt sich eine Zielgröße für die OEE von größer 85 %, was nur von in diesem Bereich führenden Unternehmen auch erreicht wird. [23]

Die Bewertung der Leistungsfähigkeit automatisierter Produktionsanlagen zeigt ein großes Optimierungspotential bezüglich der Verfügbarkeit und Gesamtanlageneffektivität auf. Dieses ist zwingend zu nutzen, da Ausfälle, Minderleistung und Qualitätsprobleme erhebliche wirtschaftliche Konsequenzen zur Folge haben (vgl. [210]). Besonders der Trend hin zum Einsatz immer komplexerer Produktionsanlagen, dem sich Unternehmen nicht entziehen können, verstärkt den diesbezüglichen Handlungsbedarf (vgl. Abschnitt 2.2.4) [45]. Die Konsequenz aus diesen Entwicklungen ist die Forderung nach Lösungsansätzen, die die Leistungsgrößen automatisierter Produktionsanlagen signifikant und wirtschaftlich verbessern können. Vor allem müssen diese Lösungen in der Lage sein, den Betrieb komplexer Anlagen effizient zu unterstützen, um im sich kontinuierlich intensivierenden Wettbewerbsumfeld konkurrenzfähig zu bleiben.

2.3 Strukturierung und Einordnung der technischen Diagnose

Aus den in dem vorausgegangenen Abschnitten aufgezeigten Spannungsumfeld (vgl. Abbildung 4) ergibt sich die Forderung nach einem Lösungsansatz, der in der Lage ist, die dargestellte Problematik aufzulösen. Mit der technischen Diagnose steht ein entsprechender Ansatz zur Verfügung.

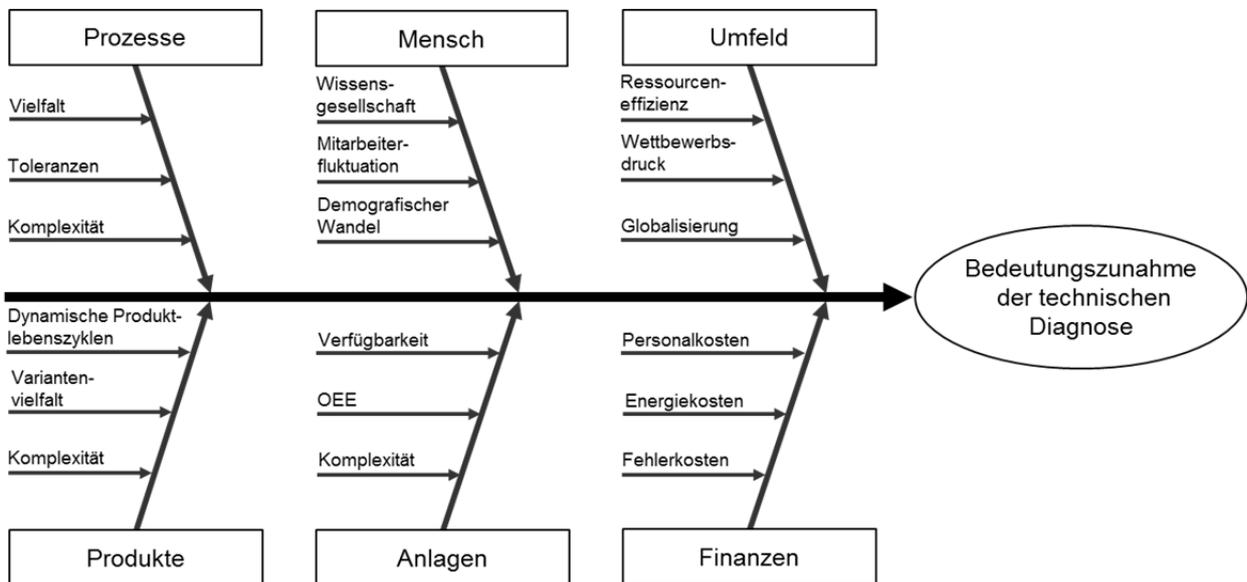


Abbildung 4: Spannungsfeld der Produktionsumgebung mit technischer Diagnose als Lösungsstrategie

Unter der technischen Diagnose werden Lösungsansätze mit folgender Zielsetzung verstanden:

- Erhöhung von Anlagenleistungskenngrößen
- Sicherstellung der Produktqualität
- Gewährleistung von Anlagensicherheit und Umweltschutz [224][229]

Diese Ziele prädestinieren die technische Diagnose dazu, neben der Gewährleistung einer hohen Anlagenproduktivität auch für einen sicheren sowie energie- und ressourceneffizienten Anlagenbetrieb zu sorgen. Insbesondere der letzte Punkt ist in den letzten Jahren verstärkt in den Fokus produzierender Unternehmen gerückt [1]. Um die zuvor festgelegte Zielsetzung vollständig erreichen zu können, ist weiterhin die Kombination der folgenden sich ergänzenden Diagnoseebenen erforderlich [224]:

- **Systemdiagnose:** Fokus auf Fertigungsanlagen
- **Prozessdiagnose:** Fokus auf Fertigungsprozesse
- **Produktdiagnose:** Fokus auf Produkte

2.3.1 Phasenmodell der technischen Diagnose

Für den Begriff der technischen Diagnose existieren in der Fachliteratur vielfältige, sich zum Teil ähnelnde, aber auch sich deutlich unterscheidende Definitionen (vgl. [6][18][24][36][45][51][56][58][224][229]). Der Begriff entstammt dem Bereich der medizinischen Diagnostik und hat im Zuge komplexerer Maschinen und Anlagen auch im Produktionsumfeld Einzug gehalten [184]. Der Prozess der technischen Diagnose wird dabei üblicherweise in zwei bis vier Phasen eingeteilt (vgl. [36][58][224]).

Für die vorliegende Arbeit wird die technische Diagnose gemäß Abbildung 5 strukturiert. Dabei erfolgt eine Unterteilung in drei Haupt- und zwei Nebenphasen. Ausgangspunkt der technischen Diagnose ist die Überwachungsphase. Deren Aufgabe ist, durch Analyse erfasster Daten, Fehler zu erkennen und diese zu melden. Ihr schließt sich die Diagnosephase an, die aufbauend auf der durch die Überwachung bereitgestellten Datenbasis, Merkmale generiert. Diese werden dann zur Ursachenfindung eines Fehlers verwendet. Abschließend erfolgt die Therapiephase, in der ausgehend von der zuvor ermittelten Ursache eine geeignete Abhilfemaßnahme ermittelt und deren Durchführung unterstützt wird.

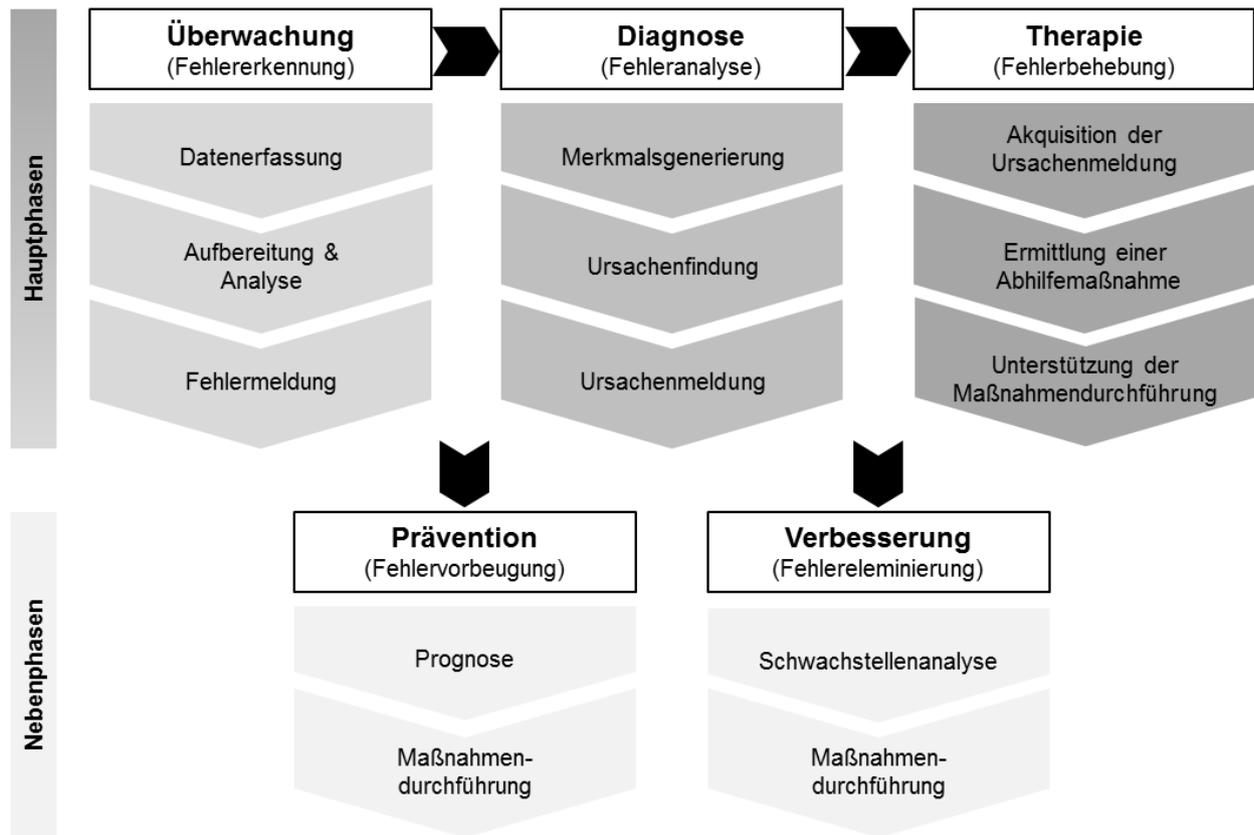


Abbildung 5: Phasenmodell der technischen Diagnose

Unter Verwendung der in den drei Hauptphasen der technischen Diagnose anfallenden Daten können weitere Aktivitäten zur Optimierung des Anlagenbetriebs erfolgen. Im Rahmen der Prävention wird die durch die Überwachung bereitgestellte Datenbasis verwendet und mit Prognoseverfahren wie der Trendanalyse oder der Signalvorhersage untersucht, um so sich anbahnende Fehler im Vorfeld zu detektieren und Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Dadurch sind Störungen und Ausfälle vermeidbar [36][45][58]. Die Verbesserung arbeitet auf statistischen Informationen aus der Diagnose- und Therapiephase. Hier erfolgen Analysen, welche Ausfälle die Leistungskenngrößen einer Produktionsanlage am signifikantesten negativ beeinflussen. Für diese Ereignisse werden dann z. B. durch Anlagen- oder Prozessanpassungen Abhilfemaßnahmen erarbeitet, die den Fehler dauerhaft aus dem System eliminieren [36].

2.3.2 Klassifikation von Softwaresystemen der technischen Diagnose

Prinzipiell sind die zuvor definierten Phasen der technischen Diagnose vollständig manuell und damit ohne Softwareunterstützung durchführbar. Ein derartiges Vorgehen ist allerdings bei den heutzutage Anwendung findenden komplexen, automatisierten Produktionsanlagen nicht wirtschaftlich [207]. Deshalb werden einige oder auch alle Phasen der technischen Diagnose durch Softwarelösungen unterstützt [93]. Diese Systeme werden entsprechend ihres Funktionsumfangs in Anlehnung an die Phase, die sie

unterstützen, als Überwachungs-, Diagnose- oder Therapiesysteme bezeichnet [51]. Es existieren sowohl Softwarelösungen, die sich auf die Unterstützung einer Phase spezialisieren, als auch welche, die alle drei Hauptphasen sowie ggf. Nebenphasen des technischen Diagnoseprozesses unterstützen [45][92]. Dabei sind folgende Kombinationen üblich:

- Überwachung
- Diagnose und Therapie
- Überwachung, Diagnose und Therapie

Eine Vielfalt an Systemen fokussiert allein auf die Überwachung der Produktionsanlagen, da derartige Systemlösungen auf die Erfassung, Speicherung und Anwendung von anwendungsfallabhängigem Wissen verzichten können. Dadurch verursachen sie einen deutlich geringeren Entwicklungs- und Pflegeaufwand als Diagnosesysteme. Daneben existieren Systeme, welche die Durchführung von Diagnose und Therapie unterstützen und auf umfassenden anwendungsfallspezifischem Wissen aufsetzen [93]. Ansätze, die eine Diagnoseunterstützung ohne dabei Therapiefunktionen zu bieten, weisen einen geringen Nutzeffekt auf und sind deshalb nicht verbreitet [56]. Ebenso sind Systeme, die Hilfestellung bei der Therapie geben, ohne dabei die Diagnose abzudecken, nicht zielführend. Da der Zeitaufwand für die Diagnose oftmals mehr als das Zehnfache der Zeit für die Therapie beträgt, bieten derartige Systeme alleine keine ausreichende Unterstützung für einen wirtschaftlich optimalen Anlagenbetrieb [186]. In diesem Zusammenhang bieten Systeme, die die Überwachungsphase der technischen Diagnose umsetzen, die Möglichkeit, die jeweilige Systemlösung ebenfalls zur Prävention einzusetzen. In analoger Weise können Diagnose- und Therapiesysteme die Nebenphase der Verbesserung realisieren.

2.3.3 Technische Diagnose und Instandhaltung

Gemäß DIN 31051 umfasst die Instandhaltung

„die Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Betrachtungseinheit zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes oder der Rückführung in diesen, sodass sie die geforderte Funktion erfüllen kann“ [123].

Sie gliedert sich in vier Phasen, die aufgrund einer gleichgerichteten Zielsetzung, eine hohe Ähnlichkeit mit den Phasen der technischen Diagnose aufweisen (vgl. Tabelle 2). Die Inspektion beinhaltet Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Istzustandes einer Betrachtungseinheit sowie zur Bestimmung von Ursachen für eine Abnutzung. Der erste Teil dieser Definition kann durch die Verwendung von Daten aus der Überwachung unterstützt werden, während der zweite Aufgabenbereich durch die Diagnose

ausgeführt wird. Aufgabe der Instandsetzung ist es, Betrachtungseinheiten in einen funktionsfähigen Zustand zurückzuführen. Hier ergibt sich eine inhaltliche Überschneidung mit der Therapie. Auch die Nebenphasen der technischen Diagnose erleichtern die Ausführung von Instandhaltungstätigkeiten. Die Prävention ist der Wartung zuordenbar, da Maßnahmen vor dem Ausfall von Komponenten vorgenommen werden. Die Verbesserung schließlich hat, ebenso wie ihr Gegenpart aus der technischen Diagnose, das Ziel, Anlagen dauerhaft zu optimieren. [123]

Tabelle 2: Phasen der technischen Diagnose und ihr Beitrag zur Unterstützung der Instandhaltung

Phasen der technischen Diagnose	Instandhaltungsphasen			
	Inspektion	Instandhaltung	Wartung	Verbesserung
Überwachung	✓			
Diagnose	✓			
Therapie		✓		
Prävention			✓	
Verbesserung				✓

Neben den vorgestellten Überlappungen bei der Zielsetzung zwischen den beiden Herangehensweisen existieren auch Unterschiede. So liegt der Schwerpunkt der technischen Diagnose namensgemäß auf den technischen Aspekten bei Überwachung, Diagnose und Therapie. Im Zentrum der Betrachtung stehen hier konkrete Maßnahmen der Datenerfassung und -analyse sowie Herangehensweisen zur Identifikation von Fehlerursachen und deren Beseitigung. Bei der Instandhaltung hingegen steht nicht die technische Durchführung der jeweiligen Tätigkeiten im Fokus, sondern deren organisatorische Eingliederung in den Produktionsbetrieb. Die einzelnen Tätigkeiten werden als Auftrag strukturiert, der üblicherweise bei der Produktionsplanung und -steuerung eingelastet wird. Darüber hinaus werden Personal, Material und Werkzeuge zur Durchführung der Tätigkeiten eingeplant. [123] Der im konkreten Anwendungsfall zu planende Bedarf an Zeit, Personal, Material und Werkzeugen, kann auf Basis der, im Rahmen der Therapie, Prävention oder Verbesserung, ausgewählten Maßnahme bestimmt werden.

2.4 Stand der Technik bei der Überwachung

Entsprechend der in Abschnitt 2.3.2 eingeführten Klassifikation von Systemen der technischen Diagnose mit individuellen Anforderungen an die jeweiligen Systemlösungen wird in diesem Abschnitt auf Überwachungssysteme fokussiert. Diese haben für eine effiziente Produktion eine erhebliche Bedeutung, da die Erfassung, Auswertung und Anzeige von im Rahmen der Produktion anfallender Daten sowohl für die Steigerung der Verfügbarkeit als auch für eine Erhöhung der OEE als wichtigste Voraussetzung gesehen wird [22][205]. Vor diesem Hintergrund wird im Folgenden zunächst ein Über-

blick über die Struktur dieser Daten sowie den daraus ableitbaren technischen und organisatorischen Kennzahlen gegeben. Im Anschluss werden dann Überwachungssysteme hinsichtlich ihres Stands der Technik sowie dem sich daraus ergebenden Handlungsbedarf analysiert. Systeme der Diagnose und Therapie werden in Abschnitt 2.5 separat analysiert.

2.4.1 Betriebsdatenerfassung (BDE) und daraus ableitbare Kennzahlen

Die Summe aller Daten, die während des Produktionsprozesses anfallen, wird als Betriebsdaten bezeichnet. Sie werden in Form der folgenden Kategorien strukturiert [30][76]:

- **Auftragsdaten:** Start- und Endtermine von Arbeitsgängen, differenzierte Zeitkomponenten (Liege-, Transport-, Bearbeitungs-, Kontroll-, Unterbrechungszeiten), Bearbeitungszustände, Stückzahlen (Gut, Ausschuss), Personaleinsatz (Mitarbeiter, Qualifikation), Materialeinsatz (Art, Menge)
- **Personaldaten:** An- und Abwesenheitszeiten, Tätigkeitsart (Rüsten, Bearbeiten, Warten), zeitliche Zuordnung von Personal, Betriebsmittel und Auftrag
- **Lager- und Materialdaten:** Bestand und Bestandsveränderungen von Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen sowie Werkstoffen und Werkstücken
- **Betriebsmitteldaten:** Informationen über Nutzungs- und Ausfallzeiten, Taktzeiten, Fehler und deren Ursachen, Stückzahlen
- **Fertigungshilfsmitteldaten:** Daten über Werkzeuge, Vorrichtungen, Maschinenprogramme etc. (Ort und Zeit des Einsatzes, Zustand, Fehler und deren Ursachen)
- **Prozessdaten:** Fehler und deren Ursachen, Zeiten, Temperaturen, Kräfte, Spannungen etc., die während des Prozesses auftreten
- **Qualitätsdaten:** Prüfwerte, Ausschussgründe sowie Prozessdaten, die für Qualitätsanalysen herangezogen werden

Diese Aufstellung umfasst zum einen Daten wie Auftrags- oder Personaldaten, die einen organisatorischen Bezug haben und deshalb speziell für die Produktionsplanung und -steuerung relevant sind. Zum anderen beinhalten Betriebsdaten auch Informationen wie Betriebsmittel- oder Prozessdaten, die technisch orientiert sind und somit vor allem für die Weiterverarbeitung im Rahmen der technischen Diagnose von Interesse sind. Bei der im Anschluss erfolgenden Betrachtung von Softwaresystemen zur Überwachung wird deshalb auf diese Teilmenge der Betriebsdaten fokussiert.

Die Sammlung von Betriebsdaten wird als Betriebsdatenerfassung bezeichnet. Hierunter werden alle Maßnahmen verstanden, die erforderlich sind, um diese Daten in ma-

schinell verarbeitbarer Form am Ort ihrer Weiterverwendung bereitzustellen [198]. Die Betriebsdatenerfassung kann dabei auf verschiedene Arten erfolgen (vgl. Abbildung 6).

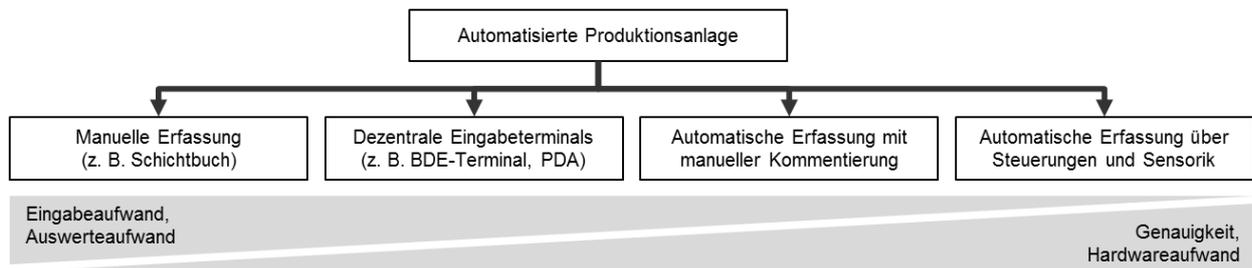


Abbildung 6: Varianten der Betriebsdatenerfassung an automatisierten Produktionsanlagen (in Anlehnung an [67])

Die automatisierte Erfassung von Daten aus Steuerungen oder Sensoren an Produktionsanlagen wird dabei als Maschinendatenerfassung bezeichnet [76]. Weiterhin ist zu beachten, dass die Variante der manuellen Erfassung (vgl. Abbildung 6) nur dann der BDE zuzuordnen ist, wenn sich eine Übertragung der manuell dokumentierten Daten in ein EDV-System anschließt. Andernfalls liegt hier eine Variante der Datenerfassung vor, bei der vollständig auf eine rechnergestützte Weiterverarbeitung der Informationen verzichtet wird und somit dem Konzept des maschinennahen Produktivitätsmonitorings folgt. Hierbei werden die Daten durchgängig von Hand an Stellwänden im Fertigungsumfeld eingetragen, ausgewertet und visualisiert [225]. Mit zunehmendem Automatisierungsgrad der Datenerfassung steigt dabei die Qualität der vorliegenden Daten [232]. Insbesondere bei komplexen Produktionsanlagen mit einer hohen Anzahl an Datenquellen sind die Personalaufwände für eine hochqualitative Datenerfassung unter Einbeziehung manueller Tätigkeiten nicht wirtschaftlich darstellbar.

Im Anschluss an ihre Erfassung sind Betriebsdaten in Form von Kennzahlen zu aggregieren, um einen schnellen und aussagekräftigen Überblick über die Situation im Fertigungsumfeld gewinnen zu können. Dazu ist das Heranziehen von Kennzahlen für folgende technische und organisatorische Bereiche im Produktionsumfeld üblich [63][166]:

- **Anlage:** OEE, Verfügbarkeit, Nutzungsgrad, Rüstgrad
- **Prozess:** Effektivität, Durchsatz, First Pass Yield, Nacharbeitsquote
- **Produkt:** Qualitätsrate, Ausschussquote, Stückkosten
- **Personal:** Personalproduktivität, Personalauslastung
- **Auftragsdurchlaufzeit:** Durchlaufzeit, Prozessgrad, Beleggrad
- **Auftragsterminierung:** Termintreue, Auftragsrückstände, Lieferzeit
- **Umlaufbestände:** Beleggrad, Menge, Wert

- **Flexibilität:** Flexibilitätsgrad, Durchlaufzeit, Kapazitätsauslastung

In einem Wettbewerbsumfeld, welches zunehmend auf automatisierte Anlagen setzt, werden auch diese Kennzahlen immer wichtiger. Sie sind zur Optimierung von Produktivität und Qualität einer Fertigungsumgebung unabdingbar, da sie die Entscheidungsgrundlage für die Initialisierung und Bewertung von Verbesserungsmaßnahmen zur Realisierung einer wirtschaftlichen Produktion darstellen [111]. Ebenso wie die Betriebsdaten können auch die daraus abgeleiteten Kennzahlen in technisch bzw. organisatorisch orientierte Größen eingeteilt werden. Für die Überwachung im Rahmen der technischen Diagnose stehen wiederum die technischen Kenngrößen aus den Kategorien Anlage, Prozess und Produkt im Fokus.

2.4.2 Stand der Technik und Handlungsbedarf im Bereich der Überwachung von Produktionsanlagen

Die aktuelle Situation beim Einsatz von Überwachungssystemen ist von vielfältigen Defiziten gekennzeichnet. So geben gemäß [111] 58 % der befragten Unternehmen im Rahmen einer Untersuchung an, dass vorhandene Kennzahlen teilweise oder überwiegend veraltet sind. Auch die Ergebnisse der in [75] vorgestellten Studie bestätigen, dass Betriebsdaten aktuell oft nur schwer zugänglich und nicht transparent dargestellt sind. Gleichzeitig wird ihnen allerdings ein hohes Potential zur Optimierung der Überwachung zugewiesen. Als Haupthemmnisse werden in diesem Zusammenhang nicht standardisierte Datenformate und Schnittstellen genannt [228]. Dies führt zu einer Vielzahl an in der Produktion eingesetzten Insellösungen aus den Systemkategorien BDE, IPS, MES, Condition Monitoring oder SCADA, die im Umfeld der Erfassung und Auswertung von Betriebsdaten zur Anwendung kommen. Diese Systeme setzen jeweils auf einer eigenen proprietären Technologiebasis auf und verfügen daher nur über eine begrenzte Kompatibilität zueinander [102]. Konsequenz daraus ist im heterogenen automatisierten Produktionsumfeld mit diversen Anlagen der Parallelbetrieb mehrerer Systeme mit eigenen Datenerfassungs- und Visualisierungskomponenten, in die sich Anwender einarbeiten müssen. Verstärkt wird diese Zersplitterung zusätzlich durch alternative technologische Basen zur Visualisierung der erfassten Betriebsdaten innerhalb einer Systemlösung. Neben desktopbasierten und webbasierten Visualisierungsvarianten bieten diese Systeme mittlerweile auch oftmals die Option einer appbasierten Darstellung [35]. Dies erhöht die Systemkomplexität für Endanwender, da diese diverse GUIs beherrschen müssen, was wiederum in höheren Einarbeitungsaufwänden resultiert.

Erschwerend kommt hinzu, dass in den zuvor genannten Kategorien Systeme enthalten sind, die nicht ausschließlich auf die Unterstützung der Überwachung fokussieren. Vielmehr haben diese ihren Schwerpunkt auf der Produktionsplanung und -steuerung, der Traceability oder der organisatorischen Abwicklung der Instandhaltung. Aus diesem Grund tragen die Überwachungskomponenten dieser Systeme nicht allen Bedürfnissen der Anwender Rechnung und werden in der Regel kundenindividuell an die jeweiligen

Erfordernisse angepasst. Die Folge hieraus ist die bewusste Erzeugung von Insellösungen durch fallspezifische Adaption. Dies führt zu Systemen, die nicht auf eine permanente Weiterentwicklung ausgelegt sind und so mit dem sich verändernden Produktionsumfeld nur unter hohem Aufwand Schritt halten können. Tabelle 3 zeigt zusammenfassend charakteristische Merkmale des Status quo bei der Überwachung von Produktionsanlagen.

Tabelle 3: Status quo bei der Überwachung von Produktionsanlagen und sich daraus ergebende Forderungen an ein ideales Überwachungssystem

Status quo	Forderungen
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Proprietäre Datenformate ▪ Parallelbetrieb mehrerer Systeme ▪ Eingeschränkte Datenzugänglichkeit ▪ Endgerätspezifische Datenvisualisierung ▪ Kundenindividuelle Insellösungen ▪ Hohe Einarbeitungsaufwände ▪ Kostenintensive Systempflege 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nutzung offener Datenformate ▪ Universelle Systemlösung ▪ Ubiquität im Datenzugriff ▪ Transparente Datenvisualisierung ▪ Flexibel parametrierbare Systeme ▪ Benutzerfreundliche Anwenderoberflächen ▪ Wiederverwendbare Systemmodule

Zudem werden in Tabelle 3 Forderungen an anpassungsfähige Überwachungslösungen aufgestellt, die flexibel einsetzbare und leistungsstarke Systeme im heutigen Produktionsumfeld zu erfüllen haben. Zur Beseitigung der identifizierten Defizite des Status quo existieren in Forschung und Industrie vielfältige Ansätze, die jeweils eine Teilmenge der postulierten Forderungen adressieren. Innovative Systemlösungen in dieser Hinsicht werden im Folgenden kurz vorgestellt und analysiert.

Bewertung verfügbarer Systeme hinsichtlich der Erfüllung der Forderungen

Systeme zur Erfassung und Anzeige von Betriebsdaten sind wie zuvor angedeutet im industriellen Umfeld in vielfältiger Ausprägung bekannt. Dabei gibt es zum einen spezielle BDE-Systeme, die auf die Erfassung und Anzeige von Betriebsdaten fokussieren (vgl. z. B. [113]). Zum anderen existiert eine Vielzahl an Systemlösungen wie IPS- oder MES-Systeme, die üblicherweise über einen modularen Aufbau verfügen (vgl. z. B. [138]). Neben diversen Systemmodulen zur Qualitätssicherung, Werkzeugverwaltung, Instandhaltungsplanung oder Produktionsplanung weisen sie auch Komponenten zur BDE auf. Allen Systemen ist gemein, dass sie hinsichtlich der Datenerfassung auf eine Kombination der Methoden aus Abbildung 6 aufbauen. Diese ist in der Regel bezüglich der Soft- und Hardwaregestaltung kundenindividuell umgesetzt und somit wenig flexibel. Anpassungen an andere Fertigungsszenarien erfordern demnach Programmieraufwand. Hinsichtlich der Datenvisualisierung existieren unterschiedliche Ansätze. Wie erwähnt, setzen einige Systeme lediglich auf desktopbasierte GUIs um die Informationen anzuzeigen, was keinen ubiquitären Zugriff erlaubt. Allerdings sind auch Visualisierungslösungen auf Basis von Webtechnologien verbreitet. Ein positives Beispiel in die-

ser Hinsicht stellt z. B. das MES-System Legato dar, welches eine SVG-basierte Informationsdarstellung realisiert, die nativ im Browser nutzbar ist [138]. Allerdings ist hier einschränkend festzuhalten, dass Erstellung und Adaption der Visualisierung unter Verwendung von Editoren manuell zu erfolgen haben. Eine automatische Erzeugung der grafischen Darstellung auf Basis von Konfigurationsinformationen im Rahmen des Parametrieren statt Programmieren-Konzepts ist nicht vorhanden. Weiterhin ist festzuhalten, dass im industriellen Umfeld verfügbare Überwachungssysteme oftmals nur eine 2D-Visualisierung von Betriebsdaten bieten. Eine 3D-Visualisierung, die für Anwender eine deutlich höhere Aussagekraft bei der Situationsbewertung an komplexen Anlagen aufweist (vgl. Abschnitt 3.3.1), ist nicht verbreitet [37].

Die Defizite aus dem industriellen Anwendungsumfeld sind in der Forschung bekannt. Vor diesem Hintergrund entwickelt [103] ein adaptives Datenmodell zur Speicherung von Betriebsdaten beliebiger Prozesse, um einen Parallelbetrieb mehrerer Systeme zu vermeiden. Auf Basis von Metainformationen kann aus einem Anlagenstrukturmodell das adaptive Datenmodell für einen Anwendungsfall konfiguriert werden, was zudem kundenindividuelle programmiertechnische Ergänzungen vermeidet. Während somit die Datenerfassung im Rahmen der Überwachung gut abgedeckt ist, weist diese Systemlösung hinsichtlich der Datenanalyse und -visualisierung erhebliche Defizite auf. Diese ist als Java-basierte Anwendung für Desktop-Systeme gestaltet [104]. Somit entfallen die typischen Vorteile eines webbasierten Systemansatzes, die sich in einer nicht erforderlichen Installation, einem jederzeit möglichen Systemzugriff sowie einer hohen Anzahl an verfügbaren offenen Standards zur Erstellung von Anwendungen mit hoher Kompatibilität äußern. Dadurch ist auch keine transparente Datenvisualisierung auf verschiedenen Endgeräten gegeben, die überall und jederzeit einen Zugriff auf aktuelle Informationen gewährleistet.

Weiterhin haben andere Forschungsansätze das Defizit industriell verfügbarer Systeme hinsichtlich des Fehlens leistungsfähiger 3D-Visualisierungsmöglichkeiten erkannt und zeigen in dieser Hinsicht Lösungswege auf. So stellt [45] ein System vor, das eine 3D-Visualisierungskomponente mit einem Datenerfassungssystem verbindet. Allerdings ist diese Visualisierung desktopbasiert und weist nicht die Vorzüge eines webbasierten Systemansatzes auf. Alternativ dazu werden auch webbasierte 3D-Visualisierungslösungen auf Basis von Java 3D oder VRML verfolgt (vgl. z. B. [194][223]). Diese Systeme bieten die Vorteile eines browserbasierten Zugriffs, erfordern allerdings die Nutzung eines Plug-Ins, was ihre Zugänglichkeit begrenzt.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass Ansätze existieren, die innovative Lösungen zur Beseitigung einer Teilmenge der bestehenden Defizite aktueller Überwachungssysteme aufzeigen. Allerdings ist keine Systemlösung bekannt, die die Defizite ganzheitlich betrachtet und eliminiert. Somit muss es das Ziel sein, eine Systemlösung zu konzipieren und umzusetzen, die die formulierten Anforderungen umfassend erfüllt.

Diese hat sowohl hinsichtlich der Datenerfassung als auch bezüglich der Datenvisualisierung die größtmögliche Flexibilität zu bieten. Die Entwicklung und Umsetzung eines derartigen Lösungsansatzes erfordert den kombinierten Einsatz mehrerer technologischer Befähiger, die im folgenden Abschnitt aufgezeigt werden.

2.4.3 Überblick über relevante technologische Befähiger aus dem IuK-Umfeld für die Überwachung

Parallel zu den Veränderungen im Produktionsumfeld war auch das Umfeld der IuK-Technologien - insbesondere im Webumfeld - in den letzten Jahren von einer hohen Innovationsgeschwindigkeit geprägt. Ergebnis dieser Entwicklungen ist eine Vielzahl an innovativen Technologien und Paradigmen, deren alleinige oder kombinierte Anwendung einen bedeutenden Beitrag zur Überwindung bestehender Defizite von Systemlösungen der technischen Diagnose leisten kann. In diesem Zusammenhang relevante Ansätze werden im Folgenden aufgelistet und kurz vorgestellt. Eine detaillierte Erläuterung der jeweiligen Technologien und Paradigmen erfolgt in den Kapiteln der Arbeit, in denen diese appliziert werden:

- **Webtechnologien und -standards:** Erlauben die Entwicklung von webbasierten Systemen mit großem Funktionsumfang und benutzerfreundlichen System-schnittstellen. Sie können in folgende Kategorien eingeordnet werden:
 - **Clientseitige Technologien:** Flash, Silverlight, JavaScript, AJAX, WebGL, etc.
 - **Serverseitige Technologien:** PHP, Java Servlets, Active Server Pages etc.
 - **Kommunikationstechnologien:** HTTP, Webservices, SOAP etc.
 - **Dokumententechnologien:** HTML, XML, SVG, VRML, X3D etc. [19]
- **Mobiles Breitband-Internet:** EDGE, UMTS, HSDPA etc.
- **Verfügbarkeit von Smartphones und Tablets als mobile Endgeräte**
- **Parametrieren bzw. Konfigurieren statt Programmieren:** Hierunter wird das Anpassen vorhandener Softwarebausteine an ein jeweiliges Anwendungsszenario verstanden, ohne dass dabei Programmieraufwand entsteht [143].
- **Baukastensysteme:** Stellen modulartig individuelle Funktionen zur Verfügung, die anwendungsfallspezifisch kombinierbar sind.

2.4.4 Applikation technologischer Befähiger aus dem IuK-Umfeld bei der Überwachung

Um das in Abschnitt 2.4.2 gesetzte Ziel der Entwicklung einer Systemlösung zur Überwachung erreichen zu können, die umfassend und nachhaltig bestehende Defizite eliminiert, ist die kombinierte Applikation vielfältiger technologischer Befähiger erforderlich. Im Bereich der Datenerfassung ist auf offene Webstandards wie XML zurückzugreifen,

die eine generische und flexibel anpassbare Beschreibung von Datenstrukturen erlauben, um diverse Anwendungsszenarien abdecken zu können. Parallel dazu ist auch die Datenvisualisierung auf Basis offen standardisierter Webtechnologien wie SVG oder WebGL aufzubauen, um eine einfache Datenzugänglichkeit auf beliebigen Endgeräten zu ermöglichen. Insbesondere die Anwendung von Technologien, die auf zusätzlich zu installierenden Browsererweiterungen wie Plug-Ins aufbauen, ist im Sinne einer einfachen und schnellen Zugriffsmöglichkeit auf das aktuelle Betriebsgeschehen zu vermeiden. Ein webbasierter Systemansatz hat gegenüber einer desktopbasierten Systemrealisierung weiterhin den Vorteil, dass derartige Systeme durch die zunehmende Verfügbarkeit eines breitbandigen Internetzugriffs ortsungebunden unmittelbar nutzbar sind, was einen ubiquitären Systemzugriff sicherstellt. Innovationen im Bereich mobiler Endgeräte in Form leistungsstarker Smartphones und Tablets verbreitern die dazu bereitstehende Gerätebasis über konventionelle Laptops hinaus.

Die Entwicklung einer derartigen Systemlösung stellt somit sicher, dass Betriebsdaten universell erfassbar, analysierbar und visualisierbar sind. Somit ist der Parallelbetrieb mehrerer Systeme zukünftig vermeidbar. Dies erhöht auch die Benutzerfreundlichkeit, da Einarbeitungsaufwände in diverse Systemlösungen bzw. in die Benutzerführung einer Systemlösung unter verschiedenen Anwenderoberflächen auf unterschiedlichen Endgeräten entfallen. Zudem ist anzustreben, dass die Datenerfassung-, -analyse und -visualisierung mittels des Parametrieren statt Programmieren-Paradigmas an anwendungsfallsspezifische Erfordernisse anpassbar ist. In Verbindung mit einem modularen Aufbau ermöglicht dies die einfache und umfassende Wiederverwendung von Systemkomponenten. Dadurch sind starre kundenindividuelle Lösungen vermeidbar und es wird die Grundlage für eine breite Wiederverwendbarkeit von einzelnen Komponenten gelegt, was in kostengünstigen Systemlösungen resultiert.

Basierend auf dem Anwendungspotential der vorgestellten technologischen Befähiger erfolgt in Kapitel 3 die Konzeption und Umsetzung einer darauf basierenden ganzheitlichen Systemlösung. Die Funktionsweise der diversen Komponenten des Lösungsansatzes wird dabei jeweils anhand von Beispielanwendungen aufgezeigt. Diese adressieren alle Teilaspekte der Überwachung von der Datenerfassung, -aufbereitung, -analyse und -visualisierung bis hin zum Fehlermeldewesen.

2.5 Stand der Technik bei der Diagnose und Therapie

Gemäß der Klassifikation in Abschnitt 2.3.2 ist für Systeme der Diagnose und Therapie anwendungsfallsspezifisches Wissen von zentraler Bedeutung. Die eingangs aufgezeigte aktuelle Situation im Wettbewerbsumfeld von Fertigungsunternehmen hat erhebliche Auswirkungen auf die Phasen der Diagnose und der Therapie sowie das dabei relevante Wissen. Im Zuge zunehmend komplexer strukturierter, mechatronischer Produktionsanlagen und gleichzeitig wachsender Arbeitsteilung kommt der effizienten Wissensverarbeitung im Fehlerfall eine gesteigerte Bedeutung zu [186]. Zudem ist in einem

heterogenen Produktionsumfeld mit hoher Variantenvielfalt und kurzen Produktlebenszyklen kontinuierlich mehr Anlagen- und Prozess-Know-how zu beherrschen, um für einen effizienten Produktionsbetrieb zu sorgen. Diese Bedeutungszunahme des Faktors Wissen in Verbindung mit einer erhöhten Mitarbeiterfluktuation erfordert Ansätze, um Wissen langfristig und unabhängig von Individuen im Unternehmen zu bewahren [74].

In den letzten Jahrzehnten wurden zur Lösung dieser Problematik überwiegend wissensbasierte Systemlösungen eingesetzt. Hierunter werden Systeme der künstlichen Intelligenz verstanden, die das Ziel verfolgen, die mentalen Fähigkeiten und Gedankenprozesse eines Menschen in Software nachzubilden, um menschenähnliche Handlungsweisen zu erzeugen [85]. Für den Bereich der technischen Diagnose sind vor allem die beiden Kategorien der Experten- sowie der Agentensysteme relevant, da sie typische Diagnosevorgänge umfassend unterstützen bzw. übernehmen können [93]. Beiden Systemklassen ist gemein, dass ihre Anwendungspotentiale seit Jahrzehnten bekannt sind und vielfältige Applikationen im Produktionsumfeld existieren [5][127]. Dennoch erfährt keiner der beiden Ansätze eine nachhaltige und durchdringende Anwendung in diesem Umfeld. Im Folgenden wird zum einen der grundlegende Aufbau der beiden Systemkategorien Expertensystem und Agentensystem vorgestellt. Zum anderen wird ihr jeweiliger Stand der Technik analysiert und Defizite, die ihrem Einsatz im Umfeld der Produktionstechnik entgegenstehen, identifiziert. Im Anschluss werden technologische Befähiger aus dem IuK-Umfeld ermittelt und aufgezeigt, wie diese zur Beseitigung der festgestellten Limitationen einsetzbar sind.

2.5.1 Grundlegender Aufbau und Arbeitsweise von Expertensystemen

Um die Schlussfolgerungsfähigkeiten eines menschlichen Experten in Software nachzubilden, setzen Expertensysteme auf der in Abbildung 7 dargestellten grundlegenden Architektur auf. Dabei übernehmen die Systemkomponenten die folgenden Funktionen:

- **Wissensbasis:** Enthält das Fachwissen in einer Form der Wissensrepräsentation. Dies umfasst Produktionsregeln, Entscheidungsbäume, semantische Netze bzw. Ontologien, neuronale Netze oder Fallbasen.
- **Wissensakquisitionskomponente:** Bietet Funktionen zur Eingabe, Änderung und Erweiterung des Fachwissens in der Wissensbasis.
- **Inferenzmechanismus:** Schlussfolgerungskomponente, die im Ableitungsprozess Benutzereingaben mit Informationen aus der Wissensbasis verknüpft, um eine Problemlösung zu erarbeiten.
- **Erklärungskomponente:** Erläutert dem Anwender die Vorgehensweise bei der Lösungsfindung und macht dadurch den Prozessablauf transparent und nachvollziehbar.

- **Fallspezifische Datenbasis:** Speichert temporär Arbeitsinformationen aus der Wissensbasis, vom Benutzer eingegebene Daten und Zwischenzustände, die für eine aktuelle Problemlösung herangezogen werden.
- **Benutzerschnittstellen:** Angepasste Systemschnittstellen für unterschiedliche Nutzerkreise:
 - Anwenderschnittstelle für benutzerfreundliche Systemnutzung im operativen Betrieb.
 - Expertenschnittstelle zur Bearbeitung der Wissensbasis durch Fachexperten. [15][159]

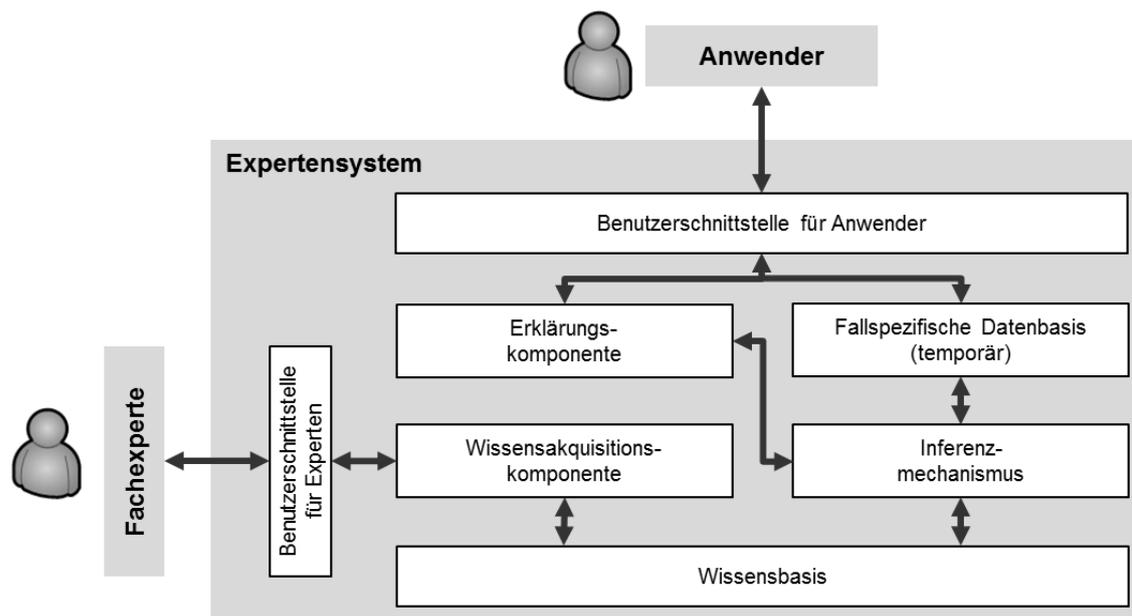


Abbildung 7: Grundlegende Systemarchitektur eines Expertensystems (in Anlehnung an[15][159])

Expertensysteme sind typische Vertreter wissensbasierter Systeme. Diese Systemklasse zeichnet sich dadurch aus, dass die Darstellung des Wissens von der Verarbeitung des Wissens strukturell getrennt ist (vgl. Abbildung 7) [15]. Im Zusammenspiel der Komponenten Wissensbasis und Inferenzmechanismus wird die Handlungsweise des Fachexperten nachgebildet. Das System verfügt über seine Wissensbasis wie Fachexperten über Regeln, Erfahrungswerte, theoretisches Wissen aus Literaturquellen sowie strategisches Wissen. Letzteres beschreibt, wann und wie die Wissens Elemente anzuwenden sind. Ausgehend von diesem Wissen erstellt das Expertensystem in Anlehnung an die Herangehensweise eines menschlichen Fachexperten bei der Analyse von Fehlersituationen Hypothesen. Für diese wird im Anschluss eine Untersuchungsreihenfolge festgelegt. Zu deren Evaluation werden fehlende Daten aus externen Quellen vom Benutzer angefordert. Dieser Schritt ist verbunden mit einer Erklärung, warum die Fragestellung erfolgt. Die so erhaltenen Zusatzinformationen werden sukzessive mit gespeichert.

cherten Informationen verknüpft und interpretiert. Am Ende des Prozesses werden Lösungsvorschläge ausgegeben und begründet, wie diese zustande gekommen sind. [159]

2.5.2 Stand der Technik und Handlungsbedarf im Bereich der Expertensysteme für produktionstechnische Anwendungen

Das erste Anwendungsgebiet für Expertensysteme war die Medizin. Dort existieren Applikationen bereits seit den 70er Jahren [85]. Aber auch in anderen Disziplinen, insbesondere auch für den Bereich der Produktionstechnik, sind seit Jahrzehnten zahlreiche Umsetzungsbeispiele und Anwendungsempfehlungen bekannt [45][127] [159][184]. Auffällig bei diesen Systemlösungen ist, dass es sich in der Regel um spezielle Entwicklungen zur Lösung eines spezifischen Fachproblems handelt (vgl. z. B. [6][45][51]). Konsequenz dieses Vorgehens ist, dass hohe Entwicklungsaufwände sowohl für die Hard- und Software als auch für den Aufbau und die Pflege der Wissensbasis anfallen [159]. Daneben besteht ein erhebliches Defizit im Bereich benutzerfreundlicher System-schnittstellen. Diese stehen seit Langem im Fokus von Expertensystementwicklern. So zeigt eine Fallstudie zur Ermittlung der aufgewandten Ressourcen zur Entwicklung der verschiedenen Systemkomponenten aus dem Jahre 1983, dass 42 % der Aufwände auf die Gestaltung der Benutzerschnittstellen entfallen. Danach folgt mit deutlichem Abstand die Gestaltung der Wissensbasis mit 22 %. Auf die übrigen Komponenten entfallen zusammen lediglich 36 % [211]. Somit ist deutlich sichtbar, dass die Forderung nach leistungsfähigen Benutzerschnittstellen für komplexe Softwaresysteme schon lange bekannt ist. Eine Umfrage aus dem Jahr 2011 zur Signifikanzbewertung von Anforderungen an wissensbasierte Systeme belegt, dass die dargestellten Defizite jedoch bis heute bestehen [70]. Als wichtigste Forderung wird in [70] eine benutzerfreundliche Anwenderoberfläche identifiziert.

Die genannten Faktoren begründen die Tatsache, warum Expertensysteme trotz ihrer großen Leistungsfähigkeit bisher keinen flächendeckenden Einzug in produktionstechnische Anwendungsfelder gehalten haben. Zusammenfassend sind folgende Defizite bei Entwicklung und Anwendung von Expertensystemen zu überwinden:

- Hoher Aufwand zur Systementwicklung
- Hoher Aufwand zur Erstellung und Pflege der Wissensbasis
- Defizite bei Bedienbarkeit und Systemzugriff durch komplexe Bedieneroberflächen

Auch in neueren Ansätzen zum Aufbau von Diagnosesystemen für das Produktionsumfeld sind diese Defizite immer noch präsent. So verfolgen sowohl [45] beim Aufbau eines Expertensystems zur Unterstützung des Bestückungsprozesses in der Elektronikfertigung als auch [98] bei der Erstellung eines Expertensystems zur Diagnose von

CNC-Maschinen den Ansatz des vollständigen Aufbaus eines Expertensystems. Zudem findet bei beiden Ansätzen die Sammlung von Wissen zur Gestaltung der Wissensbasis begleitend zur bzw. nach der Systementwicklung statt, was einen hohen Ressourcenaufwand zur Konsequenz hat. Bezüglich der Auslegung der Benutzerschnittstellen setzt [98] auf einem desktopbasierten Ansatz auf, der somit die gleichen Restriktionen aufweist, wie sie auch bei Überwachungssystemen (vgl. Abschnitt 2.4.2) festgestellt wurden. Ein ortsungebundener, schneller Systemzugriff ist somit nicht gewährleistet. [45] adressiert dieses Defizit durch die Entwicklung einer webbasierten Anwenderoberfläche auf Basis von Java-Applets. Allerdings erfordert die Nutzung dieser Technologie die Installation von Plug-Ins, was die unmittelbare Nutzbarkeit einschränkt. Somit wird sichtbar, dass Expertensystemen bis heute wichtige Eigenschaften fehlen, um die seitens der Anwender gestellten Anforderungen umfassend zu erfüllen. Vor diesem Hintergrund wird im weiteren Verlauf dieses Kapitels ein Lösungsweg aufgezeigt, der unter Verwendung neuer technologischer Befähiger aus dem Webumfeld die bestehenden Defizite eliminiert.

2.5.3 Grundlagen agentenbasierter Systeme

Im Softwarebereich existieren Architekturen, die aus einer Vielzahl an dynamisch interagierenden Objekten bestehen. Die Objekte sind wiederum alle mit einem eigenen Kontrollfluss versehen und kommunizieren über koordinierte Protokolle untereinander, woraus sich eine hohe Systemkomplexität ergibt. Die Beherrschung derartiger Architekturen durch Komplexitätsreduktion ist jedoch von immenser Wichtigkeit, da sich die meisten realen Anwendungsfälle durch genau diese Merkmale auszeichnen. Aus diesem Grund hat sich das Gebiet der Informatik in den letzten Jahrzehnten intensiv mit der Modellierung und Implementierung von Systemen beschäftigt, in denen die Interaktion von zentraler Bedeutung ist. Agentenbasierte Systeme sind das Ergebnis dieser Aktivitäten und stehen als Softwareentwurfsmuster für derartige Anwendungsfälle bereit. [234]

Agentenbegriff

Im Laufe der Entwicklung von Softwareagenten erfolgte eine Vielzahl unterschiedlicher Definitionsversuche (vgl. [44]). Eine sehr kompakt formulierte Weiterentwicklung verschiedener Definitionen erfolgt in [234]. Dort wird ein Agent als ein Computersystem definiert, das in einer Umgebung angesiedelt ist, innerhalb derer es autonom Aktionen ausführen kann, um vorgegebene Ziele zu erreichen. In Ergänzung zu dieser Definition wird auch der Ansatz verfolgt, Agenten über eine Menge klassifizierender Eigenschaften zu beschreiben [44]. Diese umfasst folgende Merkmale:

- **Reaktiv:** Ein Agent reagiert in angemessener Zeit auf Veränderungen in seiner Umwelt. Die Umwelt kann in diesem Zusammenhang sowohl eine softwaretechnische oder eine natürliche Umwelt sein.

- **Autonom:** Der Agent hat Kontrolle über seine eigenen Aktionen.
- **Zielorientiert:** Die Aktivitäten des Agenten sind auf die Erfüllung eines Ziels hin ausgerichtet. Der Weg zur Zielerreichung wird dabei vom Agenten im Laufe seiner Aktivität kontinuierlich neu evaluiert und ist nicht fest vorgegeben.
- **Kontinuierlich:** Agenten laufen in einem kontinuierlich aktiven Prozess ab, der potentiell unendlich lange aktiv sein kann.
- **Kommunikativ:** Ein Agent nimmt Kontakt mit anderen Agenten oder auch Personen auf, mit denen er im Rahmen der Aufgabenerfüllung interagiert.
- **Lernend:** Ein Agent kann sein zukünftiges Verhalten basierend auf vorausgehenden Erfahrungen anpassen.
- **Mobil:** Ein Agent kann sich von einem Ort zu einem anderen bewegen. Im Falle von Softwareagenten erfolgt dies via eines Netzwerks als Medium.
- **Flexibel:** Das Agentenverhalten beruht nicht auf geskripteten Aktionen.
- **Persönlich:** Agenten, die mit Menschen interagieren, sollen Persönlichkeit und Emotionalität vermitteln. [44][77]

Die ersten vier Merkmale beinhalten den Kern agentenbasierten Verhaltens, wie es auch in der eingangs aufgeführten Definition zum Ausdruck kommt. Das Hinzufügen weitere Eigenschaften aus der vorausgegangenen Aufstellung führt zu potentiell leistungsfähigeren Agenten. [44]

Architektur eines Agenten

Abbildung 8 zeigt den grundlegenden internen Aufbau eines Agenten. Über Sensorik und Effektoren, die jeweils in Form von Hardware oder Software ausgeführt sein können, werden Informationen aus der Umwelt registriert bzw. Aktionen in dieser angestoßen. Eingehende Informationen werden empfangen, aufbereitet und der Entscheidungsfindung zugeführt. Dort wird unter Rückgriff auf eine Wissensbasis sowie unter Berücksichtigung von Zielen, die den Auftrag eines Agenten repräsentieren, entschieden, ob und wie der Agent auf Änderungen in seiner Umgebung reagieren muss. Anzustößende Eingriffe sind im nächsten Schritt von einem Planungsmodul in konkrete auszuführende Aktionen umzusetzen. Diese werden im Anschluss durch die Aufgabebearbeitung unter Verwendung der Effektoren ausgelöst. [39][77][234]

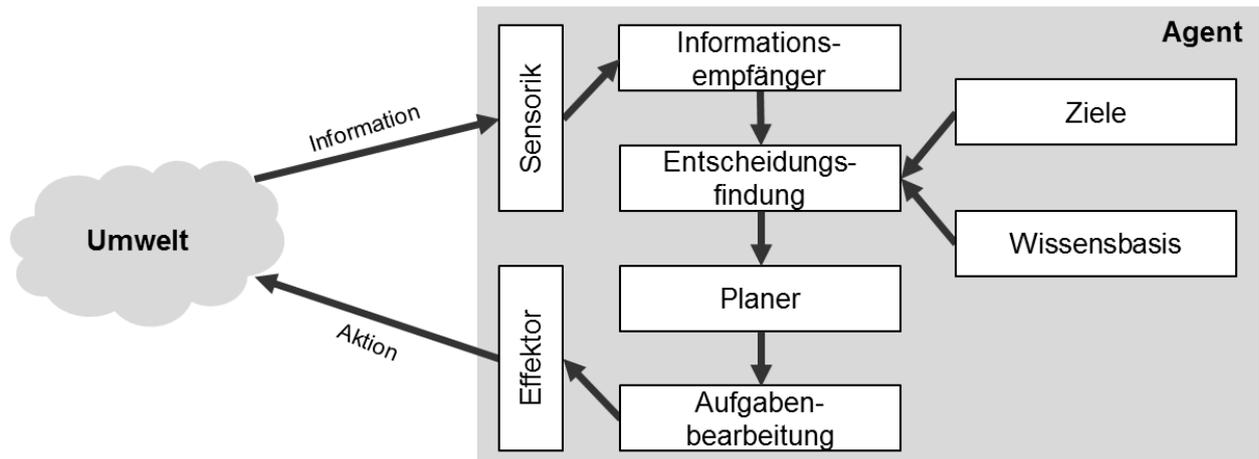


Abbildung 8: Interner Aufbau eines Agenten (in Anlehnung an [39][77][234])

Multiagentensysteme (MAS)

Ein Multiagentensystem enthält mehrere Agenten, die miteinander kommunizieren und mit ihrer Umgebung interagieren, um gemeinsam eine oder mehrere Aufgabenstellungen zu erfüllen. Dabei haben die Agenten individuelle Einflussphären, die nicht frei von Überlappungen sein müssen. Dadurch entstehen Abhängigkeiten zwischen den Agenten [234]. Charakteristische Eigenschaften eines MAS sind:

- Jeder Agent hat unvollständige Informationen oder Fähigkeiten, um eine Aufgabenstellung alleine zu lösen.
- Es gibt keine globale Kontrollinstanz, die dafür sorgt, dass sich individuelle Agenten im Sinne des Systems verhalten (vgl. Autonomieeigenschaft eines Agenten).
- Relevante Daten sind dezentral im System verteilt.
- Die Berechnungen der Abläufe im System erfolgen asynchron. [59]

Um ein lauffähiges MAS zu erhalten, ist eine standardisierte Softwareinfrastruktur erforderlich. Eine derartige Infrastruktur wurde von der IEEE-Standardisierungsorganisation FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents) im Rahmen des nach ihr benannten FIPA-Standards erstellt [156]. Dieser beinhaltet umfassende Definitionen von Standards für den Bereich der Agententechnologie sowohl bezüglich der Systemarchitektur als auch der Kommunikation. Das resultierende FIPA-Referenzmodell (vgl. Abbildung 9) besteht aus folgenden Kernkomponenten:

- **Agenten:** Kommunizieren untereinander auf Grundlage der standardisierten Agent Communication Language. Innerhalb des Systems sind sie über eine eindeutige Kennung, dem AID, identifizierbar.
- **Agentenmanagement-System (AMS):** Übernimmt Verwaltungsaufgaben im System. Jeder Agent der Plattform muss sich bei dieser Instanz anmelden, um

seine AID zu erhalten. Darüber hinaus werden hier die Kontaktinformationen registrierter Agenten gespeichert. Das AMS ist eine Pflichtkomponente der Agentenplattform und existiert genau einmal im System.

- **Verzeichnisdienst:** Agenten können hier Dienste, die sie im System anbieten, registrieren bzw. anfragen, welche Dienste im System von anderen Agenten angeboten werden. Der Verzeichnisdienst ist eine optionale Systemkomponente. In einem MAS können mehrere Verzeichnisdienste existieren.
- **Nachrichtentransport-System:** Standardkommunikationsweg, wenn ein Informationsaustausch mit Agenten, die auf anderen Agentenplattformen laufen, erfolgen soll. Auch plattforminterne Kommunikation kann hierüber abgewickelt werden.
- **Software:** Externe Software, die den Agenten weitere Funktionalitäten bereitstellt. Ist selbst nicht in Form eines Agenten aufgebaut. [129][130]

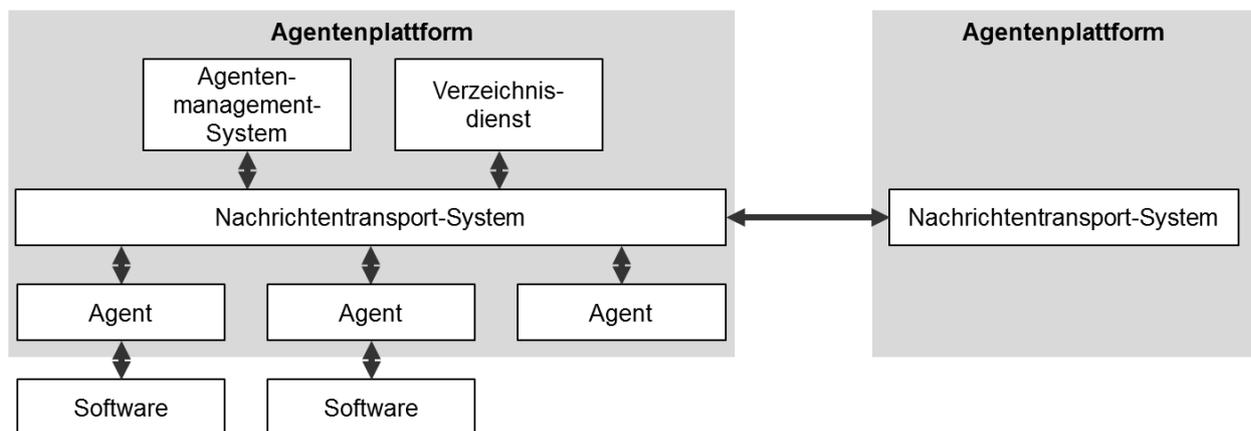


Abbildung 9: Systemarchitektur eines agentenbasierten Systems (in Anlehnung an [129])

Durch den FIPA-Standard wird ein Rahmen bereitgestellt, der die Kommunikation und die Interaktion zwischen heterogenen Agentensystemen sowie den darin enthaltenen Agenten erlaubt [27]. Erst dadurch werden die Potentiale von MAS hinsichtlich des Aufbaus robuster und effizienter Problemlösungssysteme nutzbar [59].

2.5.4 Stand der Technik und Handlungsbedarf im Bereich agentenbasierter Systeme für produktionstechnische Anwendungen

Seit Jahrzehnten sind vielfältige Anwendungen von MAS im Industrie- und Dienstleistungssektor bekannt (vgl. [59][99]). Dies umfasst unter anderem Anwendungen in der Telekommunikation, im Verkehr, im Einzelhandel, im Bankensektor und im Gesundheitswesen. Auch in der Produktionstechnik ist die Anwendung agentenbasierter Systeme seit Langem ein Thema. So existieren vielfältige Ansätze zur agentenbasierten Produktionsplanung und -steuerung als Ersatz für zentralisierte Systemlösungen (vgl.

[43][164]), im Bereich der Materialflusssteuerung (vgl. [164][233]), der Anlagen- und Prozesssteuerung (vgl. [59][164]), aber auch für die Überwachung und Diagnose (vgl. [5][176]).

Trotz der seit Jahrzehnten erfolgenden exemplarischen Anwendung von agentenbasierten Ansätzen in diversen produktionstechnischen Szenarien und der hohen Potentiale, die den implementierten Ansätzen in ihrer Evaluierung zugewiesen werden, hat sich das Agentenparadigma bislang nicht nachhaltig im Produktionsumfeld durchsetzen können [43][163][233]. Hierfür existieren vielfältige Gründe, wie eine diesbezügliche Situationsanalyse zeigt. Trotz der Verfügbarkeit eines umfassenden Standards in Form der FIPA-Spezifikation sind im Bereich der Kommunikation in agentenbasierten Systemen noch Defizite vorhanden. Diese begründen sich in der Tatsache, dass die FIPA-Spezifikation auf sehr hohem Abstraktionsniveau die Infrastruktur sowie die Kommunikation von Agentensystemen definiert. Sie enthält keine Vorgaben zu spezifischen Technologien, die zum Nachrichtenaustausch zwischen Agenten zur Anwendung kommen sollen. Dieser Sachverhalt erschwert konkrete Implementierungen des Standards und limitiert in Konsequenz auch seine Akzeptanz [29][46]. Des Weiteren entstehen trotz der Verfügbarkeit von Agentensystem-Entwicklungswerkzeugen wie JADE (Java Agent DEvelopment Framework) oder SPADE (Smart Python multi-Agent Development Environment), welche den FIPA-Standard umsetzen, hohe Aufwände zum vollständigen Aufbau eines funktionsfähigen MAS [136][153]. Neben der programmiertechnischen Realisierung der Systemkomponenten betrifft dies auch deren Konfiguration für ein bestimmtes Anwendungsszenario. Auch aktuelle Ansätze wie [175] fokussieren auf die Entwicklung von Datenmodellen zur Speicherung und Verarbeitung von Wissen sowie auf der Definition des Kommunikationsverhaltens im Agentensystem, ohne die zuvor identifizierten Limitationen zu adressieren. Zusammenfassend bestehen somit folgende Defizite bei der Anwendung agentenbasierter Systeme im Produktionsumfeld:

- Hohes Abstraktionsniveau des Standards (insbesondere bei der Kommunikation)
- Geringe Akzeptanz des Standards
- Hoher Aufwand zur Erstellung und Pflege der Agenten
- Defizite in der benutzerfreundlichen Anwendung aufgrund der komplexen Systemkonfiguration

2.5.5 Überblick über relevante technologische Befähiger aus dem IuK-Umfeld für die Diagnose und Therapie

Ergänzend zu den in Abschnitt 2.4.3 vorgestellten technologischen Befähigern stehen weitere neue Paradigmen und Technologien aus dem IuK-Umfeld zur Verfügung, die insbesondere bei der Gestaltung von Diagnose- und Therapiesystemen gewinnbringend einsetzbar sind. Im Folgenden wird wiederum ein kurzer Überblick über die Technolo-

gien gegeben, bevor diese in den spezifischen Fachkapiteln (vgl. Kapitel 4 und 5) detailliert vorgestellt werden:

- **Mass-Collaboration:** Bezeichnet die Zusammenarbeit einer großen Gruppe an voneinander unabhängigen Nutzern, um eine Aufgabenstellung zu erfüllen [217].
- **Social Software:** Sammelbegriff für Systeme, die Grundansätze der Kommunikations- und Kollaborationssysteme aufgreifen und um den Web 2.0 Gedanken erweitern (z. B. Wikis oder Blogs) [79].
- **Semantische Technologien:** Durch die Verwendung ergänzender Beschreibungsinformationen - den Metadaten - wird der Ansatz verfolgt eine maschinelle Verarbeitbarkeit des Wissens zu realisieren [220].
- **Cloud-Computing:** Erlaubt die flexible Nutzung der von Seiten eines Betreibers bereitgestellten Funktionalität über das Internet [212].
- **Serviceorientierte Architektur:** IT-Systemarchitektur, die das Zusammenspiel von Einzelbausteinen, den sogenannten Services, zur Erfüllung einer Dienstleistung beschreibt [87].
- **Komponentenbasierter Ansatz:** Entwicklungsparadigma, das auf Softwarekomponenten aufbaut. Diese sind definiert als Gestaltungseinheiten, die mit spezifizierten Schnittstellen versehen sind, keinen externen beobachtbaren Zustand aufweisen und unabhängig von weiteren Komponenten Dritter als Bausteine zum Aufbau komplexer Systeme anwendbar sind. [216]
- **Frameworks:** Stellen grundlegende Funktionen und Strukturen anwendungsfallneutral bereit.

2.5.6 Applikation technologischer Befähiger bei der Diagnose und Therapie

Mit dem Fortschritt im Bereich der Webtechnologien und neuen Entwicklungsparadigmen aus dem Webumfeld stehen technologische Befähiger zur Verfügung, die eine Beseitigung bestehender Defizite im Bereich der Expertensysteme und der Multiagentensysteme für die technische Diagnose erlauben. Im Folgenden wird zunächst dargestellt, wie dieser Technologie-Pool zur Beseitigung der jeweils identifizierten spezifischen Limitationen genutzt werden kann. Die kombinierte Applikation der technologischen Befähiger zur Entwicklung von Systemlösungen, die die erkannten Defizite nicht aufweisen, wird im Anschluss in Kapitel 5 dargestellt. Dort werden entsprechende Lösungen entwickelt, prototypisch umgesetzt und evaluiert.

Lösungsansätze im Bereich der Expertensysteme

Tabelle 4 zeigt die zuvor identifizierten Limitationen im Bereich der Expertensysteme nochmals auf und ordnet den jeweiligen Defiziten geeignete Lösungsstrategien zu. Hohe Entwicklungsaufwände zur Erstellung von Expertensystemen können durch den

Rückgriff auf Baukastensysteme und Frameworks vermieden werden. Hierzu stehen im Expertensystemumfeld mittlerweile diverse Systemlösungen bereit, die in Kapitel 5 auf ihre Einsetzeignung hin untersucht werden. Bezüglich der Aufwandsminimierung zur Erstellung und Pflege der Wissensbasis können Wissensmanagementansätze aus dem Umfeld der Social Software herangezogen werden. Dadurch kann bereits im Vorfeld des Aufbaus eines Expertensystems mit einer strukturierten Wissenssammlung begonnen werden. Hierbei anwendbare Technologiealternativen werden in Kapitel 4 detailliert betrachtet. In Verbindung mit semantischen Technologien kann diese Wissenssammlung so gestaltet werden, dass die darin enthaltenen Informationen maschinell zu verarbeiten sind und so den Kern der späteren Wissensbasis des Expertensystems darstellen. Begleitend können die Aufwände zur Wissensakquise unter Rückgriff auf das Mass-Collaboration-Konzept auf mehrere Akteure verteilt und somit nicht nur für reduziert, sondern auch parallelisiert werden. Die Benutzerfreundlichkeit ist wie bei der Gestaltung von Überwachungssystemen durch webbasierte Anwendungen zu verbessern. Somit wird der Zugriff auf die Systemlösung breit verfügbar und leicht zugreifbar, was einerseits einen ubiquitären Systemzugriff über diverse Endgeräte erlaubt. Andererseits erleichtert diese breite Systemverfügbarkeit auch die Anwendung des Mass-Collaboration-Konzepts.

Tabelle 4: Bestehende Defizite bei Entwicklung und Anwendung von Expertensystemen sowie mögliche Lösungsstrategien

Limitationen von Expertensystemen	Webgestützter Lösungsansatz
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hoher Aufwand zur Systementwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nutzung verfügbarer Baukastensysteme und Frameworks
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hoher Aufwand zur Erstellung und Pflege der Wissensbasis 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Weiterverwendung bestehender Wissenssammlungen ▪ Gemeinsame Erstellung im Rahmen von Mass-Collaboration
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Defizite bei Bedienbarkeit und Systemzugriff durch komplexe Bedieneroberflächen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Applikation webbasierter Bedieneroberflächen

Lösungsansätze im Bereich der Multiagentensysteme

Schon Ende der 90er Jahre wurde erkannt, dass das schnelle Wachstum des Internets in Verbindung mit den sich damit einhergehend zügig entwickelnden Internettechnologien und Webstandards das Potential haben, die Verbreitung von Agentensystemen zu fördern. Sie liefern wichtige Richtlinien, Standards und Architekturparadigmen, die im Umfeld von MAS einsetzbar sind, um dort aktuell bestehende Defizite zu beseitigen (vgl. Tabelle 5) [99]. Gegenüber früheren Integrationsversuchen haben die Ansätze aus dem Webumfeld mittlerweile einen Reifegrad erreicht, der eine gewinnbringende Applikation im Bereich der Agententechnologie erlaubt.

Sowohl Softwareagenten als auch serviceorientierte Architekturen stellen wichtige Paradigmen für die Modellierung verteilter Systeme dar. Der FIPA-Standard stellt die erforderlichen Richtlinien für die Interaktion zwischen Agenten bzw. den durch sie realisierten Services bereit. Die interne Verarbeitungskapazität einer Systemkomponente, die für das Abwickeln einer angebotenen Dienstleistung notwendig ist, wird ebenfalls durch das Agentenparadigma abgedeckt. Die serviceorientierte Architektur repräsentiert ein Paradigma mit identischer Zielrichtung, weist jedoch neben der reinen Architekturspezifikation auch Empfehlungen für konkrete Kommunikationsprotokolle zu dessen Umsetzung auf. Vor allem Protokolle aus dem Webumfeld wie SOAP haben in diesem Zusammenhang eine weite Verbreitung erreicht [87]. Durch eine Verbindung dieser beiden Ansätze besteht somit das Potential, die Realisierung und Verbreitung von MAS zu erleichtern, indem ein etablierter Kommunikationsstandard bereitgestellt wird. [27]

Tabelle 5: Bestehende Defizite bei Entwicklung und Anwendung von Agentensystemen sowie mögliche Lösungsstrategien

Limitationen von MAS	Webgestützter Lösungsansatz
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hohes Abstraktionsniveau des Standards (insbesondere bei der Kommunikation) ▪ Geringe Akzeptanz des Standards 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Applikation von serviceorientierten Architekturen auf Basis von Webservices
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hoher Aufwand zur Erstellung und Pflege der Agenten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gemeinsame Erstellung im Rahmen von Mass-Collaboration ▪ Nutzung und Vertrieb im Rahmen von Cloud-Computing bzw. Software-as-a-Service
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Defizite in der benutzerfreundlichen Anwendung aufgrund der komplexen Systemkonfiguration 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Webbasierte Konfigurationsoberflächen ▪ Parametrieren statt Programmieren

Auch wenn Standards und Entwicklungsumgebungen für agentenbasierte Systeme zur Verfügung stehen, so fallen für die vollständige Umsetzung eines derartigen Systems gemäß den Standards dennoch hohe Aufwände an, was die wirtschaftliche Applikation von MAS erschwert. In diesem Zusammenhang kann auf neue Entwicklungs- und Nutzungskonzepte aus dem Webumfeld zurückgegriffen werden. Der Mass-Collaboration-Ansatz sorgt für eine große Entwickler- und Anwendergemeinde, auf die sich die entstehenden Aufwände verteilen und macht zudem Synergien durch die Wiederverwendung von Komponenten nutzbar. Die Anwendung des Software-as-a-Service-Konzepts aus dem Cloud-Computing-Paradigma erlaubt das internetbasierte Anbieten bzw. Nutzen von Diensten im Rahmen individueller Geschäftsmodelle. Agenten sind durch ihre modulare Struktur dazu prädestiniert, die durch sie repräsentierten Dienste auf Basis des Software-as-a-Service-Prinzips weiteren Anwendern im Rahmen eines Lizenzmodells zur Verwendung bereitzustellen. Dadurch wird die Amortisationsgeschwindigkeit der Entwicklungsaufwendungen gesteigert. Im hier vorliegenden Anwendungsfall handelt es sich zudem um in Software realisierte

Agenten, wodurch deren Bereitstellung in der Cloud keine signifikanten Skalierungsprobleme bereitet, da sie einfach vervielfältigbar sind.

Defizite in der Handhabung agentenbasierter Systeme bei der Konfiguration für den Produktiveinsatz können, analog zu den Unzulänglichkeiten bei der Informationsdarstellung von Überwachungssystemen (vgl. Abschnitt 2.4.4), durch die Bereitstellung anwenderfreundlicher Benutzeroberflächen beseitigt werden. Diese haben die Aufgabe u. a. das Prinzip des Parametrieren bzw. Konfigurieren statt Programmierens für das MAS umzusetzen. Dazu wird auf vorhandene Softwarebausteine zurückgegriffen, die nicht neu erstellt, sondern lediglich auf das jeweilige Anforderungsszenario angepasst werden. Somit wird der Systemaufbau auch für weniger qualifiziertes Personal möglich und eine schnelle, anwendungsfallgerechte Systemapplikation sichergestellt. [143]

2.6 Lösungsweg und Zielsetzung der Arbeit

In den vorausgegangenen Abschnitten dieses Kapitels wurde die aktuelle Situation im Wettbewerbsumfeld produzierender Unternehmen aufgezeigt. Dabei wurde ebenso auf die herausragende Bedeutung der Automation zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen in diesem Umfeld eingegangen. Mit der technischen Diagnose wurde zudem ein Lösungsansatz vorgestellt, der auch den effizienten Betrieb komplexer automatisierter Anlagen erlaubt. Jedoch müssen sich auch die Systemlösungen der technischen Diagnose entsprechend den auf sie wirkenden Einflüssen aus dem Produktionsumfeld weiterentwickeln, um auch zukünftig die an sie gestellten Anforderungen erfüllen zu können. Anhand einer Analyse des Stands der Technik wurden die diesbezüglich existierenden Defizite ermittelt. Damit einhergehend erfolgte die Identifikation technologischer Befähiger aus dem schnell fortschreitenden IT-Umfeld. Dieses stellt eine Vielzahl an neuartigen Technologien, Standards, Architekturkonzepten und Paradigmen - insbesondere aus dem Webumfeld - bereit, die mit bisherigen Ansätzen der technischen Diagnose kombinierbar sind, um bestehende Defizite zu überwinden.

In den folgenden Kapiteln werden jeweils spezifische technologische Befähiger angewandt, um die Softwareunterstützung der einzelnen Phasen der technischen Diagnose entsprechend aktuellen Anforderungen zu gestalten (vgl. Abbildung 10). Den Ausgangspunkt dieser Entwicklungen stellen Überwachungssysteme dar (vgl. Kapitel 3). Es wird eine Systemlösung konzipiert und umgesetzt, die unter Rückgriff auf Webtechnologien und -standards wichtige Anforderungen umfassend erfüllt. Dies beinhaltet den Aufbau einer universellen, modular strukturierten Architektur, die aufwandsarm für diverse Anwendungsszenarien zu parametrieren ist. Weiterhin soll das System über Möglichkeiten zur transparenten und ortsungebundenen Datenvisualisierung verfügen, die durch eine hohe Benutzerfreundlichkeit gekennzeichnet sind.

Da für die Diagnose und Therapie komplexer automatisierter Produktionsumgebungen anwendungsfallspezifisches Wissen hinsichtlich Anlagen, Prozessen und Produkten eine entscheidende Rolle einnimmt, wird in Kapitel 4 zunächst der Begriff des Wissens und dessen Management betrachtet. Hierbei werden auch Softwaresysteme des Wissensmanagements hinsichtlich ihrer Eignung zur Diagnose- und Therapieunterstützung analysiert. Basierend auf den Ergebnissen dieser Analyse wird ein System zur Unterstützung der menschenzentrierten Diagnose und Therapie aufgebaut.

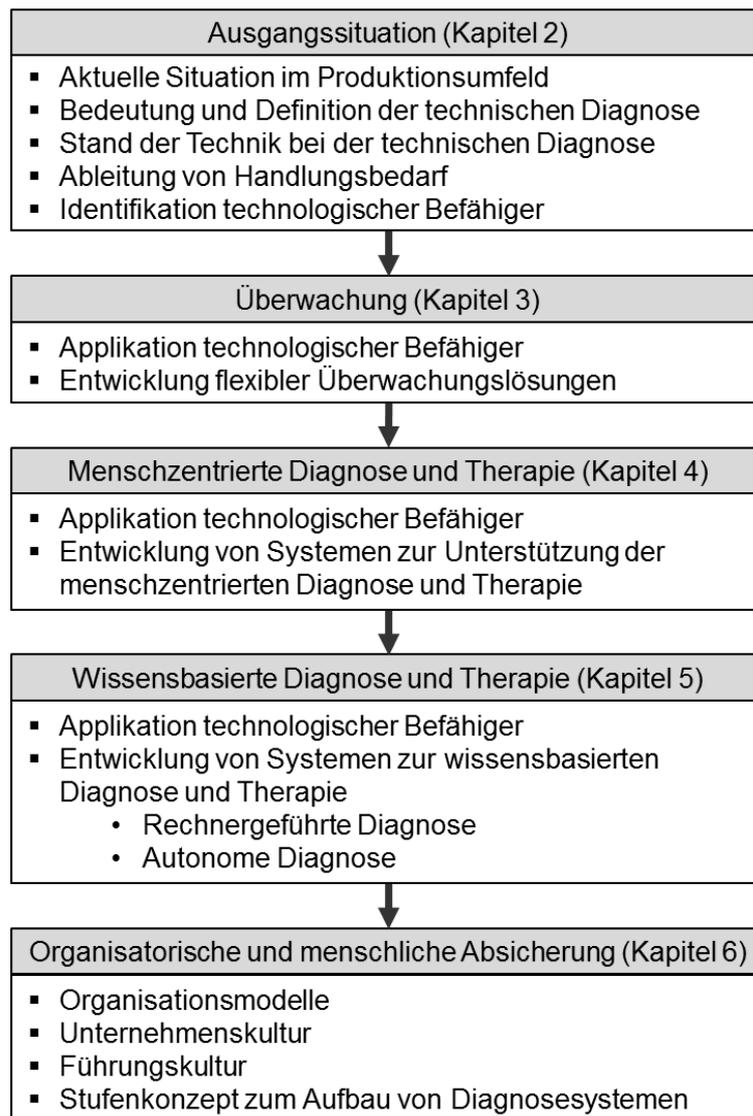


Abbildung 10: Herangehensweise zur Entwicklung bedarfsgerechter Systeme der technischen Diagnose

Diese Entwicklungen stellen einen wichtigen Zwischenschritt zum effizienten Aufbau der in Kapitel 5 betrachteten Systeme der wissensbasierten Diagnose dar. Diese setzen auf dem gesammelten Wissen bezüglich Anlagen, Prozessen und Produkten auf, das sie maschinell verarbeiten. Dadurch bieten sie das Potential, Stillstandszeiten signifikant zu

reduzieren. Die Systeme der wissensbasierten Diagnose setzen sich dabei aus Systemen der rechnergeführten Diagnose - den Expertensystemen - sowie Systemen der autonomen Diagnose - den Multiagentensystemen - zusammen. Diese werden im Rahmen von Kapitel 5 jeweils mit individuellen technologischen Befähigern kombiniert, um bestehende Defizite hinsichtlich ihres Aufbaus und ihrer Nutzbarkeit zu überwinden. Hieraus resultierende Lösungsansätze für die beiden Systemklassen werden im Anschluss konzipiert und prototypisch umgesetzt. In diesem Zusammenhang erfolgt ebenso eine Bewertung der Komplexität und Leistungsfähigkeit der jeweiligen Systeme.

Wie dargestellt ist der wirtschaftliche Einsatz leistungsstarker wissensbasierter Diagnosesysteme signifikant von einem effizienten Wissensmanagement abhängig. Dieses wiederum ist alleine durch technische Maßnahmen nicht realisierbar. Angesichts dieser Tatsache werden in Kapitel 6 organisatorische und menschliche Aspekte identifiziert, die zur Absicherung wissensorientierter Tätigkeiten notwendig sind. Zudem stellen wissensbasierte Diagnosesysteme komplexe Systemlösungen dar, die wirtschaftlich nicht direkt vom aktuellen Status quo ausgehend erreichbar sind. Durch eine Verbindung der technischen, organisatorischen und menschlichen Gesichtspunkte wird deshalb ein Stufenkonzept zum effizienten Aufbau leistungsfähiger Überwachungs- und Diagnosesysteme für die Produktion von morgen skizziert.

3 Entwicklung anpassungsfähiger Softwarelösungen zur Überwachung von Produktionsanlagen

In diesem Kapitel wird ein Lösungsansatz entwickelt, der auf den in Kapitel 2 aufgezeigten Technologie-Pool zurückgreift, um ein Überwachungssystem zur Unterstützung der technischen Diagnose aufzubauen, das aktuellen Anforderungen (vgl. Abschnitt 2.4.4) umfassend Rechnung trägt. Dazu wird im Folgenden zunächst die grundlegende Architektur für ein System konzipiert und umgesetzt, das eine generische und frei konfigurierbare Datenerfassung in heterogenen Fertigungsumgebungen erlaubt. Im Anschluss werden flexible und leistungsstarke Möglichkeiten zur browserbasierten Analyse und Visualisierung der erfassten Betriebsdaten unter Rückgriff auf standardisierte Webtechnologien aufgezeigt.

3.1 Grundlegende Systemarchitektur und Nachrichtenformate des Überwachungssystems webMon

Um die geforderten Vorgaben zu erfüllen (vgl. Abschnitt 2.4.4) setzt der entwickelte Lösungsansatz webMon (webbasiertes Monitoringsystem) auf einer modularen Architektur auf, deren Komponenten mittels standardisierter Kommunikationsschnittstellen verknüpft werden. webMon gliedert sich strukturell in zwei Hauptbereiche. Einem Backend (vgl. Abbildung 11), das auf die Erfassung von Betriebsdaten fokussiert, sowie einem Frontend (vgl. Abbildung 13), welches umfassende Analysemöglichkeiten auf Basis der gesammelten Daten erlaubt. Zentrales Bindeglied zwischen diesen beiden Bereichen stellt ein relationales Datenbanksystem dar, in dem ein universelles Datenmodell die generische Speicherung verschiedenster Betriebsdaten ermöglicht.

3.1.1 Entwurf einer flexiblen Systemarchitektur für das Backend von webMon

Ausgangspunkt des Backends sind die diversen Datenquellen einer Fertigungsumgebung wie Steuerungen oder Sensoren von Geräten (vgl. Abbildung 11), die als Lieferanten für Betriebsdaten fungieren. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass sie ihre Informationen in der Regel in einem proprietären Format bereitstellen. Auch wenn seit einigen Jahren Bestrebungen existieren, standardisierte Schnittstellen zur Maschinenanbindung zu schaffen, ist bis heute jedoch kein Standard flächendeckend im Einsatz [64]. Dies hat zur Folge, dass noch immer Wrapper-Programme erforderlich sind. Wrapper sind individuelle Programme, die fallspezifisch von einem Datenformat in ein anderes übersetzen. Sie kommen immer dann zum Einsatz, wenn für die Anbindung einer Maschinenschnittstelle an ein BDE-System eine der Komponenten ein proprietäres Interface oder ein, auf einem anderen Standard, aufbauendes Interface verwendet. Existierenden Standardisierungsbestrebungen bezüglich der Maschinenanbindung wie dem OPC UA Standard oder die Weihenstephaner Standards ist gemein, dass sie jeweils eine XML-basierte Definition Ihrer Schnittstellenspezifikation anbieten [141][172].

Daraus resultiert zunächst die Schwierigkeit, dass die einzelnen XML-basierten Schnittstellenstandards nicht zueinander kompatibel sind und erneut Wrapper - wenn auch in reduzierter Anzahl - zwischen diesen erforderlich werden. Allerdings gibt es seitens der Standardisierungsorganisation VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik Bestrebungen, auf Basis der verschiedenen vorhandenen XML-basierten Standards einen übergeordneten Metastandard zu entwerfen. Durch diese Bestrebungen kann die aktuell vorherrschende Schnittstellenproblematik zukünftig beseitigt werden [21]. Angesichts dieser Trends ist es für die Kommunikation in webMon sinnvoll, XML-basierte Datenstrukturen einzusetzen. Mit dieser Herangehensweise ist die Anpassung der Datenverarbeitungs-komponenten an einen zukünftigen Metastandard einfach möglich, da alle Systemkomponenten bereits auf die Übertragung und Verarbeitung von XML-Nachrichten ausgelegt sind. Somit ist festzuhalten, dass der Einsatz von Wrappern bei der Anbindung eines heterogenen Fertigungsumfelds an ein Überwachungssystem wie webMon aktuell unvermeidbar ist. Dennoch ist diese Variante dem Parallelbetrieb mehrerer BDE-Systeme vorzuziehen, da letzteres Vorgehen hohe Einarbeitungsaufwände und Softwarepflegekosten zur Folge hat.

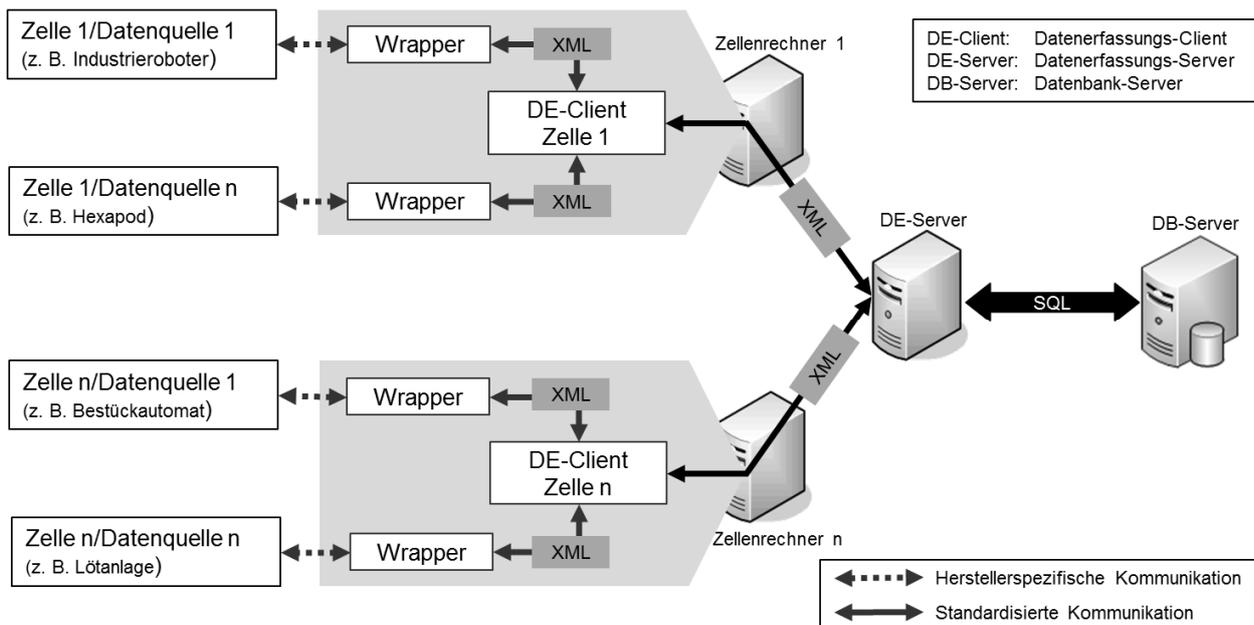


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Systemarchitektur des Backends von webMon (Datenerfassungs-System)

Die von den Wrappern erfassten Daten werden von diesem in eine definierte XML-Nachrichtenstruktur konvertiert und dann an einen Datenerfassungs-Client übertragen. Pro Fertigungszelle kommt dabei ein DE-Client zum Einsatz, der die Aufgabe hat, die jeweilige Zelle im System zu vertreten. Der gesamte Informationsfluss von den Datenquellen zum übergeordneten Datenerfassungs-Server erfolgt ausschließlich über ihn. Dies erfolgt, indem er individuelle Statusmeldungen der Zellkomponenten zu einer ag-

gregierten Datennachricht zusammenfügt, die die gesamte Fertigungszelle repräsentiert. Der DE-Server hat die Aufgabe, die Nachrichten der verschiedenen DE-Clients entgegenzunehmen und zum Datenbank-Server zur permanenten Speicherung weiterzuleiten. Von dort stehen alle erfassten Informationen für verschiedene Abfragen durch webMon-Frontendanwendungen zur Verfügung.

Für den Transfer der Nachrichten im System kommen in allen Komponenten Sockets zur Anwendung. Sie sind ein De-facto-Standard-Netzwerk-Kommunikationsmechanismus für den Informationsaustausch via TCP/IP oder UDP/IP, der in nahezu allen Programmiersprachen und Betriebssystemen zur Verfügung steht [47]. Vor diesem Hintergrund sind sie für eine universelle Systemauslegung ideal geeignet. Ein weiterer Aspekt, der die Universalität fördert, ist die Tatsache, dass von einer Kommunikation mittels proprietärer Protokolle so früh wie möglich abstrahiert wird. In webMon läuft deshalb ab der Wrapper-Ebene sämtliche Kommunikation im System über generische XML-Nachrichtenformate ab (vgl. Abschnitt 3.1.4).

3.1.2 Konzeption einer generischen Datenstruktur für webMon

Zur Speicherung der erfassten Daten stehen im relationalen Datenbanksystem von webMon verschiedene Datenbanktabellen zur Verfügung (vgl. Abbildung 12). Diese übernehmen folgende Aufgaben:

- **Client_table:** Mapping von IP-Adressen auf Fertigungszellen
- **Client_info_table:** Speicherung von Beschreibungsdaten der Fertigungszelle
- **Device_info_table:** Speicherung von Beschreibungsdaten von Datenquellen (Komponenten von Fertigungszellen)
- **Data_table:** Speicherung der erfassten Daten

Außer der *client_table*, die lediglich die Zuordnung von IP-Adressen zu Fertigungszellen sowie die Speicherung des aktuellen Status der Zelle übernimmt, ist allen übrigen Datenbanktabellen gemein, dass diese generisch ausgelegt sind. Mittels eines Tripels bestehend aus Bezeichner, Datentyp und Wert (*varname*, *datatype*, *data*) können beliebige Beschreibungsdaten bzw. Betriebsdaten von webMon gespeichert werden. Die einzige Einschränkung stellt hier die maximale Zeichenanzahl des jeweiligen Feldes dar. Diese ist jedoch bei Bedarf leicht anpassbar. Das entwickelte Konzept macht die gesamte Systemarchitektur somit sehr einfach und flexibel. Ferner werden mögliche aufwändige Anpassung an den Datenstrukturen bei der Anbindung neuer Fertigungszellen, die durch neu eingesetzte Geräte oder Prozesse im System bisher unbekannte Daten generieren, eliminiert.

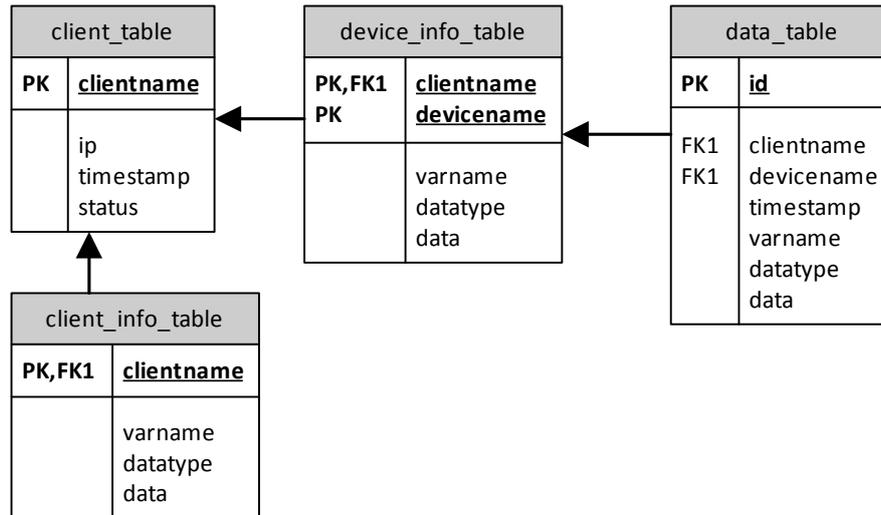


Abbildung 12: Datenbankschema von webMon

3.1.3 Systemarchitektur des Frontends von webMon

Die zentrale Komponente aufseiten des Frontends ist ein Webserver, der vielfältige anwendungsspezifische Datenverarbeitungs- und -analysemöglichkeiten in webbasierter Form anbietet. Eine detaillierte Erläuterung dieser Anwendungen und ihrer Applikationspotentiale erfolgt in den sich anschließenden Abschnitten. Allen Anwendungen ist jedoch gemein, dass diese über auf dem Webserver bereitgestellte Skripte die jeweils geforderten Daten mittels SQL-Abfragen vom DB-Server abfragen können. Ferner kann das Verhalten des DE-Systems über spezielle XML-basierte Konfigurationsnachrichten von den Clients aus angepasst werden.

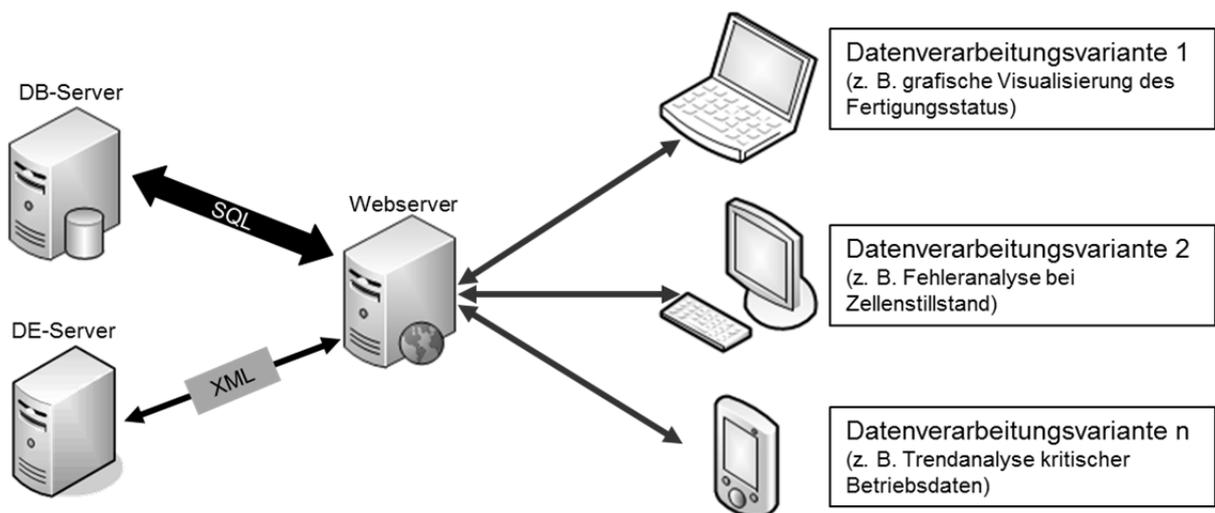


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Systemarchitektur des Frontends von webMon

3.1.4 Nachrichtentypen und -formate in webMon

Die Kommunikation in webMon ist in diversen Nachrichtentypen strukturiert. In diesem Abschnitt werden Aufbau und Funktion der Nachrichten in den Systemkomponenten erläutert. Wie aus Tabelle 6 ersichtlich ist, existieren für die Datennachricht zwei verschiedene Nachrichtentypen, die abhängig von der Konfiguration des DE-Systems zum Einsatz kommen. Die Übertragung vom Wrapper der Datenquelle zum DE-Client erfolgt immer als Einzel-Datennachricht. Befindet sich der DE-Client in einem Modus, in dem er Daten sofort nach deren Eintreffen weiterleiten soll, sendet er diese Einzel-Datennachricht auch unmittelbar an den DE-Server zur Verarbeitung weiter.

Es existiert allerdings auch ein alternativer Modus, bei dem der DE-Client nach Ablauf einer eingestellten Zeitperiode eine Statusnachricht absendet. In diesem Fall werden alle in einer Zeitperiode eingehenden Informationen in Form von Einzel-Datennachrichten der Datenquellen zunächst gespeichert. Erst nach Ablauf der vorgegebenen Zeitperiode erfolgt ihre Weiterleitung an den DE-Server als Sammelnachricht. Dieser Modus ist dann interessant, wenn lediglich periodische Statusmeldungen der Zelle von Interesse sind und gleichzeitig die Nachrichtenlast im System gering gehalten werden soll.

Tabelle 6: Beschreibung der Nachrichtentypen im Überwachungssystem

Nachrichtentyp	Quelle	Senke	Zweck	Protokoll	Häufigkeit
Initialisierungsnachricht	DE-Client	DE-Server	Übertragung von Beschreibungsinformationen Registrierung neuer Zellen bzw. Geräte im System	TCP	Ereignisgesteuert bei Änderungen
Einzel-Datennachricht	Wrapper, DE-Client	DE-Client, DE-Server	Übertragung von Betriebsdaten	TCP, UDP	Unmittelbar
Sammel-Datennachricht	DE-Client	DE-Server	Übertragung von Betriebsdaten	TCP, UDP	Im festgelegten Intervall
Steuernachricht	Webserver, DE-Server	DE-Server, DE-Client	Übertragung von Konfigurationsinformationen	TCP	Ereignisgesteuert bei Änderungen

Darüber hinaus existieren für die Datennachrichten alternative Übertragungsverfahren. Zum einen im unbestätigten Datagrammmodus (UDP) und zum anderen im verbindungsorientierten, bestätigten TCP-Modus. Die Gründe hierfür sind in der unterschiedlichen Leistungsfähigkeit und dem Aufwand, den die beiden Protokolle zur Folge haben, zu suchen. Bei UDP ist nicht sichergestellt, dass die Information den Empfänger erreicht, dafür ist der Übertragungsoverhead deutlich geringer als bei TCP. Dieses wiederum ermöglicht eine zuverlässige Informationsübertragung. Bei der Übertragung von Daten, die für das System eine hohe Wichtigkeit aufweisen, da z. B. gewisse Daten aufgrund von Traceability-Anforderungen vorliegen müssen, ist TCP zu wählen. Bei weniger wichtigen Daten kann aus Gründen einer dann höheren Nachrichtenverarbei-

tungskapazität im System UDP gewählt werden. Initialisierungsnachrichten und Steuer-
nachrichten werden immer via TCP versendet, da sie für eine die korrekte Systemfunk-
tionalität unabdingbar sind. Zudem verursachen sie aufgrund ihrer weitaus geringeren
Häufigkeit im System als Datennachrichten einen vernachlässigbaren Verarbeitungsaufwand.

Abbildung 14 zeigt den strukturellen Aufbau der Initialisierungsnachricht im DE-System
von webMon an einem Beispiel. In dieser werden sowohl zellen- als auch gerätespezifi-
sche Informationen in eine definierte XML-Datenstruktur eingebettet. Dabei existieren
fest definierte Tags, wie *client* oder *device* mit vorgegebenen Attributen, die gesetzt sein
müssen, damit die Nachricht aufseiten des DE-Servers korrekt geparkt und verarbeitet
werden kann. Im Aufbau der Initialisierungsnachricht spiegelt sich zudem die zuvor bei
der Strukturierung der Datenbanktabellen eingeführte generische Datenstruktur in Form
des Tripels *varname*, *datatype* und *data* wieder. Dieses wird in der Initialisierungsnach-
richt mittels der Verwendung von frei festlegbaren XML-Tags und deren Inhalte mit be-
liebigen Bezeichnern und Werten für Beschreibungsinformationen belegt.

```
<client name="Kooperierende Linearroboter" ip="131.188.112.65">
  <var datatype="str" varname="Jahr der Inbetriebnahme"> 2001 </var>
  <var datatype="str" varname="Standort"> Laborhalle Erlangen </var>

  <device name="RL 16-1" connection_type="ip" connection value="131.188.112.82">
    <var datatype="str" varname="Baujahr"> 2000 </var>
    <var datatype="str" varname="Traglast"> 6 kg </var>
  </device>

  ...
  <device name="..." connection_type="..." connection value="...">
    <var datatype="Datentyp der Beschreibungsinformation" varname="Name der Beschreibungsinformation"> WERT </var>
  </device>

</client>
```

Abbildung 14: Struktureller Aufbau der Initialisierungsnachricht des DE-Systems

Die in der Initialisierungsnachricht enthalten Informationen werden durch eine - eben-
falls XML-basierte - Konfigurationsdatei bereitgestellt, deren Konfiguration über webba-
sierte Frontend-Anwendungen oder von Hand realisierbar ist. In folgenden Szenarien ist
eine Anpassung der Konfigurationsdatei samt Versand einer (Re-)Initialisierungsnach-
richt an den DE-Server erforderlich:

- Integration einer neuen Fertigungszelle in die Fertigungsumgebung
- Räumliche Verlagerung einer bestehenden Fertigungszelle
- Integration eines neuen Geräts in eine bestehende Fertigungszelle
- Entfernung eines Geräts aus einer bestehenden Fertigungszelle

Das Abmelden einer Zelle, die außer Betrieb genommen wird, ist nur über die webbasierte Konfigurationsoberfläche von webMon möglich. Dieses Vorgehen ist notwendig, da in diesem Fall nicht gewährleistet ist, dass der DE-Client noch aktiv ist, um die Nachricht absetzen zu können.

Die generische Tripel-Struktur findet sich auch bei der Definition des Datenformats einer Daten-Sammelnachricht (vgl. Abbildung 15). Neben wenigen vorgegebenen Tags, die der Strukturierung der Nachricht dienen, wie dem *data*-Tag zur Kennzeichnung des Beginns und des Endes einer Nachricht sowie dem *device*-Tag zur Trennung der Informationsinhalte einzelner Geräte, können beliebige Betriebsdaten in die Nachricht integriert werden. Dazu stehen die Attribute *datatype* und *varname* des *var*-Tags sowie dessen Inhaltfeld zur Verfügung. Hierüber werden der jeweils erfassten Zustandsinformation ein Name und ein Typ zugewiesen.

```
<data send_type= „UDP“>
  <device name=“RL 16-1“ connection_type=“ip“ connection value= “131.188.112.82“>
    <var datatype=“double“ varname=“Achse 1“> 1.5 </var>
    <var datatype=“double“ varname=“Achse 2“> 2.5 </var>
    <var datatype=“...“ name=“...“> ... </var>
    ...
  </device>

  <device name=“...“ connection_type=“...“ connection value= “...“>
    <var datatype=“...“ varname=“...“> WERT </var>
    ...
  </device>
</data>
```

Abbildung 15: Struktureller Aufbau einer Datennachricht des DE-Systems

3.2 Flexible Informationsvisualisierung für die Werksebene in webMon

Durch die im vorausgegangenen Abschnitt vorgestellte flexible Systemlösung zur Datenerfassung steht ein großes Informationspotential zur Verfügung, das im Anschluss durch geeignete Weiterverarbeitungs- und Visualisierungsansätze nutzbar zu machen ist. Nur so kann das webMon-Gesamtsystem einen Beitrag zur Verbesserung der Anlagenproduktivität leisten. Dazu werden im Folgenden leistungsfähige Ansätze zur Nutzung der erfassten Daten für verschiedene Anwendungsfälle entwickelt und in webMon integriert. Im Folgenden wird zunächst ein grafischer Überblick über die gesamte Fertigung auf Hallen- bzw. Werksebene zur Analyse der aktuellen Situation in einer Fertigungsumgebung konzipiert und implementiert. Diese Komponente wird auch als grafischer Navigator oder grafischer Maschinenpark bezeichnet und soll einen schnellen Überblick über den aktuellen Zustand der Zellen einer Fertigungsumgebung geben [63]. Sie ist Grundvoraussetzung für eine effiziente Reaktion bei auftretenden Störungen, da diese dadurch unmittelbar sichtbar werden. Ausgehend vom grafischen Überblick sind

dann weiterführende Analysemöglichkeiten zugänglich, die eine detaillierte Betrachtung einzelner Aspekte erlauben.

3.2.1 Vergleich und Bewertung von Technologien zur zweidimensional-interaktiven Informationsdarstellung im Web

Zur browserbasierten Umsetzung eines grafischen Überblicks über die aktuelle Situation in einer Fertigungsumgebung in webMon stehen diverse Gestaltungsalternativen zur Verfügung. Tabelle 7 zeigt einen Vergleich unterschiedlicher Webtechnologien, auf deren Basis eine zweidimensional-interaktive Informationsvisualisierung gestaltbar ist.

Tabelle 7: Vergleich von Technologien zur zweidimensional-interaktiven Informationsdarstellung im Web [49][105][108][110][135][142][150]

Kriterium	Flash	Silverlight	JavaFX	Canvas	SVG
Plug-In oder RTE erforderlich	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein
Lizenz	Proprietär	Proprietär	GPL	Offen	Offen
Grafikformat	Raster, Vektor	Raster, Vektor	Vektor	Raster	Raster, Vektor
Datenformat	SWF	XAML	FXZ, FXD	HTML und JavaScript	XML
Unterstützung in Desktop-Browsern	++	++	++	++	+
Unterstützung in mobilen Browsern	--	--	- (in Entwicklung)	++	++

Bewertungsstufen: --: sehr schlecht; -: schlecht; o: neutral; +: gut; ++: sehr gut

Bei einer Bewertung der zur Verfügung stehenden Technologien zur zweidimensional-interaktiven Informationsdarstellung im Web anhand der formulierten Forderungen an anpassungsfähige Überwachungssysteme (vgl. Tabelle 3) ist festzustellen, dass alle Technologien diese in einem gewissen Maß unterstützen. Dennoch ergeben sich erhebliche Unterschiede bezüglich des Ausmaßes. So erfüllen die proprietären bzw. Community-getriebenen Umgebungen Flash, Silverlight und JavaFX das Merkmal einer jederzeit zugänglichen, transparenten Datenvisualisierung nur mit Einschränkungen. Diese ist so lange gegeben, wie man sich auf Windows-, Linux- oder MacOS-basierten Systemumgebungen bewegt. Im Bereich der Smartphone- und Tablet-Umgebungen ist keine Unterstützung vorhanden. Des Weiteren ist die Anwendbarkeit an die Installation eines Plug-Ins gekoppelt, was die Benutzerfreundlichkeit aufgrund des höheren Aufwands für Installation und Update der jeweiligen Plug-Ins bzw. RTEs (Runtime Environment) einschränkt. Ebenso reduziert die fehlende Unterstützung in mobilen Browsern die permanente, ortsunabhängige Zugriffsmöglichkeit auf konventionelle Notebook-Rechner und schränkt somit die Mobilität der Systemlösung und in Folge die Ubiquität ein. Auch weisen die Technologien Flash, Silverlight und JavaFX eine starke begrenzte Kompatibilität zu den jeweiligen Technologiealternativen sowie weiteren

Webtechnologien auf. Diese ist in der Regel nur zu weiteren Technologien des gleichen Herstellers gegeben. Die von der W3C, dem Gremium für Standardisierung im World Wide Web, vorangetriebenen Technologien SVG und Canvas weisen aufgrund der Plug-In-Freiheit und der Auslegung als offener Standard diese Nachteile nicht auf. Die Faktoren Modularität und flexible Anpassbarkeit werden in Zusammenhang mit zweidimensional-interaktiver Darstellung besonders durch vektorbasierte Grafikformate unterstützt. Diese erlauben die Manipulation einzelner Inhalte einer Zeichenfläche, ohne dass wie bei Rasterformaten der gesamte Inhalt neu gezeichnet werden muss [214]. Ferner unterstützen vektorbasierte Grafikformate die Mobilität, da sie verlustfrei auf die jeweils erforderliche Auflösung des aktuell verwendeten Endgerätes skalierbar sind. Deshalb bieten mit der Ausnahme Canvas auch alle Technologiealternativen die Möglichkeit mit Vektorgrafiken zu arbeiten.

Als Fazit ist festzuhalten, dass anpassungsfähige Visualisierungsansätze auf offenen Standards aufsetzen müssen, um die in sie gesetzten Erwartungen zu erfüllen. Bei den dabei zur Verfügung stehenden Technologien Canvas und SVG ist hierbei im Hinblick auf webMon SVG der Vorzug zu geben. Es stellt ein vektorbasiertes Grafikformat dar und erfüllt somit das Kriterium der Mobilität besser als Canvas. Ein weiterer Aspekt, der die Verwendung von SVG fördert, ist der HTML5-Standard. Er erlaubt die direkte Einbettung von SVG-Elementen in den HTML-Quelltext und legt somit den Grundstein für eine einfache Nutzung von SVG [14].

3.2.2 Konzeption und Umsetzung einer flexiblen Informationsvisualisierung auf Werksebene auf Basis von SVG

Abbildung 16 zeigt die Architektur der SVG-basierten Informationsvisualisierung auf Werksebene für webMon. Sie ist zu großen Teilen in die bestehende Architektur des zuvor vorgestellten DE-Systems eingebettet. Lediglich das Objektmanagement wird für die Realisierung der grafischen Informationsdarstellung ergänzt. Diese Systemkomponente ist zugleich Ausgangspunkt der flexiblen Visualisierungslösung. Ihre Aufgabe ist es, eine SVG-Modellbibliothek zu pflegen, die alle darzustellenden Modelle in Form einer SVG-Objektbeschreibung enthält. Zur Bereitstellung der erforderlichen Modelle existieren verschiedene Alternativen. Zum einen kann ein separater grafischer Editor angeboten werden, der die Erzeugung von SVG-Modellen der darzustellenden Geräte erlaubt. Zum anderen ist die Übernahme bestehender Modelle aus Engineering-Umgebungen via Konvertern möglich. Zur Speicherung der SVG-Modelle für eine spätere Verwendung im Frontend des DE-Systems werden die vorhandenen Datenbanktabellen um eine zweispaltige Tabelle ergänzt, die die Bezeichnung des Geräts sowie deren SVG-Beschreibung aufnimmt. Aufseiten des DE-Clients wird die Konfigurationsdatei um weitere Beschreibungsdaten erweitert, die Informationen zu den verwendenden SVG-Dateien enthalten. Dies umfasst:

- **SVG-Informationen zur Fertigungszelle:** Besteht aus einem Tupel (x-Position, y-Position, Höhe, Breite), das den Flächenbereich einer Fertigungszelle definiert.
- **SVG-Informationen zu den Geräten einer Fertigungszelle:** Besteht aus dem Tupel (Gerätetyp, x-Position, y-Position, x- und y-Koordinaten des Rotationszentrums, Rotationswinkel), das die Referenzierung eines Geräts für das Objektmanagement sowie die korrekte Positionierung eines SVG-Objekts innerhalb der virtuellen Repräsentation der Fertigungszelle erlaubt.
- **SVG-Steuerungsinformationen:** Ergänzend zu den SVG-Objektbeschreibungen werden in Form weiterer SVG-Tags Handler definiert, welche die Interaktion mit den dargestellten Grafikelementen steuern.

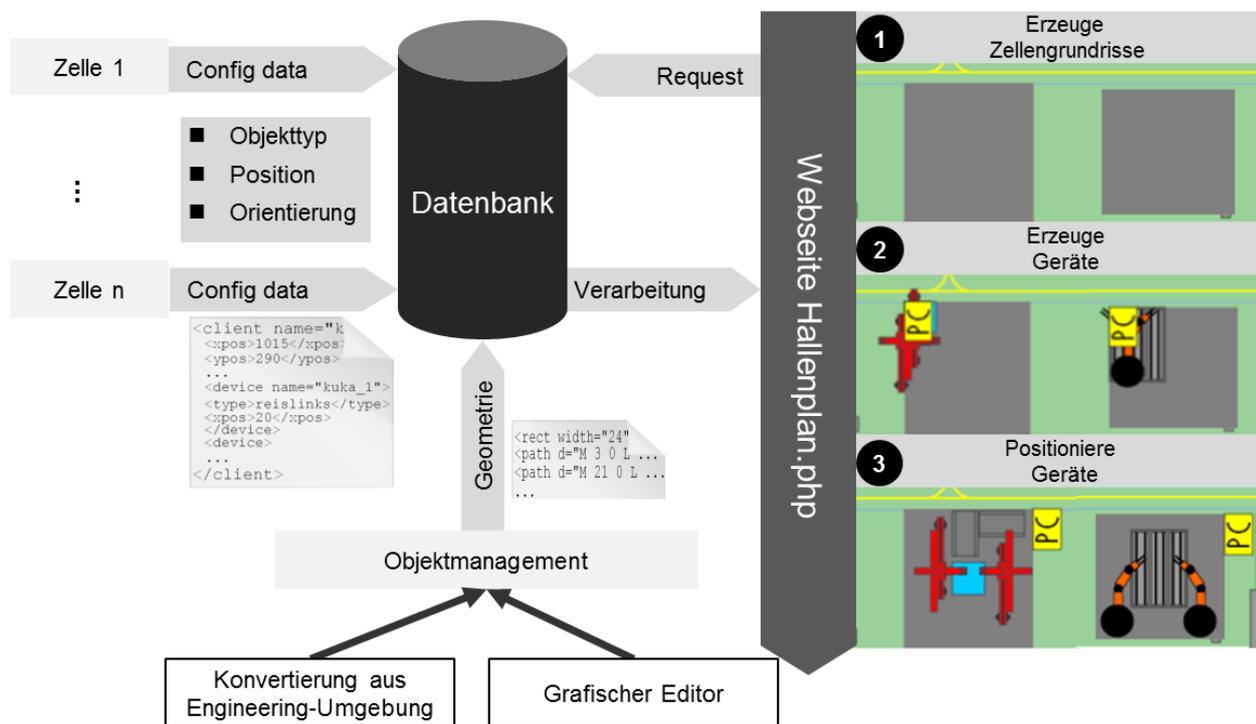


Abbildung 16: Architektur und Abläufe der SVG-basierten Informationsvisualisierung in webMon auf Werksebene

Aufgrund des generischen Datenformats des DE-Systems (vgl. Abschnitt 3.1.4) auf XML-Basis können diese zusätzlichen Informationen ohne Anpassungen in die bestehende Nachrichtenstruktur einer Konfigurationsnachricht integriert werden. Ebenso ist aufgrund der generischen XML-basierten Datenverarbeitung im DE-Client und DE-Server sowie der generischen Struktur der *data_table* die Übertragung und Speicherung der zusätzlichen Inhalte ohne Änderungen an den Backend-Komponenten oder den Datenstrukturen von webMon möglich. In diesem Zusammenhang ist das Konzept eines Objektmanagements mit anschließendem Referenzieren der SVG-Objekte in den Konfigurationsnachrichten der direkten Integration der vollständigen SVG-Beschreibung in die Konfigurationsnachrichten vorzuziehen. Durch das Objektmanagement ist die Ver-

waltung der SVG-Objekte zentralisiert und Doppelarbeit bei Erstellung und Überarbeitung von SVG-Modellgeräten vermeidbar.

Bei der Erzeugung der grafischen Darstellung von SVG-Informationen aufseiten des webMon-Frontends kommen zur Laufzeit die Webtechnologien PHP und JavaScript zur Anwendung. Der hierzu erforderliche Code ist in der Datei *Hallenplan.php* eingebettet, wobei sich der Darstellungsvorgang in drei Schritte gliedert:

- **Erzeuge Zellengrundrisse:** Alle SVG-Objekte, die Zellengrundrisse von Zellen beschreiben, die in der Fertigungsumgebung registriert sind, werden aus der Datenbank des DE-Systems ausgelesen und auf den Grundriss der Fertigungshalle gezeichnet.
- **Erzeuge Geräte:** Es wird über alle identifizierten Fertigungszellen iteriert und die jeweils zur Zelle gehörenden SVG-basierten Gerätebeschreibungen werden aus der Datenbank gelesen. Anschließend werden die enthaltenen Grafikinformatio- nen in den jeweiligen Zellenbereich gezeichnet.
- **Positioniere Geräte:** Es werden die Positionsinformationen aus der Datenbank gelesen und die zuvor gezeichneten Geräte korrekt positioniert.

Die im Abbildung 16 dargestellte graue Grundfläche der Zellenbereiche dient zur Laufzeit des webMon-DE-Systems als Alarmmeldefläche in Form einer Statusampel. In der Datenbank von webMon eintreffende Betriebsdaten werden kontinuierlich von einem serverseitig ausgeführten Skript analysiert. Basierend auf den Ergebnissen wird die Farbkodierung durch das Skript gesetzt und in der Datei *Hallenplan.php* weiterverarbeitet (vgl. Abbildung 17). Folgende Statusfarben stehen zur Verfügung:

- **Grau:** Fertigungszelle offline bzw. Status unbekannt
- **Grün:** Normaler Betrieb
- **Gelb:** Warngrenze mindestens eines Merkmals eines Geräts erreicht
- **Rot:** Mindestens ein Gerät mit Fehlfunktion

Um eine Alarmierungsfunktion zu bieten, die jederzeit den aktuellen Zellenzustand anzeigt und nicht nur den jeweils aktuellen Zustand, wie er beim Laden der Datei *Hallenplan.php* auf dem Clientrechner aktuell war, ist in diese Datei eine AJAX-Anwendung eingebettet. AJAX erlaubt das asynchrone Nachladen von Informationen vom Server und eine selektive Aktualisierung von dargestellten Informationen einer Webseite, ohne dass ein erneutes Laden der vollständigen Seite erforderlich ist. Nachgeladene Inhalte werden hierbei über Manipulation des HTML-DOMs in die Webseite integriert. Kernstück von AJAX ist das XMLHttpRequest-Objekt, das XML-codierte HTTP-Anfragen

asynchron mit einem Webserver abwickelt und in aktuellen Browsern nativ unterstützt wird. [174].

3.2.3 Anzeige aktueller Betriebsdaten von Geräten auf Basis des SVG-basierten Werksüberblicks

Ausgehend vom SVG-basierten Werksüberblick können situationsabhängig weitere Funktionen zum Zugriff auf Detailinformationen von einzelnen Fertigungszellen und den darin enthaltenen Geräten genutzt werden. Dazu wird der bereits erläuterte SVG-Darstellungsbereich um einen Anzeigebereich zur Informationsdarstellung auf Geräteebene erweitert (vgl. Abbildung 17), der sich in drei Bereiche untergliedert.

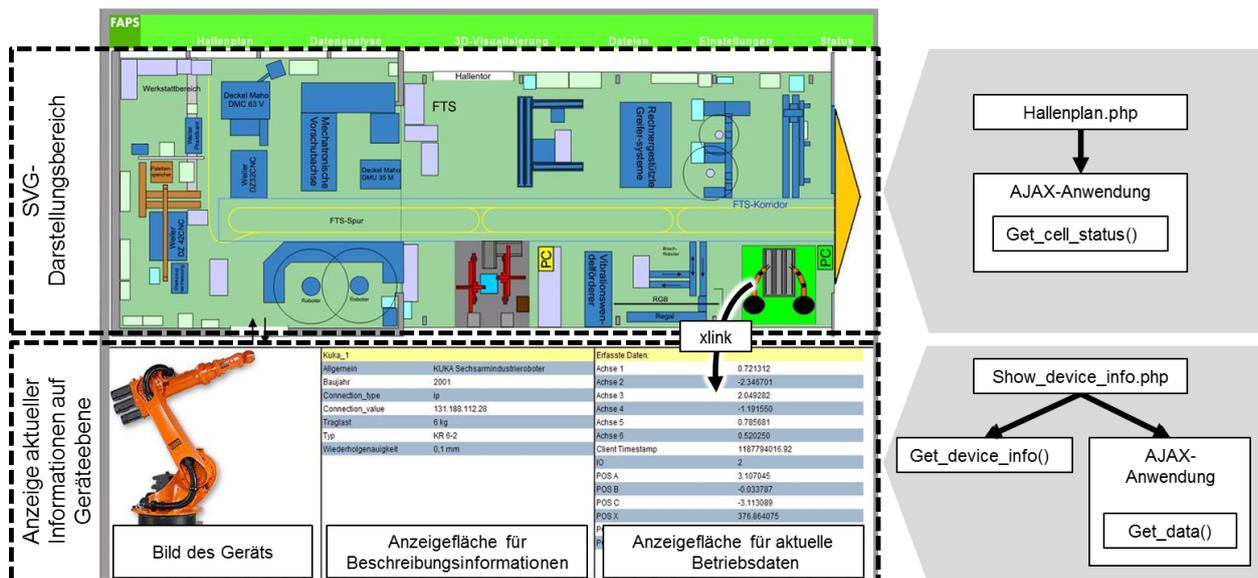


Abbildung 17: Struktur der SVG-basierten Visualisierungsoberfläche des webMon-Überwachungssystems

Diese erlauben die Anzeige eines Bildes des Geräts zu dessen leichterem Identifikation sowie die Anzeige der Beschreibungsinformationen und der jeweils aktuellen Betriebsdaten des Geräts in tabellarischer Form. Bildinformationen und Beschreibungsdaten erfahren nur sehr selten eine Änderung und werden daher nur beim erstmaligen Laden der Seite vom Server angefordert und übertragen. Betriebsdaten hingegen sind einer häufigen Änderung unterworfen und müssen somit aus Gründen der Informationsqualität kurzzyklisch nachgeladen und aktualisiert werden. Aus diesem Grund werden sie vom PHP-Skript *Show_device_info.php*, das für die Bereitstellung dieser Daten zuständig ist, unterschiedlich gehandhabt. Die Beschreibungsinformationen inklusive Bild werden einmalig durch die Funktion *Get_device_info()* bereitgestellt. Die Akquise aktueller Betriebsdaten erfolgt durch die Funktion *Get_data()* auf Basis des zuvor erläuterten AJAX-Prinzips. Dieses lädt Betriebsdaten im Hintergrund periodisch nach, worauf die entsprechenden Seitenbereiche durch *Show_device_info.php*, aktualisiert werden.

Um im SVG-Darstellungsbereich von webMon ein Gerät selektieren zu können, dessen Detailinformationen dann im darunterliegenden Anzeigebereich visualisiert werden, sind diese beiden Bereiche über das SVG-Element *xlink* verknüpft. Über dieses Element kann in einem SVG-Objekt ein Link hinterlegt werden, der bei bestimmten Ereignissen, wie einem Mausklick auf das Objekt, zur Ausführung kommt. Für den geschilderten Anwendungsfall verweist *xlink* auf einen Link, der das *Show_device_info.php*-Skript parametrisiert mit dem Namen des ausgewählten Geräts enthält.

3.3 Leistungsfähige Informationsvisualisierung auf Zellenebene durch Webtechnologien zur 3D-Darstellung in webMon

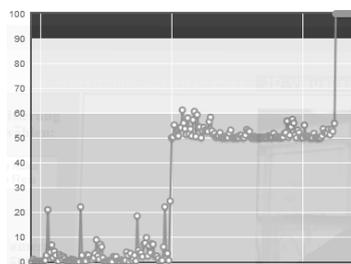
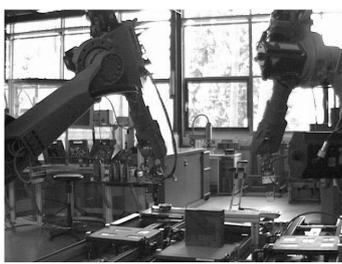
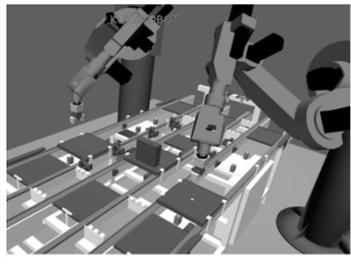
Neben der tabellarischen Auflistung aktueller Betriebsdaten einzelner Geräte im Rahmen des im vorausgegangenen Abschnitt erläuterten grafischen Werksüberblicks sind in der nächsten Stufe weitere Analysemethoden zur Bewertung des Status einzelner Fertigungszellen erforderlich. Im Folgenden werden deshalb zunächst Gestaltungsalternativen für Analyseansätze auf Zellenebene verglichen. Im Anschluss daran wird eine geeignete Systemlösung konzipiert und in das webMon-Gesamtsystem integriert.

3.3.1 Vergleich und Bewertung von Gestaltungsalternativen zur webbasierten Informationsvisualisierung auf Zellenebene

Tabelle 8 zeigt eine Übersicht über verschiedene Möglichkeiten zur webbasierten Visualisierung von Informationen auf Zellenebene, um den Zustand von Fertigungszellen detailliert zu bewerten. Für Evaluierungszwecke sind sie alle in prototypischer Form umgesetzt worden und über das Frontend von webMon (vgl. Abschnitt 3.1.3) zugänglich. Sie weisen jeweils individuelle Vor- und Nachteile auf.

Die Plot-Darstellung erlaubt die Anzeige beliebiger Betriebsdaten in Form von Grafen innerhalb einer Webseite. Dabei werden Art und Zeitraum der darzustellenden Daten über Auswahlmenüs vom Nutzer spezifiziert. Vorteil dieser Visualisierungsform ist die einfache Umsetzbarkeit unter Nutzung spezieller Webtechnologien sowie die Exaktheit der Information, da Zahlenwerte unmittelbar dargestellt werden. Zudem sind umfassende nachgelagerte Analysen möglich, da hierzu einfach auf die gespeicherten Betriebsdaten in der Datenbank von webMon zurückgegriffen werden kann. Defizite bei dieser Form der Visualisierung sind die begrenzte Anschaulichkeit der Information. So bleibt es dem Anwender überlassen sich die Bedeutung eines Verlaufs von Maschinenparametern über die Zeit räumlich vorzustellen, um so dessen Konsequenzen zu erfassen. Ebenso ist die Interaktion zwischen mehreren Geräten, wie sie in komplexen Fertigungszellen üblich ist, alleine anhand von Datenreihen schwer nachvollziehbar.

Tabelle 8: Vergleich und Bewertung von Gestaltungsalternativen zur webbasierten Informationsvisualisierung auf Zellenebene

Kriterium	Plot-Darstellung	Webcam-Blick	3D-Animation
			
Beschreibung	Anzeige von Betriebsdaten in Diagrammform	Anzeige des Videodatenstroms einer Fertigungszelle	Animierte Darstellung einer Fertigungszelle
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einfache Umsetzbarkeit ▪ Exaktheit ▪ Nachgelagerte Analysemöglichkeit 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einfache Umsetzbarkeit ▪ Hohe Anschaulichkeit ▪ Interaktion darstellbar 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Freie Navigationsmöglichkeit ▪ Hohe Anschaulichkeit ▪ Interaktion darstellbar ▪ Nachgelagerte Analysemöglichkeit
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Begrenzte Anschaulichkeit ▪ Eingeschränkte Darstellbarkeit von Interaktion 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eingeschränkte Navigationsmöglichkeiten ▪ Begrenzte nachgelagerte Analysemöglichkeit ▪ Begrenzte Exaktheit 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hoher Erstellungsaufwand ▪ Begrenzte Exaktheit

Die Einbindung von Webcam-Datenströmen in die Visualisierungsoberfläche von webMon stellt hingegen einen sehr einfachen Weg dar, um einen anschaulichen Überblick über die aktuelle Situation einer Fertigungsumgebung zu erhalten. Durch die Darstellung als Videostrom wird auch die Interaktion zwischen Geräten unmittelbar sichtbar. Allerdings weist diese Variante Defizite hinsichtlich der Navigationsmöglichkeiten in der Zelumgebung auf, weshalb eine Verdeckung interessanter Prozessbereiche ein Problem ist [37]. Auch der Rückgriff auf mehrere Webcams kann diese Einschränkung nicht für alle Situationen vollständig beseitigen. Zudem ist eine nachgelagerte Problemanalyse im Falle detektierter Fehlersituationen stark eingeschränkt. Dieses Vorgehen bedingt eine Speicherung des vollständigen Videodatenstroms, was aufgrund der anfallenden hohen Datenmenge schon bei der Nutzung von lediglich einer Webcam nur sehr begrenzt möglich ist.

Eine weitere Alternative ist die Nutzung einer dreidimensional-virtuellen Anzeigemethode. Ebenso wie bei der Layoutplanung oder der Kinematiksimulation im Rahmen der Digitalen Fabrik bietet sich auch bei der Überwachung und Diagnose der Einsatz von 3D-Welten an, wenn der Mensch die zentrale Rolle bei der Beurteilung der Situation einnimmt und diesem eine anschauliche Darstellung angeboten werden soll [106]. Vorteile dieser Methode sind zum einen die vielfältigen Betrachtungswinkel, die durch die freie Navigationsmöglichkeit zur Verfügung stehen, was die Analyse von Abläufen samt der Lokalisierung von Fehlern erheblich erleichtert. Zum anderen erlaubt die 3D-

animierte Visualisierung eine detaillierte Analyse dynamischer Prozesse [28]. Insbesondere bei der Überwachung und Diagnose komplexer Montageprozesse, die eine Interaktion mehrerer Handhabungsgeräte und Prozesswerkzeuge bedingen, ist eine 3D-Darstellung mit freier Navigation sehr hilfreich. Weiterhin wird die Animation aus derselben Datenbasis wie die Plot-Darstellung gespeist. Deren Informationen sind langfristig gespeichert und erlauben so auch umfassende nachgelagerte Analysen in Fehlersituationen. Eine zusätzliche Speicherung weiterer Daten, wie beim Webcam-Ansatz, ist nicht erforderlich. Nachteilig an diesem Ansatz ist die hohe Komplexität zum Aufbau einer derartigen 3D-Visualisierung sowie die begrenzte Exaktheit der dargestellten Information.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die 3D-Animation vielfältige Vorteile gegenüber den Alternativen Plot-Darstellung und Webcam-Blick bietet. Besonders die, für die Fehleranalyse an komplexen Montagezellen, wichtigen Funktionen der freien Navigation sowie der nachgelagerten Analysemöglichkeit werden hier unterstützt. Vor diesem Hintergrund wird im Folgenden die Entwicklung einer webbasierten 3D-Visualisierungskomponente für webMon detailliert betrachtet. Dabei werden auch Strategien aufgezeigt, wie die identifizierten Herausforderungen der hohen Entwicklungsaufwände (vgl. Abschnitt 3.3.5) sowie der mangelnden Exaktheit der Information (vgl. Abschnitt 3.3.8) beherrschbar sind.

3.3.2 Vergleich und Bewertung von Technologien zur dreidimensional-interaktiven Informationsdarstellung im Web

Um die am besten geeignete Technologie für eine leistungsfähige 3D-Informationvisualisierung zu ermitteln, werden die verfügbaren Technologien zur Darstellung dreidimensionaler Informationen im Web im Folgenden detailliert analysiert und bewertet. Die Technologien können dabei in zwei Hauptkategorien eingeteilt werden (vgl. Tabelle 9). Auf der einen Seite stehen die 3D-Grafik-APIs, welche auf Grafik-Schnittstellen wie OpenGL zurückgreifen, um Inhalte zu zeichnen. Auf der anderen Seite existieren spezielle Grafikformate für die Beschreibung dreidimensionaler Inhalte im World Wide Web wie VRML (Virtual Reality Modeling Language) und sein Nachfolgerstandard X3D (Extensible 3D). Da VRML und X3D nur Grafikstandards repräsentieren, sind zu deren Verarbeitung und Darstellung zusätzliche Plug-Ins im Browser erforderlich, die wiederum auf OpenGL oder DirectX zurückgreifen. Aufgrund der hohen Verbreitung von VRML und X3D sind jedoch vielfältige Plug-Ins diverser Hersteller unter verschiedenen Lizenzbedingungen und für alle relevanten Browser vorhanden [169]. Beide Herangehensweisen ermöglichen demnach die Interaktion mit sowie die Animation von dargestellten Inhalten durch den Rückgriff auf proprietäre APIs oder Webtechnologien.

Die 3D-Grafik-APIs bauen bis auf WebGL alle auf den in Abschnitt 3.2.1 vorgestellten Technologien zur 2D-Darstellung auf. Aufgrund der zunehmenden Bedeutung des Be-

reichs der webbasierten 3D-Visualisierung wurden auch Flash und Silverlight um die Fähigkeit zur 3D-Darstellung erweitert [155][157]. Wie bei den Technologien zur zweidimensionalen Informationsdarstellung sind auch hier die Technologien in proprietär entwickelte Formate (vgl. Flash, Silverlight), Community-getriebene Entwicklungen (vgl. JOGL, WebGL) und den offenen und ISO-standardisierten Formaten VRML und X3D einzuteilen. Das weitverbreitete VRML nimmt in diesem Vergleich eine Sonderstellung ein, da es nicht mehr weiterentwickelt wird und mit dem XML-basierten X3D ein kompatibler Nachfolgestandard vorhanden. Hinsichtlich der Verbreitung der jeweiligen Technologien ist festzustellen, dass sie alle für Desktop-Browser verfügbar sind und auch gut bis sehr gut unterstützt werden. Bezüglich der Verfügbarkeit im Bereich der Smartphone- und Tablet-Browser weist WebGL den fortschrittlichsten Stand auf. Für dieses existieren im Gegensatz zu den anderen Technologien bereits erste Umsetzungen [116]. Zudem ist anzunehmen, dass diese neue Technologie aufgrund der breiten Unterstützung sowie ihrer zurzeit hohen Innovationsgeschwindigkeit bestehende Lücken in den nächsten Jahren schließen kann [13]. Im Hinblick auf die Benutzerfreundlichkeit hat WebGL dadurch gegenüber anderen Technologien den Vorteil, dass es als einzige Technologie nativ in Webbrowsern unterstützt wird. Somit entfällt die Notwendigkeit der Installation von Plug-Ins, um 3D-Darstellungsfunktionalitäten nutzen zu können, was die Basis für einen schnellen und breit verfügbaren Systemzugriff legt.

Tabelle 9: Vergleich von Technologien zur dreidimensional-interaktiven Informationsdarstellung im Web [13][116][120][131][140][142][151][168][169][170][171]

Kriterium	Flash	Silverlight	JOGL	WebGL	VRML	X3D
Plug-In oder RTE erforderlich	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja
Lizenz	Proprietär	Proprietär	BSD	Offen	Offen, ISO-Standard	Offen, ISO-Standard
Typ	U. a. 3D-Grafik-API	3D-Grafik-API	3D-Grafik-API	3D-Grafik-API	3D-Grafik-format	3D-Grafik-format
Datenformat	SWF	XAML	U. a. WRL	U. a. X3D	WRL	X3D
Unterstützung in Desktop-Browsern	++	+	++	+	++	++
Unterstützung in mobilen Browsern	--	--	- (in Entwicklung)	o	--	--

Bewertungsstufen: --: sehr schlecht; -: schlecht; o: neutral; +: gut; ++: sehr gut

Sich aus den Kriterien der Offenheit und Universalität ergebende Ansprüche sind am besten durch Anwendung der ISO-Standards VRML und X3D erfüllbar. Darauf aufbauende Modelle können in verschiedene APIs wie JOGL oder WebGL integriert werden oder unter Verwendung diverser Plug-Ins dargestellt werden. Die Modularität und flexible Anpassbarkeit der 3D-Welten ist dadurch sichergestellt, dass z. B. mehrere separate

X3D-Dateien eingelesen werden können und basierend auf deren Teilinformationen eine vollständige 3D-Welt aufbaubar ist. Die Standards Flash oder Silverlight unterstützen eine derartige technologieneutrale 3D-Modellierung auf Basis von VRML oder X3D nicht, sondern setzen jeweils auf eigenen proprietären Datenformaten auf.

Die vorausgehende Bewertung zeigt, dass WebGL im Vergleich zu den anderen Technologien eine Vielzahl an Vorzügen aufweist, weshalb es als technologische Basis zum Aufbau der webbasierten 3D-Visualisierung in webMon zur Anwendung kommt. Ein wichtiges Alleinstellungsmerkmal ist die weitgehende native Browserunterstützung. Gerade unter Berücksichtigung der zunehmenden Heterogenität der Endgeräte stellt dies einen wichtigen Vorteil dar, da Anwender nicht geeignete Plug-Ins installieren und kontinuierlich updaten müssen [14]. Zudem setzt diese Technologie auf dem standardisierten Datenformat X3D auf und zeichnet sich somit durch eine breite Kompatibilität zu anderen Applikationen aus. Unter anderem sind viele CAD-Programme in der Lage, Daten im X3D-Format zu exportieren und auch eine Konvertierung von Vorgängerstandard VRML nach X3D ist aufgrund der Kompatibilität der Datenformate möglich.

3.3.3 Auswahl eines geeigneten Frameworks zum Aufbau einer WebGL-basierten Visualisierungslösung

Zur effizienten Erstellung einer dreidimensional-interaktiven Visualisierungslösung auf Basis von WebGL für webMon ist der Einsatz eines Frameworks bzw. einer Middleware sinnvoll (vgl. Abbildung 18). Dieser erlaubt es, von der hohen Komplexität von OpenGL sowie anderen auf sehr geringem Abstraktionsniveau angesiedelten Grafik-APIs zu abstrahieren [14]. Dadurch wird es auch für Personen, die keine Experten in der 3D-Grafikprogrammierung sind, möglich, effizient Inhalte zu erstellen, was zudem Akzeptanz und Verbreitung dieser Technologie fördert [221].

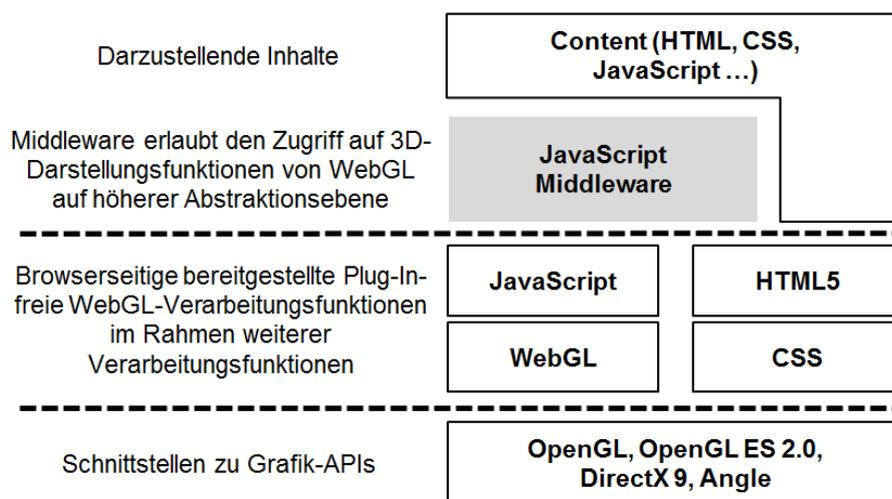


Abbildung 18: Architektur einer browserbasierten 3D-Darstellung auf Basis von WebGL (in Anlehnung an [221])

Die hohe Entwicklungsdynamik im Umfeld von WebGL führt dazu, dass trotz der Neuheit von WebGL bereits vielfältige Frameworks zur Verfügung stehen, die als Middleware fungieren können. Tabelle 10 vergleicht leistungsstarke Frameworks an Hand anwendungsrelevanter Kriterien.

Tabelle 10: Vergleich von WebGL-Frameworks [14][117][119][132][154]

Kriterium	GLGE	C3DL	SpiderGL	X3DOM	CopperLicht
Sprache	JavaScript, XML	JavaScript	JavaScript	JavaScript, HTML DOM	JavaScript
Datenformat	XML, DAE	DAE	DAE, OBJ	X3D	u. a. DAE, OBJ, 3DS
Programmierung	o	o	-	+	o
Modellierung	o	-	o	++	++
Animation	o	o	-	+	+

Bewertungsstufen: --: sehr schlecht; -: schlecht; o: neutral; +: gut; ++: sehr gut

Allen Frameworks ist gemein, dass sie JavaScript einsetzen, um von den, durch WebGL ebenfalls auf Basis von JavaScript bereitgestellten, Schnittstellen zu 3D-Grafik-APIs diverser Betriebssysteme zu abstrahieren. Einige Frameworks bieten weitere Möglichkeiten der Abstraktion via XML-Beschreibungen oder HTML DOM, welches den Zugriff auf HTML-Elemente erlaubt. Als Grafikformat für die Beschreibung von 3D-Modellen ist das COLLADA-Format (.dae) am gebräuchlichsten. Daneben kommen weitere 3D-Grafikformate wie Wavefront 3D Object File (.obj), Autodesk 3D Studio 3D Scene (.3ds) oder X3D (.x3d) zur Anwendung. X3D bietet in diesem Zusammenhang den Vorteil, dass es im Gegensatz zu COLLADA ein Laufzeit- und Ereignisbehandlungsmodell beinhaltet, das eine unmittelbare Definition von Interaktion erlaubt [8]. Darüber hinaus wurde es speziell für den Einsatz im Webumfeld entwickelt und unterstützt HTML DOM sowie AJAX, was die Gestaltung interaktiver Anwendungen für das Web erheblich vereinfacht [8].

Obwohl alle Frameworks hinsichtlich ihrer Programmierung auf JavaScript basieren, ist das Abstraktionsniveau sowie die sich daraus ergebende Komplexität für den Anwender dennoch unterschiedlich. Bei SpiderGL ist diese auf einem sehr niedrigen Niveau angesiedelt, was die Programmierkomplexität hochhält. X3DOM zeichnet sich in diesem Zusammenhang durch ein sehr hohes Abstraktionsniveau aus. Dessen Programmieransatz erlaubt die Verwendung von X3D-Tags in einer HTML-Datei und ist so insbesondere für Anwender mit HTML-Kenntnissen sehr zugänglich. Die übrigen drei Frameworks bewegen sich diesbezüglich im Mittelfeld.

Im Bereich der Modellierung sind X3DOM und CopperLicht hervorzuheben. X3DOM macht die Modellierung von Szenarien durch sein hohes Abstraktionsniveau leicht, während CopperLicht durch die Unterstützung unterschiedlichster 3D-Formate den Import

bestehender Modelle erheblich erleichtert. Ebenso bieten diese beiden Frameworks im Gegensatz zu GLGE, C3DL (Canvas 3D JS Library) und SpiderGL voreingestellte Kameras und Beleuchtungsmodelle, was die Szenenerstellung weiter vereinfacht. Um bei der späteren Betrachtung im Browser eine flüssige Darstellung auch komplexer Szenarien zu ermöglichen, ist ferner eine Funktion zur Regelung des Level-of-Detail erforderlich. Diese Option wird von GLGE, X3DOM und CopperLicht nativ bereitgestellt.

Animationsmöglichkeiten sind die Grundlage, um eine dynamisch-interaktive Informationsdarstellung gestalten zu können. In diesem Zusammenhang sind die folgenden Aspekte von Bedeutung:

- Ereignisbehandlung
- Animationsdarstellung
- Objektselektion
- Freie Bewegung in 3D-Szenen

In diesen Bereichen bietet wiederum SpiderGL die geringste Unterstützung. Ereignisbehandlung, Objektselektion und die Bewegung in 3D-Szenen sind vom Anwender selbst zu implementieren. Bei GLGE und C3DL ist die Bewegung in 3D-Szenen manuell zu bewerkstelligen. Darüber hinaus ist die Animationssteuerung aufwändiger gestaltet als bei X3DOM oder CopperLicht. Die letztgenannten Umgebungen bieten eine breite Unterstützung dieser Funktionen mit kleinen Einschränkungen bei der Animationskontrolle - im Fall von X3DOM - bzw. der Objektselektion bei CopperLicht.

Insgesamt ist somit festzuhalten, dass trotz der relativen Neuheit von WebGL bereits leistungsstarke Middlewarelösungen existieren, welche die Verwendung von WebGL wirksam unterstützen. Insbesondere X3DOM ist in dieser Hinsicht bereits sehr fortgeschritten und bietet eine weitreichende Abstraktion von der Komplexität der Grafikprogrammierung mit OpenGL. Einzig die begrenzte Auswahl an unterstützten Datenformaten, die sich auf X3D beschränkt, fällt hier auf. Mit diesem wird allerdings ein weitverbreitetes, XML-basiertes sowie ISO-standardisiertes Datenformat unterstützt, das den Standard zur Beschreibung von 3D-Modellen und deren Animation im Webumfeld darstellt. Dies relativiert die scheinbare Einschränkung, zumal vielfältige Konvertierungswerkzeuge in und aus X3D vorhanden sind [173].

3.3.4 Systemkonzept einer webbasierten 3D-Visualisierungslösung auf Basis von WebGL für webMon

Im Folgenden wird ein Architekturkonzept zur Realisierung einer webbasierten 3D-Visualisierung für webMon erarbeitet. Dies baut auf dem in Abschnitt 3.1.1 vorgestellten DE-System auf. Als Darstellungstechnologie kommt gemäß den Ergebnissen der zuvor

durchgeführten Technologievergleiche WebGL zum Einsatz, dessen Anwendung durch den Rückgriff auf das X3DOM-Framework erleichtert wird.

Den Ausgangspunkt der 3D-Visualisierung stellt eine HTML-Datei dar (vgl. Abbildung 19). Fordert ein Webbrowser auf Client-Seite die Visualisierungsumgebung an, wird diese zunächst via HTTP übertragen. In ihr sind alle Komponenten eingebettet, die zur Initialisierung und Ausführung der 3D-Darstellung erforderlich sind. Dies umfasst die 3D-Repräsentation einer ausgewählten Zelle inklusive aller in ihr enthaltenen Geräte in Form von X3D-Dateien sowie verschiedene JavaScript-Dateien. Letztere schließt sowohl die X3DOM-Bibliothek als auch weitere Skripte zum kontinuierlichen Nachladen von Betriebsdaten sowie deren anschließende Aufbereitung und Verarbeitung in der virtuellen Szenerie mit ein. Zur Realisierung des kontinuierlichen Nachladens werden mittels JavaScript XMLHttpRequests an ein serverseitig laufendes Python-Skript gestellt. Dieses beantwortet den Request, indem es angeforderte Betriebsdaten mittels SQL-Abfragen aus der Datenbank des DE-Systems extrahiert und der Client-Seite zur Verfügung stellt.

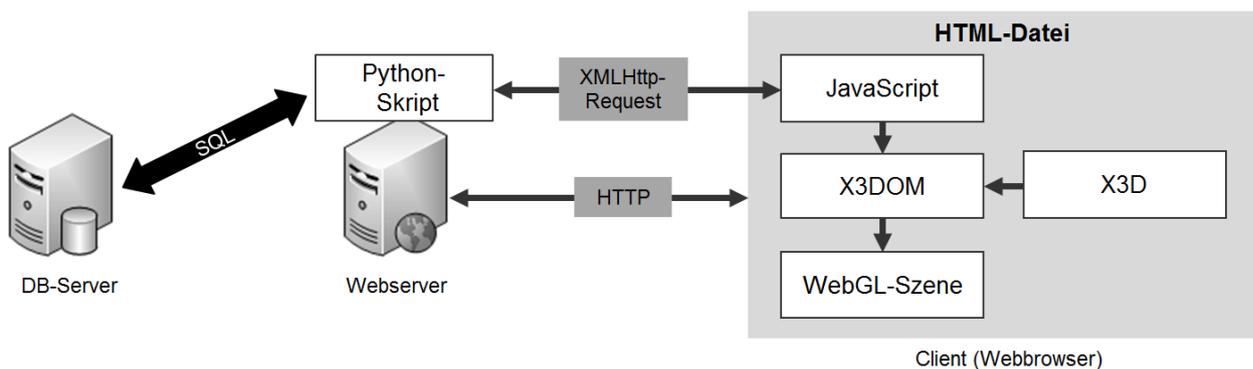


Abbildung 19: Systemarchitektur der webbasierten 3D-Visualisierung auf Basis von WebGL und X3DOM in webMon

3.3.5 Erstellung dynamischer Anlagenmodelle in X3D zur Verwendung in webMon

Zur Umsetzung der im vorausgegangenen Abschnitt erläuterten Systemarchitektur sind neben statischen Modellen von unbeweglichen Bestandteilen einer Fertigungszelle wie Podeste oder Tische, auch dynamische Modelle von bewegungsfähigen Geräten wie Robotern erforderlich. Die Dynamik wird über eine skriptgesteuerte Ereignisbehandlung kontrolliert, wodurch die Möglichkeit entsteht, Aktionen der realen Geräte in der virtuellen Welt nachzubilden.

Bereitstellung von Geometriedaten

Zur Akquise geeigneter Gerätemodelle stehen verschiedene Alternativen zur Auswahl. Dies umfasst:

- Modellierung in X3D-Autorenwerkzeugen
- Modellierung in CAD-Werkzeugen
- Konvertierung verfügbarer Modelle

Die Verwendung spezieller VRML- bzw. X3D-Modellierungswerkzeuge wie `white_dune` erlaubt den vollständigen Aufbau geeigneter Modelle unmittelbar in X3D. Ein Vorteil dieser Methode ist die kurze Werkzeugkette. Im X3D-Modellierungswerkzeug sind neben der Geometriedefinition auch Funktionen zur Erzeugung von Interpolatoren, Timern, Routen und Transform-Knoten in X3D-Syntax vorhanden, die für die Bewegungs- und Ereignissteuerung benötigt werden. Der Nachteil an diesem Vorgehen ist der begrenzte Modellierungskomfort der Werkzeuge, der deutlich unter denen kommerzieller CAD-Systeme wie CATIA oder NX liegt.

Die Modellierung in professionellen CAD-Umgebungen ermöglicht eine effiziente Erstellung der erforderlichen Geometriedateien. Diese erlauben in der Regel die Speicherung von Modellen im X3D-Format. Ist dies nicht der Fall, steht eine Vielzahl an Konvertierungswerkzeugen zur Verfügung, die eine Umwandlung typischer CAD-Datenformate wie IGES oder STEP in X3D bieten [37]. Im Anschluss ist, sofern es sich um interaktive Geräte handelt, wiederum ein X3D-Autorenwerkzeug erforderlich, um X3D-spezifische Funktionen der Bewegungs- und Ereignissteuerung in die Modelldaten zu integrieren. Alternativ ist dieser Schritt auch unter Zuhilfenahme eines Texteditors durchführbar. Dies ist allerdings aufgrund der geringen Übersichtlichkeit im Falle der Bearbeitung von komplexen Modellen sowie der fehlenden Syntaxunterstützung nicht empfehlenswert.

Eine dritte Möglichkeit ist die Weiterverwendung bereits vorhandener CAD-Daten. Hierbei stehen unternehmensinterne und -externe Datenquellen bereit. So bieten z. B. viele Hersteller von Geräten wie Roboterhersteller STEP- oder IGES-Dateien für ihre Produkte zum Download auf der Unternehmenshomepage an. Darüber hinaus können unternehmensintern vorhandene Daten aus Konstruktionsabteilungen oder Simulationsumgebungen verwendet werden. Hierbei sind im Anschluss die gleichen Nachbearbeitungsschritte wie bei der direkten Modellerzeugung in CAD-Systemen erforderlich, um die Daten in das X3D-Format zu konvertieren sowie die Bewegungs- und Ereignissteuerung zu integrieren. Dennoch ist diese Variante gegenüber den beiden zuvor vorgestellten Herangehensweisen zu bevorzugen, da keine Aufwände zur Modellerzeugung anfallen. Nachbearbeitete Modelldaten können im Rahmen des Mass-Collaboration-Ansatzes zudem über mehrere Parteien hinweg gemeinsam erstellt und

ausgetauscht werden (vgl. Kollaborationsansätze in Abschnitt 4.5 bzw. Abschnitt 5.2.3), was den Aufwand der Modellerstellung signifikant reduziert.

Generierung virtueller Produktionsanlagen auf Basis einzelner Geräte-Geometriedaten

Unter Verwendung der zuvor erzeugten X3D-Modelle von Geräten können im nächsten Schritt virtuelle Repräsentationen vollständiger Fertigungszellen aufgebaut werden. Hierzu werden X3D-Konfigurationsinformationen und einzelne Modelle kombiniert. Abbildung 20 zeigt die grundsätzliche Strukturierung einer X3D-Welt. Die Beschreibung einer Welt wird dabei durch die Tags `<X3D>` und `<Scene>` eingeleitet. Im Anschluss sind Konfigurationsinformationen der darzustellenden Szenerie bezüglich Blickwinkel, Beleuchtungsmodell und Hintergrund vorzunehmen. Danach kann unter Verwendung von `<Transform>`-Knoten und `<Group>`-Knoten die hierarchische Strukturierung der virtuellen Objekte definiert werden. Darzustellende 3D-Objekte werden entweder unmittelbar in der Datei im `<Shape>`-Element definiert oder aus einer externen X3D-Datei via des `<Inline>`-Elements eingebunden. Letztere Variante erlaubt die einfache Wiederverwendung bereits definierter Modelle in derselben oder einer anderen 3D-Welt. In der separaten Datei findet ebenso eine Objektdefinition mittels `<Shape>` statt, wie es auch bei der unmittelbaren Einbettung der Fall ist. Im `<Shape>`-Element wird durch das `<Appearance>`-Element die Erscheinung des Objekts hinsichtlich Material und Texturierung festgelegt. Die dreidimensionale Objektstruktur schließlich ist durch Rückgriff auf bereitgestellte geometrische Basisobjekte wie Kugeln (vgl. `<Sphere>`) oder durch die Vorgabe komplexer Polygonzüge via `<IndexedFaceSet>` definierbar [128].

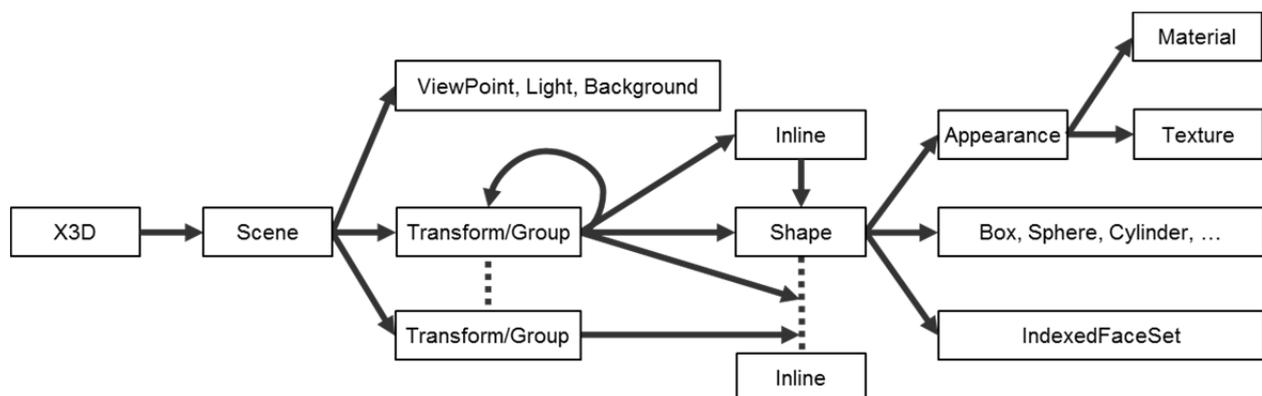


Abbildung 20: Grundlegender struktureller Aufbau einer X3D-Datei

Abbildung 21 zeigt neben der Festlegung von Hintergrund, Blickwinkel und Beleuchtung insbesondere die Anwendung der vorgestellten X3D-Syntaxelemente zur hierarchischen Komposition eines Modells einer Fertigungszelle unter Verwendung einzelner X3D-Komponentendateien. Hierbei findet eine ausgiebige Verwendung des `<Inline>`-Tags zur Einbindung der Roboterkomponenten statt. Dies ist möglich, da beide Roboter der Beispielzelle identisch aufgebaut sind.

In Abbildung 21 ist zudem die unterschiedliche Behandlung von statischen und dynamischen Zellenbestandteilen zu erkennen. Statische Bestandteile wie der Boden oder das Materialflusssystem können vollständig unter einem *<Transform>*-Knoten modelliert werden. Alle zu einem Gerät gehörenden Elemente, die sich jedoch in der animierten Darstellung unabhängig voneinander bewegen sollen, werden in hierarchisch geschachtelte *<Transform>*-Knoten eingebettet. Als Beispiel können hier die einzelnen Achsen der Roboterkinematik (vgl. z. B. *Kuka1_Achse1* in Relation zu *Kuka_Basis* in Abbildung 21) dienen. Über eine Manipulation der Parameter der einzelnen *<Transform>*-Knoten ist später die Bewegung die einzelnen Komponenten steuerbar.

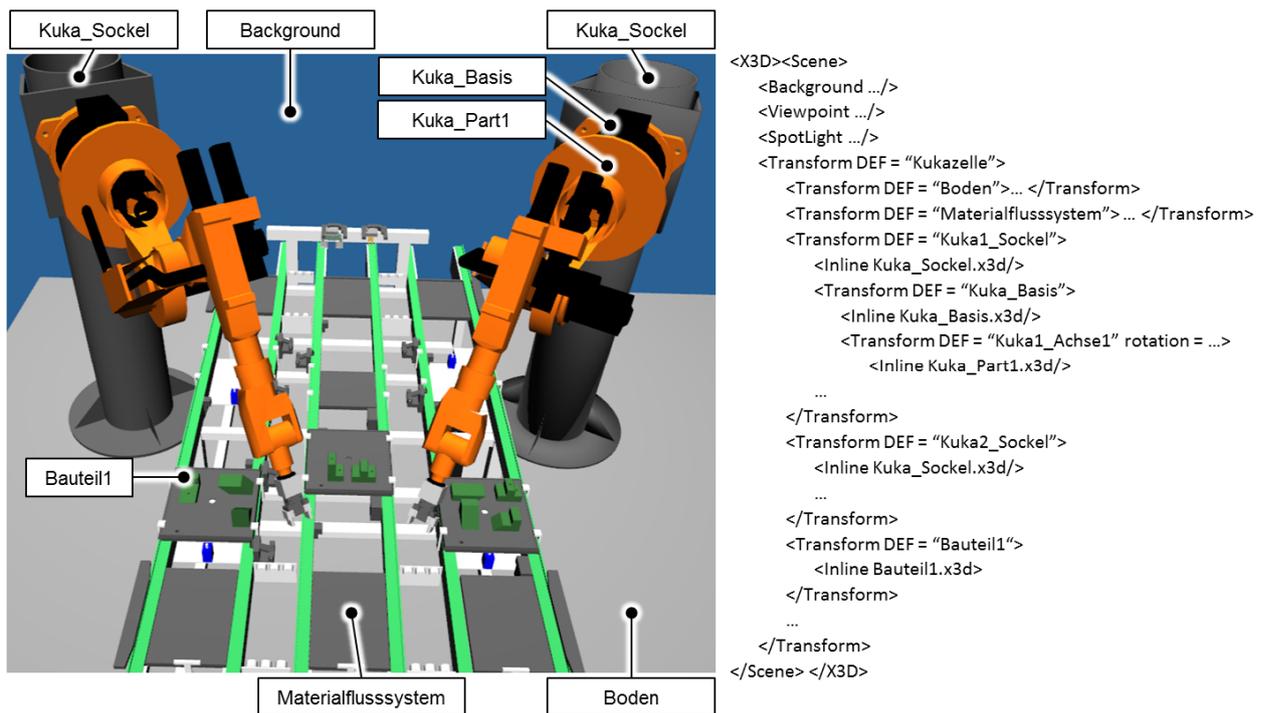


Abbildung 21: Komposition eines Modells einer Fertigungszelle für webMon auf Basis einzelner Komponentendateien im X3D-Format unter Verwendung von X3D-Syntaxelementen

3.3.6 Dynamische Visualisierung der aktuellen Fertigungssituation in webMon

Um die im vorangegangenen Abschnitt angesprochene Dynamik erzeugen zu können, sind neben der hierarchischen Unterteilung der Zellenbestandteile unter Verwendung von *<Transform>*-Knoten weitere Ergänzungen am Modell erforderlich. Dies beinhaltet die Integration von X3D-Elementen, welche die Ausführung von skriptgesteuerten Animationen ermöglichen. Daneben ist die in Abbildung 19 dargestellte Systemarchitektur clientseitig so auszugestalten, dass den entwickelten bewegungsfähigen Modellen die erforderlichen Eingangsdaten zugeführt werden.

Erstellung skriptgesteuert animierbarer 3D-Modelle

Um mit den zuvor erzeugten 3D-Modellen Bewegungen abbilden zu können, kommen die X3D-Konzepte *TimeSensor*, *Interpolator* und *Route* zum Einsatz. Abbildung 22 zeigt das Zusammenspiel dieser Komponenten zur Erzeugung einer Animation. Der Knoten *<TimeSensor>* übernimmt dabei die Rolle des Taktgebers für die gesamte 3D-Welt und generiert periodisch *fraction_changed*-Ereignisse, die ein Voranschreiten der Zeit anzeigen. Diese werden über eine *Route* mit dem Eingangswert *set_fraction* eines Interpolators wie dem *<OrientationInterpolator>* verknüpft. Dieser verfügt über zwei Datenlisten mit den Bezeichnungen *key* und *keyValue*. Der Zusammenhang zwischen beiden wird durch die Reihenfolge der Einträge von *key* und *keyValue* festgelegt. Abhängig von dem mittels *fraction_changed* gemeldeten vergangenen Zeitintervall berechnet der Interpolator unter Verwendung der *key*- und *keyValue*-Einträge einen Ergebniswert für eine Bewegung, die der *<OrientationInterpolator>* mittels *value_changed* an dem mit ihm verbundenen *<Transform>*-Knoten weitergibt. Dort wird ein Feld das 3D-Transformationen spezifiziert - im Beispiel das Feld *Rotation* - entsprechend den Vorgaben gesetzt und im Anschluss die resultierende Animation ausgeführt. Die Verknüpfung zwischen Zeitsteuerung und Interpolator bzw. zwischen Interpolatoren und zugehörigen *<Transform>*-Knoten erfolgt unter Verwendung des *<Route>*-Elements. In ihm wird eine Verknüpfung zwischen Ausgangsknoten und Ausgangsereignis sowie Eingangsknoten und -ereignis festgelegt [65].

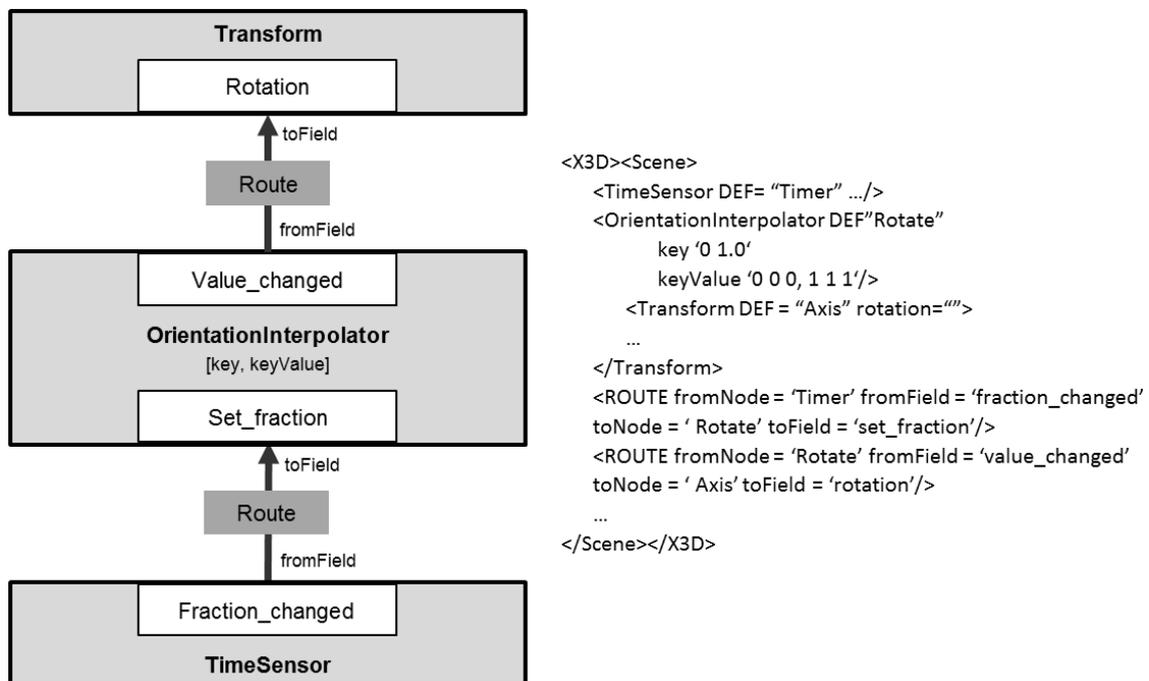


Abbildung 22: Erzeugung taktgesteuerter Bewegungen in X3D-Welten

Um eine Bewegung eines komplexen Geräts mit mehreren Freiheitsgraden wie den im Anwendungsbeispiel enthaltenen Robotern in webMon abbilden zu können, werden die

aufgezeigten Schritte mehrmals wiederholt. Für jeden Freiheitsgrad eines Handhabungsgeräts wird ein Interpolator erzeugt. Zudem werden die entsprechenden Verknüpfungen des jeweiligen Interpolators mit dem TimeSensor und dem zugehörigen <Transform>-Knoten, der die jeweilige Achse repräsentiert, unter Verwendung von <Route> erstellt.

Clientseitige Systemarchitektur zur Animation virtuellen Produktionsanlagen

Im nächsten Schritt sind aufseiten des Visualisierungsfrontends von webMon Funktionen erforderlich, welche die virtuelle Darstellung der Produktionsanlage kontinuierlich mit aktuellen Betriebsdaten versorgen. Zudem sind Funktionen bereitzustellen, die diese Daten verarbeiten, um eine skriptgesteuerte Bewegung zu modellieren. Abbildung 23 gibt einen Überblick über die dazu erforderlichen Funktionen und Datenstrukturen auf der Clientseite sowie deren Zusammenspiel. Voraussetzung für die erfolgreiche Ausführung der Animation ist, dass alle erforderlichen Betriebsdaten für die jeweils betrachtete Fertigungszelle in der Datenbank des DE-Systems zur Verfügung stehen.

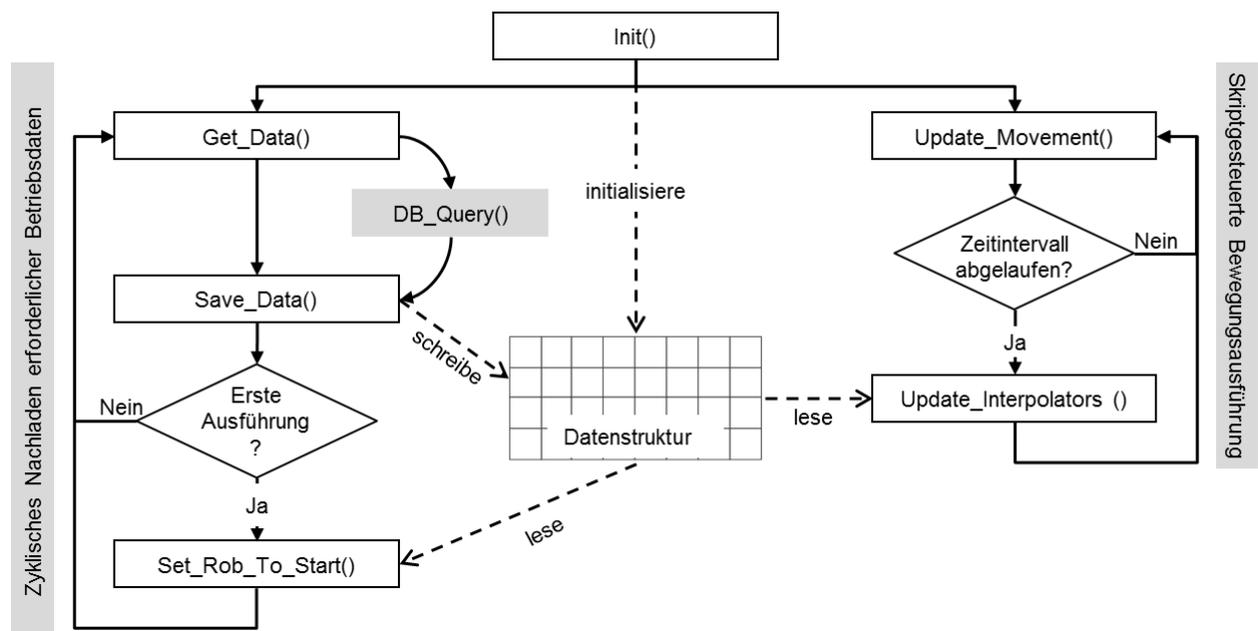


Abbildung 23: Überblick über die frontendseitige Systemarchitektur zur Animation virtueller Produktionsanlagen in webMon

Die jeweiligen Funktionen kommen dabei die folgenden Aufgaben zu:

- **Init():** In dieser Funktion werden die Datenstrukturen und Variablen angelegt sowie initialisiert, die für die Aufnahme der animationsrelevanten Betriebsdaten erforderlich sind. Als Datenstruktur kommt dabei ein Array, das als Ringpuffer fungiert, zum Einsatz. Darüber hinaus werden JavaScript-Variablen für alle in die Animationsausführung involvierten X3D-Knoten angelegt, um den Zugriff auf diese Knoten während der Programmausführung zu erleichtern. Ferner ist diese Funktion dafür verantwortlich, die periodische Aktualisierung der Animation via *Update_Movement()* sowie das kontinuierliche Nachladen neuer Betriebsdaten via *Get_Data()* zu starten.
- **Get_Data():** Setzt das Zeitintervall für aus der Datenbank abzufragende Werte entsprechend des Fortschritts der Visualisierung. Ruft via XMLHttpRequest das Python-Skript *DB_Query()* auf.
- **DB_Query():** Extrahiert via SQL-Abfragen angeforderte Betriebsdaten aus der Datenbank des Überwachungssystems (vgl. Abschnitt 3.1.2) und liefert diese als Ergebnis des XMLHttpRequests zurück.
- **Save_Data():** Zuständig für das Handling des durch *Get_Data()* gestarteten XMLHttpRequests. Empfangene Betriebsdaten werden in die angelegte Datenstruktur übertragen.
- **Set_Rob_To_Start():** Alle Achsen der Handhabungsgeräte werden unter Verwendung der zuvor angelegten JavaScript-Variablen auf die Werte des ersten empfangenen Satzes an Betriebsdaten gesetzt.
- **Update_Movement():** Prüft periodisch, ob das Zeitintervall für die gerade stattfindende Animationsphase abgelaufen ist. Ist das der Fall, wird *Update_Interpolators()* aufgerufen. Anderenfalls erfolgt keine Aktion und beim nächsten Aufruf wird erneut geprüft.
- **Update_Interpolators():** Weist allen Achs-Interpolatoren der Handhabungsgeräte neue *keyValues* zu, die in der nächsten Animationsperiode abzarbeiten sind. Ausgangspunkt einer Animationsperiode sind dabei die Achswerte der Roboter, die unter dem aktuell bearbeiteten Indexzähler des Ringpuffers stehen. Die Zielwerte finden sich im Inkrement des Indexzählers um eins. Die Dauer der nächsten Animationsperiode wird aus der Differenz der Zeitstempel dieser beiden Datensätze berechnet und dem TimeSensor zugewiesen.

3.3.7 Modellierung von Montagevorgängen in webMon

Um die Aussagekraft der webbasierten 3D-Visualisierung in webMon weiter zu erhöhen, ist neben einer Animation der Handhabungsgeräte in Fertigungszellen auch eine Animation der dort ablaufenden Prozesse wünschenswert. Eine zentrale Rolle nimmt in

diesem Zusammenhang die Bewegung von Objekten innerhalb von Fertigungszellen im Rahmen von Pick-and-Place-Vorgängen ein. Im Folgenden wird das zuvor entwickelte Systemkonzept um die Darstellung derartiger Vorgänge erweitert. In diesem Zusammenhang werden sowohl der Bauteiltransport als auch die Werkzeugaktivität visualisiert.

Vorbereitung der X3D-Welt

Um Technologieoperationen an Werkzeugen und Greifern, wie das Öffnen und Schließen eines Greifers, abzubilden, müssen diese über entsprechende *<Transform>*-Knoten in mehrere Komponenten unterteilt werden. Diese Herangehensweise erfolgt analog zu der Modellierung von Robotern, deren Achsen sich ebenfalls unabhängig voneinander bewegen sollen (vgl. Abschnitt 3.3.5). Im ausgewählten Applikationsbeispiel kommen hierbei zwei identische Backengreifer zu Einsatz, wobei jeder Greifer die folgende Unterteilung aufweist (vgl. Abbildung 24):

- **Basisteil:** Statische Grundkomponente über die der Greifer am Roboterflansch befestigt ist.
- **Backe links:** Dynamische Komponente welche nach links ausgefahren werden kann.
- **Backe rechts:** Dynamische Komponente welche nach rechts ausgefahren werden kann.

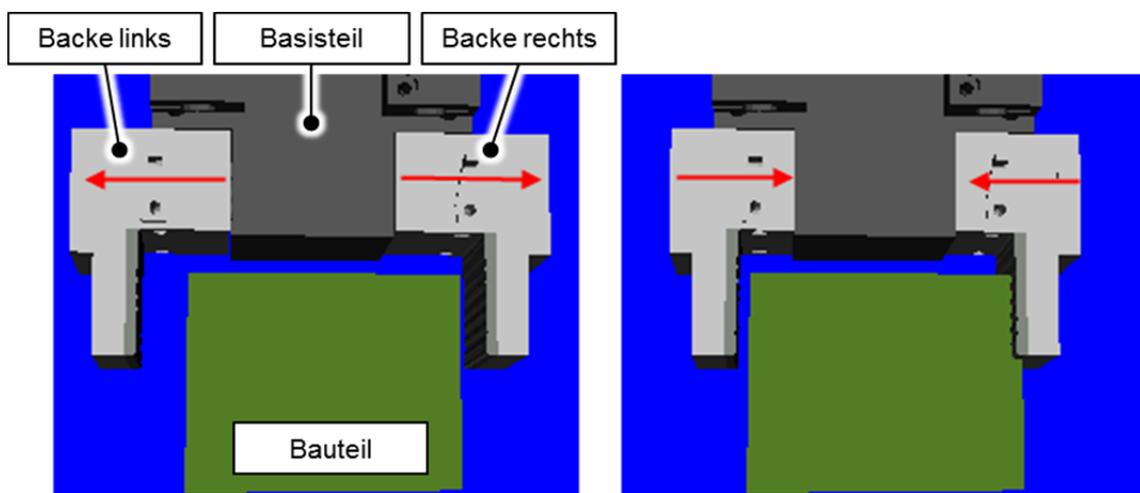


Abbildung 24: Schematische Darstellung des Konzepts bewegungsfähiger Greifer in der X3D-Welt

In der Hierarchie der X3D-Welt werden die Greifer jeweils unter dem *<Transform>*-Knoten eingehängt, der den Effektor des Roboters repräsentiert. Im Anwendungsbeispiel ist dies der *<Transform>*-Knoten der sechsten Achse. Dadurch bewegen sich die Greifer während der Animation entsprechend der Position und Orientierung dieser Ach-

se mit dem Roboter. Im Falle der Abbildung eines Montageablaufs, bei dem Greifer- bzw. Werkzeugwechsel während des Vorgangs stattfinden, ist eine statische Kombination mit dem Effektor nicht ausreichend. Vielmehr ist diese analog dem im Anschluss erläuterten Konzept der Handhabung ortsvariabler, dynamischer Objekte umzusetzen.

Integration von ortsvariablen, dynamischen Objekten und deren Handhabung

Neben Modellen für die Zellenperipherie, Handhabungsgeräte, Werkzeuge und Greifern sind auch X3D-Modelle der Bauelemente, welche in einem Montagevorgang zur Anwendung kommen, bereitzustellen. Sie nehmen in diesem Zusammenhang eine Sonderrolle ein, da sie im Gegensatz zu statischen Objekten der Zellenperipherie keine feste Position im Raum einnehmen. Von dynamischen Objekten, wie den einzelnen Achsen und Anbauteilen eines Handhabungsgeräts, unterscheiden sie sich dadurch, dass sie nicht permanent mit diesem verbunden sind. Stattdessen bewegen sie sich nur während der Ausführung einer Montageoperation temporär mit dem Handhabungsgerät mit, solange sie von dessen Endeffektor manipuliert werden. Dieses Verhalten ist ebenfalls via weiterer JavaScript-Funktionen umsetzbar. Abbildung 25 zeigt schematisch die dazu erforderlichen internen Abläufe von webMon.

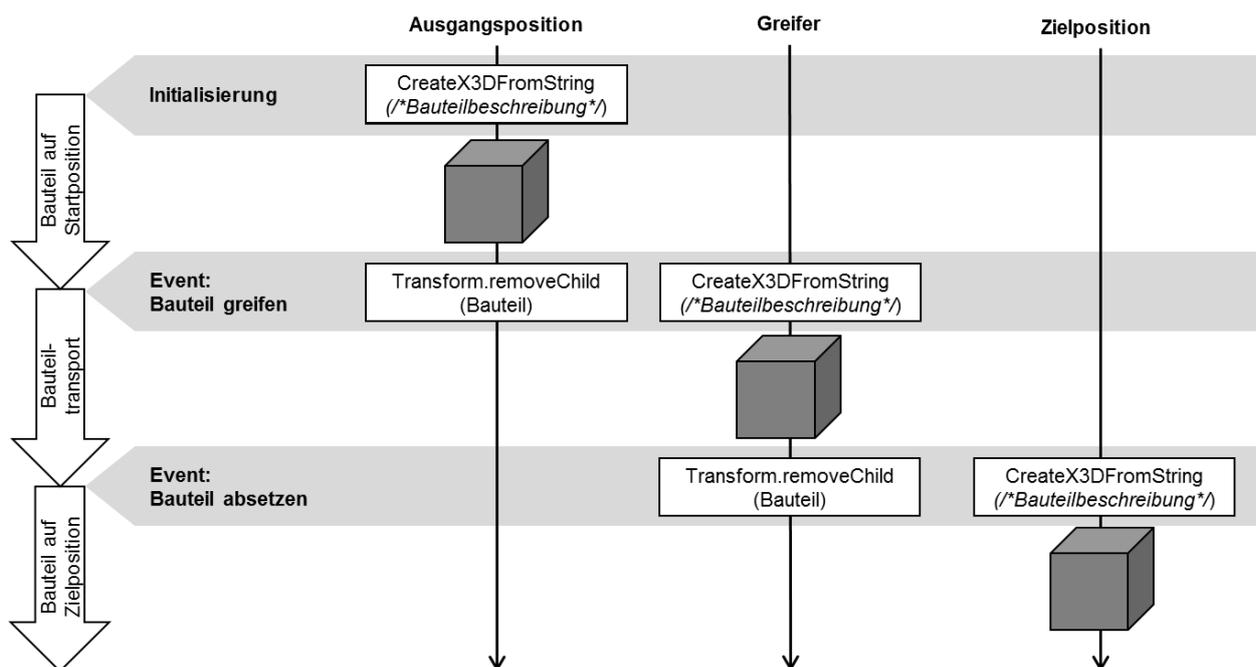


Abbildung 25: Interne Abläufe bei der browserbasierten 3D-Visualisierung von webMon im Rahmen einer Pick and Place-Operation

Während der Initialisierung der Modellwelt werden mittels `CreateX3DFromString()` die Bauteile an Ihren Ausgangspositionen erzeugt. Als Parameter wird der Funktion jeweils die X3D-Beschreibung eines Bauteils als ASCII-Text übergeben. Unter Verwendung der erfassten Betriebsdaten ist feststellbar, wann welches Bauteil gegriffen bzw. losgelas-

sen wird. Diese Information wird angewandt, um ein entsprechendes Ereignis auszulösen, welches wiederum zu einer Manipulation der X3D-Welt mittels JavaScript führt. Der `<Transform>`-Knoten, der die grafische Repräsentation des Bauteils enthält, wird aus dem Szenengraph der Welt gelöscht. Im Gegenzug wird wiederum mittels der X3D-Funktion `CreateX3DFromString()` ein neues Objekt, welches das Bauteil repräsentiert, unter dem `<Transform>`-Knoten des Greifers eingefügt. Dadurch erfährt das Bauteil ab diesem Zeitpunkt alle Positionsveränderungen der kinematischen Kette, die auch auf den Greifer wirken. Dabei ist die korrekte Orientierung und Positionierung eines Bauteils in einem Greifer für jeden Montagevorgang neu zu ermitteln und mit in den String, der die Bauteilbeschreibung enthält, zu integrieren. Beim Erreichen der Zielposition kommt ein analoger Mechanismus zur Anwendung, um das Bauteil abzusetzen. Durch die Auslagerung des X3D-Codes, der die Bauteilgeometrie sowie dessen räumliche Orientierung festlegt, kann die virtuelle Welt ähnlich dem Rüsten der realen Fertigungszelle flexibel auf unterschiedliche Montagevorgänge angepasst werden. Somit wird der Quellcode der virtuellen Umgebung nicht unnötig durch nicht verwendete Objekte vergrößert, was eine reduzierte Ausführungsgeschwindigkeit der Animation zur Folge hätte.

Erzeugung dynamischer Montagebewegungen

Um den im vorausgegangenen Abschnitt vorgestellten Mechanismus zur Ausführungszeit der Visualisierung ansprechen zu können, ist eine Erweiterung der clientseitigen Systemarchitektur von webMon aus Abbildung 23 erforderlich. Die Grundlage dazu stellt die Datenbasis des webMon-Systems dar. Unter den hier gespeicherten Werten müssen sich für eine Zelle, bei der Handhabungsbewegungen dargestellt werden sollen, Informationen über Technologieparameter wie „Greifer offen“ bzw. „Greifer geschlossen“ befinden. Des Weiteren sind Informationen darüber erforderlich, welches Bauteil gerade manipuliert wird.

Unter diesen Voraussetzungen können die zuvor erstellten Funktionen `Init()`, `Get_Data()`, `DB_Query()` sowie `Save_Data()` modifiziert werden. Dazu sind keine Änderungen am grundsätzlichen Aufbau der Funktionen erforderlich. Sie werden lediglich so erweitert, dass sie die zusätzlich erforderlichen Werte der Greifer-Bits und Bauteil-IDs berücksichtigen. Zur Verarbeitung dieser Informationen steht der Prototyp `Technology_Handling()` zur Verfügung. Dieser ist abhängig von der jeweiligen Fertigungszelle mit individuellem Verhalten zu füllen ist. Für das Beispiel der betrachteten Doppelroboterzelle sind folgende Funktionen umgesetzt (vgl. Abbildung 26):

- **Set_Grippers():** Bewegt entsprechend dem aktuellen Status der Greifer-Bits der Handhabungsgeräte den entsprechende Greifer in die geöffnete oder geschlossene Position (vgl. Abbildung 24) Greifer können dabei alternativ über Interpolatoren oder durch direkte Manipulation ihrer Positionskoordinaten animiert wer-

den. Für langsam ablaufende Vorgänge ist das Konzept mit Interpolatoren zu bevorzugen, um einzelne Phasen der Bewegung erkennen zu können. Die unmittelbare Manipulation der Koordinaten ist für schnell ablaufende Bewegungen, welche durch das menschliche Auge nicht erfassbar sind, aufgrund der geringeren Implementierungskomplexität zu bevorzugen.

- **Set_Parts():** Aktualisiert die Bauelementpositionen entsprechend den Bauteil-IDs. Bauelemente können sich statisch an Pick- oder Place-Position befinden, oder sich an einem Greifer gekoppelt durch die 3D-Welt bewegen.

Unter Berücksichtigung der beschriebenen Anpassungen ergibt sich die in Abbildung 26 dargestellte erweiterte webMon-Systemarchitektur zur Abbildung von Handhabungsoperationen. Für den Fall, dass andere Technologieoperationen wie die Abbildung von Schraub- oder Schweißvorgängen erfolgen sollen, sind die entsprechenden X3D-Modelle der involvierten Geräte bereitzustellen. Zudem ist deren Ereignisbehandlung in Technology_Handling() zu hinterlegen.

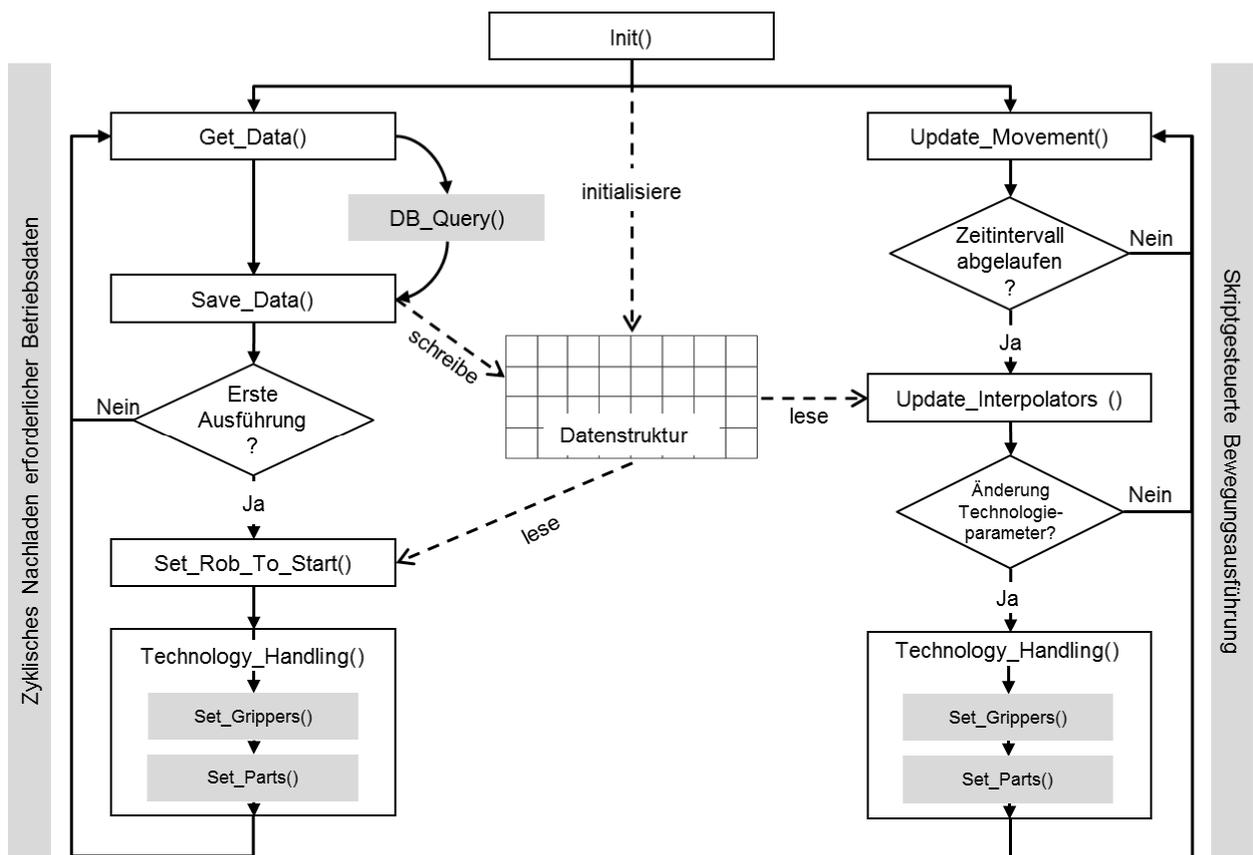


Abbildung 26: Überblick über die Systemarchitektur zur Animation virtueller Produktionsanlagen mit Handhabungsoperationen in webMon

3.3.8 Erweiterte Analysemöglichkeiten für webMon durch Integration eines HUD (Head-up-Display)

Um eine einfache Navigation zu erlauben sowie die Aussagekraft der dreidimensionalen Visualisierung von webMon weiter zu erhöhen, wird ein auf JavaScript basierendes HUD in die virtuelle Darstellung integriert. Hierunter werden Anzeigen verstanden, die dem Anwender unabhängig von der Blickrichtung an fixen Positionen dargestellt werden. Dadurch wird es möglich, die Weitergabe von textuellen und grafischen Informationen unmittelbar zu kombinieren und somit exakte Zahlenwerte für Betriebsdaten mit der Darstellung der 3D-Welt zu vereinen. Basierend auf diesem fusionierten Informationspool kann der Nutzer kritische Situationen in Fertigungszellen zielsicher bewerten, was einen Kritikpunkt der 3D-Darstellung im Vergleich zur Plot-Darstellung (vgl. Abschnitt 3.3.1) beseitigt. So kann er jederzeit genau nachverfolgen, ob z. B. bestimmte Schlüsselpositionen durch die Handhabungsgeräte exakt erreicht werden. Darüber hinaus werden im HUD Informationen dargestellt, die in der Visualisierung nicht sichtbar, jedoch für die korrekte Ausführung eines Montagevorgangs unabdingbar sind. Wird ein Prozesswerkzeug wie ein Schraubgerät gerüstet, so ist es z. B. von entscheidender Bedeutung, an welcher Stelle des Prozesses welches Schraubprogramm geladen ist. Diese Information ist mittels des HUDs parallel zur 3D-Animation verfügbar. Abbildung 27 zeigt das HUD der entwickelten Visualisierungslösung.

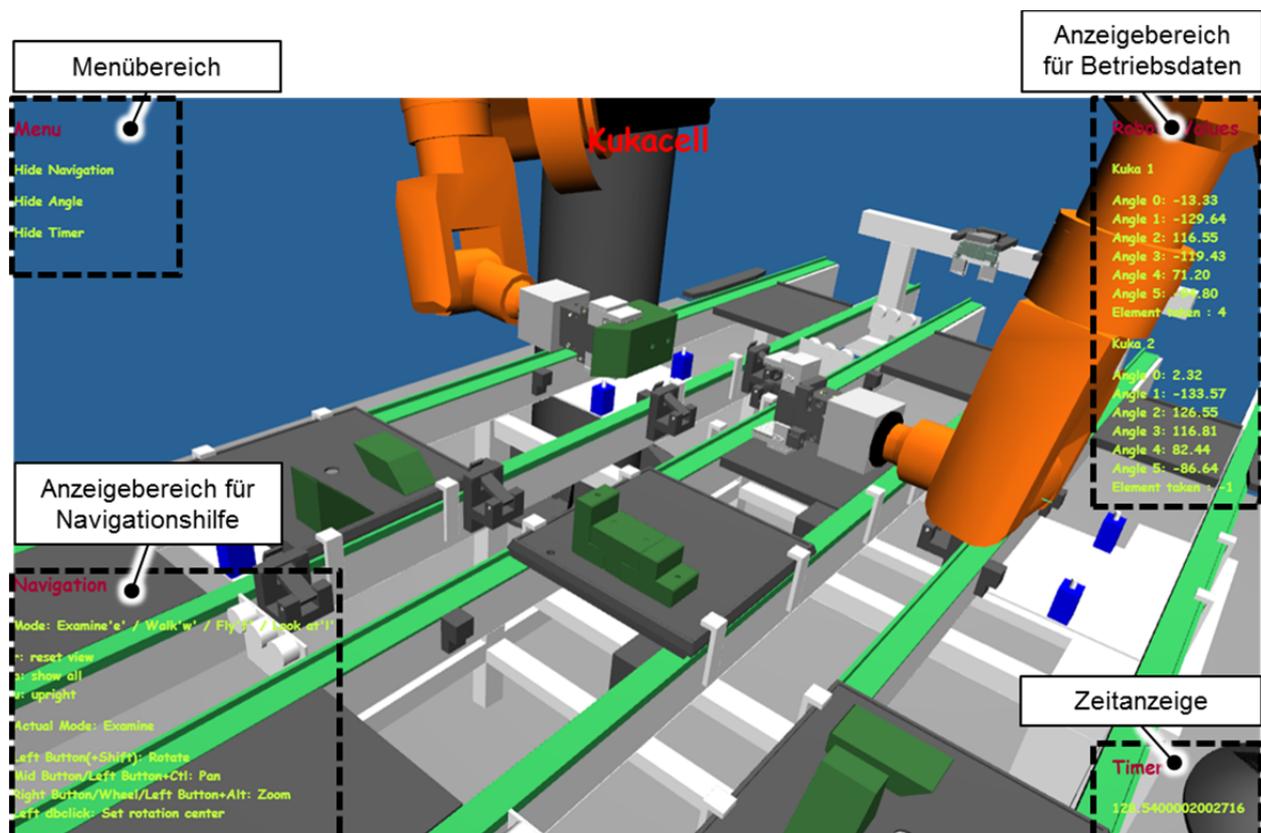


Abbildung 27: HUD der 3D-Visualisierung von webMon

Die einzublendenden Informationen kann der Anwender über einen im HUD integrierten Menübereich flexibel einstellen. Bei Aktivierung der Navigationshilfe wird die Tastenbelegung zur Selektion verschiedener Bewegungsmodi in der 3D-Welt dargestellt. Zudem erfolgt eine Anzeige von Tastenkombinationen, die für die Ausführung einer Blickwinkelveränderung im aktuell aktiven Modus erlaubt sind. Mittels dieser Hilfsfunktion wird eine einfache Zugänglichkeit zur Visualisierung für alle Anwender gewährleistet. Im rechten Bildbereich steht ein Anzeigenbereich zur Projektion aktueller Betriebsdaten zur Verfügung. Dabei werden dieselben Betriebsdaten angezeigt, die auch gerade von der Animationssteuerung zur Ausführung kommen. Dies ist möglich, da das HUD unmittelbaren Zugriff auf deren Datenbasis hat, was die Konsistenz von animierter Situation und angezeigten Werten sicherstellt. Zusätzlich kann der Anwender in einem weiteren Anzeigebereich den aktuellen Zeitstempel der Visualisierung anzeigen lassen.

3.3.9 Fehleranalyse mit webMon durch historischen Modus

Die bisher vorgestellte interaktive 3D-Visualisierung von webMon erlaubt eine umfassende Betrachtung der aktuellen Fertigungssituation. Dadurch alleine wird sie jedoch betrieblichen Anforderungen nicht gerecht. In der Regel wird die Fertigungssituation auf einer höheren Abstraktionsebene in Form aussagekräftiger Kennzahlen wie Ausbringungsmenge, Ressourcenverbräuchen und Taktzeiten, die pro Stunde, Tag, Monat oder Jahr erfasst werden, analysiert [64]. Detaillierte Betrachtungen einer Fertigungszelle erfolgen nur wenn Abweichungen in diesen Kennzahlen einen Fehler andeuten bzw. andere Überwachungsfunktionen diesen gemeldet haben. Um auch dieser Anforderung gerecht zu werden, ist die webMon-Visualisierungslösung so zu erweitern, dass sie die Abarbeitung von in der Datenbank gespeicherter Fertigungssequenzen ermöglicht.

Hierzu werden die in Abschnitt 3.3.7 erläuterten Funktionen *Init()* und *Get_Data()* der Bewegungssteuerung adaptiert. *Init()* wird um die zwei Parameter *Starttime* und *Stoptime* erweitert, die der Funktion übergeben werden können. Werden diese auf null belassen und *Init(0,0)* aufgerufen, so läuft die Visualisierung im zuvor vorgestellten Modus. Wird die Funktion jedoch in der Form *Init(Starttime, Stoptime)* aufgerufen, verwendet *Init()* nicht mehr die aktuelle Systemzeit für den erstmaligen Aufruf von *Get_Data()*, sondern die vorgegebene Startzeit. Während *Get_Data()* kontinuierlich Betriebsdaten nachlädt, erfolgt in diesem Fall eine Prüfung, ob die aus der Datenbank gelesenen Werte einen Zeitstempel größer *Stoptime* aufweisen. Ist dies der Fall, ist der vom Anwender spezifizierte Endpunkt der Visualisierung erreicht und das Nachladen weiterer Daten wird abgebrochen, was zum Anhalten der Animation führt. Die Auswahlmöglichkeit von Zeitbereichen ist dabei in die zuvor vorgestellte Betriebsdatenselektionsoberfläche des Systems integriert (vgl. Abbildung 28). Mittels der Schaltfläche „Zeitbereich visualisieren“ (vgl. Abbildung 28) wird ein JavaScript-Programm gestartet, welches die eingestell-

ten Datumsvariablen für Start- und Endzeit ausliest, in Zeitstempel konvertiert und mit diesen *Init()* aufruft.

The screenshot shows the webMon interface with a navigation bar and a data selection menu. The menu includes fields for 'Tabelle:', 'Spalten:', 'Anzahl Datensätze:', 'Client:', 'Geräte:', 'Sort absteig:', and 'Sort aufsteig:'. Below the menu is a 'Schaltfläche „Zeitbereich visualisieren“' and a 'data_table' with columns for 'Nr.', 'clientname', 'devicename', 'timestamp', 'varname', 'datatype', and 'data'. The table contains 5 rows of data. Callouts point to 'Auswahlfäche Startzeit', 'Auswahlfäche Stopzeit', and the 'Zeitbereich visualisieren' button.

Nr.	clientname	devicename	timestamp	varname	datatype	data
1	kukazelle	kuka_2	2008-01-25 12:12:08.00 (1201259528.0)	Client Timestamp	double	1201259528.94
2	kukazelle	kuka_2	2008-01-25 12:12:08.00 (1201259528.0)	ID	uchar	2
3	kukazelle	kuka_2	2008-01-25 12:12:08.00 (1201259528.0)	Achse 8	double	-1.206148
4	kukazelle	kuka_2	2008-01-25 12:12:08.00 (1201259528.0)	Achse 5	double	0.602914
5	kukazelle	kuka_2	2008-01-25 12:12:08.00 (1201259528.0)	Achse 4	double	0.173115

Abbildung 28: Selektive Auswahl von Zeitbereichen zur Darstellung in der 3D-Visualisierung von webMon im Rahmen der Fehleranalyse

Durch diese Erweiterung, die bei der Darstellung ebenso über die HUD-Funktionalität der Echtzeitvisualisierung verfügt, wird das Anwendungsspektrum der Systemlösung erheblich erweitert. Im Falle festgestellter Anlagenfehlfunktionen sind für Analysezwecke die Vorgänge vor dem Eintritt des Problems selektiv in bewegten Bildern nachvollziehbar und unterstützen so die zielsichere Ursachenfindung. Dadurch können Fehlersuchzeiten und somit auch Anlagenstillstände nachhaltig reduziert werden.

3.4 Zusammenfassung

Aufgrund der fortschreitenden Heterogenität, Dynamik und Globalisierung im Produktionsumfeld müssen Überwachungssysteme universell einsetzbar, flexibel konfigurierbar, breit verfügbar und anwenderfreundlich ausgelegt sein sowie umfangreiche und transparente Datenanalysen erlauben. In diesem Kapitel wurde mit webMon eine Systemlösung konzipiert und umgesetzt, die diesen vielfältigen Anforderungen umfassend Rechnung trägt. Um dies zu erreichen, wurde auf die in Abschnitt 2.4.3 identifizierten technologischen Befähiger aus dem IuK-Bereich und dort vor allem aus dem Webumfeld zurückgegriffen. Diese werden in allen entwickelten webMon-Systemkomponenten individuell kombiniert und appliziert.

Um die geforderte Universalität zu erreichen, wurden für das DE-System von webMon sowohl im Bereich der Nachrichtenformate als auch der Konfigurationsdateien flexibel nutzbare Datenstrukturen basierend auf XML definiert. Zudem wurde ein generisches Datenbankschema als Grundlage der webMon-Datenbank ausgewählt. Diese versetzt webMon in die Lage, unterschiedlichste Betriebsdaten ohne strukturelle Anpassungen zu verarbeiten und zu speichern. Ebenso sind die Frontend-Applikationen Betriebs-

datenselektionsmenü mit tabellarischer Informationsdarstellung, SVG-basierter Hallenplan und WebGL-basierte 3D-Visualisierung von webMon anwendungsfallneutral ausgelegt. Insbesondere die Verwendung der offenen Standards SVG und X3D in webMon unterstützt hier die Forderung nach Universalität. Einer hohen Informationsgeschwindigkeit und breiten -verfügbarkeit tragen der unmittelbare webbasierte Systemzugriff ohne Plug-Ins sowie die hohe Aktualität der dargestellten Informationen Rechnung. Letztere wird durch Anwendung des AJAX-Prinzips in webMon erreicht. Dieses gewährleistet die automatische Integration neu verfügbarer Betriebsdaten in bereits geladene Seiten sowie das in die WebGL-Welt integrierte kontinuierliche Nachladen und Animieren aktueller Betriebsdaten. Die Ortsunabhängigkeit ist durch den Einsatz plattformübergreifend verfügbarer Webtechnologien wie SVG und WebGL sichergestellt, die vor allem auch von Smartphone und Tablet-Umgebungen unterstützt werden.

Durch diverse bereitgestellte webMon-Frontendapplikationen zur Visualisierung, Analyse und Alarmierung sowie deren Selektionsmöglichkeiten sind ferner Detailgrad und Darstellungsart der Informationen flexibel steuerbar. Dies reicht von einer grafischen Alarmmeldung im Überblicksplan auf Werksebene über das Betriebsdatenselektionsmenü und der Webcam-Integration bis zur Analyse des Verlaufs einzelner Betriebsdaten im Zeitverlauf durch die Plot-Darstellung. Insbesondere die nativ im Browser realisierte 3D-Visualisierung von webMon auf Basis von WebGL unter Verwendung von X3DOM als Middleware bietet hier eine leistungsstarke Unterstützungsfunktion. Sie beinhaltet eine Darstellungsmöglichkeit von Montagevorgängen in Kombination mit einem HUD und einem Modus zur nachgelagerten Fehleranalyse. Die hier zum Einsatz kommende Technologiekombination wurde anhand eines mehrstufigen Technologievergleichs systematisch identifiziert. Für eine lückenlose Datenbasis an erforderlichen Betriebsdaten sorgen umfassende Konfigurationsmöglichkeiten aufseiten des DE-Clients. Dies gewährleistet in Verbindung mit den diversen Repräsentationsformen der grafischen Datenvisualisierung eine jederzeit auf die Bedürfnisse des Anwenders angepasste Informationsdarstellung.

In allen webMon-Systemkomponenten wurde konsequent ein modularer Ansatz verfolgt, der auf offen standardisierten Technologien aufbaut. Dies stellt die Grundlage dar, um mit webMon eine effiziente und jederzeit situativ adaptierbare Systemlösung anzubieten. Zudem führt dies zu einer Aufwandsreduktion beim Aufbau derartiger Systeme durch Wiederverwendungsmöglichkeiten von Modulen, was die Basis für deren kostengünstige Applikation ist.

4 Optimierung menschzentrierter Diagnose- und Therapie- strategien durch webbasierte Ansätze

Ebenso wie Systeme zur Unterstützung der Überwachung müssen sich auch Ansätze zur Diagnose und Therapie an die Erfordernisse eines hochdynamischen Produktionsumfelds anpassen. Wie bereits in Kapitel 2 ausgeführt, nimmt in diesem Zusammenhang die Verwaltung anwendungsfallspezifischen Wissens eine herausragende Bedeutung ein. Deshalb wird im Folgenden zunächst der Faktor Wissen und dessen Management detailliert betrachtet. Im Anschluss werden mögliche softwaretechnische Unterstützungsmöglichkeiten zur Erfüllung identifizierter Anforderungen aufgezeigt, bewertet und hinsichtlich ihrer Anwendungspotentiale analysiert. Ausgehend von den Ergebnissen dieser Analyse werden Lösungsansätze zur effizienten Unterstützung der menschzentrierten Diagnose und Therapie konzipiert und implementiert. Hierbei wird zudem die unmittelbare Integration bewährter Methoden im Diagnoseumfeld wie FMEA oder One-Point-Lessons in die entwickelten Systeme aufgezeigt.

Kapitel 4 fokussiert dabei auf die Entwicklung von Systemansätzen, bei denen der Mensch im Mittelpunkt steht und die zentrale Rolle bei Verarbeitung und Nutzung des Wissens einnimmt. Die dadurch entstehenden Wissenssammlungen stellen die Basis für einen effizienten Aufbau von wissensbasierten Diagnose- und Therapiesystemen dar. Diese weiterführenden Ansätze der künstlichen Intelligenz werden anschließend in Kapitel 5 betrachtet. Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden neben herkömmlichen Wikis ebenfalls semantische Wikis adressiert. Letztere zeigen unter Verwendung von Ontologien eine Möglichkeit auf, wie die Wissensmodellierung in Wikis so gestaltbar ist, dass nicht nur die Effizienz menschlicher Informationszugriffe gesteigert werden kann. Vielmehr sind sie die Grundlage, um die enthaltenen Informationen auch für einen maschinellen Zugriff durch wissensbasierte Systeme zu strukturieren.

4.1 Wissen und dessen Management

Im vorausgegangenen Abschnitt wurde sichtbar, dass für die Diagnose und Therapie von Produktionsanlagen der Verwaltung von Wissen eine herausragende Bedeutung zukommt. Auch für den gesamten betrieblichen Produktionsprozess hat der Faktor Wissen mittlerweile eine so hohe Bedeutung erlangt, dass er von einigen Autoren bereits neben der Arbeit, den Betriebsmitteln und den Werkstoffen als vierter Produktionsfaktor und oftmals sogar entscheidender angesehen wird [205][209]. Grundlage dieser Argumentation ist, dass die übrigen Faktoren mittlerweile auf ähnlichem Niveau weltweit jedem zur Verfügung stehen [205]. Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden zunächst die Begriffe des Wissens sowie des Wissensmanagements eingegrenzt und ein Überblick über die Zusammenhänge in dieser Disziplin gegeben. In den sich anschließenden Abschnitten wird dann das Wissensmanagement in Bezug zur Diagnose gesetzt.

4.1.1 Begriffseingrenzung Wissen

Eine Definition von Wissen, die diesen Begriff gleichzeitig von den Begriffen der Information und der Daten abgrenzt, die ebenso im Umfeld des Wissensmanagements gebräuchlich sind, gibt [187] (vgl. Abbildung 29). Die Basiseinheit der Strukturierung stellen dabei Zeichen dar. Sie sind die kleinsten zu verarbeitenden Elemente und bestehen in der Regel aus einem Zeichenvorrat an Buchstaben, Ziffern und Sonderzeichen. Unter Verwendung einer Syntax, deren Aufgabe es ist, Zeichen in eine definierten Abfolge zu bringen, entstehen aus einzelnen Zeichen oder Zeichenketten Daten. Werden Daten mit Verarbeitungsinformationen versehen und in Kontext zu einem Problembezug interpretiert, so entsteht Information. Wissen bezeichnet die Vernetzung von Information mit weiteren Informationen und Kenntnissen über deren Verwendung. Basierend auf diesen Festlegungen definiert [182] Wissen als die Gesamtheit der Kenntnisse und Fähigkeiten, die Individuen zur Lösung von Problemen anwenden. Dies beinhaltet theoretische Erkenntnisse, praktische Alltagsregeln und Handlungsanweisungen. Es baut auf Daten und Informationen auf, ist im Gegensatz zu diesen jedoch immer an Personen gebunden. Daraus folgt, dass Wissen subjektives, zweckrelatives sowie kontext- und aspektabhängiges Gut ist [187].

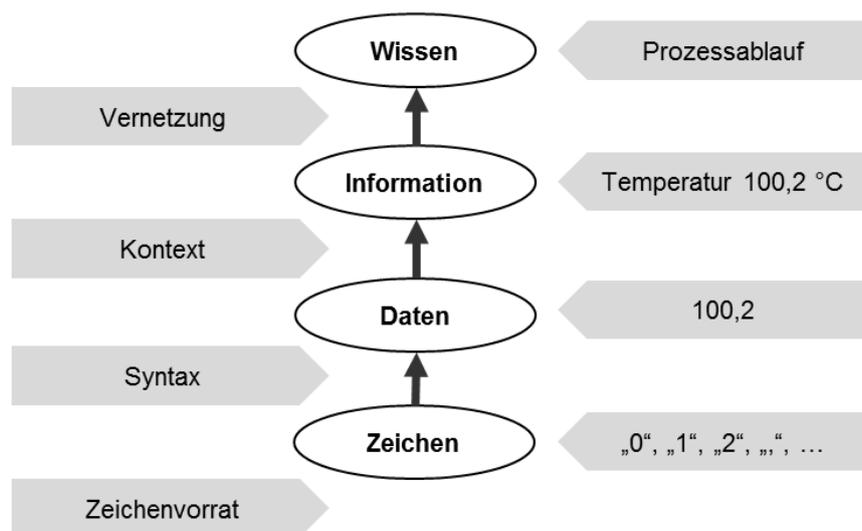


Abbildung 29: Begriffshierarchie bei der Strukturierung des Wissensbegriffs (in Anlehnung an [187])

4.1.2 Explizites versus implizites Wissen

In der Literatur wird Wissen unter Verwendung von Gegensatzpaaren wie intern und extern oder individuell und organisatorisch in verschiedene Arten eingeteilt [69]. Die wichtigste Differenzierung erfolgt in diesem Zusammenhang nach explizitem und implizitem Wissen [79]. Der Grund hierfür ist der hohe Beitrag des impliziten Wissens von Mitarbeitern eines Unternehmens zum Produktionsfaktor Wissen [205].

Explizites Wissen ist Wissen, das sich verbalisieren lässt und sprachlich eindeutig mitteilbar ist. Es kann in Form von Sätzen beschrieben, diskutiert und transportiert werden. Aufgrund dieser Eigenschaften ist die einfache Weitergabe an andere Menschen sowie eine Erfassung durch logisches Denken möglich. Typische Repräsentationsformen expliziten Wissens sind Textdokumente, Datenbanken oder mathematische Formeln. Im Gegensatz dazu steht das implizite Wissen, das nicht vollständig in Worten ausgedrückt und erfasst werden kann, wodurch es sich einer formalen Erfassung entzieht. Aus diesem Grund wird es auch als verborgenes Wissen bezeichnet. Es umfasst das Können, die Handlungsrouitinen, die Überzeugungen und die mentalen Schemata einer Person, die auf deren individuellen Erfahrungen, Vorstellungen, Werten, Idealen und Emotionen basieren. Ein Beispiel für die Anwendung von implizitem Wissen ist das Gefühl und Gespür eines erfahrenen Maschinenführers bei der Interpretation von Geräuschen einer Maschine zum Zwecke der Fehlerursachenfindung. [79][205]

4.1.3 Begriffseingrenzung Wissensmanagement

Für den Begriff des Wissensmanagements existieren vielfältige Definitionen, die teils unabhängig voneinander entstanden sind, keinen direkten Bezug zueinander nehmen und deshalb auch nicht explizit aufeinander aufbauen [79]. Eine Definition, die in ihrer Ausrichtung mit der Zielrichtung dieser Arbeit besonders harmonisiert, findet sich in [101]. Dort wird Wissensmanagement als ein Prozess beschrieben, dessen Aufgabe es ist, kontinuierlich neues Wissen zu erzeugen, im Unternehmen zu verteilen und schnell in neue Produkte, Dienstleistungen, Technologien und Systeme zu integrieren [101].

Im Rahmen dieses Prozesses kommt der Unterscheidung von explizitem und implizitem Wissen eine hohe Bedeutung zu, da die Handhabung dieser Wissensarten unterschiedliche Managementmethoden erfordert. Während explizites Wissen losgelöst vom Individuum gezielt verbreitet werden kann, sind für die Verbreitung von implizitem Wissen verhaltenssteuernde Maßnahmen erforderlich, die Personen zum Wissensaustausch anregen [84]. Vor diesem Hintergrund wird in [101] das SEKI-Modell entwickelt, um einen kontinuierlichen Wissensumwandlungsprozess zwischen implizitem und explizitem Wissen in Organisationen aufzusetzen. Es gliedert sich in folgende Schritte:

- **Sozialisation (implizit→implizit):** Zwei Personen tauschen implizites Wissen direkt aus. Eine Person beobachtet eine andere bei einer Tätigkeit und lernt durch Nachahmung. Das Gelernte wird dabei Teil des impliziten Wissens der anderen Person und ist nicht einer ganzen Organisation zugänglich.
- **Externalisierung (implizit→explizit):** Dieser Schritt ist innerhalb des SEKI-Modells der Schlüssel um Wissen zu erzeugen, das für eine gesamte Organisation zugänglich ist. Implizites Wissen wird in einem Transformationsprozess durch Analogien, Modelle, Hypothesen und Konzepte ausgedrückt und für alle zugänglich dokumentiert.

- **Kombination (explizit→explizit):** Neues explizites Wissen wird durch das Zusammenfügen von bereits bekanntem Wissen erzeugt.
- **Internalisierung (explizit→implizit):** Prozess, der dem Learning-by-Doing ähnlich ist. Vorhandenes explizites Wissen wird von Personen durch Aufnahme, Ergänzung und Neuordnung internalisiert. [187]

Das durch diesen Prozess geförderte Wechselspiel zwischen implizitem und explizitem Wissen führt zur Entstehung neuen Wissens, der Erweiterung bestehenden Wissens sowie der Verbreitung des Wissens. Um eine durchdringende Verbreitung des Wissens über Gruppen, Abteilungen, Divisionen und ggf. über Unternehmensgrenzen hinweg zu erreichen, sind die Schritte mehrmals mit variierenden Teilnehmerkreisen und auf unterschiedlichen Ebenen zu durchlaufen (vgl. Abbildung 30). [79]

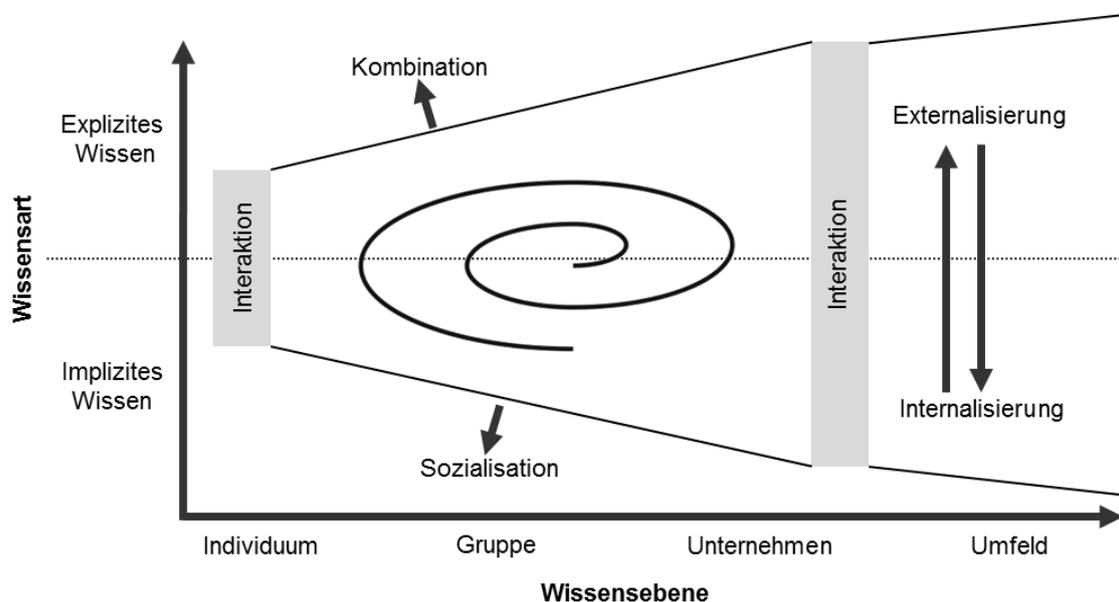


Abbildung 30: Wissensspirale zur durchdringenden Wissensverbreitung im Unternehmen und über Unternehmensgrenzen hinweg (in Anlehnung an [79][107])

Hierbei ist für die langfristige Speicherung von Wissen in einer Organisation nur explizites Wissen von Bedeutung. Nur dieses kann in Dokumenten, Archiven und Datenbanken abgelegt werden und ist somit unabhängig von der Verfügbarkeit von Individuen. Unter Berücksichtigung der erheblichen Bedeutung von Wissen als Produktionsfaktor für moderne Unternehmen können für die Unternehmenspraxis folgende Aufgaben abgeleitet werden:

- Förderung der Externalisierung von Wissen
- Verwaltung des expliziten Wissens
- Anwendung expliziten Wissens bei der Durchführung betrieblicher Aufgaben [79]

4.1.4 Stand der Technik und Handlungsbedarf im Bereich des Wissensmanagements für die menschzentrierte Diagnose und Therapie

Eine Betrachtung der aktuellen Situation im Umfeld der Diagnose und Therapie hinsichtlich des Wissensmanagements zeigt deutliche Defizite auf. Obwohl die effiziente Erzeugung, Verwaltung und Anwendung diagnoserelevanten expliziten Wissens eine Softwareunterstützung nahezu unabdingbar macht, ist diese im Produktionsumfeld nicht selbstverständlich. So ist es immer noch verbreitet, in diesem Zusammenhang lediglich auf organisatorische Konzepte wie betriebliches Vorschlagswesen, Gruppenarbeit, Gruppenmeeting, Themengruppen, Meister-Lehrling-Beziehungen und Schulungen zu setzen [205]. Diese Ansätze haben jedoch ihren Fokus auf der Sozialisation und fördern die Entstehung impliziten Wissens. Hierdurch bleibt allerdings die Problematik bestehen, dass Wissen immer an spezielle Personen oder Personengruppen gebunden ist. Wissen wird somit weder breit im Unternehmen verfügbar noch besteht jederzeit ein schneller Zugriff darauf.

Handlungsbedarf zur Beseitigung bestehender Defizite ist in den letzten Jahren in den Fokus der Unternehmen gerückt. Gemäß einer Studie zum Service- und Instandhaltungsmanagement sehen Unternehmen in der Gewährleistung einer schnellen Reparatur durch effizientes Vorgehen das höchste Potential, um kostengünstig eine hohe Verfügbarkeit zu erreichen [208]. Dabei wird neben der Erfassung, Auswertung und Bereitstellung von Betriebsdaten sowie dem Ersatzteilmanagement besonders wissensintensiven Prozessen eine hohe Bedeutung zugewiesen. Diese umfassen in absteigender Reihenfolge der Bedeutung, die die Studienteilnehmer aus [208] den jeweiligen Maßnahmen zuschreiben:

- Dokumentation der Instandhaltungserfahrungen
- Bereitstellung von Handlungsanweisungen
- Wissensaustausch zwischen Herstellern, Anwendern und Service-Dienstleistern

Werden diese Maßnahmen konsequent durchgeführt, sind Reparaturzeiten signifikant reduzierbar und ein Produktivitätszuwachs ist erreichbar [74]. Dazu fordert [74] in Analogie zu den „6 R der Logistik“ (vgl. [34]):

„das richtige Wissen zur richtigen Zeit am richtigen Ort in der richtigen Qualität und Quantität der richtigen Person anzubieten.“

Im Industrie- und Forschungsumfeld erfolgte in Konsequenz in den letzten Jahren die Applikation vielfältiger IT-Lösungen wie E-Mails, Groupware, Data Warehouses, Dokumenten- sowie Content-Management oder Portalsysteme zur Beseitigung der beschriebenen Problematik [114]. Zudem sind Wikis in den Fokus für eine Anwendung im fertigungsnahen Umfeld gerückt [55][205]. Die Konsequenz ist eine große Systemvielfalt im

Bereich des Wissensmanagements, für die die Komplexität und Vielfalt der Aufgaben in diesem Feld ursächlich ist [79]. Dies führt wiederum dazu, dass aufgrund der hohen Menge an differenzierten potentiellen Lösungsansätzen oftmals nicht klar identifizierbar ist, auf welche Systemkategorie wann zurückzugreifen ist [114].

4.2 Bewertung von Softwaretechnologien des Wissensmanagements

Wie im vorausgegangenen Abschnitt angedeutet, steht im Bereich des Wissensmanagements eine Vielzahl an Systemlösungen zur Verfügung (vgl. [79]). Um hieraus für das Anwendungsszenario der menschenzentrierten Diagnose und Therapie im Rahmen dieser Arbeit einen geeigneten Lösungsansatz identifizieren zu können, werden diese in Anlehnung an [79] in Systemkategorien eingeteilt und dann hinsichtlich ihrer Unterstützung signifikanter wissensintensiver Abläufe bewertet (vgl. Tabelle 11). Dabei kommen aufbauend auf den Aufgaben der betrieblichen Wissensverwaltung aus Abschnitt 4.1.3 sowie den identifizierten Anforderungen aus Abschnitt 4.1.4 folgende Bewertungskriterien zur Anwendung:

- **Dokumentation von Wissen:** Externalisierung von Wissens-elementen
- **Gemeinsame Weiterentwicklung von Wissen:** Ergänzung und Aktualisierung von Wissens-elementen im unternehmensinternen und -externen Kontext
- **Nutzung von Wissen:** Suche und Anwendung von Wissens-elementen

Eine erste anwendbare Softwaretechnologie stellt Groupware dar. Hierunter werden Systeme wie E-Mail, Newsgroups, Audio- und Videokonferenzsysteme, Instant Messaging, elektronische Meeting-Systeme oder Workflowmanagementsysteme zusammengefasst. Je nach ihrem Fokus sind diese in die Kategorien Kommunikations-, Kollaborations- oder Koordinationssysteme einzuordnen [79]. Auch wenn ihr Einsatz in modernen Unternehmen an vielen Stellen sinnvoll ist, um die Herausforderungen einer wissensintensiven, zeitlich und räumlich verteilten Arbeitswelt zu lösen, erfüllen sie die speziellen Bedürfnisse im Umfeld der Diagnose und Therapie von Produktionsanlagen nur begrenzt. Abhängig von der jeweiligen Systemausprägung sind sie nicht oder nur mäßig geeignet die signifikanten Prozesse der Wissensdokumentation, -speicherung, -weiterentwicklung und -suche zu unterstützen. So kann z. B. mittels E-Mails oder Chats Wissen externalisiert und in Form von E-Mail-Archiven oder Chat-Logbüchern gespeichert sein. Eine Suche und gemeinsame Weiterentwicklung ist jedoch nur mit hohem manuellem Aufwand zur Strukturierung der Inhalte sowie einer zentralen Speicherung aller relevanten Inhalte möglich. Bei anderen Ansätzen wie Audio- und Videokonferenzsystemen oder elektronischen Meeting-Systemen wird im Rahmen des gemeinsamen Austausches Wissen übertragen und erweitert, allerdings findet keine Dokumentation dieses Wissens statt. Damit steht es auch nicht für eine spätere Suche und Anwendung zur Verfügung. Workflowmanagementsysteme hingegen fokussieren

auf der Spezifikation von Abläufen, dokumentieren jedoch nicht im Detail das zur Ausführung der Anweisungen erforderliche Wissen.

Führungsinformationssysteme stellen eine weitere Möglichkeit der softwaretechnischen Unterstützung des Wissensmanagements dar. Hierunter werden Systeme des Data-Warehousing oder des Data-Minings zusammengefasst. Für das skizzierte Anwendungsszenario sind diese jedoch nicht geeignet, da sie eine andere Zielsetzung verfolgen. Ihre Aufgabe ist die Unterstützung des mittleren und oberen Managements durch Integration und Zusammenfassung operativer Unternehmensdaten sowie der daraus resultierenden Kennzahlengenerierung [79].

Inhaltsorientierte Systeme, denen z. B. Dokumentenmanagementsysteme und Content-Managementsysteme zugeordnet werden, verfolgen das Ziel, den vollständigen Lebenszyklus kodifizierter Information zu unterstützen [79]. Dies umfasst auch die im Fokus dieser Arbeit stehenden Vorgänge der Dokumentation und Nutzung von Wissens-elementen in Form von Dokumenten, Bildern und Videos. Kennzeichnend für diese Systeme ist allerdings auch eine strikte Einteilung der involvierten Personen in Nutzergruppen mit definierten Rechten [2]. Dadurch wird die gemeinsame Weiterentwicklung von Wissen durch einen breiten Nutzerkreis aufgrund geregelter Änderungsworkflows erschwert und gebremst, was sich negativ auf die Partizipationsmotivation der beteiligten Anwender auswirkt.

Tabelle 11: Vergleich ausgewählter Softwaretechnologien des Wissensmanagements

Kriterium	Group-ware-	Führungs-informations-systeme	Inhalts-orientierte Systeme	Social Software	Systeme der KI
Dokumentation von Wissen	-/o	-	+	+	o
Gemeinsame Weiterentwicklung von Wissen	-/o	-	o	+	-
Nutzung von Wissen	-/o	-	+	+	Software- und nicht mensch-zentriert

Bewertungsstufen: -: schlecht; o: neutral; +: gut

Social Software ist ein Sammelbegriff für Systeme, die Grundansätze der Kommunikations- und Kollaborationssysteme aufgreifen und um den Web 2.0 Gedanken erweitern [79]. Konkrete Systemausprägungen sind z. B. Wikis oder Blogs. Der Web 2.0 Gedanke baut auf einer Weiterentwicklung und Kombination bekannter Webtechnologien auf und hat das Ziel die Interaktion anstelle des bloßen Konsums von Inhalten zu fördern [33]. Durch diese Ansätze wird es möglich, die kollektive Intelligenz von Personengruppen nutzbar zu machen [9]. Diese Zielrichtung prädestiniert Social Software für einen Einsatz im Unternehmensumfeld zur Externalisierung von Wissensinhalten sowie deren kollaborativen Weiterentwicklung. Die Systemlösungen bieten einfach strukturierte Be-

nutzeroberflächen, die einen leichten Einstieg erlauben und sind grundsätzlich so konzipiert, dass jeder Inhalte erstellen, verändern oder kommentieren kann. Dies hat zur Folge, dass beliebige Personen im Unternehmen Wissens Elemente aufwandsarm externalisieren können. Darüber hinaus sind Weiterentwicklungsabläufe schnell und schnittstellenarm darstellbar. Ebenso bieten die Systeme Suchfunktionen zum Auffinden von Inhalten und unterstützen durch ihre strukturierte Darbietung von Informationen auch deren Anwendung. Studien weisen zudem darauf hin, dass der Einsatz von Social Software und hier insbesondere der von Wikis die Motivation einer Anwendergruppe bei der Ausführung ihrer Tätigkeiten deutlich steigern kann. Konventionelle Werkzeuge wie Schulungen oder Workshops bzw. Web 1.0 Technologien wie E-Mail-Newsgroups schneiden hier deutlich schlechter ab [191].

Zu den Systemen der künstlichen Intelligenz werden softwaretechnisch komplexe Systemlösungen wie Expertensysteme oder Agentensysteme gezählt (vgl. Abschnitt 2.5). Experten- und Agentensysteme erlauben die Dokumentation von Wissens Elementen unter Verwendung spezieller Strukturen und Menüoberflächen, die diese Systeme üblicherweise zur Modellierung ihrer Wissensbasen anbieten. Allerdings erfordert dies zum Teil nicht unerheblichen Einarbeitungsaufwand in die Modellierungswerkzeuge. Ebenso ist der Zugriff auf diese Werkzeuge aufgrund ihrer Komplexität in der Regel Wissensingenieuren vorbehalten und nicht für alle Anwender möglich, was die gemeinsame Weiterentwicklung erschwert. Diese ist nur indirekt, über die Weitergabe neu zu hinterlegender oder anzupassender Informationen an die Wissensingenieure darstellbar. Der Aspekt der Suche und Anwendung von Wissen wird von diesen Systemen zwar erfüllt, jedoch in einem anderen Kontext. Es findet keine unmittelbare Nutzung des Wissens durch eine Person statt. Vielmehr wendet das Expertensystem das gespeicherte Wissen an, um dem Menschen geeignete Handlungsvorschläge zu liefern, die danach durch diesen ausgeführt werden. Im Falle von Agentensystemen ist auch die Anwendung des Wissens zum Teil automatisiert. Systeme der künstlichen Intelligenz nehmen in dieser Gegenüberstellung eine Sonderrolle ein. Ebenso wie die übrigen Systemkategorien sind sie, wie dargestellt, potentiell geeignet menschzentrierte wissensintensive Prozesse zu unterstützen. Jedoch liegt ihr Fokus in der rechnergestützten Anwendung des Wissens, was auch den Grund für ihre mäßige Bewertung im Rahmen dieses Vergleichs ist. Unter der Voraussetzung, dass zuvor eine Externalisierung von Wissen stattgefunden hat, sind sie allerdings eine sehr leistungsfähige Systemkategorie. So ist mit diesem Ansatz ein Vorgehen über die Unterstützung der menschzentrierten Diagnose hinaus bis hin zur autonomen Störungsursachenfindung und Maßnahmenauswahl möglich. Aufgrund dieses hohen Einsatzpotentials werden sie im folgenden Kapitel intensiver betrachtet (vgl. Kapitel 5). Im Rahmen dieses Kapitels wurden sie jedoch nur hinsichtlich der Unterstützung menschzentrierter Tätigkeiten bewertet, um darzustellen, dass ihre alleinige Anwendung zur Überwindung des Status quo mit seinen Unzulänglichkeiten nicht zielführend ist.

Dieser Vergleich zeigt auf, dass Ansätze aus dem Umfeld der Social Software eine hohe Eignung aufweisen, die Anforderungen eines softwarebasierten Wissensmanagements zur Diagnose- und Therapieunterstützung im Produktionsumfeld zu erfüllen. Speziell Wikis, die die Förderung der Zusammenarbeit und der gemeinsamen Erstellung von Inhalten in den Mittelpunkt stellen, sind hierzu in hohem Maße geeignet. Die Anwendung von Blogs ist in diesem Zusammenhang weniger angebracht, da sie den Fokus auf die Kommunikationsunterstützung legen [9].

4.3 Strukturierter Wiki-Einsatz zur Unterstützung von Diagnose und Therapie

Ausgehend von den Ergebnissen des zuvor erfolgten Technologievergleichs wird nachfolgend mit Diki (Diagnoseunterstützungssystem auf Wiki-Basis) eine Systemlösung zur Unterstützung von Diagnose und Therapie auf Basis der Wiki-Architektur konzipiert und aufgebaut. In diesem Zusammenhang wird auf Strukturierungskonzepte wie PPR-Modell (Produkt Prozess Ressource), FMEA oder One-Point-Lessons zurückgegriffen, um den speziellen Anforderungen der Diagnose an Dokumentation, Suche und Anwendung von Wissen Rechnung zu tragen.

4.3.1 Grundkonzept und Funktionen von Wikis

Ein Wiki ist aus technischer Sicht ein Hypertext-System, das den Web 2.0 Gedanken zur Grundlage hat [79]. So verfolgt es dessen typische Zielrichtung in Form von Anwenderfreundlichkeit, Einfachheit und Offenheit sowie der Förderung von Partizipation, Kollaboration und Motivation [9][33]. Mittlerweile existieren mehr als hundert Basissysteme, die diesen Gedanken aufgreifen [32]. Die heute bekannteste Anwendung eines Wikis stellt die Online-Enzyklopädie Wikipedia dar [217]. Im Folgenden werden Grundkonzept und Funktionsumfang von Wikis näher erläutert.

Grundkonzept

Wiki-Systeme fokussieren auf die folgenden zentralen Ideen:

- Jeder Benutzer darf neue Seiten erstellen bzw. bestehende bearbeiten.
- Das Erstellen und Verändern von Seiten ist so leicht wie möglich zu gestalten.
- Informationen werden in Seiten strukturiert.
- Inhalte werden via Hyperlinks verknüpft.
- Wikis sind niemals abgeschlossen sondern befinden sich in einem Prozess der kontinuierlichen Weiterentwicklung. [9][80]

Um die Realisierbarkeit dieser Ideen sicherzustellen, verfügen Wikis über eine einfach zu erlernende Auszeichnungssprache, die die Definition von Struktur, Format und Verlinkungen einer Wiki-Seite erlaubt. Die Verlinkungsmöglichkeiten umfassen Links auf

weitere Wiki-Seiten, externe Webseiten sowie diverse Multimediainhalte wie Bilder oder Videos.

Typischer Funktionsumfang von Wiki-Systemen

Neben einer Auszeichnungssprache verfügen viele der aktuellen Wiki-Systeme über weitere Features, die die Arbeit mit dem System sowie die Verwaltung der Wissensinhalte vereinfachen. Typische Zusatzfunktionen umfassen:

- Grafischer Editor
- Sandbox
- Upload-Funktion für Medien
- Versionsverwaltung inkl. Differenzanzeige
- Volltextsuche
- Diskussionsseite
- Benutzerrechteverwaltung [3][32]

Diese Features zielen darauf ab, die Erstellung und Suche von Inhalten so einfach wie möglich zu gestalten. Zudem wird dadurch der Prozess der Erweiterung von Inhalten strukturiert und nachvollziehbar gestaltet. Daneben sind Zusatzfunktionen vorhanden, die Benutzerzugriff und -rechte im Wiki regeln. Im Leistungsumfang dieser Funktionen divergieren die existierenden Wiki-Systeme sehr stark. Während Systeme wie MediaWiki gemäß des Web 2.0 Gedankens auf totale Offenheit setzen und nur rudimentäre Einstellmöglichkeiten in dieser Hinsicht bieten, gibt es andere Systeme wie DokuWiki oder TikiWiki mit einem fein strukturierten Rechtesystem [3]. Letztere Systeme sind somit besonders für einen unternehmensinternen Aufbau eines Wikis geeignet, in dem auch vertrauliche Informationen hinterlegt werden sollen.

Eine spezielle Rolle nehmen semantische Wikis ein. Diese erweitern das bisherige Wiki-Konzept um die Möglichkeit semantischer Annotationen, um für eine maschinelle Verarbeitbarkeit des Wissens zu sorgen. Diese besonders mächtige Erweiterung konventioneller Werkzeuge wird in Abschnitt 4.4 im Detail analysiert.

4.3.2 Sammlung und Strukturierung diagnoserelevanter Wissens Elemente im Produktionsumfeld zur Integration ins Diki

Zum effizienten Betrieb von Produktionsanlagen sind vielfältige Informationen erforderlich. Diese können ebenso wie die Strukturierung von Planungsdaten im Rahmen des PLM-Konzepts durch ein PPR-Modell in die Kategorien Produkt-, Prozess- und Ressourcendaten eingeteilt werden [86]. Diese drei Kategorien decken sich zudem auch mit den typischen Ebenen der technischen Diagnose (vgl. Abschnitt 2.3), was diesen An-

satz für die Informationsstrukturierung im Diki prädestiniert. Für die technische Diagnose sind dabei folgende Wissensselemente des Produktionsbetriebs relevant:

- **Produkt:** Komponenten, Qualitätsmerkmale, Fehlerbilder, Fehlerursachen und Maßnahmen
- **Prozess:** Abläufe, Einflussfaktoren, Wirkzusammenhänge, Qualitätsmerkmale, Fehlerbilder, Fehlerursachen und Maßnahmen
- **Ressource:** Geräte, Einsatzbereiche (Prozesse), Inbetriebnahme, Überwachung, Wartung, Fehlerursachen und Maßnahmen

In der vorausgehenden Strukturierung ist das Themenfeld Fehlerursachen und Maßnahmen in allen drei Kategorien enthalten, da diese Kategorien auch den Ebenen der Diagnose (vgl. Abschnitt 2.3) entsprechen. Informationen bezüglich dieser Wissensselemente sind in Unternehmen entweder Teil des impliziten Erfahrungswissens der Beschäftigten oder in Form diverser Dokumente bereits explizit vorhanden. Dabei können folgende Dokumente als Informationsquellen dienen:

- Datenblätter
- Bedienungsanleitungen
- Konstruktionszeichnungen
- Maschinenlogbücher bzw. Schichtprotokolle

Die Herausforderung für das Wissensmanagement besteht darin, die in diesen Dokumenten gesammelten Informationen für alle Mitarbeiter strukturiert und leicht zugreifbar bereitzustellen. Ebenso müssen die Mitarbeiter motiviert werden ihr implizites Wissen über das PPR-Umfeld bereitzustellen, um eine kontinuierlich wachsende Wissenssammlung zu gewährleisten.

4.3.3 Konzeption und Umsetzung einer geeigneten Architektur für Diki zur Verwaltung diagnoserelevanter Wissensselemente im Produktionsumfeld

Die Modellierung der im vorausgegangenen Abschnitt identifizierten Wissensselemente im Diki wird durch ein mehrstufiges Konzept umgesetzt. Abbildung 31 zeigt eine mögliche Strukturierung der Informationen mittels einer Portalseite. In einer dreispaltigen Darstellung, die auf den Kategorien Produkt, Prozess und Ressource des PPR-Modells beruht, werden Hyperlinks auf Artikel zu einzelnen Objekten der jeweiligen Kategorien sowie deren oberster Artikelgliederungsebene angeboten. Durch die Verwendung einer derartigen Portalseite gewinnen Anwender einen transparenten Überblick über die im Diki hinterlegten Inhalte, was durch eine ausschließliche Nutzung der Suchfunktion nicht erfolgt.

Hyperlinks auf Artikelseiten, die bereits Informationen enthalten, werden im Diki anders als Artikel angezeigt, die angelegt, allerdings nicht gefüllt sind. Dadurch kann der Benutzer sofort erkennen, ob das gesuchte Themenfeld bereits mit Inhalten versehen ist. Des Weiteren besteht hierdurch ein unmittelbarer Zugriff auf alle Diagnoseebenen. Im Falle sehr homogener oder heterogener Unternehmensaktivitäten ist die Struktur der Portalseite ausgehend von dieser Basiskonfiguration individuell anzupassen. Bei sehr wenigen Produkten, Prozessen oder Ressourcen kann die Gliederungsebene ausgewählter Kategorien vertieft werden, um einen direkteren Zugriff auf dort abgelegt Inhalte zu erlauben, ohne dass die Übersichtlichkeit der Portalseite darunter leidet. Analog dazu ist im Falle sehr vielschichtiger Inhalte in den Kategorien deren Abstraktionsniveau zu erhöhen, um den Überblick zu wahren. Ebenso können alternative Gliederungsebenen für die Kategorien infrage kommen wie z. B. auf Basis von Standorten, falls verschiedene Produkte, Prozesse und Ressourcen nur für einzelne Standorte relevant sind.

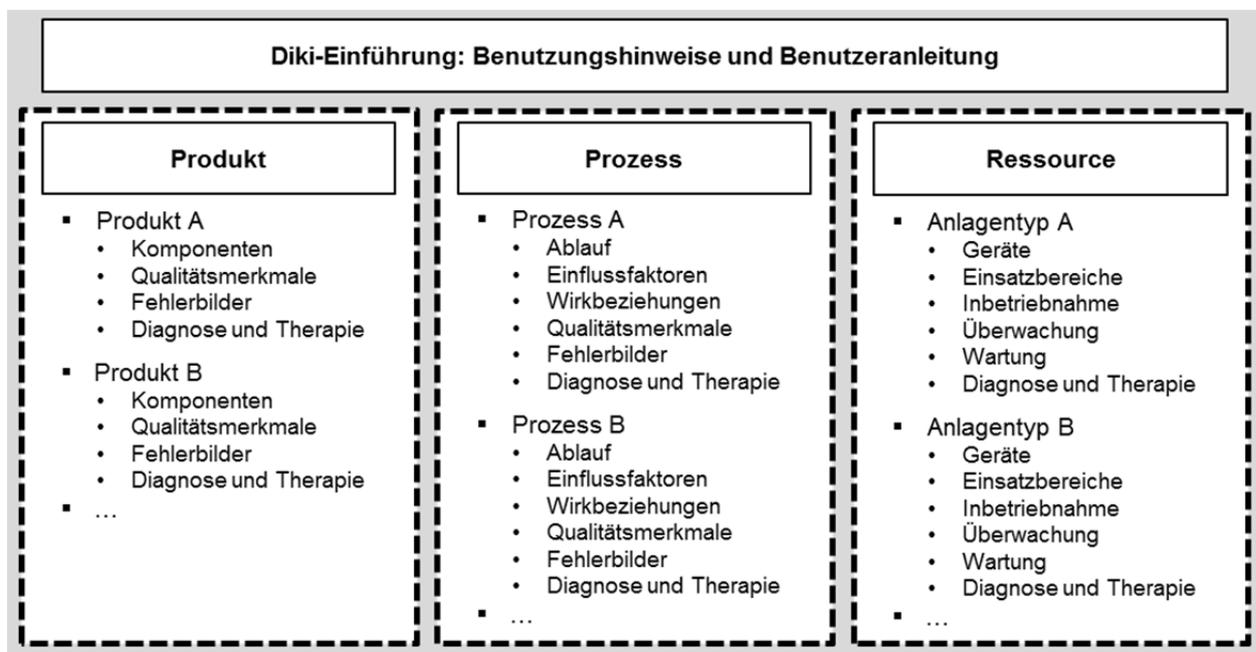


Abbildung 31: Strukturbeispiel einer Portalseite für den einfachen Einstieg ins Diki

Entwicklung einer geeigneten Artikelstruktur zur effizienten Abbildung von Integrationsebenen im Diki

Im Folgenden wird dargestellt, wie diagnoserelevante Informationen effizient im Diki in Form von Wiki-Seiten und deren Verlinkungen strukturiert werden können. Die Darstellung fokussiert auf die Kategorie der Ressource, wobei die applizierten Konzepte ebenso auf die Substrukturen der Kategorien Produkt und Prozess übertragbar sind. Zudem ist anzumerken, dass die vorgestellten Strukturen als Templates für den Aufbau eines produktionsnahen Wikis zu verstehen sind. Gemäß dem Web 2.0 Gedanken sind Adaptionen der vorgegebenen Strukturen an individuelle Erfordernisse durch die Anwender

jederzeit möglich und auch gewünscht. Ausgehend von einer bereitgestellten Vorlage können Autoren diese flexibel auf die Anforderungen eines neuen Produkts, Prozesses oder einer Ressource durch Entfernen nicht zutreffender oder Ergänzung weiterer Bereiche anpassen.

Ressourcen werden im heutigen Produktionsumfeld durch komplexe automatisierte oder teilautomatisierte Anlagen repräsentiert. Diese können in Abhängigkeit ihrer Aufbaustruktur alternativ in Fertigungslinien und deren Stationen oder in Fertigungszellen unterteilt werden (vgl. Abbildung 32).

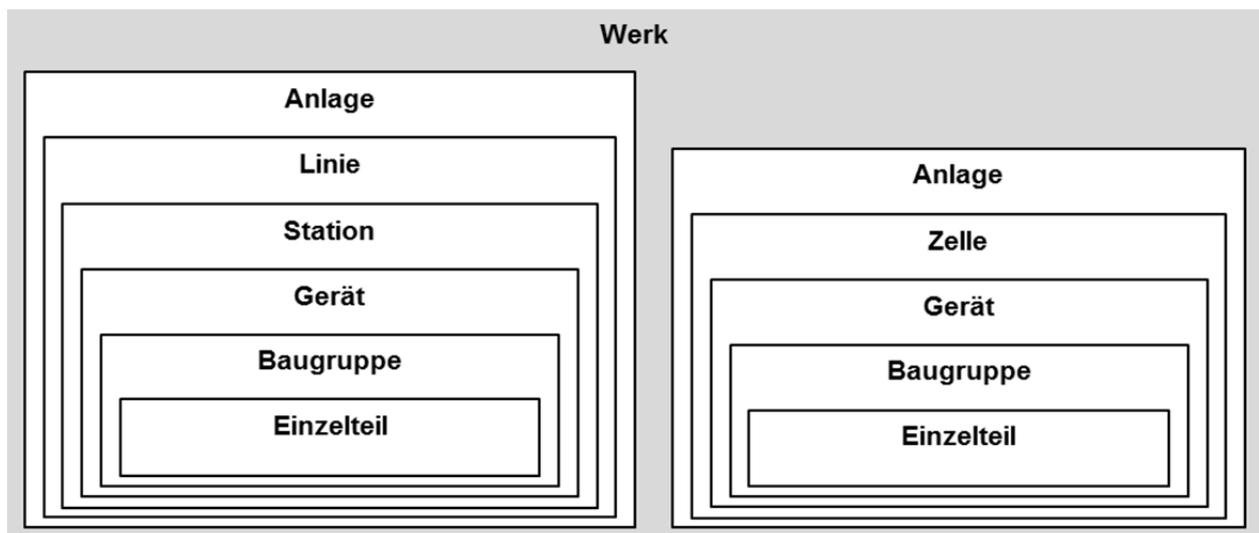


Abbildung 32: Alternative Strukturierungsmöglichkeiten für Integrationsebenen von Fertigungsanlagen (in Anlehnung an [197])

Diese enthalten ihrerseits wiederum eine Vielzahl an unterschiedlichen Geräten, deren Type darüber hinaus in verschiedenen Zellen und Linien verbaut sein kann. Diese Unterteilung ist nach unten bis auf die Ebene eines Einzelteils fortführbar, wobei in Abhängigkeit der Komplexität der Anlage ggf. weitere Unterebenen zur Strukturierung erforderlich sind. [197]

Ausgehend von den Integrationsebenen aus Abbildung 32 leiten sich für die Strukturierung der Informationen im Diki zwei Gestaltungsalternativen ab. Zum einen ist eine holistische Struktur denkbar, bei der ein Wiki-Artikel eine vollständige Anlage umfasst. Zum anderen ist es möglich, die Komponentenstruktur einer Anlage aus Fertigungszellen und deren Zusammensetzung aus einzelnen Geräten auch in der Wiki-Struktur zu repräsentieren. Signifikante Vor- und Nachteile der jeweiligen Varianten werden in Tabelle 12 gegenübergestellt.

Die holistische Struktur enthält alle Informationen zu einer Anlage bzw. Linie oder Zelle in einem Artikel. Dadurch werden der Aufbau und die Gestaltung des Dikis sehr einfach,

und es ist unmittelbar sichtbar, ob gewisse Inhalte bereits existieren. Somit wissen Anwender genau, wo sie alle Informationen bezüglich einer Anlage finden bzw. integrieren können, was Hemmnisse bei der aktiven Teilnahme am Diki vermindert. Ebenso sind umfassende Informationen unter Nutzung einer geringen Anzahl an Querverweisen zugänglich. Negative Folgen dieses Vorgehens sind sehr lange Artikel, in denen die zielgerichtete Suche nach Informationen trotz eines automatisch angelegten Inhaltsverzeichnis schwierig sein kann, da sehr viel Scroll-Aufwand erforderlich ist. Dieser Aspekt gilt auch bei der Restrukturierung von Inhalten im Editor-Modus, was die Überarbeitung von Artikeln aufgrund mangelnder Übersichtlichkeit erschwert. Ein besonders problematischer Effekt, der nicht nur die Handhabbarkeit des Dikis einschränkt, sondern sich auch negativ auf die darin enthaltenen Inhalte auswirkt, sind Konsistenzprobleme und die Isolation von Wissens-elementen in einzelnen Artikeln. Dies entsteht dadurch, dass gleiche Geräte mehrmals in einer Fertigungsumgebung vorhanden sein können, jede Entität jedoch in der Wiki-Seite der jeweiligen Anlage, in der sie verbaut ist, verwaltet wird. Deswegen wird es möglich, dass identische Informationen an mehreren Stellen im Diki hinterlegt sind. Bei der Pflege von Inhalten existiert somit das Risiko, dass diese nur an einzelnen Stellen aktualisiert werden und in Konsequenz die Inhalte divergieren. Ferner besteht die Gefahr, dass Wissensinhalte für Geräte nicht aufgefunden werden, da nur die Wiki-Seite der beinhaltenden Zelle durchsucht wird. Um dies auszuschließen, muss der Anwender bei jeder Recherche zusätzlich auch die Volltextsuche zur Abfrage des gesamten Dikis verwenden.

Tabelle 12: Gegenüberstellung alternativer Artikelstrukturen für Diki

	Holistische Artikelstruktur	Modulare Artikelstruktur
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einfache, übersichtliche Struktur ▪ Wenige Querverweise 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Übersichtliche Artikel ▪ Wiederverwendbarkeit ▪ Konsistenz
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Komplex strukturierte Artikel ▪ Konsistenzprobleme ▪ Isolation von Wissen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Komplexe Struktur ▪ Viele Querverweise

Die modulare Struktur, bei der Informationen zu den Geräten einer Fertigungslinie oder -zelle konsequent in eigene Wiki-Seiten ausgegliedert werden, führt zu einer höheren Anzahl an Artikeln im Vergleich zum holistischen Ansatz. Diese sind jedoch deutlich weniger umfangreich, wodurch sich eine leichtere Handhabbarkeit bei der Informationssuche in ihnen sowie bei Änderungen ergibt. Die Auslagerung vieler Inhalte in eigene Seiten ist dabei nicht von Nachteil, da ein Wiki prädestiniert dazu ist die Bindung zwischen Wissens-elementen mittels Hyperlinks zu sichern. Zudem ist dieser Aspekt die Grundlage für eine einfache Referenz zwischen Artikeln diverser Ebenen, was Synergieeffekte durch die einfache Wiederverwendbarkeit von Inhalten via Verlinkung erzielt. Des Weiteren werden durch dieses Vorgehen die Konsistenzprobleme der holistischen Struktur vermieden. Ihr Gegenüber weist die modulare Herangehensweise je-

doch höhere Aufwände zur Strukturierung und Verlinkung zu hinterlegender Inhalte auf. Es sind diverse Artikelseiten anzulegen und mit Hyperlinks untereinander oder mit bereits bestehenden Seiten zu verknüpfen. Auch wenn die Navigation durch ein Wiki via des Hyperlink-Konzepts sehr einfach ist, so sind dennoch mehr Mausklicks erforderlich, um ausgehend von einer Portalseite gesuchte Informationselemente auf einer untergeordneten Seite zu erreichen als in der holistischen Struktur.

Im Vergleich der beiden Alternativen ist festzustellen, dass die Vorteile der Vermeidung von Konsistenzproblemen und das hohe Potential der unmittelbaren Weiterverwendung von untergeordneten Seiten die Nachteile der komplexeren Verlinkungsstruktur klar übertreffen. Aus diesem Grund wird bei der Umsetzung der Wissensmodellierung für das Diki im Folgenden eine modulare Struktur gewählt.

Informationsstrukturierung im Diki auf Artikelebene

In diesem Abschnitt wird die typische Herangehensweise zur Strukturierung von Wissensselementen in Form von Artikelseiten dargestellt. Abbildung 33 zeigt hierzu im linken Bereich die generelle Struktur einer Anlagenseite und im rechten Bereich einen exemplarischen Auszug aus einer darauf basierenden Seite im Diki.



Abbildung 33: Strukturierung von Anlagenwissen im Diki (links) sowie exemplarische Darstellung im Diki (rechts)

Die Anlagenseite ist so aufgebaut, dass sie alle wichtigen technischen und organisatorischen Aspekte integriert. Von technischer Seite kommen hierzu die in Abschnitt 4.3.2 strukturierten Wissensselemente zur Anwendung. Diese werden um weitere organisatorische Beschreibungselemente, wie den Standort der Anlage und Ansprechpartner erweitert. Zur Umsetzung der zuvor vorgestellten modularen Artikelstruktur steht der

Unterpunkt *Geräte* zur Verfügung. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit zur Einbindung weiterer externer Medien unter dem Punkt *Ressourcen*. Eine Ergänzung zu den bisher vorgestellten Informationsinhalten stellt der Bereich *Logbuch* dar. Es hat die Aufgabe Informationen zu besonderen Ereignissen und erfolgte Modifikationen im Anlagenleben zu dokumentieren [82]. Dabei werden in der Regel neben einem Zeitstempel und einer zuständigen Person auch Informationen über Art des Ereignisses, Ursache, Auswirkungen und ggf. Beseitigungsmaßnahmen protokolliert (vgl. [159]). Im Rahmen dieser Aufbaustruktur hat die Angabe von Ursachen, Auswirkungen und deren Beseitigungsmaßnahmen im Logbuch über eine Verlinkung zu Inhalten im Abschnitt Diagnose und Therapie zu erfolgen.

Da die Sammlung und Gliederung all dieser Informationen auch bei Verwendung der modularen Herangehensweise eine sehr lange und dadurch unübersichtliche Wiki-Seite im Diki zur Folge hat, werden die Inhalte weiter unterteilt. Eine zentrale Rolle nimmt dabei das Hyperlink-Feature ein, welches die Auslagerung längerer zusammenhängender Inhalte von Themenbereichen in eigenständige Wiki-Seiten ermöglicht, die dennoch einfach vom jeweiligen Hauptartikel aus erreichbar sind (vgl. z. B. *Inbetriebnahme* in Abbildung 34).

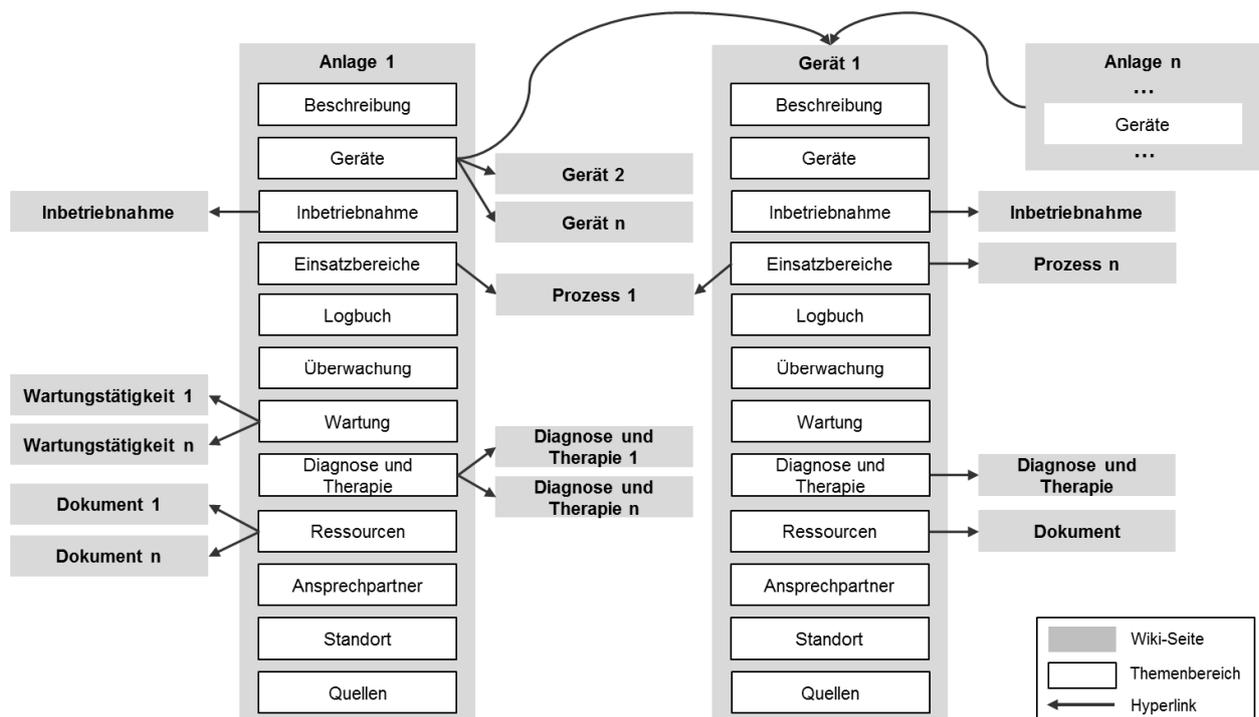


Abbildung 34: Nutzung von Hyperlinks zur Strukturierung des Informationsnetzes im Diki am Beispiel von Ressourcen

Auch die Möglichkeit der Einbindung weiterer Mediendateien wie PDF-Dokumente via Links erleichtert die Gestaltung übersichtlicher Seiten. Basierend auf diesen Festlegungen ergibt sich das in Abbildung 34 dargestellte Informationsnetzwerk zur Strukturierung

rung und Vernetzung der Inhalte im Diki. Wie erläutert werden im Rahmen der modularen Struktur Geräte in separate Seiten ausgegliedert, die ihrerseits wiederum mit weiteren Seiten vernetzt sein können. Anlagen- bzw. Geräteseiten verwenden dabei in ihrer Grundkonfiguration die zuvor vorgestellte Gliederung. Zudem ist eine Verlinkung auf relevante Elemente der anderen Kategorien Produkt und Prozess möglich, um das Informationsnetz zu komplettieren.

Auslagerung komplexer Diki-Inhalte in separate Artikel unter Verwendung von One-Point-Lessons (OPL)

Vor allem bei der Darstellung komplexer Sachverhalte wie bei der Erläuterung von Inbetriebnahme-, Wartungs- oder Diagnose- und Therapiewissen wird von einer Auslagerung in separate Seiten umfassender Gebrauch gemacht. Dabei bietet es sich an, diese Informationen in Form von One-Point-Lessons zu strukturieren. OPL haben ihren Ursprung im Umfeld der Total Productive Maintenance (TPM). Dort werden sie im Rahmen der autonomen Instandhaltung eingesetzt, um Kenntnisse und Fähigkeiten im Umgang mit den Anlagen an die Bediener zu transferieren [95]. OPL lassen sich dabei in drei Hauptkategorien einordnen:

- Grundlagen des Anlagenbetriebs (Inbetriebnahme, Überwachung, Wartung etc.)
- Verbesserungsansätze
- Probleme und deren Beseitigung [95]

Kerngedanke des OPL-Konzepts ist es, den Wissenstransfer besonders effizient zu gestalten. Dies erfolgt durch die Vorgabe der folgenden Gestaltungsrichtlinien:

- Pro OPL ist nur ein Thema zu behandeln
- Der Umfang soll sich auf ein Blatt Papier beschränken
- Die Darstellung ist so einfach wie möglich zu gestalten
- Die Beschreibung soll die 5W1H-Fragen adressieren
- Grafische Darstellungsmöglichkeiten sind zu nutzen [183]

Durch die Betonung der Einfachheit wird es möglich, dass jeder Beteiligte OPL selbst erstellen sowie die dargestellte Information im Selbststudium aufnehmen kann. Sie haben in diesem Zusammenhang nicht das Ziel, Handbücher und Dokumentationen zu ersetzen, sondern dienen als Unterstützungswerkzeug und tragen insbesondere zur raschen Verbreitung von Best Practices bei [89].

Beim Vergleich der Zielsetzungen von OPL mit denen von Wikis (vgl. Tabelle 13) ist sichtbar, dass deren Grundideen identisch sind. Ein Unterschied besteht darin, dass

OPLs Vorgaben zur Gestaltung konkreter Wissensselemente formulieren, während im Wiki der Fokus mehr auf der Systemarchitektur liegt.

Tabelle 13: Vergleich der Zielsetzungen von One-Point-Lessons und Wikis

Kriterium	One-Point-Lesson	Wiki
Einfachheit der Inhaltsgenerierung	✓	✓
Übersichtlichkeit in der Darstellung	✓	✓
Förderung der Wissensverteilung	✓	✓
Förderung der kontinuierlichen Weiterentwicklung	✓	✓
Förderung von Diskussion	✓	✓
Förderung der Partizipation	✓	✓

Im Sinne einer nachhaltigen Wissensverwaltung auf Basis von Wikis bietet es sich demnach an, die beiden Ansätze zu kombinieren. Das Wiki-System stellt hierbei die technologische Basis zur Erreichung der Zielkriterien bereit. Die effiziente Strukturierung von Informationen in Form einzelner Wiki-Seiten zur Erreichung der Zielkriterien wird hingegen durch das OPL-Prinzip gefördert. Abbildung 35 zeigt die Transformationen einer herkömmlichen OPL in Papierform bzw. in Form eines elektronischen Dokuments in eine Wiki-Seite.

One-Point-Lesson			Nummer
			4/85
Anwendungsort FAPS, Laborhalle Erlangen	Zelle Montagezelle mit kooperierenden Kuka-Robotern	Gerät Roboter Kuka KR6/2	
Erstellt von Markus Michl	Erstellt am 01/01/2012	Autorisiert von Matthias Brossog	Autorisiert am 02/01/2012
Thema Fehlermeldung Zyklusfehler (SEND_RTCL_CYC) an Montagezelle mit kooperierenden Kuka-Robotern		Kategorie Diagnose und Therapie	
Problembeschreibung Während der Ausführung der Demoapplikation „Tetris-Puzzle“ bricht die Ausführung ab. Am Handbediengerät eines der Roboter wird die Meldung „Zyklusfehler (SEND_RTCL_CYC)“ angezeigt.			
Ursache Weitere Prozesse, die neben dem Bahnplanungsprogramm auf dem Zellenrechner aktiv sind, beeinträchtigen die Ausführung. Dadurch kommt es zu Übertragungsverzögerungen und der Server-Port aufseiten der KR/2-Steuerung wird wegen des Zyklusfehlers geschlossen.			
Behebungsmaßnahme			
<ul style="list-style-type: none"> Bricht die Montageoperation ab, während ein Roboter ein Bauteil gegriffen hat: <ul style="list-style-type: none"> Druckluftventil Nummer 4 des jeweiligen Roboters betätigen, um das Bauteil aus dem Greifer zu entfernen. Während der Betätigung des Ventils mit einer Hand sind Greifer und Bauteil mit der anderen Hand gegen Herunterfallen zu sichern (vgl. Bild) Bahnplanungsprogramm am Zellenrechner beenden. Demoapplikation gemäß OPL 2/85 in den Ausgangszustand versetzen. Sicherstellen, dass keine nicht zur Demoaufführung erforderlichen Programme aktiv sind: <ul style="list-style-type: none"> Windows Updates fertigstellen bzw. abbrechen. Virens Scanner Updates fertigstellen. Java Updates fertigstellen bzw. abbrechen. Alle weiteren nicht erforderlichen Prozesse beenden (Webbrowser, MS-Office, etc.) Demoapplikation gemäß OPL 2/85 erneut ausführen. 			
Trainings-übersicht	Datum		
	Einweisende Person		
	Eingewiesene Person		

Seite Diskussion Lesen Bearbeiten Versionsgeschichte

Beseitigung des Fehlers SEND_RTCL_CYC

Inhaltsverzeichnis [Verbergen]

- OPL-Header
- Problembeschreibung
- Ursache
- Behebungsmaßnahme

1 OPL-Header [Bearbeiten]

Anwendungsort	Zelle	Gerät
nicht zutreffend	nicht zutreffend	Kuka KR6-2
Thema		Kategorie
Fehlermeldung Zyklusfehler (SEND_RTCL_CYC) bei Roboter Kuka KR6-2		Diagnose und Therapie

2 Problembeschreibung [Bearbeiten]

Während der Ausführung der Demoapplikation „Tetris-Puzzle“ bricht die Ausführung ab. Am Handbediengerät eines der Roboter wird die Meldung „Zyklusfehler (SEND_RTCL_CYC)“ angezeigt.

3 Ursache [Bearbeiten]

Weitere Prozesse, die neben dem Bahnplanungsprogramm auf dem Zellenrechner aktiv sind, beeinträchtigen die Ausführung. Dadurch kommt es zu Übertragungsverzögerungen und der Server-Port aufseiten der KR/2-Steuerung wird wegen des Zyklusfehlers geschlossen.

4 Behebungsmaßnahme [Bearbeiten]

- Bricht die Montageoperation ab, während ein Roboter ein Bauteil gegriffen hat:
 - Druckluftventil Nummer 4 des jeweiligen Roboters betätigen, um das Bauteil aus dem Greifer zu entfernen.
 - Während der Betätigung des Ventils mit einer Hand sind Greifer und Bauteil mit der anderen Hand gegen Herunterfallen zu sichern (vgl. Bild)
- Bahnplanungsprogramm am Zellenrechner beenden.
- Demoapplikation gemäß OPL Demoapplikation ausführen in den Ausgangszustand versetzen.
- Sicherstellen, dass keine nicht zur Demoaufführung erforderlichen Programme aktiv sind:
 - Windows Updates fertigstellen bzw. abbrechen.
 - Virens Scanner Updates fertigstellen.
 - Java Updates fertigstellen bzw. abbrechen.
 - Alle weiteren nicht erforderlichen Prozesse beenden (Webbrowser, MS-Office, etc.)
- Demoapplikation gemäß OPL Demoapplikation ausführen erneut ausführen.

Abbildung 35: Transformation des dokumentenbasierten OPL-Prinzips (links) in das Wiki-Konzept zur Informationsstrukturierung im Wiki (rechts)

Dabei können alle Informationselemente einer typischen OPL problemlos in die Wiki-Seite übertragen werden. Aufgrund der einfachen Verlinkungsmöglichkeiten eines Wikis

wird die Vernetzung mit anderen OPLs und weiteren Inhalten gegenüber der klassischen Darstellungsform verbessert. Ebenso kann der OPL-Dokumentenkopf der formulargebundenen Darstellung in der Diki-Variante verschlankt werden. Die Dokumentation von Versionen und Autoren erfolgt über Wiki-interne Funktionen. Ferner entfallen die Felder mit Autorisierungsinformationen, da es gemäß der Wiki-Grundprinzipien nie eine abgeschlossene Version gibt, sondern diese sich durch die Zusammenarbeit der Nutzergemeinde in einem Status der kontinuierlichen Weiterentwicklung befindet. Im in Abbildung 35 dargestellten Wiki-basierten OPL-Beispiel sind zudem die Felder Anwendungsort und Zelle nicht belegt, da es sich um eine gerätebezogene OPL handelt, die für diverse Zellen an unterschiedlichen Orten zutreffend sein kann.

Strukturierung des Themenbereichs Diagnose und Therapie im Diki unter Verwendung von FMEA und One-Point-Lessons

Die effiziente Strukturierung des Bereichs Diagnose und Therapie der verschiedenen Kategorien ist für das Diki von besonderer Wichtigkeit, da dieser Schritt eine sehr hohe Bedeutung für die wirtschaftliche Produktion aufweist. Fehler in Produkten, Prozessen und Produktionsmaschinen sind umgehend zu beheben um Ausschuss, mangelnde Produktqualität sowie Produktionsausfälle zu vermeiden. Zur Erfüllung dieser Anforderungen werden für die Beschreibung von Fehlerursachen und deren Maßnahmen die im Abschnitt zuvor vorgestellten One-Point-Lessons als Strukturierungsmittel eingesetzt. Um ein schnelles Auffinden der situationsabhängig jeweils relevanten Informationselemente zu ermöglichen, wird zudem auf eine Darstellung der Ausfallfolgen, -arten und -ursachen auf Basis der FMEA zurückgegriffen. Sie stellt die bekannteste systematische Methode zur qualitativen Zuverlässigkeitsanalyse dar. Ihr Grundgedanke ist die Ermittlung aller denkbaren Ausfallarten für beliebige Systeme, Teilsysteme und deren Bestandteile. Für diese werden im Anschluss alle möglichen Ausfallfolgen und -ursachen sowie passende Maßnahmen identifiziert. Das Vorgehen bei der FMEA wird in diversen Normen und Richtlinien dokumentiert und durch die Bereitstellung von Formblättern unterstützt. Die typischen Betrachtungsobjekte sind dabei Anlagen, Produkte oder Prozesse, die in verschiedenen Lebenszyklusphasen analysiert werden können. Generell sollte die FMEA so früh wie möglich - am besten während der Entwicklung - durchgeführt werden, da so die Fehlerkosten minimal sind. Allerdings kann die FMEA-Ausführung auch während der Betriebs- oder Servicephase durchgeführt werden, wenn hier akute Probleme festgestellt werden. Durch ihre methodische Ausrichtung erlaubt die FMEA eine effiziente Dokumentation und den Aufbau einer Wissensbasis bezüglich potentieller Fehler sowie deren Abhilfemaßnahmen. Aufgrund dieser Zielrichtung ist sie ideal geeignet, die strukturierte Darstellung von Diagnose- und Therapieinformation auf Wiki-Basis zu unterstützen. Dazu wird im Anschluss dargestellt, wie die Methode für die Verwendung im Diki zu adaptieren ist. [16][227]

Als Ausgangsdokument kommt das FMEA-Formblatt des VDA in der Version 4.2 zur Anwendung. Gegenüber früheren FMEA-Formblättern werden bei der Gestaltung dieses Blatts keine logischen Inkonsistenzen zugunsten einer einfachen Ausfüllbarkeit von links nach rechts in Kauf genommen. Vielmehr wird dem kausalen Zusammenhang zwischen Folgen, Fehlern und deren Ursachen Rechnung getragen, was zu einer veränderten Anordnung der Spalten des Dokuments gegenüber anderen FMEA-Formblättern führt [227]. Gerade die veränderte Reihenfolge dieser drei Spalten bildet die typische Herangehensweise bei der Ermittlung von Ursachen im Rahmen der Diagnose ab. Letztere hat ihren Ausgangspunkt beim Sichtbarwerden von Fehlerfolgen und wird somit durch diese Anordnung ideal unterstützt.

Der FMEA-Dokumentenkopf kann aufgrund unterschiedlicher Arbeitsmethodik in der Diki-Darstellung im Vergleich zur dokumentenbasierten FMEA weitgehend entfallen (vgl. Abbildung 36). Das klassische FMEA-Formular wird von einem FMEA-Team in der Regel während eines Workshops bearbeitet und gefüllt [227]. Dahingegen dient die FMEA-orientierte Tabelle im Diki lediglich als Werkzeug zum Aufbau und zur Strukturierung einer Sammlung möglicher Fehler sowie passender Gegenmaßnahmen durch einen lose zusammenarbeitenden Nutzerkreis. Ferner soll dieser Prozess analog dem adaptierten Vorgehen bei der OPL im Diki nicht einmalig, sondern kontinuierlich ausgeführt werden. Somit können genaue Angaben zu Verantwortlichen, Datum sowie Änderungsständen entfallen. Andere Informationen, wie der Betrachtungsgegenstand werden bereits durch die Wiki-Seite spezifiziert, in die die FMEA-Tabelle eingebettet ist.

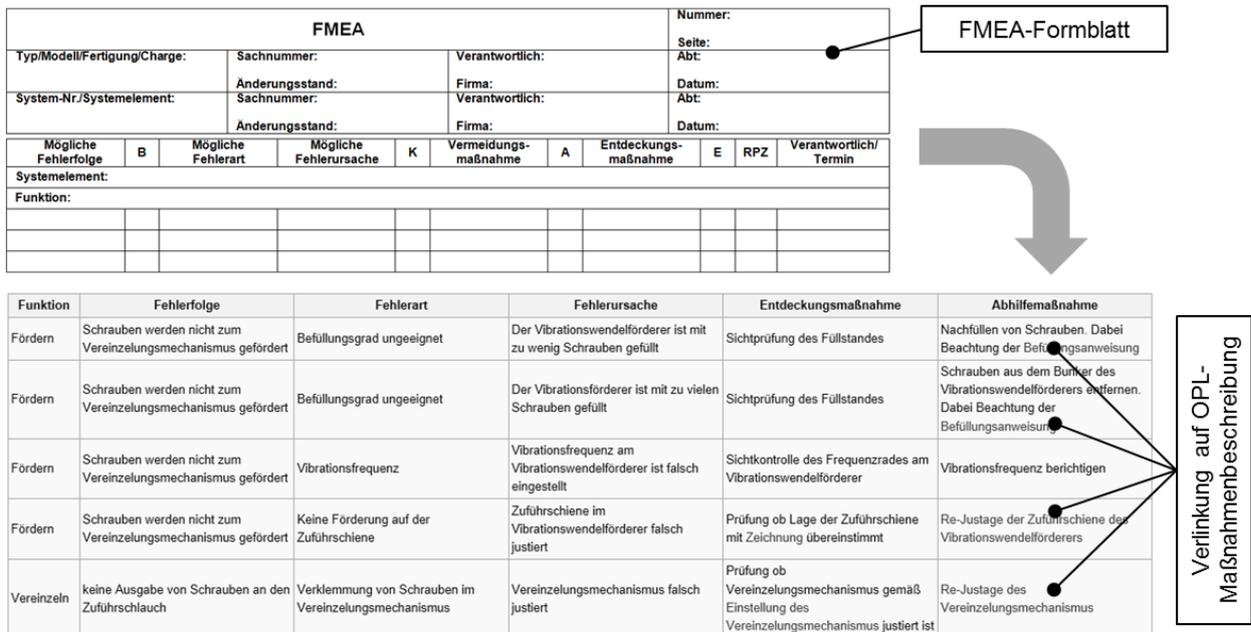


Abbildung 36: Nutzung von FMEA-Strukturen zur effizienten Abbildung diagnoserelevanter Wissens im Diki

Des Weiteren können aufgrund der lebenszyklusbegleitenden Ausrichtung der Diki-FMEA-Tabelle auch die Spalten, die zur Berechnung und Dokumentation der Risikoprioritätszahl (RPZ) dienen (vgl. Spalten B, K, A, E und RPZ in Abbildung 36), entfallen. Eine exakte Ermittlung von Auftretenswahrscheinlichkeit, Schwere des Fehlers sowie dessen Entdeckungswahrscheinlichkeit zur Berechnung der Risikoprioritätszahl, um besonders kritische Fehler zu identifizieren, sollte zuvor in der Phase der Systementwicklung erfolgen. Fehler mit hohem Risiko sind dann auch bereits dort durch entsprechende Konzept- und Designanpassungen zu beseitigen [227]. In der Betriebsphase steht vielmehr das schnelle Auffinden der Ursache sowie dazugehöriger Abhilfemaßnahmen durch eine strukturierte Informationsdarstellung im Fokus. Der Nutzen einer detaillierten Angabe der Risikoprioritätszahl sowie ihrer Berechnungsfaktoren ist hier gering. Zudem erfordert eine genaue Abschätzung der einzelnen Berechnungsfaktoren bei der Eingabe neuer Tabelleninhalte Kompetenzen, die nicht bei jedem Nutzer des vielschichtigen Anwenderkreises vorausgesetzt werden können. Die Konsequenz hieraus ist eine Verunsicherung der Anwender, die die Externalisierung von Wissen hemmt.

Gegenüber dem papiergebundenen Ausgangsdokument ist weiterhin die Spalte der Vermeidungsmaßnahme zu adaptieren. Sie wird in diesem Kontext als Abhilfemaßnahme bezeichnet und in der letzten Tabellenspalte positioniert, da sie das Resultat eines Diagnoseprozesses darstellt. Im Diki kann an dieser Stelle zudem im Tabellenfeld auf eine separate Wiki-Seite verlinkt werden, die eine ausführliche Maßnahmenbeschreibung z. B. im OPL-Format enthält (vgl. Abbildung 36).

4.4 Einsatz semantischer Wikis zur Erweiterung des Diki-Ansatzes

Semantische Wikis sind ein Ansatz, die Verwaltung von Informationen in Wikis zu erweitern. Neben strukturiertem Text in Artikelseiten und Hyperlinks, die eine Verbindung zwischen den Informationselementen herstellen, werden zusätzlich semantische Annotationen eingeführt. Im Folgenden werden zunächst die Hintergründe des semantischen Annotierens erläutert. Im Anschluss erfolgt eine Darstellung und Bewertung der Einsatzmöglichkeiten semantischer Dikis (semDiki) im Rahmen des Diki-Ansatzes.

4.4.1 Semantisches Web und Ontologien

Die Semantik bzw. Bedeutungslehre ist ein Teilgebiet der Sprachwissenschaft und beschäftigt sich in diesem Zusammenhang mit Sinn und Bedeutung von Sprache bzw. Zeichen [179]. Im semantischen Web wird durch die Verwendung ergänzender Beschreibungsinformationen - den Metadaten - der Ansatz verfolgt, Inhalten eine Bedeutung, d. h. Semantik, zu geben. Dadurch wird es möglich, Inhalte so anzureichern, dass sie nicht nur für den Menschen verständlich sind. Vielmehr sollen sie auch für maschinelle Systeme auf der Bedeutungsebene erfassbar werden [220]. Eine zentrale Rolle nehmen in diesem Zusammenhang semantische Netze ein. Diese überwinden die Limi-

tationen der Eindimensionalität herkömmlicher Ordnungsstrukturen wie Baumstrukturen und vermeiden dadurch ein Auseinanderreißen und Verstreuen von zusammengehörigen Informationen [188]. Erreicht wird dies durch die Einführung der Begriffe der Objektidentität sowie der Vernetzung. Objektidentität bedeutet, dass ein Element in der Ordnungsstruktur nur einmalig existiert. Über Relationen, die Verknüpfungen zwischen Objekten repräsentieren, ist es dann möglich, die Informationen zu vernetzen [188].

Eine besonders mächtige Repräsentationsform von semantischen Netzen stellen Ontologien dar [188]. Sie haben ihren Ursprung im Bereich der künstlichen Intelligenz und sind zentraler Bestandteil des semantischen Web. Sie beschreiben formal und programmunabhängig Konzepte und deren Beziehungen innerhalb einer Wissensdomäne. Dadurch unterstützen sie Maschinen bei der Interpretation von Inhalten im Web und entlasten den Menschen dabei, sämtliche Vernetzungstätigkeiten selbst zu übernehmen [179]. Gemäß der vom W3C spezifizierten Beschreibungssprache Web Ontology Language (OWL) sind die wichtigsten Bestandteile von Ontologien:

- **Klasse bzw. Konzept (“Class“):** Definiert eine Gruppe von Individuen, die gemeinsame Eigenschaften aufweisen
- **Eigenschaft (“Property“):** Definiert verschiedene Arten von Beziehungen. Hierbei wird differenziert in:
 - **Datentyp-Eigenschaft (“DatatypeProperty“):** Definiert Beziehungen zwischen Klassen und Datentypen
 - **Objekt-Eigenschaft (“ObjectProperty“):** Definiert Beziehungen zwischen Klassen
- **Individuum bzw. Instanz (“Instance“):** Repräsentiert eine konkrete Instanz einer Klasse [68]

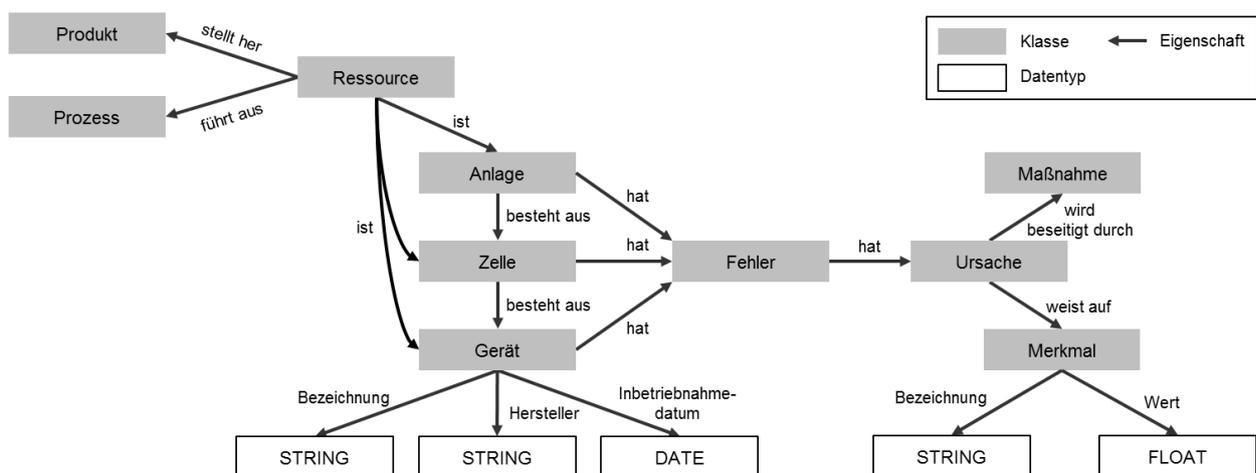


Abbildung 37: Beispielhafte ontologiebasierte Strukturierung von Fehler-Ursachenbeziehungen von Produktionsanlagen auf Grundlage des PPR-Modells

Abbildung 37 zeigt einen Auszug aus einer Ontologie für das Fertigungsumfeld, die in dieser Form als Grundlage für die Konzeptionierung diagnoserelevanten Wissens in semantischen Wikis anwendbar ist.

4.4.2 Grundprinzip semantischer Wikis

Semantische Wikis erlauben die Erweiterung herkömmlicher Wiki-Seiten um zusätzliche Metadaten in Form von semantischen Annotationen. Basis dieser Annotationen ist eine Ontologie (vgl. Abbildung 37), die festlegt, welche Eigenschaften einzelnen Objekten zugewiesen werden können [202]. Somit stellen semantische Wikis eine Kombination von Methoden des semantischen Webs mit den Funktionalitäten eines herkömmlichen Wikis dar. Typische Features semantischer Wikis sind:

- Formalismus zur semantischen Annotation
- Interne Repräsentation der Annotation in OWL/RDF zur Förderung der Kompatibilität mit anderen Anwendungen
- Import und Export von Ontologien
- Semantische Suchfunktion [72][202]

Unter Verwendung dieser Funktionen sind Wiki-Inhalte so organisierbar, dass sie auch von Maschinen verstanden und ausgewertet werden können [134]. In Erweiterung des Interaktions- und Partizipationsgedankens des Web 2.0 wird die semantische Annotation in Verbindung mit der Suchmöglichkeit via Objekteigenschaften als Web 3.0 bezeichnet [50]. Einen bekannten Vertreter semantischer Wikis stellt Semantic MediaWiki (SMW) dar, der das populäre Wiki-System MediaWiki um semantische Funktionen ergänzt. Darauf aufsetzend haben sich wiederum Systeme wie SMW+ entwickelt. SMW+ strebt an, die Arbeit mit semantischen Annotationen einfach und intuitiv zu gestalten. Dazu werden dem SMW-Konzept folgende Zusatzfunktionen hinzugefügt:

- Grafischer Editor für semantische Annotation
- Grafische Oberfläche zur Spezifikation semantischer Suchanfragen
- Ontologiebrowser zur grafischen Darstellung der Wissensbasis
- Werkzeug zur automatischen Konsistenzprüfung der modellierten Ontologien [50]

4.4.3 Semantische Annotation in Wiki-Seiten

SMW greift zur Formulierung von Ontologien auf OWL DL - einer eingeschränkten OWL-Version - zurück, um die Komplexität zu reduzieren. So wird allen Wiki-Nutzern die semantische Annotation erlaubt [72]. Dabei kommen lediglich die zuvor vorgestell-

ten Kernkomponenten von OWL zum Einsatz. Tabelle 14 gibt einen Überblick wie die einzelnen Syntaxelemente in das semantische Wiki eingebettet werden.

Tabelle 14: Umsetzung von OWL-Ontologie-Bestandteilen im SMW [72]

OWL-Ontologie-Bestandteil	Abbildung im SMW	Syntax
Instanz	Artikel	-
Klasse	Artikelkategorie	[[Category:Category_Name]]
Objekt-Eigenschaft	Verlinkung	[[Property name::Link]]
Datentyp-Eigenschaft	Wert	[[Property name::Value]]

Die semantischen Annotationen sind speziell bei der Suche nach Informationen hilfreich. Dort unterstützen sie durch den Rückgriff auf die hinterlegte Semantik die exakte Eingrenzung von Suchanfragen. In einer Weiterführung semantischer Anfragen können diese als dynamische Inhalte in Wiki-Seiten eingebettet werden. Dies bietet gegenüber klassischen Wiki-Listen und -Tabellen den Vorteil Aufstellungen zu erzeugen, die nicht durch manuelle Aktualisierungen konsistent gehalten werden müssen. Abbildung 38 zeigt die Syntax einer semantischen Anfrage sowie deren Einbettung in eine Wiki-Seite, um eine automatisch erstellte Liste aller Fehler und deren Merkmale für eines Geräts zu erhalten. Neben der Angabe von Klasse und Eigenschaften der anzuzeigenden Inhalte stehen weitere Syntaxelemente zur Formatierung der Ausgabe der semantischen Abfrage bzgl. Spaltenüberschriften (vgl. *mainlabel*, *?*) und Anordnung (vgl. *format*, *order*) zur Verfügung.

```

{{ask: [[Category: Fehler]]
[[gehört zu:: Vibrationswendelförderer]]
| mainlabel= Fehlerbeschreibung
| ?Fehlermerkmal
| format=table
| order=ascending
|}}

```



The screenshot shows a SMW page with a navigation bar at the top containing buttons for 'Seite', 'Diskussion', 'Seite annotieren', 'Bearbeiten', 'Versionen/Autoren', 'Löschen', and 'Ver'. Below the navigation bar is the page title 'Vibrationswendelförderer'. The main content is a table with two columns: 'Fehlerbeschreibung' and 'Fehlermerkmal'. The table contains several rows of data, including 'Befüllungsgrad zu gering', 'Verklebung von Fördergut in Schikane', and 'Zuführschiene falsch eingestellt' in the first column, and 'Boden des Fördertopfes ist sichtbar', 'Mikrowürfe finden statt', and 'Fördergut verlässt den Schikanenbereich' in the second column.

Abbildung 38: Integration einer dynamischen Liste basierend auf semantischen Annotationen (links) in eine Wiki-Seite (rechts)

4.4.4 Anwendung semantischer Wikis zur Unterstützung der Diagnose und Therapie auf semDiki-Basis

Durch die semantische Annotation von Informationen in Wiki-Seiten werden neue Wege des Zugriffs auf im Diki enthaltene Informationen möglich. Tabelle 15 gibt einen Überblick über im Rahmen der Arbeit erarbeitete Anwendungsszenarien im Zusammenhang

mit der Diagnose und Therapie von Produktionsanlagen. Hierbei zeigt sich insbesondere die optimierte Anwendung von im semDiki enthaltenem Wissen. Somit wird durch derartige Systemlösungen eine der zentralen Anforderungen an das diagnosenahe Wissensmanagement, die intensive Anwendung expliziten Wissens bei der Durchführung betrieblicher Aufgaben (vgl. Abschnitt 4.2), umfassend erfüllt.

Tabelle 15: Anwendungsszenarien von semDiki zur Optimierung der Diki-Nutzung im Produktionsumfeld

Funktion	Anwendungsszenario
Bereitstellung einer dynamischen Liste aller Einsatzorte einer Zelle bzw. Geräts	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vermeidung von Inkonsistenzen, da die Liste nicht manuell zu pflegen ist ▪ Lückenlose Erfassung aller Zellen bzw. Geräte im Falle von Optimierungstätigkeiten
Bereitstellung einer dynamischen Liste aller Verantwortlichen für Zellen- bzw. Gerätetypen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vermeidung von Inkonsistenzen, da die Liste nicht manuell zu pflegen ist ▪ Schnelle Verteilung relevanter Informationen an zuständigen Personenkreis
Direkte Suchmöglichkeit nach allen OPL für einen Zellen- bzw. Gerätetyp	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Präzisere Eingrenzung der Suche im Vergleich zur Volltextsuche ▪ Verkürzung von Informationsbeschaffungszeiten
Direkte Suchmöglichkeit nach Fehlerursachen, die bestimmte Merkmale aufweisen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verkürzung der Zeit zur Ursachenfindung
Dynamische Generierung von Inspektions- und Wartungsplänen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Automatische Auftragszuweisung an Verantwortliche bei Fälligkeit

Abbildung 39 demonstriert die Mächtigkeit semantischer Annotationen im semDiki am Beispiel der Suche aller OPL, die für ein bestimmtes Gerät hinterlegt sind. Dies erfolgt mittels der bereitgestellten semantischen Suchoberfläche in einem mehrstufigen Prozess. Zuerst werden unter Auswahl der Annotation Kategorie und Angabe der dabei gewünschten Merkmalsausprägung alle im semDiki hinterlegten OPL der Kategorie Diagnose und Therapie identifiziert (vgl. (1) in Abbildung 39). Danach werden durch Hinzufügen einer weiteren Restriktion, die auf Attributebene arbeitet, diejenigen OPLs selektiert, die zu einem bestimmten Gerät gehören (vgl. (2) in Abbildung 39).

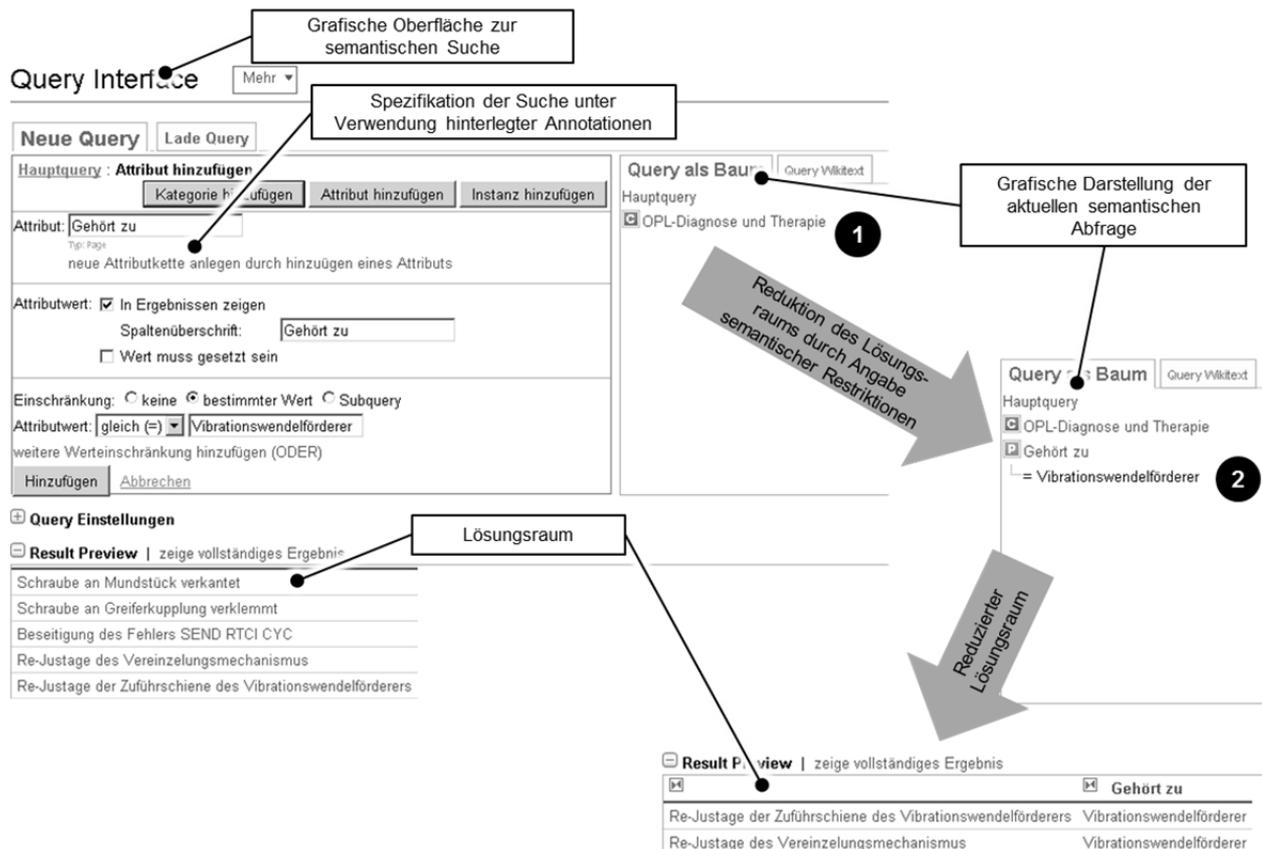


Abbildung 39: Grafische Umsetzung der semantischen Suchfunktion im semDiki am Beispiel aller OPL eines Geräts der Kategorie Diagnose und Therapie

4.4.5 Bewertung von Strategien zur semantischen Annotation von semDiki-Inhalten

Wie aus Tabelle 15 ersichtlich, bietet die semantische Annotation im semDiki signifikante Potentiale zur Unterstützung eines effizienten Anlagenbetriebs. Demgegenüber stehen jedoch Aufwände zur systematischen Annotation der Artikel. Dazu können verschiedene Gestaltungswege beschrrieben werden.

Eine Möglichkeit ist es, Anwendern unter Bereitstellung von Formularen zur Artikelerstellung die Angabe von semantischen Informationen vorzugeben. Dadurch wird gewährleistet, dass für jede Artikelkategorie die erforderlichen Informationen vorhanden sind, um semantische Abfragen durchführen zu können, die vollständige Ergebnisse liefern. Demgegenüber steht jedoch eine Erhöhung des Administrationsaufwands im semDiki zur Erzeugung und Pflege der Formulare. [54]

Eine andere Variante ist es, jedem Benutzer volle Freiheit bei der Anreicherung von Artikeln mit Annotationen zu geben. Es besteht somit keine Pflicht für eine semantische Kennzeichnung der Inhalte, und sofern diese erfolgt, ist keine vorgegebene Ontologie zu berücksichtigen. Dadurch entstehen nur geringe Mehraufwände bei der Erstellung

und Bearbeitung von semDiki-Artikeln im Vergleich zu herkömmlichen Wikis und die Anwendungspotentiale semantischer Wikis sind dennoch nutzbar. Jedoch besteht hierbei die Einschränkung, dass semantische Suchanfragen nur unvollständige Ergebnisse liefern, sofern die Benutzergemeinde unterschiedliche Bezeichner für Kategorien und Attribute verwenden. Dieses Defizit kann jedoch dadurch beseitigt werden, dass in der Nutzergemeinde eines Wikis in der Regel Gelegenheits- und Intensivnutzer existieren. Gelegenheitsnutzer greifen punktuell auf Informationen zu und integrieren Inhalte unstrukturiert. Intensivnutzer hingegen widmen sich aus der Strukturierung und Pflege der Inhalte und können in diesem Zusammenhang auch die Erstellung und Überarbeitung der semantischen Annotation übernehmen. So können unter Ausnutzung typischer Nutzerstrukturen eines Wikis auch ohne einen formalisierten Prozess umfassende und konsistente semantische Annotationen in Artikeln erreicht werden. Dieser Aspekt setzt allerdings bei kleineren Nutzergemeinden im Rahmen eines internen Wikis eine kritische Masse an motivierten Intensivnutzern voraus. Eine Diskussion wie dies sichergestellt werden kann erfolgt in Kapitel 6. [54][202]

4.5 Aufwandsreduktion des Diki-Einsatzes

Der Aufbau einer umfassenden Wissensbasis im Diki - bzw. semDiki - bezüglich aller PPR-Informationen bedeutet einen nicht unerheblichen Aufwand. Es entstehen sowohl signifikante Aufwendungen zur Externalisierung des vorhandenen Wissens sowie Redaktionsaufwand zur Recherche und Integration relevanter Dokumente [206]. Zusätzlich hat eine strukturierte Aufbereitung und Pflege der diversen Wiki-Seiten zu erfolgen. Um diese Problematik zu beseitigen, stehen im aktuellen Webumfeld nicht nur technologische Ansätze, sondern auch geeignete Entwurfsmuster wie der Mass-Collaboration-Ansatz oder der Peer-to-Peer-Wissensmanagement-Ansatz zur Verfügung. Durch diese Konzepte werden Aufbau und Wartung einer umfassenden Wissensbasis durch die Wissensvernetzung über mehrere Parteien hinweg gefördert, wodurch Synergieeffekte nutzbar werden. Mass-Collaboration bezeichnet die Zusammenarbeit einer großen Gruppe an voneinander unabhängigen Nutzern, um eine Aufgabenstellung zu erfüllen [217]. Im Rahmen des Peer-to-Peer-Wissensmanagements pflegen Anwender zunächst eigene Wissensbasen. Diese stellen sie jedoch in Teilen oder vollständig auch anderen Anwendern zur Verfügung, sodass Informationen nicht von jeder teilnehmenden Partei modelliert werden müssen. Vielmehr kann auf vorhandene Informationselemente anderer Anwender aufgebaut werden [206].

In Kombination dieser Ansätze empfiehlt sich eine Strukturierung der Zusammenarbeit zwischen mehreren Parteien gemäß Abbildung 40, um effizient eine umfassende Informationsbasis aufzubauen und weiterzuentwickeln. Dabei sind folgenden Nutzergruppen mit unterschiedlichen Zielrichtungen unterscheidbar:

- **Fertigungsunternehmen:** Anwender fertigungsnaher Dikis
 - Effizienter Aufbau und Pflege einer umfassenden Wissensbasis
 - Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit
- **Gerätehersteller:** Anwender fertigungsnaher Dikis
 - Erhöhung der Kundenbindung durch innovative Dienstleistungen
 - Rückmeldungen über Produkterfahrungen aus dem Anwendungsumfeld
- **Dienstleister:** Lösungsanbieter im Diagnoseumfeld
 - Administrations- und Redaktionsarbeiten im Community-Diki
 - Anbieten von Informationselementen auf Basis von Geschäftsmodellen

Anwender aus dem Fertigungsumfeld können neben der Führung eines unternehmensinternen Dikis auch durch Partizipation an einer Wiki-basierten Informationsaustauschplattform (Community-Diki in Abbildung 40) schnell und kostengünstig eine umfassende Wissensbasis aufbauen. Hierzu besteht eine Zugriffsmöglichkeit auf öffentlich verfügbare Informationselemente auf Basis definierter Geschäftsmodelle. Zudem bietet dieser Ansatz die Option, wettbewerbskritische Inhalte vertraulich im internen Diki zu halten und nur selektiv Inhalte mit der Community zu teilen. Bestehen keine Bedenken bezüglich der Vertraulichkeit von Inhalten, ist es auch möglich Wissen direkt mit anderen Teilnehmern in ein gemeinsames Diki zu integrieren, ohne intern ein eigenes System zu pflegen. Neben der Vertraulichkeit sind auch Maßnahmen erforderlich, die das Vertrauen in die Korrektheit und die Qualität der verfügbaren Diki-Inhalte sichern. Dazu können Prinzipien des Web-of-Trust im Rahmen dokumentierter Beiträge zur Austauschplattform angewandt werden [206]. Dadurch wird die Reputation der Teilnehmer messbar und Akteure, die eine schädigende Absicht verfolgen, sind identifizierbar [206].

Gerätehersteller können durch das Anbieten von Diki-Inhalten zu den von ihnen vertriebenen Produkten die Qualität ihrer Kundenbeziehungen verbessern und erhalten zudem wertvolle Rückmeldung über ihre Produkte aus dem Fertigungsumfeld. Zudem können sie schnell auf bekannt werdende Schwierigkeiten mit ihren Produkten reagieren und so die Servicequalität verbessern. Daneben treten Dienstleister als Lösungsanbieter auf. Sie erstellen Diki-Inhalte und bieten diese an oder unterstützen den Betrieb des Community-Dikis technisch und organisatorisch.

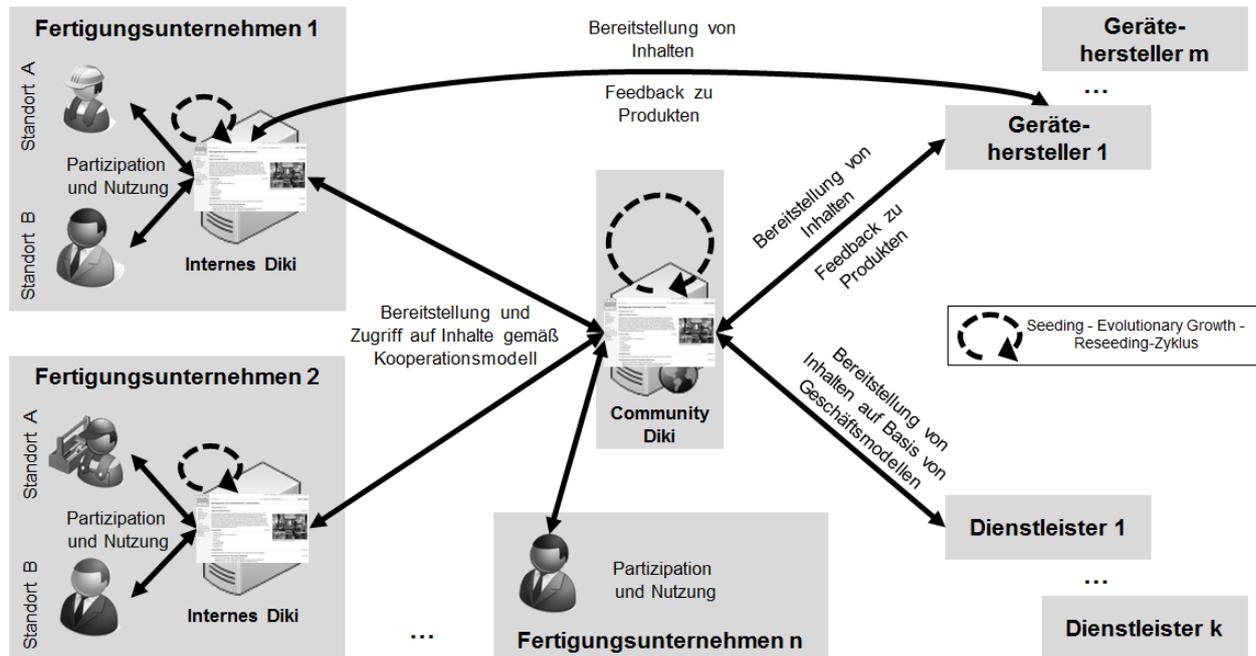


Abbildung 40: Kollaborationskonzept zur Effizienzsteigerung beim Diki-Einsatz

Zur Sicherung einer koordinierten kontinuierlichen Weiterentwicklung der Diki-Inhalte wird auf dem „Seeding, Evolutionary Growth and Reseeding“-Konzept (vgl. [40]) aufgesetzt. Ausgangspunkt dieses Ansatzes ist eine „Seed“-Phase, in der Experten das System mit einem initialen Wissensstand füllen. Im Anschluss erfolgt im Rahmen des „Evolutionary Growth“ eine kontinuierliche Erweiterung der Wissensbasis durch Experten und Anwender während einer Nutzungsphase. Hierbei treten im Laufe der Zeit aufgrund der hohen Gestaltungsfreiheit, die ein Wiki bietet, Inkonsistenzen und Redundanzen auf. Um diese zu beseitigen und damit eine hohe Effektivität und Effizienz des Dikis sicherzustellen, werden in einer „Reseed“-Phase die im Diki enthaltenen Informationen wiederum durch Experten reorganisiert. Diese drei Phasen werden während der Lebensphase des Dikis periodisch durchlaufen. [10]

Das vorgestellte Konzept kann sowohl für Dikis auf Basis herkömmlicher Wikis als auch für semDikis, die auf semantischen Wikis aufsetzen, herangezogen werden. Im letzteren Fall enthalten die ausgetauschten Seiten des semDikis die zuvor erläuterten semantischen Annotationen (vgl. Abschnitt 4.4). Die Nutzergemeinde bearbeitet dabei gemeinsam die dahinterliegende Ontologie und die darauf aufsetzenden Inhalte [215]. Im Falle einer gekoppelten Systemlösung aus internem und öffentlichem semDiki, ist in der „Reseed“-Phase ein besonderes Augenmerk darauf zu legen, die intern verwendete Ontologie kompatibel mit der öffentlichen Version zu halten.

4.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden Herausforderungen zur Optimierung der menschzentrierten Diagnose und Therapie analysiert. Dabei ist der in diesem Zusammenhang entscheidende Faktor ein effizientes Wissensmanagement. Als Hauptaufgaben für ein bedarfsgerechtes Wissensmanagement in diesem Kontext wurde die Förderung der Externalisierung, die gemeinsame Weiterentwicklung sowie die breite Verwendung von Wissen identifiziert. Zur Unterstützung dieser Aufgaben wurde im Folgenden eine geeignete Softwarelösung aus diversen Wissensmanagementsystemen ausgewählt. Mit Wikis stellte sich ein Vertreter der Social Software zur Erfüllung der formulierten Aufgaben als am besten geeignet heraus. Dies begründet sich durch deren Umsetzung des Web 2.0 Gedankens, wodurch sie eine hohe Benutzerfreundlichkeit und eine geringe Systemkomplexität aufweisen sowie die Partizipation und Kollaboration intensiv fördern.

Im Anschluss wurde mit Diki eine Systemlösung auf Wiki-Basis konzipiert und umgesetzt, die ein effizientes Wissensmanagement für diagnoserelevante Informationselemente ermöglicht. Dazu wurden zunächst relevante Informationselemente identifiziert und dann ein geeignetes Strukturierungskonzept zu deren Ablage im Diki entwickelt. Dieses basiert auf einer modularen Artikelstruktur, um die Handhabbarkeit des Dikis zu vereinfachen sowie die Konsistenz der hinterlegten Informationen zu gewährleisten. Die Anwendung der Konzepte der Portalseite, OPL und FMEA-Tabellen verbessert die Informationsstruktur und somit die Effizienz des Informationszugriffs im Diki weiter. Darüber hinaus wurde unter Verwendung der Wiki-Erweiterung SMW mit semDiki ein semantisches Diki aufgebaut. Die in semDiki enthaltenen semantischen Funktionen verbessern das Auffinden und Anwenden von im System hinterlegten Wissensselementen signifikant. Der Aufbau einer ontologiebasierten Wissenssammlung in Form eines semDiki stellt ferner die Grundlage zur effizienten Einführung von leistungsfähigen Systemen der wissensbasierten Diagnose dar. Diese werden im folgenden Kapitel adressiert und setzen auf maschinell zu verarbeitenden Wissensbasen auf, wie sie semantisch annotierte Seiten im semDiki bereitstellen.

Da die Wissenssammlung sowie -strukturierung in Dikis und im Speziellen in semDikis beträchtliche Aufwände erfordert, wurde zudem ein Konzept zum gemeinsamen Aufbau dieser Systemlösungen entwickelt. Dies erfolgte unter Rückgriff auf die Paradigmen der Mass-Collaboration sowie des Peer-to-Peer-Wissensmanagements. Das vorgestellte Konzept verteilt den Aufbau und Pflege der Wissensbasis auf eine breite Anwendergemeinschaft, die durch ihren jeweiligen Beitrag individuelle Potentiale zu nutzen sucht.

5 Aufbau effizienter wissensbasierter Diagnosesysteme durch Applikation webbasierter Ansätze

Im vorausgegangenen Kapitel wurden Wege aufgezeigt, wie die Herangehensweise menschlicher Experten bei der Diagnose und Therapie durch die Bereitstellung webbasierter Informationsplattformen umfassend zu unterstützen ist. Im Folgenden wird mit Expertensystemen bzw. Agentensystemen auf Systemansätze fokussiert, die dem Anwender nicht nur einen strukturierten Zugang zu einer umfassenden Informationsbasis bieten, sondern diese auch selbst verarbeiten können. Dadurch sind sie in der Lage, selbstständig Fehlerursachen zu identifizieren und Abhilfemaßnahmen anzubieten bzw. sogar selbst auszuführen. Bestehende Defizite bei den beiden Systemklassen und mögliche Lösungsstrategien wurden bereits in Abschnitt 2.5 erarbeitet. In diesem Kapitel wird für die beiden Systemklassen getrennt die Applikation identifizierter technologischer Befähiger dargestellt, um Systemlösungen aufzubauen, die über den Stand der Technik hinausgehen, wodurch vorhandene Limitationen beseitigt werden. Dabei werden die jeweiligen zur Anwendung kommenden technologischen Befähiger ausführlich vorgestellt, bevor darauf aufbauend Systemprototypen entwickelt und evaluiert werden.

5.1 Expertensystemeinsatz zur Unterstützung der rechnergeführten Diagnose und Therapie

Im Folgenden wird hinsichtlich der eingangs geschilderten Zielsetzung dieses Kapitels zunächst die Systemkategorie der Expertensysteme betrachtet. Diese verfolgen das Ziel, Anwender bei der Lösung von Problemen zu unterstützen. Dazu bilden sie das Wissen und die Schlussfolgerungsfähigkeit eines menschlichen Experten in einem gegebenen Spezialisierungsbereich nach [15].

5.1.1 Vergleich und Bewertung innovativer Ansätze zur Gestaltung von Expertensystemen

Zur Beseitigung der in Abschnitt 2.5.6 skizzierten Limitationen von Expertensystemen und Umsetzung der dort formulierten webgestützten Lösungsansätze stehen diverse aktuelle Systemlösungen zur Verfügung. Tabelle 16 gibt einen Überblick über diese Ansätze und bewertet sie an Hand wichtiger Kriterien, die über das Angebot typischer technischer Expertensystemfunktionen hinausgehen. Dies beinhaltet eine Bewertung der Qualität der Entwicklungsumgebung und der Anwenderoberfläche sowie die Verfügbarkeit von Dokumentations- und Supportmaterialien. Des Weiteren werden das jeweilige Lizenzmodell der Systemlösung sowie bedeutende Alleinstellungsmerkmale betrachtet.

Tabelle 16: Vergleich innovativer Expertensystemlösungen

Kriterium	JBoss Drools	MyCBR	KnowWE	Semantic-Guide
Entwicklungs- umgebung	+	+	+ (*)	++
Anwender- oberfläche	-	o	+ (*)	++
Dokumentation und Support	o	o	+	+
Lizenz	++	++	++	o
Besonderheiten	Einbindung in Java-Umgebung	Ontologiebasierter Ansatz	Integration in se- mantisches Wiki	Ontologiebasierter Ansatz

Bewertungsstufen: --: sehr schlecht; -: schlecht; o: neutral; +: gut; ++: sehr gut

(*) Tendenz zu „++“, allerdings aktuell noch Defizite in der Bedienbarkeit aufgrund Betastatus

JBoss Drools bietet zur Erstellung und Bearbeitung von Wissensbasen zwei Varianten an. Zum einen eine browserbasierte Oberfläche namens Guvnor sowie ein Plug-In für die populäre Java-Entwicklungsumgebung Eclipse. Zur Verarbeitung der hierdurch definierten Regeln steht Drools Expert als Regel-Engine zur Verfügung. Somit ist der Bereich der Entwicklungsumgebung gut abgedeckt, wenn auch die bereitgestellten Benutzeroberflächen von einer hohen Komplexität gekennzeichnet sind. Das Kriterium der benutzerfreundlichen Anwenderoberflächen ist hingegen nur teilweise erfüllt. Der verfolgte Ansatz basiert hier darauf, dass diese unter Verwendung der Programmiersprache Java und der für diese zur Verfügung stehenden zahlreichen Erweiterungen selbst entwickelt werden. Lediglich unter dem Menüpunkt *Scenario Test* des Guvnors steht eine Testoberfläche bereit, die als rudimentäre Anwenderoberfläche Verwendung finden kann. Hinsichtlich Dokumentation und Support ist die breite Verfügbarkeit von Dokumenten und ergänzender Materialien via Wikis, Foren und Live-Chats positiv. Allerdings wenden sich die vorhandenen Dokumente an versierte Entwickler mit Programmiererfahrung, was die Komplexität der Systemverwendung steigert. Des Weiteren eröffnet das Lizenzmodell unter Open-Source-Bedingungen uneingeschränkte Einsatzmöglichkeiten. [125]

MyCBR setzt den für die Modellierung der Wissensbasis den Gedanken des fallbasierten Schließens um. Es baut dabei auf dem Open-Source-Ontologie-Modellierungswerkzeug Protégé auf und erweitert dieses um CBR-Funktionen. Hierbei bietet es umfangreiche Möglichkeiten, Ähnlichkeitsbeziehungen für Merkmale zu definieren. Zudem stehen Exportfunktionen für die Wissensbasis bereit, die deren Wiederverwendbarkeit in anderen Projekten erleichtert. Sowohl Protégé als auch myCBR sind unter Open-Source-Bedingungen lizenziert und können somit kostenfrei angewandt werden. Ähnlich JBoss Drools stehen auch für myCBR zwei verschiedene Anwenderoberflächen zu Verfügung. Zum einen kann die desktopbasierte Oberfläche von Protégé für die Arbeit mit MyCBR genutzt werden. Allerdings sorgt dies für eine hohe Komplexität der Bedien-

oberfläche, da neben den myCBR-Funktionen auch die sehr umfangreichen Protégé-Funktionen in dieser Oberfläche zur Auswahl stehen. Diese haben allerdings zum Großteil für die Verwendung als Expertensystems keine Funktion. Daneben ist ein browserbasierter, von Protégé separierter, Systemzugriff zur Nutzung von myCBR möglich. Hierzu wird eine Option angeboten, die den Export des Expertensystems aus Protégé und eine anschließende Einbindung auf Applikationsservern wie Apache Tomcat erlaubt. Somit ist eine webbasierte Nutzung von myCBR möglich, jedoch existieren hier Einschränkungen. Die browserbasierte Anwenderoberfläche ist in der bereitgestellten Grundversion sehr einfach gestaltet und muss durch eine manuelle Anpassung der dazugehörigen JSP-Datei aufwändig an den jeweiligen Verwendungszweck angepasst werden. Ferner steht in der Browseroberfläche nicht der vollständige Funktionsumfang des fallbasierten Schließens zur Verfügung. Neue Fälle können hier nicht angelegt werden. Vielmehr sind diese im myCBR-Plug-In innerhalb der Protégé-Umgebung zu ergänzen und anschließend erneut, unter Verwendung der Exportfunktion, für die webbasierte Variante verfügbar zu machen. Diese Vorgehensweise erschwert einfache und schnelle Aktualisierungen an der Wissensbasis. Hinsichtlich Dokumentation und Support ist anzumerken, dass für das Basiswerkzeug Protégé eine umfassende Dokumentation inklusive unterstützender Wikis und Foren existiert, während für die myCBR-Erweiterung lediglich eine Dokumentation vorhanden ist. Weitere Informationen zum Umgang mit myCBR können mitgelieferten Beispielapplikationen entnommen werden. Für Protégé stehen darüber hinaus kostenpflichtige Supportoptionen und Schulungen durch die Entwickler zum Angebot. [139][144]

KnowWE verfolgt den Ansatz, das Prinzip semantischer Wikis mit der Problemlösungsmethodik von Expertensystemen zu kombinieren. Hierzu werden die Möglichkeiten der semantischen Annotation von Wiki-Seiten genutzt (vgl. Abschnitt 4.4), um Problemlösungsinformationen in Wiki-Seiten unter Verwendung einer bereitgestellten generischen Problemlösungsontologie einzubetten. Klassische Wiki-Inhalte werden in einer üblichen Wiki-Syntax angelegt, was auch die Integration von Multimediainhalten umfasst. Zur Eingabe von Problemlösungswissen in Form semantischer Annotationen steht eine erweiterte Syntax zur Verfügung. Alternativ können auch in Wiki-Seiten Formulare integriert werden, die zur Beschreibung und Verknüpfung einzelner Fragen, möglicher Antworten und Lösungen dienen. Im Rahmen des „Save and Integrate“-Konzepts von KnowWE extrahiert das System beim Speichern Problemlösungswissen, generiert daraus automatisch Regeln und speichert diese Inhalte getrennt von den Wiki-Inhalten in einer separaten Problemlösungswissensbasis. Der Zugriff auf Inhalte erfolgt ebenfalls vollständig über herkömmliche Wiki-Seiten, die um spezielle Formulare zur Problemlösung ergänzt werden (vgl. Abbildung 41). Dort werden dem Anwender auf Basis des hinterlegten Wissens Fragen zur Beantwortung gegeben. Unter Verwendung der eingegebenen Informationen wird dann die integrierte Expertensystem-Engine d3web ange-

steuert, die Lösungsvorschläge erarbeitet und zurückliefert. Die Ergebnisdarstellung erfolgt wiederum eingebettet in Wiki-Seiten. [10]

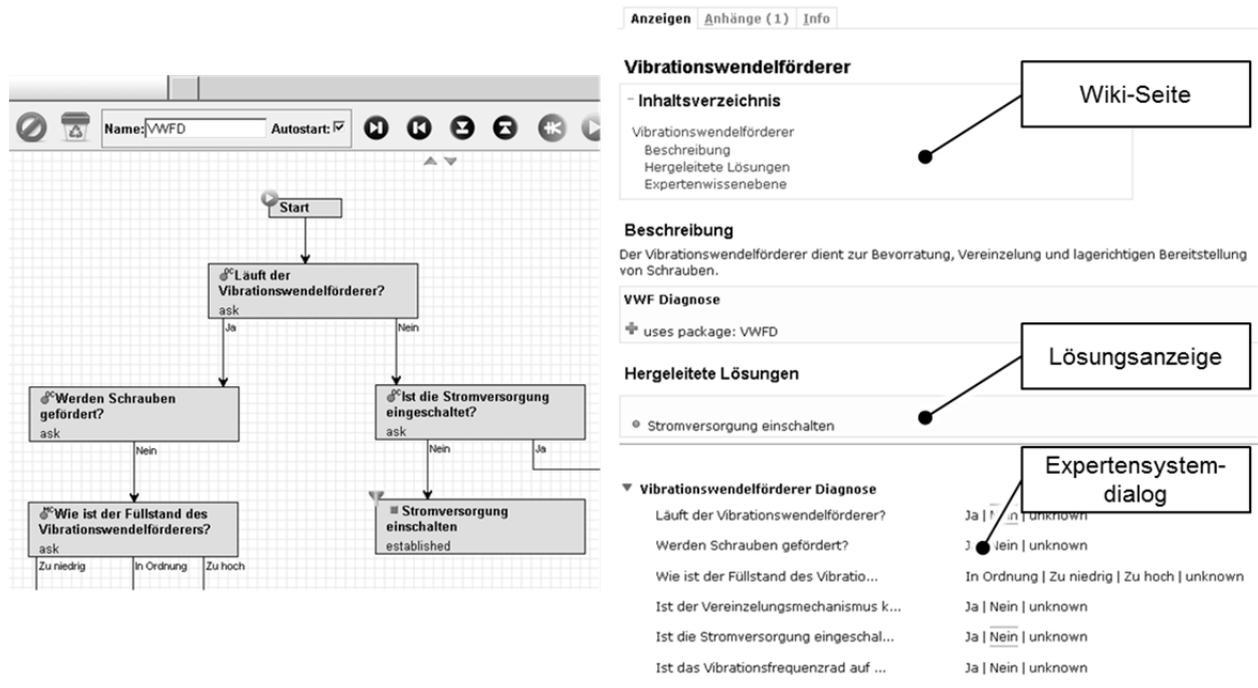


Abbildung 41: Webbasierte Modellierung einer Wissensbasis (links) sowie Expertensystemintegration in eine Wiki-Seite (rechts) mit KnowWE

Durch das Aufsetzen auf dem Wiki-Prinzip, welches auf Formular-Basis um Expertensystemfunktionen erweitert wird, bleiben typische Wiki-Vorzüge hinsichtlich der Benutzerfreundlichkeit sowohl für Entwickler als auch für Anwender erhalten. Durch das hohe Abstraktionsniveau auf Formularbasis können auch Anwender aktiv Wissen beisteuern und die Wissensintegration ist nicht ausschließlich Wissensingenieuren vorbehalten. Auch KnowWE ist unter Open-Source-Bedingungen frei verfügbar und es sind Wiki-basierte Dokumentationen sowie Demoapplikationen verfügbar. Bei einer Anwendung von KnowWE ist jedoch der Beta-Entwicklungsstatus des Projekts kritisch, der sich in diversen Fehlern während der Systemnutzung äußert. [10][137]

Der SemanticGuide stellt ein ontologiebasiertes Ratgebersystem dar, das wie myCBR semantische Technologien mit Expertensystemfunktionalitäten verbindet. Im Gegensatz zu diesem handelt es sich bei SemanticGuide um ein kommerziell vertriebenes Werkzeug. Auch wenn diverse Lizenzmodelle für angepasste Kundenwünsche zur Verfügung stehen, ist die Systemnutzung im Gegensatz zu Open-Source-Systemen in jedem Fall mit Kosten verbunden. Dieser Aspekt wird allerdings dadurch relativiert, dass somit auch eine Kontinuität hinsichtlich Weiterentwicklung und Pflege der Systemlösung gewährleistet ist. Ebenso steht aufgrund des Lizenzmodells ein Installationservice sowie direkter Herstellersupport zur Verfügung. Dieser umfasst die Bereitstellung von Doku-

mentationen, webbasierte Ticket-Systeme und Hotlines. Auch können mit dem Anbieter kostenpflichtige Systemadaptionen an spezielle Kundenbedürfnisse vereinbart werden, was die Lösung für Anwender attraktiv macht, die selbst keine Entwicklungsaufwände übernehmen wollen. Die Architektur gliedert sich in drei Systemkomponenten. Eine Entwicklungsoberfläche erlaubt die browserbasierte grafische Modellierung von Fehlerfällen. Dieser Vorgang wird durch umfangreiche Integrationsmöglichkeiten von multimedialen Inhalten - einschließlich Videos - bei der Formulierung von Fragen und Lösungen im Rahmen eines Fehlerfalls unterstützt. Ferner stehen umfassende Funktionen zum strukturierten Durchsuchen und Anpassen der Wissensbasis sowie der hinterlegten Multimediaelemente bereit. Daneben existiert eine weitere webbasierte GUI zur Administration, über die der Systemzugriff und die Distributionsmechanismen für aktualisierte Wissensbasen an die Nutzer einstellbar sind. Der Anwenderzugriff bei der Problemlösung wird ebenfalls über eine webbasierte Oberfläche, die einen Dialogprozess beinhaltet, abgebildet. [7][148]

Fazit des Expertensystemvergleichs

Ein Vergleich der vorgestellten Systemansätze mit den Abschnitt 2.5.2 identifizierten Limitationen bei der Expertensystemanwendung im Produktionsumfeld zeigt, dass aktuelle, innovative Lösungsansätze in der Lage sind, bisher existierende Defizite zu überwinden. Allen Systemen ist gemein, dass sie generische Basislösungen darstellen, mit denen diverse Anwendungsfälle abbildbar sind. Somit ist es nicht mehr erforderlich, vollständige Expertensysteme durch Eigenentwicklung aller relevanten Komponenten aufzubauen. Ferner setzen die vorgestellten Systeme selbst wiederum auf vorhandenen Werkzeugen auf. So werden der Ontologie-Editor Protégé oder Wiki-Distributionen als Benutzeroberfläche sowie d3web oder Drools Expert als Expertensystem-Engines verwendet. Zukünftige Weiterentwicklungen in diesen Bereichen stehen folglich auch unmittelbar den darauf aufbauenden Systemen zur Verfügung. Auch wurde die Bedeutung von Webtechnologien zur Gestaltung benutzerfreundlicher Systemschnittstellen erkannt und wird von allen Systemen angeboten. Derartige Bedienoberflächen stellen eine Voraussetzung dar, um im Rahmen des Mass-Collaboration-Gedankens gemeinsam Wissensbasen auf- und auszubauen, da sie einen ubiquitären Systemzugriff gewährleisten.

Weiterhin ist festzustellen, dass die Bedeutung einer standardisierten Wissensbeschreibung zur Förderung der Wiederverwendung und des Austauschs von Wissen erkannt wurde. In Konsequenz erlauben die Systeme myCBR, KnowWE und SemanticGuide eine Formalisierung ihres Wissens unter Verwendung der Ontologie-Beschreibungssprache OWL. KnowWE geht diesen Schritt sogar soweit, dass es sich von klassischen Expertensystemanwenderoberflächen löst und zur Nutzerinteraktion auf einem semantischen Wiki aufsetzt. Hierdurch können die Vorteile einer ontologiebasierten Wissensmodellierung mit denen der hohen Benutzerfreundlichkeit eines Wiki-basierten Ansatzes vereint werden. Aktuelle Defizite bestehen bei Systemen wie JBoss

Drools oder myCBR trotz des Aufgreifens eines webbasierten Ansatzes in der Ausgestaltung der Benutzeroberfläche. Im Falle von JBoss Drools ist bisher nur eine Oberfläche für Wissensingenieure, nicht jedoch für Anwender verfügbar. Bei myCBR ist unter der alleinigen Verwendung der webbasierten Oberfläche keine vollständige Systemnutzung möglich. Wegweisend ist in diesem Bereich das System SemanticGuide, das die vollständige Systeminteraktion von Aufbau und Pflege der Wissensbasis über die Administration bis hin zur Systemnutzung über einheitlich strukturierte, schlanke und übersichtliche Weboberflächen abwickelt. Eine ähnlich hohe Benutzerfreundlichkeit kann das System KnowWE erreichen, sofern vorhandene Inkonsistenzen bei der Benutzung mit dem Verlassen des Beta-Entwicklungsstatus beseitigt werden. Dennoch stellt dieses System bereits heute einen innovativen und leistungsstarken Systemansatz dar. Als solcher hat er das Potential, die bisherigen Limitationen beim Expertensystemeinsatz signifikant zu reduzieren und dadurch Anwendungsfelder im Produktionsumfeld zu erschließen.

5.1.2 Aufbau eines Expertensystems zur Unterstützung der technischen Diagnose des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion

Im Anschluss wird die Applikation leistungsfähiger Expertensystemlösungen zur Beseitigung aktueller Defizite im Bereich der Diagnose und Therapie komplexer produktionstechnischer Anwendungsfälle an einem Praxisbeispiel exemplarisch aufgezeigt. Dies erfolgt am Beispiel des Aufbaus des Expertensystems DiaX-SD (Diagnoseunterstützungssystem auf Expertensystembasis für den Schablonendruck) für den Schablonendruckprozess im Rahmen der Elektronikfertigung.

Ausgangssituation und Handlungsbedarf

Der Prozess des Schablonendrucks stellt im Vergleich zu den Folgeprozessen der Bauelementbestückung und des Reflowlötens den kritischsten Prozessschritt der SMT-Fertigung dar. Dies wird durch Untersuchungen belegt, die ergeben, dass dieser Fertigungsprozess für ungefähr zwei Drittel aller Fehler verantwortlich ist [177]. Deshalb kommt der exakten Überwachung und zielsicheren Fehlerbeseitigung dieser Phase eine immens hohe Bedeutung zu. Nur so sind hohe Reparatur- und Ausschusskosten, die sich im weiteren Verlauf der Prozesskette ergeben, vermeidbar [180]. Um diese Problematik zu beseitigen, sind bezüglich der Überwachung bereits Maßnahmen erfolgt. So sind Systeme der automatischen optischen Inspektion ergänzend zur Sichtkontrolle verfügbar, die eine objektive Beurteilung des Druckergebnisses erlauben. Insbesondere 3D-Pasteninspektionssysteme sind hier besonders leistungsfähig, da sie eine umfassende Analyse der Druckqualität durch die Einbeziehung von Qualitätsmerkmalen wie der Transfereffizienz oder des Depothöhenverhältnisses erlauben [199]. Daneben stehen mittlerweile diverse Softwarelösungen zur Verfügung, welche die Daten aus den Inspektionssystemen - unter anderem auch unter Anwendung von Webtechnologien - aufbereiten und darstellen [71][200]. Die Überwachungsphase der technischen Diagnose ist

somit gut abgedeckt, wohingegen bei Diagnose und Therapie Handlungsbedarf besteht. Während z. B. für den Bestückungsprozess seit Jahren Softwarelösungen zur Prozessdiagnose existieren (vgl. [236]), sind für den Schablonendruckprozess keine Unterstützungssysteme vorhanden. Die Einleitung effektiver Abhilfemaßnahmen unter Einbeziehung der umfassenden Informationsbasis, die durch Überwachungssysteme bereitgestellt wird, ist dadurch problematisch. Sie ist aktuell immer vom individuellen Wissensstand des Fertigungsmitarbeiters abhängig, der sich um das jeweilige Problem kümmert. Seine Aufgabe ist es, eine Vielzahl unterschiedlicher Einflussfaktoren und Wirkzusammenhänge, die zudem in der Regel in Wechselwirkung stehen, korrekt zu interpretieren, um eine geeignete Abhilfemaßnahme zu identifizieren [94]. Um das hierin liegende Optimierungspotential zu heben, ist dem Anwender ein Expertensystem zur Seite zu stellen, das ihm bei diesem komplexen Entscheidungsprozess unterstützt. Dadurch können in Konsequenz Eingriffszeiten reduziert sowie die Erfolgsquoten der Maßnahmendurchführung erhöht werden, was sich wiederum in geringeren Stillstandszeiten und Ausschussmengen niederschlägt [94].

Lösungsansatz

Bei Auswahl und Aufbau einer fertigungsnahen Expertensystemlösung zur Effizienzsteigerung bei Diagnose und Therapie wie DiaX-SD sind spezifische Anforderungen zu berücksichtigen. Diese umfassen die folgenden Aspekte:

- Hohe Fehleridentifikationsquote
- Unterstützung eines strukturierten Diagnoseworkflows
- Benutzerfreundliche Systemoberflächen
- Breite Systemzugriffsmöglichkeit
- Robuste Softwarelösung mit geringem Wartungsaufwand
- Effizienter Aufbau und Pflege der Wissensbasis

Auf Basis dieser Entscheidungskriterien kommt für den Aufbau von DiaX-SD die Software SemanticGuide, als Basissystem zum Einsatz, da diese die Anforderungen am besten erfüllt (vgl. Abschnitt 5.1.1). Deren Stärken im Bereich der Benutzeroberflächen fördern zum einen den leichten Einstieg der Anwender in die Systemnutzung, und stellen zum anderen die Voraussetzung für einen überall verfügbaren Systemzugriff dar. Ferner erfüllt dieses System im Gegensatz zu Systemen wie KnowWE bereits die Forderung nach einer ausgereiften und stabilen Systemlösung. Auch ein strukturierter Workflow bei Ursachenidentifikation und Maßnahmendurchführung wird durch den angebotenen Dialogprozess unterstützt. Vor allem die weitreichenden Möglichkeiten der Einbindung von Multimediadokumenten in diesen Prozess gewährleisten eine zielsichere Ursachenfindung und damit eine hohe korrekte Fehleridentifikationsquote. Die Möglichkeit des effizienten Aufbaus und Pflege der Wissensbasis unter Nutzung des Mass-

Collaboration-Ansatzes ist mit allen webbasierten Systemen möglich (vgl. Abschnitt 5.1.3).

Wissen und Wirkbeziehungen beim Schablonendruckprozess

Um eine hohe korrekte Fehleridentifikationsquote bei der Unterstützung des Schablonendruckprozesses zu erlangen, ist relevantes Wissen für alle Ebenen der Diagnose (vgl. Abschnitt 2.3) zu sammeln, zu strukturieren und in DiaX-SD zu integrieren. Dies umfasst Informationen aus den Betrachtungsebenen System, Prozess und Produkt. Speziell das Prozesswissen stellt aufgrund seiner Komplexität die Wissensakquise vor große Herausforderungen. Auf diese wird durch ein mehrstufiges Vorgehen (vgl. [199]) reagiert, das auf Literaturrecherchen, Experteninterviews sowie Versuchsreihen als Wissensquellen setzt. Im Rahmen dieses Vorgehens finden die folgenden Hauptschritte statt:

- Sammlung typischer Fehlerbilder beim Schablonendruckprozess
- Festlegung von Qualitätsmerkmalen zur Bewertung der Fehlerbilder
- Ermittlung und Strukturierung der Einflussgrößen auf den Schablonendruckprozess
- Erarbeitung von Wirkzusammenhängen zwischen Einflussgrößen und Qualitätsmerkmalen
- Wissensstrukturierung in Form von Mind-Mapping [94][199]

Integration des Wissens in die Expertensystemlösung

Ausgangsbasis der Wissensintegration in DiaX-SD ist das mittels Mindmaps strukturierte Wissen. Dieses wird unter Verwendung der webbasierten Benutzerschnittstelle für Wissensingenieure des SemanticGuide, dem SemanticGuide Designer, im Expertensystem hinterlegt. Dazu werden Fehlerfälle im System angelegt, die jeweils manuell bzw. automatisch detektierte Verstöße gegen Qualitätskenngrößen oder Produktspezifikationen sowie Maschinenfehler repräsentieren (vgl. Abbildung 42). Im Anschluss werden die zur Verfügung stehenden Fragen- und Ursachenknoten mit Inhalten hinterlegt und verknüpft. Diese Elemente strukturieren den Dialogprozess, der später den Nutzer bei der Ursachenfindung unterstützt, in Form eines Netzwerkes. Als weitere Elemente sind ferner Subdiagnoseknoten vorhanden, die eine Kapselung und Wiederverwendung von Teilbereichen des Fehler-Ursachennetzwerkes in anderen Fehlerfällen erlauben. Auch einzelne Frage- bzw. Ursachenknoten können wiederverwendet werden, indem sie anstelle der Neuerstellung von Elementen aus einem Dropdown-Menü ausgewählt werden. Knoten, die Fehlerursachen repräsentieren, enthalten neben deren detaillierten Beschreibung auch Informationen über Abhilfemaßnahmen sowie deren Durchführung. Auch ist an dieser Stelle die Integration von multimedialen Inhalten in Form von PDF-Dokumenten, Bildern oder Videos in einzelne Frage- bzw. Ursachenknoten möglich.

Dadurch wird entweder die treffsichere Beantwortung einer Frage oder die korrekte Ausführung einer Abhilfemaßnahme unterstützt. Daneben besteht die Möglichkeit, Synonyme für bei der Modellierung des Fragen-Ursachennetzwerks verwendete Begriffe zu definieren. Dies verbessert die Leistung von DiaX-SD weiter, da es sich dadurch auf unterschiedliche Anwenderjargons einstellen kann.

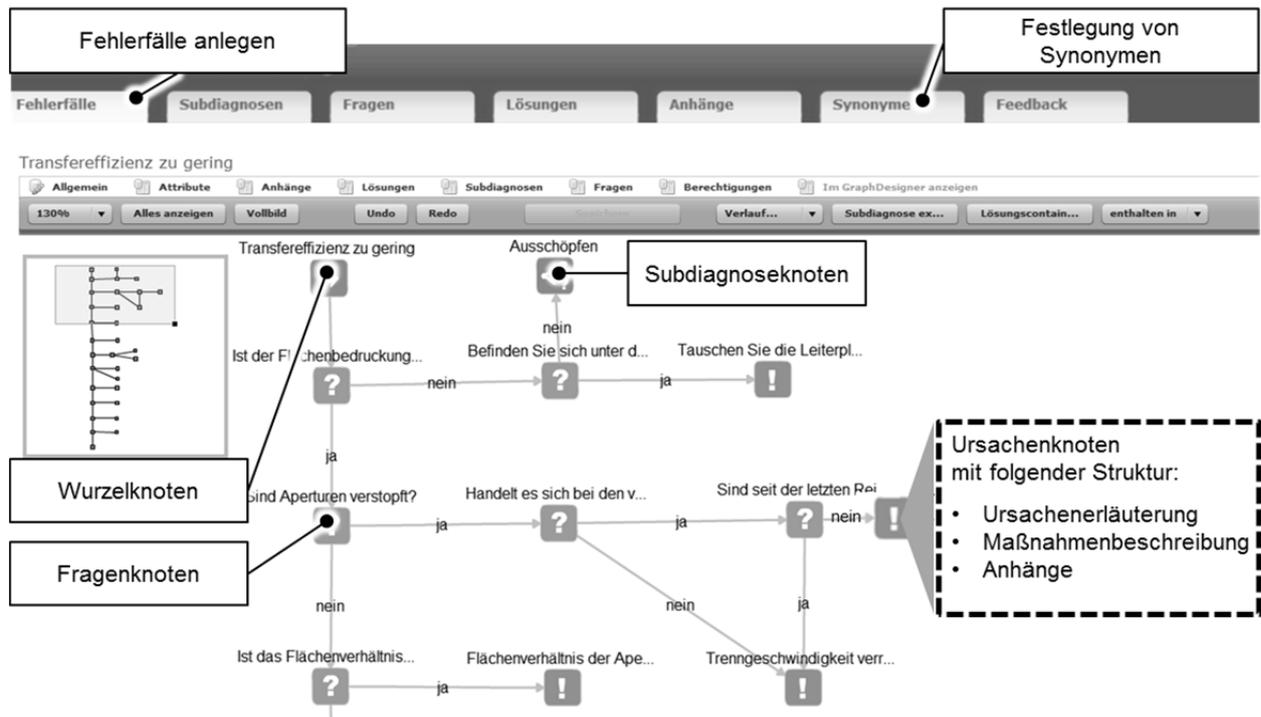


Abbildung 42: Modellierung von Diagnosewissen für DiaX-SD

Im nächsten Schritt werden unter Verwendung der Administrations-GUI des SemanticGuide die angelegten Fehlerfälle in die Anwenderoberfläche des Expertensystems übertragen. Hierbei besteht eine Auswahlmöglichkeit, welche Fehlerfälle in die Anwenderoberfläche übernommen werden sollen. Dadurch ist sichergestellt, dass in Arbeit befindliche Fehlerfälle in der vom SemanticGuide Designer verwendeten Wissensbasis enthalten sind, nicht jedoch in der Wissensbasis, auf die das Anwendersystem SemanticGuide zugreift. Hiermit wird die Konsistenz der enthaltenen Informationen sichergestellt.

Verwendung von DiaX-SD zur Unterstützung von Diagnose und Therapie

Die Verwendung von DiaX-SD über die Anwenderoberfläche SemanticGuide wird durch einen manuell oder automatisch detektierten Verstoß gegen vorgegebene Qualitätsmerkmale aufseiten des Produkts bzw. des Prozesses oder durch erkannte Maschinenfehler ausgelöst. Daraufhin greift der Anwender zur zielsicheren Ursachenidentifikation bzw. Maßnahmenauswahl auf DiaX-SD zurück. Dazu startet er den dialogbasierten Unterstützungsprozess durch Eingabe einer Beschreibung der festgestellten Fehlersitu-

ation. Auf Basis dieser Informationen startet das System den Inferenzprozess und grenzt den Lösungsraum potentieller Ursachen in einem Frage-Antwortprozess mit dem Nutzer kontinuierlich ein (vgl. Abbildung 43). Parallel dazu bekommt der Nutzer in Abhängigkeit des Fortschritts des Diagnoseprozesses aktuell noch infrage kommende Lösungen aufgelistet. Dies erlaubt es dem Anwender, unmittelbar zu einer, ihm am plausibelsten erscheinenden, Ursache zu springen und sich die dort hinterlegte Beschreibung und Maßnahme anzusehen. Ebenso hat er die Möglichkeit, durch einen Klick auf eine bereits beantwortete Frage im angezeigten Diagnoseverlauf an diesen Punkt des Prozesses zurückzukehren, falls er seine Entscheidung revidieren möchte.

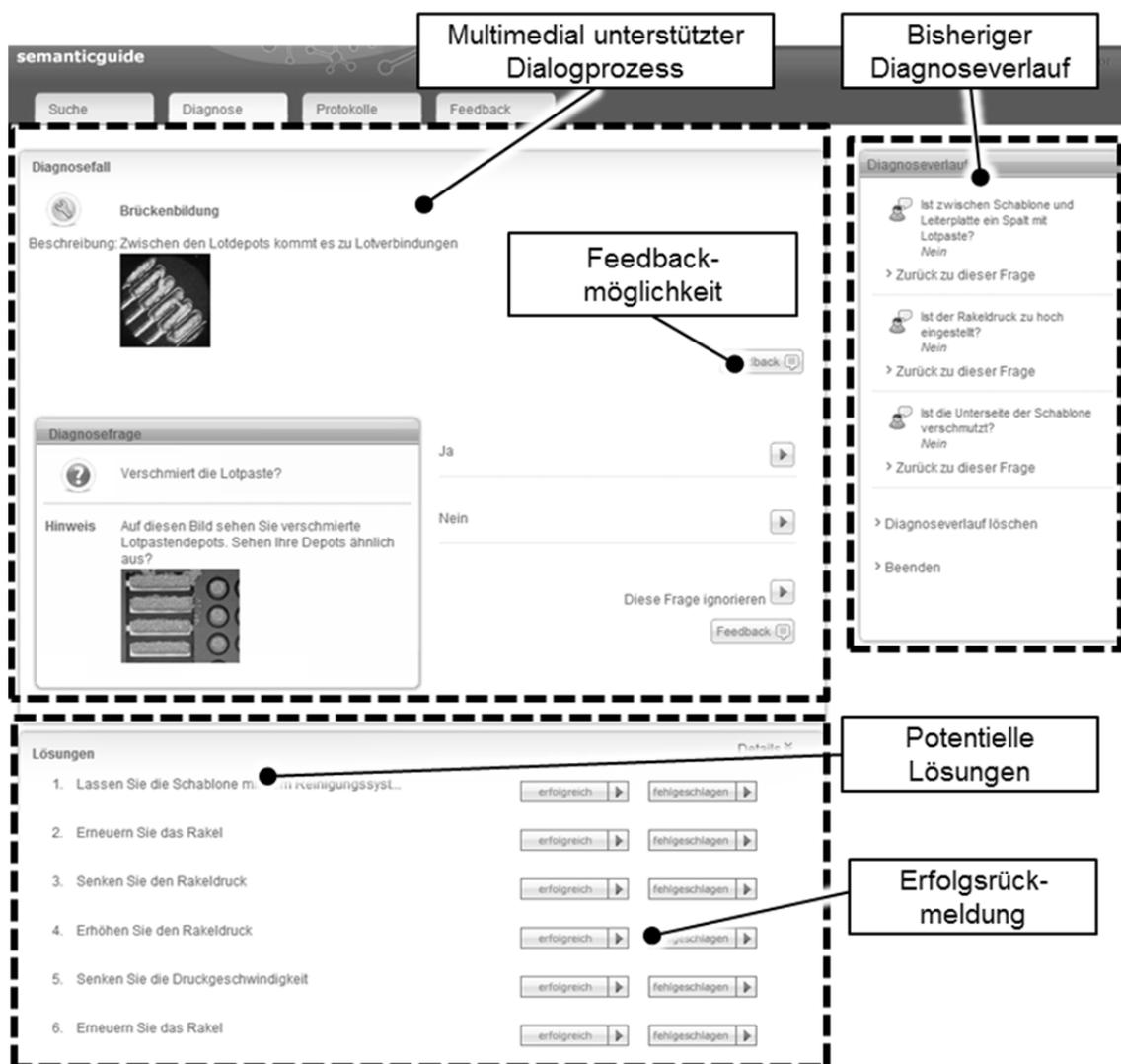


Abbildung 43: Unterstützung von Diagnose und Therapie in DiaX-SD durch dialogbasierte Ursachenfindung

Ist der Prozess soweit fortgeschritten, dass der Anwender ein Ursachenelement selektiert, bekommt er dessen Inhalte in einer Detailansicht dargestellt (vgl. Abbildung 44). Hier werden Ursache und Abhilfemaßnahme ausführlich erläutert. Vor allem die Einbin-

dung von Multimediaobjekten ist besonders wertvoll, um auch unerfahrenem Personal die schnelle Erfassung und korrekte Ausführung komplexer Tätigkeiten zu erlauben. Des Weiteren sind die Ursachenknoten mit Schaltflächen zur Rückmeldung versehen, ob eine Lösung erfolgreich war oder fehlgeschlagen ist, was Optimierungspotentiale in diesem Bereich sichtbar macht.

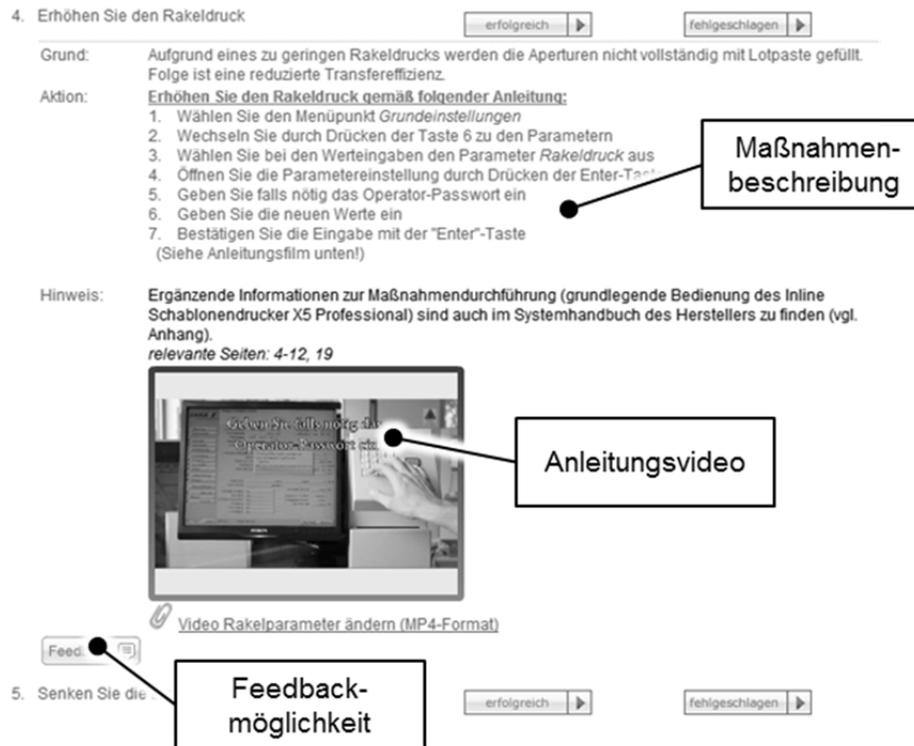


Abbildung 44: Struktur eines Lösungsknotens in DiaX-SD mit Maßnahmenbeschreibung in der Anwenderoberfläche im Detail

Darüber hinaus hat der Nutzer an allen Stellen des Diagnoseprozesses die Möglichkeit, unter Verwendung einer Feedback-Schaltfläche mit Freitexteingabe, Rückmeldung zu Fragen, Antworten sowie angebotenen Lösungen an die Wissensingenieure zu geben. Dadurch wird die kontinuierliche Optimierung der Systemlösung gefördert. Insbesondere die Integration fehlender Inhalte, die einem Anwender bekannt sind, kann hierüber unterstützt werden. Ebenso werden auf diese Weise Fehler, Inkonsistenzen oder obsoletere Inhalte in der vorhandenen Wissensbasis aufgedeckt und in einem strukturierten Prozess sukzessive eliminiert.

5.1.3 Effizienter Aufbau und Pflege von Wissensbasen für Expertensysteme unter Rückgriff auf Mass-Collaboration

In den vorausgegangenen Abschnitten wurde demonstriert, wie mit DiaX-SD eine anwenderfreundliche Expertensystemnutzung unter Verwendung webbasierter Benutzerschnittstellen erfolgen kann. Zudem wurde die effiziente Bereitstellung der erforderli-

chen Systemkomponenten unter Rückgriff auf existierende Baukästen dargestellt. Darüber hinaus ist (vgl. Abschnitt 2.5.2) mit der Unterstützung des Aufbaus und der kontinuierlichen Weiterentwicklung von Wissensbasen für Expertensysteme eine weitere Herausforderung zu lösen, sofern eine effiziente Nutzung von Systemen wie DiaX-SD sichergestellt sein soll. Hierbei kommt ein analoges Konzept wie in Abschnitt 4.5 bei der Effizienzsteigerung des Diki-Einsatzes zur Anwendung (vgl. Abbildung 45). Es besteht lediglich der Unterschied, dass keine auf Wiki-Basis strukturierten Informationen, sondern Inhalte der Wissensbasen der Expertensysteme ausgetauscht bzw. gemeinsam entwickelt werden. Allerdings sind im Falle des gemeinsamen Aufbaus von Expertensystemen die technischen Ansprüche bei der Reorganisation aufgrund der Komplexität der Wissensbasen weitaus höher als im Falle von Wiki-Artikeln. Vor diesem Hintergrund wird in [192] eine Kombination aus manueller Arbeit und Methoden des maschinellen Lernens zur Erfüllung dieser Aufgabe propagiert, deren technische Umsetzung dort ebenfalls beschrieben wird. Diese kann wiederum in das „Seeding, Evolutionary Growth and Reseeding“-Konzept eingebettet werden.

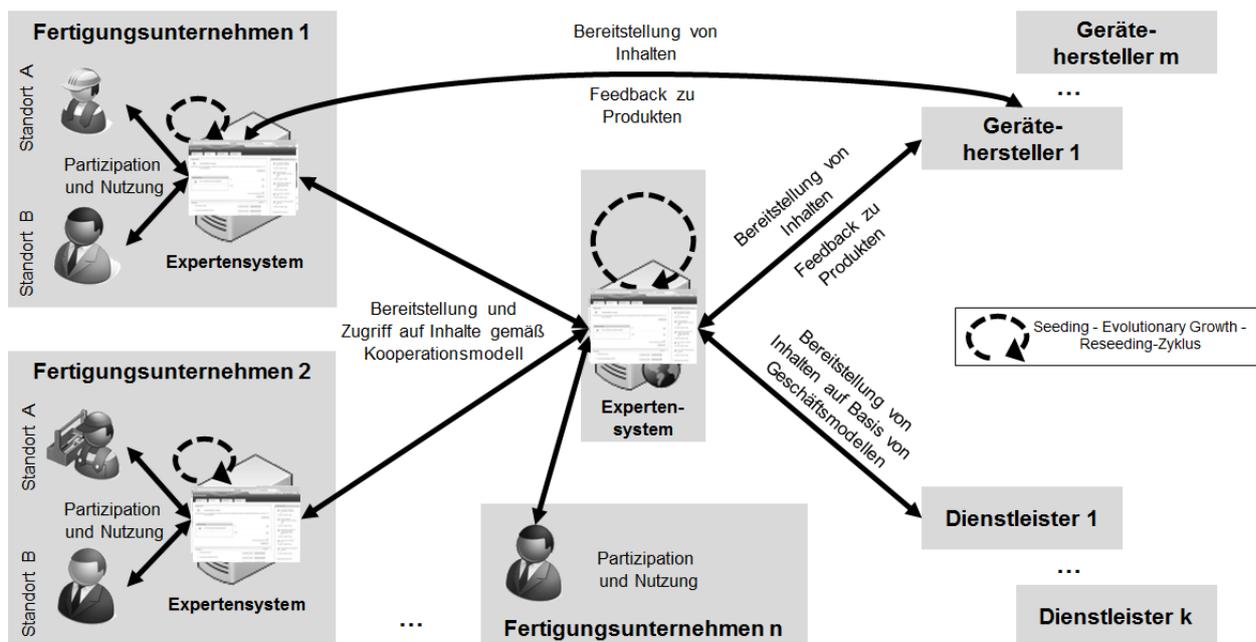


Abbildung 45: Kollaborationskonzept zur effizienten Entwicklung von Wissensbasen für Expertensysteme

5.1.4 Zusammenfassung

Wie erläutert, ist die Systemklasse der Expertensysteme bereits seit Jahrzehnten bekannt und auch für den Einsatz im Produktionsumfeld existieren zahlreiche Beispiele (vgl. [18][127][236]). Sie stellt potentiell eine sehr leistungsfähige Unterstützungsmöglichkeit für Anwender im Rahmen der technischen Diagnose dar, was der Grund für die vielfältigen Anwendungsversuche ist. Dennoch blieb diesen Systemen bisher der Durchbruch im Feld der Produktionstechnik verwehrt. Bei einer in diesem Zusammen-

hang durchgeführten Analyse wurden generelle Defizite dieser Systemklasse hinsichtlich der Komplexität des Aufbaus, der Pflege und der Bedienbarkeit identifiziert. Darauf aufbauend wurden Lösungsstrategien zu deren Beseitigung erarbeitet und durch den Aufbau des Systems DiaX-SD an einem Anwendungsbeispiel demonstriert. Wie in Abschnitt 2.5.2 dargestellt, beruhen die Lösungsstrategien schwerpunktmäßig auf neuen Entwicklungen im Webumfeld. Dort werden vielfältige Baukastensysteme vor allem unter Open-Source-Bedingungen verfügbar, die als Ausgangspunkt für den Systemaufbau dienen können. Zudem unterstützen webbasierte Systemarchitekturen und -schnittstellen einen ubiquitären Zugriff. Dadurch kann die Systemanwendung problemlos skalieren und in zahlreichen Fertigungszellen und -standorten genutzt werden, was die breite Applikation von Systemen wie DiaX-SD fördert. Damit einhergehend verteilen sich die Administrations- und Pflegeaufwände an der Wissensbasis von DiaX-SD auf einen großen Nutzerkreis. Die Zusammenarbeit zur Systementwicklung und -weiterentwicklung muss dabei nicht auf ein Unternehmen beschränkt bleiben, sondern kann im Rahmen des Mass-Collaboration-Paradigmas unter Einbeziehung einer vielschichtigen Community erfolgen (vgl. Abschnitt 5.1.3). Dies reduziert die individuellen Aufwände beim Expertensystemeinsatz weiter und stellt zudem einen Zugang zu einer neuen Quelle für diagnoserelevantes Wissen dar, das vorher im Unternehmen nicht verfügbar war. Webbasierte Anwenderschnittstellen, die auch die Darstellung von Multimediainhalten integrieren, reduzieren die Einarbeitungsaufwände der Nutzer und unterstützen die effektive und effiziente Nutzung von DiaX-SD, was die Optimierung des Expertensystemeinsatzes abrundet.

5.2 Agentenbasierte Systeme zur autonomen Diagnose

Agentenbasierte Systeme sind per Definition in der Lage, selbstständig innerhalb einer Umgebung Aktionen durchzuführen, um die von ihnen verfolgten Ziele zu erreichen [234]. Damit erweitern sie das Konzept der Expertensysteme, das die Schlussweise eines menschlichen Experten nachzubilden versucht, um die Fähigkeit, auch die sich hieraus ergebenden Handlungen autonom durchzuführen zu können. Somit ergibt sich das Potential einer vollständig ohne Nutzereingriffe erfolgenden Überwachung, Diagnose und Therapie. Dadurch sind typische Maßnahmen (vgl. Abschnitt 2.3.1) bei der Fehlerbeseitigung an automatisierten Produktionsanlagen effizienter durchführbar, da Nebenzeiten, die sich aus den Restriktionen des menschlichen Handelns ergeben, entfallen. Hieraus resultieren reduzierte Stillstandszeiten und in Konsequenz eine gesteigerte Gesamtanlageneffektivität.

Agentenbasierte Systeme erfahren zudem im Rahmen des Zukunftskonzepts der Industrie 4.0 eine gesteigerte Bedeutung. Im Mittelpunkt dieser Vision stehen Cyber-Physical-Systems (CPS) als Kernkomponente zur Realisierung einer dezentralen, intelligenten Produktions- und Logistikumgebung [189]. CPS sind gemäß [22] als Systeme definiert, die über intelligente Sensoren und Aktoren zur Interaktion mit ihrer Umwelt verfügen.

Von bestehenden technischen Systemen unterscheiden sie sich durch die Fähigkeit, das eigene Verhalten abhängig von der Umwelt zu planen und anzupassen. Zudem sind sie in der Lage, neue Verhaltensweisen und -strategien zu erlernen und sich dadurch selbst zu optimieren. [22] Beim Vergleich der Definition von CPS und Agenten sind deutliche Überlappungen sichtbar, was Agenten zu einem der zentralen Bausteine zur Umsetzung der Vision der Industrie 4.0 macht. Für den Aufbau einer cyberphysischen Produktionsumgebung nimmt die Beherrschung der Entwicklung sowie die Anwendung agentenbasierter Systemprinzipien generell und insbesondere im Bereich der technischen Diagnose während des Anlagenlebenszyklus eine entscheidende Rolle ein.

Die sich aus den genannten Aspekten ergebenden Implikationen werden im Folgenden durch die mit der Entwicklung von DiMAS (Diagnosesystem auf Multiagentensystembasis) adressiert. Hierbei kommt den Anforderungen der Modularität, Autonomie, Dezentralität, Anpassungsfähigkeit, Skalierbarkeit und Integrationsfähigkeit von Automatisierungssystemen eine große Bedeutung zu [163]. Durch die Verwendung agentenbasierter Systeme wird es möglich, Lösungen zu entwickeln, die den hohen Flexibilitätsanforderungen zukünftiger verteilter Produktionsumgebungen gerecht werden [42].

5.2.1 Vergleich und Bewertung neuartiger Ansätze zur Gestaltung agentenbasierter Systeme

Mit der serviceorientierten Architektur und dem Cloud-Computing sind im Webumfeld in den letzten Jahren Entwicklungskonzepte formuliert worden, die im Rahmen der agentenbasierten Diagnose vorteilhaft anwendbar sind, um existierende Defizite zu eliminieren (vgl. Abschnitt 2.5.6). Im Folgenden werden zunächst die Grundgedanken der beiden Ansätze vorgestellt, bevor im Anschluss deren Anwendungspotentiale in Verbindung mit dem Agentenparadigma genutzt werden, um DiMAS aufzubauen.

Serviceorientierte Architektur (SOA)

Unter einer serviceorientierten Architektur wird ein Entwurfsmuster für IT-Systemarchitekturen verstanden, das das Vorgehen bei Entwurf und Realisierung von lose gekoppelten, verteilten Softwaresystemen beschreibt. Insbesondere wird das Zusammenspiel seiner zentralen Einzelbausteine, den sogenannten Services, spezifiziert [87]. Ein Service wird dabei folgendermaßen beschrieben:

- Hat die Leistungsfähigkeit, Arbeit für Dritte auszuführen
- Spezifiziert die Arbeit, die er für Dritte ausführen kann
- Bietet explizit an, dass er Arbeit für Dritte ausführt [146]

Dabei ist im Rahmen der Service-Definition ein wichtiger Aspekt zu beachten. Auch wenn ein Service potentiell die Fähigkeit hat, Arbeiten für Dritte auszuführen, wird diese Fähigkeit erst durch die weiteren Bestandteile einer SOA nutzbar [146]. Eine vollwertige SOA umfasst folgende Komponenten (vgl. Abbildung 46):

- **Service-Provider:** Bieten im System komplexe Dienste an, in deren Bearbeitung sie wiederum weitere Dienste mit einbeziehen können. Diese Fachdienste sind die zentralen Bausteine einer SOA.
- **Service-Consumer:** Konsument von Diensten, der die Kommunikation durch die Anfrage einer Dienstleistung initialisiert.
- **Service-Mediation-System:** Bietet die technische Basis für die verteilte Kommunikation der angeschlossenen Dienste.
- **Service-Registry:** Verzeichnisdienst, der für alle im System registrierten Services die technischen Beschreibungen und Kontaktinformationen enthält.
- **Service-Repository:** Enthält Metadaten für die technische Zusammenführung und Ansteuerung von Services. Dies umfasst Kontraktinformationen und Berechtigungsprofile. [87]

Eine SOA stellt alle Funktionalitäten bereit, um Geschäftsprozesse, wie sie in der realen Arbeitswelt üblich sind, in die virtuelle Welt zu übertragen. Das Zusammenspiel der einzelnen SOA-Komponenten bei der Abwicklung eines Geschäftsprozesses zeigt Abbildung 46. Dabei wird die klassische Client-Server-Architektur, die durch Service-Consumer und Service-Provider repräsentiert ist, um eine dritte Systemkomponente, das Service-Registry&Repository, erweitert.

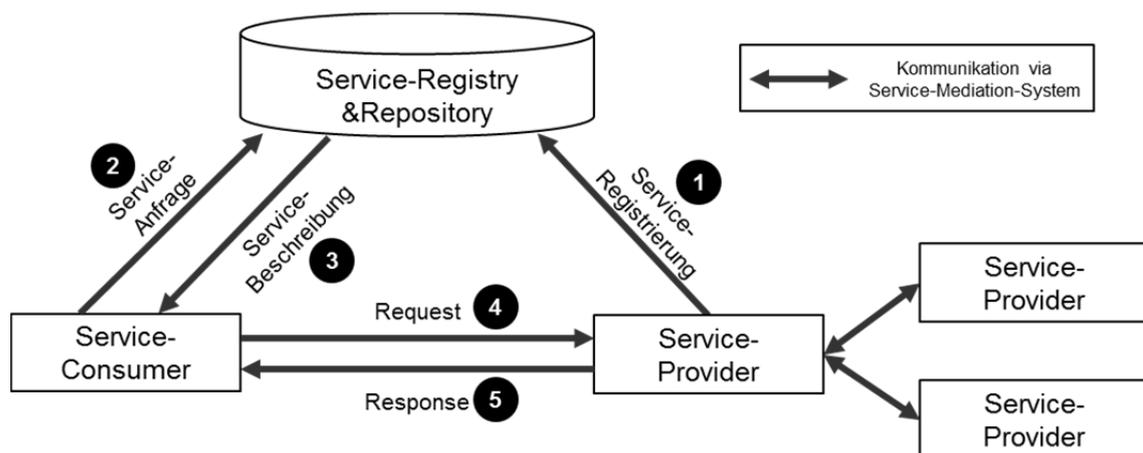


Abbildung 46: SOA-basiertes Dienstleistungsmodell (in Anlehnung an [81][87])

Das Service-Registry&Repository nimmt Service-Registrierungen von Service-Providern an und verwaltet die erforderlichen Kontrakt- und Kommunikationsinformationen (vgl. (1) in Abbildung 46). Ein Kunde, der auf der Suche nach einer Dienstleistung ist, wird in

der SOA durch einen Service-Consumer repräsentiert. Dieser stellt eine Anfrage an das Service-Registry&Repository mit seiner Aufgabenbeschreibung (vgl. (2) in Abbildung 46). Daraufhin erhält er Antwort, ob die gewünschte Dienstleistung verfügbar ist. Im Falle einer positiven Antwort erhält er dabei eine vollständige Service-Beschreibung vom Verzeichnisdienst zurück (vgl. (3)). Diese enthält Informationen darüber, wie und unter welchen Bedingungen ein angebotener Dienst nutzbar ist. Basierend auf diesen Informationen findet die eigentliche Ausführung der Dienstleistung im Rahmen eines einfachen Request-Response-Musters statt (vgl. (4) und (5) in Abbildung 46). Weitere Verhandlungen sind üblicherweise nicht erforderlich. Falls angebotene Dienste dennoch auf komplexen Nachrichtenaustauschmustern beruhen sollten, stehen auch hierfür geeignete Ablaufmuster zur Verfügung (vgl. [87]). Zudem ist es möglich, dass komplexe Dienste im Rahmen des vorgestellten Dienstabwicklungsmodells wiederum auf weitere Dienste zur Erfüllung einer Dienstleistung zurückgreifen. Hieraus ergibt sich eine modulare und äußerst flexible Architektur zur Abbildung von Geschäftsprozessen auf Basis standardisierter Schnittstellen. Somit bietet dieser Ansatz ein hohes Maß an Wiederverwendungspotential bezüglich der involvierten Komponenten. [87]

Serviceorientierte Architektur auf Webservice-Basis

Webservices sind im Zuge der stark wachsenden Popularität des World Wide Web zu Beginn des Jahrtausends entstanden. Seitdem haben sich diese zu einem Quasistandard für die Bereitstellung notwendiger Basistechnologien zur Umsetzung von SOA entwickelt. Unter dem Begriff Webservice werden modulare, sich selbst beschreibende Applikationen verstanden, die über das Internet publiziert, lokalisiert und aufrufbar sind [218]. Webservices bauen auf drei grundlegenden Standards zur Definition ihrer Schnittstellen sowie ihrer Kommunikation auf:

- **Simple Object Access Protocol (SOAP):** Von Registry, Consumer und Provider gemeinsam genutztes XML-basiertes Kommunikationsprotokoll, welches wiederum auf HTTP aufsetzt, wodurch eine gute Firewall-Durchlässigkeit sichergestellt wird.
- **Web Service Description Language (WSDL):** XML-basierte Schnittstellenbeschreibungssprache für Webservices.
- **Universal Description, Discovery and Integration (UDDI):** Spezieller Webservice, der als Verzeichnisdienst fungiert und die Registrierung und Lokalisierung von Webservices ermöglicht. [218]

Beim Vergleich von SOA bzw. Webservices mit dem agentenbasierten Systemansatz (vgl. Abschnitt 2.5.3) fallen viele Ähnlichkeiten hinsichtlich der Architektur und den Kommunikationsabläufen auf. Beide Ansätze basieren auf einem Verzeichnisdienst, der die im System vorhandenen Verarbeitungsfähigkeiten sowie deren Kontaktinformationen verwaltet. Die Darstellung von Verarbeitungskapazitäten erfolgt durch modulare Kom-

ponenten (Agenten bzw. Services), die auf Basis einer definierten Kommunikationsinfrastruktur mit dem Verzeichnisdienst sowie mit anderen Komponenten interagieren. Dabei weisen beide Ansätze individuelle Stärken und Schwächen auf. Webservices auf Basis von SOAP, WSDL und UDDI haben eine große Verbreitung und finden eine hohe Akzeptanz. Als einfache, zustandslose Elemente, die nach einem einfachen Request-Response-Muster arbeiten, ist ihr Anwendungsbereich das Anbieten einfacher Informationen. Agenten hingegen zeichnen sich durch komplexe Interaktionsbeziehungen aus, die es ihnen erlauben, auch komplizierte Aufgabenstellungen autonom in ihrer Systemumgebung zu verfolgen. Ihr Paradigma ist jedoch im Vergleich zu Webservices deutlich geringer verbreitet und ihr Standard weniger akzeptiert. [201]

Potentiale des Webservice-basierten SOA-Einsatzes bei Agentensystemen

Eine Kombination der beiden Paradigmen bietet folglich ein hohes Potential, um eine standardisierte, allgemein akzeptierte und zur Ausführung komplexen Handlungen fähige Systemarchitektur zu schaffen. Insbesondere Anforderungen, die sich aus der Zukunftsvision einer cyberphysischen Produktionsumgebung ergeben, sind so umfassend erfüllbar. Dieses Potential wurde erkannt und es existiert in Form der IEEE AWSI WG bereits eine der FIPA untergeordnete Arbeitsgruppe, die an der Erreichung dieses Ziel arbeitet [46][201]. Angesichts dieser Entwicklungen stellen serviceorientierte Architekturen auf Webservice-Basis eine adäquate Grundlage für den Architekturentwurf von DIMAS dar.

Cloud-Computing

Unter dem Begriff Cloud-Computing wird ein IT-Infrastrukturparadigma verstanden, das folgendermaßen definiert ist:

„Cloud Computing bezeichnet das dynamisch an den Bedarf angepasste Anbieten, Nutzen und Abrechnen von IT-Dienstleistungen über ein Netz. Angebot und Nutzung dieser Dienstleistungen erfolgen dabei ausschließlich über definierte technische Schnittstellen und Protokolle. Die Spannbreite der im Rahmen von Cloud Computing angebotenen Dienstleistungen umfasst das komplette Spektrum der Informationstechnik und beinhaltet unter anderem Infrastruktur (z. B. Rechenleistung, Speicherplatz), Plattformen und Software.“ [118]

Zentrale Charakteristika von Cloud-Computing sind laut [91]:

- **On-Demand-Selbstbedienung:** Ein Anwender kann sich, ohne dass eine Interaktion mit dem Serviceprovider erforderlich ist, bedarfsgerecht Ressourcen zuteilen.
- **Breite Verfügbarkeit:** Der Zugriff auf die Ressourcen erfolgt per Netzwerk auf Basis von Standard-Mechanismen via heterogenen Plattformen (Laptop, Smartphone, Tablet etc.).
- **Gemeinsamer Ressourcen-Pool:** Die Anwender greifen auf einen gemeinsamen Pool an Ressourcen zu, den der Anbieter intransparent auf Basis von Abstraktions- und Virtualisierungsprinzipien zusammenstellt.
- **Hohe Elastizität:** Ressourcen skalieren bedarfsgerecht gemäß den Anwenderanforderungen.
- **Ressourcenmessung:** Die Inanspruchnahme der Ressourcen durch die Anwender wird gemessen, überwacht und ihm transparent kommuniziert. Dies stellt die Grundlage zur Abrechnung der genutzten Dienstleistung dar. [91][212]

Für die Anwendung des Cloud-Computing-Konzepts sind weiterhin zwei wichtige Modellierungsebenen relevant. Zum einen existieren Bereitstellungsmodelle, die die Verwaltung der Cloud-Infrastruktur festlegen, zum anderen Service-Modelle, die spezifizieren, welche Arten von Diensten über die Cloud in Anspruch genommen werden. Die Bereitstellungsmodelle werden dabei in vier Kategorien eingeteilt (vgl. Abbildung 47):

- **Öffentliche Cloud:** Ein Anbieter stellt seine Services der Allgemeinheit bzw. einer großen Gruppe an Anwendern (z. B. einem Industriezweig) zur Verfügung.
- **Community Cloud:** Weist einen identischen Aufbau wie eine öffentliche Cloud auf, ist allerdings hinsichtlich der Zielgruppe eingeschränkt. Potentielle Anwender zeichnen sich durch gemeinsame Interessen (z. B. identische Mission oder Compliance-Anforderungen) aus, auf die auch die angebotenen Cloud-Dienste abgestimmt sind.
- **Private Cloud:** Die Cloud-Infrastruktur wird alleine für einen Anwender betrieben.
- **Hybride Cloud:** Um die individuellen Vorteile öffentlicher und privater Cloud bedarfsgerecht nutzen zu können, verfügt die Organisation über mehrere Cloud-Infrastrukturen, die über standardisierte Schnittstellen gekoppelt sind. [91][212]

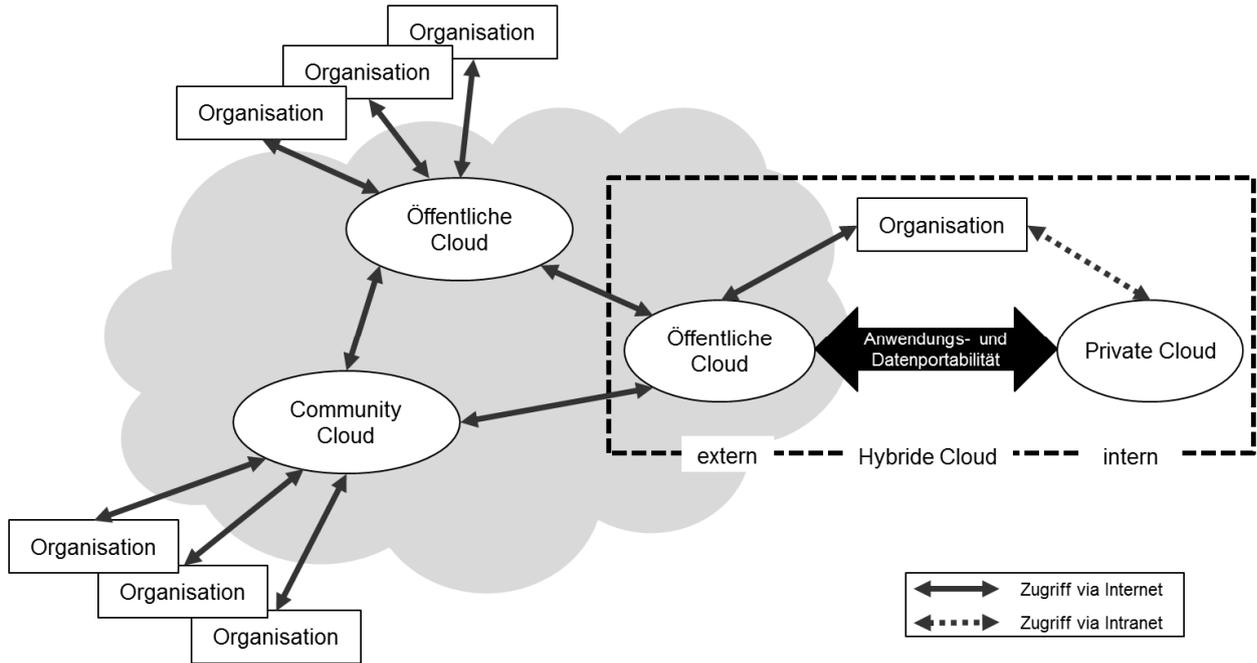


Abbildung 47: Zusammenwirken alternativer Cloud-Computing-Bereitstellungsmodelle (in Anlehnung an [91][212])

Im Hinblick auf Servicemodelle für das Cloud-Computing können in Abhängigkeit von der Abstraktionsebene folgende Ansätze unterschieden werden:

- **Infrastructure as a Service (IaaS):** Stellt die niedrigste Abstraktionsebene dar. Dem Anwender werden grundlegende IT-Ressourcen wie Computerinstanzen, Rechenleistung, Speicher, Netzwerk oder Backupmöglichkeiten bereitgestellt. Er hat volle Kontrolle über die darauf aufsetzenden Betriebssysteme und Applikationen.
- **Platform as a Service (PaaS):** Mittlere Abstraktionsebene des Cloud-Computings, um die Vorteile von IaaS (hohe Anpassungsfähigkeit) und SaaS (einfache Verwaltung) zu vereinen. Der Anwender hat keinen Zugriff auf unter Schichten wie Betriebssysteme oder Netzwerke. Er kann allerdings unter Verwendung von durch den Betreiber bereitgestellten Programmierumgebungen und APIs eigene Applikationen entwerfen.
- **Software as a Service (SaaS):** Stellt die höchste Abstraktionsebene des Cloud-Computings dar. Anwender können bereitgestellte Softwareapplikationen verwenden. Der Zugriff ist über diverse Plattformen (Desktop-PC, Laptop, Smartphone, Tablet etc.) möglich und erfolgt unter Verwendung eines Thin-Client wie dem Webbrowser. [90][91][212]

Die Applikation von Cloud-Computing offeriert eine Vielzahl an Potentialen bei gleichzeitig überschaubaren Einschränkungen. Tabelle 17 zeigt deren Gegenüberstellung.

Tabelle 17: Vor- und Nachteile der Applikation von Cloud-Computing [90][96][212]

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Geringe IT-Infrastrukturkosten ▪ Geringer Wartungsaufwand ▪ Geringe Anforderungen bezüglich der Rechenleistung auf Client-Seite ▪ Geringe Softwarekosten (Pay per Use) ▪ Fördert die Zusammenarbeit ▪ Ubiquitärer Systemzugriff ▪ Hohes Maß an Skalierbarkeit ▪ Plattformübergreifender Systemansatz ▪ Geringe Einstiegsbarrieren 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Internetzugang erforderlich ▪ Latenzprobleme ▪ Limitierter Funktionsumfang ▪ Datensicherheitsrisiken

Potentiale der Applikation des Cloud-Computing Paradigmas bei Agentensystemen

Das Cloud-Computing stellt eine Infrastruktur bereit, deren resultierende Vorteile (vgl. Tabelle 17) umfassend die Gestaltung anpassungsfähiger und flexibler Systeme der technischen Diagnose unterstützen. Die Infrastruktur ist aufgrund ihrer Ausrichtung dazu prädestiniert, die Applikation von serviceorientierten Architekturen zu ermöglichen, indem sie den technologischen Unterbau bereitstellt. Services im Rahmen einer SOA sind auf Ressourcen, z. B. Betriebssysteme oder Rechenleistung angewiesen, um die von ihnen angebotenen verteilten Dienstleistungen ausführen zu können. Diese werden durch das Cloud-Computing bereitgestellt. [48] Erst in Verbindung von SOA und Cloud-Computing kann das volle Potential dieser beiden Ansätze für die Optimierung des MAS-Einsatzes bei DiMAS gehoben werden. Neben der Einführung von Webservices als akzeptierten Kommunikationsstandard für MAS, wird durch die Kombination dieser beiden Ansätze der flexible Zugriff und die breite Wiederverwendung individueller Agenten gefördert.

5.2.2 Architekturentwurf von DiMAS zur Unterstützung der technischen Diagnose von komplexen Montagezellen

Im Folgenden wird mit DiMAS ein Lösungsansatz entwickelt, der unter Anwendung der zuvor vorgestellten Technologien und Architekturparadigmen bestehende Defizite beim Einsatz agentenbasierter Systeme im Produktionsumfeld (vgl. Abschnitt 2.5.4) überwindet. Dabei wird auf die beiden Handlungsgebiete der benutzerfreundlichen Systemnutzung sowie der Aufwandsreduktion bei Entwurf und Pflege von MAS wie DiMAS fokussiert. Die effiziente Nutzung des entwickelten Konzepts setzt dabei die Verfügbarkeit einer umfassenden Modellbibliothek für DiMAS voraus. Möglichkeiten zu deren wirtschaftlichen Aufbau werden in Abschnitt 5.2.3 dargestellt.

Eine detaillierte Behandlung des weiteren Defizits, welches das Fehlen eines allgemein akzeptierten, weitverbreiteten Kommunikationsstandard für Agenten darstellt, ist im

Rahmen der Arbeit nicht erforderlich. Hierzu finden zurzeit Aktivitäten internationaler Standardisierungsorganisationen statt (vgl. Abschnitt 5.2.1).

Generelle Vorgehensweise bei der MAS-Entwicklung

Der Entwurf agentenbasierter Systeme ist weithin als komplexe und aufwändige Aufgabe bekannt [83]. Dies gilt umso mehr beim Entwurf von MAS für den Bereich der technischen Diagnose. Neben anwendungsfallneutralen Herausforderungen wie der Spezifikation und Implementierung von Systemarchitektur sowie von Interaktions- und Kommunikationsmechanismen entstehen signifikante Aufwände zur Modellierung von Wissensbasis und Verhalten der Agenten (vgl. Abschnitt 2.5.3). Aufgrund der heterogenen Zusammensetzung automatisierter Fertigungszellen aus unterschiedlichsten mechatronischen Komponenten (vgl. Abbildung 48), die vielfältige Fehlermöglichkeiten aufweisen, sind für das zu modellierende Agentensystem diverse Agenten mit umfassenden und individuellen Wissensbasen anzulegen [230].

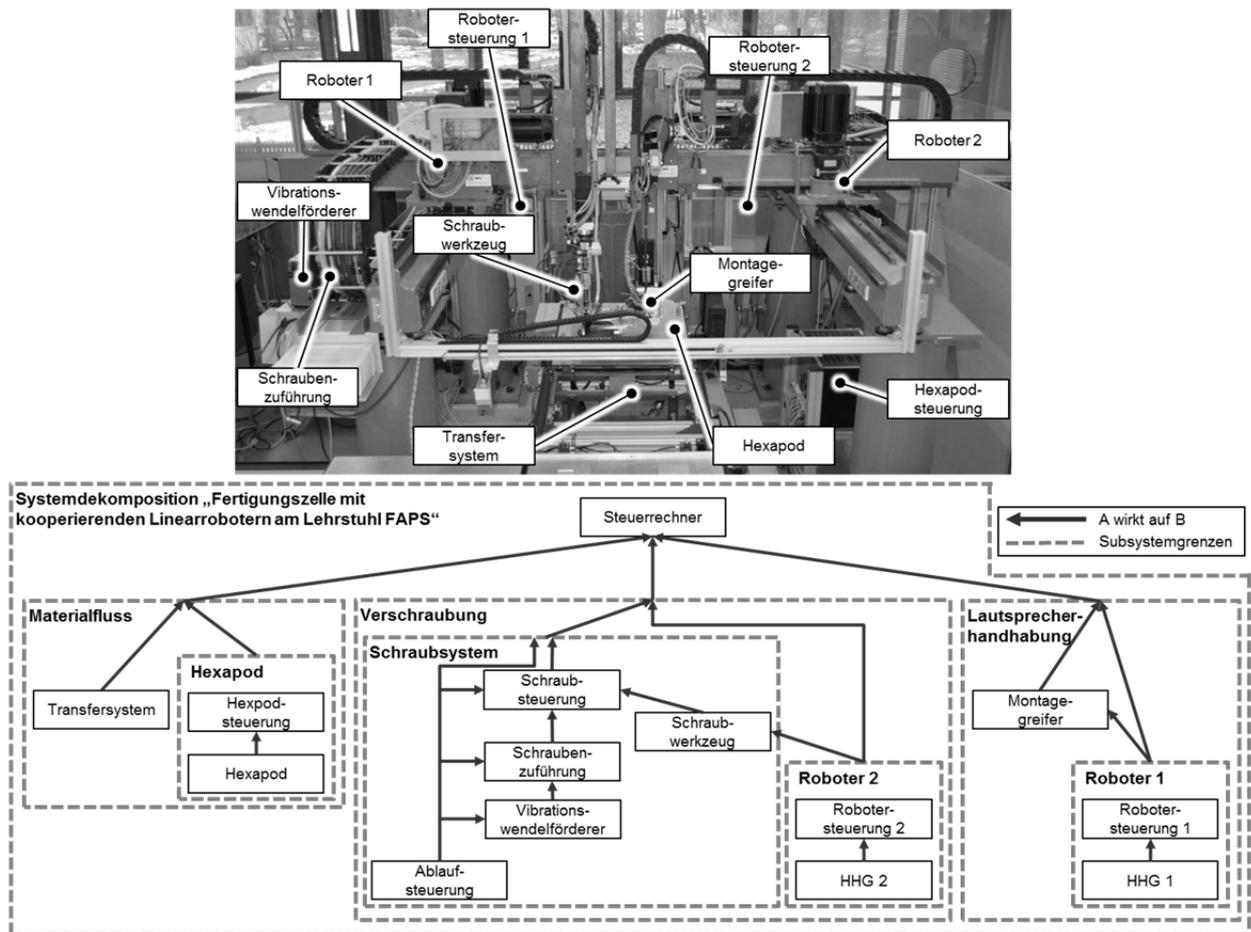


Abbildung 48: Dekomposition eines Fertigungssystems am Beispiel einer automatisierten Montagezelle am Lehrstuhl FAPS

Dabei beinhaltet das Vorgehen zur Modellierung von Wissensbasen und Agentenverhalten folgende Schritte:

- **Systemdekomposition:** Die Bestandteile eines Betrachtungsobjekts sind in einem ggf. mehrstufigen Zerlegungsprozess zu identifizieren (vgl. Abbildung 48).
- **FMEA-Durchführung:** Für alle identifizierten Geräte sind mögliche Fehlerarten, deren Ursachen und Behebungsmaßnahmen zu ermitteln.
- **Fehlerbaumanalyse:** Auf Basis der FMEA-Ergebnisse wird eine erweiterte Fehlerbaumanalyse unter Verwendung hierarchischer, komponentenbasierter Fehlerbäume gemäß [60] durchgeführt, um Fehlerabhängigkeiten zwischen Systemkomponenten identifizieren zu können. Diese sind für die Modellierung einer Systemumgebung ausgelegt, bei der ein System aus diversen Subkomponenten besteht, wobei die Subkomponenten jeweils mehrere übergeordnete Systemeinheiten funktional beeinflussen können (vgl. Abbildung 49). Sie spiegeln damit die Verhältnisse im automatisierten Produktionsumfeld ideal wieder, was sie für eine Anwendung in diesem Zusammenhang prädestiniert. [60]

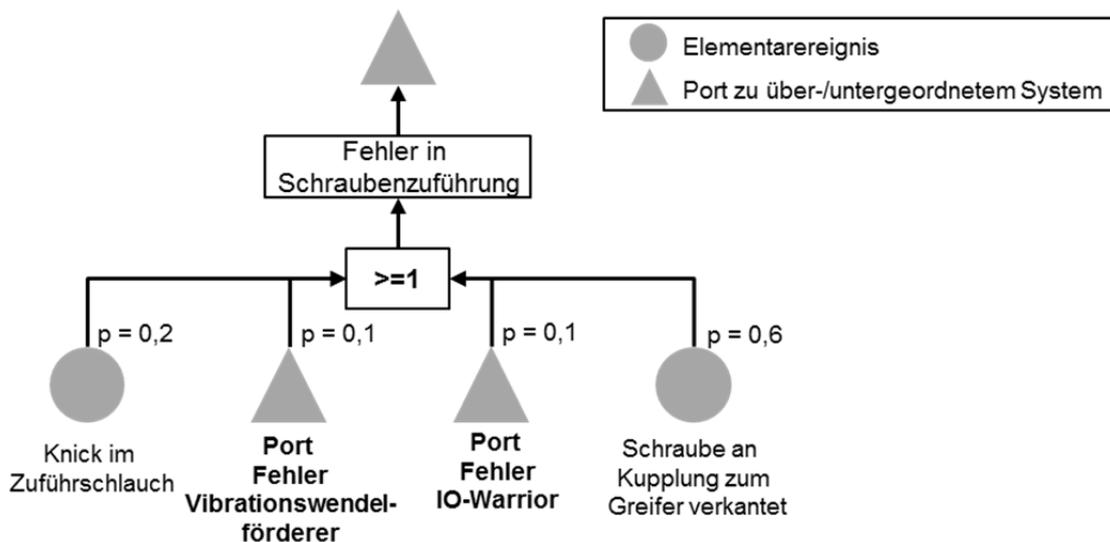


Abbildung 49: Exemplarischer Auszug aus einem komponentenbasierten Fehlerbaum für eine automatisierte Montagezelle (in Anlehnung an [60])

- **Modellierung der agenteninternen Wissensbasis:** Im Rahmen von FMEA und Fehlerbaumanalyse erarbeitete Informationen über Ursache-Wirkungszusammenhänge werden in Wissensbasen für die Agenten konvertiert. Dazu werden die Informationen z. B. in Form von Regeln oder semantischen Netzen repräsentiert, um eine maschinelle Verarbeitung durch Agenten zu erlauben.
- **Modellierung des Agentenverhaltens:** Das interne Agentenverhalten ist festzulegen. Es erfolgt eine Spezifikation und Implementierung, welche Ziele der Agent

verfolgen soll, und wie er darauf basierend Entscheidungen trifft sowie entsprechende Maßnahmen plant und abarbeitet.

Bewertung der Vorgehensweise bei der MAS-Entwicklung

Die anwendungsfallneutralen Schritte der Entwicklung eines MAS wie DiMAS, die die Spezifikation und Implementierung der Systemarchitektur sowie der Interaktions- und Kommunikationsmechanismen umfassen, sind bereits gut abgedeckt. Für diesen Bereich steht zur Aufwandsreduktion eine Vielfalt an Frameworks zur Verfügung. Sie unterstützen Spezifikation und Implementierung des Systems, indem sie Entwicklungswerkzeuge (z. B. Codebibliotheken, Skriptsprachen etc.) sowie eine Agentenplattform zur Ausführung der Agenten anbieten. Zudem werden zur Laufzeit üblicherweise GUIs angeboten, die eine benutzerfreundliche Interaktion zwischen Agenten und Anwendern erlauben. [20]

Somit ist festzuhalten, dass für den generellen Systemaufbau durch Softwareentwickler sowie für die Systemnutzung durch Anwender Lösungsansätze vorhanden sind, welche die Applikation agentenbasierter Systeme fördern. Allerdings ist bei der internen Struktur der Agenten ein Konzept erforderlich, das die einfache Integration von spezifischem Überwachungs- und Diagnoseverhalten ermöglicht, um die individuellen Anforderungen diverser Geräte flexibel zu unterstützen. Nur so kann ein System wie DiMAS kontinuierlich an die Herausforderungen eines dynamischen Produktionsumfelds mit wandlungsfähigen Anlagen angepasst werden. Ein klassischer Softwarelebenszyklus, bei dem das System zu Beginn mit Entwicklerunterstützung in Betrieb genommen und dann durch den Anwender genutzt wird, ist hier nicht angemessen. Vielmehr erfolgen kurzzyklisch durch Produkt- und Prozessinnovationen getriebene Veränderungen an den Anlagen, die auch das dazugehörige Überwachungs- und Diagnosesystem DiMAS beeinflussen. Sollen in diesem Umfeld agentenbasierte Diagnosesysteme wirtschaftlich einsetzbar sein, müssen sie ebenfalls diesen Anforderungen Rechnung tragen.

Darüber hinaus wird die einfache Adaption agentenbasierter Diagnosesysteme durch Anwender an unterschiedliche Produktionsszenarien bisher nicht ausreichend unterstützt. Diese Zielgruppe weist in der Regel keine Erfahrung mit Softwareentwicklungswerkzeugen auf, weshalb die vorhandene Werkzeugunterstützung für sie nicht ausreichend ist. Vielmehr fordert sie eine Anpassbarkeit eines Systems wie DiMAS im Rahmen des Parametrieren statt Programmieren-Konzepts [78]. Für diese kritische Anforderung existiert im Umfeld agentenbasierter Diagnosesysteme aktuell keine geeignete Lösung und muss somit im Folgenden erarbeitet werden.

Erstellung agentenbasierter Systeme im Baukastenprinzip durch Bereitstellung von Gerätebibliotheken und webbasierten Konfigurationsoberflächen

Im Folgenden wird mit DiMAS ein Lösungsansatz zum effizienten und anwenderfreundlichen Aufbau agentenbasierter Systeme für die technische Diagnose unter Verwendung eines komponentenbasierten Ansatzes sowie von Webtechnologien erarbeitet (vgl. Abschnitt 2.5.5).

Systemarchitektur und Systemkomponenten von DiMAS

Ausgangspunkt der Gestaltung von DiMAS ist die Spezifikation der Architektur und der Nachrichtenformate gemäß FIPA (vgl. [156]) sowie das grundlegende Modell agentenbasierten Verhaltens (vgl. Abschnitt 2.5.3). Darauf aufbauend werden die internen Abläufe in den Agenten in den drei Modulen Konfigurationsmanagement, Kommunikationsmanagement und Verhaltensmanagement strukturiert (vgl. Abbildung 50). Ein besonderes Augenmerk liegt auf dem Verhaltensmanagement, das Wissensbasis und Ziele eines Agenten enthält. Hieraus ergibt sich zur Laufzeit das Verhalten des Agenten. Das Verhaltensmanagement ist im Sinne des komponentenbasierten Ansatzes wiederum in separate Bausteine gekapselt. So wird eine flexible Anpassung der Agenten an individuelle Anforderungen ermöglicht, die sich aus der Vielfalt der zu repräsentierenden Geräte ergeben.

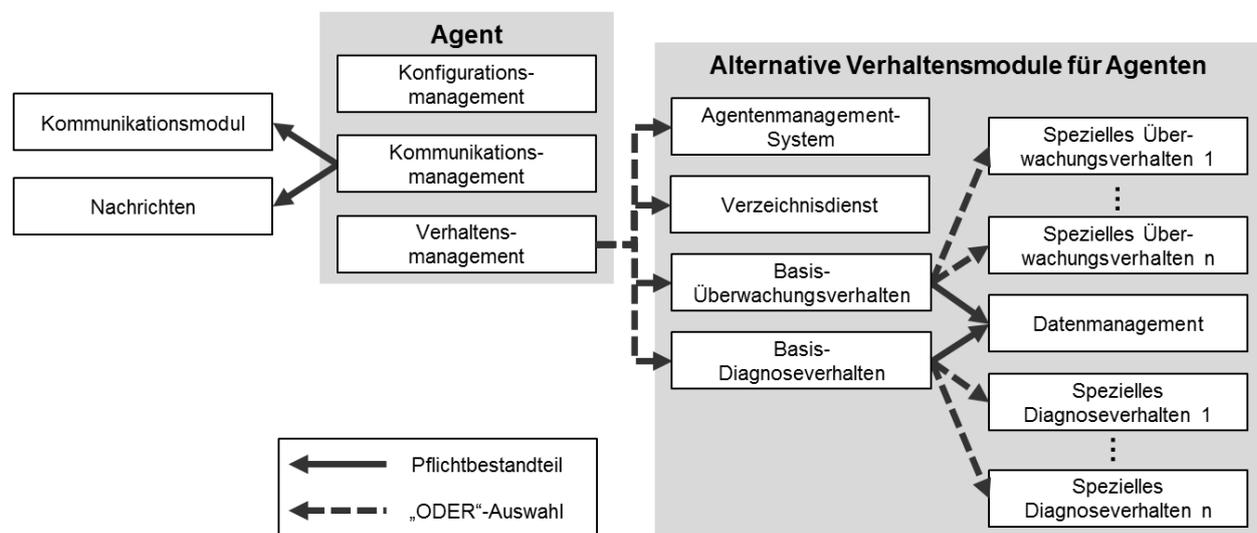


Abbildung 50: Struktur eines Agenten in DiMAS und dessen mögliche Rollen

Die einzelnen Komponenten und Subkomponenten in DiMAS übernehmen dabei die folgenden Aufgaben:

- **Konfigurationsmanagement:** Systemmodul, das bei der Initialisierung eines Agenten, XML-basierte Konfigurationsdateien parst und verarbeitet.

- **Kommunikationsmanagement:** Abwicklung grundlegender Nachrichtenverarbeitungsfunktionen, die durch weitere Systemmodule unterstützt werden:
 - **Kommunikationsmodul:** Handhabung des Nachrichtenein- und -ausgangs auf Basis eines definierten Kommunikationsprotokolls.
 - **Nachrichten:** Enthält die von DiMAS unterstützten Nachrichtenformate.
- **Verhaltensmanagement:** Beinhaltet Basis-Agentenverhalten wie die parallele Ausführung von Kommunikation und Verhalten sowie die Handhabung von Anfragen, die nicht verstanden werden. Um spezielle Rollen auszuüben, wird das Verhalten mit weiteren alternativen Modulen erweitert:
 - **Agentenmanagement-System:** Spezifiziert das Detailverhalten eines AMS-Agenten (vgl. Abschnitt 2.5.3).
 - **Verzeichnisdienst:** Spezifiziert das Detailverhalten eines Verzeichnisdienstagenten (vgl. Abschnitt 2.5.3).
 - **Basis-Überwachungsverhalten:** Spezifiziert das generische Verhalten von Überwachungsagenten in DiMAS. Dies umfasst die Serviceregistrierung und das Absetzen eines Diagnoseauftrags bei detektiertem Fehlverhalten. Zur Ermittlung von Fehlverhalten unterstützen weitere spezifische Systemmodule:
 - *Datenmanagement:* Umsetzung eines konkreten Kommunikationsprotokolls oder einer Zugriffstrategie auf erforderliche Betriebsdaten, die zur Ausführung des speziellen Überwachungsverhaltens erforderlich sind.
 - *Spezielles Überwachungsverhalten:* Festlegung einer konkreten Analysestrategie (vgl. [57]) wie Grenzwertüberwachung oder Trendanalyse sowie eines Alarmierungsverhaltens für die Geräte, die der jeweilige Agent repräsentiert.
 - **Basis-Diagnoseverhalten:** Spezifiziert das generische Verhalten von Diagnoseagenten in DiMAS. Dies umfasst die Serviceregistrierung und die Koordination des Diagnoseablaufs bei mehreren involvierten Agenten. Die Ursachenfindung und Maßnahmenauswahl wird dabei von weiteren spezifischen Systemmodulen unterstützt:
 - *Datenmanagement:* Umsetzung eines konkreten Kommunikationsprotokolls oder einer Zugriffstrategie auf erforderliche Betriebsdaten, die zur Ausführung des speziellen Diagnoseverhaltens erforderlich sind.
 - *Spezielles Diagnoseverhalten:* Bereitstellung von Wissensbasis und Inferenzstrategie zur Ursachenfindung für die Geräte, die der jeweilige Agent repräsentiert. Arbeitet auf Basis von aktuellen Informationen, die durch das Datenmanagement bereitgestellt werden.

Unter Verwendung dieser Komponentenstruktur wird es mit DiMAS möglich, insbesondere für die vielfältigen Überwachungs- und Diagnoseaufgaben an Geräten aufwandsarm Agenten mit spezifischem Verhalten zu erstellen. Dabei ist der erforderliche Funktionsumfang entweder in übergeordneten Basiskomponenten (vgl. Basis-Überwachungs- bzw. -Diagnoseverhalten) integriert und muss nicht neu erstellt werden oder kann flexibel und anforderungsgerecht über spezialisierte Systemmodule (vgl. spezielles Überwachungs- bzw. Diagnoseverhalten) eingebettet werden. Weiterhin besteht auch die Option, bestimmtes Verhalten anwendungsfallabhängig zu adaptieren, indem für ein Gerät diverse Module mit unterschiedlichem Überwachungs- und Diagnoseverhalten angeboten werden. Diese divergieren dann z. B. hinsichtlich Leistungsumfang, Aufwand, Geschwindigkeit oder Zielrichtung.

Das vorgestellte Konzept eliminiert die komplexen Schritte der Durchführung einer FMEA mit nachgelagerter Fehlerbaumanalyse und anschließendem Aufbau einer Wissensbasis sowie die Modellierung des Agentenverhaltens aus der regulären Anwendung des Agentensystems. Vielmehr werden diese Schritte nur einmal pro Gerät durchgeführt und dann in eigenständigen Softwarekomponenten für vielfältige Anwendungsfälle bereitgestellt. Hierbei ist der Einsatz von Mass-Collaboration-Ansätzen sinnvoll, um die Basis für eine häufige Wiederverwendung entwickelter Module zu legen (vgl. Abschnitt 5.2.3).

Webbasierte Konfigurationsoberfläche für MAS

Bei der Applikation des, im vorausgegangenen Abschnitt entwickelten, DiMAS-Systems in einem konkreten Anwendungsszenario hat lediglich eine Dekomposition des Betrachtungssystems zu erfolgen, um die einzelnen Geräte zu identifizieren. Für diese sind im Anschluss entsprechenden Softwareagenten auszuwählen und gemäß der hierarchischen Struktur des realen Systems (vgl. Abbildung 48) zu koppeln. Zudem sind Konfigurationsdaten bezüglich des Kommunikationsaufbaus vorzugeben. Zur Gewährleistung einer einfachen Ausführung dieser Schritte sind grafische Konfigurationsoberflächen, die keine Programmierkenntnisse erfordern, anzubieten [143]. Eine derartige Oberfläche wird im Folgenden für DiMAS entwickelt.

Abbildung 51 zeigt den Prototyp einer webbasierten Konfigurationsoberfläche für DiMAS. Kernstück der Oberfläche ist ein grafischer Modellierungsbereich auf SVG-Basis. Dieser ist in eine HTML-Seite eingebettet, die die weiteren Menüs der GUI beinhaltet. Die erforderliche Dynamik der GUI wird sowohl im SVG- als auch im HTML-Bereich via JavaScript erzeugt. Aufgrund der Verwendung dieser Technologiebasis zeichnet sich der Lösungsansatz durch die typischen Vorteile des Rückgriffs auf standardisierte Webtechnologien (vgl. Abschnitt 3.2.1) aus. Ein ubiquitärer, Plug-In-freier und somit anwenderfreundlicher Zugriff ist gewährleistet.

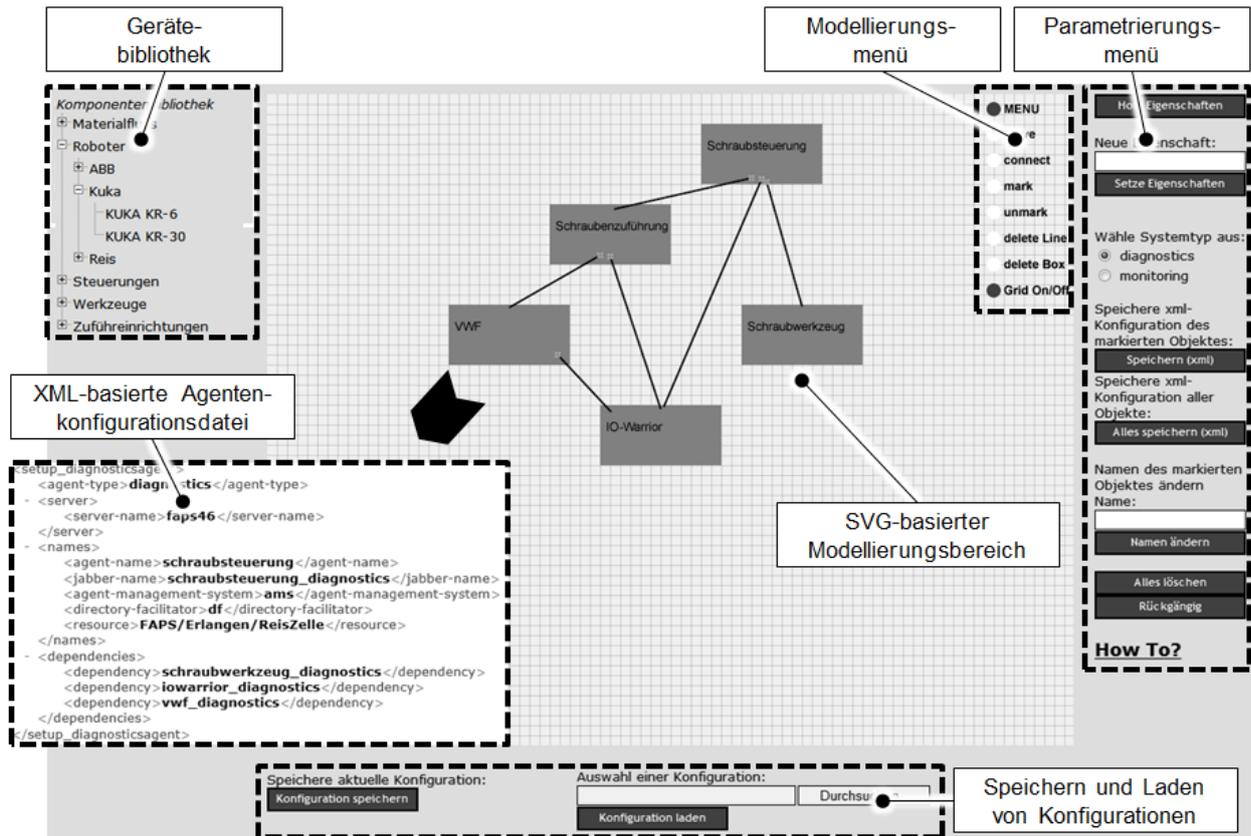


Abbildung 51: Webbasierte Systemoberfläche zur Konfiguration von DiMAS

Für eine effiziente Anwendbarkeit der Konfigurationsoberfläche ist die Gerätebibliothek von zentraler Bedeutung. Über sie werden Agentenmodule verfügbar, die die in Abbildung 50 vorgestellten Grundkomponenten eines Agenten und abhängig von der ausgewählten Gerätevariante auch bereits spezielles Überwachungs- und Diagnoseverhalten für diese enthalten. Die Bausteine können dann unter Verwendung der Modellierungsoberfläche und deren Menüoberfläche entsprechend ihrer hierarchischen Position in der realen Anlage (vgl. z. B. Abbildung 48) angeordnet sowie in eine Abhängigkeitsbeziehung gesetzt werden. Diese beeinflusst das Agentenverhalten zur Laufzeit. Zur weiteren Adaption der Standard-Agentenbausteine an spezifische Einsatzszenarios steht ein Parametrierungsmenü zur Verfügung. Hierüber erfolgen generelle Verwaltungseinstellungen zur Kommunikationsinitialisierung in DiMAS für den jeweiligen Anwendungsfall. Darüber hinaus bietet die GUI die Möglichkeit, die modellierten Systemkonfigurationen in einem XML-basierten Format zu speichern bzw. vorhandene Konfigurationen zur Bearbeitung zu laden. Die XML-basierten Konfigurationsdateien werden zum Systemstart von DiMAS von den Agenten durch das Konfigurationsmanagement-Modul verarbeitet und zur Initialisierung des entsprechenden Agenten verwendet. Die vorgestellte Konfigurationsoberfläche bietet somit folgende Vorteile:

- Adaption von DiMAS an individuelle Anwendungsszenarien ohne Programmierkenntnisse
- Zugriff auf Agentenbausteine aus einer Gerätebibliothek
- Grafische Spezifikation von Systeminterdependenzen
- Automatische Erstellung der Systemkonfigurationsdateien

Applikation und Evaluation von DiMAS am Anwendungsbeispiel

Anhand einer Referenzimplementierung von DiMAS in der Forschungsfabrik des Lehrstuhl FAPS wird deren Laufzeitverhalten analysiert. Als Anwendungsbeispiel dient die in Abbildung 48 dargestellte Fertigungszelle. Die vorbereitenden Schritte zur Erstellung eines MAS werden gemäß Abschnitt 5.2.2 durchgeführt. Die programmiertechnische Umsetzung von DiMAS erfolgt auf Basis der dynamischen objektorientierten Programmiersprache Python. Vorteile dieser Programmiersprache sind die hohe Zahl an verfügbaren Erweiterungsbibliotheken, die in Verbindung mit der klaren, kompakten Syntax eine schnelle Implementierung erlauben [145]. Darüber hinaus steht mit SPADE bereits ein Agentenframework für diese Programmiersprache bereit, welches den FIPA-Standard implementiert und somit als Basis für die Umsetzung verwendet wird. Ausgehend von einer Systemdekomposition werden dann neben AMS und Verzeichnisdienst die weiteren erforderlichen Überwachungs- und Diagnoseagenten unter Verwendung des zuvor erläuterten komponentenbasierten Konzepts entwickelt.

Abbildung 52 stellt exemplarisch das sich ergebende Zusammenspiel der implementierten DiMAS-Komponenten im Rahmen einer kaskadierenden Diagnose beim Auftreten eines Fehlers im Bereich der Schraubsteuerung der Montagezelle dar. Während des Betriebs der Fertigungszelle sind diverse Überwachungsagenten aktiv. Stellt einer dieser Agenten - im Beispiel der Überwachungsagent der Schraubsteuerung - ein Fehlverhalten fest, setzt er einen Diagnoseauftrag ab.

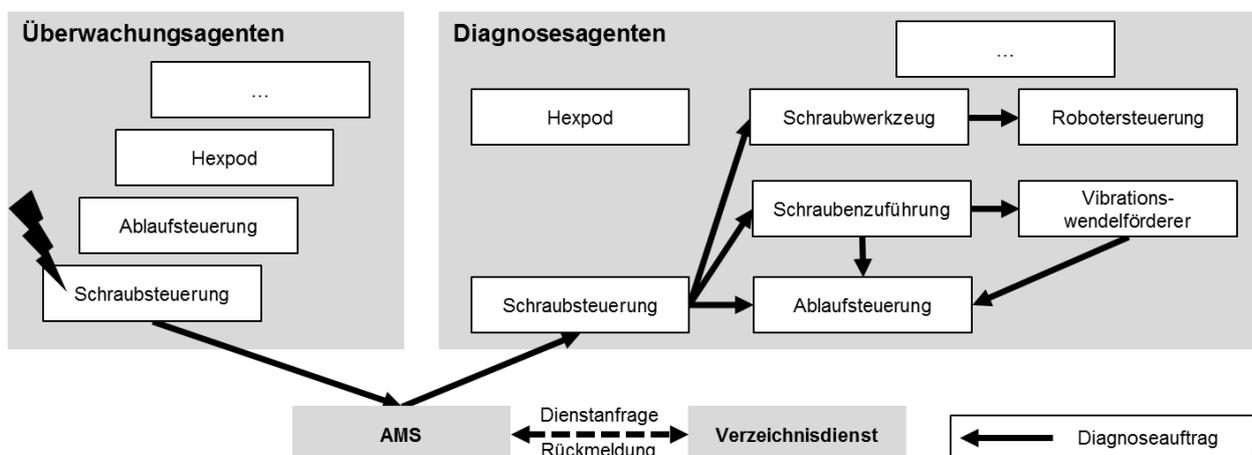


Abbildung 52: Ablauf der kaskadierenden Diagnose in DiMAS im Anwendungsbeispiel

Dieser wird vom AMS entgegengenommen, das unter Rückgriff auf den Verzeichnisdienst einen Diagnoseagenten ausfindig macht, der das entsprechende Gerät diagnostizieren kann, und beauftragt ihn mit dieser Aufgabe. Diagnoseagenten erteilen zur Erfüllung ihrer Aufgabenstellung entsprechend der hierarchischen Abhängigkeitsstruktur einer Montagezelle Diagnoseaufträge an weitere Diagnoseagenten, die Geräte repräsentieren, von denen sie abhängig sind. Stellt einer der nachgelagerten Agenten einen Fehler im von ihm verantworteten Gerät fest, wird dies den übergeordneten Agenten gemeldet, die daraufhin ihre Diagnosetätigkeiten beenden. Der für das fehlerhafte Gerät zuständige Agent verfolgt hingegen im weiteren Verlauf die Analyse und Beseitigung des Fehlers. Melden alle Agenten, mit denen ein Agent in einer Abhängigkeitsbeziehung steht, eine korrekte Funktionsausführung beginnt der Agent mit der Diagnose seines Betrachtungsobjekts.

Wie zu erwarten, verursacht die Konzeption und Implementierung von DiMAS samt webbasierter Konfigurationsoberfläche initial erhebliche zeitliche Aufwände. Im Gegenzug stehen fortan auf dem FIPA-Standard basierende wiederverwendbare Systemkomponenten zur agentenbasierten Überwachung und Diagnose zur Verfügung, die über eine GUI ohne Programmierkenntnisse an diverse Anwendungsfälle angepasst werden können. Somit sind die technischen Herausforderungen zum Aufbau und Betrieb leistungsstarker autonomer Diagnosesysteme wie DiMAS gelöst. Jedoch sind in Konsequenz Organisationsansätze erforderlich, welche die Wiederverwendung - vor allem der mit hohem Aufwand erstellen Überwachungs- und Diagnosekomponenten - fördern. Anderenfalls ist eine wirtschaftliche Umsetzung dieses Ansatzes im heutigen, durch kurze Lebenszyklen geprägten, Produktionsumfeld nicht erreichbar. Ein Konzept, das diese Zielrichtung unterstützt, wird im folgenden Abschnitt entwickelt.

5.2.3 Aufwandsarmer Einsatz von DiMAS im Produktionsumfeld

Zur Beseitigung der am Anwendungsbeispiel (vgl. Abschnitt 5.2.2) festgestellten Defizite wird ein Systemkonzept zur gemeinsamen Entwicklung und Nutzung der Agentenkomponenten von DiMAS unter Rückgriff auf SOA und Cloud-Computing erarbeitet. Im Fokus stehen hier besonders die individuellen und aufwändig zu gestaltenden speziellen Verhaltensmuster bei Überwachung und Diagnose. Dabei wird auf die folgenden Ansätze zurückgegriffen:

- **Cloud-Computing:** Die Cloud-Infrastruktur stellt die Voraussetzung dar, um Überwachungs- und Diagnosedienste flexibel und verteilt auf Basis einer SOA anzubieten bzw. zu nutzen (vgl. (1) in Abbildung 53). Dabei wird ein Bereitstellungsmodell aus Abbildung 47 oder eine Kombination der dort aufgezeigten Bereitstellungsmodelle angewandt.

- **SOA auf Webservice-Basis:** Lokale agentenbasierte Diagnosesysteme integrieren zur Erfüllung Ihrer Aufgabenstellung flexibel weitere Überwachungs- und Diagnosedienste im Rahmen des SOA-Ansatzes (vgl. (2) in Abbildung 53).
- **Mass-Collaboration:** Cloud-basierte Überwachungs- und Diagnosedienste werden gemeinsam von mehreren Parteien gemeinsam entwickelt bzw. erweitert und der Benutzergemeinde in Form einer Softwarekomponentenbibliothek zur Verfügung gestellt (vgl. (3) in Abbildung 53).
- **SaaS:** Überwachungs- und Diagnosedienste werden in einem definierten Geschäftsmodell (z. B. Pay per Use) flexibel auf Basis des SaaS-Prinzips als Webservices angeboten bzw. genutzt (vgl. (4) in Abbildung 53).
- **PaaS:** Softwarekomponenten für Überwachungs- und Diagnosedienste werden auf Basis bereitgestellter Frameworks und Systembaukästen erstellt (vgl. (5) in Abbildung 53).

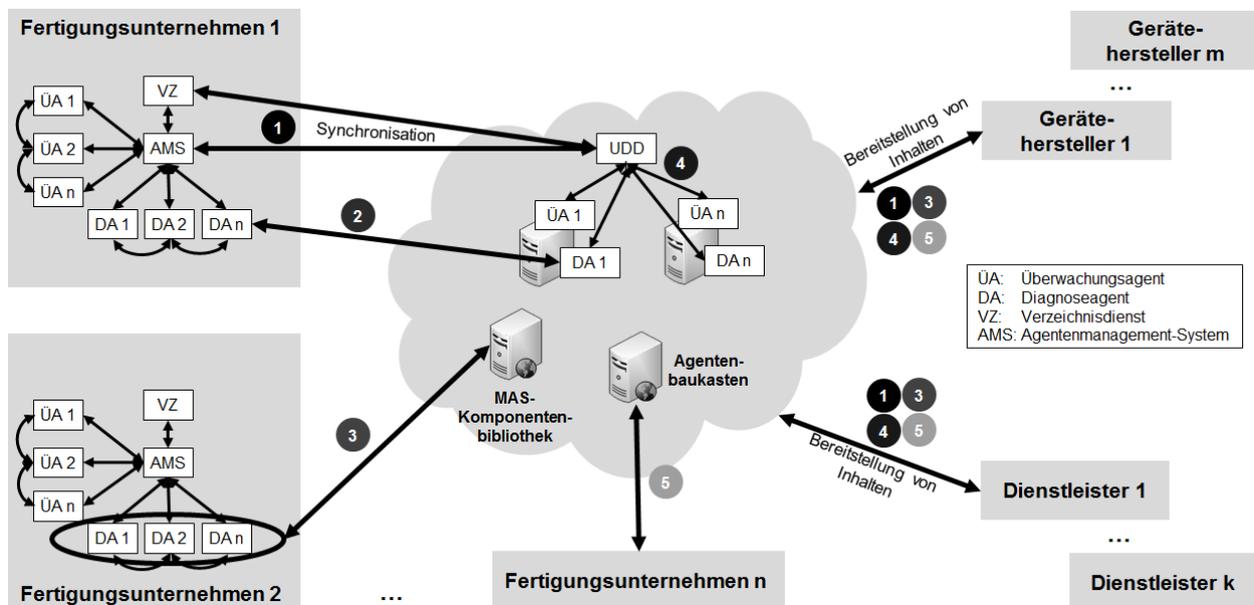


Abbildung 53: Effizienter Aufbau und Pflege von DiMAS durch Applikation innovativer Webparadigmen

Abbildung 53 zeigt eine strukturelle Darstellung des aus der Fusion dieser Ansätze resultierenden Systemansatzes. Bei diesem treten folgende Akteure auf, die individuelle Rollen einnehmen und unterschiedliche Zielsetzungen verfolgen:

- **Fertigungsunternehmen:** DiMAS-Anwender zur Unterstützung der technischen Diagnose
 - **Ziel:** Effizienter Aufbau und Pflege von DiMAS
 - **Rolle:** Anbieten von Agenten auf Basis eines Geschäftsmodells; flexible Einbindung von Agenten auf Basis eines Geschäftsmodells

- **Gerätehersteller:** DiMAS-Komponentenanbieter
 - **Ziel:** Differenzierung von Wettbewerbern; Umsatzsteigerung durch Anbieten innovativer After-Sales Services
 - **Rolle:** Anbieten von Agenten auf Basis eines Geschäftsmodells
- **Dienstleister:** Lösungsanbieter im Diagnoseumfeld
 - **Ziel:** Aufbau einer unternehmerischen Tätigkeit durch das Anbieten innovativer Dienstleistungen
 - **Rolle:** Anbieten von Agenten auf Basis eines Geschäftsmodells

In das skizzierte Systemkonzept sind z. B. auch Expertensystemlösungen wie das zuvor entwickelte System DiaX-SD integrierbar (vgl. Abschnitt 5.1.2). Diese können als Dienst fungieren und umfassende Diagnosefunktion über die Cloud offerieren. Darüber hinaus werden mittels der vorgestellten Architektur die in Tabelle 17 formulierten umfassenden Vorteile eines Cloud-basierten Ansatzes für DiMAS sowie die technische Diagnose im Allgemeinen zugänglich.

5.2.4 Zusammenfassung

Mit MAS steht eine Systemklasse zur Verfügung, die in der Lage ist, autonom Fehler an einer Produktionsanlage zu beheben und somit Stillstandszeiten signifikant zu reduzieren. Allerdings erfährt sie bisher wenig Verbreitung im Produktionsumfeld [93]. Hierfür wurden als Gründe das Fehlen akzeptierter Kommunikationsstandards, die hohen Entwicklungsaufwände für eine derartige Systemlösung sowie eine mangelnde Benutzerfreundlichkeit beim Einsatz der Systeme identifiziert. Die Problematik hinsichtlich des Kommunikationsstandards wird dabei zurzeit durch eine Kombination des FIPA-Standards mit Webservices durch internationale Standardisierungsorganisationen bearbeitet, auf deren Ergebnissen zukünftig aufgesetzt werden kann [109]. Für die beiden weiteren offenen Punkte wurden in diesem Abschnitt unter Rückgriff auf Webparadigmen und -technologien geeignete Lösungsstrategien erarbeitet und durch den Aufbau des Systems DiMAS exemplarisch umgesetzt. Dabei wurde aufbauend auf dem FIPA-Standard ein komponentenbasiertes Konzept zur Strukturierung von Agentenfunktionalitäten in DiMAS entwickelt. Die in die Zusammenhang entstandenen Komponenten werden in einer webbasierten Bibliothek angeboten. Über eine daran gekoppelte SVG-basierte Konfigurationsoberfläche können die Agenten dann grafisch an ein individuelles Anwendungsszenario adaptiert werden.

Weiterhin wurden mit der SOA und dem Cloud-Computing zwei Konzepte vorgestellt, deren Applikation das Potential hat, den Entwurf und die Pflege von agentenbasierten Systemen wie DiMAS erheblich in ihrer Komplexität zu reduzieren. Um dieses Potential zu heben, wurde unter Einbeziehung des Mass-Collaboration-Paradigmas eine Systemarchitektur konzipiert, die eine gemeinsame Entwicklung von Agenten und deren zugehörigen Modulen im World Wide Web erlaubt. Unter Verwendung einer Cloud-

Computing-Infrastruktur können diese zudem verteilt im Netz angesiedelt sein und dort flexibel über Webservices in Anwendungen eingebunden werden. Durch diese Herangehensweise werden für die technische Diagnose im weltweiten Rechnernetz modulare, intelligente Dienste verfügbar. Diese erlangen speziell im Hinblick auf die Vision einer dezentralen, intelligenten Produktionsumgebung auf Basis von CPS im Rahmen der Zukunftsvision Industrie 4.0 eine hohe Bedeutung. Mittels Systemen wie DiMAS wird es möglich, diese Vision vonseiten der Diagnose mit adäquaten Lösungsansätzen zu stützen.

6 Strategien zur nachhaltigen Integration von Diagnosesystemen ins Unternehmensumfeld

In den Kapiteln 3 bis 5 wurden mit webMon, Diki, semDiki, DiaX und DiMAS Lösungsansätze mit unterschiedlichem Anwendungsfokus zum wirtschaftlichen Aufbau leistungsstarker Überwachungs- und Diagnosesysteme auf Basis von Webtechnologien und Webparadigmen konzipiert und implementiert. Neben der technischen Umsetzung der Lösungsansätze gewinnt jedoch insbesondere der Aspekt der Wissensintegration in die Diagnosesysteme zunehmend an Bedeutung. Gründe hierfür sind kürzere Produktlebenszyklen in Verbindung mit einer steigenden Variantenvielfalt, die die Anzahl an in Unternehmen eingesetzten Technologien und Prozessketten signifikant erhöhen [1]. In Verbindung mit einer abnehmenden Verweildauer von Mitarbeitern in Fertigungsumgebungen entsteht hier die Herausforderung, umfangreiches diagnoserelevantes Wissen vollständig in den Systemlösungen vorzuhalten [1].

Aktuell ist dieses Wissen aufgrund der geringen Verbreitung rechnergestützter Diagnosesysteme überwiegend als implizites Wissen im individuellen Wissensstand der Mitarbeiter sowie diversen in Papierform oder elektronisch vorliegenden Dokumenten gebunden. Die Herausforderung besteht somit in der Externalisierung impliziten Wissens sowie einer strukturierten Sammlung und Integration des Wissens in Diagnosesystemlösungen. Dieser Schritte sind mit einer rein technologisch zentrierten Herangehensweise nicht erfolgreich auszuführen. Vielmehr muss auch die betriebliche Organisationsstruktur an diese neuen Aufgaben adaptiert werden, um neben der technologischen Seite auch der starken Bedeutung der humanen Seite für diese Prozesse Rechnung zu tragen.

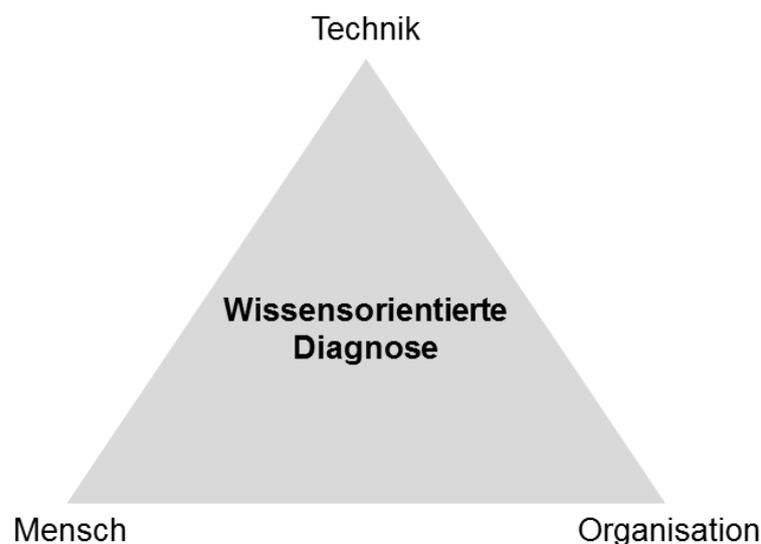


Abbildung 54: Gestaltungsdimensionen einer wissensorientierten Diagnose (in Anlehnung an [25])

In diesem Zusammenhang sind neben der soft- und hardwaretechnischen Bereitstellung von Diagnosesystemen unter Verwendung von IuK-Technologien auch die Faktoren Mensch und Organisation mit einzubeziehen (vgl. Abbildung 54). Aufgabe der Dimension der Organisation ist es dabei Strukturen bereitzustellen, die Wissenserwerb, -transfer und -speicherung unterstützen. Die menschliche Komponente hingegen hat die Aufgabe eine Unternehmens- und Führungskultur zu gestalten, die Motivation, Zusammenarbeit und Vertrauen fördert. [25]

Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden, ausgehend von klassischen Ansätzen der Organisationsstruktur und -kultur, deren Weiterentwicklungen zu wissensorientierten Formen bewertet. Danach werden diese angewendet, um ein Modellumfeld zur Förderung der Applikation flexibler und leistungsstarker technischer Lösungsansätze im Produktionsumfeld zu gestalten. Im Anschluss wird unter Berücksichtigung des Modellumfelds sowie der in den vorausgegangenen Kapiteln entwickelten technischen Systemlösungen ein Stufenkonzept zur Evolution technischer Diagnosesysteme entwickelt. Ziel dabei ist die Aufstellung einer Entwicklungs-Roadmap, die unter Einbeziehung der drei Gestaltungsdimensionen Systeme der technischen Diagnose ausgehend vom Status quo so vorantreibt, dass diese zukünftigen Anforderungen im Produktionsumfeld gerecht werden.

6.1 Betriebliche Organisationsmodelle zur Förderung der technischen Diagnose

Die Strukturierung der grundlegenden Organisation eines Unternehmens gliedert sich in die Bereiche der Primär- und Sekundärorganisation. Im Folgenden wird herausgearbeitet, welche Organisationsstrukturen dabei jeweils einsetzbar sind, um wissensintensive Unternehmensprozesse zu unterstützen.

6.1.1 Klassische und wissensfördernde Primärorganisationen

Die Primärorganisation beschreibt die dauerhafte, hierarchische Grundstruktur einer Unternehmung. Zum einen spezifiziert sie die Zerlegung und die Verteilung von Aufgaben und Kompetenzen, zum anderen wird die Koordination von Aufgaben und Aufgabenträgern festgelegt. [12]

Klassische Primärorganisationen

Zur Strukturierung der Unternehmensorganisation haben sich historisch drei Grundmodelle herausgebildet [12]. Dies beinhaltet in der Reihenfolge ihrer historischen Entwicklung (vgl. Tabelle 18):

- Funktionale Organisation
- Divisionale Organisation
- Matrixorganisation [12]

Tabelle 18: Gegenüberstellung klassischer Primärorganisationen [12]

	Funktionale Organisation	Divisionale Organisation
Strukturmodell		
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wahrnehmung von Spezialisierungsvorteilen ▪ Eindeutige Zuständigkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Marktnähe und Flexibilität ▪ Autonomie und Transparenz ▪ Entlastung der Unternehmensführung
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ressortegoismus ▪ Überlastung der Unternehmensspitze ▪ Mangelnde Marktorientierung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Spartenegoismus ▪ Doppelarbeit
Matrixorganisation		
Strukturmodell		
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Förderung kreativer Problemlösungen ▪ Vorrang von Sachkompetenz vor formaler Autorität 	
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schwierige Kompetenzabgrenzung ▪ Bürokratisierung 	

Die kennzeichnenden Merkmale der jeweiligen Organisationsform basieren dabei auf unterschiedlichen Ausprägungen der Gestaltungsparameter Spezialisierung, Delegation und Koordination, was mit individuellen Stärken und Schwächen der Organisationsform einhergeht (vgl. Tabelle 18). Somit steht jedes Unternehmen vor der Entscheidung, auf Basis von Kriterien wie Unternehmensgröße, Produktionsprogramm oder regionale Verteilung eine passende Organisationsform auszuwählen, wobei auch Kombinationen der Grundmodelle möglich sind. [12]

Wissensfördernde Primärorganisationen

Die vorgestellten klassischen Organisationsmodelle sind vor allem vom Kriterium der Stabilität getrieben. Damit sind sie vielversprechend für relativ stabile Märkte und versetzen die Organisation in die Lage, auf inkrementelle Veränderungen im Unterneh-

mensumfeld adäquat zu reagieren. Im heutigen hochdynamischen, diskontinuierlichen Wettbewerbsumfeld haben auf diesen Prinzipien strukturierte Unternehmen jedoch erhebliche Probleme. Sie sind schlecht gerüstet für eine strategische Erneuerung und haben Schwierigkeiten, neue Geschäftsfelder intern zu entwickeln. Ferner verfügen die klassischen Strukturen über historisch gewachsene geografische oder funktionale Barrieren, die einem effizienten Wissensfluss im Unternehmen entgegenstehen. Zudem verhindern die Prämissen der Hierarchie und der Unabhängigkeit den Aufbau eines kohärenten Wissensmanagements und erhöhen somit die Informationskosten (vgl. Abbildung 55). [107][182]

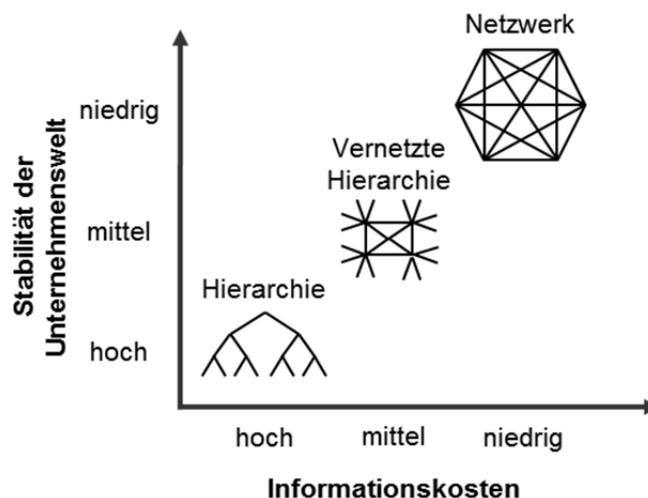


Abbildung 55: Beurteilung von Organisationsformen hinsichtlich Stabilität und Informationskosten (in Anlehnung an [66])

Vor diesem Hintergrund haben sich in Verbindung mit der Forderung von Mitarbeitern nach mehr Freiraum und der Verfügbarkeit neuer IuK-Technologien neuartige Organisationsformen herausgebildet, die auf die Förderung des Wissensmanagements fokussieren [107]. Wie bei den klassischen Organisationsformen können auch hier Grundtypen identifiziert werden (vgl. Tabelle 19):

- **Unendlich flache Organisation:** Kernstück dieser Organisationsform ist ein Zentrum, an das prinzipiell unendlich viele Knoten angedockt sind. Das Zentrum übernimmt dabei die Führung und fungiert als Koordinator, Informationsquelle, Best-Practices-Transferstelle, Problemlöser sowie Ideengenerator. In diesem Zusammenhang wird erforderliches Wissen in replizierbare Routinen überführt, an die Knoten z. B. unter Zuhilfenahme eines Informationssystems verteilt und von diesen angewandt. Das Ergebnis dieses Ansatzes ist eine tayloristische Arbeitsteilung, die eine hohe Effizienz und schnelles Wachstum sicherstellt und dabei mit einem kontinuierlichen Innovationsprozess gekoppelt ist. [107]

- **Invertierte Organisation:** Diese Organisationsform dreht die klassische Hierarchiepyramide um, was zur Folge hat, dass sich Kernkompetenzen an den Knoten und nicht im Zentrum befinden. Im Fokus steht hierbei die Interaktion von Fachleuten mit den Kunden. Die Organisation im Hintergrund bietet logistische und administrative Unterstützung und wird von Linienmanagern gesteuert. Der Wissensaustausch erfolgt zwischen den Knoten auf informeller Ebene und zwischen Knoten und Zentrum in einem formellen Prozess. [107]
- **Sternexplosion:** Bei dieser Organisationsform stellen sowohl die Knoten als auch das Zentrum Unternehmen dar und verfügen jeweils über spezialisiertes Wissen. Das Zentrum übernimmt dabei die Aufgaben der Gestaltung der Unternehmenskultur, der Prioritätensetzung, der Ressourcenbeschaffung und der Besetzung von Schlüsselpositionen. In den Ablegern findet die eigentliche unternehmerische Tätigkeit statt, die in der Regel auf dem Angebot einer teuren und spezialisierten Dienstleistung in diversen Märkten basiert. [107]
- **Spinnennetz:** Bei dieser Organisationsform sind zwei oder mehr rechtlich selbstständige Unternehmen bzw. Unternehmenseinheiten mehr durch kooperative und relativ stabile Beziehungen als durch kompetitive in einem Netzwerk verknüpft. Die Knoten repräsentieren bei dieser Organisationsform Kompetenzzentren, die in ihrer Existenz projektabhängig oder längerfristig angelegt sein können. Bei einer konkreten Auftragssituation wird der Wissensfluss im Netzwerk temporär aktiviert, um eine spezifische Kundenlösung zu entwickeln. Ein Netzwerk lebt von einer Kultur der Offenheit und basiert auf gemeinsamen Interessen sowie sich überlappenden Wertesystemen. [107]

Tabelle 19: Gegenüberstellung wissensfördernder Primärorganisationen [107]

	Unendlich flache Organisation	Invertierte Organisation
Strukturmodell		
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schnelle Reaktion auf Marktveränderungen ▪ Stark ansteigende Lernkurve ▪ Wachstum durch Replikation 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kundennähe steht im Fokus ▪ Zeitreserven für Management
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aktivitäten müssen in Einzelschritte teilbar und optimierbar sein ▪ Keine traditionellen Karrierewege möglich 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Autoritätsverlust von Führungskräften ▪ Schwieriger Kompetenzaufbau für Gesamtorganisation
	Sternexplosion	Spinnennetz
Strukturmodell		
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mobilisierung unternehmerischen Handelns ▪ Kernunternehmen fokussiert auf Kernkompetenzen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nutzung der Koordinationspotentiale von Markt und Organisation ▪ Exponentielle Wissensentwicklung ▪ Ad hoc Problemlösungen
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Glaube an den Markterfolg der Töchter muss aufrechterhalten werden ▪ Schwieriger systematischer Wissenstransfer 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kompatible Wertesysteme erforderlich ▪ Schwierigkeiten bei der Entwicklung einer langfristigen Geschäftsstrategie

Den vorgestellten wissensfördernden Organisationsformen ist gemein, dass sie flache Hierarchien anstreben, um eine schnelle und individuelle Kundenkommunikation zu realisieren. In Einklang mit diesem Bestreben delegieren sie Verantwortung dorthin, wo sich die Schnittstelle zum Kunden befindet [107]. Die flachen und unbürokratischen Strukturen fördern weiterhin die Eigenverantwortlichkeit von Organisationsteilen und stellen die Basis für eine organisatorische Flexibilität dar, die auch den Wissensfluss im Unternehmen fördert [97].

Fusion klassischer und wissensfördernder Organisationsformen

Unternehmen, welche bisher nach konventionellen Organisationsformen aufgebaut sind, stehen im aktuellen Wettbewerbsumfeld vor der Herausforderung Potentiale wissensfördernder Strukturen für sich nutzbar zu machen. Dabei ist zu berücksichtigen,

dass eine fundamentale Transformation der Primärorganisation ein fehleranfälliger und komplexer Prozess ist, der bei Misslingen schwere Unternehmenskrisen auslösen kann. Daher wird dieser im Falle einer Reorganisation gemieden und auf ein inkrementelles Vorgehen gesetzt. Im Rahmen dieses Vorgehens werden nur die dringlichsten Defizite einer Organisationsstruktur adressiert und mit befriedigenden, intern durchsetzbaren Lösungen behoben [12]. Vor diesem Hintergrund haben sich auch Ansätze entwickelt, die bestehende Organisationsformen weitgehend unberührt lassen, aber dennoch eine Neuausrichtung auf sich wandelnde Anforderungen erlauben. Eine dieser Formen stellt die Hypertext-Organisation dar. [107]

Diese Organisationsform basiert darauf, dass ein Unternehmen neben einer hierarchischen Formalstruktur auch noch nicht-hierarchische selbstorganisierende Strukturen aufweisen kann (vgl. Abbildung 56). Die Geschäftssystem-Schicht ist für die Ausführung des operativen Geschäfts im Rahmen einer traditionellen bürokratischen Struktur zuständig. Strategisch bedeutende, innovative Tätigkeiten werden auf die Projektteam-Schicht ausgegliedert und dort in Projekten bearbeitet. Die Wissensbasis-Schicht hat die Aufgabe Wissen zu sammeln, zu strukturieren und dem Gesamtunternehmen zur Verfügung zu stellen. Dadurch erlaubt es dieser Ansatz, die Risiken einer fundamentalen Transformation der Primärorganisation zu meiden und dennoch ein Unternehmen auf die Anforderungen, die sich aus der Bedeutungszunahme des Wissensmanagements ergeben, vorzubereiten. [107]

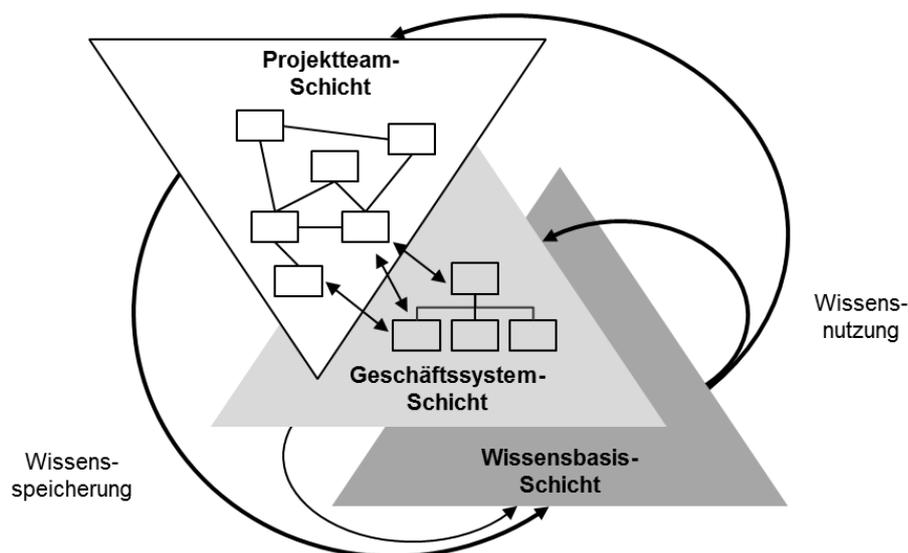


Abbildung 56: Ebenen der Hypertextorganisation (in Anlehnung an [101])

6.1.2 Klassische und wissensfördernde Sekundärorganisationen

Die Aufgabe der Sekundärorganisation ist die Koordination von sich aus der Primärorganisation ergebenden Schnittstellen sowie die Strukturierung der Bearbeitung innova-

tiver oder selten auftretender Spezialaufgaben [12]. In diesem Zusammenhang haben sich ebenso wie für die Primärorganisation typische Formen herausgebildet. Diese umfassen sowohl Ansätze, die für ein spezifisches Aktivitätsfeld entwickelt wurden als auch Ansätze mit anwendungsfallneutralen Strukturen:

- **Arbeitsgruppe:** Weitgehend selbstständige organisatorische Einheit, deren Aufgabe die Produkterstellung oder die Erbringung einer sonstigen Leistung ist. Die Gruppe besteht in der Regel bis zur nächsten Reorganisation und wird durch einen Gruppenleiter gelenkt. [12][226]
- **Produktmanagement:** Produktmanager übernehmen bei dieser Organisationsform die funktionsbereichsübergreifende Koordination aller produktbezogenen Aktivitäten im Unternehmen. [12]
- **Key-Account-Management:** Bei dieser Form stehen nicht die Produkte, sondern spezielle Kunden im Mittelpunkt der Aktivitäten. Kundenmanager koordinieren unternehmensweit Aktivitäten mit dem Ziel, den Kunden eine einheitliche Schnittstelle zum Unternehmen zu bieten. [12]
- **Projektteam:** Gruppe, die in Abhängigkeit von der zu erfüllenden Projektaufgabe nach fachlichen Kriterien zusammengesetzt wird und bis zum Projektende existiert. Projektaufgaben sind dabei neuartige, komplexe, einmalige und zeitlich befristete Vorhaben. In Abhängigkeit der Unterstellung der Projektmitglieder werden die Ausprägungen Stabs-Projektorganisation, Matrix-Projektorganisation und reine Projektorganisation unterschieden. [12]

Hinsichtlich der Eignung der vorgestellten Strukturen wissensorganisatorische Aufgaben zu übernehmen, ist festzuhalten, dass Produkt- und Key-Account-Management einen anderen Fokus aufweisen. Feste Arbeitsgruppen hingegen binden mit ihrer statischen Struktur Wissen in Funktionsbereichen und sind zur Förderung eines Wissensaustauschs ebenso nicht geeignet. Projektteams wiederum verfügen nicht über eine ausreichende Kontinuität und sind nur bedingt in der Lage, Erfahrungen systematisch aufzuarbeiten und projektübergreifend zu reflektieren. [107]

Angesichts dieser Defizite haben sich wie bei den Primärorganisationen neue Formen der Organisation herausgebildet, die den Wissensfluss unterstützen. Besonders vielversprechende Ansätze sind in diesem Zusammenhang:

- **Communities of Practice (CoP):** Hierunter wird der freiwillige und informelle Zusammenschluss einer Personengruppe verstanden, die Interesse an einem gemeinsamen Thema hat sowie Wissen dazu aufbauen und austauschen will. Die Gruppe existiert, solange Interesse an der Themenstellung vorhanden ist. Zudem ist sie nicht an Unternehmensgrenzen gebunden. Erfolgreiche CoPs zeichnen sich dadurch aus, dass sie eine klare Zielorientierung aufweisen und

die erarbeiteten Ergebnisse einen unmittelbaren Nutzen für die tägliche Arbeit haben. Ferner sind produktive CoPs von einer Kultur der Offenheit, des Vertrauens, der Kommunikation sowie der Interaktion geprägt und werden von einer Kerngruppe geführt. Auch hat sich das situationsabhängige Hinzuziehen Community-externer Experten als vorteilhaft herausgestellt. [107][182][226]

- **Lernarenen:** Lernarenen stellen ein der CoPs verwandtes Konzept dar. Im Vergleich zu CoPs sind ihre Tätigkeiten stärker formalisiert und der Teilnehmerkreis ist fixiert [204]. Bei Lernarenen werden drei Arten unterschieden. Lernarenen der ersten Art bearbeiten inhaltlich eine fachspezifische Themenstellung. Lernarenen der zweiten Art beschäftigen sich mit der Analyse von Optimierungspotentialen, von der mehrere Lernarenen profitieren können. Lernarenen der dritten Art adressieren als Zielgruppe die Leiter von Lernarenen und entwickeln die eingesetzten Lernmethoden weiter. [195]
- **Wissensallianz:** Bei dieser Form der längerfristig orientierten Zusammenarbeit kooperieren mehrere unabhängige Geschäftseinheiten eines Unternehmens oder mehrere Unternehmen mit dem Ziel, Wissen und Innovationen gemeinsam zu entwickeln und zu nutzen. Neben dem Unterscheidungsmerkmal der Organisationsebene (intra- oder extraorganisatorisch) kann eine Wissensallianz auch nach der Positionierung in der Wertschöpfungskette (vertikal bzw. horizontal) oder der Allianzform (offen, permeabel bzw. geschlossen) unterschieden werden. Dabei stellt jede Ausprägung unterschiedliche Herausforderungen. [107]

6.2 Humanorientierte Aspekte zur Förderung der technischen Diagnose im Fertigungsumfeld

Wie eingangs dieses Kapitels erläutert, kommt neben der Schaffung der technischen und organisatorischen Voraussetzungen der menschlichen Komponente eine entscheidende Rolle bei der Umsetzung wissensorientierter Diagnoseansätze zu. Insbesondere das weithin bekannte Defizit der mangelnden Bereitschaft von Mitarbeitern zur Wissensteilung (vgl. [107]) ist für die effiziente Umsetzung der vorgestellten Lösungsansätze der technischen Diagnose ein immenses Hindernis. Aus diesem Grund sind Ansätze erforderlich, die diesbezügliche Vorbehalte durch den Aufbau einer passenden Unternehmens- und Führungskultur beseitigen. Geeignete Lösungsstrategien werden im Folgenden betrachtet.

6.2.1 Unternehmenskultur

Gemäß [222] beinhaltet die Unternehmenskultur die Gesamtheit von im Unternehmen bewusst oder unbewusst kultivierten Werten, Denkmustern und Verhaltensnormen, die sich im Laufe der Zeit zur Existenz- und Erfolgssicherung der Unternehmung nach außen sowie der Sozialintegration nach innen entwickelt haben. Ihre Basis sind gemeinsame Vorstellungen über Grundannahmen, die Wahrnehmung, Gedankengänge,

Gefühle und Verhalten steuern [203]. Die Unternehmenskultur äußert sich unter anderem in Form von ungeschriebenen Kleiderordnungen, einer unternehmensspezifischen Sprache oder Büroausstattung sowie Ritualen und Verhaltensmustern [12].

Aufgrund der entscheidenden Bedeutung der Unternehmenskultur für das Denken und Handeln der Mitarbeiter wird für wissensorientierte Unternehmen die Erweiterung der Unternehmens- zu einer Wissenskultur gefordert [53]. Die Existenz und Qualität einer Wissenskultur kann z. B. daran gemessen werden, ob in einem Unternehmen Wissen eine hohe Bedeutung zugemessen wird und ob es geteilt oder individuell gehütet wird [53]. Typische Werte einer Wissenskultur sind Vertrauen, Zusammenarbeit, Offenheit, Lernbereitschaft, Autonomie und Fehlertoleranz [213]. Hierbei besteht allerdings die große Gefahr, dass diese Werte zwar nach innen und außen postuliert, jedoch nicht gelebt werden [182]. Die Konsequenz hieraus ist, dass sich im Unternehmen parallele Verhaltensregeln herausbilden, die in offiziell postulierte und heimlich gelebte unterschieden werden können (vgl. Tabelle 20) [53].

Tabelle 20: Divergenz zwischen offiziellen und heimlich gelebten Verhaltensregeln in Organisationen [53][107]

Offizielle Verhaltensregeln	Heimliche Verhaltensregeln
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Arbeite kooperativ ▪ Teile das Wissen mit Kollegen ▪ Zeige Neugierde, stelle Fragen ▪ Sei offen und ehrlich ▪ Das Ergebnis der Gruppe zählt ▪ Zeige Verantwortungsfreude 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zeige Ellenbogen ▪ Wissen ist Macht ▪ Besserwisserei kommt weiter ▪ Suboptimale Kommunikation sichert Claims ▪ Bonus gibt es nur für Einzelleistungen ▪ Sei pflichtbewusst

Um eine Divergenz zwischen offiziellem und tatsächlichem Verhalten zu vermeiden, werden diverse Lösungsstrategien vorgeschlagen. Diese umfassen die folgenden Handlungsempfehlungen:

- **Sensibilisierung für die eigene Unternehmenskultur:** Durchführung von Sensibilisierungsworkshops unter Beteiligung von Führungskräften mit dem Ziel, den Teilnehmern ihren persönlichen Umgang mit Wissen bewusst zu machen und Handlungsalternativen aufzuzeigen. [182]
- **Kultur des Experimentierens:** Bei Fehlern, die bei der Umsetzung von neuen Ideen und Konzepten gemacht werden, erfolgt keine Sanktion, sondern eine Belohnung. Dadurch wird die Risikofreude, Kreativität und Lernbereitschaft im Unternehmen gefördert. [213]
- **Förderung der Wissensnutzung:** Mittels Schulungen werden Mitarbeiter für den Austausch von Wissen sensibilisiert. Zudem erfolgt die Bildung von interdis-

ziplinären Teams zur Förderung der Kommunikation und einem damit verbundenen Wissensaustausch. [53]

- **Wertkongruenz:** Ziel hierbei ist es, die Werte der Individuen mit den Werten des Unternehmens in Einklang zu bringen. Erreicht wird dies im Rahmen einer intensiven internen Kommunikation, die durch das Einräumen von zeitlichen Freiräumen für die Mitarbeiter zum Wissensaustausch ermöglicht wird. [26]
- **Wissensleitbild:** Im Wissensleitbild werden neben der Unternehmenskultur auch Wünsche und Erwartungen der Mitarbeiter formuliert. Es enthält somit neben der aktuell gelebten Kultur auch eine noch offene und unbestimmte, visionäre Komponente [53]. Dies motiviert Mitarbeiter durch ihr persönliches Verhalten zur Realisierung der Vision und somit zum Erreichen der Unternehmens- und Wissensziele beizutragen [101].

6.2.2 Führungskultur

Unter Führung wird gemäß [11] die zielorientierte Gestaltung von Unternehmen sowie die zielorientierte Beeinflussung von Personen verstanden. Der Begriff der Führung ist eng mit dem des Managements verwandt und wird oft synonym verwendet. Führung hat die Funktion Ziele vorzugeben, zu koordinieren, zu motivieren und zu repräsentieren [11]. Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden bewährte Führungsansätze, Führungsmodelle und Anreizsysteme vorgestellt und wissensorientierte Weiterentwicklungen dieser Konzepte aufgezeigt.

Wissensorientierte Ausrichtung von Führungsansätzen

Führungsansätze legen das generelle Rollen- und Interaktionsverständnis von Führungsebenen in einer Organisationsstruktur fest [101]. Bezüglich der Handhabung von Wissensmanagementprozessen weisen die beiden traditionellen Ansätze Top-down und Bottom-up jeweils spezifische Defizite auf. Deshalb schlägt [101] einen weiteren Ansatz vor, der die Anforderungen des Wissensmanagements aufgreift:

- **Top-down-Ansatz:** Beim Top-down-Ansatz in Form einer hierarchischen Pyramide gibt die obere Führungsebene über Pläne und Instruktionen Grundkonzepte an die mittlere Führungsebene weiter. Diese transferiert die erhaltenen Vorgaben in Aufgaben, die dann von den fachlichen Mitarbeitern der unteren Ebene ausgeführt werden. Für den Wissensmanagementprozess bedeutet dies, dass lediglich ein Wissenstransfer in Form von explizitem Wissen von oben nach unten erfolgt. Die Mitarbeiter der unteren Ebene werden nicht motiviert am Wissensmanagement teilzuhaben und an der Basis vorhandenes implizites Wissen bleibt folglich ungenutzt. [101]
- **Bottom-up-Ansatz:** Bei diesem Ansatz verfügen die fachlichen Mitarbeiter über eine weitgehende Autonomie und handeln unternehmerisch. In diesem Rahmen

schaffen sie umfassendes implizites Wissen. Die übergeordneten Führungsebenen geben dabei nur wenig Anweisungen an die Mitarbeiter und verstehen sich als Förderer der Mitarbeiter. Nachteilig an diesem Konzept ist die fehlende Strukturierung des Wissensmanagementprozesses, was dazu führt, dass Wissen nicht gezielt externalisiert und verbreitet wird. [101]

- **Middle-up-down-Ansatz:** Im Rahmen dieses Ansatzes kommt den mittleren Führungskräften eine Schlüsselrolle zu. Während die obere Führungsebene eine idealisierte Vision der Wissensmanagementprozesse entwickelt, ist es Aufgabe des mittleren Managements diese Vision in konkrete Konzepte zu transferieren und das Wissensmanagement auf der unteren Ebene in die gewünschte Richtung zu steuern. Auf der fachlichen Ebene erfolgen Wissensgenerierung und Wissenstransfer in Teams organisiert, die durch Mittelmanager koordiniert werden. [101]

Dem mittleren Management kommt bei diesem Ansatz somit die Aufgabe zu, als Zentrum der Wissensspirale den Wissenstransfer über die verschiedenen Hierarchieebenen des Unternehmens hinweg zu gestalten (vgl. Abschnitt 4.1.3). Durch dieses Konzept erhält das mittlere Management zudem eine sinnstiftende Aufgabe zurück, die es im Rahmen des Hierarchieabbaus, der wissensbasierte Unternehmensorganisationen auszeichnet (vgl. Abschnitt 6.1), verloren hat. Um diese neue Aufgabe erfolgreich gestalten zu können, ist ein neues Führungsverständnis erforderlich, welches sich durch die folgenden vier Thesen auszeichnet:

- **Führung heißt Sinn stiften:** Zu den Aufgaben der Führungskraft gehört es, die Motivation der Mitarbeiter zu stimulieren und diese in Einklang mit den Zielen der Organisation zu bringen. [101]
- **Führung heißt gemeinsam lernen:** Die Führungskraft begleitet und gestaltet Lernprozesse mit. Die klassische Aus- und Weiterbildung rückt dabei vor der Netzwerk- und Community-Arbeit in den Hintergrund. [101]
- **Führung heißt Spielraum für Veränderung schaffen:** Führungskräfte sind angehalten, den Wissensarbeitern persönliche Gestaltungsmöglichkeiten bei der Ausführung ihrer Tätigkeiten einzuräumen und somit deren Kreativität und Engagement zu fördern. Vor allem die Entlastung von Wissensarbeitern hinsichtlich administrativer Aufgaben kann hier deutliche Steigerungspotentiale aktivieren. [101]
- **Führung ist Dienstleistung:** Die Führungskraft betrachtet ihr Verhältnis zu den fachlichen Mitarbeitern als Dienstleister, der den organisatorischen Rahmen gestaltet und nicht aus dem klassischen Standpunkt einer Machtposition. [101]

Gestaltung wissensorientierter Führungsmodelle

Unter Führungsmodellen werden Aussagensysteme verstanden, die Informationen über die Struktur und die Funktion zielorientierter Gestaltungsprozesse zwischen Vorgesetzten und Untergebenen enthalten. Im Laufe der Zeit haben sich in Theorie und Praxis diverse Führungsmodelle herausgebildet, welche insbesondere auf den „Management-by“-Prinzipien beruhen. [11] Jedoch besteht auch hier wie bei den Organisationsstrukturen (vgl. Abschnitt 6.1) die Herausforderung sich, aufgrund der Bedeutungszunahme des Wissensmanagements, an ändernde Anforderungen anzupassen. In diesem Zusammenhang wird von diversen Autoren (vgl. [107][182]) der Ausbau des Management-by-Objectives-Modells propagiert.

Management-by-Objectives ist ein umfassendes und bekanntes Führungsmodell, bei dem die Führungsinstanz und der Mitarbeiter gemeinsam Ziele festlegen. Diese sind im Rahmen des Konzepts präzise und individuell zu formulieren, periodisch neu festzulegen und sollen eine Herausforderung für den Mitarbeiter darstellen. Im Gegensatz zu anderen Führungsmodellen, die detaillierte Verhaltensregeln formulieren, verfügt der Mitarbeiter hier über einen Ermessensspielraum bezüglich des Wegs zur Zielerreichung [11]. Somit erhält der Mitarbeiter Freiraum für kreative Tätigkeiten, die für das Wissensmanagement von besonderer Wichtigkeit sind.

Allerdings geht auch dieses Modell noch nicht weit genug, da es in der vorgestellten Form keine spezifischen Wissensziele enthält. Vor diesem Hintergrund schlagen [107] und [182] die Erweiterung der Zieldefinition um Wissensziele wie den Ausbau der persönlichen Kompetenz oder der Weitergabe von Wissen vor. Das Resultat dieser Weiterentwicklung wird als Management-by-Knowledge-Objectives (MbKO) bezeichnet. Um damit besonders erfolgreich zu sein, ist darauf zu achten, dass die individuell mit einem Mitarbeiter definierten Ziele in Einklang mit der Unternehmens- bzw. Wissenskultur stehen.

Gestaltung wissensorientierter Anreizsysteme

Die mangelnde Bereitschaft von Mitarbeitern, Wissen zu teilen, ist eine intensiv diskutierte Problematik im Umfeld des Wissensmanagements. Um eine Wissenskultur mit Leben füllen zu können, ist es allerdings erforderlich, dieses Hindernis zu überwinden. Inwieweit dabei Anreizsysteme wirksam einsetzbar sind, wird im Folgenden analysiert. [107]

Bezüglich der Quelle von Anreizen werden im Bereich der Motivationsforschung extrinsische und intrinsische Motive unterschieden. Extrinsische Arbeitsmotive sind dabei auf die Erlangung materieller Zielsetzungen in Form von Lohn, Prämien und Statussymbolen hin ausgerichtet [107]. Im Rahmen des Wissensmanagements kann ihnen auf folgende Arten Rechnung getragen werden:

- **Monetäre Prämierung auf Basis des Erfolgs der Gemeinschaft:** Anstelle einer individuellen Prämienzahlung wird ein Gehaltsbestandteil an den Erfolg der Gruppe, des Bereichs oder des Unternehmens gekoppelt. Dies fördert die Wissensweitergabe an sowie die Unterstützung von Kollegen, da die vorgegebenen Ziele nur durch ein effizientes Agieren aller Beteiligten erreichbar sind. [107]
- **Wissenswettbewerbe:** Hier erfolgt eine Sensibilisierung zum Wissenstransfer durch spielerische Initiativen. So können durch ein gemeinschaftliches Bepunktungssystem Beiträge oder Mitarbeiter gekürt werden, die den Wissenstransfer in einer Periode besonders unterstützt haben. Erfolgreiche Akteure erfahren im Rahmen einer Prämierung am Jahresende entsprechende Anerkennung. [107]

Intrinsische Arbeitsmotive umfassen das Streben nach Selbstverwirklichung und sozialer Anerkennung. Diese sind durch Feedback zur erbrachten Leistung, das Angebot von gemeinsamen Interaktionstätigkeiten wie Ausflügen und Festen oder die Bereitstellung von anspruchsvollen Tätigkeiten förderbar. Im Rahmen des Wissensmanagements wird den intrinsischen Motivationsfaktoren eine höhere Bedeutung als den extrinsischen beigemessen. Der Grund hierfür ist die Tatsache, dass Wissensarbeit schwer quantifizierbar ist und oftmals mehrere Mitarbeiter am Wissenstransfer beteiligt sind, was eine gerechte materielle Entlohnung erschwert. Des Weiteren beruht das Wissensmanagement überwiegend auf kreativen Tätigkeiten, die insbesondere durch intrinsische Motive stimulierbar sind. [107] Folgende Ansätze können dabei zur Anwendung kommen:

- **Integration des Wissensmanagementfaktors in die Mitarbeiterbeurteilung:** Mitarbeiter werden aufgefordert, Wissen langfristig aufzubauen und zu teilen. Die Anerkennung der vollbrachten Leistungen erfolgt im Rahmen des Mitarbeitergesprächs. [107]
- **Einführung eines Award-Systems:** Herausragende Verdienste werden mit Awards belohnt, die physisch an hervorgehobenen Stellen im Unternehmensgebäude oder digital auf der Unternehmenshomepage platziert werden. [107]
- **Honorierung der Wissensarbeit mit Freiräumen:** Im Wissensmanagement aktive Mitarbeiter erhalten einen gewissen Prozentsatz ihrer Arbeit zur freien Verfügung bzw. profitieren von flexiblen Arbeitszeiten [107]. Hierdurch wird eigenverantwortliches Handeln gestärkt.
- **Offerieren neuer Herausforderungen:** Anerkannte Wissensarbeiter erhalten die Möglichkeit, in speziellen Kompetenzteams mit führenden Experten mitzuarbeiten, die anspruchsvolle Aufgabenstellungen zur Weiterentwicklung ihres Berufsfelds oder der Unternehmung bearbeiten. [107]
- **Schaffung von Karrieremöglichkeiten für Fachspezialisten:** Neben der Managementlaufbahn wird eine Fachlaufbahn für Wissensarbeiter eingerichtet.

Hierüber besteht die Möglichkeit, die Vergütung und die Kompetenzen dieser Personengruppe an die des Managementpersonals anzunähern. [107]

Die Anwendung der genannten Konzepte führt durch die Aussicht auf eigenständiges Handeln, Anerkennung und die Übernahme verantwortungsvoller Aufgaben zu einer persönlichen Identifikation und Miteigentümerschaft der Mitarbeiter am verfolgten Vorhaben [107]. Damit einhergehend wird das Verantwortungsgefühl zur Erfüllung der gestellten Aufgabe erheblich gestärkt.

6.3 Konzeption eines Modellumfelds für die wissensorientierte Diagnose unter Berücksichtigung organisatorischer und humaner Aspekte

In den Kapiteln 4 und 5 wurde detailliert dargestellt, welche hohe Bedeutung insbesondere wissensorientierten Systemen der Diagnose wie Diki, semDiki, DiaX und DiMAS angesichts aktueller Entwicklungstendenzen im Fertigungsumfeld zukommt. Kritisch für den Erfolg der in diesem Zusammenhang entwickelten Systemkonzepte ist ein funktionierender Wissensmanagementprozess sowohl unternehmensintern als auch über Unternehmensgrenzen hinweg. Dieser ist, wie zu Beginn dieses Kapitels herausgestellt, nicht alleine durch eine technische Realisierung umsetzbar. Vielmehr müssen die Dimensionen Organisation, Mensch und Technik ineinandergreifen [17]. Vor diesem Hintergrund wird eine Idealstruktur entwickelt, die unter Berücksichtigung der drei Gestaltungsdimensionen Organisation, Mensch und Technik eine effiziente Ausführung von Tätigkeiten im Umfeld der wissensbasierten Diagnose erlaubt (vgl. Abbildung 57).

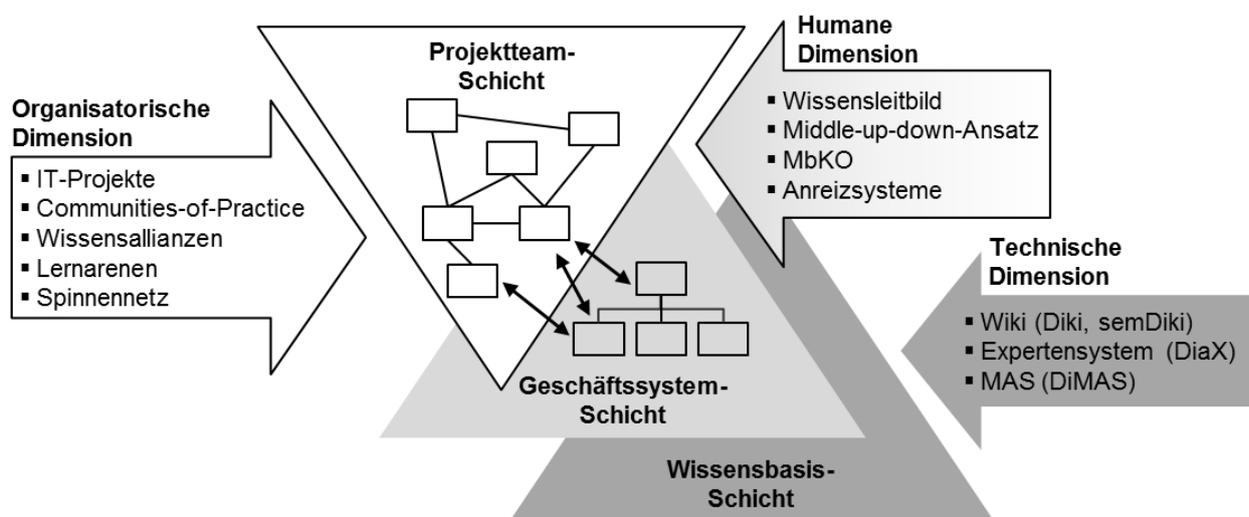


Abbildung 57: Ausprägungen der technischen, organisatorischen und humanen Gestaltungsdimension im betrieblichen Modellumfeld auf Basis der Hypertextorganisation

Um eine einfache Adaption einer klassischen Organisationsstruktur an die Anforderungen des Wissensmanagements zu ermöglichen, wird auf Ebene der Primärorganisation auf eine Hypertextorganisation zurückgegriffen. Dadurch werden nachstehende Vorteile erreicht:

- Erhalt der klassischen hierarchischen Struktur (funktional, divisional, Matrix) zur Ausführung operativer Tätigkeiten in der Geschäftssystem-Schicht.
- Vermeidung eines risikoreichen Transformationsprozesses der Primärorganisation.
- Abwicklung wissensbasierter Tätigkeiten im Umfeld der technischen Diagnose unter Rückgriff auf die Projektteam- und Wissensbasis-Schicht.
- Ansiedlung wissensnaher Tätigkeiten (Sammlung, Weiterentwicklung, Pflege, Verteilung etc.) in der Projektteam-Schicht.
- Zugriff der operativen Instandhaltung auf die Wissensbasis-Schicht im Rahmen der Tätigkeitsausführung.

Auf sekundärer Organisationsebene wird die herkömmliche Arbeit im Projektteam folgendermaßen erweitert:

- Einführung von IT-Systemen wie webMon, Diki, semDiki, DiaX und DiMAS zur Unterstützung der technischen Diagnose in Form von IT-Projekten (vgl. [219]).
- Pflege und Weiterentwicklung von Diagnosesystemen im Rahmen von CoPs.
- Bildung von CoPs für kritische Aspekte der Diagnose.
- Teilhabe an unternehmensübergreifenden CoPs ermöglicht die Nutzung der Vorteile der Spinnennetz-Struktur:
 - Bedarfsgerechte und flexible Bildung von Gemeinschaften
 - Exponentielle Wissensentwicklung
- Begleitung der Arbeit in den CoPs durch Lernarenen der zweiten und dritten Art.
- Aufbau von Wissensallianzen bei wichtigen und längerfristig relevanten Maßnahmen im Diagnoseumfeld wie der Partizipation an Kollaborationskonzepten (vgl. Abschnitte 4.5, 5.1.3 sowie 5.2.3) zum Aufbau und zur Pflege von Diagnosesystemen.

Technische Aspekte wissensbasierter Diagnosetätigkeiten werden bei der Hypertextorganisation durch die Wissensbasis-Schicht dargestellt. Diese ist wie folgt zu strukturieren, um einen maximalen Nutzen zu erreichen:

- Integration von Ergebnissen der Wissensarbeit in der Projektteam-Schicht in die technischen Systeme der Wissensbasis-Schicht (z. B. Diki oder DiaX).

- Bedarfsgerechte Speicherung, Verwaltung und Nutzung von Wissen mittels der Wissensbasis-Schicht, ohne dass die gesamte Organisationsstruktur wissenszentriert auszurichten ist.
- Einsatz von Dikis und semDikis als Katalysatoren der Wissensverteilung bei der menschenzentrierten Diagnose [182].

Das vorgestellte Aufbaukonzept lässt zudem Raum, auch die menschliche Gestaltungsdimension angemessen zu berücksichtigen:

- Verabschiedung eines Wissensleitbildes, das die Kennzeichen einer Wissenskultur adressiert:
 - Kultur des Experimentierens
 - Werte: Vertrauen, Zusammenarbeit, Offenheit, Lernbereitschaft, Autonomie und Fehlertoleranz
 - Wertkongruenz
 - Förderung der Wissensnutzung
- Sensibilisierung des mittleren Managements für die herausragende Bedeutung von Wissensmanagement (vgl. Middle-up-down-Ansatz).
- Aufgreifen eines wissensorientierten Führungsverständnisses durch das mittlere Management.
- Förderung des Aufbaus von Wissensarbeitern im Unternehmen durch MbKO.
- Förderung der Wissensnutzung und -verbreitung durch CoPs.

Die skizzierte Organisations-, Unternehmens- und Führungskultur ist durch die Bereitstellung geeigneter Anreizsysteme zu begleiten. Vor allem bei ihrer Einführung ist dies von Bedeutung, um eine erste Auseinandersetzung der Zielgruppe mit der Thematik zu fördern [61]:

- Durchführung von Wissenswettbewerben, um den Aufbau einer initialen Wissenssammlung zu unterstützen.
- Setzen intrinsischer Motivationsanreize durch die Einrichtung von CoPs [107]:
 - Offerieren neuer Herausforderungen: Teilnahmemöglichkeit an CoPs
 - Honorierung der Wissensarbeit mit Freiräumen: Frei verfügbare Arbeitszeit kann zur Teilnahme an CoPs verwendet werden.
- Wissensmanagement als Faktor bei der Mitarbeiterbeurteilung im Rahmen des MbKO.
- Angebot einer Fachlaufbahn für Wissensarbeiter.
- Einführung einer monetären Prämie auf Basis des Gruppenerfolgs.

- Einführung von Auszeichnungen für diverse Aktivitäten im Wissensumfeld auf Basis eines Award-Systems:
 - „OPL des Monats“
 - „Wissensarbeiter des Monats“

Der Rückgriff auf Anreizsysteme stellt die Basis dar, um eine kritische Masse an Inhalten zu erarbeiten. Deren anschließende Nutzung setzt ausreichend positive Impulse, um eine weitere Unterstützung des verfolgten Wissensmanagementansatzes zu sichern [61]. Dieser Sachverhalt ist als „erfahrener Nutzen“ bekannt und stärkt die Bereitschaft von Personen aktiv zu einem erfolgreichen Wissensmanagement beizutragen. Zudem sind extrinsische und intrinsische Anreize zu kombinieren, da die alleinige Aktivierung intrinsischer Motive die Gefahr birgt, dass ausschließlich individuelle Ziele verfolgt werden, die nicht mit den Unternehmenszielen übereinstimmen. [185] Dieser Gefahr kann weiterhin durch entsprechende Gegenmaßnahmen in Form eines Wissensleitbilds sowie durch die Förderung der Wertkongruenz entgegen getreten werden.

6.4 Entwicklung eines Stufenkonzepts zur nachhaltigen Einführung und Anwendung rechnergestützter Diagnosesysteme

Im Folgenden wird ein mehrstufiges Konzept entwickelt, um den in Kapitel 2 geschilderten aktuellen Stand bei der technischen Diagnose sukzessive zu verbessern. Dabei werden die in Kapitel 3 bis 5 entwickelten technischen Lösungswege webMon, Diki, semDiki, DiaX und DiMAS mit eingangs dieses Kapitels identifizierten, geeigneten organisatorischen und menschlichen Begleitmaßnahmen kombiniert.

Systeme der Überwachung und Diagnose gliedern sich in die Instandhaltung ein (vgl. Abschnitt 2.3.3). Diese wiederum nimmt eine unterstützende Aufgabe zur Realisierung von Optimierungspotentialen bei der Produktion bezüglich Größen wie Verfügbarkeit, Produktqualität oder Kosten wahr. Demzufolge stehen für Aufbau und Betrieb dort angesiedelter Maßnahmen nur begrenzte Ressourcen zur Verfügung. [122] Angesichts dieser Voraussetzung sind insbesondere leistungsstarke Überwachungs- und Diagnoseselösungen, die auf einer komplexen Systemarchitektur basieren wie DiMAS, nicht in einem Schritt umsetzbar. Deshalb ist ein Stufenkonzept zur Evolution technischer Diagnosesysteme unter Berücksichtigung betrieblicher Restriktionen erforderlich. Dieses Konzept hat folgenden zentralen Anforderungen an die Instandhaltung der Zukunft Rechnung zu tragen:

- Umfassende IT-Unterstützung der Instandhaltung
- Aufbau von Wissensplattformen aufgrund der zunehmenden Wissensintensität der Instandhaltung
- Zusammenarbeit bezüglich Standardisierung, Datenbasis und Wissenssammlung zwischen Betreiber, Hersteller und Dienstleister
- Neue Rolle der Führungskraft [73]

6.4.1 Stufe 1: Einführung webbasierter Überwachungssysteme

Im Sinne einer kosteneffizienten Instandhaltung ist die flächendeckende Einführung komplexer IT-Systeme zur Diagnoseunterstützung nicht zielführend. Deshalb ist das Ziel der ersten Stufe dieses Konzepts die Identifikation von Anlagen, an denen der höchste Optimierungsbedarf besteht. Dazu werden die in Abbildung 58 dargestellten Maßnahmen durchgeführt:

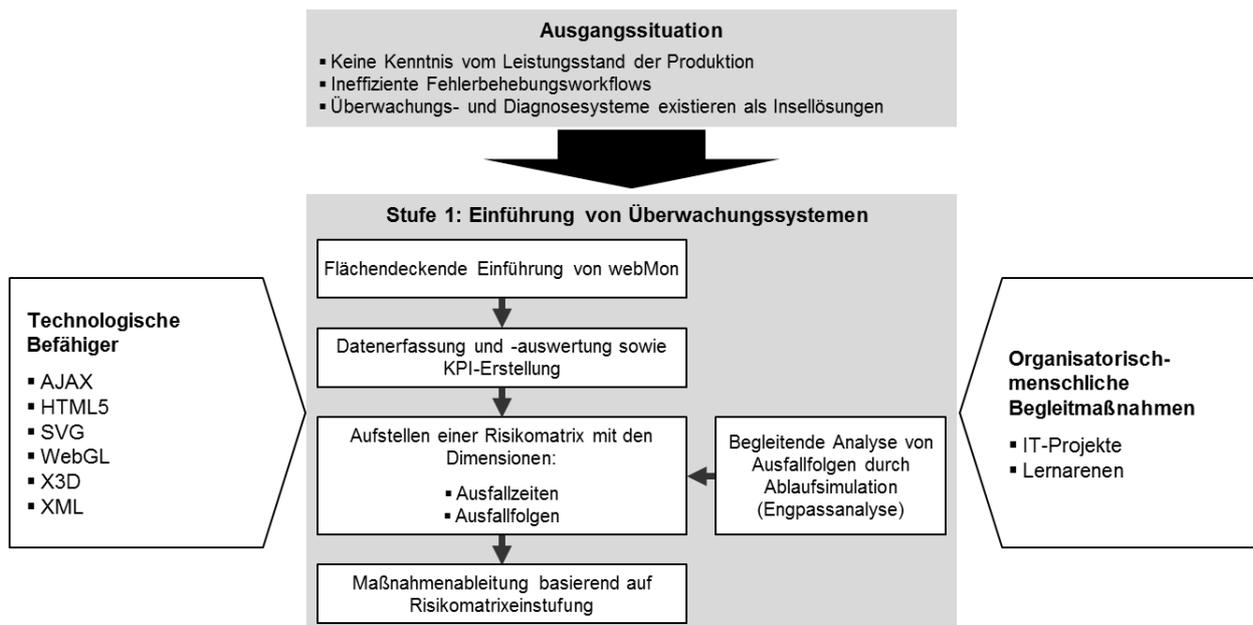


Abbildung 58: Einführung von webMon zur transparenten Ermittlung des Leistungsstands der Produktion

Um eine fundierte Entscheidung bei der Auswahl kritischer Betrachtungsobjekte treffen zu können, ist in einem ersten Schritt zunächst mit webMon ein Überwachungssystem einzuführen (vgl. Kapitel 3). Auf Basis der dadurch bereitgestellten Datengrundlage kann anschließend eine Einordnung von Anlagen in eine Risikomatrix auf Basis der Ausfallzeit und -folgen durchgeführt werden. In diesen Zusammenhang erfolgende Analysen sind durch einen begleitenden Einsatz der Ablaufsimulation abzusichern [152].

6.4.2 Stufe 2: Aufbau von Systemlösungen zur Unterstützung menschzentrierter Diagnose und Therapie

Werden anhand der Risikobewertung aus Stufe 1 kritische Betrachtungsobjekte identifiziert, deren Defizite auf einem unzureichenden Wissensmanagement im Umfeld des Anlagenbetriebs beruhen, ist die Einführung eines softwaregestützten Wissensmanagements angemessen (vgl. Abbildung 59). Hierbei ist aufgrund der einfachen technischen Umsetzbarkeit und der einfachen Zugänglichkeit zunächst der Aufbau einer Wissenssammlung auf Diki-Basis im Anlagenumfeld sinnvoll (vgl. Kapitel 4). Nachdem die Systemlösung eingeführt und ihre Akzeptanz im betrieblichen Umfeld durch begleitende organisatorisch-menschliche Maßnahmen abgesichert ist, kann ein Ausbau der Systemlösung zu semDiki erfolgen. Auch wenn dies mit einer gesteigerten Systemkomplexität einhergeht, werden dennoch wertvolle neue Anwendungsmöglichkeiten nutzbar (vgl. Tabelle 15).

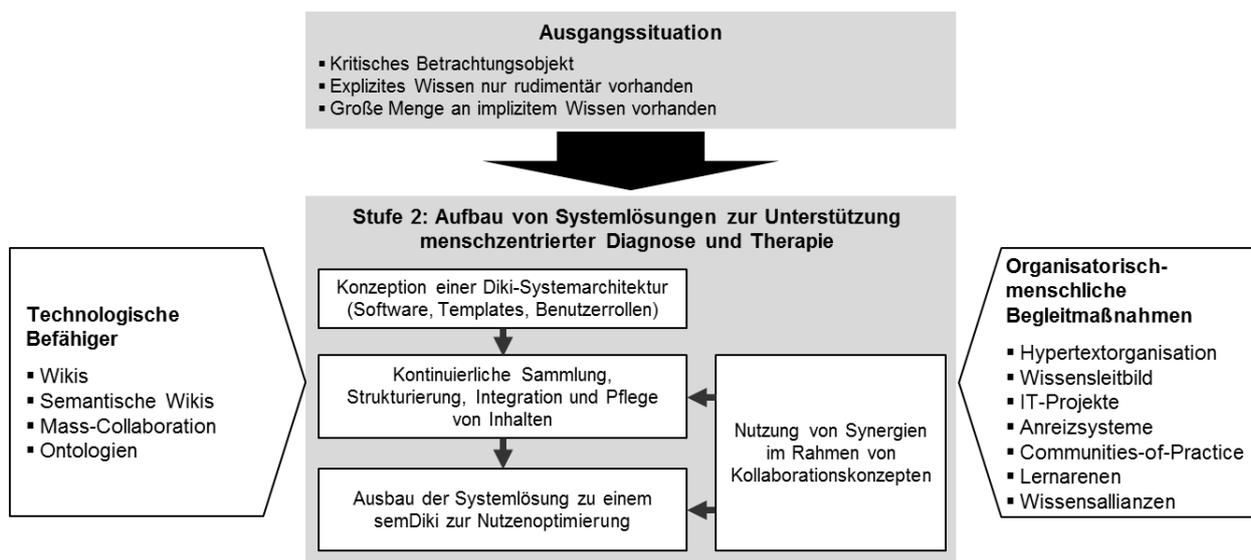


Abbildung 59: Aufbau und Weiterentwicklung von Systemlösungen der menschzentrierten Diagnose und Therapie auf Wiki-Basis mit Diki und semDiki

6.4.3 Stufe 3: Einführung rechnergeführter Diagnosesysteme

Die in Stufe 2 eingeführten Systemlösungen Diki und semDiki bieten zwar eine umfassende Informationsbasis hinsichtlich Diagnose und Therapie, allerdings wird speziell der Schritt der strukturierten Ursachenfindung nur gering unterstützt. Dieser Vorgang nimmt jedoch eine entscheidende Bedeutung bei der Verkürzung von Stillstandszeiten ein. Deshalb sind in einer weiteren Entwicklungsstufe Systeme zur rechnergeführten Ursachenfindung und Maßnahmenauswahl wie DiaX (vgl. Abschnitt 5.1) aufzubauen (vgl. Abbildung 60).

Die Vorarbeiten der Wissenssammlung und -strukturierung aus Stufe 2 stellen die Basis zur Ausstattung von DiaX mit einer Wissensbasis dar, die bereits zum Zeitpunkt der Systemeinführung mit umfassendem Anlagenwissen gefüllt ist. Dadurch profitiert der Anwenderkreis unmittelbar von DiaX und die Akzeptanz des Systems wird umgehend über den dabei erfahrenen Nutzen gesteigert. Der semDiki-Ansatz und die dabei zum Einsatz kommenden Ontologien stellen die technologische Plattform dar, um eine einfache Weiterverwendung von, in der vorausgegangenen Stufe, gesammeltem Wissen zu ermöglichen.

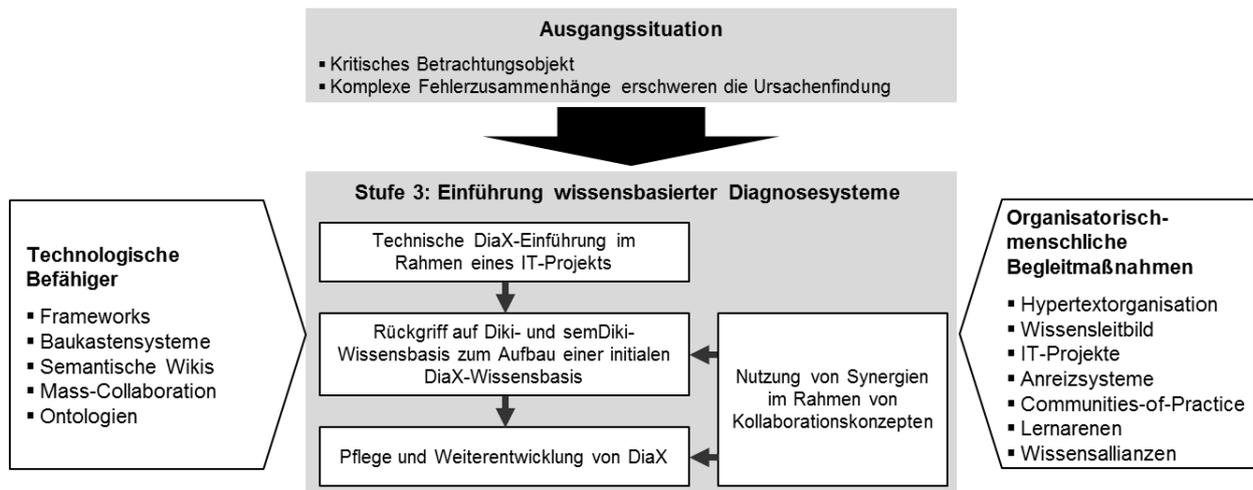


Abbildung 60: Einführung von DiaX zur rechnergeführten Diagnose

6.4.4 Stufe 4: Einführung autonomer Überwachungs- und Diagnosesysteme

Eine weiterführende Entwicklung der Systemlandschaft nach erfolgreicher Einführung von rechnergeführten Diagnosesystemen ist durch unterschiedliche Aspekte motiviert. Geht eine weitere Verkürzung von Zeitanteilen bei der Fehlerbehebung hinsichtlich Erkennung, Diagnose und Reaktion (vgl. Kapitel 2, Abbildung 3) mit unmittelbaren wirtschaftlichen Vorteilen einher, ist der Einsatz von DiMAS in Betracht zu ziehen. Eine andere Motivation ist die Ebnung des Wegs zu einer dezentralen, vernetzten und intelligenten Produktionsumgebung unter Einbeziehung von CPS. Dieses Ziel ist im Sinne eines ganzheitlichen Systemansatzes auch seitens der technischen Diagnose mit entsprechenden Ansätzen zu unterstützen. DiMAS stellt dazu ein geeignetes Mittel dar. Abbildung 61 skizziert die dazugehörigen Phasen beim Aufbau von DiMAS. Dabei wird umfassender Gebrauch von den in Abschnitt 5.2 vorgestellten Technologien, Lösungsansätzen und Kollaborationskonzepten gemacht. Im Rahmen einer SOA sind auch die im Zusammenhang mit der DiaX-Applikation erstellten Wissensbasen weiterverwendbar. Hierzu sind Expertensysteme wie DiaX so zu adaptieren, dass sie als Service-Provider im Rahmen einer SOA fungieren und so in die Landschaft der autonom agierenden Systeme einbettbar sind.

Parallel dazu bleiben die in den vorausgegangenen Stufen eingeführten organisatorisch-menschlichen Maßnahmen weiterhin aktiv. Der Schwerpunkt bei der Bildung von Wissensallianzen und CoPs bleibt neben der technischen Weiterentwicklung der Systemlösung weiterhin die Wissensarbeit zur Pflege und zum Ausbau von Wissensbasen. Nur so ist gewährleistet, dass die über die DiMAS-Agentenplattform angebotenen Services fortwährend mit höchster Effizienz ausgeführt werden können.

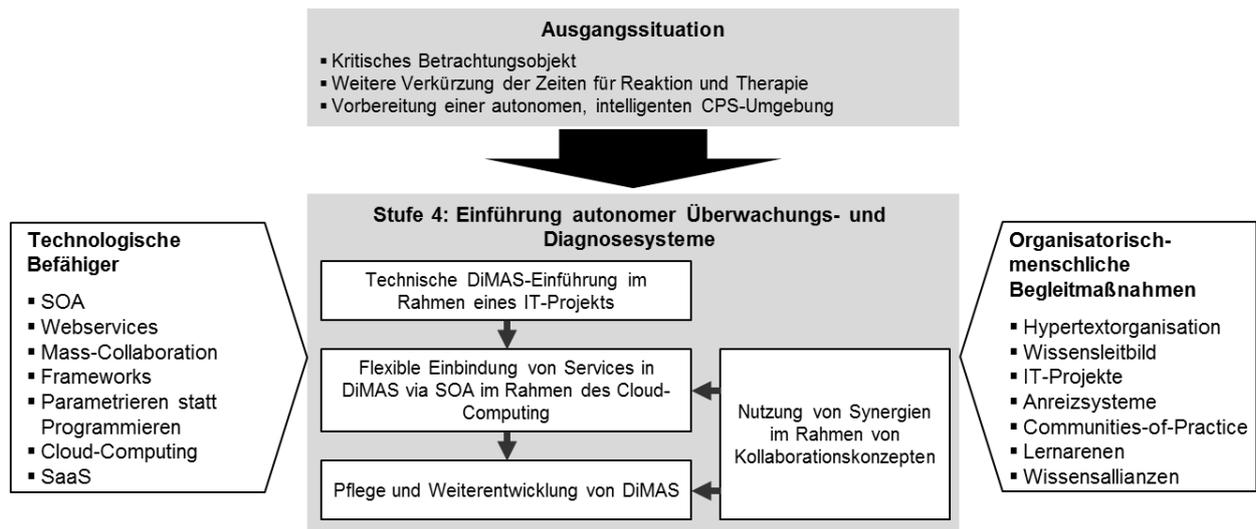


Abbildung 61: Einführung von DiMAS zur autonomen technischen Diagnose

6.4.5 Gesamtkonzept

Abbildung 62 zeigt das Gesamtkonzept, das sich aus der Kombination der vorgestellten Evolutionsstufen der technischen Diagnose ergibt. Ausgehend vom Status quo ist im Rahmen dieses Konzepts der Leistungsstand der Diagnose anwendungsfallspezifisch zu steigern. Neben der Kritikalität eines Betrachtungsobjekts sind dabei die, den jeweiligen Stufen, zugeordneten Voraussetzungen mit einzubeziehen, wenn eine Entscheidung bezüglich der Einführung einer weiteren Entwicklungsstufe erfolgt.

Auf Basis des entwickelten Stufenkonzepts ist eine sukzessive Unterstützung der Realisierung einer cyberphysischen Produktionsumgebung vonseiten der technischen Diagnose darstellbar. Stehen für alle Betrachtungsobjekte autonome Überwachungs- und Diagnosesysteme in Form der in Kapitel 5.2 aufgezeigten Systemlösung DiMAS zur Verfügung, können diese mit weiteren CPS für Produktion und Logistik gekoppelt werden. Somit wird die umfassende Vision einer dezentralen, intelligenten Produktionsumgebung erreichbar.

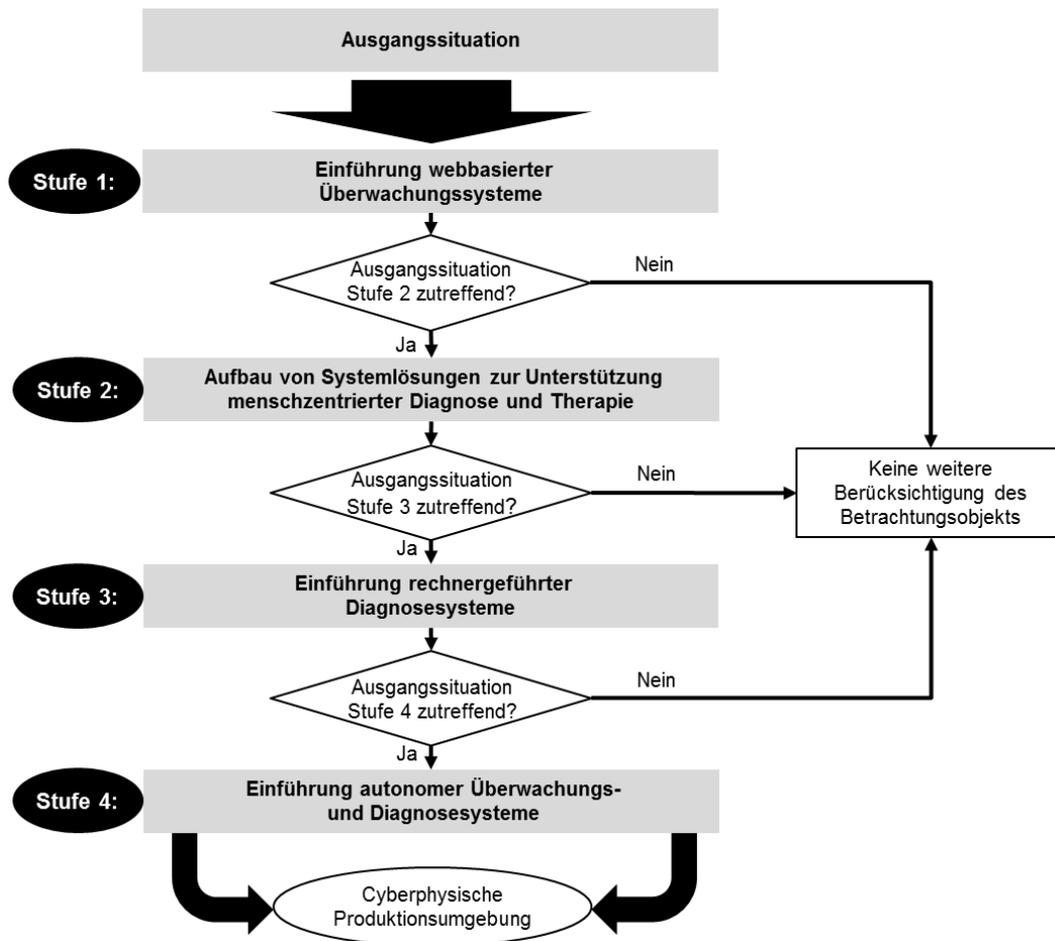


Abbildung 62: Stufenkonzept zur Evolution des Status quo bei der technischen Diagnose entsprechend aktueller und zukünftiger Anforderungen

6.5 Zusammenfassung

Im Zuge zunehmend komplexerer Produktionsanlagen steigt auch das zu deren effizientem Betrieb erforderliche Wissen [1]. Diesem Trend hat auch die technische Diagnose Rechnung zu tragen, was in Konsequenz zu einer Bedeutungszunahme des Wissensmanagements für diesen Bereich führt. Hierbei besteht die Herausforderung, dass Wissensmanagement durch einen allein technikgetriebenen Ansatz nicht erfolgreich umsetzbar ist, sondern auch die Dimensionen Mensch und Organisation zu beachten sind [25]. Somit sind die Einführung und der Betrieb der in dieser Arbeit entwickelten technischen Diagnosesysteme mit geeigneten organisatorisch-menschlichen Begleitmaßnahmen abzusichern.

Ausgehend von dieser Aufgabenstellung wurden betriebliche Organisationsmodelle sowie Gestaltungsmöglichkeiten für Unternehmens- und Führungskulturen auf ihre Eignung für eine Flankierung von technischen Lösungen zur Überwachung und Diagnose von Produktionsanlagen untersucht. In einem Vergleich klassischer und wissensorientierter Organisationsmodelle wurde die Hypertextorganisation als eine Aufbauform iden-

tifiziert, die in besonders hohem Maße hierzu geeignet ist. Aufgrund ihrer Auslegung kann eine herausfordernde Transformation der Primärorganisation entfallen. Vielmehr werden Wissensarbeit sowie -speicherung in separate Aufbauschichten verlegt, die neben die bisherige hierarchische Aufbaustruktur treten. Eine dieser Schichten stellt die Projektteam-Schicht dar, in die wissensfördernde Sekundärorganisationsstrukturen wie Communities-of-Practice, Lernarenen oder Wissensallianzen integrierbar sind.

Die menschliche Dimension ist durch Ausbau der herkömmlichen Unternehmenskultur zu einer Wissenskultur zu unterstützen. Kennzeichnend dafür ist die Verabschiedung eines Wissensleitbilds, das explizit Werte und Verhaltensregeln fördert, die der Wissensarbeit nutzen. Aufgabe des Managements ist es in diesem Zusammenhang, die Mitarbeiter durch ein wissensorientiertes Führungsverhalten zur Wissensarbeit zu motivieren. Hierbei ist der Middle-up-down-Ansatz in Verbindung mit Management-by-Knowledge-Objectives besonders geeignet. Im Rahmen dieses Ansatzes hat der Vorgesetzte zudem ein neues Führungsverständnis aufzugreifen, das den Fokus nicht auf die Beibehaltung einer Machtposition legt. Vielmehr muss sich dieser als Mentor und Coach der Untergebenen hinsichtlich der Wissensarbeit sehen. Die vorgestellten Maßnahmen erfordern deutliche Veränderungen im Verhalten der Mitarbeiter. Um diese zu stimulieren, wurde analysiert, inwieweit Anreize in extrinsischer und intrinsischer Form dabei einsetzbar sind. Über eine alleinige monetäre Motivation hinaus erweisen sich insbesondere intrinsische Anreize, die den Mitarbeitern Anerkennung, Freiräume und neue Herausforderungen in Aussicht stellen, als geeignet, eine Wissenskultur mit Leben zu füllen.

In Aggregation dieser Erkenntnisse wurde ein betriebliches Modellumfeld konstruiert, das in der Lage ist, den nachhaltigen Einsatz technischer Diagnosesysteme organisatorisch und menschlich abzusichern. Unter Einbeziehung des Modellumfelds wurde im Anschluss ein Stufenkonzept entwickelt, das einen Weg zum systematischen Aufbau der in den Kapiteln 3 bis 5 erarbeiteten technischen Lösungsansätze aufzeigt. Hierbei wurde deutlich, dass unter Beachtung von Budgetrestriktionen der industriellen Instandhaltung eine dezentrale, intelligente Diagnose, die die Zukunftsvision der Industrie 4.0 unterstützt, nicht in einem Schritt erreichbar ist. Vielmehr ist zunächst der dringendste Bedarf unter Einbeziehung von Überwachungssystemen wie webMon zu ermitteln. Zu dessen Deckung werden dann zunächst technisch einfache Lösungen mit inhärent hoher Nutzerakzeptanz auf Wiki-Basis wie Diki oder semDiki eingeführt. Erst danach ist es angemessen, die eingesetzten Systemlösungen über weitere Ausbaustufen in Richtung autonomer, intelligenter Systeme wie DiMAS voranzutreiben.

7 Zusammenfassung

Die wirtschaftliche Produktion von Gütern stellt für Industrieländer ein zentrales Standbein ihres Wohlergehens dar. Dem propagierten Wandel zu einer Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft zum Trotz bleibt insbesondere in Deutschland die industrielle Produktion nach wie vor die Grundlage des Wohlstands. Dabei zeichnet sich Deutschland durch eine Fokussierung auf eine intelligente Produktion aus, die es erlaubt sich vom Trend der Deindustrialisierung abzukoppeln. In diesem Umfeld muss sich die Produktion in Deutschland auf verändernde Märkte und Rahmenbedingungen einstellen, um weiterhin wettbewerbsfähig zu bleiben. Diese Veränderungen werden von Megatrends wie der Globalisierung, der Durchdringung mit neuen Technologien, der Dynamisierung von Produktlebenszyklen, der Ressourcenverknappung, der Wissensgesellschaft oder dem demografischen Wandel getrieben. Angesichts dieser Einflüsse ist eine automatisierte, wandlungsfähige Produktionsumgebung erforderlich, die in der Lage ist, kundenindividuelle Produkte in hoher Qualität zu erzeugen. [1]

Für den wirtschaftlichen Betrieb automatisierter Anlagen ist allerdings ein hoher Gesamtnutzungsgrad bzw. eine hohe OEE Grundvoraussetzung [230]. Nur dadurch ist eine konkurrenzfähige Fertigung unter Verwendung komplexer, kapitalintensiver und automatisierter Anlagen realisierbar. In diesem Zusammenhang kommt rechnergestützten Systemen der technischen Diagnose eine hohe Bedeutung zu. Durch ihren Einsatz können die vielfältigen Fehlermöglichkeiten komplexer Automatisierungssysteme und Fertigungsprozesse schnell erkannt, identifiziert und beseitigt werden [38]. Somit stellen sie ein Schlüsselement zur Erreichung kurzer Stillstandszeiten und einer hohen Ressourceneffizienz dar.

Technische Diagnosesysteme unterliegen wie das Produktionsumfeld vielfältigen Einflüssen, die bei ihrer Entwicklung und ihrem Einsatz zu beachten sind. Sie müssen flexibel und anpassungsfähig sein, um für eine Anwendung im wandlungsfähigen Produktionsumfeld geeignet zu sein. Parallel dazu nimmt zukünftig aufgrund kürzerer Verweildauern von Mitarbeitern im Unternehmen sowie einer gesteigerten Wissensintensität der Produktion auch das Wissensmanagement für produktionsnahe Unterstützungsfunktionen, wie sie auch die Diagnose darstellt, eine herausragende Bedeutung ein [1].

Ziel dieser Arbeit war daher die Entwicklung von Lösungsansätzen der technischen Diagnose, die für einen Einsatz im dargestellten Wettbewerbsumfeld geeignet sind. Um eine definierte Ausgangsbasis für diese Tätigkeiten zu bieten, wurde zunächst der Begriff der technischen Diagnose systematisiert und in das Produktionsumfeld eingeordnet. Danach erfolgte die Identifikation von technologischen Befähigern, auf deren Basis die Umsetzung geeigneter Systemlösungen für Überwachung, Diagnose und Therapie erfolgen kann, die festgestellte Defizite beim Status quo beseitigen.

Als erster Teil der Lösungsstrategie wurde mit webMon ein flexibles Überwachungssystem für Produktionsanlagen entwickelt. Motivation hierbei war die Beseitigung aktueller Defizite, die sich in einem Parallelbetrieb mehrerer Systeme sowie einem hohen Einarbeitungsaufwand zur Systemnutzung äußern. Diese sind Folge des Einsatzes von Insellösungen auf Basis proprietärer Technologien. Der webMon-Ansatz zeichnet sich hingegen durch generische Datenstrukturen, den Einsatz standardisierter Webtechnologien wie SVG oder WebGL und einen modularen Aufbau aus. Dies fördert die Wiederverwendbarkeit von webMon-Komponenten, erhöht die Benutzerfreundlichkeit durch Einfachheit in der Systemnutzung und reduziert in Konsequenz auch die Kosten der Systemapplikation.

Nachfolgend wurden mit Diki und semDiki Systemlösungen zur Diagnose und Therapie entwickelt, die eine einfache Einführung der technischen Diagnose in einem wissensintensiven Produktionsumfeld erlauben. Hierbei wurden zunächst in einem Technologievergleich aus einer Vielzahl an Softwaresystemen des Wissensmanagements Wikis als geeignetes Basiswerkzeug zur Unterstützung einer menschenzentrierten Diagnose und Therapie ermittelt. Durch eine geringe Systemkomplexität und die intensive Förderung von Partizipation und Kollaboration ermöglichen sie einen einfachen Einstieg in die rechnergestützte Diagnose. Zusätzliche Optimierungsmöglichkeiten entstanden bei diesem Ansatz durch die Einbettung weiterer Konzepte wie Portalseiten, One-Point-Lessons und FMEA-Tabellen in das Diki sowie den Ausbau des Dikis zu semDiki, einem Diki auf Basis semantischer Technologien. Um die Vorteile eines effizienten Aufbaus einer Wissenssammlung durch Partizipation und Kollaboration umfassend nutzbar zu machen, wurde zudem ein Konzept zur diesbezüglichen unternehmensumspannenden bzw. -übergreifenden Zusammenarbeit unter Rückgriff auf die Ansätze der Mass-Collaboration und des Peer-to-Peer-Wissensmanagements entwickelt.

Die zuvor erstellten Wissensbasen können als Ausgangspunkt für den Aufbau komplexerer, aber auch leistungsstärkerer Systemlösungen in Form wissensbasierter Systeme dienen. Vor diesem Hintergrund wurden zunächst Expertensysteme betrachtet. Die nachhaltige Integration dieser Systemklasse in die betriebliche Diagnose ist seit Jahrzehnten das Ziel diverser Applikationsversuche. Angesichts dieser Situation erfolgte eine Analyse hinsichtlich der Limitationen bisheriger Einführungsbestrebungen. Für die identifizierten Defizite wurde ein Lösungsweg unter Einbeziehung von webbasierten Systemarchitekturen, Baukastensystemen sowie Kollaborationskonzepten entwickelt und in Form von DiaX umgesetzt. Im Anschluss wurden Multiagentensysteme betrachtet. Sie bieten die Möglichkeit einer autonomen Überwachung und Diagnose, allerdings existieren hinsichtlich ihres Einsatzes wie bei Expertensystemen bisher signifikante Hürden. Diese wurden wiederum analysiert und im Anschluss geeignete Lösungsstrategien entwickelt. Bezüglich vorhandener Defizite hinsichtlich des Kommunikationsstandards kann dabei auf die Arbeiten internationaler Standardisierungsorganisationen ge-

setzt werden. Die mangelnde Anwenderfreundlichkeit bei Aufbau und Konfiguration eines Multiagentensystems wurde durch die Bereitstellung einer webbasierten Modellierungsoberfläche samt Gerätebibliothek zur grafischen Spezifikation und Konfiguration von Agentensystemen eliminiert. Des Weiteren stellen die hohen Aufwände für Entwicklung und Betrieb eines agentenbasierten Systems ein entscheidendes Hemmnis hinsichtlich ihrer Verbreitung im Produktionsumfeld dar. Zu dessen Beseitigung wurde unter Einbeziehung der internetbasierten Architekturkonzepte serviceorientierte Architektur und Cloud-Computing eine Systemlandschaft konzipiert, die die verteilte sowie kollaborative Entwicklung und Pflege von Multiagentensystemen erlaubt. Diese ermöglicht ferner die flexible Nutzung von Multiagentensystem-Komponenten auf Grundlage des Software-as-a-Service-Prinzips. Einhergehend mit der Entwicklung der Lösungsstrategien wurde deren Realisierbarkeit durch den begleitenden Aufbau von DiMAS demonstriert.

Insbesondere die Einführung leistungsstarker wissensbasierter Diagnosesysteme wie DiaX oder DiMAS erfordert erhebliche Anpassungen im betrieblichen Anwendungsumfeld, die aufgrund der Stellung der technischen Diagnose als Unterstützungsfunktion der Instandhaltung sukzessive zu erfolgen haben. Deshalb wurde ein Stufenkonzept erarbeitet, das den Leistungsstand technischer Diagnosesysteme ausgehend vom identifizierten Status quo unter Beachtung organisatorischer und menschlicher Rahmenbedingungen schrittweise weiterentwickelt. Dies beinhaltet aus organisatorischer Sicht den Aufbau einer Hypertextorganisation in Kombination mit der Einführung von Communities of Practice, Lernarenen und Wissensallianzen. Parallel dazu ist zur Berücksichtigung der menschlichen Gestaltungsdimension die Unternehmenskultur zu einer Wissenskultur voranzutreiben. Dies erfolgt mittels der Festlegung eines Wissensleitbilds sowie der Einführung eines wissensorientierten Führungsverhaltens auf Basis von Management-by-Knowledge-Objectives. Begleitend dazu sind intrinsische und extrinsische Anreize zu setzen, die die Beschäftigten zur Wissensarbeit motivieren.

Die im Rahmen der Arbeit eingeführten technischen Lösungsansätze webMon, Diki, semDiki, DiaX und DiMAS entwickeln in Verbindung mit dem erarbeiteten Stufenkonzept die technische Diagnose ganzheitlich entsprechend aktuellen Anforderungen weiter. Dabei berücksichtigen sie entscheidende Trends, die auf das heutige Produktionsumfeld wirken wie den Wandel zu einer Wissensgesellschaft oder die Vision einer dezentralen, intelligenten Produktionsumgebung. Vor allem die Applikation von Paradigmen und Technologien aus dem Webumfeld leistet einen entscheidenden Beitrag zur Zielerreichung und erfüllt inhärent dazu vormals postulierte Anforderungen wie die Fähigkeit zur Telediagnose.

8 Summary

The economic production of goods is a central pillar of welfare for industrial countries. Despite a propagated change to a service and information society, especially in Germany industrial production remains the foundation of prosperity. Thereby, Germany distinguishes itself by focusing on an intelligent production that allows for a decoupling from the trend of de-industrialization. Within this environment production in Germany has to adapt itself to altering markets and framework conditions in order to stay competitive. These transformations are driven by megatrends such as globalization, penetration of new technologies, dynamization of product life cycles, shortage of resources, knowledge society and demographic change. Given these influences, an automated, versatile production environment is called for that is able to manufacture customized products in high quality. [1]

For the economic operation of automated plants however, a high total utilization ratio respectively a high OEE is a basic prerequisite [230]. Only this allows for a competitive production that uses complex, capital-intensive and automated plants. In this context computer-based systems for technical diagnosis are of high significance. By their application the manifold failure modes of complex automation systems and manufacturing processes can swiftly be detected, identified and eliminated [38]. Therefore, they represent a key element for achieving short downtimes and high resource efficiency.

Like the production environment, technical diagnosis systems are subject to manifold influences that have to be taken into account during their development and application. They have to be flexible and adaptable in order to be suitable for an application in a versatile production environment. In parallel knowledge management for production-related support functions like diagnosis gains an outstanding importance due to shorter retention times of employees and an increasing knowledge intensity of production. [1]

This work therefore aimed at developing solutions for technical diagnosis that are suitable for the application in the depicted competitive environment. In order to provide a defined starting point, at first the notion of technical diagnosis was systematized and classified in the production environment. This was followed by the identification of technological enablers that can serve as a foundation for the implementation of suitable system solutions for monitoring, diagnosis and therapy that eliminate ascertained deficits concerning the status quo.

As first part of the solution strategy webMon, a flexible monitoring system for production facilities, was developed and applied. The motivation hereby was to eliminate existing deficits that manifest themselves by the parallel operation of several systems and the high familiarization effort in order to use the systems. They are the result of the application of island solutions based on proprietary technologies. The webMon-approach how-

ever distinguishes itself by generic data structures, the application of standardized web technologies like SVG or WebGL and a modular composition. This fosters the reusability of webMon-components, increases usability by simplicity in utilization and also reduces in consequence the costs of system application.

Consecutively, in the form of Diki and semDiki system solutions for diagnosis and therapy that allow for opportunities of getting technical diagnosis started in a knowledge-intensive production environment were developed. Here, wikis were first determined as a suitable base tool for supporting human-centered diagnosis and therapy by a technology comparison considering a variety of knowledge management software systems. Allowing for a low system complexity and an intensive promotion of participation and collaboration, they facilitate an easy entry into computer-based diagnosis. Additional optimization opportunities arose by incorporating further concepts like portal sites, One-Point Lessons and FMEA-tables into Diki and by enhancing Diki to semDiki, a Diki based upon semantic technologies. In order to make the advantages of an efficient composition of a knowledge collection by the means of participation and collaboration fully accessible, a concept concerning this matter was developed, which builds upon company-spanning and cross-company cooperation by recourse to mass collaboration and peer to peer knowledge management.

The previously created knowledge bases can serve as a starting point for the setup of more complex, but also more powerful system solutions in the form of knowledge-based systems. Given this background, expert systems were considered. Since decades the sustainable integration of this system class into diagnosis at an operational level has been the goal of various application efforts. In the light of this situation an analysis concerning the limitations of previous implementation intentions was conducted. A solution strategy for the identified deficits that includes web-based system architectures, construction kits and collaboration concepts was developed and implemented in the form of DiaX. Subsequently multi-agent systems were regarded. They offer the possibility of autonomous monitoring and diagnosis, but similar to expert systems there exist significant hurdles with respect to their application. These were once again analysed and subsequently suitable solution strategies were developed. In terms of existing deficits with respect to communication standards, one can rely on the work of international standardization organizations. The poor usability during setup and configuration of multi-agent systems was resolved by providing a web-based modelling surface along with a device library that allows for a graphical specification and configuration of agent systems. Furthermore, the high efforts for development and operation of agent-based systems represented a decisive restraint for limiting their dissemination in the production environment. In order to tackle this issue, a system landscape incorporating the internet-based architecture concepts of service-oriented architecture and cloud computing was designed that permits the distributed as well as collaborative development and

maintenance of multi-agent systems. Furthermore, the approach enables the flexible usage of components of multi-agent systems based on the software as a service principle. The development of the solution strategies was accompanied by the demonstration of their feasibility by the concomitant implementation of DiMAS.

Particularly the introduction of powerful knowledge-based diagnosis systems like DiaX or DiMAS requires considerable adjustments in the operational application environment that have to take place successively due to the status of technical diagnosis as a support function of maintenance. Therefore, a staggered concept was worked out that gradually advances the performance level of technical diagnosis, starting from the status quo with due regard to organizational and human framework conditions. This encompasses the setup of a hypertext organization in combination with the introduction of communities of practice, learning arenas and knowledge alliances. In parallel, enterprise culture has to be promoted to a knowledge culture in consideration of the human design dimension. This ensues through the passage of a guiding principle on knowledge as well as the introduction of knowledge-oriented leadership behaviour based on management by knowledge-objectives. These steps have to be accompanied by intrinsic and extrinsic stimuli in order to motivate employees to conduct knowledge work.

The technical solutions webMon, Diki, semDiki, DiaX and DiMAS that were developed within the scope of this work advance in conjunction with the developed staggered concept technical diagnosis holistically according to current needs. Thereby, they take into account decisive trends that have an effect on today's production environment like the transition into a knowledge society or the vision of a decentralized, intelligent production environment. Especially, the application of paradigms and technologies for the web environment contributes decisively to the achievement of objectives and fulfils inherently formerly postulated requirements like the capability of telediagnosis.

9 Abkürzungsverzeichnis

3DS	3D Studio 3D Scene
5W1H	When, Where, Who, What, Why and How
AID	Agent Identifier
AJAX	Asynchronous JavaScript and XML
AMS	Agentenmanagement-System
API	Application Programming Interface
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
AWSI WG	Agents and Web Services Interoperability Working Group
BDE	Betriebsdatenerfassung
BSD	Berkeley Software Distribution
C3DL	Canvas 3D JS Library
CBR	Case-Based Reasoning
COLLADA	Collaborative Design Activity
CoP	Community of practice
CPS	Cyber-Physical Systems
DAE	Digital Asset Exchange
DB-Server	Datenbank-Server
DE-Client	Datenerfassungs-Client
DE-Server	Datenerfassungs-Server
DE-System	Datenerfassungs-System
DiMAS	Diagnosesystem auf Multiagentensystembasis
DiaX-SD	Diagnoseunterstützungssystem auf Expertensystembasis für den Schablonendruck
Diki	Diagnoseunterstützungssystem auf Wiki-Basis
DOM	Document Object Model
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
FIPA	Foundation for Intelligent Physical Agents
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
GAFF	Gesamtanlageneffektivität
GPL	GNU General Public License
GUI	Graphical User Interface

HHG	Handhabungsgerät
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HTML	Hypertext Markup Language
HUD	Head-up-Display
IaaS	Infrastructure as a Service
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol
IPS	Instandhaltungsplanungssystem
ISO	International Organization for Standardization
IT	Informationstechnik
IuK	Information und Kommunikation
JADE	Java Agent DEvelopment Framework
JOGL	Java Bindings for OpenGL
JSP	Java Server Pages
KPI	Key Performance Indicator
MAS	Multiagentensystem
MbKO	Management by Knowledge-Objectives
MES	Manufacturing Execution System
MP	Megapixel
MTBF	Mean Time Between Failure
MTTR	Mean Time To Repair
OBJ	Wavefront 3D Object
OEE	Overall Equipment Effectiveness
OPC UA	Object Linking and Embedding for Process Control Unified Architecture
OpenGL	Open Graphics Library
OPL	One-Point-Lesson
OWL	Web Ontology Language
OWL DL	Web Ontology Language Description Logic
PaaS	Platform as a Service
PDA	Personal Digital Assistant
PLM	Product-Lifecycle-Management
PPR	Produkt Prozess Ressource
RDF	Resource Description Framework

RTE	Runtime Environment
SaaS	Software as a Service
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SEKI	Sozialisation, Externalisierung, Kombination, Internalisierung
semDiki	semantisches Diki
SMT	Surface Mounted Technology
SMW	Semantic MediaWiki
SOA	Serviceorientierte Architektur
SOAP	Simple Object Access Protocol
SPADE	Smart Python multi-Agent Development Environment
SQL	Structured Query Language
SVG	Scalable Vector Graphics
SWF	Shockwave Flash
TBF	Time Between Failure
TCP	Transmission Control Protocol
TPM	Total Productive Maintenance
TTR	Time To Repair
UDDI	Universal Description, Discovery and Integration
UDP	User Datagram Protocol
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VRML	Virtual Reality Modeling Language
XML	Extensible Markup Language
W3C	World Wide Web Consortium
WebGL	Web Graphics Library
webMon	Webbasiertes Monitoringsystem
WRL	World
WSDL	Web Service Description Language
X3D	Extensible 3D
XAML	Extensible Application Markup Language

10 Literatur

- [1] Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion - Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. Carl Hanser Verlag, München, 2011
- [2] Abst, D.; Mülder, W.: Grundkurs Wirtschaftsinformatik - Eine kompakte und praxisorientierte Einführung. Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009
- [3] Adler, F.; Frost, I.; Gross, D.: Die Qual der Wiki-Wahl - Wikis für Wissensmanagement in Organisationen. Pumacy Technologies (Hrsg.): http://www.pumacy.de/fileadmin/content_files/publikationen/wissensmanagement/Wikis-Wissensmanagement.pdf, Zugriff am 05.07.2012
- [4] Albers, A.; Gausemeier, J.: Von der fachdisziplinentorientierten zur vorausschauenden und systemorientierten Produktentstehung. In: 10. Karlsruher Arbeitsgespräche Produktionsforschung. Karlsruhe, 2010
- [5] Albert, M.; Längle, T.; Wörn, H.: Development Tool for Distributed Monitoring and Diagnosis Systems. In: Proceedings of the 13th International Workshop on Principles of Diagnosis. Semmering, Österreich, 2002, S. 158-164
- [6] Anders, C.: Adaptierbares Diagnosesystem bei Transferstraßen. Dissertation, Universität Stuttgart. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998
- [7] Angele, J. et al.: Anwendungen und Good Practices Semantischer Technologien. In: Pellegrini, T.; Blumauer, A. (Hrsg.): Semantic Web - Wege zur vernetzten Wissensgesellschaft. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006
- [8] Arnaud, R.; Parisi, T.: Developing Web Applications with COLLADA and X3D. Khronos Group (Hrsg.): http://www.khronos.org/collada/presentations/Developing_Web_Applications_with_COLLADA_and_X3D.pdf, Zugriff am 15.05.2012
- [9] Back, A.; Gronau, N.: Grundlagen, Fallstudien und Trends zum Einsatz von Social Software. In: Tochtermann, K. (Hrsg.): Web 2.0 in der Unternehmenspraxis. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, 2008
- [10] Baumeister, J.; Puppe, F.: Web-based Knowledge Engineering using Knowledge Wikis. In: Proceedings of the AAAI 2008 Spring Symposium on Symbiotic Relationships between Semantic Web and Knowledge Engineering. Stanford, USA, 2008, S. 1-13
- [11] Bea, F. X.: Einleitung: Führung. In: Bea, F. X.; Friedl, B.; Schweitzer, M. (Hrsg.): Allgemeine Betriebswirtschaftslehre - Band 2: Führung. Lucius & Lucius Verlagsgesellschaft mbH, Stuttgart, 2005
- [12] Bea, F. X.; Göbel, E.: Organisation. Lucius & Lucius Verlagsgesellschaft mbH, Stuttgart, 2010
- [13] Behr, J.; Eschler, P.; Jung, Y.; Zöllner, M.: X3DOM - a DOM-based HTML5 / X3D integration model. In: International Conference on 3D Web Technology. Darmstadt, 2009, S. 127-135
- [14] Behr, J. et al.: A scalable architecture for the HTML/X3D integration model X3DOM. In: Proceedings of the 15th International Conference on Web 3D Technology. Los Angeles, USA, 2010, S. 185-194

- [15] Beierle, C.; Kern-Isberner, G.: Methoden wissensbasierter Systeme. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2008
- [16] Bertsche, B.; Lechner, G.: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2004
- [17] Betzold, M.: Entwicklung eines Diagnosewerkzeuges für Wissensmanagementansätze in KMU. Dissertation, RWTH Aachen. Shaker Verlag, 2006
- [18] Birkel, G.: Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in flexiblen Produktionszellen. Dissertation, TU München. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1995
- [19] Birkhofer, D. et al.: Einsatz von Web-Technologien in der Automation. Berthold Druck und Direktwerbung GmbH, Frankfurt, 2006
- [20] Braubach, L.: Architekturen und Methoden zur Entwicklung verteilter agentenorientierter Systeme. Dissertation, Universität Hamburg. Lulu, N. N., 2007
- [21] Braune, A.; Wollschlaeger, M.: XML - Hype oder Segen? In: Computer&Automation, Heft 8, 2007, S. 22-28
- [22] Broy, M.: Cyber-Physical Systems - Wissenschaftliche Herausforderungen bei der Entwicklung. In: Broy, M. (Hrsg.): Cyber-Physical Systems - Innovation durch softwareintensive eingebettete Systeme. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010
- [23] Brunner, F. J.; Wagner, K. W.: Qualitätsmanagement - Leitfaden für Studium und Praxis. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2011
- [24] Buchholz, A.: Zustandsorientierte Instandhaltung von Standardkomponenten mit Life Cycle Units. Dissertation, TU Berlin. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2005
- [25] Bullinger, H.-J.; Wörner, K.; Prieto, J.: Wissensmanagement heute - Daten, Fakten, Trends. Stuttgart, 1997
- [26] Bullinger, H.-J.; Wagner, K.; Ohlhausen, P.: Intellektuelles Kapital als wesentlicher Bestandteil des Wissensmanagements. In: Krallmann, H. (Hrsg.): Wettbewerbsvorteile durch Wissensmanagement - Methodik und Anwendungen des Knowledge Managements. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 2000
- [27] Chao, K.-M.; Griffiths, N.: Introduction. In: Griffiths, N.; Chao, K.-M. (Hrsg.): Agent-Based Service-Oriented Computing. Springer-Verlag, London, 2010
- [28] Daniel, C.; Graupner, T.-D.; Ritter, A.: Virtuelle Anlagenkonfiguration. In: wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 95, Heft 1/2, 2005, S. 44-48
- [29] De Hóra, B.: FIPA Abstract Architecture. Dehora (Hrsg.): http://www.dehora.net/journal/2007/01/fipa_abstract_architecture.html, Zugriff am 17.08.2012
- [30] Dillinger, J. et al: Fachkunde Metall. Verlag Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten, 2007
- [31] Dombrowski, U.; Wesemann, S.: OEE-Kennzahl im Anlagenhochlauf bei KMU. In: wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 98, Heft 7/8, 2008, S. 628-633
- [32] Ebersbach, A.; Glaser, M.; Heigl, R.: WikiTools. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005
- [33] Ehrenmann, F.; Hartkopf, M.; Walz, A.; Westkämper, E.: Web 2.0-Tools zur Unterstützung einer dynamischen Projektarbeit. In: wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 100, Heft 7/8, 2010, S. 646-651

-
- [34] Ehrmann, H.: Logistik. NWB Verlag GmbH & Co. KG, Herne, 1999
- [35] Fatum, M.: In die Produktion mit mobile Apps. In: Digital Manufacturing, Heft 2, 2011, S. 14-15
- [36] Faupel, B.: Ein modellbasiertes Akquisitionssystem für die technische Diagnose. Dissertation, RWTH Aachen. trans-aix-press, Aachen, 1992
- [37] Feldmann, K.; Brossog, M.; Merhof, J.; Michl, M.: Dreidimensionale Planung, Simulation und Überwachung von Produktionssystemen mit VRML. In: ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrgang 103, Heft 10, 2008, S. 676-681
- [38] Feldmann, K.; Göhringer, J.: Internet-Based Diagnosis of Assembly Systems. In: CIRP Annals 2001 - Manufacturing Technology, Jahrgang 50, Heft 1, 2001, S. 5-8
- [39] Ferber, J.: Multiagentensysteme. Addison-Wesley Verlag, München, 2001
- [40] Fischer, G.: Seeding, Evolutionary Growth and Reseeding: Constructing, Capturing and Evolving Knowledge in Domain-Oriented Design Environments. In: Automated Software Engineering, Jahrgang 5, Heft 4, 1998, S. 447-464
- [41] Fleischer, J.; Weismann, U.; Nigggeschmidt, S.: Verfügbarkeit- und Lebenszyklusprognose. In: wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 96, Heft 7/8, 2006, S. 483-488
- [42] Frank, U.; Papenfort, J.; Obermeier, M.; Vogel-Heuser, B.: Potentiale und Herausforderungen für die Steuerungsprogrammierung im Maschinen- und Anlagenbau von morgen. In: Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Erhöhte Verfügbarkeit und transparente Produktion. Kassel university press GmbH, Kassel, 2011
- [43] Franke, J.; Merhof, J.; Hopfensitz, S.: Einsatz von dezentralen Multiagentensystemen. In: ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrgang 105, Heft 12, 2010, S. 1075-1078
- [44] Franklin, S.; Graesser, A.: Is it an Agent, or just a Program?: A Taxonomy for Autonomous Agents. In: Proceedings of the 3rd International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages. Budapest, Ungarn, 1996, S. 21-35
- [45] Göhringer, J.: Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen. Dissertation, FAU Erlangen-Nürnberg. Meisenbach-Verlag, Bamberg, 2001
- [46] Greenwood, D.; Lyell, M.; Mallya, A.; Suguri, H.: The IEEE FIPA Approach to Integrating Software Agents and Web Services. In: Proceedings of the 6th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. Honolulu, USA, 2007
- [47] Haase, O.: Kommunikation in verteilten Anwendungen. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, 2008
- [48] Hall, G.: Cloud Computing Unleashes the Potential of Service Oriented Architecture. In: Cloud Storage Strategy (Hrsg.): <http://cloudstoragestrategy.com/2009/06/cloud-computing-unleashes-the-potential-of-service-oriented-architecture.html>, Zugriff am 16.10.2012
- [49] Hammer, N.; Bensmann, K.: Webdesign für Studium und Beruf. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011

- [50] Hansch, D.; Schnurr, H. P.; Pissierssens P.: Semantic MediaWiki+ als Wissensplattform für Unternehmen. In: 5. Konferenz Professionelles Wissensmanagement. Solothurn, Schweiz, 2009, S. 206-210
- [51] Härdtner, G. M.: Wissensstrukturierung in Diagnoseexpertensystemen für Fertigungseinrichtungen. Dissertation, Universität Stuttgart. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1992
- [52] Hartmann, E. H.: TPM - Effiziente Instandhaltung und Maschinenmanagement. Verlag Moderne Industrie, Landsberg am Lech, 2001
- [53] Herbst, D.: Erfolgsfaktor Wissensmanagement. Cornelsen Verlag, Berlin, 2000
- [54] Herzig, D. M.; Ell, B.: Semantic MediaWiki in Operation: Experiences with Building a Semantic Portal. In: Proceedings of the 9th International Semantic Web Conference. Shanghai, China, 2010, S. 114-128
- [55] Hoffmeister, M. et al.: Schlankes Wissensmanagement für agile Produktionssysteme. In: wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 101, Heft 9, 2011, S. 611-616
- [56] Hummels, M.: Rechnerunterstützung und benutzerorientierte Fehlerbehandlung bei automatisierten Fertigungsanlagen - Lösungswege und Realisierungsmöglichkeit zur Repräsentation von Fehlerwissen mit Hypertext. Dissertation, RWTH Aachen. Shaker Verlag, Aachen, 1998
- [57] Isermann, R.: Fault-Diagnosis Systems - An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006
- [58] Isermann, R.: Moderne Methoden und ihre Anwendungen bei technischen Systemen - Eine Übersicht. In: Isermann, R. (Hrsg.): Überwachung und Fehlerdiagnose - Moderne Methoden und ihre Anwendungen bei technischen Systemen. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1994
- [59] Jennings, N. R.; Sycara, K.; Wooldrige, M.: A Roadmap of Agent Research and Development. In: Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, Jahrgang 1, Heft 1, 1998, S. 7-38
- [60] Kaiser, B.; Liggesmeyer, P.; Mäckel, O.: A New Component Concept for Fault Trees. In: Proceedings of the 8th Australian Workshop on Safety Critical Systems and Software. Canberra, Australia, 2003, S. 37-46
- [61] Katenkamp, O. et al.: Einführung von Wissensmanagementsystemen in Wirtschaft und Wissenschaft - eine aktuelle Bestandsaufnahme. In: Katenkamp, O.; Peter, G. (Hrsg.): Die Praxis des Wissensmanagement. LIT Verlag, Münster, 2003
- [62] Kinkel, S.; Lay, G.: Der Leistungsstand der deutschen Investitionsgüterindustrie. In: Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (Hrsg.): Mitteilungen aus der Produktionsinnovationserhebung, Nummer 11, Karlsruhe, 1998
- [63] Kletti, J.: Konzeption und Einführung von MES-Systemen - Zielorientierte Einführungsstrategie mit Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, Fallbeispielen und Checklisten. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007
- [64] Kletti, J.: MES Manufacturing Execution System - Moderne Informationstechnologie zur Prozessfähigkeit der Wertschöpfung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006
- [65] Kloss, J. H.: X3D - Programmierung interaktiver 3D-Anwendungen für das Internet. Addison-Wesley Verlag, München, 2010

- [66] Klodt, H.; Maurer, R.; Schimmelpfennig, A.: Tertiärisierung in der deutschen Wirtschaft. In: Siebert, H. (Hrsg.): Kieler Studien. J. C. B. Mohr (Paul Siebeck), Tübingen, 1997
- [67] Köhrmann, C.: Modellbasierte Verfügbarkeitsanalyse automatischer Montagelinien. Dissertation, Universität Hannover. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000
- [68] Köstlbacher, A.: OWL Web Ontology Language Overview Deutsche Übersetzung. Semaweb (Hrsg.): <http://www.semaweb.org/dokumente/w3/TR/2004/REC-owl-features-20040210-DE.html#s3>, Zugriff am 17.07.2012
- [69] Krallmann, H.; Schönherr, M.; Trier, M.: Systemanalyse im Unternehmen - Prozessorientierte Methoden der Wirtschaftsinformatik. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, 2007
- [70] Kratzer, M.; Rauscher, M.; Binz, H.; Göhner, P.: Konzept eines Wissensintegrationssystems zur benutzerfreundlichen, benutzerspezifischen und selbstständigen Integration von Konstruktionswissen. In: Tagungsband Design for X - Beiträge zum 22. DfX-Symposium. Tutzing, 2011, S. 21-32
- [71] Krippner, P.: Prozessoptimierung mit 3D-SPI. EPP - Elektronik Produktion & Prüftechnik, Heft 11, 2011, S. 90-92
- [72] Krötzsch, M.; Vrandečić, D.; Völkel, M.: Semantic MediaWiki. In: Proceedings of the 5th International Semantic Web Conference. Athens, USA, 2006, S. 935-942
- [73] Kuhn, A.: Trends und Chancen für die Instandhaltung. In: Management Circle Jahrestagung - Summit Maintenance 2007. München, 2007
- [74] Kuhn, A.; Bandow, G.: Instandhaltungskosten im Brennpunkt. In: wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 92, Heft 9, 2002, S. 463-466
- [75] Kuhn, A.; Schuh, G.; Stahl, B.: Nachhaltige Instandhaltung - Trends, Potentiale und Handlungsfelder Nachhaltiger Instandhaltung. VDMA Verlag, Frankfurt, 2006
- [76] Kurbel, K.: Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management in der Industrie. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, 2011
- [77] Lämmel, U.; Cleve, J.: Künstliche Intelligenz. Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [78] Lantermann, T.: Die MES-Anbindung. In: Computer&Automation, Heft 7, 2010, S. 28-31
- [79] Lehner, F.: Wissensmanagement - Grundlagen, Methoden und technische Unterstützung. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2009
- [80] Leuf, B.; Cunningham, W.: The Wiki Way - Quick Collaboration on the Web. Addison-Wesley Longman, Amsterdam, 2001
- [81] Liebhart, D. et al.: Architecture Blueprints - Ein Leitfaden zur Konstruktion von Softwaresystemen mit Java Spring, .NET, ADF, Forms und SOA. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2007
- [82] Liebstückel, K.: Instandhaltung mit SAP. Galileo Press, Bonn, 2010
- [83] Luck, M. et al.: Agent Technology: Computing as Interaction - A Roadmap for Agent Based Computing. AgentLink (Hrsg.): <http://www.agentlink.org/roadmap/al3rm.pdf>, Zugriff am 26.08.2012
- [84] Maaß, F.: EDV-gestützte Methoden des Wissensmanagements in der Personalpolitik kleiner und mittlerer Unternehmen. In: Institut für Mittelstandsforschung Bonn (Hrsg.): Jahrbuch zur Mittelstandsforschung 1/2007. Deutscher Universitäts-Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2007

- [85] Martin, J.; Oxman, S.: Building Expert Systems - A Tutorial. Prentice Hall, New Jersey, 1988
- [86] Martin, P.; D'Acunto, A.: Design of a production system: an application of integration product-process. In: International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Jahrgang 16, Heft 7/8, 2003, S. 509-516
- [87] Mathas, C.: SOA intern - Praxiswissen zu Service-orientierten IT-Systemen. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2008
- [88] May, C.; Koch, A.: Overall Equipment Effectiveness (OEE) - Werkzeug zur Produktivitätssteigerung. In: ZUB Zeitschrift der Unternehmensberatung, Jahrgang 3, Heft 6, 2008, S. 245-250
- [89] McMahon, T.: Single Point Lessons: An Educational Tool. A LEAN JOURNEY - The Quest for True North (Hrsg.): <http://www.aleanjourney.com/2009/06/single-point-lessons-educational-tool.html>, Zugriff am 15.07.2012
- [90] Meir-Huber, M.: Cloud Computing - Praxisratgeber und Einstiegsstrategien. Software & Support Media GmbH, Frankfurt am Main, 2010
- [91] Mell, P.; Grance, T.: The NIST Definition of Cloud Computing. National Institute of Standards and Technology (Hrsg.): <http://www.nist.gov/itl/cloud/upload/cloud-def-v15.pdf>, Zugriff am 23.08.2012
- [92] Michl, M.: Softwareunterstützung der technischen Diagnose von Produktionsanlagen. In: Tagungsband Engineering wandlungsfähiger Produktionsanlagen. Nürnberg, 2011, S. 143-153
- [93] Michl, M.; Fischer, C.; Merhof, J.; Franke, J.: Comprehensive Support of Technical Diagnosis by Means of Web Technologies. In: Proceedings of the 7th International Conference on Digital Enterprise Technology. Athen, Griechenland, 2011, S. 73-82
- [94] Michl, M.; Rösch, M.; Franke, J.: Optimierung des Schablonendruckprozesses unter Verwendung innovativer Inspektionsverfahren und wissensbasierter Diagnosesysteme. In: Tagungsband Internationales Forum Mechatronik. Cham, 2011, S. 507-519
- [95] Miller, J.: One-point Lesson: One-point Lesson. gemba panta rei (Hrsg.): http://www.gembapantarei.com/2009/05/one-point_lesson_one-point_lesson.html, Zugriff am 15.07.2012
- [96] Miller, M.: Cloud Computing - Web-based Applications That Change the Way You Work and Collaborate Online. Que Publishing, Indianapolis, 2008
- [97] Minder, S.: Wissensmanagement in KMU - Beitrag zur Ideengenerierung im Innovationsprozess. Dissertation, Universität St. Gallen. KMU Verlag HSG, St. Gallen, 2001
- [98] Möller, H.; Flaig, H.; Soukchaleum, H.: CNC integrierte wissensbasierte Maschinendiagnose. In: wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 97, Heft 5, 2007, S. 336-341
- [99] Murch, R.; Johnson, T.: Agententechnologie: Die Einführung. Addison-Wesley Verlag, München, 2000
- [100] Nakajima, S.: Management der Produktionseinrichtungen (Total Productive Maintenance). Campus Verlag, Frankfurt am Main, New York, 1995

- [101] Nonaka, I.; Takeuchi, H.: The Knowledge-Creating Company - How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation. Oxford University Press, New York, Oxford, 1995
- [102] Neugebauer, R.; Langer, T.; Wenzel, K.: Konzepte zur flexiblen Datenerfassung und -verwaltung bei Maschinen und Anlagen - Teil 1: Entwicklung eines qualifizierenden Anlagenmodells. In: ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrgang 103, Heft 1/2, 2008, S. 41-47
- [103] Neugebauer, R.; Langer, T.; Wenzel, K.: Konzepte zur flexiblen Datenerfassung und -verwaltung bei Maschinen und Anlagen - Teil 2: Flexible Erfassung und Speicherung von Prozessdaten. In: ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrgang 103, Heft 3, 2008, S. 151-159
- [104] Neugebauer, R.; Langer, T.; Wenzel, K.: Konzepte zur flexiblen Datenerfassung und -verwaltung bei Maschinen und Anlagen - Teil 3: Komponentenbasierter Ansatz und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen. In: ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrgang 103, Heft 4, 2008, S. 229-234
- [105] Neumann, A.: GIS Technologie News. Fachgruppe GIS Technologie (Hrsg.): http://www.sogi.ch/fileadmin/redakteure/download/technologie-news/SOGI-News_SVG_Canvas.pdf, Zugriff am 18.04.2012
- [106] Ng, A. H. C.; Adolfsson, J.; Sundberg, M.; De Vin, L. J.: Virtual manufacturing for press line monitoring and diagnostics. In: International Journal of Machine Tools & Manufacture, Jahrgang 48, Heft 5, 2008, S. 565-575
- [107] North, K.: Wissensorientierte Unternehmensführung - Wertschöpfung durch Wissen. Gabler Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, 2011
- [108] N. N.: Adobe Flash Player Browser Support Matrix. Adobe (Hrsg.): <http://helpx.adobe.com/flash-player/kb/comprehensive-list-supported-flash-features.html>, Zugriff am 18.04.2012.
- [109] N. N.: Agents and Web Services Interoperability Working Group (AWSI WG). FIPA (Hrsg.): <http://www.fipa.org/subgroups/AWSI-WG.html>, Zugriff am 26.08.2012
- [110] N. N.: All SVG features. When can I use... (Hrsg.): <http://caniuse.com/#cats=SVG>, Zugriff am 18.04.2012
- [111] N. N.: Analysen - Probleme - Lösungen. In: Digital Manufacturing, Heft 2, 2011, S. 6-8
- [112] N. N.: Automation 2020 - Bedeutung und Entwicklung der Automation bis zum Jahr 2020. VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (Hrsg.): http://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/gma_dateien/AT_2020_INTERNET.pdf, Zugriff am 27.11.2011
- [113] N. N.: BDE-Systeme. KIENZLE Automotive (Hrsg.): http://www.kienzle.de/p_bde_zeitsysteme.html, Zugriff am 24.01.2013
- [114] N. N.: Bedeutung und Entwicklung des multimediebasierten Wissensmanagements in der mittelständischen Wirtschaft. KPMG (Hrsg.): http://cis.com/intranet/content/data/kontakt/downloads_1/studie_kpmg.pdf, Zugriff am 07.10.2012

- [115] N. N.: Bevölkerungsvorausberechnung. Statistisches Bundesamt (Hrsg.): <http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Statistiken/Bevoelkerung/VorausberechnungBevoelkerung/Tabellen/Content50/Bevoelkerungsvorausberechnung,templateId=renderPrint.psml>, Zugriff am 27.11.2011
- [116] N. N.: Browser support. X3dom (Hrsg.): http://www.x3dom.org/?page_id=9, Zugriff am 06.05.2012
- [117] N. N.: Canvas 3d JS Library. C3DL (Hrsg.): <http://www.c3dl.org/>, Zugriff am 29.09.2012
- [118] N. N.: Cloud Computing Grundlagen: Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (Hrsg.): https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/CloudComputing/Grundlagen/Grundlagen_node.html, Zugriff am 23.08.2012
- [119] N. N.: CopperLight. Ambiera (Hrsg.): <http://www.ambiera.com/copperlicht/index.html>, Zugriff am 16.05.2012
- [120] N. N.: Cross-browser installation with JavaScript. Bitmanagement (Hrsg.): <http://www.bitmanagement.com/en/press/cross-browser-installation>, Zugriff am 06.05.2012
- [121] N. N.: Deutsche Wirtschaft - 2. Quartal 2011. Statistisches Bundesamt (Hrsg.): <http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Publikationen/Fachveroeffentlichungen/VolkswirtschaftlicheGesamtrechnungen/DeutscheWirtschaftQuartal,property=file.pdf>, Zugriff am 27.11.2011
- [122] N. N.: DIN EN 13306: Instandhaltung - Begriffe der Instandhaltung. DIN - Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Dezember 2010
- [123] N. N.: DIN 31051: Grundlagen der Instandhaltung. DIN - Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Juni 2003
- [124] N. N.: DIN EN ISO 12100: Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsleitsätze - Risikobeurteilung und Risikominimierung. DIN - Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, März 2011
- [125] N. N.: Drools. JBoss (Hrsg.): <http://www.jboss.org/drools/>, Zugriff am 07.08.2012
- [126] N. N.: Erwerbstätige: Deutschland, Jahre, Wirtschaftszweige (WZ2008), Geschlecht. Statistisches Bundesamt (Hrsg.): <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/logon>, Zugriff am 27.11.2011
- [127] N. N.: N. N. Warnecke, H. J.; Bullinger, H.-J. (Hrsg.): Expertensysteme in Produktion und Engineering. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1991
- [128] N. N.: Extensible 3D (X3D) Part 1: Architecture and bases - Node index. Web3D (Hrsg.): <http://www.web3d.org/files/specifications/19775-1/V3.2/Part01/nodeIndex.html>, Zugriff am 20.05.2012
- [129] N. N.: FIPA Agent Management Specification. FIPA (Hrsg.): <http://www.fipa.org/specs/fipa00023/SC00023K.html>, Zugriff am 14.08.2012
- [130] N. N.: FIPA Agent Message Transport Service Specification. FIPA (Hrsg.): <http://www.fipa.org/specs/fipa00067/SC00067F.html>, Zugriff am 15.08.2012
- [131] N. N.: Flash to Focus on PC Browsing and Mobile Apps; Adobe to More. Adobe (Hrsg.): <http://blogs.adobe.com/conversations/2011/11/flash-focus.html>, Zugriff am 06.05.2012

- [132] N. N.: GLGE: WebGL for the lazy. GLGE (Hrsg.): <http://www.glge.org/>, Zugriff am 29.09.2012
- [133] N. N.: Handyvergleich. Inside-handy.de (Hrsg.): http://www.inside-handy.de/handy-vergleich/241_2235_komplett.html, Zugriff am 19.11.2011
- [134] N. N.: Help:Einführung in Semantic MediaWiki. Semantic MediaWiki (Hrsg.): http://semantic-mediawiki.org/wiki/Help:Einführung_in_Semantic_MediaWiki, Zugriff am 31.07.2012
- [135] N. N.: HTML Canvas 2D Context. W3C (Hrsg.): <http://www.w3.org/TR/2dcontext/>, Zugriff am 18.04.2012
- [136] N. N.: Java Agent DEvelopment Framework. Jade (Hrsg.): <http://jade.tilab.com/>, Zugriff am 17.08.2012
- [137] N. N.: KnowWE Ontology Engineering Demo. Universität Würzburg - Lehrstuhl für Informatik VI (Hrsg.): <http://www.is.informatik.uni-wuerzburg.de/forschung/anwendungen/knowwe/>, Zugriff am 07.08.2012
- [138] N. N.: MES- und Leitsysteme Legato. GEFASOFT (Hrsg.): http://www.gefasoft-muenchen.de/index.php?id=28&tx_gfprodukte_pi1%5Bcat%5D=11, Zugriff am 24.01.2013
- [139] N. N.: myCBR. DFKI GmbH (Hrsg.): <http://mycbr-project.net/>, Zugriff am 07.08.2012
- [140] N. N.: Overview. Jogamp (Hrsg.): <http://jogamp.org/jogl/www/>, Zugriff am 06.05.2012
- [141] N. N.: OPC Unified Architecture. OPC Foundation (Hrsg.): http://www.opcfoundation.org/Default.aspx/01_about/UA.asp?MID>AboutOPC, Zugriff am 08.04.2012
- [142] N. N.: Oracle shows JavaFX on iOS and Android. InfoWorld (Hrsg.): <http://www.infoworld.com/d/application-development/oracle-shows-javafx-ios-and-android-174996?page=0,0>, Zugriff am 18.04.2012
- [143] N. N.: Parametrieren statt Programmieren. In: VDI Nachrichten, Heft 6, 2012, S. 12
- [144] N. N.: Protégé. Stanford Center for Biomedical Informatics Research (Hrsg.): <http://protege.stanford.edu/>, Zugriff am 07.08.2012
- [145] N. N.: Python. Python Software Foundation (Hrsg.): <http://www.python.org/>, Zugriff am 30.08.2012
- [146] N. N.: Reference Model for Service Oriented Architecture 1.0. OASIS (Hrsg.): <http://docs.oasis-open.org/soa-rm/v1.0/soa-rm.pdf>, Zugriff am 21.08.2012
- [147] N. N.: Samsung Galaxy S II. Samsung (Hrsg.): <http://samsung.de/de/Privatkunden/Mobil/Mobiltelefone/MultimediaInfotainment/samsunggalaxysii/GT-I9100LKADBT/detail.aspx?atab=specifications>, Zugriff am 19.11.2011
- [148] N. N.: SemanticGuide Nutzerhilfe. Ontoprise GmbH (Hrsg.). Karlsruhe, 2010
- [149] N. N.: Siemens SX45. GSMarena (Hrsg.): http://www.gsmarena.com/siemens_sx45-300.php, Zugriff am 19.11.2011
- [150] N. N.: Silverlight 4 System Requirements. Microsoft (Hrsg.): <http://www.microsoft.com/getsilverlight/locale/en-us/html/installation-win-SL4.html>, Zugriff am 18.04.2012

- [151] N. N.: Silverlight Installation. Microsoft (Hrsg.): <http://www.microsoft.com/getsilverlight/Get-Started/Install/Default.aspx>, Zugriff am 06.05.2012
- [152] N. N.: Simulation. In: Feldmann, K. (Hrsg.): Montageplanung in CIM. Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, 1992
- [153] N. N.: SPADE. Spade2 (Hrsg.): <http://code.google.com/p/spade2/>, Zugriff am 17.08.2012
- [154] N. N.: SpiderGL - 3D Graphics for the Next-Generation WWW. SpiderGL (Hrsg.): <http://spidergl.org/>, Zugriff am 29.09.2012
- [155] N. N.: Stage 3D. Adobe (Hrsg.): <http://www.adobe.com/de/devnet/flashplayer/stage3d.html>, Zugriff am 06.05.2012
- [156] N. N.: The Foundation for Intelligent Physical Agents. FIPA (Hrsg.): <http://www.fipa.org/index.html>, Zugriff am 17.08.2012
- [157] N. N.: Top Silverlight Features. Microsoft (Hrsg.): <http://www.microsoft.com/silverlight/features/>, Zugriff am 06.05.2012
- [158] N. N.: Über das Lebensgefühl „Always-on“. Netzwertig.com (Hrsg.): <http://netzwertig.com/2009/10/02/gesellschaft-ueber-das-lebensgefuehl-always-on/>, Zugriff am 20.11.2011
- [159] N. N.: VDI Richtlinie 2889: Einsatz wissensbasierter Diagnosemethoden und -systeme in der Instandhaltung. VDI - Verein deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1998
- [160] N. N.: VDI Richtlinie 3423: Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen. VDI - Verein deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2011
- [161] N. N.: VDI Richtlinie 4004 - Blatt 1: Zuverlässigkeitskenngrößen - Übersicht. VDI - Verein deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1986
- [162] N. N.: VDI Richtlinie 4008 - Blatt 2: Boolesches Modell. VDI - Verein deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1998
- [163] N. N.: VDI/VDE Richtlinie 2653 - Blatt 1: Agentensysteme in der Automatisierungstechnik - Grundlagen. VDI - Verein deutscher Ingenieure; VDE - Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik, Düsseldorf, 2010
- [164] N. N.: VDI/VDE Richtlinie 2653 - Blatt 3: Agentensysteme in der Automatisierungstechnik - Anwendung. VDI - Verein deutscher Ingenieure; VDE - Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik, Düsseldorf, 2012
- [165] N. N.: VDI/VDE Richtlinie 3542 - Blatt 1: Sicherheitstechnische Begriffe für Automatisierungssysteme - Qualitative Begriffe. VDI - Verein deutscher Ingenieure; VDE - Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik, Düsseldorf, 2000
- [166] N. N.: VDMA-Einheitsblatt 66412-1 - Manufacturing Execution Systems (MES) Kennzahlen. Verein Deutscher Maschinen- und Anlagenbau, Frankfurt/Main, 2009
- [167] N. N.: VGR des Bundes - Bruttowertschöpfung, Bruttoinlandsprodukt (nominal/preisbereinigt): Deutschland, Jahre. Statistisches Bundesamt (Hrsg.): <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/logon>, Zugriff am 27.11.2011
- [168] N. N.: VRML Archives. Web3D Consortium (Hrsg.): <http://www.web3d.org/x3d/vrml/>, Zugriff am 06.05.2012

- [169] N. N.: VRML Plugin and Browser Detector. National Institute of Standards and Technology (Hrsg.): <http://cic.nist.gov/vrml/vbdetect.html>, Zugriff am 06.05.2012
- [170] N. N.: WebGL Specification. Khronos Group (Hrsg.): <https://www.khronos.org/registry/webgl/specs/1.0/>, Zugriff am 06.05.2012
- [171] N. N.: What is X3D? Web3D Consortium (Hrsg.): <http://www.web3d.org/realtime-3d/x3d/what-x3d>, Zugriff am 06.05.2012
- [172] N. N.: WS XML-Schnittstellendokumentation. TU München, Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik (Hrsg.): http://weihenstephaner-standards.de/content/WSDefinitionen_XMLSchnittstellendokumentation, Zugriff am 08.04.2012
- [173] N. N.: X3D Resources. Web3D Consortium (Hrsg.): <http://www.web3d.org/x3d/content/examples/X3dResources.html>, Zugriff am 30.09.2012
- [174] N. N.: XMLHttpRequest Level 2. W3C (Hrsg.): <http://www.w3.org/TR/XMLHttpRequest/>, Zugriff am 24.04.2012
- [175] Oglodin, V.: Maschinenübergreifender agentenbasierter Informationsaustausch für die Störungsbeseitigung. Dissertation, Universität Stuttgart. Jost Jetter Verlag, Heimsheim, 2010
- [176] Ouelhadj, D.; Hanachi, C.; Bouzouia B.: Multi-agent Architecture for Distributed Monitoring in Flexible Manufacturing Systems (FMS). In: Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation. San Francisco, USA, 2000, S. 2416-2421
- [177] Oresjo, S.: Results from 2007 Industry Defect Level and test Effectiveness Studies. In: Proceedings of the IPC Printed Circuit Expo, APEX and Designers Summit. Las Vegas, USA, 2008, S. 194-228
- [178] Pachow-Frauenhofer, J.; Heins, M.; Nyhuis, P.: Zustandsbeschreibung von Produktionsanlagen. In: wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 98, Heft 7/8, 2008, S. 622-627
- [179] Pellegrini, T.; Blumauer, A.: Semantic Web und semantische Technologien: Zentrale Begriffe und Unterscheidung. In: Pellegrini, T.; Blumauer, A. (Hrsg.): Semantic Web - Wege zur vernetzten Wissensgesellschaft. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006
- [180] Pham-Van-Diep, G.; Belmonte, J.; Aravamudhan, S. R.; Harrel, J.: Closed-Loop Process Control in the Solder Paste Printing Process. In: Assembly, 2006, S. 1-7
- [181] Piller, F. T.: Mass Customization - Ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter. Deutscher Universitäts-Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2006
- [182] Probst, G.; Raub, S.; Romhardt, K.: Wissen managen - Wie Unternehmen ihrer wertvollste Ressource optimal nutzen. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler, Wiesbaden, 2006
- [183] Productivity Press Development Team: One-Point Lessons - Rapid Transfer of Best Practices for the Shop Floor. Productivity Press, New York, 1996
- [184] Puppe, F.; Gappa, U.; Poeck, K.; Bamberger, S.: Wissensbasierte Diagnose- und Informationssysteme. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1996
- [185] Rascher, I.; Wilkesmann, U.: Change Management in der Wissensökonomie: Das Bochumer Modell. In: Katenkamp, O.; Peter, G. (Hrsg.): Die Praxis des Wissensmanagement. LIT Verlag, Münster, 2003

- [186] Rashidy, H.: Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry. Dissertation, TU München. Herbert Utz Verlag, München, 2009
- [187] Rehäuser, J.; Krcmar, H.: Wissensmanagement in Unternehmen. In: Schreyögg, G.; Conrad, P. (Hrsg.): Managementforschung 6 - Wissensmanagement. De Gruyter, Berlin, New York, 1996
- [188] Reichenberger, K.: Kompendium semantische Netze. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010
- [189] Reinhart, G.: Zukunftsprojekt Industrie 4.0 - Cyber-Physische Systeme in der Produktion. In: Perspektiven und Zukunftsszenarien für die Produktionsautomatisierung. Nürnberg, 2012
- [190] Reinhart, G.; Stich, P.: Automation 2015 - Anforderungen und Entwicklungstendenzen. In: 19. Automation Day. Nürnberg, 2010
- [191] Reiß, M.; Vlachou, H.; Spejic, G.; Steffens, D.: Neue Medien im Change Management - Auswertung einer Online-Befragung im Überblick. Reiß, M. (Hrsg.): <http://www.change-zweinull.de/wp-content/uploads/2008/02/feedback.pdf>, Zugriff am 02.07.2012
- [192] Richardson, M.; Domingos, P.: Building Large Knowledge Bases by Mass Collaboration. In: Proceeding of the 2nd International Conference on Knowledge Capture. Sanibel Island, USA, 2003, S. 129-137
- [193] Richter, M.: Gestaltung der Montageorganisation. In: Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion - Ein Handbuch für die Praxis, Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, 2006
- [194] Rohrmeier, M.: Web based robot simulation using VRML. In: Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference. Orlando, USA; 2000, S. 1525-1528
- [195] Romhardt, K.: Das Lernarenakzept - Ein Ansatz zum Management organisatorischer Lernprozesse in der Unternehmenspraxis. Enbiz (Hrsg.): <http://www.enbiz.de/wmk/papers/public/Lernarenakzept/>, Zugriff am 06.11.2012
- [196] Rooks, T.: Rechnergestützte Simulationsmodellgenerierung zur dynamischen Absicherung der Montagelogistikplanung bei der Fahrzeugneutypplanung im Rahmen der Digitalen Fabrik. Dissertation, TU Clausthal. Shaker Verlag, Aachen 2009
- [197] Ropohl, G.: Allgemeine Systemtheorie - Eine Systemtheorie der Technik. Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe, 2009
- [198] Roschmann, K.: Betriebsdatenerfassung 1996 - Ident-, BDE- und mDE-Techniken und ihr Einsatz. In: FB/IE - Fortschrittliche Betriebsführung und Industrial Engineering, Jahrgang 5, Heft 5, 1996, S. 204-247
- [199] Rösch, M.: Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion. Dissertation, FAU Erlangen-Nürnberg. Meisenbach-Verlag. Bamberg, 2011
- [200] Rösch, M.; Nolting, F. W.; Franke, J.: Web-basierte Diagnosesoftware. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrgang 106, Heft 4, 2011, S. 241-244
- [201] Ryzko, D.; Radziszewska, W.: Integration between Web Services and Multi-Agent Systems with Application for Multi-commodity Markets. In: Kaleta, M.;

- Traczyk, T. (Hrsg.): Modeling Multi-commodity Trade: Information Exchange Methods. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2012
- [202] Schaffert, S.; Bry, F.; Baumeister, J.; Kiesel, M.: Semantic Wiki. Gesellschaft für Informatik (Hrsg.): <http://www.gi.de/service/informatiklexikon/detailansicht/article/semantic-wiki.html>, Zugriff am 17.07.2012
- [203] Schein, E.: Organizational Culture. In: American Psychologist, Jahrgang 45, Heft 2, 1990, S. 109-119
- [204] Schindler, M.: Wissensmanagement in der Projektabwicklung. Dissertation, Universität St. Gallen. JOSEF EUL Verlag GmbH, Lohmar, Köln, 2002
- [205] Schley, N.; Nakhosteen, C. B.; Ott, B.: Betriebliches Erfahrungswissen - die verborgene Ressource. In: ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrgang 103, Heft 4, 2008, S. 215-222
- [206] Schmitz, C.; Hotho, A.; Jäschke, R.; Stumme, G.: Kollaboratives Wissensmanagement. In: Pellegrini, T.; Blumauer, A. (Hrsg.): Semantic Web - Wege zur vernetzten Wissensgesellschaft. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006
- [207] Schuh, G. et al.: Intelligent Maintenance - Potentiale zustandsorientierter Instandhaltung. Aachen, 2005
- [208] Schuh, G.; Grawatsch, M.: Trends im Instandhaltungsmanagement. In: wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 95, Heft 7/8, 2005, S. 590-591
- [209] Schulz, A.: Gedanken zu einer Informationsbetriebslehre. In: ZfB - Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Jahrgang 40, Heft 2, 1970, S. 91-104
- [210] Slaby, D.; Krasselt, R.: Industriebetriebslehre: Anlagenwirtschaft. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, 1998
- [211] Smith, R. G.; Baker, J. T.: The DIPMETER ADVISOR SYSTEM: A Case Study In Commercial Expert System Development. In: Proceedings of the 8th International Joint Conference on Artificial Intelligence - Volume 1. San Francisco, USA, 1983, S. 122-129
- [212] Sosinsky, B.: Cloud Computing Bible. Wiley Publishing Inc., Indianapolis, 2011
- [213] Staiger, M.: Wissensmanagement in kleinen und mittelständischen Unternehmen - Systematische Gestaltung einer wissensorientierten Organisationsstruktur und -kultur. Rainer Hampp Verlag, München, Mering, 2008
- [214] Sucas, M. SVG or Canvas? Choosing between the two. DEV.OPERA (Hrsg.): <http://dev.opera.com/articles/view/svg-or-canvas-choosing-between-the-two/>, Zugriff am 18.04.2012
- [215] Sure, Y.; Tempich, C.: Wissensvernetzung in Organisationen. In: Pellegrini, T.; Blumauer, A. (Hrsg.): Semantic Web - Wege zur vernetzten Wissensgesellschaft. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006
- [216] Szyperski, C.; Gruntz, D.; Murer, S.: Component Software - Beyond Object-Oriented Programming. Pearson Education Limited, Edinburgh, 2002
- [217] Tapscott, D.; Williams, A. D.: WIKINOMICS - How Mass Collaboration Changes Everything. Portfolio, New York, 2006
- [218] Tidwell, D.: Web Services: The Web's next Revolution. IBM (Hrsg.): <http://www.cn-java.com/download/book/wsbasics-a4.pdf>, Zugriff am 21.08.2012
- [219] Tiemeyer, E. (Hrsg.): Handbuch IT-Projektmanagement. Carl Hanser Verlag, München, 2010

- [220] Tochtermann, K.; Maurer, H.: Semantic Web - Geschichte und Ausblick einer Vision. In: Pellegrini, T.; Blumauer, A. (Hrsg.): Semantic Web - Wege zur vernetzten Wissensgesellschaft. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006
- [221] Trevett, N.: WebGL and WebCL. Khronos Group (Hrsg.): <http://www.khronos.org/assets/uploads/developers/library/2012-pan-pacific-roadshow-March/WebGL-WebCL-China-Mar12.pdf>, Zugriff am 29.09.2012
- [222] Ulrich, P.: Unternehmenskultur. In: Wittmann, W. et al. (Hrsg.): Handwörterbuch der Betriebswirtschaft. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 1993
- [223] Wang, L.; Orban, P.; Cunningham, A.; Lang, S.: Remote real-time CNC machining for web-based manufacturing. In: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Jahrgang 20, Heft 6, 2004, S. 563-571
- [224] Weber, H.: Wissensbasierte Diagnose technischer Systeme mit konnektionistischen Modellen. Dissertation, TU Berlin. UNZE Verlagsgesellschaft mbH, Potsdam, 1996
- [225] Weber, M.; Tegtmeyer, J.: Maschinennahes Produktivitätsmonitoring. In: ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrgang 104, Heft 10, 2009, S. 896-900
- [226] Wenger, E. C.; Snyder, W. M.: Communities of Practice: The Organizational Frontier. In: Harvard Business Review, Heft 1, 2000, S. 139-145
- [227] Werdich, M.: FMEA - Einführung und Moderation. Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011
- [228] Wesch, C.: Verstand - Verfügbarkeitsorientierte Instandhaltung - Trends, Potentiale, Handlungsfelder. In: 2. Real-Time-Maintenance-Forum, Donaueschingen, 2007
- [229] Westerbusch, R.: Entwicklung eines lernfähigen transputergestützten Werkzeugmaschinenendiagnosesystems. Dissertation, TU Braunschweig. Vulkan-Verlag, Essen, 1994
- [230] Westkämper, E.; Stolz, M.: Sprachportale als Baustein des Teleservice. In: wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 94, Heft 7/8, 2004, S. 322-325
- [231] Wiendahl, H. P.: Wandlungsfähigkeit. In: wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 92, Heft 4, 2002, S.122-127
- [232] Wiendahl, H.-P.; Hegenscheidt, M.: Verfügbarkeit von Montagesystemen. In: Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion - Ein Handbuch für die Praxis. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006
- [233] Wolf, W.: Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld. Dissertation, FAU Erlangen-Nürnberg. Meisenbach Verlag, Bamberg, 2009
- [234] Wooldridge, M.: An Introduction to MultiAgent Systems. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2009
- [235] Zäh, M.; Reinhart, G.: Auftragsabwicklung im Maschinenbau. Vorlesungsskriptum, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, München, 2005
- [236] Zöllner, B.: Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion. Dissertation, FAU Erlangen-Nürnberg. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1995