Einheitliches Konzept einer Kommunikationsschnittstelle zur systematischen Integration von Maschinendaten in den Prozessbereich von Product Lifecycle Management

Von der Fakultät Maschinenwesen

der

Technischen Universität Dresden

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte DISSERTATION

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Dipl.-Kfm.(FH) Stephan Günter Arndt, MBA

geboren am 12.06.1984 in Lauchhammer

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph H. Stelzer (Technische Universität Dresden)

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Gerhard (Ruhr-Universität Bochum)

Tag der Einreichung: 15. April 2021

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD am Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion der Technischen Universität Dresden. Meine Arbeit hat mich mit vielen Menschen zusammengeführt, denen auf unterschiedliche Weise mein Dank gebührt.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph Stelzer für seine wertvollen Anregungen und Hinweise sowie für sein stets förderliches Engagement als Mentor und Erstgutachter. Mein besonderer Dank gilt ebenso Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Gerhard für die freiwillige Übernahme der Zweitgutachterrolle.

Bedanken möchte ich mich ebenso bei meinen Kollegen an Professor. Hier gilt mein spezieller Dank Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Steger, Herrn Dr.-Ing. Bernhard Saske und Herrn Dipl.-Ing. Sebastian Klement für ihre tatkräftige Hilfsbereitschaft, motivierenden Worte ihre Zeit für fachliche Diskussionen. Den genannten und allen anderen Kollegen und namentlich Frau Annett Kupka und Frau Dipl.-Ing. Heike Wieghardt danke ich für viele ermunternde Gespräche und ein besonders gutes Arbeitsklima.

Meiner Partnerin Cindy und unserer Tochter Viviane danke ich für ihre motivierende Unterstützung und vor allem für ihr außerordentlich anhaltendes Verständnis für spätabendliche Arbeits- und Schreibphasen. Darüber hinaus danke ich meinen Eltern, die mich stets gefördert und unermüdlich unterstützt haben.

Ein letzter Dank geht an die Firmen *LanguageTooler* und *Greting Pine*, deren Internetanwendung *OpenThesaurus* bzw. deren Teeprodukte mich zuverlässig im Schreibprozess unterstützt haben.

Dresden, im April 2021

»Die Erfindung des Problems ist wichtiger als die Erfindung der Lösung;
in der Frage liegt mehr als in der Antwort.«

Walther Rathenau (1867-1922)
dt. Industrieller und Politiker

Kurzzusammenfassung

Die Prozesse aus der Betriebsphase von Maschinen beruhen vermehrt auf Daten, die durch fortschrittliche Technologien zur Datenerfassung, -verarbeitung und -kommunikation bereitgestellt werden. Die damit einhergehende, stetig anwachsende Menge maschinenrelevanter Daten bietet aus Sicht von Maschinenherstellern ein großes Optimierungspotenzial für sowohl aktuelle als auch zukünftige Maschinengenerationen und deren betriebsbegleitende Services. Vor diesem Hintergrund und entgegen vorrangig organisatorischer Informationsbarrieren auf Maschinenhersteller- und -betreiberseite ist es notwendig, die speziell für die Produktentstehung und bspw. die Instandhaltung relevanten Maschinendaten in den Prozessbereich von PLM systematisch zu integrieren. Zu diesem Zweck wird in dieser Dissertation das FELDKONZEPT als grundlegende Beschreibung einer Kommunikationsschnittstelle zur einheitlichen Integration von Maschinendaten vorgestellt. Die Datenintegration erfolgt virtuell und prozessunterstützt-reproduzierbar auf der Applikationsebene einer FELDMANAGEMENTPLATTFORM als Middleware sowie anhand einer FELDSTRUKTUR als Mapping-Grundlage. Die FELDSTRUKTUR ist eine produktartneutrale, produkt- und organisationsübergreifende Strukturbeschreibung aus der konsistenten Verknüpfung ausgewählter Produktstrukturinformationen mit Strukturinformationen von Maschinen aus deren Betriebsphase. Das als FELDMODELL bezeichnete Integrationsergebnis dient als Vehikel zum Austausch ausgewählter und logisch in einem Datensatz gemeinsam strukturierter Produkt- und/oder Maschinendaten zu bspw. Analysezwecken. Mithilfe des FELDMODELLS lassen sich Maschinendaten dokumentbasiert im Produktdatenmanagement zu speichern.

Abstract

Machine operating processes are increasingly relying on data provided by advanced technologies for data acquisition, processing and communication. From the perspective of machine manufacturers, the steadily growing volume of machine-relevant data offers a great potential for optimizing both current and future machine generations and their operational services. Due to this and facing primarily organizational information barriers on the side of machine manufacturers and operators, it is necessary to systematically integrate machine data that is specifically relevant for product development and e.g. maintenance into the PLM processes. For this purpose, the FELDKONZEPT (Field Concept) is introduced in this doctoral thesis as a basic description of a communication interface for the uniform machine data integration. The data integration occurs virtually and by process-supported reproducible on the application level of a FELDMANAGEMENTPLATTFORM (Field Management Platform) as middleware and by using a FELDSTRUKTUR (Field Structure) as mapping basis. The FELDSTRUKTUR is a product-type-neutral, cross-product and cross-organization structural description from the consistent linking of selected product structure information and structure information of machines from their operating phase. The integration result, called FELDMODELL (Field Model), serves as a vehicle for exchanging selected and logically structured product and/or machine data in a common data set for analysis purposes, for example. With the help of the FELDMODELL, machine data can be stored document-based in product data management.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis ..... **III**

1 Einleitung **1**

1.1 Motivation 1

1.2 Untersuchungsgegenstand 4

1.3 Methodik 6

1.4 Gliederung der Arbeit 8

2 Grundlagen **10**

2.1 Abgrenzung des Informationsraums 10

2.2 Product Lifecycle Management 13

2.3 Maschinendaten 17

2.4 Integrationsansätze für Maschinendaten 21

2.5 Zwischenfazit 31

3 Arbeitsbereich **33**

4 Das Feldkonzept **36**

4.1 Konzeptübersicht 36

4.2 Datenmodell 45

4.3 Prozessmodell 60

4.3.1 Gesamtmodell 60

4.3.2 Teilprozess I: Aufbau der FELDSTRUKTUR 62

4.3.3 Teilprozess II: Aktualisierung der FELDSTRUKTUR 78

4.3.4 Teilprozess III: Erzeugen eines FELDMODELLS 83

5 Grundprinzipien des Feldmanagementsystems **89**

6 Validierung des Feldkonzepts **93**

6.1 Anwendungsszenario 93

6.2 Prototyp eines FELDMANAGEMENTSYSTEMS 97

6.3 Validierungsdurchführung 107

7 Zusammenfassung und Ausblick **115**

7.1 Fazit 115

7.2 Kritik und weiterführende Arbeiten 116

Quellenverzeichnis ..... **IV**

Tabellenverzeichnis ..... **XV**

Abbildungsverzeichnis ..... **XVI**

Anhang ..... **XIX**

A 1 Übersicht der verwendeten Modellierungselemente I XX

A 2 Übersicht der verwendeten Modellierungselemente II XXI

A 3 Seriennummernschema nach IRDI XXIV

A 4 Verzeichnis betreuter Projekt- und Abschlussarbeiten XXV

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AR	Artikel
CMMS	Computerized Maintenance Management System
CSV	Comma-separated values
DA	Datei
DO	Dokument
BPMN	Business Process Model and Notation
ERM	Entity-Relationship-Modell
FO	FELDOBJEKT-Entitätstyp
IR	INFORMATIONSRESSOURCE-Entitätstyp
OPC UA	OPC Unified Architecture
PDM	Produktdatenmanagement
PLM	Product Lifecycle Management
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
TFO	Template-FELDOBJEKT-Entitätstyp
XML	Extensible Markup Language

1 Einleitung

1.1 Motivation

Ausgangspunkt

Maschinenbauunternehmen sind bestrebt, ihren Markterfolg kontinuierlich zu verbessern. Ermöglicht wird dies insbesondere durch die Herstellung von Produkten mit den höchsten Qualitätsanforderungen, wozu die Optimierung der Produktentstehungs- und Produktionsprozesse notwendig und daher immer wieder Gegenstand der Forschung ist.

Wesentliche Optimierungspotenziale bietet vor allem die Integration von Daten aus dem gesamten Produktlebenszyklus in zunehmend digitalisierte und vernetzte Unternehmensprozesse, um insbesondere Services, Produkte und Geschäftsmodelle zu verbessern (vgl. Müller et. al, 2019, S. 111; Dispan & Schwarz-Kocher, 2018). Das *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie* bezeichnet ‚Daten' treffend „als den Rohstoff für wirtschaftliche Wertschöpfung im digitalen Zeitalter – ihre intelligente Nutzung ist die Quelle von Innovation und Wachstum" (BMWi, 2016). Dabei bietet insbesondere die Betriebsphase von Maschinen das größte Potenzial als Datenquelle. Schließlich verfügen Maschinen zunehmend über integrierte, immer kompaktere und leistungsstärkere, aber auch immer preiswertere und teilweise mit Information- und Kommunikationstechnologien ausgestatte Sensoren. Deren Anzahl entwickelt sich nach Schätzungen führender Unternehmen der Halbleiterindustrie in den nächsten Jahren explosionsartig auf nahezu eine Billion im Jahr 2022, mit weiter steigender Anzahl in den Folgejahren (vgl. Abbildung 1). ‚Intelligente' Sensoren gelten lt. dem BMWi (2015, S. 23) als wesentliche Voraussetzung zur Umsetzung von *Industrie 4.0*.

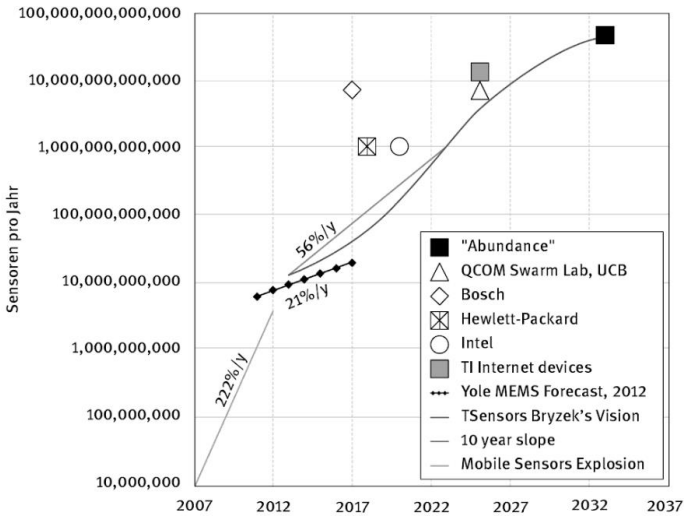


Abbildung 1: Wachstumsprognosen der weltweiten Sensoranzahl (Quelle: Bryzek, 2013)

Mit ansteigender Sensoranzahl und dem verstärkten Einsatz maschinenintegrierter Geräte zur Datenverarbeitung, Kommunikation und Vernetzung wachsen in der Betriebsphase von Maschinen in hohem Maß auch die Datenheterogenität und das Datenvolumen (vgl. Dispan & Schwarz-Kocher, 2018, S. 5). Letztere ist weltweit, allein zwischen den Jahren 2010 bis 2015 um den Faktor 10.000, auf geschätzt 10 Zettabyte ($10x10^{21}$ Byte) außerordentlich stark angestiegen (Mathes, 2016, S. 15). Bis 2020 und darüber hinaus wird ein weiter fortschreitendes, exponentielles Wachstum des Datenvolumens prognostiziert. Dabei sind neben Maschinen auch die immer umfassender in der Produktion eingesetzten Informationssysteme zur Datenverwaltung und -verarbeitung Quellen zusätzlicher Daten (vgl. BMWi, 2016, S. 4; Reinsel et al., 2018, SS. 6–19).

Darstellung des Untersuchungsbereichs

Moderne Maschinen sind als *Cyber-Physische Systeme* zu verstehen, die untereinander kommunizieren und mit dem *Internet der Dinge und Dienste* vernetzt sind (vgl. Eigner et al., 2019, S. 415). Solche *Cyber-Physischen Systeme* gestatten eine – wenn auch nur rein gedanklich – unbegrenzte Verfügbarkeit von Daten aus der Betriebsphase, die das Interesse speziell von Maschinenherstellern[1] an deren wirtschaftlichen und technischen Nutzung befördert. Dabei ist der Wunsch, entsprechende Daten zu nutzen nicht neu. Allen voran der Softwarehersteller *Microsoft* erfasst allbekannt Nutzerdaten und wertet diese aus (Kling, 2015).

Daten mit Maschinenbezug (kurz: Maschinendaten) können dazu beitragen, Prozesse in unterschiedlichen Phasen des Produktlebenszyklus zu unterstützen (vgl. Stich & Hicking, 2019, S. 548; Voet et al., 2017, S. 21). Z.B. können Maschinendaten in der produktionsbegleitenden Instandhaltung eingesetzt werden, um die Verfügbarkeit, die Leistungsfähigkeit und die Sicherheit aktueller Maschinengenerationen zu verbessern (→ *Predictive Maintenance*, vgl. Jantzer et al., 2019, S. 29; Bink & Zschech, 2018). Außerdem lassen sich anhand von Maschinendaten zukunftsinnovative Maschinengenerationen entwickeln, die zuverlässiger, sicherer und besser an die betriebsspezifischen Anforderungen angepasst sind (Schuh et al., 2018; vgl. Kramer-Wolf, 2018, S. 12; Abramovici et al., 2013). Nicht zuletzt steigt auch der Maschinendatenbedarf mit dem wachsenden Interesse an

---

[1] Als **Hersteller** gilt lt. §4 Abs 1 & 2 ProdHaftG derjenigen, „der das Endprodukt […] oder ein Teilprodukt hergestellt hat [oder] sich durch das Anbringen seines Namens, seiner Marke oder eines anderen unterscheidungskräftigen Kennzeichens als Hersteller ausgibt. Als Hersteller gilt ferner, wer ein Produkt zum Zweck des Verkaufs, der Vermietung, des Mietkaufs oder einer anderen Form des Vertriebs mit wirtschaftlichem Zweck im Rahmen seiner geschäftlichen Tätigkeit in den Geltungsbereich des Abkommens über den Europäischen Wirtschaftsraum einführt oder verbringt.“

Unter ‚herstellen‘ wird das „gewerbsmäßig in laufender Produktion anfertigen“ verstanden (Duden, 2016_1).

nachhaltigen Produkten, die eine eigene Ökobilanz aufweisen müssen (Madushela et al., 2016).

Maschinendaten besitzen insbesondere in Branchen mit kapitalintensiven und hoch sicherheitsrelevanten Maschinen wie in der Luft- und Raumfahrt oder wie auch im Militär – beides hochsensible Bereiche, in denen die höchsten Ansprüche an Qualität, Sicherheit und Zuverlässigkeit an Maschinen und deren Komponenten gelten – bereits seit Jahrzehnten eine strategische Bedeutung. Vor allem die Betreiber teurer Investitionsgüter wie Flugzeuge, Produktionsanlagen oder Rüstungstechnik, aber auch die mit deren Instandhaltung beauftragten Unternehmen sind außerordentlich stark auf Daten aus dem Maschinenbetrieb angewiesen, um Prozesse präzise planen und steuern zu können (vgl. BMVg, 2016, S. 21; Klingauf et al., 2017). Die hierfür elementar notwendige Datenverfügbarkeit wird erst durch einen sicheren und leistungsfähigen Datenaustausch auf der Grundlage zum Teil spezialisierter Technologien und Infrastrukturen ermöglicht (vgl. Rützel, 2009, S. 17 ff.).

Maschinenbauunternehmen und allen voran Automobilhersteller entwickeln verstärkt Lösungen, um an Daten ihrer Produkte aus der Betriebsphase zu gelangen. Dabei verfolgen sie immer häufiger innovative, digitale Geschäftsmodelle, die über klassische Absatz- und Dienstleistungsfunktionen hinausgehen. Die gewonnenen Daten dienen hierbei den Maschinenherstellern bspw. bei der Umsetzung sog. Pay-per-Use-Betreibermodelle, bei denen die Einsatzfähigkeit von Maschinen durch eine, durch Datenauswertungen getragene, Zustandsüberwachung und vorausschauende Instandhaltung dauerhaft erhöht wird (vgl. Stich & Hicking, 2019, S. 549; Kramer-Wolf, 2018, S. 12). Solche sog. *Hybriden Leistungsbündel* aus physischen und nicht-physischen Produktbestandteilen gewinnen zunehmend an Bedeutung (vgl. Leimeister, 2020, S. 6). Die Firma *Thyssenkrupp Elevator* bspw. hat mehr als 180.000 Aufzüge mit Sensorik ausgestattet, um speziell Ausfallereignisse unter anderem anhand des Kundennutzungsverhaltens zu prognostizieren und um daraufhin präventiv handeln zu können (Kühnl, 2018).

Um produkteigene Daten auswerten zu können, kommen zunehmend digitale Serviceplattformen zum Einsatz, die als Instrument neue Wege der Leistungserbringung und Zusammenarbeit ermöglichen (siehe Jaekel, 2017; iit, 2017). Beispiele für unternehmensübergreifende Plattformen sind *MindSphere* von der *Siemens AG (2019), ADAMOS* von der ADAMOS GmbH (2019) und *it‘s OWL* von der *it's OWL Clustermanagement GmbH (2019)*. Darüber hinaus existieren unternehmensspezifische Plattformlösungen wie unter anderem von der *TRUMPF GmbH & Co KG*, der *Alfred Kärcher SE & Co. KG* und der KAESER *Kompressoren SE*, deren digitale Geschäftsmodelle von Arndt (2019) analysiert und gegenübergestellt wurden.

Innovative Geschäftsmodelle und die voranschreitende Entwicklung digitaler Serviceplattformen befördern den Wunsch von Maschinenherstellern, aber auch von Maschinenbetreibern bis dato unzugängliche, entwicklungs- bzw. betriebsrelevante Datenquellen zu erschließen, um diese für eigene Prozesse zu nutzen (vgl. Stich & Hicking, 2019, S. 549). Der dadurch implizierte Austausch von Daten zwischen der Produktentstehung und der Betriebsphase von Maschinen ist nicht unbekannt, sondern ein weithin anerkanntes, zentrales Bestreben zur Umsetzung von PLM (siehe Kapitel 2.2).

1.2 Untersuchungsgegenstand

Eine Maschine wird nach der Inbetriebnahme ein aktiver Bestandteil der IT-Infrastruktur des Maschinenbetreibers. Innerhalb dieser Infrastruktur erfolgt die Kommunikation von Maschinendaten hauptsächlich über das unternehmensinterne Netzwerk, unter Anwendung vorwiegend industrienaher Kommunikationsprotokolle wie *Profibus* und *Modbus* für Feldbussysteme bzw. wie *Profinet* und *EtherCAT* für Industrial Ethernet-Systeme. Entsprechende Kommunikationsprotokolle bestimmen unter anderem die syntaktische, semantische und strukturierte Informationskodierung für den Datenaustausch (Gottwald, 2014). Organisatorische Einzelheiten der Kommunikationsabläufe – bspw. zur Erfassung, Zusammenstellung und Übertragung von Messdaten oder zur Steuerung von Maschinen – sind nicht verbindlich geregelt, sondern individuell durch den Maschinenbetreiber festgelegt.

Die Kommunikation und besonders der Datenaustausch über Unternehmensgrenzen hinweg erfordert ebenfalls klare Festlegungen zur Informationskodierung sowie zur Organisation der Kommunikationsabläufe. Die zu diesem Zweck eingesetzten Kommunikationsschnittstellen[2] sind häufig proprietäre Einzellösungen, die grundsätzlich auf dem gegenseitigen Einverständnis zur Erfassung und Nutzung ausgewählter Daten beruhen (vgl. Stich & Hicking, 2019, S. 548; Kramer-Wolf, 2018, S. 13; Stürmlinger et al., 2018). Aktuell wird nur ein Bruchteil der durch Maschinen generierten Daten in die Produktentstehung zurückgeführt (vgl. Abramovici et al., 2013, S. 357).

„Mittelständler sind angesichts der großen Komplexität digitaler Strukturen und Prozesse finanziell und Know-how-mäßig überfordert“. Sie [die mittelständischen Unternehmen] befürchten, in einem Chaos an Daten und Schnittstellen den Überblick zu verlieren“ (VDI-Z Integrierte Produktion (2018). Daraus lässt sich verallgemeinernd schlussfolgern, dass Maschinenbetreiber nur begrenzt daran interessiert sind, Kommunikationsschnittstellen

[2] „Eine **Schnittstelle** bezeichnet eine Übergangsstelle zwischen verschiedenen Komponenten eines IT-Systems, über die ein Datenaustausch oder die Datenverarbeitung realisiert werden. […] Kommunikationsschnittstellen […] enthalten Informationen, die zwischen beteiligten Systemteilen ausgetauscht werden“ (SoftSelect, 2014).

“nach Außen“ aufzubauen, um Informationen weiterzugeben. Dies führt zu einer Barriere seitens der Maschinenbetreiber, die neben organisatorischen Mängeln vorrangig durch persönliche und durch individuelle Interessen hervorgerufene Widerstände geprägt ist. Diese richten sich häufig gegen Veränderungen des Status quo und blockieren die Einführung von technologisch oder organisatorisch Neuem. Das Auflösen dieser Widerstände ist ein zentrales Managementthema (→ Change- und Innovationsmanagement, siehe Cropley & Cropley, 2018; Schiersmann & Thiel, 2018).

Seitens der Maschinenhersteller existiert ebenfalls eine Barriere: Das Angebot individueller Produkte (→ Losgröße 1) hat eine extrem große Anzahl potenzieller Maschinenkonfigurationen zur Konsequenz, die wiederum im Beziehungsgeflecht unterschiedlicher Maschinenmodelle und -generationen stehen. Diese unterschiedlichen Maschinen sind teilweise unvernetzt und weltweit im Einsatz (vgl. Fachverband VDMA Software und Digitalisierung, 2018, S. 17). Die Erfassung der mit diesen Maschinen verknüpften, ebenfalls verteilten/dezentral gespeicherten, heterogenen und häufig unvollständigen Daten ist nur mit einem erheblichen technischen und organisatorischen Aufwand möglich. Maschinenhersteller sind derzeit mehrheitlich nicht in der Lage, Maschinendaten in der notwendigen Zusammensetzung und Qualität konsistent zu erfassen (vgl. Suter et al., 2019, S. 404).

Maschinenbetreibern und -herstellern gemeinsam sind die grundlegenden Bedenken zum Datenaustausch angesichts der Gefährdungen von Datensicherheit und Datenschutz durch über öffentliche Netzwerke kommunizierende Maschinen. Demnach können ungesicherte und über das Internet ausgetauschte Daten durch Diebstahl zum Zwecke der Industriespionage missbraucht werden (Ahrens, 2017; vgl. Kramer-Wolf, 2018, S. 13) oder durch Manipulation ihre Integrität verlieren, was wie im Fall der Luftfahrtindustrie zu lebensbedrohlichen Konsequenzen führen kann (Fuest & Hegmann, 2015; vgl. Reinhart, 2017, S. 199). Romero & Vieira (2014) weisen in diesem Zusammenhang speziell darauf hin, dass sich Lieferanten in der Luftfahrtindustrie aus Angst vor Kontrollverlust dazu entscheiden, selbst anonymisierte und verschlüsselte Daten nicht weiterzugeben, trotz der Vorteile, die sich daraus ergeben.

Angesichts der wachsenden Bedeutung von Daten – auch mit Blick auf den eigenen Unternehmenserfolg und in Anbetracht der vermehrt global verteilten, digitalisierten und vernetzten Produktions- und Logistikprozesse – sind Maschinebetreiber und Maschinenhersteller zunehmend daran interessiert, ihre jeweiligen Informationsbarrieren zu durchbrechen. Technisch ermöglicht wird dies (1) durch fortschrittliche Infrastrukturen für den flächendeckenden Datenaustausch, wie das Projekt *Narrowband IoT* der Vodafone GmbH (2019) bereits demonstriert, und (2) durch fortschrittliche Kommunikationstechnologien wie *OPC Unified Architecture* (OPC UA) oder *Data Distribution Service*,

die eine umfassende und anwendungsnahe Beschreibung leistungsfähiger und flexibler Kommunikationsschnittstellen gestatten, für eine sichere Maschinenkommunikation, aber auch für den Datenaustausch zwischen unternehmensweiten IT-Systemen über Netzwerke wie das Internet.

Nicht zuletzt sind Fragen zum Urheber- und zum Eigentumsrecht an den durch Maschinen generierten Daten nicht abschließend geklärt, wie die Auseinandersetzung zwischen *Airbus* und *Lufthansa* zeigt (Hegmann, 2018). Öffentliche und politische Diskussionen sowie erste Regelungen tragen bereits dazu bei, diese für die Zukunft essenziellen Rechtsfragen zu beantworten (→ *Datenschutzgrundverordnung*, vgl. Hornung & Lurtz, 2019, SS. 114-116).

Die bestehenden rechtlichen Defizite und die zum Teil unterschiedlichen und individuellen Barrieren von Maschinenbetreibern und Maschinenherstellern lassen sich als eine gemeinsame Informationsbarriere interpretieren. Deren teilweise Auflösung kann technisch durch eine zentrale Kommunikationsschnittstelle realisiert werden, um einen einheitlich-geordneten, durchgängigen und organisationsübergreifenden Datenaustausch zwischen den Prozessen der Produktentstehung und der Betriebsphase von Maschinen zu ermöglichen.

Abgrenzung der vorliegenden Arbeit

Die vorliegende Arbeit grenzt sich von spezifischen, d.h. bspw. unternehmensindividuellen Schnittstellenlösungen zum Datenaustausch ab und fokussiert stattdessen einen auf PLM gründenden Konzeptansatz mit generischen Schnittstellenelementen. Diesbezüglich beruht der wissenschaftliche Wert dieser Arbeit auf der Verknüpfung vorhandener und teilweise neu entwickelter, datenrelevanter Ressourcen und Prozesse der Produktentstehung mit denen aus der Betriebsphase, unter Anwendung anerkannter Theorien wie bspw. zur Datenintegration.

Die vorliegende Arbeit grenzt sich weiterhin von politischen Diskussionen um Begriffe wie *Industrie 4.0 oder Digitaler Zwilling* ab, über deren Definitionen und einzelne Aspekte teilweise nach wie vor Uneinigkeit herrscht.

1.3 Methodik

Das methodische Vorgehen dieser Arbeit zur Entwicklung eines Schnittstellenkonzepts zum Datenaustausch zwischen der Produktentstehung und der Betriebsphase folgt dem 1994 von Beitz vorausgedachten und 2007 von Hevner et al. beschriebenen *Design-Science Paradigma* für einen konstruktionsorientierten und wie von Lachenmaier et al. (2019, S. 318) empfohlenen, allgemein-ingenieurtechnischen Forschungsansatz. In dessen Mittelpunkt steht die problemorientierte, technische Lösung durch Artefakte wie

bspw. Theorien, Konzepte, Modelle, Sprachkonstrukte oder IT-Komponenten, um Informationssysteme zu optimieren (vgl. Simon, 1996, S. S. 20 ff.; Peffers et al., 2007, S. 47). Die Entwicklung eines Artefakts baut auf vorhandenen Artefakten auf, die anhand der Kreativität, Erfahrung und Problemlösungsfähigkeit des Forschers modifiziert, erweitert, kombiniert oder in einem neuen Kontext angewendet werden (vgl. Hevner et al., 2004, S. 2). Nach Vaishnavi & Kuechler, Bill, Petter, Stacie (2008, S. 25) beeinflusst und verändert ein solcher Design-zentrierter Forschungsansatz den Stand der Technik unmittelbar!

Abbildung 2 zeigt das Vorgehensmodell für den Entwicklungsablauf. Das Vorgehensmodell stellt eine Adaption des ursprünglich von Hevner (2007) für generelle und pragmatische, d.h. für primär ergebnisorientierte, Forschungsziele veröffentlichten, *Information Systems Research Frameworks* dar. Das Vorgehensmodell besteht aus drei Gegenstandsbereichen sowie drei Bearbeitungszyklen.

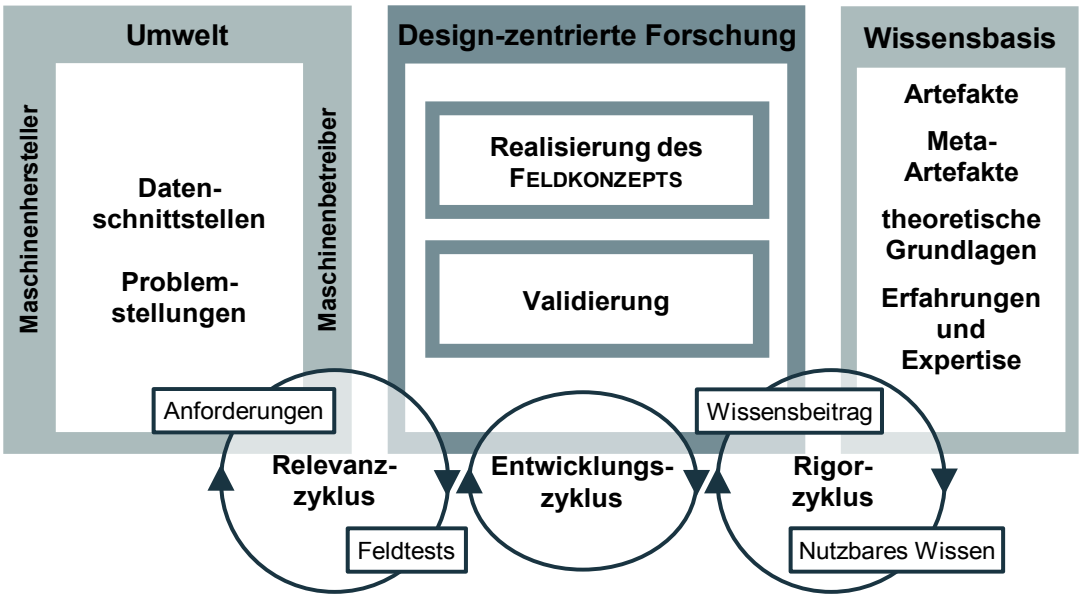


Abbildung 2: Vorgehensmodell für die Konzeptentwicklung nach dem Design-Science Paradigma (Darstellung in Anlehnung an Hevner et al., 2004, S. 80; Hevner, 2007, S. 88)

Im Gegenstandsbereich *Umwelt* erfolgt die Identifikation und die Analyse der für den gewählten Forschungsschwerpunkt relevanten, sozio-technologischen Systeme. Für die vorliegende Arbeit sind dies die Informationssysteme von Maschinenherstellern und -betreibern und speziell deren Prozess- und Datenschnittstellen. Im sog. *Relevanzzyklus* erfolgt die Überführung des in Kapitel 3 dargelegten Arbeitsbereichs in spezifische Anforderungen. Im selben Zyklus werden die Ergebnisse des nachfolgenden *Entwicklungszyklus* anhand von Feldtests und somit von Feedbacks aus dem Gegenstandsbereich *Umwelt* validiert, solange bis das finale Artefaktdesign vorliegt. Dieses Vorgehen ermöglicht

ein (noch) besseres Verständnis der Probleme und eine sowohl bessere Qualität des Designprozesses als auch der Artefakte.

Im Mittelpunkt des *Entwicklungszyklus* steht die (praktische) Design-zentrierte Forschung und damit die Entwicklung des FELDKONZEPTS und der hierzugehörigen Daten-, Prozess- und Systemmodelle als Artefakte. Deren wissenschaftliche Fundierung (Rigorosität) wird durch die konsequente Nutzung einer *Wissensbasis* im *Entwicklungszyklus* sichergestellt, die sowohl die im Entwicklungsprozess eingesetzten Programmier- und Modellierungssprachen als Meta-Artefakten, die theoretischen Grundlagen bspw. zur Datenintegration als auch die Erfahrungen sowie die Expertise von Fachkollegen umfasst. Die aus dem *Entwicklungszyklus* stammenden Artefakte gehen als Wissensbeitrag und damit als neue Elemente in die *Wissensbasis* ein und können wegen ihrer zuvor garantierten Relevanz für die betriebliche Umwelt letztendlich Anwendung in der Praxis finden. Der sog. *Rigorzyklus* schließt sich.

1.4 Gliederung der Arbeit

Neben dem Vorgehensmodell nach dem *Design-Science Paradigma* (siehe Abbildung 2, auf S. 7) existiert mit dem „Forschungsprozess für angewandte Wissenschaften“ nach Ulrich (1981) ein für wissenschaftliche Arbeiten aus den Ingenieurwissenschaften anerkannter, praxisnaher, integrativer und systemtheoretischer Ansatz, der die notwendige Gliederung für diese Arbeit liefert (vgl. Ulrich & Hill, 1976, S. 308; Zohm, 2004, S. 7). Anhand der in Abbildung 3 auf S. 9 (links) dargestellten Prozessschritte lassen sich die einzelnen Kapitel ableiten (Abbildung 3, rechts).

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel. Beginnend mit Kapitel 1 wird die Arbeit motiviert und sowohl der Untersuchungsbereich als auch der Untersuchungsgegenstand dargestellt. In Kapitel 2 werden die für die Problemlösung theoretischen Grundlagen mit Blick auf den Forschungsbedarf zur Integration von Produkt- und Maschinendaten erarbeitet und aktuelle Lösungsansätze abschließend kritisch diskutiert. Darauf basierend werden in Kapitel 3 die konzeptionellen Mängel aktueller Kommunikationsschnittstellen in Bezug auf die systematische Integrierbarkeit von Maschinendaten in den PLM-Prozessbereich zusammengefasst, woraufhin die Zielsetzung und die Arbeitspakete für die vorliegende Arbeit abgeleitet sind. In Kapitel 4 wird das FELDKONZEPT als Lösungsvorschlag für das aufgedeckte Schnittstellenproblem vorgestellt. Die Umsetzung des FELDKONZEPTS erfolgt durch ein FELDMANAGEMENTSYSTEM, welches in Kapitel 5 durch grundlegende Prinzipien beschrieben ist und in Kapitel 6 als Prototyp aufgebaut wird. Für die Validierung des FELDKONZEPTS dienen ein in Kapitel 6 beschriebenes Anwendungsszenario sowie ein

für diesen Zweck entwickelter Prototyp eines FELDMANAGEMENTSYSTEMS. Kapitel 7 schließt die Arbeit mit einer Zusammenfassung sowie einem Ausblick ab.

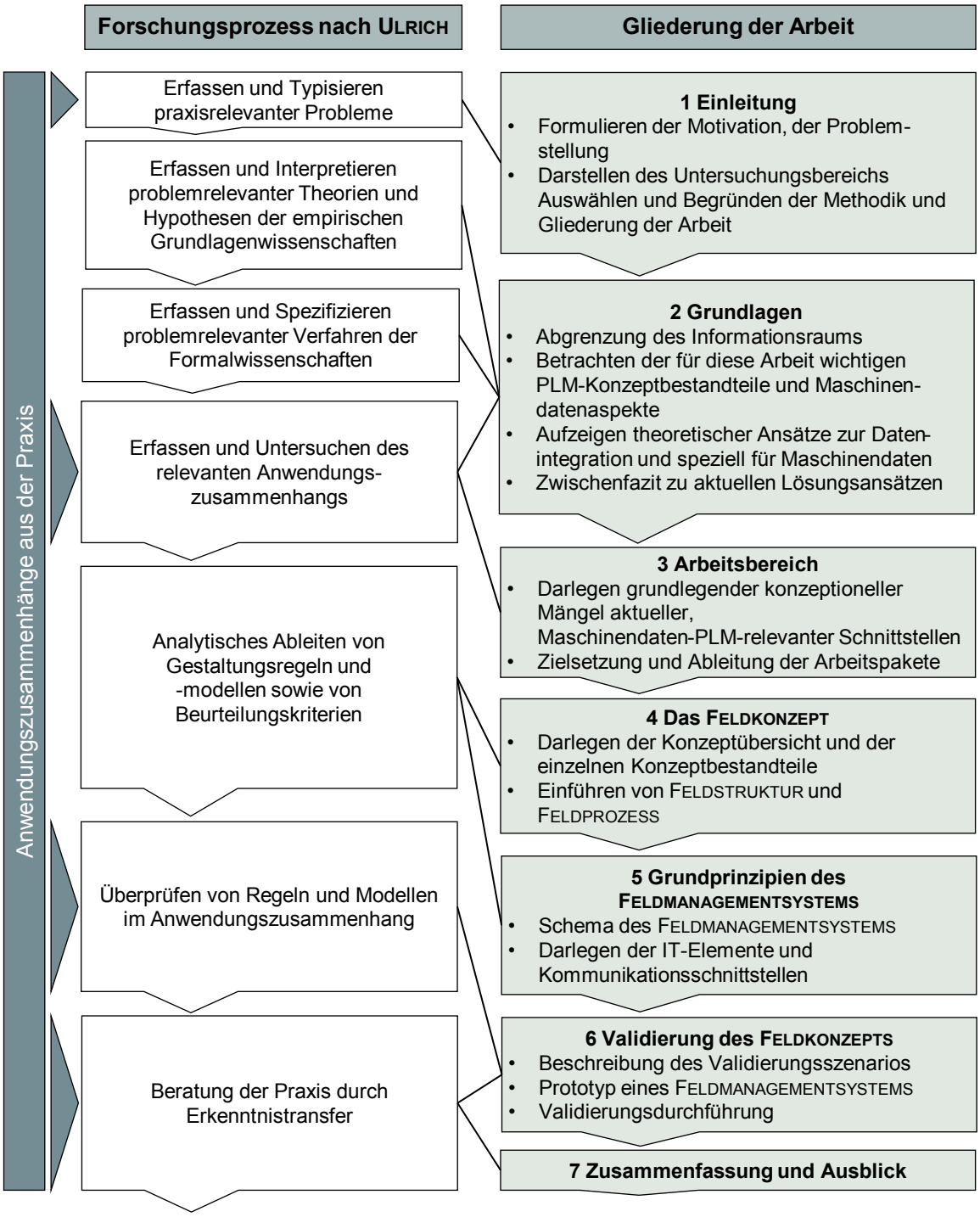


Abbildung 3: Forschungsprozess nach Ulrich (1981) und Gliederung der Arbeit

2 Grundlagen

2.1 Abgrenzung des Informationsraums

Von der konzeptionellen Idee bis zu deren endgültigen Entsorgung folgen Produkte[3] einem Prozess des Werdens, Wachsens und Vergehens. In Anlehnung an DIN EN 82045-2 (2005) bzw. auch an DIN 31051 (2012_1) ist damit der Begriff des Produktlebenszyklus, ein auf empirischen Beobachtungen basierendes Prozessmodell[4], allgemeingültig definiert.

Je nach Perspektive des Betrachters, d.h. je nach Wissenschaftsdisziplin, Unternehmensstruktur, Branche und Betrachtungsgegenstand existieren unterschiedliche Interpretationen und Modellvarianten für Produktlebenszyklen. Diese unterscheiden sich nach der, für die Nutzung eines Produktlebenszyklus als Erklärungsmodell geeigneten, Anzahl und Bezeichnung von Produktlebensphasen sowie nach deren zeitlichen Abfolge.

In den Wirtschaftswissenschaften und verwandten Bereichen wird der Produktlebenszyklus aus ökonomischer Sicht betrachtet und orientiert sich am Marktzyklus (vgl. Peschke, 2017, SS. 18-19). Die in den technischen Ingenieurwissenschaften genutzten Produktlebenszyklen fokussieren vorrangig die Produktzustände oder die produktbezogenen Tätigkeiten in den jeweiligen Produktlebensphasen. Ein häufig in der englischsprachigen Literatur verwendeter Produktlebenszyklus ist als Variante 1 in Abbildung 4 dargestellt. Dieser umfasst die elementaren Phasen Begin-of-Life (BOL), Middle-of-Life (MOL) und End-of-Life (EOL).

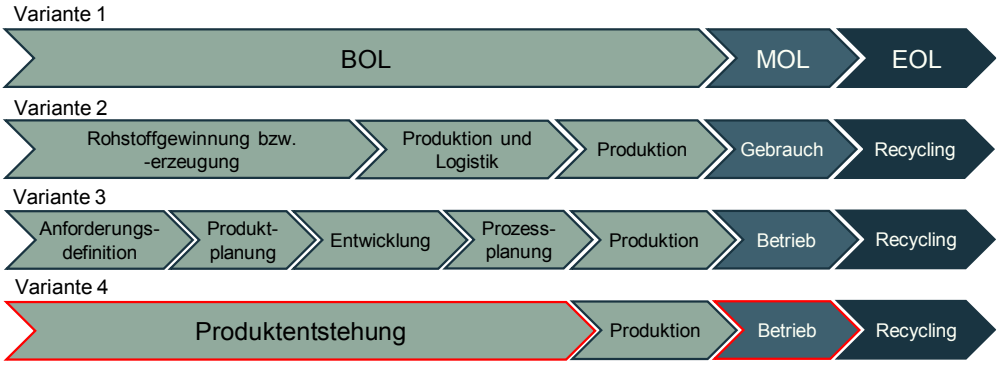


Abbildung 4: Produktlebenszyklusvarianten

---

3 „Ein Produkt bezeichnet ein Gut aus Komponenten, das erstellt, zusammengesetzt oder in irgendeiner anderen Form wertschöpfend angereichert wird und auf die Schaffung von Kundennutzen (jedweder Art) abzielt (vgl. Kehl, 2018, S. 15; Homburg, 2017, S. 557).“ Speziell technische Produkte spannen einen Bereich auf von rein mechanischen Produkten bis hin zu mechatronischen Produkten, die mechanische, elektronische und softwaretechnische Komponenten in einem System integrieren (vgl. Isermann, 2008, S. 14).

4 Ein **Modell** ist nach *Stachowiak*, zitiert durch Krcmar (2015, S. 31) ein reduziertes Abbild eines natürlichen oder künstlichen Originals, welches für ein bestimmtes Subjekt, innerhalb eines bestimmten Zeitraums, einen bestimmten Zweck erfüllt, indem lt. Hansen et al. (2015, S. 101) und Zafirov(2014, S. 80) ein System oder Prozess vereinfacht als ein begriffliches (abstraktes) oder physisches Gebilde dargestellt wird.

Die Unterteilung der elementaren Phasen führt zu differenzierteren Lebenszyklusvarianten, deren Anzahl und Bezeichnungen der Produktlebensphasen sich unter anderem je nach Ingenieurdisziplin unterscheiden. Variante 2 in Abbildung 4 zeigt einen Produktlebenszyklus speziell für das Ecodesign bzw. das Life Cycle Assessment nach DIN EN ISO 14040 (2009). Als weiteres Beispiel ist in Abbildung 4 der von Eigner & Stelzer (2009, S. 2) vorgestellte – aber auch von Arnold et al. (2011, S. 10) und von Stark (2015, S. 6) in vergleichbarer Form beschriebene – Produktlebenszyklus als Variante 3 dargestellt. Dessen Schwerpunkt sind die frühen Lebensphasen, in denen Produkte durch Anforderungen spezifiziert, geplant, entwickelt und produziert werden, um diese anschließend in der Betriebsphase[5] einzusetzen und final zu recyceln bzw. zu entsorgen.

Aus der Variante 3 leitet sich der in Abbildung 4 als Variante 4 bezeichnete und von Eigner und Stelzer (2009, S. 2) vorgeschlagene Produktlebenszyklus ab. Dieser beinhaltet die **Produktentstehung** und die **Betriebsphase von Maschinen** als die für diese Arbeit relevanten Informationsräume. Dabei obliegt die Produktentstehung der verantwortlichen Rolle des **Maschinenherstellers** und die Betriebsphase dem des **Maschinenbetreibers**.

Der Produktlebenszyklus wird durch zahlreiche Informationen begleitet, deren wirtschaftliche und technische Nutzung vorranging innerhalb der Produktlebensphasen erfolgt, in denen diese Informationen generiert werden. Lt. Guo et al. (2014) können dadurch jedoch keine nachhaltigen Produkt- oder Prozessverbesserungen erzielt werden.[6] Demnach haben insbesondere Maschinenhersteller und -betreiber ein nachvollziehbares Interesse daran, Informationen aus der Betriebsphase bzw. der Produktentstehung außerhalb ihrer originären Prozessbereiche für eigene Zwecke zu nutzen. Eine detaillierte Beschreibung des hierfür notwendigen Informationszyklus erfolgt durch das von Jun et al. (2007) erstmalig vorgestellte und von Kiritsis (2011) und Guo et al. (2014) erweiterte *Design Closed-loop*-Konzept.

In der Produktentstehung sind Produktinformationen das Ergebnis intellektueller Planungsarbeit, mit dem Ziel, die Struktur eines Produkts sowie dessen Geometrie-, Funktions-, Verhaltens- und Zustandseigenschaften zu beschreiben. Daraus lassen sich die zur Herstellung benötigten Produktionsunterlagen sowie weitere Dokumente ableiten, die speziell die späten Phasen des Produktlebenszyklus betreffen (vgl. Wang et al., 2012, S. 1420).

---

5 Je nach Lebenszyklusmodell und wird synonym auch von Nutzungs- oder Servicephase gesprochen.

6 Die Methoden für das *Design for Use* und der Konstruktionsansatz der Integrierten Produktentwicklung sind unter anderem stark auf den kontinuierlichen Informationsrücklauf aus allen Produktlebensphasen und speziell aus der Betriebsphase angewiesen (Wellsandt et al., 2015).

In der Betriebsphase sind neben diversen IT-Systemen der Maschinenbetreiber insbesondere Sensoren wichtige Informationsquellen. Der Begriff Sensor (lat. sensus für Gefühl oder Empfindung) bezeichnet ein technisches Bauteil, welches chemische, biologische und nichtelektrische, physikalische Messgrößen in elektrische Signale umformt. Zu diesem Zweck werden unterschiedliche physikalische Effekte und Messprinzipien genutzt, für die ein bekannter und reproduzierbarer Zusammenhang zwischen der interessierenden Messgröße und der zu beeinflussenden, elektrischen Sensoreigenschaft existiert (vgl. Hesse & Schnell, 2014, S. 2; Tränkler, 2014, S. 3). Anhand der ermittelten Messgrößeninformationen lassen sich vorrangig Rückschlüsse auf maschinenrelevante Ereignisse oder das Verhalten bzw. den Zustand einer Maschine ziehen, um diese ggf. zu beeinflussen.

Die Nutzung von Informationen aus der Betriebsphase in anderen Phasen des Produktlebenszyklus wie der Produktentstehung setzt voraus, dass, unter Beachtung der zeitlichen Abfolge und wie in Abbildung 5 im durch Schraffur gekennzeichneten Bereich angedeutet, zumindest eine Maschinengeneration in der Betriebsphase existieren muss, um als Informationsquelle zu dienen. Insbesondere bei Neuentwicklungen ist diese Voraussetzung nicht immer erfüllt. In diesem Fall obliegt es dem Maschinenhersteller (betriebsnahe) Informationen anderweitig zu beschaffen. Mögliche Informationsquellen hierbei sind unter anderem gleichartigen Maschinen oder unter Annahmen und statistische Ansätze künstlich erzeugte Informationsbestände (vgl. Arndt et al., 2016, SS. 2-3).

Abbildung 5: Überdeckung von Produktlebensphasen (Quelle: Arndt et al., 2016, S. 2)

Der für diese Arbeit relevante Informationsraum setzt sich aus maschinenrelevanten Informationen aus der Betriebsphase und der Produktentstehung zusammen, die individuell und situationsabhängig und ohne logische Einschränkungen von besonderem Interesse für Maschinenhersteller bzw. Maschinenbetreiber sind. Eine Begrenzung erfährt der Informationsraum indes durch technisch-organisatorische Einschränkungen, indem nur solche Informationen berücksichtigt werden, die – wie im Fall von Messgrößeninformationen – technisch erfasst, digitalisiert und durch Datenkodierung zur Verarbeitung zur Verfügung stehen.

2.2 Product Lifecycle Management

Product Lifecycle Management (PLM) ist ein strategischer Ansatz bzw. ein umfassendes Managementkonzept, das speziell technische Produkte und die mit deren Herstellung und Betrieb verbundenen wertschöpfenden Prozesse bzw. die dabei anfallenden Informationen in den Mittelpunkt der Betrachtung rückt. „Das Ziel von PLM ist es, alle Informationen zu einem Produkt und der zugehörigen Produktionssysteme [und Ressourcen] über deren gesamten Lebenszyklus hinweg […] konsistent zu managen und für alle zukünftigen Aufgaben im Produktentstehungsprozess bereitzustellen“ (Gerhard, 2016, SS. 215-216).[7] Grundlage hierfür ist die Integration sämtlicher Produktinformationen in eine phasen- und unternehmensübergreifende, wertschöpfende Prozesslandschaft (vgl. Eigner und Stelzer 2009, S. 37). Mit PLM wird durch Prozesse, Methoden und Werkzeuge die Möglichkeit geschaffen, Produktinformationen in der notwendigen Qualität und Reihenfolge sowie am richtigen Ort zur Verfügung zu stellen.

Kernbestandteil der PLM-Strategie ist das **Produktdatenmanagement** (PDM) als sog. Datenbackbone. PDM verfolgt das Ziel, entlang des gesamten Produktlebenszyklus eindeutige und reproduzierbare Produktkonfigurationen durch das IT-gestützte Management des Prozess- und Produktmodells zu erzeugen (Eigner & Stelzer, 2009, S. 34). IT-Systeme für PDM stellen lt. VDI 2219 (2016) technische Datenbank- und Kommunikationssysteme dar, die dazu dienen, Informationen über Produkte und deren Entstehungsprozesse und/oder Lebenszyklen konsistent zu speichern, zu verwalten und transparent für alle relevanten Bereiche eines Unternehmens bereitzustellen. **PDM-Systeme** bilden einen Baustein innerhalb der Informationsinfrastruktur von Unternehmen, um die Methoden und Regeln des PDM zu implementieren.

Das **Prozessmodell** beschreibt jene technischen und organisatorischen Geschäftsprozesse[8], die mithilfe von PDM abgebildet und gemanagt werden (vgl. Strickmann, 2008, S. 36). Für den Begriff des **Produktmodells** existieren in der Literatur zwei verschiedenen Interpretationen, die hinsichtlich ihrer Anforderungen an Inhalt und Umfang eines Produktmodells zum Teil stark voneinander abweichen. Die erste Interpretation definiert das Produktmodell im Sinne der allgemeinen Modelltheorie nach Stachowiak (1973) als

---

[7] Gerhard (2016, S. 216) erweitert das zentrale Ziel von PLM hin zu einer kohärenten Unterstützung des Zusammenwirkens aller beteiligten Instanzen in der Produktentstehung und -herstellung (zur Begriffsunterscheidung siehe Eigner & Stelzer (2009, S. 2)) unter Einbindung von *Supply Chain*.

[8] Ein **Geschäftsprozess** ist nach (Schwickert & Fischer, 1996, SS. 10–11) eine logisch zusammenhängende (wertschöpfende und wiederholbare) Kette von Teilprozessen, die ein Input durch den Einsatz materieller und immaterieller Güter unter Beachtung von Regeln und unternehmensinternen und -externen Faktoren zu einem Output transformiert. Ein Geschäftsprozess ist in ein System von umliegenden Prozessen eingegliedert, kann jedoch als eine selbständige, von anderen (organisationsweiten und organisationsübergreifenden) Prozessen isolierte Einheit betrachtet werden.

Abbildung eines konzeptionellen Teilaspekts eines gedachten oder realen Produkts hinsichtlich eines bestimmten Zwecks im Entwicklungsprozess (vgl. Kohn, 2013, S. 54). Ein solches Modell kann entweder real oder digital vorhanden sein oder nur gedanklich existieren (vgl. Lindemann, 2009, S. 11). Nach der zweiten Interpretation – dieser wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit gefolgt – wird unter dem Produktmodell-Begriff und im Sinne von PLM ein gesamtheitlicher Produktbeschreibungsansatz verstanden. Dieser hat zum Ziel, ein Produkt mit seinen für den gesamten Lebenszyklus relevanten Informationen digital abzubilden (vgl. Paul et al., 1995; zitiert von Eigner & Stelzer, 2009, S. 26; DIN EN ISO 10303, 2014).

Ein Produktmodell umfasst die im PDM mittels **Dokumente**[9] verwalteten Produktdaten sowie Produktstammsätze und die Produktstruktur.[10] **Produktstammsätze** beschreiben anhand von **Artikeln**[11] die Eigenschaften der einem Produkt zugeordneten Komponenten, Halbzeuge, Materialien sowie von Fertigungs- und Montageressourcen. Die **Produktstruktur** gibt Aufschluss über den Aufbau eines Produkts und ist das zentrale Instrument zur Prozessgestaltung und zur Unterstützung der Informationshandhabung im Sinne eines unternehmensweit gemeinsam nutzbaren Produktmodells (vgl. Eigner, 2014, S. 272).

Ausgangspunkt für die Produktstruktur sind die auf der Basis modellbasierter Entwicklungsansätze bereits in den frühen Produktlebensphasen erzeugten Strukturen für Produktanforderungen und -funktionen (→ *Model Based Systems Engineering*).[12] Die werden wie die Eigenschaften, das Verhalten und die logische und technisch-physische Zusammensetzung der Produktkomponenten im Verlauf der Produktentstehung durch verschiedene, domänenspezifische Engineeringmodelle beschrieben. Die damit verknüpften Strukturen liefern als Bauzusammenhänge eine mögliche Lösung zur physischen Realisierung der geforderten Produktfunktionen (vgl. Feldhusen et al., 2013, S. 255). Die Produktstruktur ist dahingehend das Resultat der durch PDM unterstützten Zusammenführung verteilter,

---

9 Ein **Dokument** ist nach VDI 2219 (2016) definiert als „Einheit behandelte Zusammenstellung von Informationen, die nicht flüchtig auf einem Informationsträger gespeichert sind.“ Dokumente dienen in der Produktentstehung zur Verwaltung der durch **Produktdaten** kodierten Entwicklungsergebnisse zur digitalen Produktbeschreibung (vgl. Kehl, 2018, S. 19). Sie sind (wie die meisten durch PDM verwalteten Objekte) ein fester Bestandteil des gesamten Produktlebenszyklus und unterliegen einer fortwährenden Bearbeitung oder Änderung (vgl. Eigner & Stelzer, 2009, S. 170).

10 Anstelle von Produktstruktur wird in den Ingenieurwissenschaften synonym auch von Artikel- oder Baustruktur, Erzeugnisgliederung, Stückliste oder Bill of Material (BOM) gesprochen (vgl. Pahl & Beitz, 1993, S. 474; Eigner, 2014, S. 272). Ihre ursprüngliche Form ist die flache Stückliste, wie sie auf Baugruppenzeichnungen zu finden ist.

11 Ein **Artikel** „repräsentiert in Form von Attributen auf der Metadatenebene alle Informationen, die zu einem Teil bzw. zu einer Baugruppe oder einem Endprodukt zu speichern sind“ (vgl. Gerhard, 2016, S. 222).

12 Die Grundlagen zur Strukturierung von Objekten liefern Standards, die unter anderem von der *Object Management Group*, dem *International Council on Systems Engineering*, der *Gesellschaft für Systems Engineering e.V.* oder dem *Verein ProStep iViP* definiert sind und weiterentwickelt werden.

modellbasierter Strukturinformationen, die wie zuvor beschrieben das Entwicklungsergebnis der Produktentstehung sind.

Für die Produktlebensphasen Produktion, Betrieb und Recycling sind Strukturinformationen ein inhärenter Bestandteil von Stücklisten, die jeweils einen bauspezifischen Entwicklungs-, Fertigungs-, Auslieferungs- oder Betriebszustand beschreiben. Entsprechende Stücklisten bilden den Kern von Produktkonfigurationen (Ausprägungen des Produktmodells), die je nach Verwendungszweck über alle zur Fertigung, Montage, Qualitätskontrolle oder für die Instandhaltung relevanten Dokumente verfügen. So bildet die häufig für Produkte mit langer Nutzungsdauer wie bspw. Produktionsanlagen eingesetzte und für diese Arbeit wichtige Produktkonfiguration ***As-Maintained*** bzw. ***As-Used*** die aktuelle Baustruktur in der Betriebsphase speziell für Instandhaltungszwecke digital ab.

Für eine durchgängige PLM-Strategie sind die verschiedenen, aufgabenspezifischen und von der Lebensphase eines Produkts abhängigen Stücklisten assoziativ und konsistent im Sinne einer zentralen Produktstruktur miteinander verknüpft (→ *Digital Thread*, vgl. Eigner, 2014, S. 274). Der Aufbau einer solchen Produktlebensphasen-übergreifenden Produktstruktur erfordert die digitale Abbildung der Instanzen ausgewählter Produkte und deren Komponenten durch die bspw. **Serialisierung** der Artikel derartiger Produkte und Produktkomponenten im PDM, wodurch deren Nachverfolgbarkeit insbesondere bei hohen Betriebs- oder Produkthaftungsrisiken über alle Phasen des Lebenszyklus ermöglicht wird (vgl. Eigner, 2014, S. 262). Zudem lassen sich auf der Grundlage einer zentralen Produktstruktur Produkt- und Maschineninformationen konsequent miteinander verknüpfen (siehe Kapitel 2.4 zu Integrationsansätzen für Maschinendaten), was einen geordneten Informationsaustausch gestattet.

Serialisierte Artikel sind persistent im PDM gespeichert und verfügen neben einer Artikelnummer[13] und einem Änderungsindex auf der obersten Produktebene auch über eine fortlaufende Serien- bzw. Serialnummer[14] sowohl auf Baugruppen- als auch auf Teileebene. Eine **Seriennummer** ist eine Zeichenfolge, die zur eindeutigen Identifikation eines Exemplars (z.B. eine Maschine) aus einer Serie dient (Duden, 2018).

Einem Maschinenhersteller lassen sich für gewöhnlich mehrere Maschinen und damit verknüpft auch deren jeweilige Seriennummern eindeutig zuordnen (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2016, S. 42). Es besteht jedoch die Gefahr, dass eine solche Zuordnung fehlschlägt, wenn Seriennummern bspw. von verschiedenen Maschinenherstellern

[13] In der Literatur wird synonym auch die Bezeichnung als Sachnummer verwendet.

[14] Im weiteren Verlauf der Arbeit wird zugunsten einer vereinfachten Lesbarkeit nur der Begriff ‚Seriennummer' verwendet.

mehrfach vergeben werden, was im globalen Maßstab nicht unwahrscheinlich ist. Darum müssen gemäß Hippenmeyer & Moosmann (2016, S. 11) insbesondere Objekte innerhalb vernetzter Informationssysteme anhand ihrer Seriennummern eindeutig identifiziert und unterschieden werden können. Dies kann z.B. durch kodierte Metainformationen wie die Herstellerangabe in der Zeichenfolge der Seriennummer gelöst werden. So empfiehlt bspw. die *Plattform Industrie 4.0* für das Konzept der sog. *Industrie 4.0-Komponente* zur Objektidentifikation unter anderem[15] das *International Registration Data Identifier*-Verfahren (kurz ISO/IEC IRDI), nach ISO/IEC 11179 (2015) und DIN EN/IEC 62507 (2012_2) sowie unter Verwendung des Zeichenschemas nach ISO/TS 29002-5 (2009) ((Stand 2017, Heidel et al., 2017, SS. 64-66; vgl. Plattform Industrie 4.0, 2018_1, SS. 6–7; ISO/IEC 11179, 2015; Plattform Industrie 4.0, 2016, S. 13; Finkenzeller, 2015, S. 416).

Anhand der Seriennummer lässt sich jede einzelne Ausprägung einer Menge von Teilen, Baugruppen und Produkten mit identischer Artikelnummer – jedes Exemplar einer Serie (eine Konfigurationseinheit oder auch als *Serialized Configuration Items* bezeichnet) – in allen Phasen des Produktlebens dauerhaft und ortsunabhängig eindeutig identifizieren und administrieren (vgl. Hippenmeyer & Moosmann, 2016, S. 4; Eigner, 2014, SS. 161-162; Duden, 2018). Darüber hinaus können Änderungen der konfigurationsspezifischen Produktstruktur aufgrund von bspw. Instandsetzungsmaßnahmen als eingefrorener Bauzustand dokumentiert werden[16] (vgl. Niemann, 2003, S. 898; VDI, 2015, S. 23).

Die schließlich mit Informations- und Kommunikationstechnologien ausgestatteten Maschinen und Maschinenkomponenten lassen sich in den Kommunikationsnetzwerken und IT-Systemen der Betriebsphase anhand ihrer ID wie z.B. die Seriennummer eindeutig identifizieren. Daraus resultiert ein Anknüpfungspunkt an das PDM und damit für eine systematische Integration von Maschinendaten in den PLM-Prozessbereich.

Allerdings konzentriert sich der Einsatz von PDM bislang stark auf die frühen Produktlebensphasen, mit dem Ziel eines intensiven entwicklungs- und produktionsbegleitenden Daten- und Prozessmanagements. Daraufhin sinkt nach der Produktauslieferung und Inbetriebnahme der Einsatzgrad von PDM und andere Managementkonzepte wie das

---

[15] Ebenfalls zur eindeutigen Objektidentifikation für Industrie 4.0 zugelassen ist das Identifikationsverfahren *Universally Unique Identifier* (siehe Sinsel, 2020, S. 24). Andere Verfahren wie bspw. der elektronische Produktcode (EPC) für internationale Produktkennzeichnungen in der Logistik sind durch ihren teilweise begrenzten Einsatzbereich für Industrie 4.0 ungeeignet (GS1, 2021, S. 87 ff.).

[16] Die Überwachung der Konfigurationen eines Produkts über den kompletten Lebenszyklus ist Aufgabe des Konfigurationsmanagements. Nach DIN ISO 10007 (2019) werden mithilfe von Konfigurationsmanagement die Transparenz und die Überwachung funktioneller und physischer Produktmerkmale sichergestellt.

Customer-Relationship-Management gewinnen parallel zunehmend an relativer Bedeutung (Bommisetty, 2011). Die Nutzungspotenziale von PDM in den späten Produktlebensphasen sind noch zum Großteil ungenutzt: Die Einbindung der Ressourcen und Systeme der Betriebsphase in das Managementkonzept PLM ist aktuell nur unzureichend gelöst (vgl. Wellsandt et al., 2015; Wiesner et al., 2015; Eigner & Stelzer, 2009, S. 6). In Konsequenz stehen speziell den Prozessen der Produktentstehung Maschineninformationen gar nicht, unvollständig oder nicht in der erforderlichen Qualität zur Verfügung und das obwohl Bestandteile des Prozess- und des Produktmodells auch außerhalb von PDM in verschiedenen, technischen und logistischen Systemen der Betriebsphase genutzt und sogar verwaltet werden. Systeme für *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) oder *Computerized Maintenance Management System* (CMMS) nutzen Seriennummern zur Identifikation und Verwaltung von Maschinen und deren Komponenten. Darüber hinaus verfügen entsprechende Systeme über struktur- und eigenschaftsrelevante, speziell die Produktkonfiguration *As-Used* bzw. *As-Maintained* betreffende Informationen. Jedoch besteht in der Betriebsphase ein Mangel an produktspezifischen Informationen speziell zu mechanischen, elektrischen und informationstechnischen Kopplungen und Wechselwirkungen zwischen den Maschinenkomponenten.

2.3 Maschinendaten

Für den Maschinendaten-Begriff gibt es keine einheitliche Definition in der Literatur. Nach Kurbel (2016, S. 368) sind **Maschinendaten** spezielle Betriebsdaten, die automatisch an einer Produktionsanlage erfasst werden[17] oder vereinfacht gesagt: Maschinendaten sind alle an einer Maschine anfallenden, zur rechentechnischen Nutzung kodierten Informationen (QSW, 2019; Rouse, 2017). Maschinendaten werden entweder aus den Anlagensteuerungen ausgelesen, über Sensoren ermittelt oder von speziellen Lesestationen (z.B. von RFID-Reader) aufgenommen. Maschinendaten umfassen verlässliche Aufzeichnungen zu den Aktivitäten und Verhaltensweisen von Maschinennutzern, zu Ereignissen sowie zu den Transaktionen zwischen Anwendungen im Zusammenhang mit dem Maschinenbetrieb.

Anhand der Literatur lassen sich zwei Kategorien von Maschinendaten unterscheiden: Produktions- und Prozessdaten. **Produktionsdaten** operationalisieren die Produktionsaufträge, wodurch diese geplant und gesteuert werden können. Beispiele hierfür sind Daten

[17] Ergänzt werden müssen in dieser Definition die immer häufiger in Maschinen und Anlagen eingebetteten Systeme (Embedded Systems) zur Ausführung von Überwachungs-, Steuerungs- oder Regelungsfunktionen bzw. allgemein zur Daten- und Signalverarbeitung.

über Produktionsmengen und Taktungen.[18] **Prozessdaten** umfassen die zum Betrieb einer Maschine notwendigen und durch den Betrieb direkt erzeugten Informationen. Hierzu zählen unter anderem Konfigurationsdaten für die Einrichtung einer Maschine sowie Daten zu live bereitgestellten, historischen oder bereits analysierten Messwerten, Auslastungen, Laufzeiten und Schaltspielen bzw. auch zu Störungs- oder Ausfallereignissen. Quellen für Prozessdaten sind sowohl dem Maschinenbetrieb als auch der Inbetriebnahme und der Instandhaltung von Maschinen zuzuordnen.

Die Nutzung von Maschinendaten konzentriert sich vorrangig auf die Produktion. Insbesondere die durch maschineneigene Sensoren bereitgestellten Daten sind ein fundamentaler Faktor in der Prozess- und Automatisierungstechnik. Sensordaten ermöglichen es, Rückschlüsse auf Prozessverläufe, die Qualität der zu fertigenden Produkte, Umweltbedingungen sowie auf Maschinen- und Anlagenzustände zu ziehen und schließlich einen störungsfreien Betrieb sicherzustellen.

Die Organisation von Maschinendaten erfolgt im Ursprung auf den Eigenschaften der digitalen Modelle von Produktionsanlagen. Entsprechende Modelle ermöglichen wie in Abbildung 6 dargestellt, die objektorientierte Beschreibung unterschiedlicher Anlagenaspekte wie bspw. aus Prozesssicht oder aus Sicht der Geometrie und Komponentenstruktur.

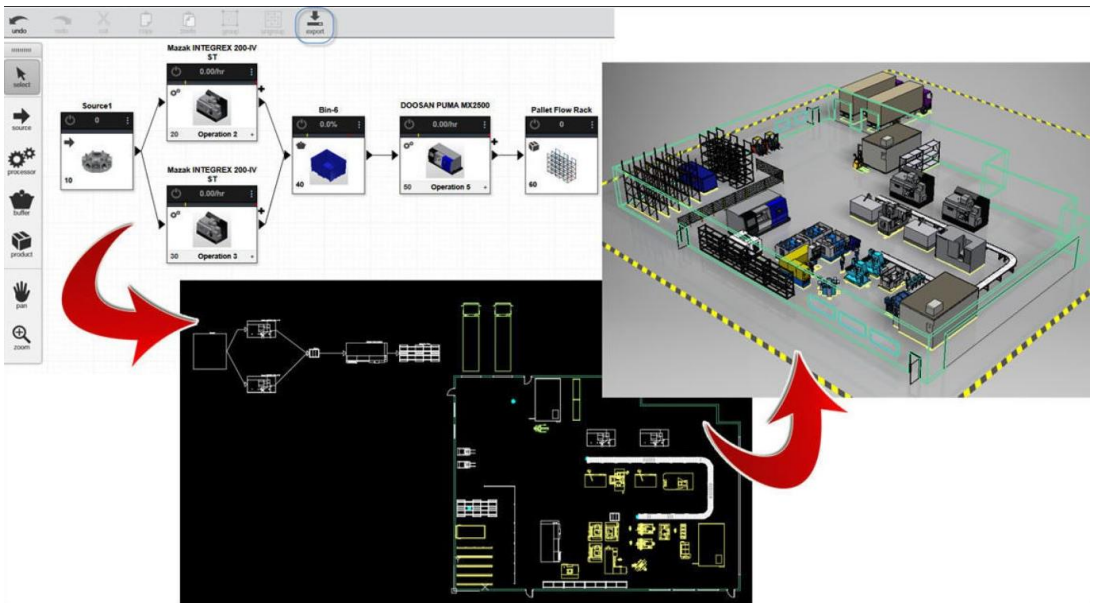


Abbildung 6: Beschreibung einer Produktionsanlage anhand unterschiedlicher Modelle (Quelle: Autodesk, 2019)

[18] Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf den Prozessdaten. Produktionsdaten sind stark von der Ausgestaltung unternehmensindividueller Produktionssysteme abhängig. Sie geben nur indirekt Aufschluss über maschinenrelevante Informationen speziell für Maschinenhersteller.

Für die Entwicklung von Anlagenmodellen wird i.d.R. auf Datenbanken zurückgegriffen, die über Objekte als Repräsentationen für Maschinen und für diverse, informationsrelevante Maschinen- und Anlagenkomponenten (Sensoren, eingebettete Systeme usw.) verfügen. Die Verknüpfung dieser Objekte erfolgt im Regelfall grundlegend neu, vorrangig in funktionaler Objektreihenfolge und damit ohne Bezug zum Produktmodell, der in der Anlage eingesetzten Maschinen (vgl. Seitz, 2015, S. 224 ff.; Schwips, 2015; Kletti, 2007, SS. 104-105). Dabei werden die Anlagenobjekte durch eigenschaftsbehaftete Knoten in der Anlagenstruktur repräsentiert. Produktstrukturinformationen wie die Beziehungen zwischen informationsrelevanten Produktkomponenten werden wie bereits angesprochen für die Planung solcher Anlagenstrukturen aktuell nur unzureichend genutzt.

Die entwickelten Anlagenmodelle sind unabhängig voneinander in den verschiedenen IT-Systemen der Produktion wie bspw. SCADA oder CMMS eingebettet. Sie werden unter Einbezug von Maschinendaten zweckbezogen für die Anlageninbetriebnahme, die Produktionsplanung und -steuerung sowie für die Anlageninstandhaltung genutzt.

Die durch maschinen- und produktionszugehörige Systeme generierten Maschinendaten sind stark heterogen hinsichtlich ihrer Menge aber vor allem auch bzgl. der für die Datenspeicherung und -kommunikation eingesetzten Kodierung und Strukturierung. So sind die für die Echtzeitsteuerung von Maschinen ausgetauschten Daten, mit dem Ziel einer schnellen Kommunikation und Datenauswertung, typischerweise binär kodiert. Demgegenüber werden für die permanente Speicherung von Sensormesswerten je nach Anforderungen Datentypen für Fest- oder Gleitkomma verwendet. Entsprechende Messwertdaten werden für gewöhnlich nach deren zeitlicher Messfolge, objektbezogen, d.h. z.B. einem konkreten Sensor zugeordnet, strukturiert organisiert und in spezialisierten Zeitreihendatenbanken gespeichert. Obwohl die Datensätze, die in einer solchen Datenbank geschrieben werden, im Allgemeinen klein sind, gibt es für gewöhnlich eine große Anzahl von Datensätzen, und die Gesamtdatenmenge kann schnell wachsen. Prozessdaten über Ausfallereignisse bspw. können auf der Basis von Zeichenketten oder teils komplexer Datentypen in semistrukturierter Form in bspw. CSV- oder XML-Dateien gespeichert werden. Darüber hinaus ermöglichen Applikationen zur Überwachung und Steuerung technischer Prozesse oder für Instandhaltungsaufgaben die Speicherung, das Management und die Verarbeitung verschiedenartiger und unterschiedlich kodierter und strukturierter Maschinendaten.

Entscheidungen über die Kodierung und Strukturierung basieren nicht zuletzt auf der Auswahl proprietärer oder neutraler Modelle für Maschinendaten, die über fest definierte oder frei konfigurierbare Datenschemata verfügen. Diese sind entweder ein fester Bestandteil standardisierter Protokolle für die Industriekommunikation wie bspw. *MTConnect,*

Profibus, *CC-Link, CoAP* oder *Modbus* oder deren Festlegung erfolgt im Zusammenhang mit der Entwicklung von Datenbanken, Dateiformaten (bspw. CSV oder XML-basierte Dokumente) bzw. auch bei der Adaption von Kommunikationsarchitekturen wie bspw. *OPC UA* (vgl. Russom, 2007).

Mit Blick auf *Industrie 4.0* und dem damit verbundenen Ziel, Maschinendaten prozessweit nutzbar zu machen, ist die Standardisierung der Kommunikationsschnittstellen speziell in der Produktion von außerordentlicher Wichtigkeit. Dabei im Fokus steht insbesondere die (Weiter-)Entwicklung einheitlich in der Industrie anerkannter, modellbasierter Schnittstellentechnologien, die Informationen über Maschinen- bzw. Anlagenstrukturen anhand strukturierter Knoten in einem Adressraum objektorientiert bereitstellen. Das Vokabular und die Semantik zur eindeutigen Beschreibung entsprechender, zur Datenabfrage verfügbarer Objekte und deren Beziehungen werden häufig organisationsgetrieben spezifiziert und in Form von Informationsmodellen[19] öffentlich dokumentiert. Beispiele hierfür sind die im Forschungsprojekt *ProDok 4.0* entwickelte, grundlegende Ontologie für Maschineninformationen *(dictaJet Ingenieurgesellschaft mbH, 2018)* oder die *Companion Specifications* für *OCP UA* für verschiedene technologische Anwendungsgebiete – exemplarisch hierfür ist die vom VDMA entwickelte *OPC UA Companion Specification* für Robotik und industrielle Bildverarbeitung (VDMA, 2018). Eine wesentlich allgemeinere Spezifikation eines Informationsmodells vertreten das *BMWi* und die *Plattform Industrie 4.0* im Konzept der Verwaltungsschale einer *Industrie 4.0*-Komponente. Die Verwaltungsschale beschreibt das digitale Abbild einer Industrie 4.0-Komponente anhand klassenzugehöriger Merkmale, über die alle Industrie 4.0-Komponenten gleichermaßen verfügen (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2016, S. 26 ff.) – ein Beispiel hierfür ist das von Arndt (2017) bereitgestellte Referenzmodell für Sensoren.

Standardisierte Kommunikationsschnittstellen besitzen das Potenzial, die Integration von Maschinendaten in die digitalen Prozesse der verschiedenen Produktlebensphasen zu unterstützen und zu vereinfachen (vgl. Spath & Dangelmaier, 2016, S. 6; VDI, 2015, S. 23). Die Perspektiven gehen dabei weit über die Ansätze aktueller Lösungen zur Umsetzung von PLM hinaus: Aus der vom *PDM | PLM Competence Center des Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik*, der *CONTACT Software GmbH* und der *VDI-Gesellschaft Produkt- & Prozessgestaltung* gemeinsam veröffentlichten Studie geht

[19] Ein **Informationsmodell** ist ein Metamodell und spezifiziert die Regeln und Grundbausteine einer Kommunikationsschnittstelle. Informationsmodelle mit standardisiertem Vokabular und Semantik erlauben eine weithin einheitliche und korrekte Interpretation von Maschineninformationen. Deren Einsatz verringert das Risiko für semantische Fehlinterpretationen und für Irrtümer die bspw. beim manuellen Mapping unterschiedlicher Informationsmodelle auftreten können. Darüber hinaus entfällt der Aufwand für die semantische Normalisierung nicht standardisierter Informationsmodelle, die jeweils individuelle Schnittstellenlösungen erfordern.

hervor, dass sich die befragten Studienteilnehmer einig sind, besonders unverarbeitete Sensordaten in Cloud-Lösungen speichern zu wollen (vgl. Müller et. al, 2019, S. 116). Eine gezielt-aufgabenspezifische Datenauswahl wird gar nicht in Betracht gezogen, um nur eine geringe Datenmenge kommunizieren und verarbeiten zu müssen. Darüber hinaus lässt sich das Potenzial unternehmensübergreifend-bereitgestellter Maschinendaten, unter Einbeziehung von Zuliefererkomponenten wie kommunikationsfähiger Module, noch gar nicht abschätzen. Damit verbunden sind Gedanken darüber, wie sich etwa maschinenübergreifende Störungsmuster durch bis dato unbekannte Wechselwirkungen zwischen Maschinenkomponenten erkennen lassen und wie sich das Wissen über solche Störungsmuster mit anderen Maschinenbetreibern teilen lässt (siehe Pfeffer et al., 2015).

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass die der Produktentstehung zur Verfügung gestellten Maschinendaten den sog. Felddaten zuzuordnen sind. Felddaten kodieren nach der Definition von Bertsche et al. (1998, S. 41) speziell die während der Produktnutzung auftretenden Ereignisse in Form von Störungs- und Fehlermeldungen aus Reklamationen oder Instandhaltungs-, Service- und Erfahrungsberichten. Aus diesen lassen sich (teilweise aufwendig) produktrelevante Aspekte primär für die herstellereigenen Qualitäts-, Marketing- und Dienstleistungsprozesse ableiten (siehe Schmitt & Pfeifer, 2015; Wellsandt et al., 2015; Edler, 2001). Letztendlich ist für die als Felddaten interpretierbaren Maschinendaten ein auf Maschinenherstellerseite umfassendes und ganzheitliches Management notwendig, das vor allem konkrete, organisatorische und technische Maßnahmen zur Erfassung, Kommunikation, Speicherung, Verarbeitung und Nutzung von Felddaten unterstützen muss. Schmitt & Pfeifer (2015, S. 249 ff.) kritisieren in diesem Zusammenhang einen in der Praxis vorherrschenden, mangelhaft-systematischen Umgang mit den Daten und eine übertriebene Technologiefokussierung. Eine systematische Herangehensweise erfordert Managementwerkzeuge wie das von Klement et al. (2019) entwickelte Portfolio zum Vergleich von Datenanalyseprojekten in der Produktentwicklung.

2.4 Integrationsansätze für Maschinendaten

Die Nutzung von Maschinendaten in der Produktentstehung erfordert deren Integration in den Daten- und Prozessbereich von Maschinenherstellern. Datenintegration ist nach Mertens (2013, S. 14) allgemein durch das Zusammenführen von Datenbeständen gekennzeichnet, mit dem Ziel, dieselben Daten unmittelbar für verschiedene Aufgaben nutzbar zu machen. Bei der Datenintegration werden vorhandene Datenquellen in ein neues, umfassendes System eingebunden, das den Benutzern einen einheitlichen Zugriff auf die verschiedenen häufig lokal verteilten und oft heterogenen Datenbestände ermöglicht. Dabei sind die bestehenden Systeme weitestgehend zu erhalten, damit (lokale) Anwendungen,

die für diese Systeme entwickelt wurden, auch weiterhin ohne Veränderung eingesetzt werden können (vgl. Stefan, 2002, S. 191).

Grundlegend kann Datenintegration in Anlehnung an ein klassisches Dreischichtenmodell[20] der Softwareentwicklung über mindestens eine von drei Integrationsebenen erfolgen, die in Entsprechung zur Präsentations-, Applikations- und Datenschicht stehen (vgl. Rossak & Filbry, 2013, S. 31, siehe Abbildung 7). Bei einer logischen Datenintegration auf Präsentations- und Applikationsebene verbleiben die Daten in ihren ursprünglichen Quellen und werden nur bei Anfrage – soweit zur Beantwortung der Anfragen notwendig – in einen integrierten Datenbestand[21] zusammengeführt; eine dauerhafte Speicherung der integrierten Daten ist dabei nicht vorgesehen. Diese Art der Integration findet in reiner Form in föderierten Datenbanksystemen ihren Ausdruck. Bei einer physischen Datenintegration auf Datenebene werden die Daten kopiert und zusammen in einer neuen Datenbank abgelegt (vgl. Stefan, 2002, S. 190).

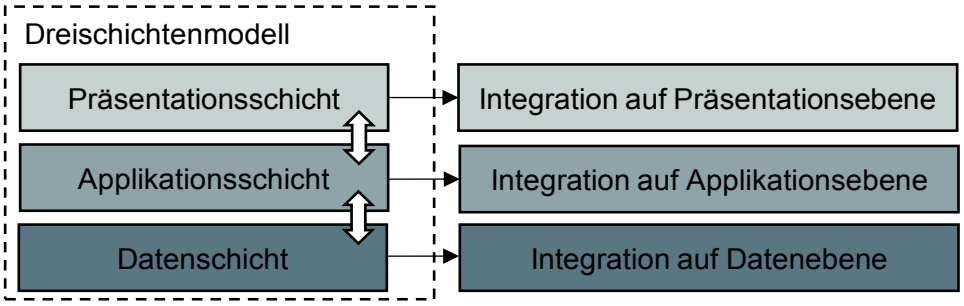


Abbildung 7: Dreischichtenmodell kontra Integrationsebenen

Für die Datenintegration existieren unterschiedliche Integrationsarchitekturen, Kommunikationsstandards und -technologien (Protokolle, Datenaustauschformate, Programmierschnittstellen (→ *API*) usw.) sowie IT-Lösungen, die je nach Integrationsanforderungen und Gestaltung der datenbereitstellenden IT-Systeme zum Einsatz kommen. *Enterprise Service Bus* bspw. ist eine Netzwerkarchitektur, welche die Integration verteilter Dienste innerhalb der Anwendungslandschaft eines Unternehmens unterstützt. Weiterhin sind *REST* und *SOAP* zwei bekannte Technologievertreter für die Online-Datenübertragung, die definieren, wie APIs, mit denen Daten zwischen Webanwendungen übertragen werden können, erstellt

[20] **Schichtenmodelle** sind ein häufig angewandtes Strukturierungsprinzip für die Architektur verteilter Softwaresysteme. Dabei werden verschiedene Funktionalitäten oder Komponenten eines Softwaresystems konzeptionell jeweils einer Schicht zugeordnet. Schichtenmodelle wie das speziell für PLM vom *Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik* vorgestellte *Engineering Operating System* zeichnen sich aufgrund ihrer logisch getrennten Schichten durch eine reduzierte Komplexität sowie eine hohe Modularität, Anpassbarkeit, Erweiterbarkeit, Wartbarkeit und Portabilität aus (vgl. Steiner, 2017, S. 112; Stark et al., 2014; Dunkel et al., 2008, S. 16).

[21] Der Begriff **Datenbestand** steht synonym für Datensatz und meint „eine Gruppe in bestimmter Hinsicht zusammengehöriger Daten einer Datei“ (Duden, 2016_2).

werden. Außerdem unterstützen sowohl proprietäre als auch offene Datenaustauschformate die Schaffung von PLM-Integrationen. So werden für den Austausch von Produktdaten über Unternehmensgrenzen hinweg mehrheitlich teilstrukturierte Dateien eingesetzt, basierend auf unterschiedlichen, produktneutralen und frei konfigurierbaren oder fest definierten, d.h. standardisierten Datenmodellen. Etabliert Datenmodellen sind bspw. das vom Verein *ProSTEP iViP* erarbeitete *Standard for Exchange of Product Model Data* (STEP) nach DIN EN ISO 10303 und das ursprünglich von der Firma *Siemens* entwickelte *Jupiter Tesselation* (JT) nach ISO 14306. Darüber hinaus kann als IT-Lösung zur Datenintegration eine Middleware Anwendung finden. Lt. Abts & Mülder (2017, S. 147) ist eine solche Middleware eine Softwarelösung, die als zentrale Daten- und Prozessschnittstelle Dienste für Funktionsaufrufe, Netzwerkzugriffe, Transaktionsausführungen oder zur Schnittstellenverwaltung anbietet, um den Informationsaustausch zwischen verteilten Systemkomponenten zu unterstützten. Eine Middleware ist als separate Schicht in die Integrationsarchitektur eingefügt, um als zentrale Instanz bilaterale Beziehungen zwischen den einzelnen, datenbereitstellenden IT-Systemen zu vermeiden, zugunsten einer einzigen Verbindung für alle an die Middleware angeschlossenen Systeme (vgl. Stark et al., 2014, S. 4; Burchardt, 2013, S. 63; zum Begriff der Interoperabilität siehe Kosanke, 2006).

Im Folgenden werden die Datenintegrationsansätze auf Präsentations-, Applikations- und Datenebene mit Beispielen für Maschinendaten und unter Verwendung einer Middleware vorgestellt, da diese für das in Kapitel 4 vorgestellte Schnittstellenkonzept relevant ist. Nichtsdestotrotz is die Integration von Maschinendaten in den PLM-Prozessbereich auch mittels anderer Integrationsarchitekturen, Technologien und IT-Lösungen möglich.

Die <u>Integration von Maschinendaten auf Präsentationsebene</u> erfolgt über die Middleware einer zentral bereitgestellten Präsentationsschicht (siehe Abbildung 8). Deren Benutzerschnittstelle dient als Einstiegspunkt für Interaktionen mit dem Gesamtsystem, dass sich aus den zu integrierenden, produktionszugehörigen IT-Systemen zusammensetzt. Durch die Datenintegration auf Präsentationsebene ist eine einheitliche Sicht auf die getrennten, aber logisch zusammenpassenden Einzelsysteme möglich. Diese behalten die Hoheit über die eigenen Applikationen und Daten. Die jeweiligen Benutzerschnittstellen indes können je nach Einsatzszenario vollständig durch die neue, einheitliche Benutzerschnittstelle abgelöst werden oder bleiben separat erhalten (vgl. Rossak & Filbry, 2013, SS. 32-34).

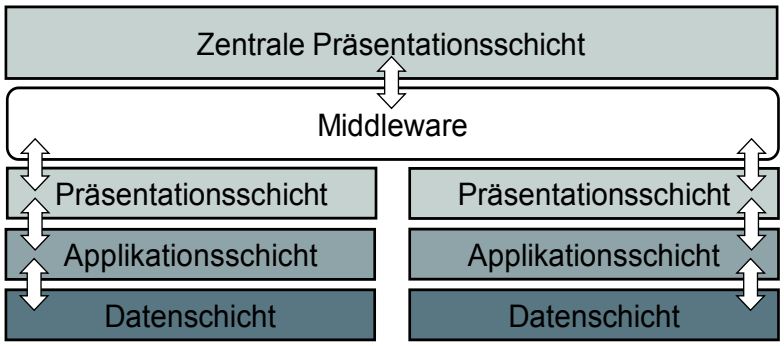


Abbildung 8: Systemarchitektur zur Datenintegration auf Präsentationsebene (Quelle: Conrad et al., 2005, S. 18)

Ein Beispiel für die Integration von Maschinendaten auf Präsentationsebene sind Softwareanwendungen für SCADA, die dazu dienen, Prozesse und Zustände von Produktionssystemen oder Kraftwerken zu visualisieren, zu überwachen und zu steuern. Die gezielt zur Visualisierung ausgewählten Maschinendaten werden direkt von den Sensoren oder der Maschinensteuerung abgerufen. Die Daten werden schließlich gemeinsam in einer aufgaben- und nutzergerechten Darstellung zusammengefasst, wie in Abbildung 9 für einer Windparkleitwarte gezeigt.[22]

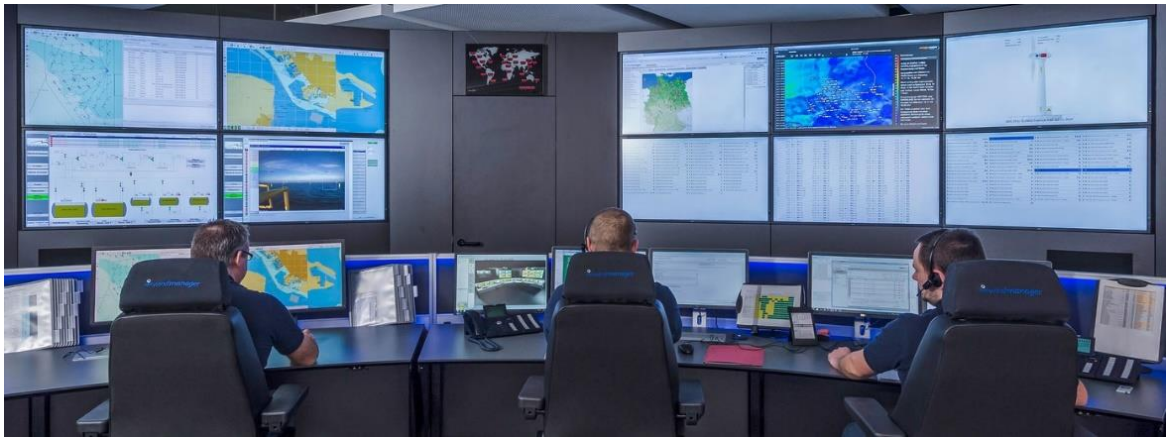


Abbildung 9: Beispiel einer mit SCADA-Funktionen ausgestatten Windparkleitwarte der Firma wpd windmanager GmbH & Co. KG (Quelle: wpd windmanager, 2019)

Anwendung findet die Integration von Maschinendaten auf Präsentationsebene auch organisationsübergreifend über digitale Plattformen. Diese stehen zunehmend im Mittelpunkt digitaler Geschäftsmodelle, wie von Arndt (2019) für die Firmen *TRUMPF GmbH & Co KG*, *Alfred Kärcher SE & Co. KG* und KAESER *Kompressoren SE*

[22] Anwendungsbeispiele für die Datenintegration auf Präsentationsebene bewegen sich lt. Rossak & Filbry (2013, S. 36) im Übergangsbereich zur Datenintegration auf Datenebene (siehe im weiteren Textverlauf), wenn die zu integrierenden Daten konsolidiert (d.h. verdichtet) werden oder die Integration auf der Basis eines gemeinsamen Datenmodells Anwendung findet wird.

ausführlich dargelegt. Über die plattformeigenen Benutzerschnittstellen ist bspw. ein zentraler Handel mit Maschinendaten bzw. ein durch datengetriebenes Management räumlich verteilter Maschinen möglich. Die Plattform *Kärcher Fleet* bspw. ist ein Flottenmanagementsystem, das die Vernetzung der bei den Kundenunternehmen eingesetzten Reinigungsmaschinen verfolgt. Die unmittelbar von den Reinigungsmaschinen stammenden Daten werden über die Plattform zusammengeführt und lassen sich über die plattformeigene Benutzeroberfläche darstellen, wie in Abbildung 10 gezeigt.

Abbildung 10: Ausschnitt der Benutzeroberfläche der Kärcher Fleet-Plattform (Quelle: Kärcher, 2019)

Plattformen ermöglichen es, Maschinendaten auch außerhalb der Unternehmensgrenzen von Maschinenbetreibern zu nutzen, wie das Beispiel der *Kärcher Fleet*-Plattform zeigt, sei es (lediglich) zur Datenvisualisierung oder für Aufgaben des Flottenmanagements. Entsprechende Plattformen lassen sich auch in der Produktentstehung einsetzen, um bspw. zu ermitteln, wo Maschinen weltweit im Einsatz sind, welche Laufzeiten diese besitzen und ob ggf. Störungsereignisse stattfanden.

Die Integration von Maschinendaten auf Applikationsebene erfolgt über die Middleware einer zentral bereitgestellten Applikationsschicht (siehe Abbildung 11). Über die darin eingebettete Logik (einer übergeordneten Prozessbeschreibung) können Anfragen aus einer gemeinsamen Präsentationsschicht entgegengenommen und an die verteilten Applikationen der zu integrierenden, produktionszugehörigen IT-Systeme weitergeleitet werden, um Daten aus den ebenfalls verteilten Datenbeständen der Datenschicht zu erhalten. Durch die Datenintegration auf Applikationsebene lassen sich Kommunikationsprozesse über verschiedene Kanäle effizient gestalten, indem nur die benötigten Daten passgenau abgefragt und zur Verfügung gestellt werden. Die Einzelapplikationen und die dazugehörigen Datenbestände verbleiben autonom (vgl. Rossak & Filbry, 2013, SS. 34).

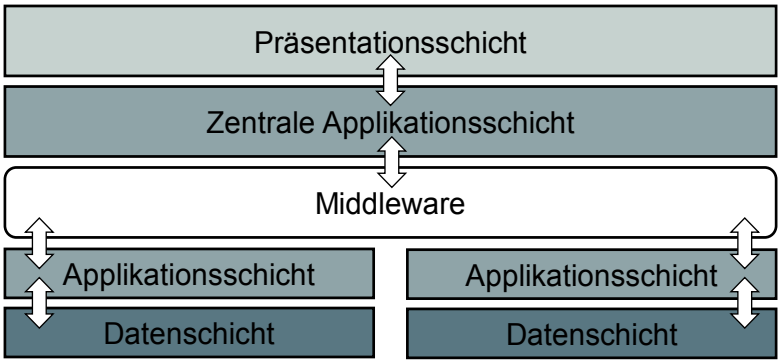


Abbildung 11: Systemarchitektur zur Datenintegration auf Applikationsebene (Quelle: Conrad et al., 2005, S. 18)

Für die Integration von Maschinendaten auf Applikationsebene sind systemübergreifende Kommunikationsarchitekturen auf der Basis standardisierter Middleware-Lösungen wie OPC UA besonders geeignet, da diese eine effiziente Organisation der Datenflüsse zwischen den Systemen, vor allem im Hinblick auf die Unterstützung system- und anwendungsübergreifender Prozesse ermöglichen (→ *Enterprise Application Integration*). Die Prozesslogik wird durch Services realisiert, die für gewöhnlich auf Clients und Servern verteilt sind (→ *Serviceorientierte Architektur*, Plattform Industrie 4.0, 2018; vgl. Rossak & Filbry, 2013, S. SS. 42–43; OPC Foundation, 2017).

Ein Anwendungsbereich für die Integration von Maschinendaten auf Applikationsebene zielt auf die Umsetzung der sog. ‚intelligenten' Produktion, die nicht zuletzt unter dem Begriff *Industrie 4.0* diskutiert wird. In einem von proALPHA (2019) beschriebenen Anwendungsfall sind Applikationen für das *Enterprise Resource Planning* auf verzögerungsfrei übertragende Maschinendaten für reaktionsschnelle Anpassungen der Produktion angewiesen. Müssen Daten aus einer Vielzahl von Quellen und ggf. in verschiedenen Formaten erfasst werden, bedarf es einer Middleware zur zentralen Abfrage und anschließenden Konvertierung und Zusammenführung der Daten. Vorteile einer solchen, bspw. mittels *OPC UA* implementierten Lösung sind, dass ERP-Applikationen nicht über alle notwendigen, spezifischen Kommunikationsschnittstellen verfügen müssen und dass datenbezogene Aufgaben ausgelagert sind, wodurch die Flexibilität des Kommunikationssystems insbesondere gegenüber Veränderungen erhöht wird.

Die zuvor angesprochenen Plattformen im Zusammenhang mit digitalen Geschäftsmodellen sind ebenfalls Instrumente für die Integration von Maschinendaten auf Applikationsebene. So verfolgt bspw. die Firma KAESER Kompressoren SE ein Betreibermodell für Kompressoren und Druckluftanlagen, bei dem KAESER als Anlageneigentümer für die Inbetriebnahme und den Betrieb verantwortlich ist und die Kunden ausschließlich für die verbrauchte Druckluftmenge bezahlen. Für den Service erfasst KAESER Maschinendaten

in Bezug auf Temperatur, Leistung und Volumenströme der weltweit verteilten Kompressoren und Druckluftanlagen, deren Einsatzfähigkeit durch eine durch Datenauswertung getragene Zustandsüberwachung und vorausschauende Instandhaltung dauerhaft erhöht wird. Abbildung 12 zeigt die am Plattformkonzept von KAESER beteiligten Applikationen. Für die Datenerfassung und -auswertung werden Applikationen der Firma SAP genutzt und als Plattformapplikation (Kernstück der zentralen Applikationsschicht) dient eine Cloudlösung der Firma T-Systems. Als Middleware steht *OCP UA* zur Verfügung, um die Kommunikation zwischen den Kompressoren bzw. Druckluftanlagen mit der Plattform zu bündeln und zu vereinheitlichen (KAESER, 2019; T-Systems, 2019; vgl. T-Systems, 2018, S. 34).

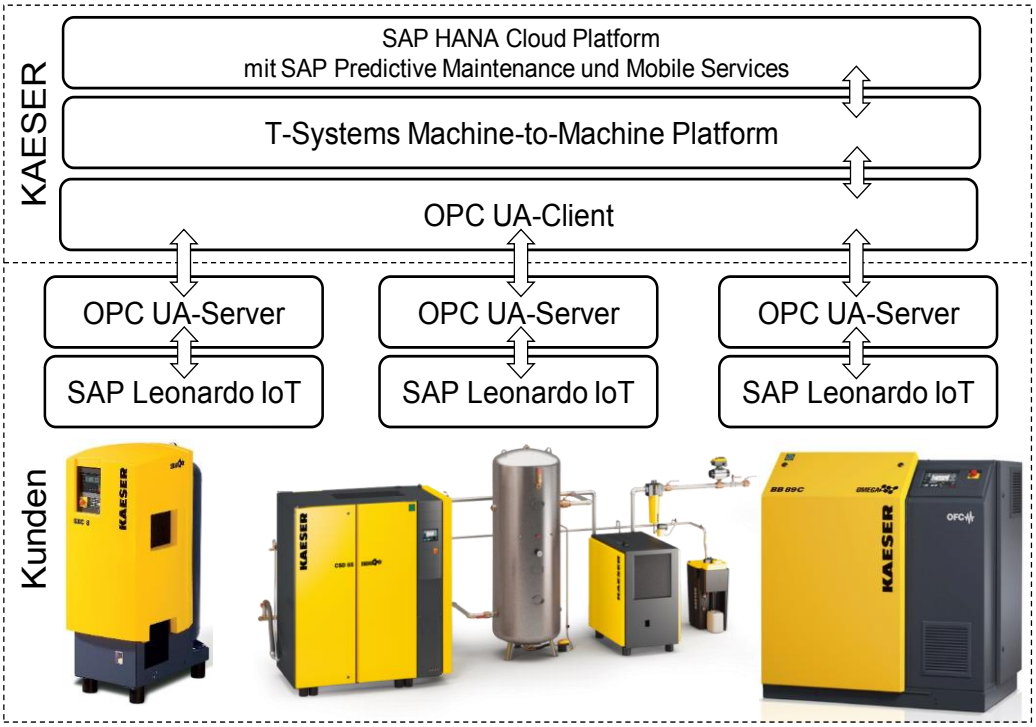


*Abbildung 12: Architektur der KAESER Kompressoren SE für das Angebot „Druckluft-as-a-Service**

Die <u>Integration von Maschinendaten auf Datenebene</u> erfolgt über die Middleware einer zentral bereitgestellten Datenschicht (siehe Abbildung 13). Es handelt sich um den wohl bekanntesten und am häufigsten eingesetzten Integrationsansatz. Dabei werden einzelne, verteilte Datenbestände dauerhaft zu einem konsolidierten Datenbestand zusammengeführt, auf den infolge verschiedene Applikationen gemeinsam zugreifen. Die ursprünglichen Datenbestände können je nach Einsatzszenario erhalten bleiben oder vollständig in dem neuen Bestand aufgehen (vgl. Rossak & Filbry, 2013, S. SS. 35-37).

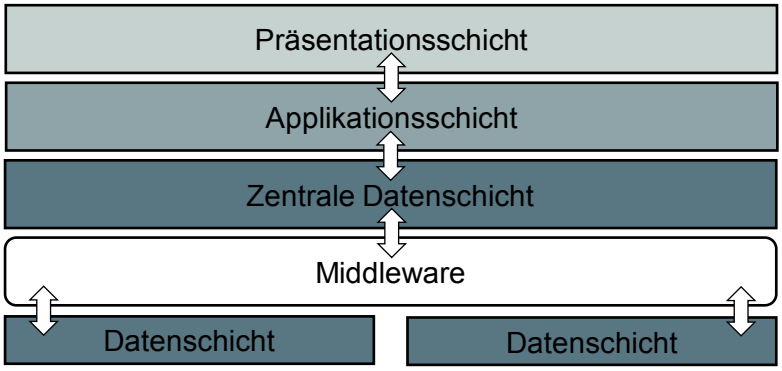


Abbildung 13: Systemarchitektur zur Datenintegration auf Datenebene (Quelle: Conrad et al., 2005, S. 18)

Je nach der Zielstellung der Datenintegration können verschiedene Strategien verfolgt werden: Bspw. kann nach der Persistenz der zu integrierenden Daten zwischen materialisierter bzw. physischer und virtueller Integration unterschieden werden. Bei der materialisierten Integration erfolgt die Datenspeicherung dauerhaft in einem neuen einheitlichen und konsolidierten Datenbestand. Bei einer virtuellen Integration verbleiben die Daten in ihren ursprünglichen Quellen und werden nur bei Anfragen an den integrierten Datenbestand – soweit zur Beantwortung der Anfragen notwendig – temporär zusammengeführt; nach dem Gebrauch werden die Daten wieder verworfen. Darüber hinaus lassen sich Fusion und Mapping als Integrationsstrategien unterscheiden: Fusion zielt auf die komplette Verschmelzung vorgegebener Einzeldatenbestände (Quellsysteme) mit der Aufgabe, alle enthaltenen Informationen vollständig, korrekt und redundanzfrei in einem neuen Datenbestand (Zielsystem) abzubilden. Mapping zielt indes auf die ausschnittsweise Abbildung ausgewählter Einzeldatenbestände und nur der für das Zielsystem relevanten Daten (vgl. Rossak & Filbry, 2013, SS. 48-49).

Bei der Integration von Maschinendaten auf Datenebene müssen neben der technischen vor allem die syntaktische, strukturelle und semantische Heterogenität der zu integrierenden Datensysteme (Datenbankkonzepte und -modelle) überwunden werden, wodurch speziell semantische Informationen verloren gehen können. Darüber hinaus stellen auch die autonome Verwaltung der Einzeldatenbestände sowie die logische und physische Verteilung von Daten, deren Menge, Aktualität, Detailliertheit, Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Redundanz, Widersprüchlichkeit (Inkonsistenz) usw. mit jeder Integrationsaufgabe neue und individuell zu lösende, da systemspezifische Herausforderungen dar. Diese sind jedoch durch Standards wie das Modellierungskonzept der *Semantische Allianz für Industrie 4.0* (SemAnz40, 2017) oder durch individuelle Lösungsansätze wie das von Arndt (2017) vorgestellte Referenzintegrationsdatenmodell für Sensoren beherrschbar. Datenintegration

auf Datenebene erfolgt regelbasiert und häufig nur teilautomatisch durch den Beziehungsaufbau zwischen den Elementen der zu integrierenden Einzeldatenbestände (vgl. Stark et al., 2014; Lee & Suh, 2009; Rossak & Filbry, 2013, S. 24 ff.; Conrad, 1997).

Aus der Vielfalt möglicher Integrationsbeispiele für Maschinendaten auf Datenebene sind im Folgenden zwei ausgewählte beschrieben: Im ersten Beispiel demonstrieren Arndt et al. (2015) die Integration von Engineering- und Maschinendaten für eine halbindustrielle Versuchsanlage. Als Middleware dient eine am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD für CAD- und Virtual Reality-Applikationen entwickelte Kollaborationsplattform, in der die für die Anlagenvisualisierung notwendige Baustruktur vorgehalten wird. Im hierfür angewendeten Datenmodell verfügt jeder Strukturknoten für eine Anlagenkomponente über eine zusätzliche ID als Fremdschlüsselattribut, anhand der dieselbe Anlagenkomponente im Maschinendatenbestand einer SCADA-Applikation eindeutig identifiziert werden kann (Mapping). Durch diese bilateralen Verknüpfungen – eine lose Kopplung der Datenmodelle der an der Datenintegration beteiligten PDM- und SCADA-Applikationen – lassen sich anhand der Kollaborationsplattform ausgewählte, durch Maschinendaten kodierte Informationen zu Prozessgrößen abrufen und auf 3D-Objekte in Virtual Reality abbilden. Das Visualisierungskonzept gestattet schließlich auch die virtuelle Integration von live-erfassten und historischen Maschinendaten, sodass aktuelle bzw. gespeicherte Informationen zu Prozessparametern (z.B. die aktuelle Strömungsgeschwindigkeit und Temperatur eines Fluids in einem Rohr) dargestellt werden können.

Die gemeinsame Darstellung von Engineering- und Prozessinformationen ermöglicht es, komplexe Fragestellungen domänenübergreifend zu beantworten. Die Frage nach der prozessualen Verbindung räumlich entfernter Anlagenkomponenten ist ebenso möglich wie die Frage nach deren Nutzungsfolge und Betriebsbelastung, die sich aus dem Prozessverlauf ergeben. Störungen lassen sich wie in Abbildung 14 gezeigt mithilfe kombinierter Engineering- und Prozessdaten visuell schnell lokalisieren und Entscheidungen zu deren Behebung gezielt unterstützen, indem kontextbezogen alle notwendigen Informationen zur Verfügung stehen. Die Verfügbarkeit technischer Anlagen wird dadurch gesteigert und technische Veränderungen sind leichter zu realisieren. Ein umfassendes Szenario hierzu ist durch Pfeffer et al. (2015) beschrieben.

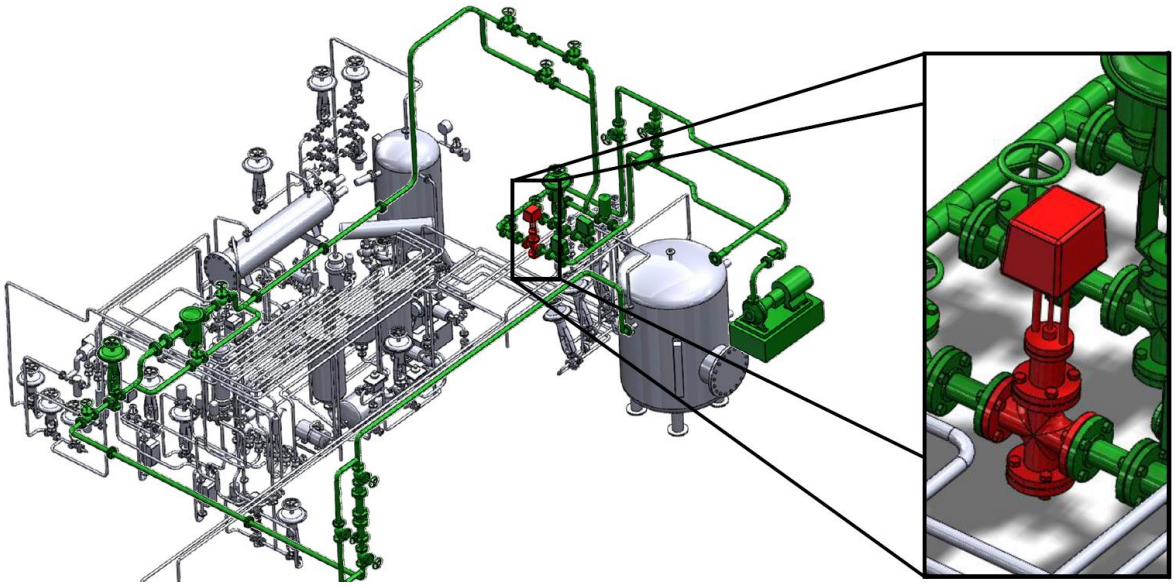


Abbildung 14: Markierung des defekten Ventils (rot) im Teilprozess (grün) einer Versuchsanlage

Im zweiten Beispiel werden Maschinendaten zur Realisierung eines Digitalen Zwilling-Konzepts verwendet. Hierbei wird neben der Maschine (als reale Produktinstanz bzw. Realer Zwilling) ein konfigurationsgleicher Digitaler Zwilling (eine virtuelle Produktinstanz) bereitgestellt und mit den Daten des Realen Zwillings synchronisiert. Nach Kaul et al. (2019, S. 19) bzw. Muggeo & Pfenning (2015, S. 284) basiert ein solcher Digitaler Zwilling auf dem, ursprünglich aus den frühen Entwicklungsphasen stammenden, integrierten Systemmodell (→ *Model Based Systems Engineering*), welches wie im Fall von Sun et al. (2020, S. 6) als Grundlage zur Datenintegration genutzt wird: Im Detail dient ein, vom Systemmodell entkoppeltes, Datenmodell der gemeinsamen Integration von Produkt- und Maschinendaten in einen zentralen Datenbestand (Strategie: materialisierte Integration und Mapping). In dem Beispiel ist über den Digitalen Zwilling der Zugriff auf Entwicklungsartefakte aus der Produktentstehung möglich, um bspw. Impactanalysen oder Produktionsabläufe zu simulieren, die auf den spezifischen Einsatz des Realen Zwillings zugeschnitten sind.

Die Wahl einer Integrationsstrategie für Maschinendaten zur Realisierung des Digitalen Zwilling-Konzepts hängt immer von Einzelfallfaktoren ab: Diese bestimmen die bereits oben angesprochenen, individuell zu lösenden, systemspezifischen Herausforderungen. Bspw. können die für die Integration erforderlichen Maschinendaten je nach Datenmenge entweder akkumuliert (d.h. im Batch) oder wie von Banerjee et al. (2017) beschrieben, als Datenstrom für den Digitalen Zwilling bereitgestellt werden (→ *Smart Data*).

2.5 Zwischenfazit

Die in Kapitel 2.4 beschriebenen Beispiele zeigen, dass die Integration von Maschinendaten in den Prozessbereich von PLM grundsätzlich bspw. anhand einer Middleware-Lösung möglich ist, insofern die Daten- und Prozessschnittstellen zwischen Middleware und den datenbereitstellenden IT-Systemen klar definiert sind.[23] Aus Sicht des Autors ist daher festzustellen, dass unter dem technischen Gesichtspunkt betrachtet, d.h. bzgl. Integrationsarchitekturen, Kommunikationsstandards und -technologien sowie IT-Lösungen, kein dringender Forschungs- und Entwicklungsbedarf existiert, um offensichtliche Defizite zu beheben – im Gegenteil, es wird viel geforscht und entwickelt. Jedoch offenbart die Literatur zum Thema Maschinendatenintegration nach wie vor überwiegend offene Fragen: Es werden zwar sowohl die dringende Notwendigkeit der Datenintegration in verschiedene Prozessbereiche als auch die daraus erwachsenden Potenziale ausführlich und in zahlreichen Veröffentlichungen dargelegt, jedoch ohne dass das organisatorische WIE beantwortet wird (siehe z.B. Klostermeier et al., 2020; Haße et al., 2019; Dietz & Pernul, 2019; Lachenmaier et al., 2019; Saracco, 2019; Tao et al., 2019; Abramovici et al., 2018). Bis auf wenige Ausnahmen wie der von Lee & Suh (2009) vorgestellte Ansatz eines Datenmodells für den gesamten Lebenszyklus speziell für Maschinenwerkzeuge oder der von Cai et al. (2017) vorgestellte, datenbasierte Lösungsansatz zur Realisierung des Digitalen Zwilling-Konzepts, erfolgt die Integration von Maschinendaten ausschließlich für produktionsrelevante Systeme auf Maschinenherstellerseite (Bruno et al., 2020; D'Antonio et al., 2017; Yoo et al., 2016; Ben Khedher et al., 2011).

Die bis dato entwickelten Integrationslösungen sind, wie die Beispiele in Kapitel 2.4 zeigen, grundsätzlich spezifisch, d.h. diese sind nur beschränkt für einen bestimmten Organisationsrahmen (bspw. ein einzelnes Unternehmen und dessen Partner), für bestimmte Produkte bzw. Produktarten, Daten und Nutzungsszenarien gültig und daher nicht als einheitliches Schnittstellenkonzept zur Maschinendatenintegration in die Prozesse von Product Lifecycle Management anzusehen. Dies gilt sowohl für anwendungsnahe Lösungen wie die von der Firma KAESER Kompressoren SE, bei der die Integration ausgewählter Sensordaten an das unternehmensinterne SAP-System gekoppelt ist (T-Systems, 2016), aber auch für genormte Ansätze wie bspw. nach ISO 15926 (2007) speziell für die

[23] Eine zur Datenintegration eingesetzte Middleware kann sowohl über eine Modellgrundlage, die den Strukturzusammenhang und die Bedeutung der zu integrierenden Maschinendaten festlegt, als auch über integrationsunterstützende Applikationen und Daten verfügen. Gewisse Einschränkungen existieren in puncto Integration von Maschinendaten auf Präsentationsebene: Die temporär und hauptsächlich für Visualisierungszwecke integrierten Maschinendaten sind i.d.R. nicht für den Austausch mit anderen Systemen vorgesehen, d.h. die Interoperabilität zwischen Middleware und den datenbereitstellenden, PLM-relevanten IT-Systemen ist nicht zwingend erforderlich.

Datenintegration bei Öl- und Gasförderanlagen. Demgegenüber lassen sich Integrationslösungen wie bspw. *Mercedes-Benz Uptime* oder *SIEMENS MindSphere* aus Daten- und Prozesssicht mithilfe der öffentlich verfügbaren Informationen gar nicht beurteilen (Daimler, 2019; Siemens, 2020).

Es ist weiterhin festzustellen, dass die online oder in der Literatur beschriebenen Beispiele zur Datenintegration eine gänzlich unzureichende oder sogar vernachlässigte Schnittstellenbetrachtung zu PDM offenbaren. Datenaustauschformate wie STEP oder AutomationML sind auf den Austausch von Engineering-Daten in einer heterogenen Tool-Landschaft von domänen- und disziplinspezifischen Engineering-Werkzeugen spezialisiert. Durch sie ist unter anderem der Austausch von Produktstrukturinformationen möglich, jedoch originär ohne die Option, Strukturinformationen von Maschinen aus deren Betriebsphase mit der Produktstruktur durchgängig und konsistent miteinander zu verknüpfen. Das macht die Anpassung des Datenmodells wie im Fall AutomationML und die Bereitstellung eines darauf aufbauenden Integrationsprozesses notwendig. Das Ergebnis kann jedoch nur ein Kompromiss sein, der kaum alle hersteller- und betreiberseitigen Anforderungen erfüllen kann, ohne überhand zu nehmen oder zu komplex zu werden.

Die Antwort auf das organisatorische WIE erfordert die Definition eines produktartneutralen, produkt- und organisationsübergreifenden Standards einer Kommunikationsschnittstelle zur Integration von Maschinendaten in den PLM-Prozessbereich. Das bedeutet konkret, es bedarf eines konzeptionell-einheitlichen, von Maschinenherstellern und Maschinenbetreibern gemeinsam akzeptierten und genutzten Referenzprozess- und Referenzdatenmodells, die sich an die individuellen Bedürfnisse anpassen lassen, indem bspw. (1) hersteller- und betreiberseitig festgelegt werden kann, welche Daten zur Integration bereitgestellt werden und (2) welche Daten tatsächliche für eine Integrationsaufgabe notwendig sind, um abgefragt zu werden. Aus Punkt (1) eröffnet sich für die Maschinenhersteller und -betreiber die Möglichkeit, Einfluss auszuüben, um eigene Interessen durchzusetzen. Dadurch kann die in Kapitel 1.2 beschriebene organisatorische Informationsbarriere in gewissem Maß durchbrochen und die persönlichen Widerstände teilweise abgebaut werden. Punkt (2) hat zur Konsequenz, dass sich das für die Integration erforderliche Datenmodell ausschließlich aufgabenspezifisch gestaltet.

3 Arbeitsbereich

In der derzeitigen Forschung und wissenschaftlichen Debatte erfolgt eine anhaltende, jedoch unzureichende Auseinandersetzung

a) mit der in Kapitel 1.2 beschriebenen Thematik der Informationsbarriere zwischen Maschinenherstellern und -betreibern und anderen, in die PLM-Prozesse involvierter Parteien sowie
b) mit der in Kapitel 2.4 diskutierten Problemstellung zur Maschinendatenintegration. Dabei erschließen die proprietären d.h. individuell und unabhängig voneinander entwickelten Maschinendaten- und PLM-relevanten Kommunikationsschnittstellen nur bedingt die Möglichkeiten eines einheitlichen Schnittstellenkonzepts. Konzeptionelle Mängel hierfür sind:
    1. Die systematische Integration von Maschinendaten in den PLM-Prozessbereich ist aktuell nur unvollständig gelöst. Es mangelt speziell an einer produktartneutralen, produkt- und organisationsübergreifenden Strukturbeschreibung, anhand der Strukturinformationen von Maschinen aus deren Betriebsphase mit der Produktstruktur durchgängig und konsistent verknüpft sind.
    2. Der reproduzierbare und dokumentierte Aufbau gemeinsam strukturierter Maschinen- und Produktdaten als geordneter Bestand bzw. als einzelner Datensatz ist nur aufwendig möglich.
    3. Der durchgängige und organisationsübergreifende Austausch strukturierter Maschinen- und Produktdaten unterliegt keiner einheitlichen Prozessbeschreibung, die an die Prozesse der Produktentstehung und der Betriebsphase von Maschinen anknüpft.

Aus den genannten Ursachen folgt, dass die konsequente Nutzung von Maschinen- und Produktdaten außerhalb ihrer originären Prozessbereiche stark eingeschränkt ist. Maschinendaten sind in der Produktentstehung nur in unzureichendem Maß verfügbar. Gleiches gilt umgekehrt auch für Produktdaten in der Betriebsphase. Darüber hinaus bleiben Potenziale aus der Datenintegration ungenutzt.

a) Maschinenhersteller besitzen für gewöhnlich keinen unmittelbaren Zugang zu Informationen über die von ihren ausgelieferten Produkte, was zu deren Entfremdung führt. So bleiben bspw. undokumentierte Konfigurationsänderungen an Maschinen den Herstellern häufig für immer verborgen.
b) Die Weiterentwicklung aktueller und zukünftiger Maschinengenerationen erfolgt ineffizient, da aufgrund fehlender Maschinendaten – vor allem von Prozessdaten zur

tatsächliche Maschinennutzung – Anforderungen unvollständig bleiben bzw. gar nicht erkannt werden.

c) Demgegenüber stehen Maschinenbetreibern ausgewählte entwicklungsspezifische Informationen zur Verfügung, wodurch die Modellierung von bspw. Produktionsanlagen als cyber-physische Systeme außerordentlich stark unterstützt wird. Jedoch können Maschinenbetreiber nur begrenzt und im Einzelfall auf das Produktmodell und damit auf aktuelle Entwicklungsergebnisse einzelner Maschinen und deren Komponenten zugreifen.

d) Der Austausch strukturierter Daten mit anderen Maschinenbetreibern ist stark eingeschränkt.

Zielsetzung und Ableitung der Arbeitspakete

Im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit steht die Beschreibung eines einheitlichen Konzepts einer Kommunikationsschnittstelle zur Integration von Maschinendaten in den PLM-Prozessbereich. Durch das Schnittstellenkonzept sollen die zuvor aufgeführten, konzeptionellen Mängel aktueller Maschinendaten-PLM-relevanter Kommunikationsschnittstellen kompensiert werden. Zu diesem Zweck sind zur vollständigen Beschreibung des Schnittstellenkonzepts die folgenden Arbeitspakete definiert.

1. Eine produktartneutrale, produktübergreifende Strukturbeschreibung erfordert wie im Fall der *Industrie 4.0-Komponente* die Einführung eines virtuellen, abstrakten Stellvertreterobjekts für Maschinen und Maschinenkomponenten (→ *generisches Ressourcendesign*, als z.B. *Thing* oder *Asset;* siehe hierzu Reidt et al. (2017, S. 29)). Die Abstraktheit ermöglicht es, Probleme bei der Datenintegration durch bspw. semantische Heterogenitäten zu umgehen (vgl. Sinsel, 2020, SS. 23-24).
2. Anhand einer Struktur aus oben genanntem Stellvertreterobjekt ist eine logische, konsistente sowie organisationsübergreifende Zusammenführung bzw. Strukturierung von Maschinen und Maschinenkomponenten möglich. Ausgangspunkt für die Strukturierung sind die konfigurationsspezifischen Produktstrukturinformationen (wie im bereits angesprochenen Systemmodellbeispiel von Sun et al. (2020, S. 6) geschehen), für deren Austausch sich verschiedene proprietäre oder offenen Datenaustauschformate wie STEP oder AutomationML eignen (siehe Schroeder et al., 2016).
3. Eine für die Strukturverwaltung konzipierte Plattform als Middleware-Lösung ermöglicht eine dauerhafte Adressierung von Maschinen und Maschinenkomponenten als Ressourcen in den produktionsrelevanten IT-Systemen der Betriebsphase. Eine derartige Plattform ermöglicht darüber hinaus eine gleichzeitige Adressierung der Elemente in der Produktstruktur im PDM, wodurch eine Verbindung in den

PLM-Prozessbereich aufgebaut wird. Generische Schnittstellenelemente unterstützen die Anknüpfung an die spezifischen Daten- und Prozessschnittstellen von Maschinenherstellern und -betreibern.

4. Die Integration von Produkt- und Maschinendaten erfolgt schließlich auf der Grundlage der entwickelten produktartneutralen, produkt- und organisationsübergreifenden Strukturbeschreibung und unter Zuhilfenahme von modellbasierten Kommunikationstechnologien, um die Abfrage und den Austausch von Produkt- und Maschinendaten organisationsübergreifend zu organisieren.
5. Vervollständigt wird das Konzept durch einen Prozess, der die Abläufe zur Verwaltung der Strukturbeschreibung sowie zur Datenintegration formal beschreibt.

4 Das FELDKONZEPT

4.1 Konzeptübersicht

Die vorliegende Arbeit stellt sich der Herausforderung, die in Kapitel 3 beschriebenen konzeptionellen Mängel aktueller Kommunikationsschnittstellen zur Integration von Maschinendaten in den PLM-Prozessbereich systematisch mithilfe des FELDKONZEPTS aufzulösen. Das FELDKONZEPT ist ein Baustein, um den lt. VDI (2015, S. 6) notwendigen Informationsaustausch bzgl. Maschinendaten über Unternehmensgrenzen hinweg zu standardisieren.

Definition FELDKONZEPT
Das **FELDKONZEPT** ist die grundlegende Beschreibung einer einheitlichen Kommunikationsschnittstelle zur systematischen Integration von Maschinendaten in den Prozessbereich von PLM. Ermöglicht wird dies durch eine im FELDKONZEPT verankerte, produktartneutrale, produktübergreifende Strukturbeschreibung 1. zur organisationsübergreifenden, konsistenten Verknüpfung ausgewählter Produktstrukturinformationen mit Strukturinformationen von Maschinen aus deren Betriebsphase sowie 2. zur prozessunterstützt-reproduzierbaren und dokumentierten Erfassung und Bereitstellung ausgewählter und logisch gemeinsam integrierter Bestände aus Produkt- und/oder Maschinendaten (vgl. Arndt et al., 2016, S. 5).

Als Konzept wird nach Nehrenberg & Mainusch (2019) sinngemäß eine gemeinsame Idee verstanden, die es als Leidfaden bzw. Werkzeug einzusetzen gilt, um diese Idee im Anwendungskontext durch Ressourcen umzusetzen. Wesentlich sachbezogener bezeichnet Schneider (1997, S. 479) ein Konzept als „Planungsdokument, das aus den Grundlagen eines Vorhabens und seiner Ziele die Mittel und Wege definiert, mit denen diese Ziele erreicht werden können.“ Bezogen auf das FELDKONZEPT wurden die Grundlagen und Ziele in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt. Die „Mittel und Wege“ (Ressourcen) sind die mit neu eingeführten Begriffen benannten und im Nachfolgenden definierten und erläuterten Elemente des FELDKONZEPTS.

Abbildung 15 zeigt eine Übersicht des Begriffssystems für das FELDKONZEPT. Der allen Begriffen gemeinsame Präfix *Feld-* steht in Verbindung zur Feldebene (engl. Shopfloor) industrieller Fertigungssysteme (siehe Bök et al. (2020, S. 352 ff.)). In der Feldebene werden Maschinendaten in erster Instanz durch Sensoren erfasst, verarbeitet und kommuniziert (vgl. Heinrich et al., 2020, S. 5).

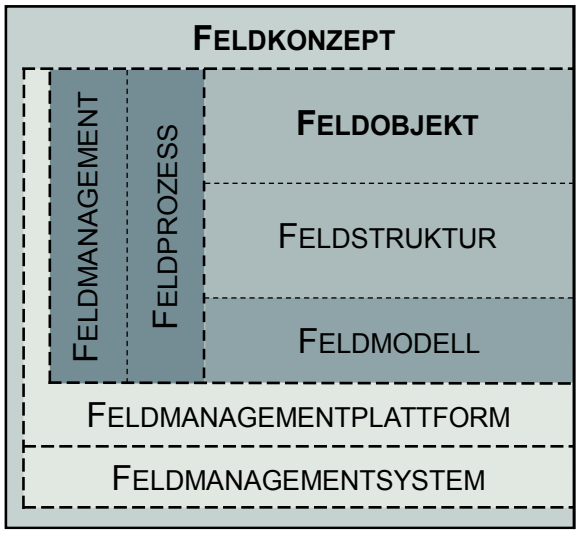


Abbildung 15: Begriffssystems für das FELDKONZEPT

Die zentrale Umsetzung des FELDKONZEPTS erfolgt durch das in dieser Arbeit neu eingeführte **FELDOBJEKT**, das als Stellvertreterobjekt für Maschinen und Maschinenkomponenten in der **FELDSTRUKTUR** organisiert ist. Die zielgerichtete Verwaltung der FELDSTRUKTUR sowie der Aufbau von **FELDMODELLEN** obliegt dem **FELDMANAGEMENT**, das durch den **FELDPROZESS** unterstützt wird und dessen informationstechnische Implementierung durch die **FELDMANAGEMENTPLATTFORM** erfolgt.

FELDOBJEKT

Das elementare Fundament des FELDKONZEPTS ist das FELDOBJEKT.

Definition FELDOBJEKT
Das **FELDOBJEKT** ist eine virtuelle, abstrakte, produkt- und produktartneutrale Repräsentation einer Maschine oder Maschinenkomponente, anhand der der serialisierte Artikel (im PDM) mit dessen physischen Pendant verknüpft ist.

Jeder Knoten einer digital beschriebenen Produktstruktur (inkl. der Produktkonfiguration *As-Maintained* für die aktuelle Baustruktur eine Maschine oder Produktionsanlage) kann durch jeweils ein FELDOBJEKT repräsentiert sein. Dies betrifft vor allem die für Maschinenhersteller und/oder -betreiber relevanten Maschinen und/oder Maschinenkomponenten und schließt explizit die Domänen Mechanik, Elektrik/Elektronik sowie Software ein. Eine solche Relevanz kann unterschiedlich motiviert sein. Primär und nachvollziehbarerweise sind Maschinen und/oder Maschinenkomponenten mit verfügbaren und kommunizierbaren Produkt- bzw. Maschinendaten von besonderem Interesse. Exemplarisch kann für jeden Sensor einer Maschine sowie für die Maschine selbst ein FELDOBJEKT existieren, wenn

deren Daten dem Maschinenhersteller oder anderen, in die PLM-Prozesse involvierten Parteien offiziell zur Verfügung gestellt und kommuniziert werden sollen.

Die Nutzung von FELDOBJEKTEN ist nicht auf sog. „smarte“ Maschinen oder Maschinenkomponenten begrenzt. Demzufolge kann bspw. auch ein Kugellager oder ein Strukturbauteil einer Maschine, die explizit keine eigenständigen Quellen für Maschinendaten sind, über ein FELDOBJEKT verfügen. Anhand dessen kann wie im Beispiel des Kugellagers die gemeinsame Analyse von Strukturzusammenhängen und Maschinendaten zu dem Ergebnis kommen, dass die Kombination des Kugellagers mit einer speziellen Welle für unterschiedliche Getriebe zu wiederholten Ausfällen führt: Es besteht eine Korrelation zwischen Lagerauswahl und Getriebeausfall. Durch eine nachfolgende, gemeinsame Analyse von lagerrelevanten Produkt- und Maschinendaten lassen sich die tiefer liegenden Ursachen für das Ausfallverhalten identifizieren.

Auch die Bedeutung einer Maschine oder Maschinenkomponente kann Anlass für die Nutzung eines FELDOBJEKTS sein, wenn diese bspw. systemkritisch ist und damit dessen Verhalten und Zustände in der Betriebsphase auch aus Herstellersicht von Interesse sind. Wie in Kapitel 1.1 auf S. 3 beschrieben trifft dies bspw. für Hersteller von Maschinen zu, die gleichzeitig auch deren Betreiber sind und somit für eine schnelle Instandsetzung verantwortlich sind.

FELDSTRUKTUR

Als Mehrwert für die Wissenschaft wird mit dem FELDKONZEPT eine produktartneutrale, produkt- und organisationsübergreifende Strukturbeschreibung bereitgestellt, die, wie unter anderem von der Plattform Industrie 4.0 (2015) ausdrücklich für die Umsetzung einer *Industrie 4.0* gefordert, ausgewählte Elemente der Produktstruktur konsistent mit den logisch-äquivalenten Elementen der aktuellen Baustruktur einer Maschine oder Anlage verknüpft. Das Verknüpfungsergebnis wird als FELDSTRUKTUR bezeichnet und konstituiert mithin eine organisationsübergreifende Basis zum Austausch von Produkt- und Maschinendaten.

Definition FELDSTRUKTUR

Die **FELDSTRUKTUR** repräsentiert ein virtuelles Geflecht aus Maschinen und Maschinenkomponenten als ein produkt- und organisationsübergreifender, logisch geordneter, konsistenter Zusammenschluss von FELDOBJEKTEN. Die FELDSTRUKTUR dient (1) der organisationsübergreifenden, konsistenten Verknüpfung ausgewählter Produktstrukturinformationen und Strukturinformationen von Maschinen aus deren Betriebsphase sowie (2) der prozessunterstützt-reproduzierbaren Erfassung und Bereitstellung integrierter Bestände ausgewählter und logisch gemeinsam strukturierter Produkt- und/oder Maschinendaten. Die FELDSTRUKTUR (oder ausgewählte) Teile davon sind die Mapping-Grundlage zur Datenintegration im Rahmen des FELDKONZEPTS.

Die FELDSTRUKTUR ist bzw. dient als eine strukturelle Schnittstelle, über die die verschiedenen, sich voneinander unterscheiden-könnenden Repräsentationen (Modelle) von Maschinen und Maschinenkomponenten, gespeichert und verwaltet im PDM und in den unterschiedlichen IT-Systemen der Betriebsphase, miteinander verknüpft sind (siehe Abbildung 16). Durch die FELDSTRUKTUR lassen sich ausgewählte, da feldrelevante, strukturelle und topologische Zusammenhänge von Maschinen und Maschinenkomponenten digital abbilden. Entsprechende Produktinformationen können zur Beschreibung größerer/übergeordneter Strukturen wie für Produktionsanlagen, Fabriken oder für global verteilte Maschinennetzwerke verwendet werden, um bspw. den Aufbau, die Optimierung und das Management komplexer, verteilter Produktions- und Logistiksysteme zu ermöglichen.[24] Darüber hinaus lassen sich auf der Grundlage der FELDSTRUKTUR aus Maschinenherstellersicht Änderungen von Maschinenkonfigurationen dokumentieren und somit nachverfolgen.

[24] Komplexe, unternehmensübergreifende Produktions- und Logistiksysteme sind mehrheitlich nicht das Ergebnis zentraler Planung. Es existiert daher auch kein einzelnes Modell inkl. Strukturbeschreibung, das ein solches System gesamtheitlich abbildet. Eine übergeordnete Strukturbeschreibung lässt sich jedoch durch die Zusammenführung der (Teil-)Strukturen einzelner und voneinander getrennter Produktionssysteme, unter Zuhilfenahme der FELDSTRUKTUR ableiten.

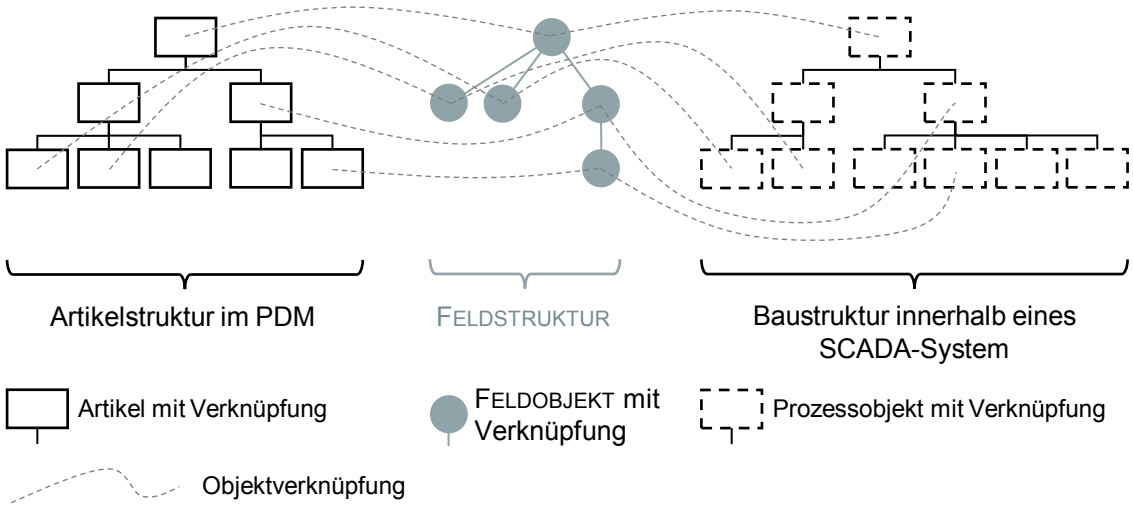


Abbildung 16: Die FELDSTRUKTUR als strukturelle Schnittstelle am Beispiel einer einfachen Maschinenkonfiguration

Die FELDSTRUKTUR ist unabhängig von räumlichen, organisatorischen und technischen Barrieren wie bspw. den heterogenen Kommunikationsschnittstellen zwischen global verteilten, organisations- und netzwerkübergreifenden Maschinen (vgl. Arndt et al., 2016, S. 629). Die durch die FELDSTRUKTUR beschriebenen Zusammenhänge sind losgelöst von

1. der individuellen Produkt- und Baustruktur der miteinander verknüpften Maschinen und Maschinenkomponente, indem unter anderem Hierarchie und Verknüpfungsbeziehungen nicht eins zu eins übernommen werden müssen, sowie von
2. deren realen Nachbarschaftsbeziehungen organisationsinterner und -übergreifender Infrastrukturen.

Die von Maschinenherstellern teilweise vorausgeplante und initial angelegte und durch Maschinentreiber ergänzte und aktualisierte FELDSTRUKTUR verfügt zu keinem Zeitpunkt über einen abgeschlossenen Aufbauzustand; sie erweitert sich mit jeder neuen Instanz einer Maschine oder Maschinenkomponente. Die Planung einer solchen dynamischen Struktur (aus Millionen oder sogar Milliarden von FELDOBJEKTEN) ist insbesondere und ausschließlich mithilfe der im Engineering etablierten, modellgetriebenen Entwicklungsstrategien und -werkzeuge vollkommen ausgeschlossen. Der Aufbau und die Verwaltung einer konsistenten FELDSTRUKTUR erfordern sowohl eine fundierte Organisationsgrundlage, wie sie das FELDKONZEPT liefert, als auch eine durchgängige Computerunterstützung, um die außerordentlich große Menge an Strukturinformationen leistungsfähig, sicher und fehlerfrei zu beherrschen.

Abbildung 17 zeigt das übersichtliche Beispiel einer FELDSTRUKTUR für ein Bearbeitungszentrum. Die FELDSTRUKTUR verfügt über vier miteinander verknüpfte, als Knoten dargestellte FELDOBJEKTE. Das FELDOBJEKT auf der hierarchisch ersten Ebene repräsentiert

das Bearbeitungszentrum als solches. Damit verknüpft sind die FELDOBJEKTE der zweiten Ebene für den Antrieb, die Werkzeugspindel sowie für die Steuerung des Bearbeitungszentrums – diese Komponenten sind Quelle für Maschinendaten und daher relevant zur Repräsentation via FELDOBJEKT.

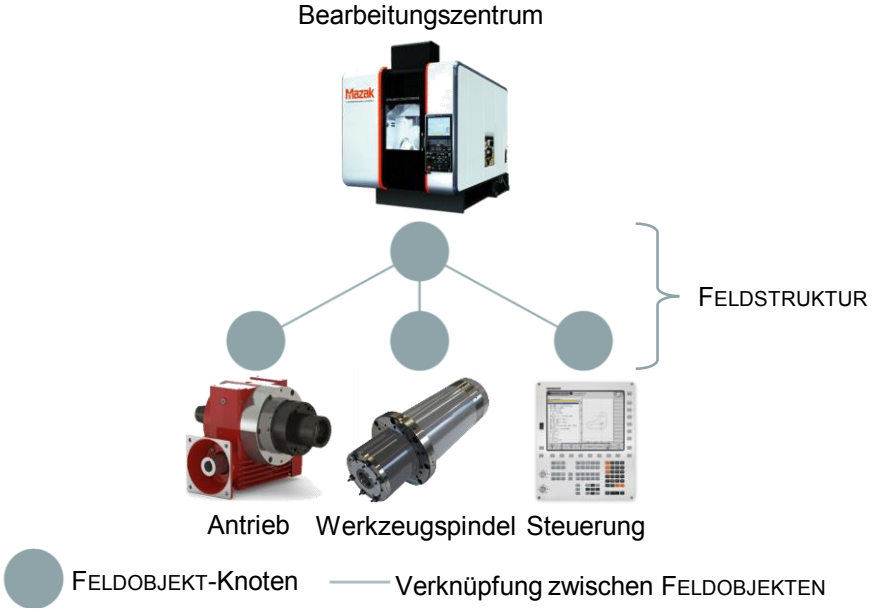


Abbildung 17: Beispiel einer FELDSTRUKTUR für ein Bearbeitungszentrum

Angenommen, das als Beispiel genutzte Bearbeitungszentrum ist in doppelter Ausführung Bestandteil einer Produktionsanlage (zur Veranschaulichung besteht die Produktionsanlage ausschließlich aus den zwei Bearbeitungszentren), so ergibt sich die in Abbildung 18 vereinfacht dargestellte FELDSTRUKTUR.

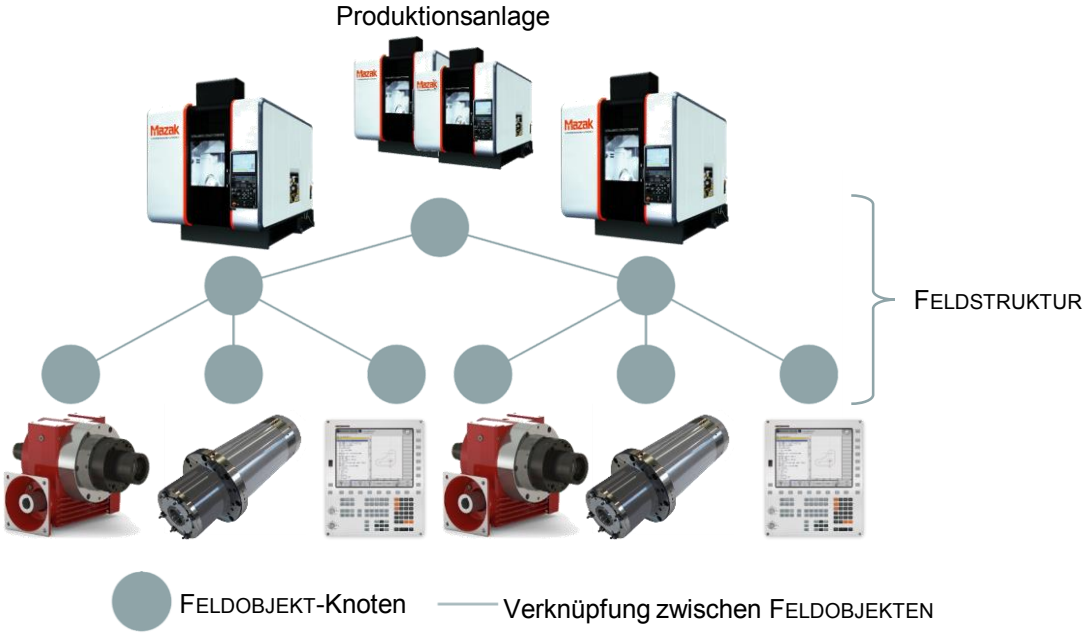


Abbildung 18: Beispiel einer FELDSTRUKTUR für zwei Bearbeitungszentren einer Produktionsanlage

Das FELDOBJEKT auf der hierarchisch ersten Ebene repräsentiert nun die Produktionsanlage. Damit verknüpft sind die FELDOBJEKTE der zweiten Ebene für die Bearbeitungszentren. Auf der dritten Ebene befinden sich die oben bereits genannten FELDOBJEKTE für den Antrieb, die Werkzeugspindel sowie für die Steuerung, ebenfalls in doppelter Ausführung entsprechend der beiden Bearbeitungszentren. Die FELDSTRUKTUR erweitert sich mit jeder neuen Instanz einer Maschine oder Maschinenkomponente.

FELDPROZESS UND FELDMODELL

Definition FELDMODELL

Ein **FELDMODELL** ist die modellbasierte Abbildung eines Systems aus aufgabenspezifischen, aus der FELDSTRUKTUR ausgewählten FELDOBJEKTEN für Maschinen und/oder Maschinenkomponenten, deren über Kommunikationssysteme verfügbare Produkt- und/oder Maschinendaten für einen gemeinsamen, integrierten Datenbestand ausgewählt sind. Aus Datensicht ist ein FELDMODELL ein auf der Grundlage des FELDPROZESSES geplanter, durch einen modellbasierten[25] Ansatz zur virtuellen Integration von Produkt- und Maschinendaten erzeugter Datenbestand, dessen Struktur auf einem aufgabenspezifisch-ausgewählten Ausschnitt der FELDSTRUKTUR als Integrationsgrundlage beruht. Anders ausgedrückt, lässt sich ein FELDMODELL als eine mit Produkt- und/oder Maschinendaten angereicherte Replikation der gesamten oder teilweisen FELDSTRUKTUR interpretieren.

Definition FELDPROZESS

Der **FELDPROZESS** ist eine Abfolge von Aktivitäten zum Aufbau und zur Erhaltung konsistenter FELDSTRUKTUREN sowie zur Erzeugung von FELDMODELLEN.

FELDMODELLE sind wie die FELDSTRUKTUR selbst virtuelle Produkte, die nur durch eine organisationsübergreifende Zusammenarbeit zwischen Maschinenherstellern und -betreibern und unter Einsatz von Produkt- und Maschinendaten als immaterielle Güter realisierbar sind. Dabei erfüllen FELDMODELLE immer einen aufgabenspezifischen Zweck, der sich aus den jeweils individuellen Unternehmenszielen von Maschinenherstellern (optimierte Maschinenentwicklung) und Maschinenbetreibern (optimierter Maschinenbetrieb) ableitet (mögliche Anwendungsszenarien sind in Kapitel 1.1 skizziert).

[25] Eine lose Kopplung der heterogenen Modelle für Produkt- und Maschinendaten durch bilaterale Konvertierungen steht als Alternative in keinem sinnvollen Aufwand- und Nutzenverhältnis.

Das „Eine FELDMODEL“ gibt es nicht. Durch seine individuelle Bedeutung ist ein FELDMODELL mehr als nur ein aufgabenspezifischer Bestand gemeinsam strukturierter Produkt- und Maschinendaten. Unter dieser Voraussetzung kann der FELDPROZESS als Geschäftsprozess verstanden werden, mithilfe dessen FELDMODELLE zur Wertschöpfung beitragen.

Abbildung 19 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen FELDSTRUKTUR und FELDMODELL am Beispiel von vier typgleichen Bearbeitungszentren. Die FELDSTRUKTUR ist vereinfacht als sternförmiges Netz dargestellt und verknüpft (1) die an den FELDSTRUKTUR-Knoten angesiedelten Bearbeitungszentren miteinander und (2) auch mit dem, in Abbildung 19 anhand eines Geometriemodells veranschaulichten, Produktmodell des Bearbeitungszentrums.

Abbildung 19: Beispiel für den Zusammenhang zwischen FELDSTRUKTUR und FELDMODELL

Jedes Bearbeitungszentrum verfügt über einen abrufbaren Bestand von Maschinendaten. Darüber hinaus stehen die allen Bearbeitungszentren gemeinsamen Produktdaten abrufbar über die FELDSTRUKTUR zur Verfügung. Entsprechende Produktdaten können grundsätzlich alle im PDM, zur Beschreibung des Produktmodells des Bearbeitungszentrums, verwalteten Daten umfassen.

Für den Aufbau von FELDMODELLEN dienen aufgabenspezifisch-ausgewählte FELDOBJEKT-Knoten der FELDSTRUKTUR sowie ebenfalls aufgabenspezifisch-ausgewählte Produkt- und Maschinendaten. Im Ergebnis können FELDMODELLE unterschiedlicher Struktur und Datenzusammensetzung entstehen (vgl. Abbildung 19, unten).

Das FELDMODELL FM1 umfasst exemplarisch die FELDOBJEKT-Knoten aller Bearbeitungszentren sowie einen Bestand aus sowohl Produkt- als auch Maschinendaten (angedeutet durch den Farbunterschied je nach Datenherkunft). Das FELDMODELL FM2 umfasst hingegen nur FELDOBJEKT-Knoten ausgewählter Bearbeitungszentren, bei einem ebenfalls gemischten Datenbestand. Die ausgewählte Struktur und Datenauswahl für die FELDMODELLE dient in beiden Fällen z.B. der Analyse von Störungsursachen, welche sich ggf. auf mangelhafte Entscheidungen in der Produktentwicklung zurückführen lassen wie zu gering eingeschätzte Kräfte am Bearbeitungswerkzeug, die zu Bauteilversagen führen.

Das FELDMODELL FM3 umfasst die FELDOBJEKT-Knoten aller Bearbeitungszentren und ausschließlich Maschinendaten. Deren Analyse ermöglicht aus Herstellersicht unter anderem Aussagen über Gemeinsamkeiten und Unterschiede im Nutzerverhalten verschiedener Maschinenbetreiber, woraus sich Erkenntnisse zu den potenziell aussichtsreichen Eigenschaften zukünftiger Produktgenerationen ableiten lassen.

FELDMANAGEMENT, FELDMANAGEMENTSYSTEM und FELDMANAGEMENTPLATTFORM

Definition FELDMANAGEMENT
FELDMANAGEMENT umfasst alle methodischen, konzeptionellen, organisatorischen und technischen Maßnahmen und Verfahren zur Verwaltung der FELDSTRUKTUR, zur Abfrage von Produkt- und Maschinendaten sowie zum Aufbau und zum Management von FELDMODELLEN (FELDMANAGEMENT-Aufgaben). Das FELDMANAGEMENT dient dem Ziel, die als FELDMODELLE bereitgestellten, strukturierten Produkt- und Maschinendaten mit ihrem maximalen Nutzungspotenzial bereitzustellen und deren optimale Nutzung zu gewährleisten. Dabei berücksichtigt das FELDMANAGEMENT Aspekte zur Qualität und Sicherheit von Daten bzw. Informationsqualität sowie zum Datenschutz.

Definition FELDMANAGEMENTSYSTEM
FELDMANAGEMENTSYSTEM bezeichnet die gesamte IT-Infrastruktur zur Umsetzung der FELDMANAGEMENT-Aufgaben. Im Zentrum des FELDMANAGEMENTSYSTEMS steht die FELDMANAGEMENTPLATTFORM.

Definition FELDMANAGEMENTPLATTFORM

Die **FELDMANAGEMENTPLATTFORM** ist das zentrale Instrument zur Umsetzung des FELDKONZEPTS. Sie steht als Middleware-Lösung für PLM im Mittelpunkt des FELDMANAGEMENTSYSTEMS und ermöglicht (1) die Verwaltung der FELDSTRUKTUR und (2) die wechselseitige Kommunikation zwischen den IT-Systemen der Maschinenhersteller und -betreiber.

4.2 Datenmodell

Die Datenspeicherung in der FELDMANAGEMENTPLATTFORM mittels Datenbank setzt ein konzeptionelles Datenmodell[26] voraus (vgl. Leimeister, 2015, S. 70). Ein konzeptionelles Datenmodell beschreibt nach Siepermann (2018) die globale logische Struktur aller Daten für einen Anwendungsbereich, auf der inhaltlichen (semantischen) Ebene, systematisch, implementierungsunabhängig und in strukturierter Form.

Eine der bekanntesten und verbreitetsten Methoden formaler Modellierungssprachen zur Entwicklung konzeptioneller Datenmodelle ist das von *Chen* stammende Entity-Relationship-Modell (ERM). ERM ermöglicht durch dessen graphische Notation eine einheitliche, menschenlesbare und somit leicht verständliche Modelldarstellung, wodurch sich ERM als Kommunikationsbasis zwischen Datenbankanwendern und -entwicklern etabliert hat (Stobitzer, 2017). ERM kann als De-facto-Standard zur Datenmodellierung wie für relationale Datenbanken angesehen werden. Dies ist angesichts der Tatsache von Bedeutung, dass relationale Datenbanksysteme im PLM-Umfeld – insbesondere für PDM-Systeme – nach wie vor stark verbreitet sind (siehe Stark, 2016, S. 229; 351).

Abbildung 20 zeigt das von Arndt et al. (2018) eingeführte Basisdatenmodell der FELDMANAGEMENTPLATTFORM als klassisches ERM. Das Datenmodell ist ein zentrales Artefakt dieser Arbeit und fest im FELDKONZEPT verankert. Das Datenmodell ermöglicht die grundlegende, digitale Beschreibung der FELDSTRUKTUR und der darauf aufbauenden FELDMODELLE. Die Bezeichnungen der verwendeten Modellierungselemente (siehe Tabelle 3 im Anhang A1) basieren auf dem im FELDKONZEPT verankerten Vokabular wie z.B. dem FELDOBJEKT-Begriff, deren Semantik durch die Begriffsdefinitionen in dieser Arbeit eindeutig festgelegt ist. Die Entitätstypen sind in Abbildung 20 mit dem obligatorischen Schlüsselattribut ID zur eindeutigen Identifikation in Datenbanken dargestellt.

[26] In der Literatur wird synonym häufig von logischem Datenbankschema oder vereinfacht von Datenbankmodell bzw. -schema gesprochen.

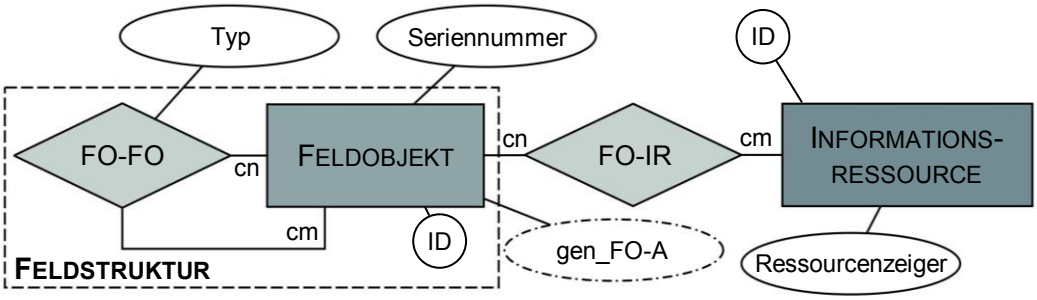


Abbildung 20: Das Basisdatenmodell der FELDMANAGEMENTPLATTFORM

Der FELDOBJEKT-Entitätstyp

Der Entitätstyp FELDOBJEKT im Basisdatenmodell der FELDMANAGEMENTPLATTFORM dient als Originalabbild für FELDOBJEKT-Entitäten, zur digitalen Repräsentation von FELDOBJEKTEN.

Das FELDOBJEKT-Attribut: *Seriennummer*

Das FELDOBJEKT-Attribut *Seriennummer* speichert die einer Maschine bzw. Maschinenkomponente ursprünglich vom Hersteller zugewiesene Seriennummernzeichenfolge. Die Verfügbarkeit der Seriennummer im Datenbestand der FELDMANAGEMENTPLATTFORM trägt wesentlich zum Aufbau und zum Erhalt konsistenter FELDSTRUKTUREN bei (siehe hierzu der Abschnitt ‚Zur FELDSTRUKTUR-Konsistenz' ab S. 56).

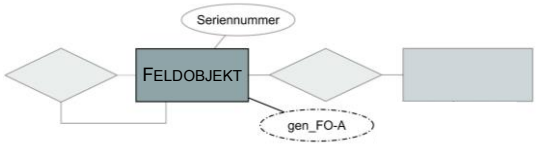
Das FELDOBJEKT-Attribut: *gen_FO-A*

Das generische FELDOBJEKT-Attribut *gen_FO-A* verleiht dem Basisdatenmodell der FELDMANAGEMENTPLATTFORM (siehe Abbildung 20 auf S. 46) einen generischen Charakter. Das FELDOBJEKT-Attribut *gen_FO-A* ist nach dem Prinzip der Abstraktion konzipiert (siehe Loos, 1996, SS. 3-4). Demzufolge wird ein generisches Datenmodellelement – wie für die Erzeugung eines FELDMODELLS de facto notwendig – erst während der Modellbildung durch die anwendungsfall- und typspezifisch-benötigte Anzahl von Instanzen dieses Modellelements ersetzt und mit Werten festgelegt. Die Werte stammen aus den Daten der IT-Systeme von Maschinenherstellern und -betreibern.

> Für jede FELDOBJEKT-Entität eines FELDMODELLS erfolgt die Instanziierung des generischen Attributs *gen_FO-A* als neue, separate Entität, wodurch die geordnete Aufnahme anwendungsfall- und typspezifischer (FELDOBJEKT-individueller) Attribute möglich ist. Diese (neuen) Attribute reservieren den zum FELDMODELL-Aufbau (durch die Integration von Produkt- und Maschinendaten) notwendigen Speicherbereich im FELDDATENSPEICHER.

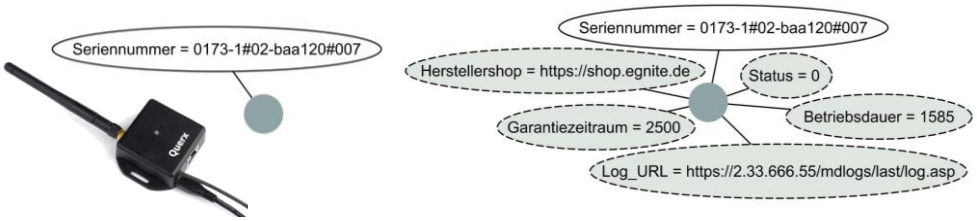
Abbildung 21 zeigt den Aufbau eines FELDMODELLS unter Einsatz des generischen FELDOBJEKT-Attributs für das Anwendungsbeispiel des mit einem Microcontroller ausgestatteten Sensors *Querx WLAN TH* der Firma *egnite.* Ausgehend vom Basisdatenmodell der FELDMANAGEMENTPLATTFORM (oben in Abbildung 21) ist für den Sensor eine FELDSTRUKTUR aus nur einem FELDOBJEKT-Knoten mit dessen *Seriennummer*-Attribut aufgebaut (links in Abbildung 21). Die für das FELDOBJEKT-relevanten Daten werden in einer Tabelle einer relationalen Datenbank gespeichert (links unten in Abbildung 21).

Fokus auf dem FELDOBJEKT-Entitätstyp und dessen Attribute



FELDSTRUKTUR
aus nur einem FELDOBJEKT-Knoten
für den Sensor *Querx WLAN TH*

Zusammensetzung des FELDMODELLS
für den Sensor *Querx WLAN TH*



Tabellen zum Speichern FELDOBJEKT-und FELDMODELL-relevanter Daten

FELDOBJEKT	***gen_FO-A***	
Seriennummer	**Attributname**	***Attributwert***
0173-1#02-baa120#007	Seriennummer	0173-1#02-baa120#007
	Herstellershop	https://shop.egnite.de
	Status	0
	Betriebsdauer	1585
	Garantiezeitraum	2500
	Log_URL	https://2.33.666.55/mdlogs/last/log.asp

für das FELDMODELL ausgewählte Daten

Abbildung 21: Aufbau eines FELDMODELLS unter Einsatz des generischen FELDOBJEKT-Attributs gen_FO-A *(Darstellung m.H.v. egnite GmbH (2018))*

Für den Aufbau eines FELDMODELLS wird *gen_FO-A* für jedes in das FELDMODELL aufzunehmende Attribut instanziiert: In diesem Beispiel sind neben der Seriennummer die Sensormerkmale *Status*, *Herstellershop, Betriebsdauer*, *Garantiezeitraum* und *Log_URL* FELDMODELL-relevant (Sensormerkmale siehe Arndt (2017)). Die wertbehafteten Attribute

werden in einer zweiten Datenbanktabelle gespeichert (rechts unten in Abbildung 21).[27] Der gesamte Tabelleninhalt von *gen_FO-A* ist FELDMODELL-Bestandteil.

Der Beziehungstyp: FO-FO

Der Beziehungstyp *FO-FO* im Basisdatenmodell der FELDMANAGEMENTPLATTFORM (siehe Abbildung 20 auf S. 46) ist die auf Datenebene konzeptionelle Grundlage zur Verknüpfung von FELDOBJEKTEN, deren gesamtes Beziehungsgeflecht die FELDSTRUKTUR darstellt.[28] Ein FELDOBJEKT kann mit keinem oder beliebig vielen FELDOBJEKTEN in Beziehung stehen.

Das FO-FO-Attribut: *Typ*

Die Verknüpfung von zwei FELDOBJEKTEN wird durch eine gerichtete Kante zwischen einem Anfangs- und Endknoten (als Repräsentation beider FELDOBJEKTE) dargestellt. Die dazugehörige Kantenkodierung erfolgt über das *Typ*-Attribut und legt die logische Beziehung zwischen den FELDOBJEKTEN fest (Tabelle 1).

Tabelle 1: Definition des FO-FO-Attributs Typ

Attribut	Datentyp	Kodierung	Wörtliche Entsprechung	Graphische Entsprechung	Bedeutung
Typ	Boolean	0	„gleicht“		Die den FELDOBJEKT-Knoten zugrundeliegenden Maschinen bzw. Maschinenkomponenten gleichen sich.
		1	„ist untergeordnet“		Das FELDOBJEKT am Anfangsknoten ist dem FELDOBJEKT am Endknoten hierarchisch untergeordnet (Bottom-up-Ansatz).

Die Kantenkodierung „0“ / „gleicht“ ermöglicht eine Gruppierung von FELDOBJEKTEN, die bspw. bau- oder typgleiche Maschinen bzw. Maschinenkomponenten repräsentieren. Eine solche Gruppierung unterstützt die effiziente Nutzung der FELDSTRUKTUR, indem speziell bei der Suche nach zusammengehörigen FELDOBJEKTEN über die mit „0“-kodierten Kanten navigiert wird, um bspw. Schlussfolgerungen über logische Zusammenhänge zwischen (den in der FELDSTRUKTUR abgebildeten) Maschinen und Maschinenkomponenten ableiten zu können.

[27] Die für den FELDMODELL-Aufbau verfügbaren Attribute für Produkt- und Maschineninformationen sind durch Maschinenhersteller bzw. -betreiber veröffentlicht, siehe hierzu ab S. 51 zur INFORMATIONSRESSOURCE.

[28] Der prozessbasierte Ablauf zum Aufbau der FELDSTRUKTUR ist in Kapitel 4.3 beschrieben.

1. Gruppierungsregel: Repräsentieren mehrere FELDOBJEKTE gleiche Maschinen bzw. Maschinenkomponenten, so sind alle ab dem zweiten mit dem aus chronologischer Sicht zuerst erzeugten FELDOBJEKT mit „0“-kodiert gerichtet zu verknüpfen.

Die Kantenkodierung „1“ / „ist untergeordnet“ gestattet es, den, bereits in der Produktstruktur immanenten, hierarchischen Aufbau von Maschinen und deren Komponenten in die FELDSTRUKTUR zu überführen. Dabei leitet sich die FELDOBJEKTE-Struktur für eine Maschine aus der im PDM verwalteten Produktstruktur ab und umfasst lediglich FELDOBJEKTE für die feldrelevanten Maschinenkomponenten (siehe Kapitel 4.3.2 zum Aufbau der FELDSTRUKTUR).

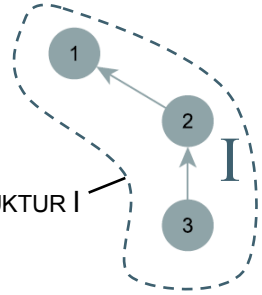
Abbildung 22 auf S. 50 zeigt den schrittweisen Aufbau einer als gerichteter und unzusammenhängender Graph dargestellten FELDSTRUKTUR für das Beispiel von Reinraumarbeitsplätzen. In jedem Schritt werden die FELDOBJEKTE eines weiteren Reinraumarbeitsplatzes der vorhandenen FELDSTRUKTUR hinzugefügt und verknüpft. Dabei lässt sich der Strukturaufbau mithilfe der durch geschlossene Strichlinienzüge graphisch voneinander abgegrenzten SUB-FELDSTRUKTUREN I bis IV chronologisch nachvollziehen.

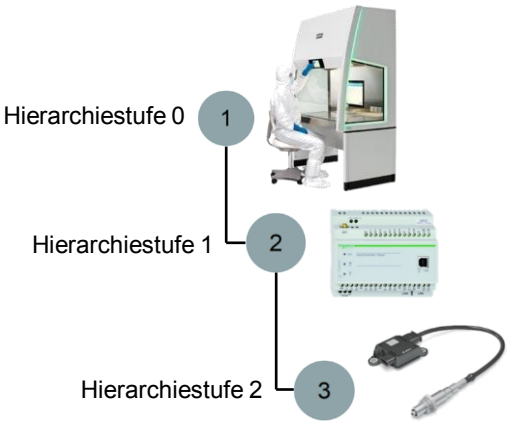
Definition SUB-FELDSTRUKTUR

Eine **SUB-FELDSTRUKTUR** ist ein gedanklicher Ausschnitt der Feldstruktur, bestehend aus ausgewählten, logisch zusammenhängenden Feldobjekten. Eine Sub-Feldstruktur ist im Rahmen des Feldkonzepts das Strukturgerüst zur modellbasierten Integration von Produkt- und Maschinendaten.

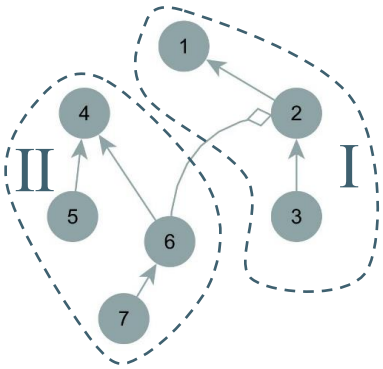
Die in Abbildung 22 dargestellten SUB-FELDSTRUKTUREN I, II und III gestatten den Blick auf drei konfigurationsverschiedene, jedoch aus FELDOBJEKTE-Sicht strukturähnliche, Reinraumarbeitsplätze. Im Detail umfassen die SUB-FELDSTRUKTUREN jeweils eine unterschiedliche Anzahl und Struktur der im Graph als kreisförmige Knoten dargestellten FELDOBJEKTE. Darunter befinden sich die FELDOBJEKT-Knoten 1, 4 und 8 als Wurzelknoten für jeweils einen der Reinraumarbeitsplätze und hierarchisch untergeordnet die FELDOBJEKT-Knoten 2 und 3, 5 bis 7 bzw. 9 bis 14 für die feldrelevanten Arbeitsplatzkomponenten.

1. Schritt



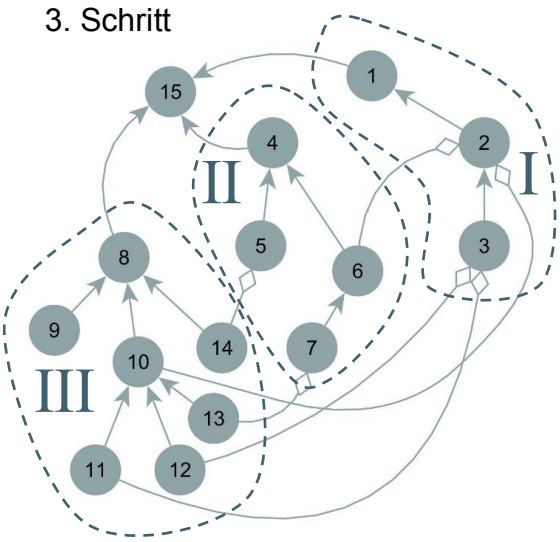


2. Schritt

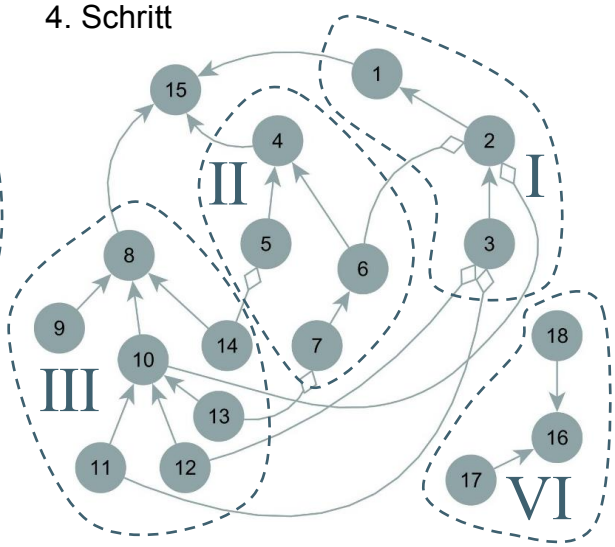


FELDOBJEKT	FO-FO		
FO-ID	FO-ID_primär	FO-ID_sekundär	Typ
1	2	1	1
2	3	2	1
3	5	4	1
4	6	4	1
5	6	2	0
6	7	6	1
7			

3. Schritt



4. Schritt



Knoten für ein FELDOBJEKT

Das FELDOBJEKT am Anfangsknoten ist dem FELDOBJEKT am Endknoten hierarchisch untergeordnet.

Das FELDOBJEKT am Anfangsknoten repräsentiert eine gleiche Maschine bzw. Maschinenkomponente wie das FELDOBJEKT am Endknoten

Abbildung 22: Beispiel für den Aufbau einer FELDSTRUKTUR für Reinraumarbeitsplätze

In Abbildung 22 (rechts oben) sind die SUB-FELDSTRUKTUR I und der hierarchische Strukturaufbau für den Reinraumarbeitsplatz I anhand der im 1. Schritt erzeugten FELDOBJEKTE 1, 2 und 3 gegenübergestellt. Demzufolge befindet sich der Wurzelknoten 1 für den Reinraumarbeitsplatz auf der obersten Hierarchiestufe 0. Auf der mittleren Stufe 1 befindet sich der FELDOBJEKT-Knoten 2 als Repräsentation für die im Reinraumarbeitsplatz I verbaute Recheneinheit zur Überwachung und Steuerung von Umgebungsparametern im Reinraumbereich. Auf der untersten Hierarchieebene 2 der SUB-FELDSTRUKTUR I befindet sich der FELDOBJEKT-Knoten 3 für einen Sensor bspw. zur Erfassung der Partikeldichte. Die FELDOBJEKTE sind einander untergeordnet (Kantenkodierung „1“) und gerichtet miteinander verknüpft.

Im 2. Schritt werden die FELDOBJEKTE 4 bis 7 für den Reinraumarbeitsplatz II der FELDSTRUKTUR hinzugefügt (siehe SUB-FELDSTRUKTUR II in Abbildung 22, mittig). Es gilt dasselbe Vorgehen wie für den Reinraumarbeitsplatz I. Zu beachten ist jedoch, dass die Reinraumarbeitsplätze I und II über gleiche Recheneinheiten als Arbeitsplatzkomponenten verfügen (FELDOBJEKT-Knoten 2 und 6). Demzufolge ist in Übereinstimmung mit der *1. Gruppierungsregel* der FELDOBJEKT-Knoten 6 mit dem aus chronologischer Sicht zuerst erzeugten FELDOBJEKT-Knoten 2 unter der Kodierungsangabe „0“ / „gleicht“ zu verknüpfen.

Die bis zum Zeitpunkt nach dem 2. Schritt angelegten Datenbankeinträge sind in den mit *FELDOBJEKT* und *FO-FO* benannten Tabellen zusammengefasst (Abbildung 22, mittig rechts). Darin existieren sieben FELDOBJEKT-Entitäten (zur Vereinfachung ohne Seriennummern), die die FELDSTRUKTUR bilden. Demgegenüber stehen sechs Beziehungsentitäten, deren zusammengesetztes Schlüsselattribut (*FO-ID_primär FO-ID_sekundär*) sich aus den FO-IDs der jeweils verknüpften FELDOBJEKT-Entitäten ergibt. Bis auf die FELDOBJEKT-Verknüpfung 6 2 sind alle Beziehungsentitäten mit „1“ / „ist untergeordnet“ kodiert.

Die *1. Gruppierungsregel* findet auch bei mehrfach-gleichen Komponenten einer Maschine konsequent Anwendung wie im Fall der SUB-FELDSTRUKTUR III mit den Sensoren-zugehörigen FELDOBJEKT-Knoten 11 und 12. Beide Sensoren des Reinraumarbeitsplatzes III sind typgleich mit dem Sensor des Reinraumarbeitsplatzes I, wodurch zwei Verknüpfungen unter der Kodierungsangabe „0“ / „gleicht“ mit dem aus chronologischer Sicht zuerst erzeugten FELDOBJEKT-Knoten 3 notwendig sind.

Im Beispiel der FELDSTRUKTUR in Abbildung 22 auf S. 50 existieren zwei Besonderheiten: (1) Die SUB-FELDSTRUKTUR IV beschreibt ein nicht näher definiertes, strukturiertes Objekt abseits der Reinraumarbeitsplätze – vorstellbar ist ein ebenfalls im Reinraum eingesetztes Mess- oder Analysegerät –, dessen zugeordnete FELDOBJEKT-Knoten 16, 17 und 18 zwar

der FELDSTRUKTUR angehören, die jedoch nicht mit anderen FELDOBJEKT-Knoten verknüpft sind, da „typ- oder bauungleiche“ Komponenten verbaut sind. (2) Der FELDOBJEKT-Knoten 15 verknüpft als übergeordnete Instanz die Wurzelknoten 1, 4 und 8 der Reinraumarbeitsplätze miteinander, wodurch diese rein gedanklich zusammengefasst werden. In diesem Sinne repräsentiert der FELDOBJEKT-Knoten 15 bspw. eine Reinraumzelle, in der die drei Reinraumarbeitsplätze gemeinsam aufgebaut sind. Unter dieser Vorstellung wurde der FELDOBJEKT-Knoten 15 im 3. Schritt durch den Betreiber der Reinraumzelle manuell erstellt, um diese individuelle Konstellation in der FELDSTRUKTUR abzubilden.

Der Entitätstyp INFORMATIONSRESSOURCE

Der Entitätstyp INFORMATIONSRESSOURCE im Basisdatenmodell der FELDMANAGEMENTPLATTFORM (siehe Abbildung 20 auf S. 46) dient als Originalabbild für INFORMATIONSRESSOURCE-Entitäten.

Definition INFORMATIONSRESSOURCE
Die **INFORMATIONSRESSOURCE** ist das Schnittstellenobjekt im Datenbestand der FELDMANAGEMENTPLATTFORM zu den aus den originären Datenquellen abrufbaren Produkt- und Maschinendaten.

Das INFORMATIONSRESSOURCEN-Attribut: Ressourcenzeiger

Ein Ressourcenzeiger ist eine Zeichenfolge zur Adressierung der von Maschinenherstellern und -betreibern bereitgestellten[29], modellbasierten Kommunikationsschnittstellen. Ein Ressourcenzeiger ermöglicht die eindeutige Identifikation eines Knotens innerhalb des schnittstelleneigenen Modells, durch deren spezifische Eigenschaften sich Produkt- und Maschinendaten aus den originären Datenbeständen abrufen lassen. Anhand eines solchen Ressourcenzeigers ist lt. Neuroth et al. (2010, S. Kap. 9:46) „der dauerhafte Ressourcenzugriff in einem weitgehend unsortierten und dezentral organisierten Informationsraum wie dem Internet auch über technische und organisatorische Grenze und zeitliche Veränderungen hinweg möglich.“

Der Beziehungstyp: FO-IR

Der Beziehungstyp *FO-IR* im Basisdatenmodell der FELDMANAGEMENTPLATTFORM (siehe Abbildung 20 auf S. 46) dient als Originalabbild aller *FO-IR*-Beziehungsentitäten zur

[29] Die Anwendung des FELDKONZEPTS setzt maßgeblich die Bereitschaft von Maschinenherstellern und -betreibern voraus, durch Kommunikationsschnittstellen einen geregelten Zugang zu den als Produkt- und Maschinendaten abrufbaren, Produkteigenschaften bzw. Maschinenparametern von außerhalb des eigenen Organisationsnetzwerks zu ermöglichen.

Verknüpfung von FELDOBJEKTEN und INFORMATIONSRESSOURCEN. Ein FELDOBJEKT kann mit keinem oder beliebig vielen INFORMATIONSRESSOURCEN in Beziehung stehen.

In Abbildung 22 auf S. 50 wurde der Aufbau einer FELDSTRUKTUR am Beispiel von drei konfigurationsverschiedenen, jedoch aus FELDOBJEKT-Sicht strukturähnlichen Reinraumarbeitsplätzen dargestellt. An das Beispiel angelehnt wird zugunsten der Übersichtlichkeit und wie in Abbildung 23 gezeigt, der Graph der SUB-FELDSTRUKTUR I für den Reinraumplatz I um die als rechteckförmige Knoten dargestellte INFORMATIONSRESSOURCEN, um deren Beziehungen zu den FELDOBJEKTEN sowie um die Modellknoten der Kommunikationsschnittstellen des Arbeitsplatzherstellers, des Arbeitsplatzbetreibers und des Sensorherstellers erweitert.

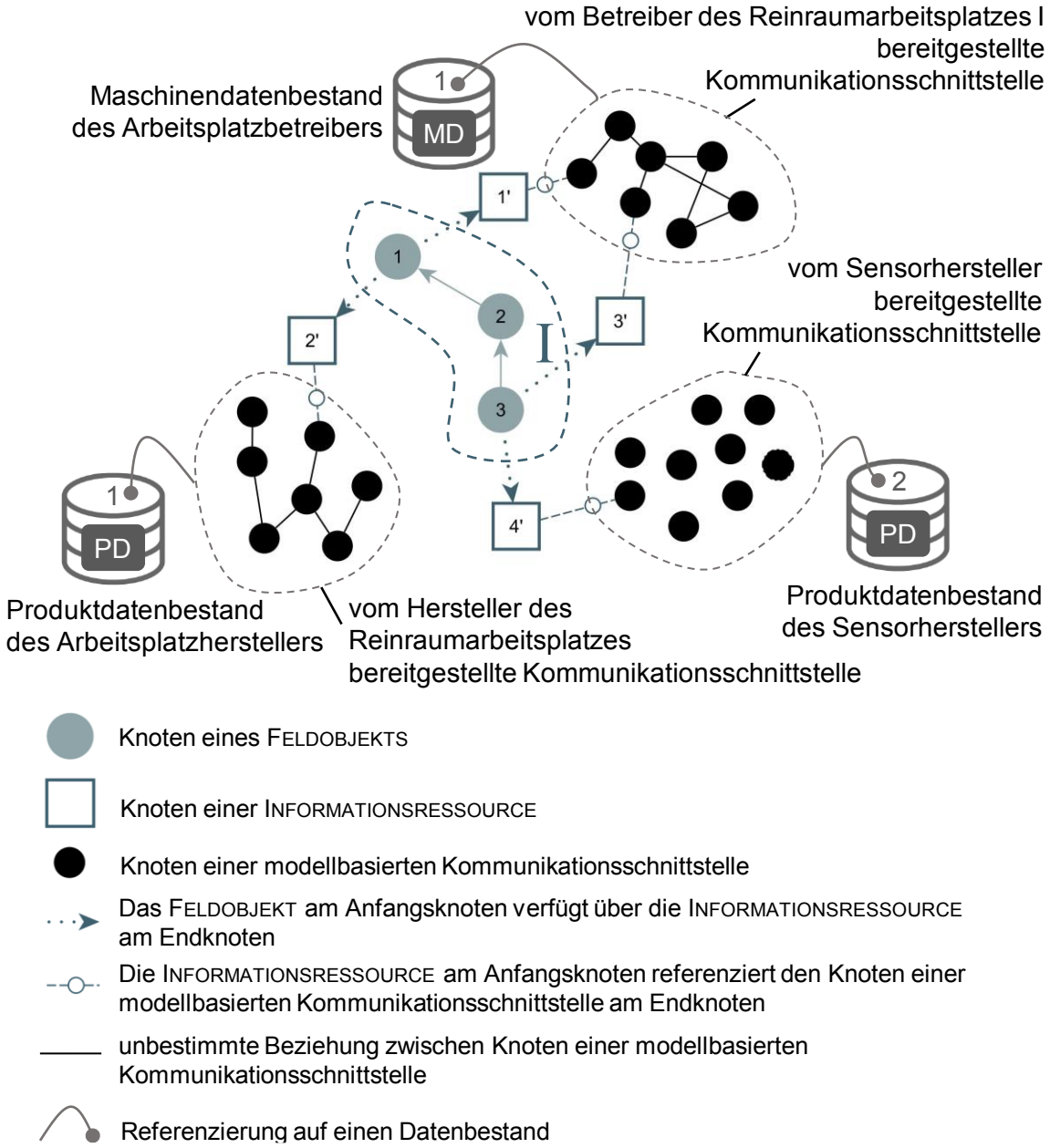


Abbildung 23: Referenzierung von Produkt- und Maschinendaten durch INFORMATIONSRESSOURCEN

INFORMATIONSRESSOURCE-Knoten, wie der in Abbildung 23 mit 1‘ bezeichnete, referenzieren anhand des Ressourcenzeiger-Attributs jeweils einen Knoten der von Herstellern und Betreibern bereitgestellten, modellbasierten Kommunikationsschnittstellen, deren internes Knotengerüst Produkt- oder reale Bau- bzw. Netzwerkstrukturen widerspiegeln können. Über schnittstelleninterne Verweise auf die Bestände für Produkt- bzw. Maschinendaten lassen sich diese schließlich abfragen. Exemplarisch stehen über die, mit dem FELDOBJEKT-Knoten 1 für den Reinraumarbeitsplatz I verknüpften, INFORMATIONSRESSOURCE-Knoten 1‘ und 2‘ Daten sowohl aus dem Maschinendatenbestand des Betreibers als auch Daten aus dem Produktdatenbestand des (Reinraumarbeitsplatz-)Herstellers zur Verfügung. Gleiches gilt für den einzigen Sensor des Reinraumarbeitsplatzes und dessen FELDOBJEKT-Knoten 3: Über die INFORMATIONSRESSOURCE-Knoten 3‘ und 4‘ und die damit verknüpften Knoten der modellbasierten Kommunikationsschnittstellen sind sowohl sensorrelevante Daten aus dem Maschinendatenbestand des Betreibers als auch Daten aus dem Produktdatenbestand des (Sensor-)Herstellers abrufbar.

Im Beispiel der drei Reinraumarbeitsplätze (siehe Abbildung 22 auf S. 50) repräsentieren die FELDOBJEKT-Knoten 11 und 12 (der SUB-FELDSTRUKTUR III des gleichnamigen Reinraumarbeitsplatzes) sowie der im obigen Beispiel verwendete FELDOBJEKT-Knoten 3 typgleiche Sensoren. Jeder der drei FELDOBJEKT-Knoten ist über jeweils einen der INFORMATIONSRESSOURCE-Knoten 3‘, 5‘ bzw. 6‘ mit der, vom Betreiber der Reinraumarbeitsplätze bereitgestellten, Kommunikationsschnittstelle verbunden (siehe Abbildung 24 auf S. 55). Demgegenüber erfolgt die Verbindung zur, vom Hersteller der Reinraumarbeitsplätze bereitgestellten, Kommunikationsschnittstelle ausschließlich über den INFORMATIONSRESSOURCE-Knoten 4‘ des FELDOBJEKT-Knotens 3 als gemeinsamer, zentraler Zugangspunkt.

2. Gruppierungsregel: Die FELDOBJEKTE gleicher Maschinen bzw. Maschinenkomponenten nutzen die INFORMATIONSRESSOURCE des zuerst erzeugten FELDOBJEKTS als gemeinsamen, zentralen Zugangspunkt, wenn die mit der INFORMATIONSRESSOURCE verknüpfte Referenz auf einen Produkt- oder Maschinendatenbestand identisch ist.

Zur Navigation in der FELDSTRUKTUR: Soll bspw. ausgehend vom FELDOBJEKT-Knoten 11 auf die sensorrelevanten Produktdaten zugegriffen werden, ist zunächst anhand der logischen Beziehungen zwischen den FELDOBJEKTEN zu überprüfen, ob eine mit „0“-kodierte Kante zu einem anderem FELDOBJEKT-Knoten führt und ob dieser über INFORMATIONSRESSOURCE-Knoten für Produktdaten verfügt. Im konkreten Beispiel trifft dies

auf den FELDOBJEKT-Knoten 3 und dessen INFORMATIONSRESSOURCE-Knoten 4‘ zu, der auf die Kommunikationsschnittstelle des Sensorhersteller verweist (siehe Abbildung 24 auf S. 55). Durch das Zusammenspiel der *1.* und *2. Gruppierungsregel* minimiert sich die Anzahl an Zugangspunkten zu den Produktdaten.

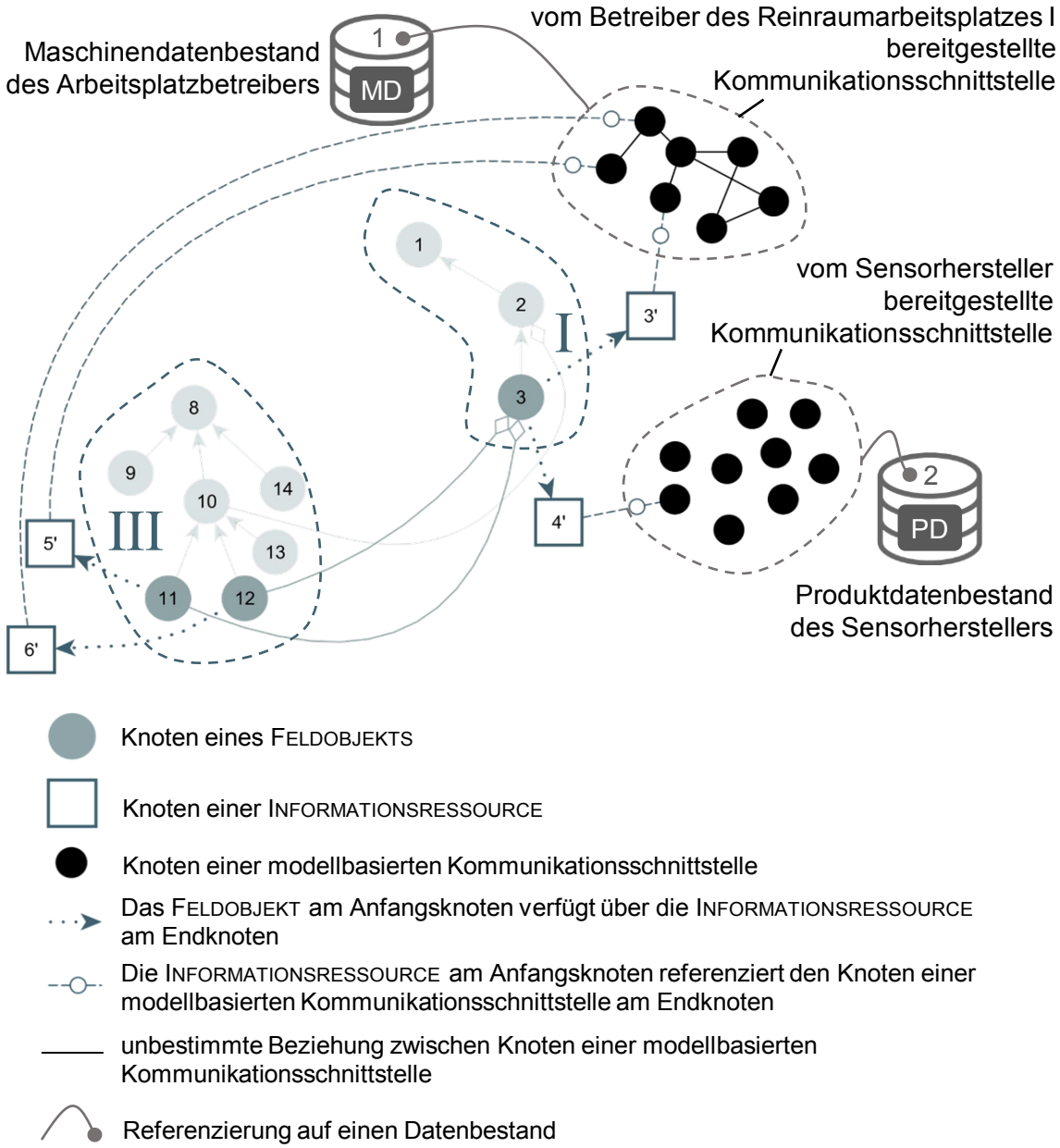


Abbildung 24: INFORMATIONSRESSOURCEN für die typgleichen Sensoren der Reinraumarbeitsplätze I und III

Sensorspezifische Produktdaten können unter anderem die Herkunft und die genaue Typidentität von Sensoren offenlegen, sodass im Instandsetzungsfall ein defekter Sensor durch einen typgleichen ersetzt werden kann. Sensorspezifische Maschinendaten können entweder den Reinraumarbeitsplatz- oder durchaus auch den Sensorherstellern Auskunft

über z.B. den Zustand von Sensoren und über deren gegenwärtige Leistungsfähigkeit geben, die unmittelbar die Messqualität und Lebensdauer beeinflussen.

Durch die Analyse von sensorspezifischen Maschinendaten zusammen mit den über das sensoreigene Produktmodell abrufbaren Daten zur Struktur und Komponentenzusammensetzung von Sensoren lassen sich etwaige, die Leistungsfähigkeit negativ beeinflussende, Konstruktionsmängel aufdecken. In diesem Zusammenhang lassen sich für verschiedene Reinraumarbeitsplätze und deren Betriebsbedingungen die folgenden Beispielfragen analytisch beantworten: Bei welchen Reinraumarbeitsplätzen ist der zeitliche Leistungsverlust oder die Ausfallwahrscheinlichkeit für Sensoren am größten? Gibt es einen Zusammenhang zwischen der Struktur bzw. der Komponentenzusammensetzung von Reinraumarbeitsplätzen und der Ausfallwahrscheinlichkeit einzelner Sensorkomponenten?

Zur FELDSTRUKTUR-Konsistenz

Eine konsistente FELDSTRUKTUR bildet die aktuelle Baustruktur (Topologie) der feldrelevanten Maschinen und Maschinenkomponenten entsprechend ihrer jeweiligen Produktkonfiguration ***As-Used*** bzw. ***As-Maintained*** anhand von FELDOBJEKTEN und deren Verknüpfungen korrekt und widerspruchsfrei ab. Fehlende FELDOBJEKTE oder Verknüpfungsfehler führen zu Inkonsistenzen, welche die Beziehungen zwischen Maschinen und Maschinenkomponenten unvollständig oder fehlerhaft widerspiegeln.

Die zur Umsetzung des FELDKONZEPTS von Maschinenherstellern und -betreibern eingesetzten, modellbasierten Kommunikationsschnittstellen sowie die auf S. 46 als FELDOBJEKT-Attribut eingeführte Seriennummer tragen wesentlich zum Aufbau und zum Erhalt konsistenter FELDSTRUKTUREN bei. Hierfür müssen insbesondere auf Maschinenbetreiberseite die schnittstelleneigenen Modelle für Maschinen und Maschinenkomponenten deren aktuelle Baustruktur anhand von strukturrichtig verknüpften Modellknoten und unter Einbezug der korrekt-zugehörigen Seriennummern abbilden. Die Verknüpfung der schnittstelleneigenen Modelle auf Maschinenhersteller und -betreiberseite wiederum erfolgt durch die FELDOBJEKTE bzw. durch die mit den FELDOBJEKTEN verknüpften *INFORMATIONSRESSOURCEN, (ebenfalls)* unter Einbezug der mit einem FELDOBJEKT persistent gespeicherten Seriennummer. Abbildung 25 demonstriert die durchgängige Verwendung der Seriennummer für den Sensor im Reinraumarbeitsplatz I.

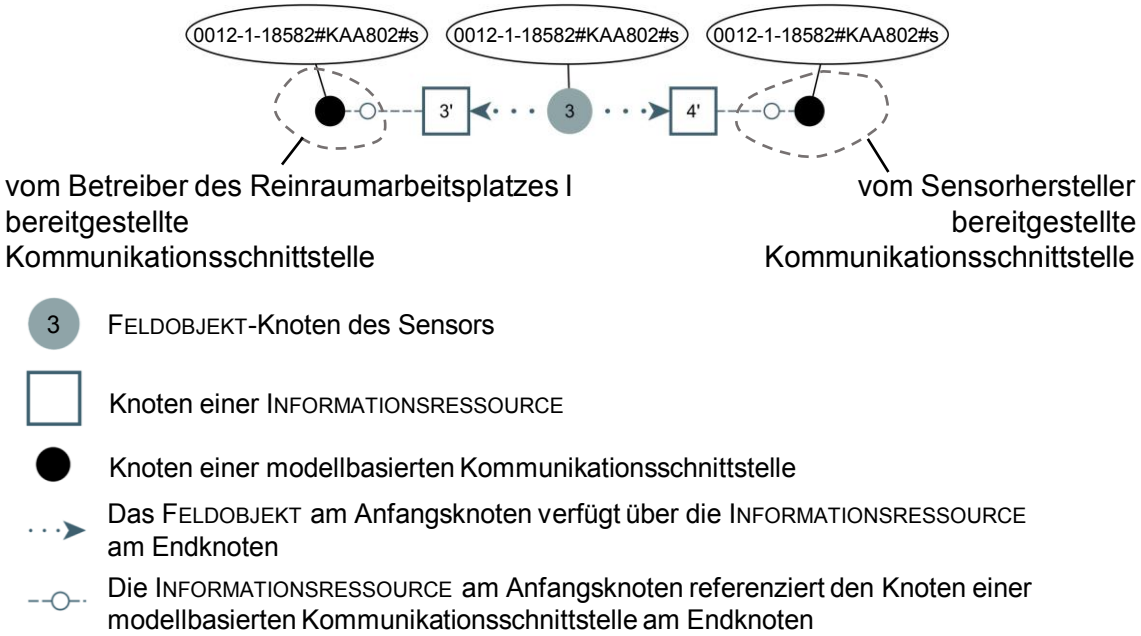


Abbildung 25: Die durchgängige Verwendung der Seriennummer

> Die konsistente (widerspruchsfreie) Verknüpfung ausgewählter Elemente der Produktstruktur mit den logisch-äquivalenten Strukturelementen der modellbasierten Kommunikationsschnittstellen der Maschinenbetreiber erfolgt mithilfe eindeutiger und durchgängig verwendeter Seriennummern und über die FELDOBJEKTE als zentrale Verbindungspunkte. Der Aufbau und der Erhalt konsistenter FELDSTRUKTUREN obliegt der FELDMANAGEMENTPLATTFORM.

Inkonsistenzen der FELDSTRUKTUR können in der Betriebsphase durch bspw. undokumentierte Konfigurationsänderungen von Maschinen entstehen. Dabei wird mindestens eine mit einer Seriennummer ausgestattete Maschinenkomponente modifiziert, d.h. entfernt oder ersetzt. Infolgedessen aktualisiert sich das schnittstelleneigene Modell auf Maschinenbetreiberseite[30]: Der ursprüngliche, komponenteneigene Modellknoten wird durch einen neuen mit eigener Seriennummer ersetzt. Das bedeutet, der neue Modellknoten verfügt über eine, gegenüber dem noch existierenden komponenteneigenen FELDOBJEKT, ohne Nachweis abweichende Seriennummer und die FELDSTRUKTUR entspricht nicht mehr der realen Maschinentopologie.

[30] Mit fortschrittlichen Kommunikationstechnologien wie bspw. OPC UA ausgestattete Maschinen oder Produktionsanlagen sind bereits imstande, systemeigene Veränderungen zu registrieren und diese bspw. im zu Kommunikationszwecken bereitgestellten Adressraum automatisch abzubilden.

Eine fehlerhafte Seriennummernzuordnungen bietet Herstellern die Option, im Sinne der Qualitätssicherung und von Gewährleistungsgarantien, unautorisierte oder ungeplante Aktivitäten erkennen und nachvollziehen zu können. Demzufolge ist es bspw. möglich, die Gewährleistungsgarantie für eine Maschine auszuschließen, wenn keine Originalersatzteile verwendet werden.

Autorisierte bzw. geplante Änderungen der Maschinenkonfiguration durch bspw. Instandhaltungsarbeiten führen zunächst auch zu abweichenden Seriennummern zwischen FELDOBJEKTEN und Informationsknoten. Es erfolgt jedoch eine durch Nachweis angestoßene Aktualisierung des FELDSTRUKTUR, die die temporäre Inkonsistenz auflöst; dies wird durch den Teilprozess II im FELDPROZESS behandelt (siehe Kapitel 4.3 ab S. 78).

Zum Referenzcharakter des Datenmodells

Das Basisdatenmodell der FELDDATENMANAGEMENTPLATTFORM (vgl. Abbildung 20 auf S. 46) besitzt den Charakter eines Referenzmodells.[31] Ein Referenzmodell bildet aus Sicht der Informationstechnik eine, von den Erfahrungen und dem Wissen des Modellierers abhängige, generelle Empfehlung zur Gestaltung der Elemente eines Informationssystems für einen bestimmten Anwendungsbereich (vgl. Abts & Mülder, 2017, S. 566). Allgemeine Prinzipien und Theorien bilden den Ausgangspunkt für die Entwicklung eines Referenzmodells (Deduktive Strategie), dessen entscheidende Merkmale dessen Akzeptanz sowie dessen nachgewiesene Wiederverwendung sind (vgl. Fettke & vom Brocke, 2016).

Im Basisdatenmodell der FELDDATENMANAGEMENTPLATTFORM können der FELDOBJEKT- oder der INFORMATIONSRESSOURCE-Entitätstyp wie auch die Beziehungstypen nach Bedarf um zusätzlich Attribute erweitert werden, deren Daten nicht bereits in den IT-Systemen wie PDM, SCADA oder CMMS gespeichert sind. Demnach können **FELDOBJEKTE** Daten wie etwa zur Lokalisierung einer Maschine durch GPS-Informationen oder die Domänenzugehörigkeit einer Maschinenkomponente zugewiesen sein.[32] Wiederum andere Attribute sind bspw. für besondere Datenanalyseaufgaben oder zur Klassifizierung von FELDOBJEKTEN erforderlich. Eine solche Klassifizierung speziell für Sensormerkmale wurde von Arndt (2017) durchgeführt. Demnach erfolgt die Klassifizierung der Sensormerkmale

[31] Besonders im Kontext von Industrie 4.0 und unternehmensübergreifender Digitalisierungsbestrebungen werden Referenzmodelle eingesetzt, um auf eine gewisse Art der Standardisierung hinzuwirken und die Komplexität bei der Entwicklung von Systemen zu reduzieren (vgl. Reidt et al., 2018, S. 893). Datenmodelle mit Referenzmodellcharakter wie das von (Arndt, 2017) vorgestellte Referenzintegrationsdatenmodell für Sensoren sind in diesem Zusammenhang von besonderer Bedeutung, da sie Ausgangspunkt für den Entwurf neuer bzw. nutzungsspezifischer Datenmodelle sind, wobei Modellbestandteile wie Entitätstypen oder Attribute nach Bedarf ergänzt, entfernt oder verändert werden können (vgl. Thomas, 2006, S. 16-17).

[32] Im Projekt GEISER (vgl. iit, 2017, S. 33) wurde eine cloudbasierte Plattform entwickelt, die Sensordaten mit Geodaten zur räumlichen Positionsbestimmung kombiniert, sie in ein einheitliches Format bringt und für neue intelligente Services und Produkte nutzbar macht.

gemäß dem Aufbau der *Verwaltungsschale einer Industrie 4.0-Komponente* (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2016).

Um das Management von **FELDOBJEKTEN** und **INFORMATIONSRESSOURCEN** zu ermöglichen, können diese über dokumentspezifische Metadaten wie einen Status, ein Erstelldatum oder einen Eigentümer verfügen. Darüber hinaus können **INFORMATIONSRESSOURCEN** über Spezifikationen der von PDM, SCADA oder CMMS zur Datenbereitstellung eingesetzte Schnittstellentechnologie verfügen.

Nicht zuletzt können bspw. dem **Beziehungstyp *FO-FO*** Daten zugeordnet sein, um die logische Verknüpfung von FELDOBJEKTEN – und damit die Beziehung zwischen Maschinen und/oder Maschinenkomponenten – zu spezifizieren. Dies können Attribute für unter anderem raumbezogene (topologische) Daten wie die relative Position von Maschinen in einer Produktionsanlage oder zwischen Maschinenkomponenten sein, woraus sich deren relative Entfernung bzw. Nähe ermitteln lässt. In Verbindung mit den Ereignisdaten aus dem Maschinenbetrieb lassen sich dadurch bspw. Rückschlüsse auf außergewöhnlich störungsanfällige Konstellationen bzw. Kombinationen von Maschinen oder Maschinenkomponenten ermitteln. Im bisher besprochenen Beispiel der Reinraumarbeitsplätze ist es bspw. möglich, dass die Funktionsfähigkeit einzelner Sensoren durch den Betrieb anderer Maschinen (Geräte) in der Nähe des Reinraumarbeitsplatzes negativ beeinflusst wird.

4.3 Prozessmodell

4.3.1 Gesamtmodell

Der Aufbau und die Erhaltung konsistenter FELDSTRUKTUREN wird wie die Erzeugung von FELDMODELLEN durch die Ausführung des FELDPROZESSES bzw. dessen Aktivitätenabfolge ermöglicht. Der FELDPROZESS beruht auf dem von Arndt et al. (2018) eingeführten und fest im FELDKONZEPT verankerten Prozessmodell als ein (neben dem Basisdatenmodell der FELDMANAGEMENTPLATTFORM weiteres) zentrales Artefakt dieser Arbeit. Ein **Prozessmodell** stellt nach Rosemann (1996, S. 1) ein zweckbezogenes Abbild des zeitlich-sachlogischen Ablauf der Funktionen dar, die an einem (Prozess-)Objekt durchgeführt werden.

Abbildung 26 zeigt das Modell für den FELDPROZESS als ein auf der grafischen Modellierungssprache *Business Process Model and Notation* (BPMN)[33] basierendes Flussdiagramm. Die für die Modellierung eingesetzten Elemente und deren Symbole zur grafischen Prozessbeschreibung entstammen der BPMN-Spezifikation (vgl. OMG, 2011, SS. 27–40) und sind in Tabelle 4 im Anhang A2 zusammengefasst. Darüber hinaus wurden für die Erstellung des Flussdiagramms die von der *Firma Signavio* in Zusammenarbeit mit dem *Hasso-Plattner-Institut* und der *Humboldt-Universität zu Berlin* entwickelten Modellierungsregeln für BPMN angewendet (siehe Signavio GmbH, 2014).

Für eine bessere Lesbarkeit und Orientierung liegt dieser Arbeit ein zweite, herausnehmbare und vergrößerte Abbildung des Prozessmodells bei, die sich auf der Innenseite des hinteren Einbands befindet.

Das Modell für den FELDPROZESS besteht aus drei logisch getrennten und Abbildung 26 für eine bessere Unterscheidbarkeit auch farblich getrennten Teilprozessmodellen. Diese ermöglichen nach Arndt et al. (2016, S. 630) den Aufbau und die Aufrechterhaltung einer konsistenten FELDSTRUKTUR (Teilprozess I und II) sowie die Planung und Erzeugung von FELDMODELLEN (Teilprozess III).

[33] *Business Process Model and Notation* (BPMN) ist ein anerkannter Standard zur Modellierung und zum Management von Geschäftsprozessen (vgl. Freund & Rücker, 2017, S. 1).

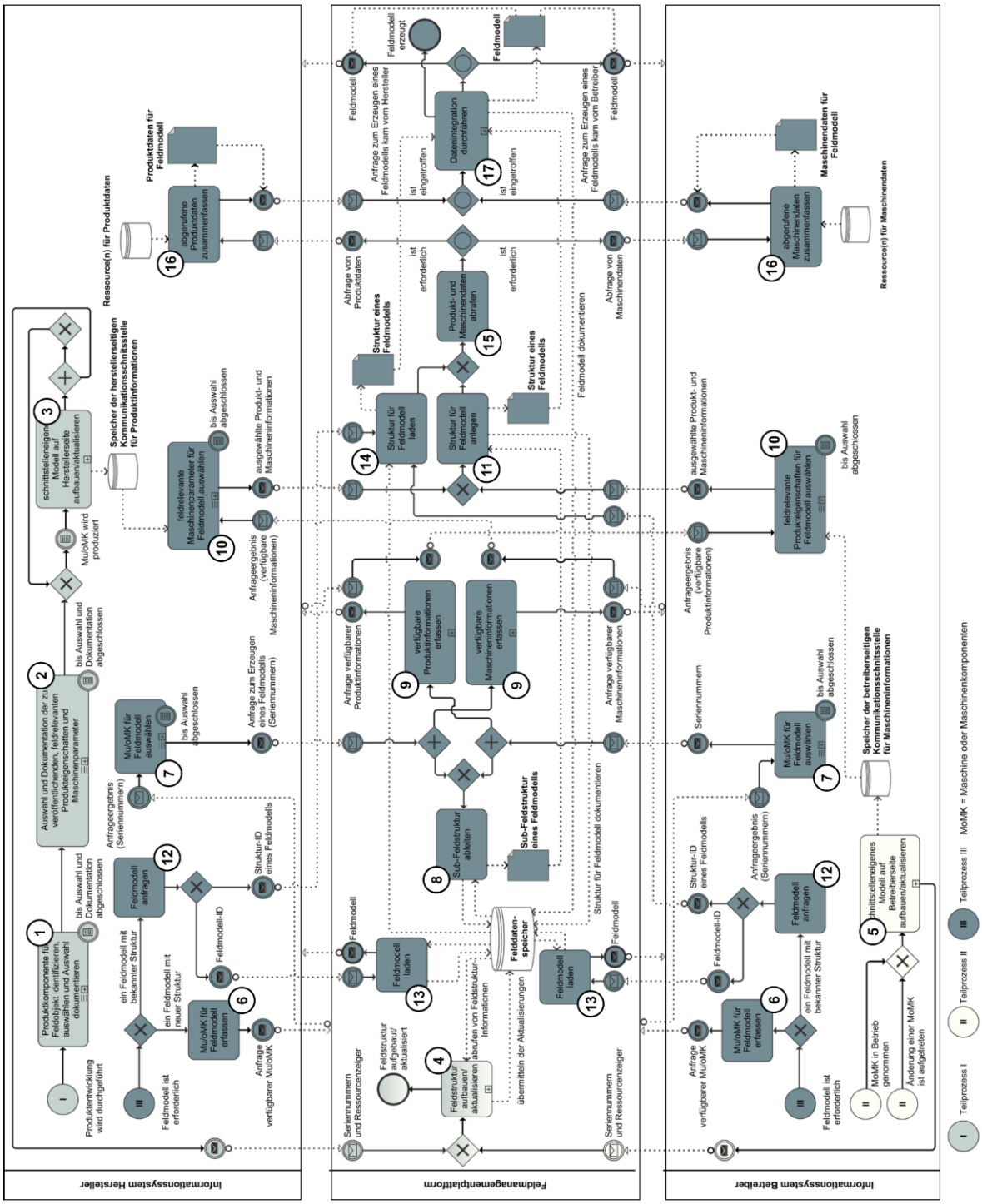


Abbildung 26: Das Prozessmodell für das FELDKONZEPT
(siehe Innenseite des hinteren Einbands)

Ein Teilprozess wird durch ein Startereignis[34] entweder im Informationssystem des Maschinenherstellers oder des Maschinenbetreibers initiiert und setzt sich über die verschiedenen Modellelemente (Einzel- und Mehrfachaktivitäten sowie Subprozesse), teilweise systemübergreifend über die FELDMANAGEMENTPLATTFORM bis zum geplanten Endereignis fort. Innerhalb der Modellelemente werden unterschiedliche Prozessobjekte (darunter Dokumente zur Speicherung der Informationen zu feldrelevanten Produkteigenschaften und Maschinenparameter, FELDOBJEKTE, SUB-FELDSTRUKTUREN usw.) bearbeitet. Deren Speicherorte sind die Ressourcen für Produkt- und Maschineninformationen sowie der zentrale FELDDATENSPEICHER (siehe Abbildung 26).

Die Teilprozesse sind nicht streng chronologisch d.h. nicht zwingend sequenziell abzuarbeiten, sondern können in nahezu beliebiger Reihenfolge, Häufigkeit und Geschwindigkeit durchlaufen werden. Die Teilprozesse sind jedoch logisch abhängig voneinander: Ein FELDMODELL kann nur dann geplant und erzeugt werden (Teilprozess III), wenn zunächst eine FELDSTRUKTUR aufgebaut/vorhanden und diese aktuell und konsistent gehalten ist (Teilprozess I und II).

Das Modell für den FELDPROZESS und dessen Teilprozessmodelle sind unspezifisch: Den Modellelementen sind keine konkreten Rollen oder Ressourcen zugeordnet. Es liegt in der Verantwortung von Maschinenherstellern und -betreibern, die für sich relevanten Modellelemente angesichts ihrer individuellen organisations- und informationssystemspezifischen Rahmenbedingungen zu adaptieren.

Die Teilprozesse werden in den nachfolgenden Unterkapiteln nacheinander beschrieben.

4.3.2 Teilprozess I: Aufbau der FELDSTRUKTUR

Der Teilprozess I (vgl. Abbildung 27) verfolgt das Ziel, die Schnittstelle für Produktinformationen auf Herstellerseite einzurichten und eine konsistente FELDSTRUKTUR aufzubauen. Der Teilprozess I wird durch ein allgemeines Startereignis in der Produktentwicklung eingeleitet. Ein solches kann z.B. durch die Freigabe einer Konstruktion oder mit dem Erreichen eines Projektmeilensteins eintreten. Die Festlegung eines solchen Ereignisses obliegt bspw. den Prozessverantwortlichen für die Produktentwicklung (z.B. dem Organisationsmanagement bei einem Maschinenhersteller).

[34] Die Teilprozessmodelle II (Aktualisierung der Feldstruktur) und III (Aufbau eines Feldmodells) verfügen über jeweils zwei mögliche Startereignisse, welche allerdings dasselbe Endereignis als Ergebnis haben.

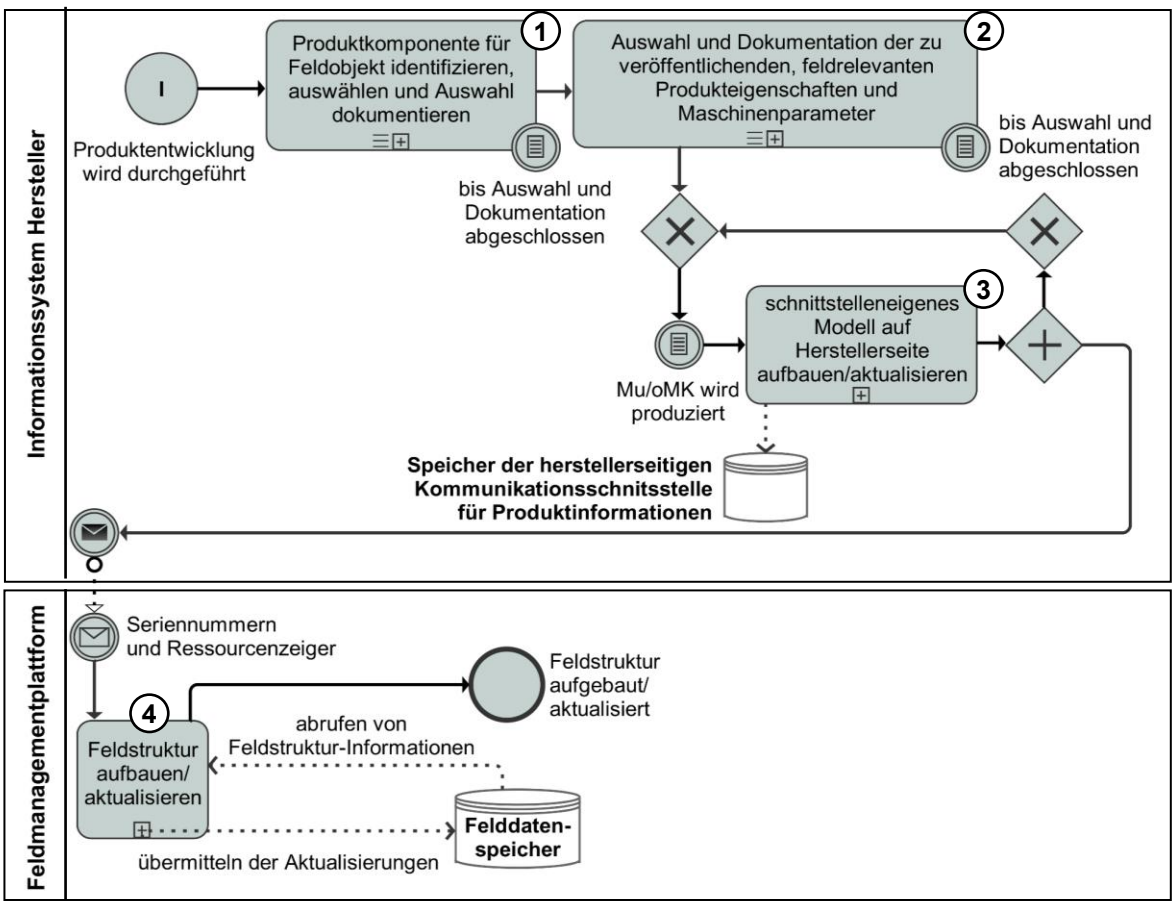


Abbildung 27: Auszug aus dem FELDPROZESS-Modell: Der Teilprozess I als BPMN-Flussdiagramm

Aktivität 1

In der Aktivität 1 erfolgt die Identifikation, Auswahl und Dokumentation von Produktkomponenten, welche durch FELDOBJEKTE repräsentiert werden sollen. Der detaillierte Verlauf der Aktivität 1 folgt einem separaten Subprozess und findet anhand von Mehrfachaktivitäten in sequenzieller Bearbeitung und beliebiger Bearbeitungsreihenfolge statt. Das bedeutet, die Auswahl und die Dokumentation werden für jede Produktkomponente individuell betrachtet. Die Aktivität 1 endet mit der Feststellung, dass die Auswahl und die Dokumentation vollständig sind, als abschließendes Ereignis.

Im Detail werden zu Beginn der Aktivität 1 Produktkomponenten für die Repräsentation durch FELDOBJEKTE identifiziert und ausgewählt. Hierfür eignen sich vor allem die domänenspezifischen, modellbasierten Softwarenwendungen aus der Produktentwicklung. Diese verfügen zum einen über Schnittstellen für PDM. Zum anderen ermöglichen sie es, im Gegensatz zu Dokument- oder Artikelstrukturen (im PDM), mehrfach verwendete Komponenten wie typgleiche Sensoren als einzelne Instanzen bspw. im Feature-Manager oder im Grafikbereich einer 3D-Anwendung eindeutig zu identifizieren und auszuwählen.

Im besonderen Fokus stehen dabei Anwendungen speziell zur Beschreibung von Automatisierungstechnik-relevanten Zusammenhängen und somit von feldrelevanten Produkteigenschaften: Durch ECAD-Anwendungen wie z.B. EPLAN lassen sich die zur Erfassung von Maschinendaten notwendigen Sensoren sowie die zur Datenverarbeitung und -abfrage eingesetzten Hardwarekomponenten festlegen und der Produktstruktur hinzufügen.

Die primäre Quelle zur Auswahl feldrelevanter Produktkomponenten sind die, ein Produkt aus domänenspezifischer Sicht beschreibenden, Modelle der Produktentwicklung. Spezielle Funktionen der ebenfalls domänenspezifischen entwicklungsbegleitenden Anwendungen unterstützen den Auswahl- und Dokumentationsprozess.

Template-FELDOBJEKT und Template-FELDSTRUKTUR

Die zu Beginn der Aktivität 1 getroffene Auswahl von Produktkomponenten wird zum einen in den domänenspezifischen Entwicklungsmodellen gespeichert und zum anderen im PDM-System des Herstellers dokumentiert. Für letzteres wird mit dem Einchecken bspw. einer CAD-Baugruppe in PDM für jede als feldrelevant markierte Produktkomponente ein separates Template-FELDOBJEKT im PDM erzeugt, welches als Attribut die Domänenzugehörigkeit der Produktkomponente ausweist. Anhand entsprechender Template-FELDOBJEKTE wird eine domänenübergreifende Template-FELDSTRUKTUR angelegt, welche sich parallel zur Entwicklungsarbeit aufbaut.

Definition Template-FELDOBJEKT

Das **Template-FELDOBJEKT** ist eine virtuelle, abstrakte Repräsentation eines nicht serialisierten Produkts oder einer nicht serialisierten Produktkomponente (d.h. ohne eine spezifische Seriennummer).

Definition Template-FELDSTRUKTUR

Die **Template-FELDSTRUKTUR** ist ein produktspezifischer und vom Produkthersteller geplanter, logisch-geordneter Zusammenschluss von Template-FELDOBJEKTEN.

Template-FELDOBJEKTE und die damit im Zusammenhang stehenden Template-FELDSTRUKTUREN sind Bestandteil des Produktmodells. Sie unterliegen der Versionierung; Freigabe- und Änderungsprozesse sind darauf anwendbar. Template-FELDOBJEKTE und Template-FELDSTRUKTUREN sind Ausgangspunkt für die, mit der Produktion einer Maschine oder Maschinenkomponente eingeleitete, Instanziierung von FELDOBJEKTEN und der dazugehörigen SUB-FELDSTRUKTUREN.

Zur Einbindung strukturierter Template-FELDOBJEKTE in PDM wurde, wie in Abbildung 28 gezeigt, dessen Basisdatenmodell um den Entitätstyp Template-FELDOBJEKT und den rekursiven Beziehungstyp *TFO-TFO* ergänzt. Die Beziehungstypen *AR-TFO* und *DO-TFO* ermöglichen die Verknüpfung von Template-FELDOBJEKTEN mit den im PDM verankerten Dokumenten und Artikeln.

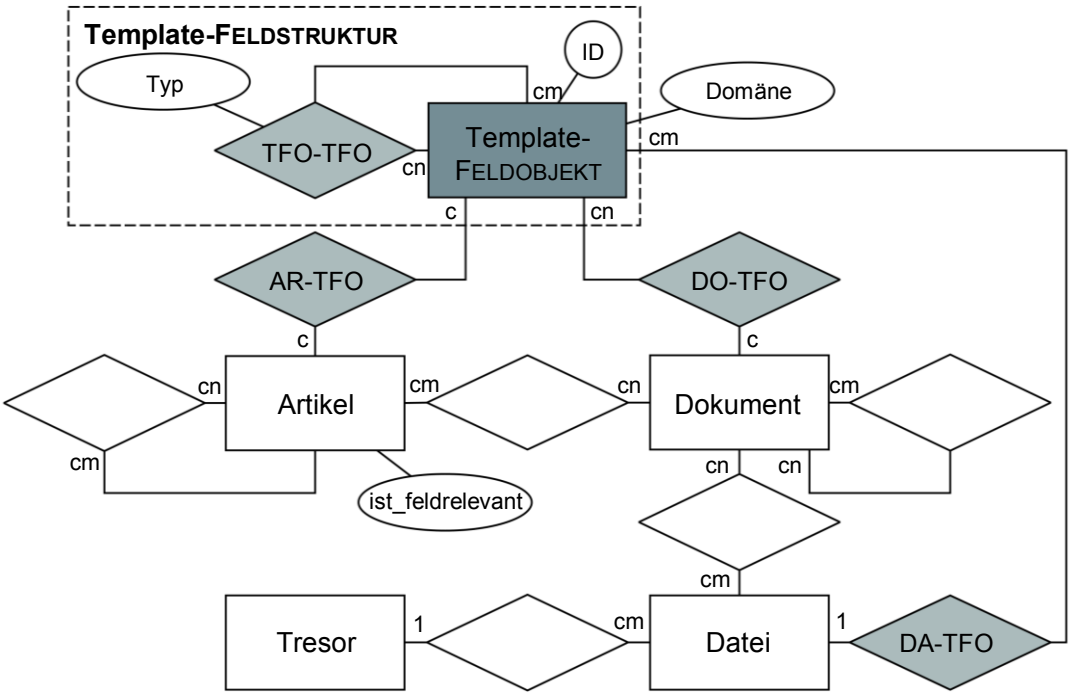


Abbildung 28: Das erweiterte Basisdatenmodell für PDM

Die Auswahl feldrelevanter Produktkomponenten erfolgt primär über die in der Produktentwicklung eingesetzten domänenspezifischen Entwicklungsmodelle (z.B. ein CAD-Geometriemodell), welche im PDM dokumentbasiert verwaltet werden. Für jede feldrelevante Produktkomponente wird (ebenfalls im PDM) ein Template-FELDOBJEKT erzeugt und entsprechend der Modellzugehörigkeit verknüpft. Das Ergebnis ist eine Template-FELDSTRUKTUR für das dem Entwicklungsmodell zugehörige Produkt bzw. die Produktkomponente. Für die Erzeugung und Verknüpfung strukturierter Template-

FELDOBJEKTE sind die folgenden Regeln anzuwenden, die in hohem Maße die Einrichtung und die Aufrechterhaltung konsistenter FELDSTRUKTUREN unterstützen.

Regeln für Template-FELDOBJEKTE

1. Verfügt ein Produkt über mindestens eine feldrelevante Produktkomponente, so ist auch für das Gesamtprodukt (z.B. eine sich in der Entwicklung befindende Maschine) ein Template-FELDOBJEKT zu erzeugen.
2. Für eine Produktkomponente, die andere, feldrelevante Produktkomponenten organisiert (z.B. als eine hierarchisch übergeordnete Baugruppe), ist ebenfalls ein Template-FELDOBJEKT zu erzeugen.
3. Existiert für eine Produktkomponente bereits ein Template-FELDOBJEKT bspw. aus einem anderen Produktkontext, so ist dieses Template-FELDOBJEKT wiederzuverwenden.
4. Ist der Ursprung einer Template-FELDSTRUKTUR ein Entwicklungsmodell, so sind alle Template-FELDOBJEKTE (dieser Template-FELDSTRUKTUR) mit dem Dokument des Entwicklungsmodells zu verknüpfen.

Lt. der 4. Regel für Template-FELDOBJEKTE wird über den Beziehungstyp *DO-TFO* ein unmittelbarer Bezug zwischen dem Dokument des ursprünglich als Auswahlgrundlage genutzten Entwicklungsmodells und den daraus resultierenden Template-FELDOBJEKTEN hergestellt. Dadurch lässt sich dokumentieren und schließlich zurückverfolgen, auf welcher (Modell-)Grundlage ein Template-FELDOBJEKT basiert.

Ein Dokument kann mit keinem oder beliebig vielen Template-FELDOBJEKTEN in Beziehung stehen. **Fall 1** liegt vor, wenn eine Produktkomponente nicht für die Repräsentation durch ein Template-FELDOBJEKTE ausgewählt ist, da diese wie z.B. die Blechverkleidung einer Maschine im Allgemeinen über keine Maschinendatenrelevanz verfügt. Fall 1 kann jedoch auch vorliegen, wenn ein Template-FELDOBJEKT nicht auf der Grundlage eines Entwicklungsmodells, sondern anhand eines Artikels festgelegt ist. Diese Vorgehensweise ist insbesondere für Produktkomponenten relevant, für die im PDM keine (produktrelevanten) Entwicklungsdaten verwaltet werden und somit keine Dokumente existieren. Dies trifft unter anderem auf eine sich in der Entwicklung befindende Maschinensoftware zu, deren Projektdateien mithilfe eines spezialisierten, domänenspezifischen Versionsverwaltungssystems dokumentiert werden. Unter diesen Umständen ist im PDM anhand des Artikels für die Software ein Template-FELDOBJEKT manuell festzulegen. Hierzu verfügt der Entitätstyp *Artikel* wie in Abbildung 28 gezeigt über das Attribut *ist_feldrelevant* als Hinweis für die Feldrelevanz einer Produktkomponente. Anhand des

Beziehungstyps *AR-TFO* kann ein Artikel mit keinem oder nur einem Template-FELDOBJEKT in Beziehungen stehen. Umgekehrt ist ein Template-FELDOBJEKT entweder mit keinem oder mit genau einem Artikel verknüpft.

Fall 2 beschreibt die Situation, dass ein Dokument mit beliebig vielen Template-FELDOBJEKTEN in Beziehung steht. Dies tritt ein, wenn entweder konfigurationsverschiedene oder konfigurationsgleiche (identische) Produktkomponenten mehrfacher Bestandteil eines Entwicklungsmodells sind. Fall 2 sei exemplarisch an einem Achsantriebmodul für Busse verdeutlicht (vgl. Abbildung 29, oben). Das Modul besteht aus einem Achsträger und zwei elektrischen Radnabenmotoren. Für beide Produktkomponenten sind im PDM separate Dokumente angelegt und mit dem Dokument für das Achsantriebmodul verknüpft (vgl. Abbildung 29, unten links). Die Mehrfachverwendung des Radnabenmotors ist anhand der Dokumentstruktur nicht erkennbar, jedoch aber an der Template-FELDSTRUKTUR: Im konkreten Fall existieren für beide Radnabenmotoren separate Template-FELDOBJEKTE, die durch ihre Beziehungen zum Template-FELDOBJEKT des Achsantriebsmoduls die Template-FELDSTRUKTUR bilden.

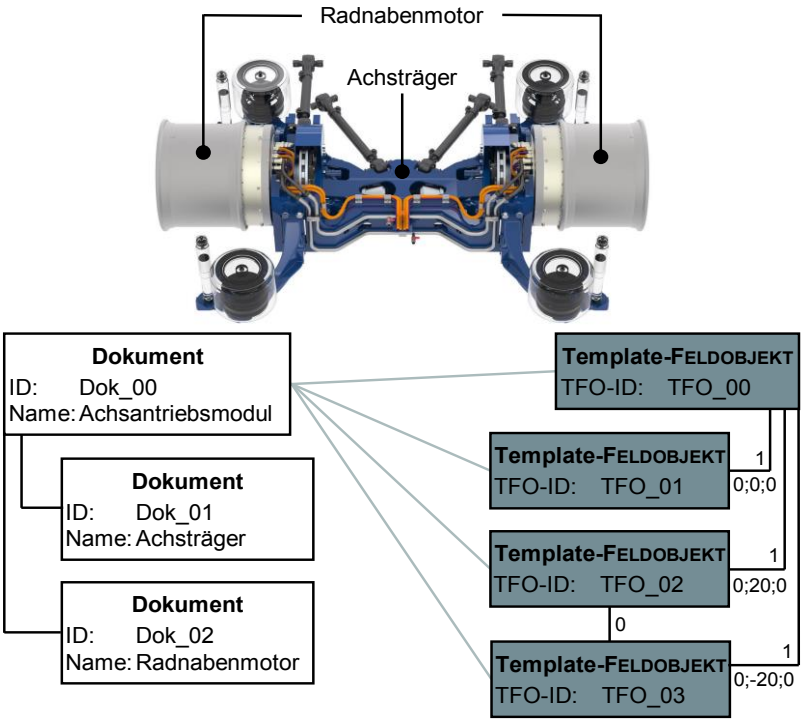


Abbildung 29: Achsantriebmodul für Busse (Darstellung m.H.v. ZIEHL-ABEGG SE, 2017)

Template-FELDOBJEKTE können wie mit dem Beispiel der Maschinensoftware bereits angedeutet, auf der Grundlage unterschiedlicher, domänenspezifischer Entwicklungsmodelle definiert sein. Davon unabhängig sind Template-FELDOBJEKTE Bestandteil einer

gemeinsamen, produktspezifischen Template-FELDSTRUKTUR. Abbildung 30 verdeutlicht diesen Zustand am Beispiel einer Hydraulikpresse.

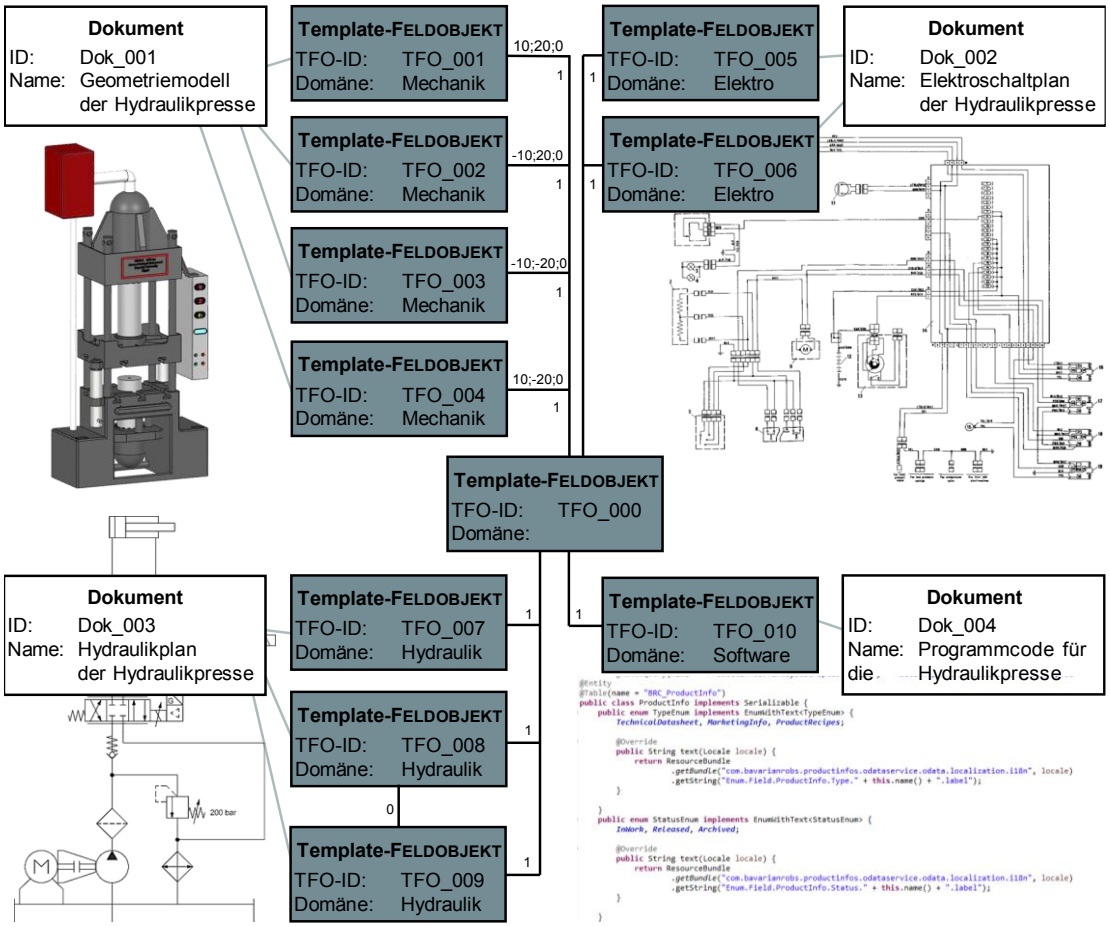


Abbildung 30: Nutzung domänenspezifischer Modelle zur Ableitung von Template-FELDOBJEKTEN (Quelle: Eigene Darstellung m.H.v. HIDRALMAC Europe GmbH, 2015)

Für die Entwicklung der Hydraulikpresse wurden in vereinfachter Annahme vier Entwicklungsmodelle unterschiedlicher Domänen genutzt. Die Modelle verfügen über teils domänenspezifische Produktkomponenten, die für die Repräsentation durch Template-FELDOBJEKTE beispielgebend ausgewählt wurden. Dies sind im Einzelnen:

1. die Führungssäulen der Hydraulikpresse (TFO_001 bis 004),
2. eine Steuerungsplatine sowie ein Drucksensor (TFO_005 und 006),
3. Motor und Hydraulikpumpe sowie ein Ventilstellantrieb (TFO_007 bis 009) der Hydraulikanlage sowie
4. die zur Presse zugehörige Herstellersoftware (TFO_010).

Nicht zuletzt existiert entsprechend der Regeln für strukturierte Template- FELDOBJEKTE auch für die Hydraulikpresse selbst ein domänenunabhängiges Template-FELDOBJEKT (TFO_000). Die Template-FELDOBJEKTE der Produktkomponenten sind unter

Vernachlässigung aller Unterbaugruppen mit dem Template-FELDOBJEKT der Hydraulikpresse verknüpft. Die erfolgreiche Realisierung solcher Verknüpfungen setzt eine integrierte und domänenübergreifende Zusammenarbeit voraus!

Der Beziehungstyp *TFO-TFO* verfügt wie der Beziehungstyp *FO-FO* im Basisdatenmodell der FELDMANAGEMENTPLATTFORM über ein *Typ*-Attribut (siehe Abbildung 20 auf S. 46), anhand dessen die logische Beziehung zwischen Template-FELDOBJEKTEN durch 1 oder 0-kodierte Kanten gekennzeichnet wird. Durch den Referenzcharakter des erweiterten Basisdatenmodells für PDM lassen sich weitere Daten dem Template-FELDOBJEKTE und dem Beziehungstyp *TFO-TFO* zuweisen: Einerseits können Template-FELDOBJEKTE für Produktkomponenten wie im Beispiel der Hydraulikpresse über die Angabe der Domänenzugehörigkeit verfügen. Andererseits lassen sich anhand des Beziehungstyps *TFO-TFO* Daten speichern, die die Beziehung zwischen Produktkomponenten – stellvertretend durch Template-FELDOBJEKTE – spezifizieren. Dies kann wie im Beispiel des Achsantriebmoduls die Position des Achsträgers und der Radnabenmotoren relativ zum gesamten Achsantriebmodul sein. Dementsprechend verfügen wie in Abbildung 29 gezeigt, die als Linien angedeuteten Beziehungsentitäten über Koordinatenangaben für x, y und z, bezogen auf das Ursprungskoordinatensystem[35] der übergeordneten Baugruppe (hier der Modulbaugruppe). Diese relative Position jeder Komponente lässt sich mithilfe der Koordinatenangaben unmittelbar aus einer CAD-Anwendung ableiten und als Beziehungsinformation speichern.

Eine wie in Abbildung 29 und Abbildung 30 gezeigte Template-FELDSTRUKTUR dient vorrangig als Grundlage für die Instanziierung von FELDOBJEKTEN und der dazugehörigen SUB-FELDSTRUKTUREN. Darüber hinaus ermöglicht sie die gezielte und vor allem auch produktübergreifende Planung von Template-FELDSTRUKTUREN sowie die Erfassung und Nutzung der in Aussicht stehenden Maschinendaten bereits während der Produktentwicklung vorauszudenken. Damit verbunden sind datenstrategische Entscheidungen, welche Art, Menge und Qualität an Daten für bestimmte Ziele (z.B. zur Datenanalyse) erforderlich sind (vgl. Klement et al., 2018, S. 173).

Zum Umgang mit Zulieferkomponenten (1)

Angesichts von Template-FELDOBJEKTEN und Template-FELDSTRUKTUREN stellt sich die Frage, wie mit Zulieferkomponenten umzugehen ist, die als Kaufteile ein integraler Produktbestandteil sein können. Müssen Maschinenhersteller auch für die durch Zulieferer bezogenen Produktkomponenten Template-FELDOBJEKTE definieren oder obliegt diese

[35] Für Objekte wie Koordinatensysteme, Ebenen, Achsen usw. lassen sich ebenfalls Template-FELDOBJEKTE definieren. Das FELDKONZEPT, wie in dieser Arbeit beschrieben, ist für diesen Zweck zu erweitern. Eine Beschreibung von Erweiterungsmöglichkeiten liefert Kapitel 7.2 (Kritik und weiterführende Arbeiten).

Aufgabe allein den Zulieferern, vorausgesetzt diese setzen das FELDKONZEPT ebenfalls um? Die Antwort lautet: Jeder Hersteller – ob Maschinenhersteller oder Zulieferer – muss für jede feldrelevante Produktkomponente ein Template-FELDOBJEKT erzeugen und dieses in der produkteigenen Template-FELDSTRUKTUR verknüpfen. Begründung: Hersteller für z.B. Sensoren als Zulieferkomponenten kennt für gewöhnlich das Endprodukt (im Allgemeinen eine Maschine) nicht, in das ein jeweils konkreter Sensor verbaut wird. Es muss jedoch gewährleistet sein, dass sich das FELDOBJEKT eines solchen Produkts (Sensors) ordentlich in die finale Sub-FELDSTRUKTUR einer Maschine integriert. Dies gelingt nur dann, wenn das produktzugehörige FELDOBJEKT inkl. Seriennummer in der FELDSTRUKTUR bereits existiert. Für die Erzeugung dieses FELDOBJEKTS ist der Hersteller des Sensors (als Zulieferer) verantwortlich. Aus Sicht des Maschinenherstellers muss zudem klar definiert sein, ob eine Produktkomponente in Eigenfertigung hergestellt oder durch einen Zulieferer bezogen wird. Die Informationen über die Herkunft einer Produktkomponente liefert der Artikel unter Angabe von *Make or Buy*.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass Zulieferkomponenten mit der Herstellung einer Maschine gewissermaßen in Betrieb genommen werden. Diesen Sachverhalt behandelt der Teilprozess III des FELDPROZESS-Modells (siehe ab S. 83). Darüber hinaus sei für die Identifikation und die Verknüpfung von FELDOBJEKTEN auf die Aktivität 4 des Teilprozesses I verwiesen.

Aktivität 2

In der Aktivität 2 im Teilprozess I des FELDPROZESS-Modells (vgl. Abbildung 27 auf S. 63) erfolgt die gezielte Identifikation, Auswahl und Dokumentation der zu veröffentlichenden, feldrelevanten Produkteigenschaften und Maschinenparameter. Der detaillierte Verlauf der Aktivität 2 folgt einem separaten Subprozess und findet anhand von Mehrfachaktivitäten in sequenzieller Bearbeitung und beliebiger Bearbeitungsreihenfolge statt. Das bedeutet, die Auswahl und die Dokumentation werden für jede Eigenschaft bzw. für jeden Parameter individuell betrachtet. Die Aktivität 2 endet mit der Feststellung, dass die Auswahl und die Dokumentation vollständig sind, als abschließendes Ereignis. Im Folgenden werden die Auswahl und die Dokumentation als separate Aktivitäten näher beschrieben.

Zur Identifikation und Auswahl der zu veröffentlichenden Produkteigenschaften und Maschinenparameter

Eine leistungsfähige (und damit schnelle) Abfrage von Produkt- und Maschinendaten wird ermöglicht durch die Reduktion der angebotenen Daten, zum einen durch die gezielte Auswahl feldrelevanter Produktkomponenten (siehe Aktivität 1) und zum anderen durch

eine gedankliche Vorausplanung der, über die produkt- und maschinenseitig eingesetzten Kommunikationsschnittstellen veröffentlichten, Informationen zu feldrelevanten Produkteigenschaften und Maschinenparametern. Eine solche Vorausplanung muss vor der finalen Inbetriebnahme einer Maschine oder Maschinenkomponente in der Produktentwicklung erfolgen und liegt daher in der Verantwortung des Maschinenherstellers.

Das Antizipieren der für die Betriebsphase relevanten Informationen ist notwendig, da aufgrund der existierenden, großen Anzahl von Produkteigenschaftsgrößen und Maschinenparametern sowie der damit verbundenen, z.T. immensen Datenmengen nicht alle veröffentlicht werden können bzw. müssen. Die gezielte Auswahl der zu veröffentlichenden, feldrelevanten Produkteigenschaften und Maschinenparametern verlangt nach einem eigenständigen und an die Bedürfnisse von Herstellern und Betreibern angepassten Entscheidungsprozess (vgl. Klement et al., 2018). Systematisch und unterstützt durch Methoden und Werkzeuge wie Fragebögen, Anwendungsfall- und Bedarfsanalysen usw. lassen sich die während der Betriebsphase einer Maschine oder Maschinenkomponente erforderlichen Informationen bzgl. Produkteigenschaften und Maschinenparameter ermitteln und die dazugehörigen Produkt- bzw. Maschinendaten identifizieren. Die Auswahl der zu veröffentlichenden, feldrelevanter Produkt- und Maschineninformationen erfolgt schließlich mithilfe der bereits für die Auswahl feldrelevanter Produktkomponenten eingesetzten domänenspezifischen Entwicklungswerkzeuge speziell für die Modellierung bzw. Beschreibung Automatisierungstechnik-relevanter Zusammenhänge.

Die Auswahl der zu veröffentlichenden, feldrelevanten Produkteigenschaften und Maschinenparameter gründet sich auf die in der Aktivität 1 getroffenen Auswahl feldrelevanter Produktkomponenten. Eine feldrelevante Produktkomponente kann (als Datenlieferant) über einen Knoten in den zum Datenaustausch eingesetzten, modellbasierten Kommunikationsschnittstellen auf Maschinenhersteller und -betreiberseite verfügen. Indes ist für eine Produktkomponente, die andere, feldrelevante Produktkomponenten organisiert (z.B. eine Baugruppe), ein solcher Knoten nicht zwangsläufig notwendig, auch wenn diese über ein Template-FELDOBJEKT verfügt.

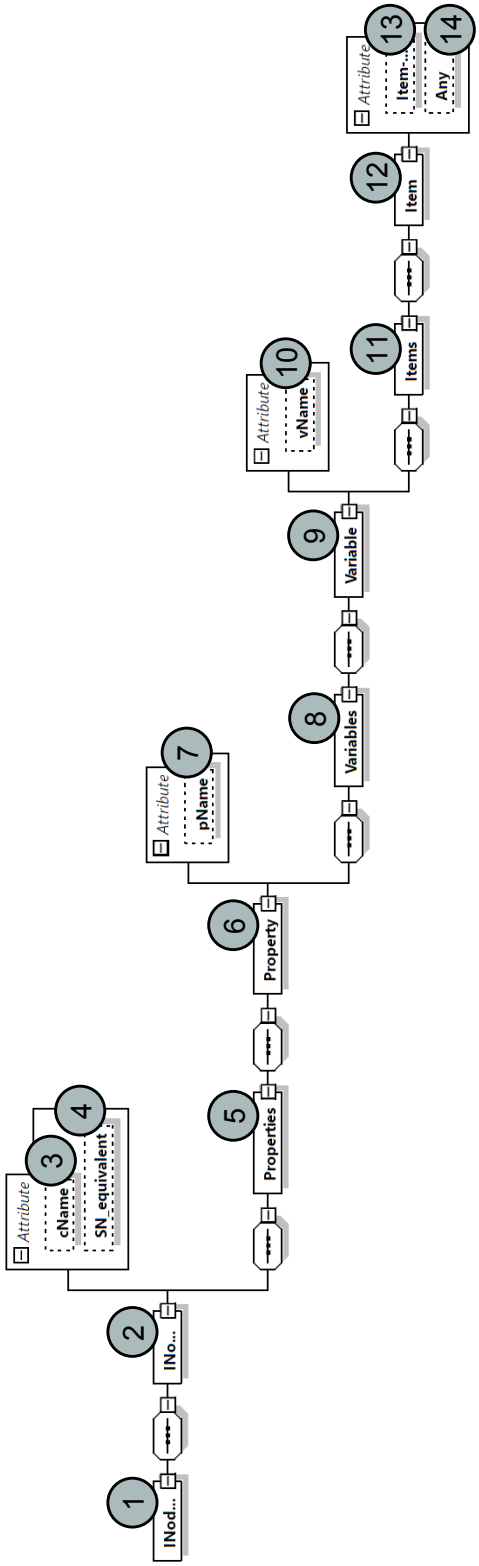
Die Auswahl der zu veröffentlichenden Informationen zu feldrelevanten Produkteigenschaften und Maschinenparametern ist (wie die Auswahl feldrelevanter Produktkomponenten) Bestandteil des Produktmodells. Die Verwaltung der dateibasierten Informationsauswahl erfolgt über das Template-FELDOBJEKT im PDM.

Zur Dokumentation der zu veröffentlichenden Produkteigenschaften und Maschinenparameter

Die Dokumentation der zu veröffentlichenden Produkteigenschaften und Maschinenparameter erfolgt dateibasiert im PDM-System des Maschinenherstellers. Entsprechende Dateien können im Informationsumfang, im Vokabular und dessen Semantik sowie in der Struktur unternehmensindividuell realisiert sein, insofern sie dazu geeignet sind, die produkt- und maschinenseitig eingesetzten, schnittstelleneigenen Modelle korrekt und vollständig zu definieren. Die Verknüpfung von Datei und Template-FELDOBJEKTEN ist im erweiterten Basisdatenmodell für PDM (siehe Abbildung 28 auf S. 65) über den Beziehungstyp *DA-TFO* definiert. Demzufolge kann ein Template-FELDOBJEKT über keine oder genau eine Datei verfügen; umgekehrt kann eine Datei mehreren Template-FELDOBJEKTEN zugeordnet sein.

Abbildung 31 zeigt ein in graphischer Form dargestelltes, exemplarisches XML-Schema für die Speicherung strukturierter Produkteigenschaften (als zu veröffentlichende, feldrelevante Produktinformationen). In einem auf dem Schema basierenden XML-Dokument können keine oder beliebig viele Produkteigenschaften (*Properties:5*) einem Knotenelement (*INode:2*) zugeordnet sein, das einen Informationsknoten im Modell der Kommunikationsschnittstelle auf Herstellerseite definiert. Ein Knotenelement verfügt über die Attribute *cName:3* für die Bezeichnung einer Produkt- bzw. Maschinenkomponente und *SN_equivalent:4*, für die, im Laufe der Produktion zu erzeugende und zuzuordnende Seriennummer. Ein XML-Dokument kann über mehrere Knotendefinitionen (*INodes:1)* verfügen.

Jede Produkteigenschaft (*Property:6*) besitzt laut des gezeigten XML-Schemas eine Bezeichnung (*pName:7)* sowie Bezüge zu keinem oder beliebig vielen Produkteigenschaftsgrößen (*Variables:8*) als Attribute. Eine Eigenschaftsgröße (*Variable:9*) besitzt ebenfalls eine Bezeichnung (*vName:10)* und kann in Beziehung zu keinem oder beliebig vielen *Item*-Elementen (*Items:11*) stehen. Das *Item*-Attribut *Item-ID:13* ermöglicht die Identifikation des Objekts (bspw. ein Artikel- oder Dokumentattribut im PDM-System des Herstellers), welches die einer Produkteigenschaftsgröße zugeordneten Daten verwaltet. Das *Item*-Attribut *Any:14* dient dazu, ein XML-Dokument um Elemente oder Attribute zu erweitern, die nicht explizit im Schema angegeben sind. Im konkreten Fall kann einem *Item*-Element bspw. ein Pfad-Attribut zur Lokalisierung eines Artikel- oder Dokumentattributs im PDM-System des Herstellers hinzugefügt werden.




```
<?xml version="1.0" encoding="ASCII"?>
<xs:schema elementFormDefault="qualified" xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema">
  <xs:element name="INodes">
    <xs:complexType>
      <xs:sequence
```

Abbildung 31: XML-Schema für Produkteigenschaften

Zur Definition der Knotenelemente explizit für die Maschinenparameter kann ein ähnliches XML-Schema wie in Abbildung 31 gezeigt entwickelt und verwendet werden. Die schließlich mit einer Maschine oder Maschinenkomponente (bspw. als XML-Dokument) ausgelieferte Knotendefinition ermöglicht den korrekten Aufbau des schnittstelleneigenen Modells auf Maschinenbetreiberseite.

Ein Beispiel für das Speichern ausgewählter Produkteigenschaften und Maschinenparameter zeigt Abbildung 32 für den aus Kapitel 4.2 bekannten Multisensor *Querx WLAN TH*. Es sei angenommen, der Multisensor verfügt über einen Microcontroller mit Software sowie einen Thermo- und Hygrosensor als feldrelevante Produktkomponenten. Der Microcontroller ohne Software sowie die Sensoren werden von Zulieferern bezogen und sind auf einer Platine verbaut. Diese wird wie der gesamte Multisensor von der Firma *egnite* in Eigenfertigung herstellt.

XML-Dokument für ausgewählte

Produkteigenschaften

```
<?xml version="1.0" encoding="ASCII"?>
  <INodes>
    <INode cName="Multisensor" SN_eqivalent="">
      <Properties>
        <Property pName="Dokumentation“>
          <Variables>
            <Variable vName="Version">
              <Items>
                <Item Item-ID="N8tiSO" Ressource=“SAP R/3“/>
              </Items>
            </Variable>
          </Variables>
        </Property>
        <Property pName="Zuverlässigkeit“>
          <Variables>
            <Variable vName="Ausfallrate">
              <Items>
                <Item Item-ID="udeGox" Ressource=“SAP R/3“/>
              </Items>
            </Variable>
          </Variables>
        </Property>
      </Properties>
    </INode>
    <INode cName="MS-Software" SN_eqivalent="">
      <Properties>
        <Property pName="Wartungsversion“>
          <Variables>
            <Variable vName="Verfügbarkeit">
              <Items>
                <Item Item-ID="ZhQgAZ" Ressource=“SAP R/3“/>
              </Items>
            </Variable>
            <Variable vName="Build-ID">
              <Items>
                <Item Item-ID="7f3HVZ" Ressource=“SAP R/3“/>
              </Items>
            </Variable>
          </Variables>
        </Property>
      </Properties>
    </INode>
  </INodes>
```

Maschinenparameter

```
<?xml version="1.0" encoding="ASCII"?>
  <INodes>
    <INode Component="Multisensor" S/N_eqivalent="">
      <Parameters>
        <Parameter Name="Inbetriebnahme">
          <Variables>
            <Variable Name="Datum" Item-ID="XHd2Eg"/>
          </Variables>
        </Parameter>
      </Parameters>
    </INode>
    <INode Component="MS-Software" S/N_eqivalent="">
      <Parameters>
        <Parameter Name="Version">
          <Variables>
            <Variable Name="Versionsnummer" Item-ID="E3EQBz"/>
          </Variables>
        </Parameter>
      </Parameters>
    </INode>
    <INode Component="Microcontroller" S/N_eqivalent="">
      <Parameters>
        <Parameter Name="Aktivität">
          <Variables>
            <Variable Name="Status" Item-ID="N8tiSO"/>
          </Variables>
        </Parameter>
      </Parameters>
    </INode>
    <INode Component="Thermosensor" S/N_eqivalent="">
      <Parameters>
        <Parameter Name="Messung">
          <Variables>
            <Variable Name="Messwert" Item-ID="T7Fux5"/>
          </Variables>
        </Parameter>
      </Parameters>
    </INode>
    <INode Component=" Hygrosensor" S/N_eqivalent="">
      <Parameters>
        <Parameter Name="Messung">
          <Variables>
            <Variable Name="Messwert" Item-ID="wLFac4"/>
          </Variables>
        </Parameter>
      </Parameters>
    </INode>
  </INodes>
```

Abbildung 32: XML-Dokumente für die Eigenschafts- und Parameterauswahl eines Multisensors

Das XML-Dokument für die Produkteigenschaften in Abbildung 32 (links) basiert auf dem in Abbildung 31 vorgestellten Schema. In dem Dokument enthalten sind die Knotendefinitionen für den Multisensor und dessen Software (*Component = "Multisensor"; Component = "MS-Software"*). Die Daten der veröffentlichten Eigenschaftsgrößen stammen aus dem SAP R/3 *(Ressource)* der Firma *egnite* und sind dem Item-Element mit der *ID* N8tiSO zugeordnet. Für die Software lassen sich unter anderem die Verfügbarkeit und die Build-ID der aktuellen Wartungsversion abfragen. Die Angabe der Seriennummern unter S*N_equivalent* erfolgt erst mit der Herstellung eines konkreten Sensors, zusammen mit der Erzeugung eines konkreten Knotens in der produktseitig eigensetzten Kommunikationsschnittstelle auf Herstellerseite.

Im XML-Dokument für die Maschinenparameter (in Abbildung 32 rechts) wurde ein äquivalentes Schema wie für die Produkteigenschaften genutzt. Knotendefinitionen sind im Detail maschinenseitig für alle Sensorkomponenten sowie für den Multisensor als Gesamtprodukt vorgesehen. Es lassen sich im Einzelnen das Inbetriebnahmedatum des Sensors, die Versionsnummer der Software, der Status des Microcontrollers sowie die Messwerte beider Sensoren als Daten abfragen.

Die Auswahl feldrelevanter Produkt- und Maschineninformationen ist wie die Auswahl feldrelevanter Produktkomponenten (bzw. deren Template-FELDOBJEKTE) **konfigurationsspezifisch**. Dahingehend sind die Dokumente zur Speicherung der ausgewählten Produkteigenschaften und Maschinenparameter ein **Bestandteil der Produktkonfiguration**. Modifikationen an einer freigegebenen Auswahl von Produkt- und Maschineninformationen bzw. an einer freigegebenen Auswahl feldrelevanter Produktkomponenten (bzw. deren Template-FELDOBJEKTE) begründen demzufolge eine **Konfigurationsänderung**.

Zum Umgang mit Zulieferkomponenten (2)

Jeder Hersteller – ob Maschinenhersteller oder Zulieferer – ist dafür verantwortlich, nur für die jeweils selbst in Eigenfertigung produzierten, feldrelevanten Produkte Knotendefinitionen (*INodes*) zu erstellen. Demzufolge liegt im obigen Beispiel die Veröffentlichung der produktbezogenen Knoten für den Microcontroller und die Sensoren in der Verantwortung der Zulieferer.

Aktivität 3

Nach der abgeschlossenen Auswahl und Dokumentation feldrelevanter Produktkomponenten sowie feldrelevanter Informationen zu Produkteigenschaften und Maschinenparametern in der Aktivität 1 und 2 erfolgt mit der Produktion einer Maschine oder Maschinenkomponente als Initial- bzw. Zwischenereignis der Aufbau bzw. die Aktualisierung des schnittstelleneigenen Modells als Teil der Kommunikationsschnittstelle auf Herstellerseite (vgl. Abbildung 27 auf S. 63). Der detaillierte Verlauf der Aktivität 3 folgt einem separaten Subprozess, dessen Gestaltung unternehmensindividuell und von den zur Kommunikation eingesetzten Schnittstellentechnologien abhängig ist.

Die produktrelevanten Modellknoten als Teil der Kommunikationsschnittstelle auf Herstellerseite sowie die dazugehörigen FELDOBJEKTE sind feste, gewissermaßen „mit ausgelieferte“ Produktbestandteile, die durch die Instanziierung der Knotendefinitionen und Template-FELDOBJEKTE erzeugt werden.

Die Knotendefinitionen (*INodes*) der in Aktivität 2 ausgewählten Informationen zu feldrelevanten Produkteigenschaften werden zum Erzeugen von Knoten im Modell der Kommunikationsschnittstellen auf Herstellerseite genutzt. Die für *INode*-Attribut *SN_equivalent* notwendige Seriennummer wird mit der Produktion einer Maschine bzw. Maschinenkomponente erzeugt. Die Knoten begründen entweder ein neues, produktbezogenes, schnittstelleneigenes Modell oder werden alternativ einem vorhandenen Modell hinzugefügt.

Aktivität 4 (1. Teil)

Mit dem Abschluss der Aktivität 3 werden die Seriennummern der feldrelevanten Maschinen und Maschinenkomponenten sowie die Ressourcenzeiger für die herstellerseitige Kommunikationsschnittstelle an die FELDMANAGEMENTPLATTFORM übermittelt. Der Nachrichtenempfang löst die Aktivität 4 aus (vgl. Abbildung 27 auf S. 63), woraufhin die FELDSTRUKTUR aufgebaut bzw. aktualisiert wird. Der detaillierte Verlauf der Aktivität 4 folgt dem in Abbildung 33 dargestellten, separaten Subprozess.

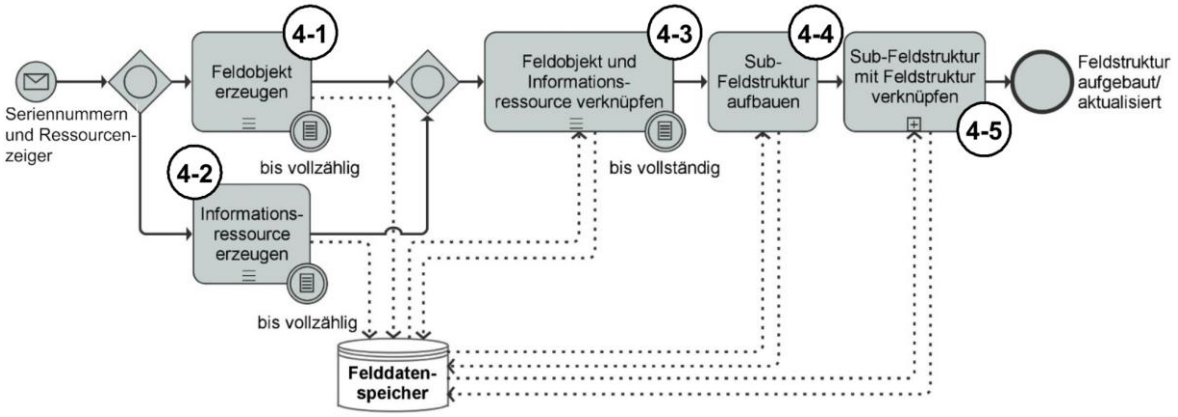


Abbildung 33: Subprozess zum Aufbau bzw. zur Aktualisierung der FELDSTRUKTUR

Zu Beginn der Aktivität 4 erfolgt eine Instanziierung der in der Aktivität 1 definierten Template-FELDSTRUKTUR. Dabei werden für die feldrelevanten und in Eigenfertigung hergestellten Maschinen bzw. Maschinenkomponenten FELDOBJEKTE gemäß der realisierten Produktkonfiguration im FELDDATENSPEICHER erzeugt (Aktivität 4-1). Daraufhin wird jedem neu erzeugten FELDOBJEKT die Seriennummer der jeweils zugehörigen Maschine bzw. Maschinenkomponente zugewiesen. Die Seriennummern für Zulieferer-komponenten lassen sich indes entweder direkt, z.B. über ein produktzugehörendes Typen-schild, oder über die FELDSTRUKTUR ermitteln. Letzteres ist möglich, da die FELDOBJEKTE für Zuliefererkomponenten bereits durch deren Hersteller angelegt wurden (siehe hierzu der Absatz „Zum Umgang mit Zulieferkomponenten (1)“ auf S. 69). Parallel zur Aktivität 4-1 werden in der Aktivität 4-2 die INFORMATIONSRESSOURCEN mit den für die Abfrage von Produktdaten erforderlichen Ressourcenzeigern angelegt. (Verfügt eine vorhandene INFORMATIONSRESSOURCE bereits über einen notwendigen Ressourcenzeiger, findet die *2. Gruppierungsregel* Anwendung.)

Im weiteren Verlauf des Subprozesses wird die Sub-FELDSTRUKTUR für die neu produzierte Maschine oder Maschinenkomponente aufgebaut, indem die neu angelegten und die von Zulieferern bereitgestellten FELDOBJEKTE miteinander verknüpft werden. In diesem Zusammenhang werden den Verknüpfungsbeziehungen Werte für unter anderem das *Typ*-Attribut für den Beziehungstyp FO-FO zugewiesen. Darüber hinaus werden die FELDOBJEKTE und INFORMATIONSRESSOURCEN in der Aktivität 4-3 entsprechend der in der Aktivität 2 geplanten Zuordnung verknüpft (siehe hierzu das *TFO*-Element Nr. 15 in der Knotendefinition auf S. 73).

Zum Abschluss der Aktivität 4 ist es notwendig, anhand der zuvor aufgebauten SUB-FELDSTRUKTUR eine neue FELDSTRUKTUR zu begründen oder die SUB-FELDSTRUKTUR eine vorhandene FELDSTRUKTUR durch Verknüpfungen zu integrieren (diese zu erweitern). Hierzu sind in der Aktivität 4-5 zunächst die FELDOBJEKTE gleicher Maschinen und

Maschinenkomponenten unter Zuhilfenahme ihrer Seriennummern zu identifizieren. Kann mindestens ein solches (vorhandenes) FELDOBJEKT identifiziert werden, ist zu überprüfen, ob eine mit „0“-kodierte Kante existiert, die entsprechend der *1. Gruppierungsregel* auf ein in chronologischer Sicht zuerst erzeugtes FELDOBJEKT einer gleichen Maschine bzw. gleichen Maschinenkomponente zeigt. Trifft dies zu, ist zu diesem FELDOBJEKT eine neue Verknüpfungsbeziehung zu erzeugen und die Kantenkodierung „0“ / „gleicht“ zuzuweisen. Kann kein (vorhandenes) FELDOBJEKT identifiziert werden, ist eine Verknüpfung obsolet.

4.3.3 Teilprozess II: Aktualisierung der FELDSTRUKTUR

Der in Abbildung 34 dargestellte Teilprozess II dient dazu, die Konsistenz der FELDSTRUKTUR wiederherzustellen, die aufgrund der Inbetriebnahme einer Maschine oder durch die Änderung einer Maschinenkonfiguration verlorengegangen ist. Hierzu wird einerseits die Kommunikationsschnittstelle auf Maschinenbetreiberseite zur Abfrage von Maschinendaten eingerichtet und andererseits werden die Verbindungen zwischen FELDOBJEKTEN und den in Betrieb genommenen Maschinen oder Maschinenkomponente neu hergestellt bzw. aktualisiert.

Der Teilprozess II ermöglicht die Umsetzung von drei Szenarien, die durch eins von zwei möglichen Startereignissen im Informationssystem beim Maschinenbetreiber eingeleitet werden (siehe Abbildung 34, unten).

1. Szenario: Eine Maschinen oder Maschinenkomponente wird erstmals in Betrieb genommen.
2. Szenario: Im Rahmen einer Instandsetzung erfolgt der Austausch einer feldrelevanten Maschine oder Maschinenkomponente durch eine identische.
3. Szenario: Im Rahmen einer Instandsetzung erfolgt eine strukturelle oder topologische Änderung einer feldrelevanten Maschine oder Maschinenkomponente bzw. der Austausch einer solchen durch eine nicht identische. Daraus resultiert eine Änderung der Maschinenkonfiguration (*As-Maintained*).

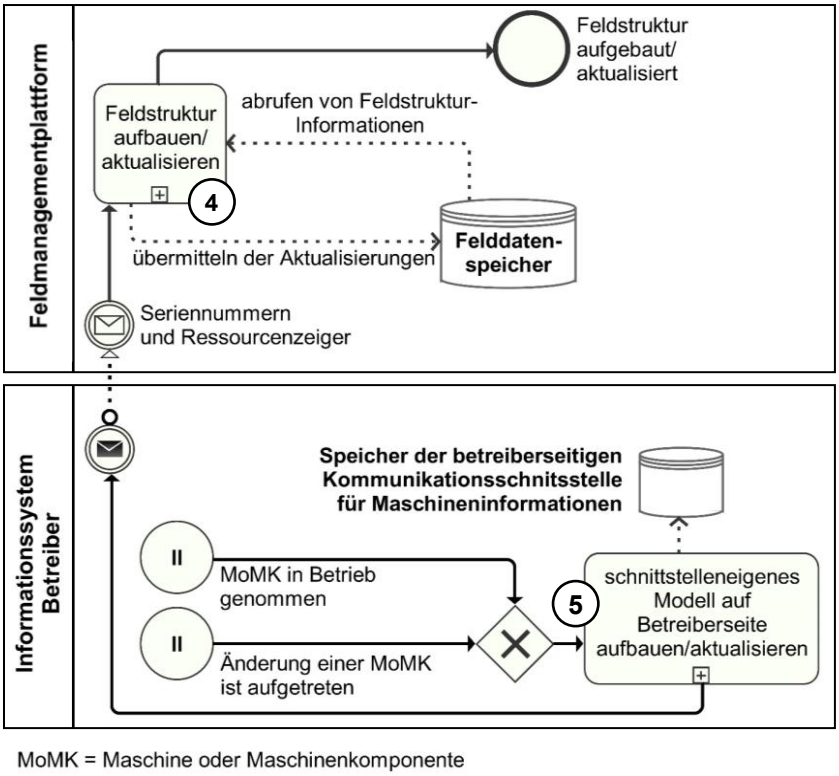


Abbildung 34: Auszug aus dem FELDPROZESS-Modell: Der Teilprozess II als BPMN-Flussdiagramm

Änderungen einer Maschine oder Maschinenkomponente wie sie in den Szenarien 2 und 3 auftreten, sind konsequent nachzuverfolgen und sowohl in der Kommunikationsschnittstelle auf Maschinenbetreiberseite als auch in der FELDSTRUKTUR abzubilden.

Änderungen am Produktmodell der bereits hergestellten und in Betrieb genommenen Maschinen und Maschinenkomponenten haben keine Auswirkungen auf die bestehende FELDSTRUKTUR oder auf die bestehenden Kommunikationsschnittstellen auf Maschinenbetreiberseite. Die Ergebnisse eines Änderungsprozesses wirken sich erstmalig auf die infolgedessen und auf der Grundlage des geänderten Produktmodells hergestellten und in Betrieb genommenen Maschinen und Maschinenkomponenten aus.

Aktivität 5

In der Aktivität 5 erfolgt der Aufbau bzw. die Aktualisierung des auf Maschinenbetreiberseite eingesetzten Modells der Kommunikationsschnittstelle einem separaten Subprozess, dessen Gestaltung unternehmensindividuell und von den zur Informationsbereitstellung eingesetzten Technologien abhängig ist. Dementsprechend werden mit der Inbetriebnahme

einer Maschine oder Maschinenkomponente im 1. Szenario die in der Aktivität 2 geplant zu veröffentlichenden Maschinenparameter als Modellknoten in der Kommunikationsschnittstelle auf Maschinenbetreiberseite angelegt. Die hierfür notwendigen Knotendefinitionen sind in einer mit der Maschine bzw. Maschinenkomponente ausgelieferten Datei gespeichert (siehe hierzu das Beispiel eines XML-Dokuments für die Parameterauswahl eines Multisensors auf S. 74).

Findet wie im 2. und 3. Szenario der Austausch einer feldrelevanten Maschine oder Maschinenkomponente statt, muss das dazugehörende, schnittstelleneigene Modell aktualisiert werden. Im Fall gleicher Maschine bzw. Maschinenkomponente (2. Szenario) bleibt der bereits bestehende Modellknoten (der ausgetauschten Maschine bzw. Maschinenkomponente) erhalten und es erfolgt ausschließlich ein Wechsel der Seriennummer, da die ansonsten veröffentlichten Maschinenparameter identisch sind. Im Fall umfangreicher Änderungen einer feldrelevanten Maschine oder Maschinenkomponente (3. Szenario) ist es erforderlich, den Modellknoten (der ausgetauschten Maschine bzw. Maschinenkomponente) zu ersetzen. Wichtige Voraussetzung hierfür ist dessen vorhandene Knotendefinition, die durch den Maschinenhersteller bereitgestellt sein muss.

Aktivität 4 (2. Teil)

Im Teilprozess II wird auf Aktivität 4 aus dem Teilprozess I (siehe Abbildung 33 auf S. 77) zurückgegriffen, denn mit der Inbetriebnahme einer Maschine oder Maschinenkomponente bzw. aufgrund von maschinenseitigen Konfigurationsänderungen, sind Aktualisierungen von Teilen der FELDSTRUKTUR notwendig, um diese konsistent zu halten. Die Aktivität 4 wird durch eine Nachricht aus dem Informationssystem des Maschinenbetreibers ausgelöst. Eine solche Nachricht umfasst die Seriennummern der betroffenen Maschinen bzw. Maschinenkomponenten sowie die Ressourcenzeiger auf deren Modellknoten innerhalb der Kommunikationsschnittstelle.

Mit der Inbetriebnahme einer Maschine oder Maschinenkomponente im 1. Szenario sind weitere INFORMATIONSRESSOURCEN im Datenbestand der FELDMANAGEMENTPLATTFORM zu erzeugen, welche die auf Maschinenbetreiberseite angelegten, schnittstelleneigenen Modellknoten referenzieren. Die INFORMATIONSRESSOURCEN sind infolgedessen mit den FELDOBJEKTEN entsprechend gleicher Seriennummern zu verknüpfen.

Das für das 1. Szenario beschriebene Vorgehen gilt grundlegend auch für das 2. und 3. Szenario. Wird eine Maschine oder Maschinenkomponente ausgetauscht, ist deren FELDOBJEKT durch das FELDOBJEKT der ersetzenden Maschine bzw. Maschinenkomponente in der FELDSTRUKTUR auszutauschen. Das sozusagen Ersatz-FELDOBJEKT existiert bereits, da die ersetzende Maschine bzw. Maschinenkomponente aus der

logischen Konsequenz zwangsläufig bereits hergestellt und damit auch ihr FELDOBJEKT in der FELDSTRUKTUR angelegt ist (siehe hierzu die Aktivität 4 im Teilprozess I). Die Nachricht aus dem Informationssystem des Maschinenbetreibers an die FELDMANAGEMENT-PLATTFORM muss demzufolge die Seriennummern der zu ersetzenden und der ersetzenden Maschine bzw. Maschinenkomponente beinhalten. Das Ersatz-FELDOBJEKT übernimmt denselben Platz wie das vorangegangene FELDOBJEKT in der FELDSTRUKTUR. Dies gilt sowohl für gleiche als auch für ungleiche Maschinen und Maschinenkomponenten (Kantenkodierung „0“ kontra Kantenkodierung „1“).

Zum Umgang mit obsoleten FELDOBJEKTEN

Es stellt sich die Frage, ob die FELDOBJEKTE außer Betrieb genommener Maschinen und Maschinenkomponenten aus der FELDSTRUKTUR gelöscht werden oder erhalten bleiben. Die Antwort lautet: FELDOBJEKTE werden grundsätzlich nicht gelöscht; Maschinenkomponenten können repariert und erneut in Betrieb genommen werden. In diesem Sinne kann die dokumentierte Historie eines FELDOBJEKTS als Verwendungsnachweis für dessen zugeordnete Maschinen bzw. Maschinenkomponente betrachtet werden. Es ist außerdem vorstellbar, das FELDKONZEPT auf andere Prozessbereiche oder Phasen des Produktlebenszyklus wie das Recycling auszudehnen. Demnach kann der angesprochene Verwendungsnachweis wichtige Informationen für diese (neuen) Prozessbereiche mit sich bringen.

Zum Umgang mit strukturellen und topologischen Änderungen

Eine strukturelle Änderung einer Maschine oder Maschinenkomponente liegt vor, insofern deren Aufbau von der ursprünglich geplanten Zusammenstellung der konfigurationsspezifischen Knoten des Produktmodells abweicht. Wird z.B. eine feldrelevante Komponente wie etwa ein Sensor dauerhaft d.h. ohne Ersatz entfernt, ändert sich die geplante Struktur der Maschinenkonfiguration. Die FELDSTRUKTUR muss mit dem schnittstelleneigenen Modell auf Maschinenbetreiberseite synchronisiert werden. Das beutete im konkreten Beispiel, das dem Sensor zugeordnete FELDOBJEKT wird nicht ersetzt und die in der FELDSTRUKTUR obsolet gewordene Verknüpfung wird als inaktiv markiert. In einem anderen Beispiel wird ein Multisensor durch mehrere Einzelsensoren ersetzt; das Beispiel kann auch in umgekehrter Richtung betrachtet werden. Die Änderung erfordert die Aktualisierung der FELDSTRUKTUR: Im Detail sind die Ersatz-FELDOBJEKTE korrekt in die FELDSTRUKTUR zu integrieren, sodass diese entsprechend dem (realen) Aufbau bzw. der neuen Konfiguration (*As-Maintained*) organisiert ist. Nicht zuletzt entspricht auch der Wechsel einer Maschine in ein anderes Kommunikationsnetzwerk einer quasi strukturellen Änderung. In diesem Fall müssen in der FELDSTRUKTUR die Ressourcenzeiger der betroffenen INFORMATIONSRESSOURCEN aktualisiert werden.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass strukturelle Änderungen vollständig und korrekt an die FELDMANAGEMENTPLATTFORM kommuniziert werden müssen, um insbesondere die Ersatz-FELDOBJEKTE in der FELDSTRUKTUR ordnungsgemäß zu verknüpfen. Es existieren mehrere, theoretische Ansätze, um entsprechende Änderungen der FELDMANAGEMENTPLATTFORM bekannt zu machen:

1. Der Einsatz einer sekundären, auf Betreiberseite verwalteten FELDSTRUKTUR bietet die Möglichkeit, die aktuelle Konfiguration einer Maschine oder Maschinenkomponente separat vorzuhalten. Der Ansatz löst das Grundproblem jedoch nicht, sondern verlagert es nur. Die Verknüpfungen für die Ersatz-FELDOBJEKTE müssen trotzdem in geeigneter Weise in die (betreiberseitige) FELDSTRUKTUR übertragen werden, bevor diese an die FELDMANAGEMENTPLATTFORM kommuniziert werden.
2. Alternativ kann die bereits angesprochene Nachricht aus dem Informationssystem des Betreibers an die FELDMANAGEMENTPLATTFORM die einander zugeordnete Seriennummern beinhalten, anhand derer die Verknüpfungen für die Ersatz-FELDOBJEKTE kommuniziert werden. Es mangelt jedoch auf Betreiberseite an der Grundlage zur Seriennummernzuordnung: Speziell das auf Maschinenbetreiber eingesetzte, schnittstelleneigene Modell verfügt über keine explizite Knotenstruktur, in der die als Knotenattribut gespeicherten Seriennummern einander gegenübergestellt sind.
3. Nicht zuletzt können die mit Informations- und Kommunikationstechnologien ausgestatteten, selbstorganisierenden („smarten“) feldrelevanten Maschinen und Maschinenkomponenten auch direkt mit der FELDMANAGEMENTPLATTFORM verbunden sein, um strukturelle Änderungen zu kommunizieren.

Strukturelle Änderungen an Maschinen oder Maschinenkomponenten führen teilweise auch zu topologischen Änderungen, die die Lagebeziehungen bzw. Anordnung von Komponenten betreffen. Entsprechende Änderungen sind anhand der, für den Beziehungstyp *FO-FO* als (Referenz-)attribut genutzten, relativen Koordinaten zu dokumentieren (siehe hierzu der Absatz „Zum Referenzcharakter des Datenmodells“ auf S. 58). Jedoch ist die Erfassung topologischer Änderungen teilweise aufwendig, erfordert dies doch eine topologische Überprüfung durch z.B. eine messtechnische Unterstützung.

Zum Umgang mit undokumentierten Änderungen

Die bisher als dokumentiert beschriebenen Änderungen an Maschinen oder Maschinenkomponenten sind von undokumentierten Änderungen zu unterscheiden. Letztere sind gekennzeichnet durch nicht erfasste, vernachlässigte (undokumentierte) Anpassungen der FELDSTRUKTUR. Im Einzelnen führen strukturelle oder topologische Änderungen an Maschinen und Maschinenkomponenten zu Diskrepanzen zwischen den, in einer

INFORMATIONSRESSOURCE und dem ihr zugeordneten Informationsknoten gespeicherten, Seriennummern (vgl. Abbildung 25 auf S. 57). Diese Diskrepanz äußert sich als Verknüpfungsfehler in der FELDSTRUKTUR, der auf falsche strukturelle oder topologische Zusammenhänge schließen lässt und eine inkonsistente FELDSTRUKTUR gegenüber den tatsächlichen, realen Konfigurationszusammenhängen verursacht. Auf die Maschinendaten der geänderten Maschinen und Maschinenkomponenten kann nicht mehr zugegriffen werden.

Das Erkennen eines Verknüpfungsfehlers in der FELDSTRUKTUR kann als Indiz und folglich als Nachweis für eine gewissermaßen inoffizielle Änderungen z.B. im Rahmen einer Instandsetzung dienen. Dadurch können sich Hersteller von Maschinen und Maschinenkomponenten gegen unbefugte Änderungen sowie gegen den Einsatz herstellerfremder Ersatzprodukte absichern.

4.3.4 Teilprozess III: Erzeugen eines FELDMODELLS

Der in Abbildung 35 auf S. 84 dargestellte Teilprozess III beschreibt zusammengefasst einen durch die menschliche Unterstützung notwendigen Planungsprozess für FELDMODELLE. Der Teilprozess III kommt einem Modellierungsprozess gleich, der in Analogie zum Schritt der Datenvorbereitung im von Klement et al. (2018, S. 172) vorgestellten Datenanalyseprozess für die Produktentwicklung steht.

Der Teilprozess III wird durch den Bedarf nach einem FELDMODELL eingeleitet, der sowohl von Maschinenhersteller- als auch von Maschinenbetreiberseite aufkommen kann. Bedarfsfälle zur Abfrage und Nutzung von Produkt- und Maschinendaten sind im Unterkapitel 1.1 auf S. 2 beschrieben. Im groben Ablauf erfolgt zu Prozessbeginn die Definition bzw. die Auswahl der für ein aufgabenspezifisches FELDMODELL geeigneten SUB-FELDSTRUKTUR. Im Weiteren werden die für den FELDMODELL-Zweck erforderlichen Produkt- und Maschineninformationen ausgewählt. Zum Prozessabschluss erfolgt die Integration der Produkt- und Maschinendaten und damit die Bereitstellung des FELDMODELLS.

Aufgrund der nahezu grenzenlosen Menge produkt- und maschinenzugehöriger Daten ist es von essenzieller Bedeutung, die für einen FELDMODELL-Zweck tatsächlich relevanten zu identifizieren und diese als verfügbare Daten aus der Gesamtdatenmenge zu isolieren. In Kapitel 4.3.2 zum Teilprozess I wurde bereits darauf hingearbeitet, die abrufbare Produkt- und Maschinendatenmenge durch eine gedankliche Vorausplanung zu reduzieren, indem die Auswahl feldrelevanter Produktkomponenten, Produkteigenschaften und Maschinenparameter die Datenauswahl eingrenzen. Ungeachtet dessen liegt es in der Verantwortung des FELDMODELL-Erstellers – Ingenieure im Engineering, Datenanalysten, Anlagenplaner oder -betreiber usw. – die zur Aufgabenerfüllung notwendigen Daten auszuwählen.

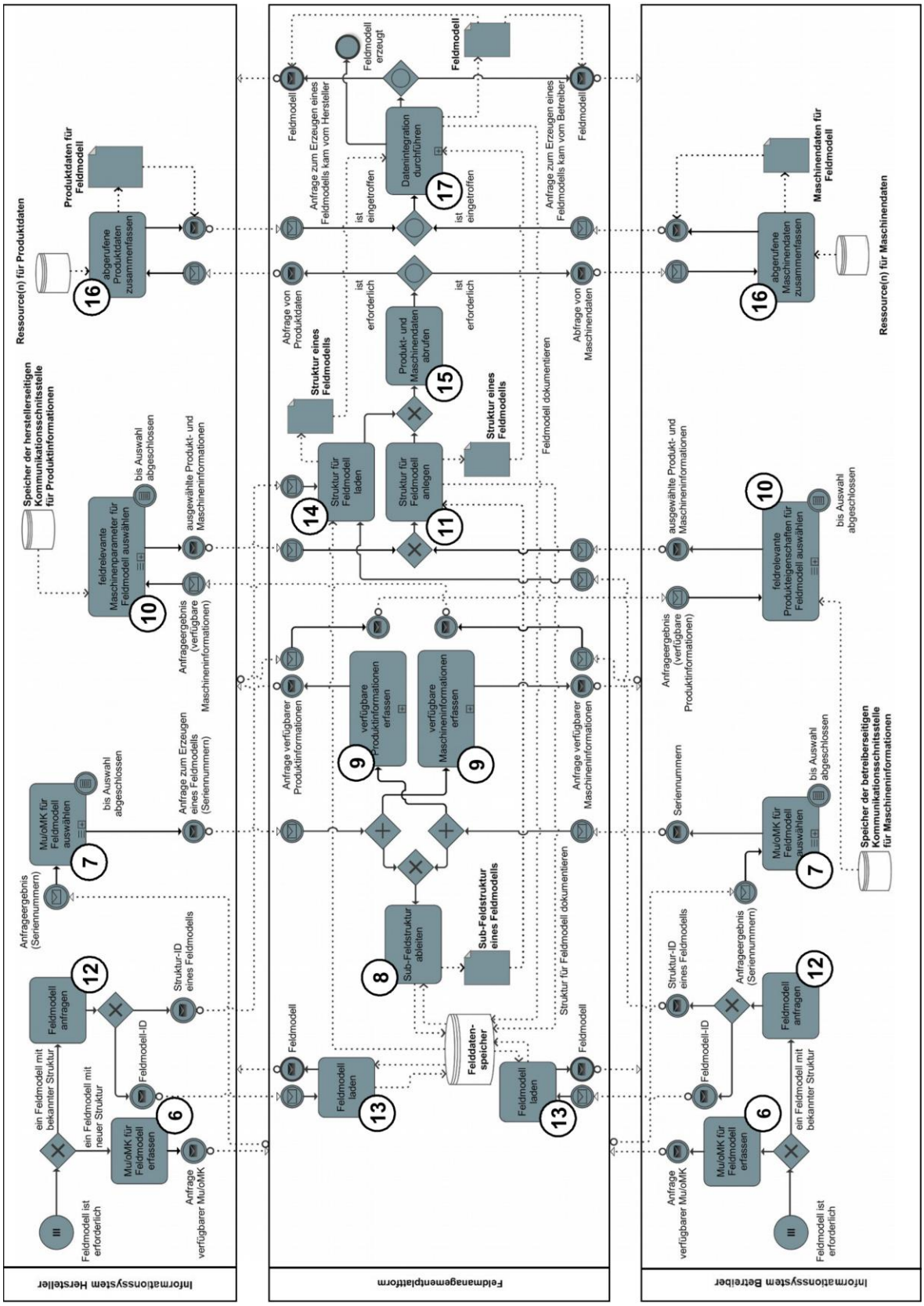


Abbildung 35: Auszug aus dem FELDPROZESS-Modell: Der Teilprozess III als BPMN-Flussdiagramm ***(siehe Innenseite des hinteren Einbands)***

Aktivität 6

Mit dem Bedarf nach einem FELDMODELL steht die Entscheidung an, ein solches neu aufzubauen oder ein bereits vorhandenes, da dokumentiertes FELDMODELL bzw. dessen (datenfreie) FELDOBJEKT-Struktur zu nutzen (siehe Aktivität 12 und 13). Fällt die Entscheidung auf ein neues FELDMODELL, sind in der Aktivität 6 im ersten Modellierungsschritt die für das zu erstellende FELDMODELL verfügbaren, feldrelevanten Maschinen und/oder Maschinenkomponenten zu erfassen. Eine Anfrage danach wird unter Anwendung spezieller Such- und Filterkriterien an die FELDMANAGEMENTPLATTFORM als Nachricht gestellt.

Aktivität 7

Die Antwortnachricht von der FELDMANAGEMENTPLATTFORM beinhaltet als Abfrageergebnis die Seriennummern der verfügbaren, feldrelevanten Maschinen und/oder Maschinenkomponenten. Die Auswahl der für ein FELDMODELL relevanten Maschinen und Maschinenkomponenten folgt einem separaten Subprozess und findet anhand von Mehrfachaktivitäten in sequenzieller Bearbeitung und beliebiger Bearbeitungsreihenfolge statt. Die Aktivität 7 endet mit der Feststellung, dass die Maschinen- und/oder Maschinenkomponentenauswahl vollständig ist, als abschließendes Ereignis.

Aktivität 8

Die in der Aktivität 7 zusammengestellte Maschinen- und/oder Maschinenkomponentenauswahl wird als Anfrage zum Erzeugen eines FELDMODELLS an die FELDMANAGEMENTPLATTFORM weitergeleitet. Daraufhin erfolgt parallel zur Aktivität 9 in der Aktivität 8 die Ableitung der für den FELDMODELL-Aufbau notwendigen SUB-FELDSTRUKTUR aus der FELDSTRUKTUR. Die SUB-FELDSTRUKTUR umfasst die FELDOBJEKTE der ausgewählten Maschinen und/oder Maschinenkomponenten sowie deren Verknüpfungen. Die SUB-FELDSTRUKTUR wird mit der Option auf Wiederverwendung im FELDDATENSPEICHER hinterlegt (siehe Aktivität 13).

Aktivität 9

Mit der Anfrage zum Erzeugen eines FELDMODELLS sind in der Aktivität 9 die mit den FELDOBJEKTEN (der ausgewählten Maschinen und/oder Maschinenkomponenten) verknüpften, zur Datenabfrage verfügbaren Informationen der veröffentlichten Produkteigenschaften bzw. Maschinenparameter zu erfassen. Stammt die ursprüngliche Anfrage nach einem FELDMODELL vom Maschinenhersteller, ist es aus seiner Sicht notwendig, die verfügbaren (veröffentlichten) Maschineninformationen über die Kommunikationsschnittstelle des Maschinenbetreibers abzufragen. Gleiches gilt für den umgekehrten Fall. Je nachdem wird eine Anfrage an das Informationssystem beim Betreiber oder Hersteller gestellt.

Aktivität 10

Die Antwortnachricht aus dem Informationssystem beim Betreiber bzw. beim Hersteller beinhaltet als Abfrageergebnis die verfügbaren Produkt- bzw. Maschineninformationen speziell für die in der Aktivität 7 ausgewählten feldrelevanten Maschinen und/oder Maschinenkomponenten. Die Antwortnachricht wird über die FELDMANAGEMENTPLATTFORM an den anfragenden Maschinenhersteller bzw. -betreiber weitergeleitet. Die darauffolgende Auswahl der für ein FELDMODELL relevanten Produkt- und Maschineninformationen folgt (analog zur Aktivität 7) einem separaten Subprozess und findet anhand von Mehrfachaktivitäten in sequenzieller Bearbeitung und beliebiger Bearbeitungsreihenfolge statt.

Es ist notwendig, die zu einem späteren Zeitpunkt abgerufene Menge an Produkt- und Maschinendaten vorausschauend zu reduzieren, wenn bspw. nur die aktuellen Produktdaten oder nur die Maschinendaten aus einem bestimmten Zeitfenster von Interesse sind. Im Subprozess der Aktivität 10 werden zu diesem Zweck Maßnahmen wie z.B. Filtermechanismen zur Datenreduzierung eingesetzt. Die Aktivität 10 endet mit der Feststellung, dass die Informationenauswahl vollständig ist, als abschließendes Ereignis.

Aktivität 11

In der Aktivität 11 erfolgt der Strukturaufbau für das FELDMODELL. Hierzu wird für jedes FELDOBJEKT der in der Aktivität 8 abgeleiteten SUB-FELDSTRUKTUR ein separates Attribut für die zuvor ausgewählten Produkt- und Maschineninformationen auf der Grundlage bzw. anstelle des generischen FELDOBJEKT-Attributs *gen_FO-A* angelegt. Die Struktur wird im Anschluss im FELDDATENSPEICHER dokumentiert und der Aktivität 17 für die Datenintegration zur Verfügung gestellt.

Aktivität 12

Alternativ zu den Aktivitäten 6 bis 11 können Maschinenhersteller und -betreiber auch auf im FELDDATENSPEICHER dokumentierte FELDMODELLE oder (datenfreie) FELDOBJEKT-Strukturen zurückgreifen. Der Modellierungsprozess muss nicht von Grund auf neu durchlaufen werden, wenn insbesondere auf die mit einem FELDMODELL verbundenen Produkt- und Maschinendaten bspw. zu Analysezwecken wiederholt zugegriffen werden muss. Die Wiederverwendung einer (datenfreien) Struktur für ein FELDMODELL ist sinnvoll, wenn sich eine Aufgabe in gleichartiger Weise wiederholt und unter Verwendung von FELDMODELLEN derselben Struktur lösbar ist. Als Beispiel hierfür sei der mehrmalige Aufruf identischer Maschinenparameter genannt, wenn bspw. ein Maschinenhersteller den Status der von ihm hergestellten Maschine bzw. Maschinenkomponente regelmäßig ermitteln möchte.

Die Anfrage nach einem FELDMODELL in der Aktivität 12 beginnt mit der Entscheidung, ob ein bereits vorhandenes, da dokumentiertes FELDMODELL oder eine FELDOBJEKT-Struktur für ein solches FELDMODELL über die FELDMANAGEMENTPLATTFORM angefragt werden soll. Im ersten Fall wird eine Nachricht zur Anfrage eines FELDMODELLS unter Angabe seiner FELDMODELL-ID gestellt. Im zweiten Fall wird eine Nachricht zur Anfrage der Struktur für ein FELDMODELL unter Angabe seiner Struktur-ID gestellt.

Aktivität 13

Erfolgt wie im oben beschriebenen ersten Fall der Aktivität 12 eine Anfrage nach einem FELDMODELL, wird in der Aktivität 13 das betreffende FELDMODELL aus dem FELDDATEN-SPEICHER geladen und daraufhin als Nachricht an das anfragende Informationssystem beim Betreiber oder Hersteller übermittelt. Der Teilprozess III endet und die sich anschließende Nutzung des FELDMODELLS obliegt dem Hersteller bzw. Betreiber.

Aktivität 14

Erfolgt wie im beschriebenen zweiten Fall der Aktivität 12 eine Anfrage nach einer (daten-freien) FELDOBJEKT- Struktur, wird in der Aktivität 14 die betreffende Struktur aus dem FELD-DATENSPEICHER geladen und der Aktivität 17 zur Datenintegration zur Verfügung gestellt.

Aktivität 15 und 16

Nachdem die FELDOBJEKT-Struktur für ein FELDMODELL festgelegt ist, werden in der Aktivität 15 die zur Integration erforderlichen Produkt- und Maschinendaten, über die Eigenschaften der Modellknoten, der von Maschinenhersteller und -betreiber bereitgestellten Kommunikationsschnittstellen, aus den originären Datenbeständen abgerufen. Die Daten werden daraufhin in der Aktivität 16 entsprechend der Auswahl von Produkt- und Maschineninformationen (aus der Aktivität 10) zusammengefasst und an die FELDMANAGEMENTPLATTFORM weitergeleitet.

Aktivität 17

In der Aktivität 17 findet die finale Datenintegration statt: Für den Aufbau eines FELDMODELLS werden die Produkt- und Maschinendaten in dem für die Instanzen des generischen FELDOBJEKT-Attributs (*gen_FO-A)* reservierten Speicherbereich abgelegt. Das bedeutet, die Daten werden mit der zuvor entwickelten bzw. ausgewählten (daten-freien) FELDOBJEKT-Struktur, entsprechend der FELDMODELL-Definition (siehe S. 42) zu einem aufgabenspezifischen, integrierten Produkt- und Maschinendatenbestand verknüpft. Im Anschluss daran wird das aufgebaute FELDMODELL an das anfragende Informationssystem beim Betreiber bzw. Hersteller übermittelt, dem die Nutzung des FELDMODELLS obliegt. Darüber hinaus kann das FELDMODELL im FELDDATENSPEICHER zur weiteren Verwendung (siehe Aktivität 12 und 13) dokumentiert werden.

Die für die Aktivität 17 getroffenen Aussagen zur Datenintegration und zur Nutzung und Dokumentation von FELDMODELLEN besitzen Referenzcharakter bei der Umsetzung des FELDKONZEPTS: Anpassungen im Teilprozess III können teilweise notwendig und von Vorteil sein wie bspw. die Datenintegration direkt in einem der Informationssysteme beim Betreiber oder Hersteller durchzuführen, um die Weiterleitung sensibler Produkt- bzw. Maschinen-daten oder großer Datenmengen zu verhindern. Gleichermaßen kann die Nutzung von FELDMODELLEN auch innerhalb der FELDMANAGEMENTPLATTFORM erfolgen, um abermals ggf. unnötige Datenweiterleitungen zu umgehen oder wenn die Ressourcenverfügbarkeit in den Informationssystemen dieses Vorgehen sinnvoll macht. Nicht zuletzt ist es aus Sicht von Maschinenherstellern und -betreibern nachvollziehbar, insbesondere sensible wie bspw. sicherheitsrelevante Daten nicht der FELDMANAGEMENTPLATTFORM zu überlassen. Die Dokumentation von FELDMODELLEN ist in diesem Fall nicht gestattet.

5 Grundprinzipien des FELDMANAGEMENTSYSTEMS

Die Umsetzung der FELDMANAGEMENT-Aufgaben erfordert eine IT-Infrastruktur, die als FELDMANAGEMENTSYSTEM bezeichnet wird (siehe Kapitel 4.1, S. 44). Die konzeptionelle Grundlage zur Gestaltung und zum Aufbau eines solchen FELDMANAGEMENTSYSTEMS ist in Abbildung 36 als Schema dargestellt. Darin enthalten sind die für das FELDMANAGEMENT-SYSTEM wichtigen Elemente der IT-Systeme von Maschinenherstellern und -betreibern sowie die durch Kommunikationsschnittstellen gekoppelte FELDMANAGEMENTPLATTFORM im Zentrum.

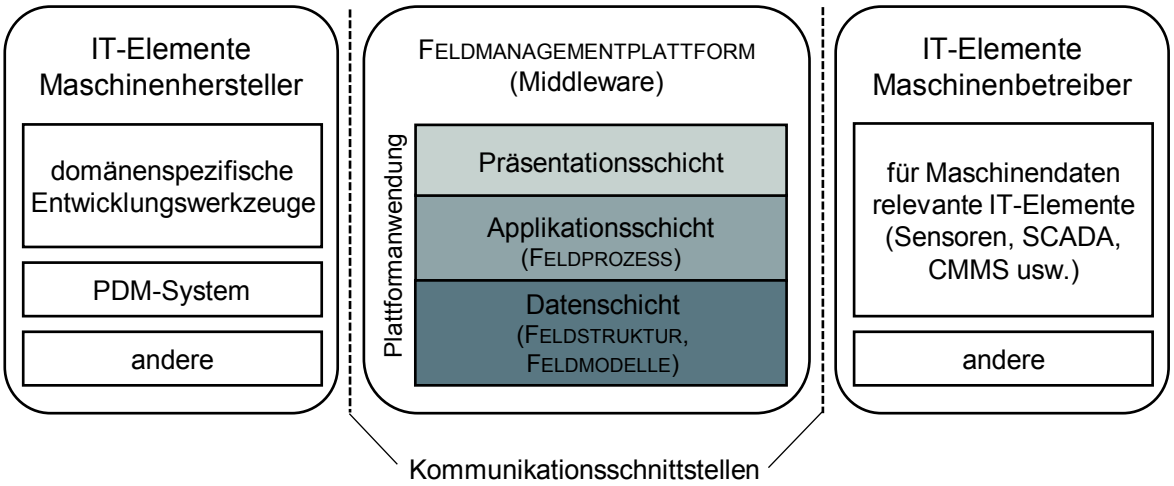


Abbildung 36: Schema des FELDMANAGEMENTSYSTEMS

FELDMANAGEMENTPLATTFORM

Die FELDMANAGEMENTPLATTFORM steht im Zentrum des FELDMANAGEMENTSYSTEMS und ist lt. ihrer Definition als eigenständige Middleware-Lösung für PLM das zentrale Instrument zur Umsetzung des FELDKONZEPTS. Die Plattform wird durch eine Plattformanwendung getragen, die über einen, wie im Kapitel 2.4 beschriebenen, Architekturaufbau eines Dreischichtenmodells verfügt (siehe Abbildung 36). Darin ermöglicht die plattformeigene Präsentationsschicht Benutzereingaben, Informationsdarstellungen sowie den Zugang zu den, unter anderem den FELDPROZESS ausführenden, Funktionen der plattformeigenen Applikationsschicht. In der plattformeigenen Datenschicht erfolgt die digitale Beschreibung und persistente Speicherung der FELDSTRUKTUR und der darauf aufbauenden FELDMODELLE im FELDDATENSPEICHER.

Die Integration von Produkt- und Maschinendaten erfolgt logisch in der Applikationsschicht der FELDMANAGEMENTPLATTFORM als Middleware, die somit den Einstiegspunkt für ein föderiertes Datenbanksystem darstellt (siehe hierzu Kapitel 2.4 auf S. 22). Werden die

Integrationsergebnisse (die FELDMODELLE) im FELDDATENSPEICHER gespeichert, kommt es zur physischen Datenintegration in der Datenschicht.

IT-Elemente von Maschinenherstellern und -betreibern

Die domänenspezifischen Entwicklungswerkzeuge sowie ein PDM-System sind die für die Umsetzung des FELDKONZEPTS essenziell notwendigen IT-Elemente der Maschinenhersteller. So ermöglichen die domänenspezifischen Entwicklungswerkzeuge die Definition von Template-FELDOBJEKTEN, die, wie unter anderem die Produktstruktur, im PDM-System verwaltet werden. Das IT-System der Maschinenbetreiber beinhaltet Sensoren, SCADA- oder CMMS-Anwendungen als zentrale Maschinendatenquellen. Andere IT-Elemente sowohl auf Hersteller- als auch auf Betreiberseite können bspw. diverse Planungstools sein, die über ausgezeichnete Kommunikationsmöglichkeiten mit der FELDMANAGEMENTPLATTFORM verfügen.

Kommunikationsschnittstellen

Kommunikationsschnittstellen ermöglichen den Datenaustausch zwischen der FELDMANAGEMENTPLATTFORM mit den hersteller- und betreibereigenen IT-Systemen. Mithilfe geeigneter Schnittstellentechnologien werden Seriennummern, Ressourcenzeiger, Dokumente der veröffentlichten Produkteigenschaften und Maschinenparameter bzw. auch FELDMODELLE als Daten übertragen.

Anwendungsfunktionen

Tabelle 2 ordnet den Elementen des FELDMANAGEMENTSYSTEMS und den systemspezifischen IT-Elementen Anwendungsfunktionen zu, die aus dem Modell für den FELDPROZESS bzw. speziell aus dessen Aktivitäten abgeleitet sind. Die technische Umsetzung der Anwendungsfunktionen ermöglicht den Aufbau eines konkreten FELDMANAGEMENTSYSTEMS.

Tabelle 2: Zuordnung von Anwendungsfunktionen zu den System- bzw. IT-Elementen

Systemelement bzw. systemspezifisches IT-Element	**Anwendungsfunktion**	**Aktivität aus dem FELDPROZESS**
domänenspezifische Entwicklungswerkzeuge	Identifizieren und Auswählen der feldrelevanten Produktkomponenten	1
	Speichern der Auswahl von feldrelevanten Produkt-komponenten in den Entwicklungsmodellen	1
	Identifizieren und Auswählen der zu veröffentlichenden, feldrelevanten Produkteigenschaften und Maschinenparameter (Knotendefinitionen)	2
PDM-System	Erzeugen, Speichern und Verwalten von Template-FELDOBJEKTEN und deren Verknüpfungen	1
	dateibasierte Dokumentation der Auswahl der zu veröffentlichenden, feldrelevanten Produkteigenschaften und Maschinenparameter	2
	Produktdaten zur Abfrage bereitstellen (Kommunikation mit der FELDMANAGEMENT-PLATTFORM)	16
Kommunikationsschnittstellen auf Herstellerseite und auf Betreiberseite	Aufbau bzw. die Aktualisierung des schnitt-stelleneigenen Modells: Erzeugen, Speichern und Verwalten von Modellknoten und deren Verknüpfungen	3, 5
	Kommunikation zwischen der FELDMANAGEMENT-PLATTFORM und den IT-Elementen auf Herstellerseite und auf Betreiberseite realisieren (Anfragen und Antworten übersetzen und weiterleiten, Datenaustausch ermöglichen)	6, 7
FELDMANAGEMENTPLATTFORM	Erzeugen, Speichern und Verwalten von FELDOBJEKTEN	4
	Suchen von FELDOBJEKTEN von Zulieferern	4
	Aufbau von Sub-FELDSTRUKTUREN: Erzeugen, Speichern und Verwalten von FELDOBJEKT-Verknüpfungen	4
	Suchen von INFORMATIONSRESSOURCEN; Navigieren in der FELDSTRUKTUR	4
	Erzeugen, Speichern und Verwalten von INFORMATIONSRESSOURCEN und deren Verknüpfungen	4
	Aktualisieren der FELDSTRUKTUR	4

	Abfrageergebnisse zusammenstellen: Nachricht an das Informationssystem von Maschinenhersteller oder -betreiber	
	Sub-FELDSTRUKTUR für FELDMODELL ableiten	8
	für FELDMODELL verfügbare Produktinformationen bzw. Maschinenparameter abfragen (Kommunikation mit den IT-Elementen auf Herstellerseite bzw. auf Betreiberseite)	9
	Struktur für ein FELDMODELL anlegen	11
	Produkt- und Maschinendaten abrufen	15
	Datenintegration durchführen	17
für Maschinendaten relevante IT-Elemente	abgefragte Maschinendaten zur Abfrage bereitstellen (Kommunikation mit der FELDMANAGEMENTPLATTFORM)	16
andere IT-Elemente auf Herstellerseite und auf Betreiberseite (FELDMODELL abrufen)	für FELDMODELL verfügbare Maschinen und/oder Maschinen abfragen und auswählen (Kommunikation mit der FELDMANAGEMENT-PLATTFORM)	6, 7
	für FELDMODELL verfügbare Maschinenparameter bzw. Produktinformationen auswählen (Kommunikation mit der FELDMANAGEMENT-PLATTFORM)	10

6 Validierung des FELDKONZEPTS

6.1 Anwendungsszenario

Die Validierung der Entwicklungsergebnisse erfolgt anhand eines fiktiven, durchgehenden Anwendungsszenarios, in dem drei Hersteller von CNC-Fräsmaschinen (im Weiteren nur als ‚Fräsmaschine' bezeichnet), ein Hersteller für Motorspindeln (als ausgewählter Komponentenzulieferer) und ein Betreiber mehrerer Fräsmaschinen auf eine gemeinsam nutzbare FELDMANAGEMENTPLATTFORM zugreifen, um jeweils nutzerspezifische Aufgaben zu verfolgen. Die Situation stellt sich wie folgt dar.

Situation

Das fiktive Unternehmen ***CVi*** ist ein mittelständischer Auftragsfertiger, spezialisiert auf mechanische Fertigungsverfahren wie Drehen, Bohren und Fräsen. Das Unternehmen besitzt drei europaweit verteilte Fertigungszentren innerhalb einer unternehmensweiten breiten Fertigungslandschaft. In den Fertigungszentren befinden sich teils unterschiedliche Typen von Fräsmaschinen der Hersteller *GF Machining Solutions (GF)*, *Mazak* und *HURCO* im Einsatz (siehe Abbildung 37).

Abbildung 37: Verbindungen zwischen den Beteiligten im Anwendungsszenario

CVi ist Nutzer der Fräsmaschinen, jedoch nicht deren Eigentümer. Das Unternehmen hat, wie Abbildung 37 zeigt, Serviceverträge mit den genannten Maschinenherstellern geschlossen, wodurch diese, in Anbetracht gegenseitiger Rechte und Pflichten (vgl. Arndt et al., 2016, S. 629), die Betriebsbereitschaft der bereitgestellten Maschinen mit Ausnahme der

Motorspindeln sicherstellen. *CVi* kommt über das Finanzierungsmodell „Pay per Use“ für das Nutzungsrecht auf und gestattet den Herstellern das Abrufen und die Weiterverwendung der durch die Fräsmaschinen erfassten Maschinendaten für eigene Nutzungszwecke. Da *CVi* fiktiv ist, werden zur Umsetzung des Anwendungsszenarios die vom *Smart Manufacturing Systems Test Bed* des *National Institute of Standards and Technology (NIST)*[36] über das Internet frei kommunizierten Maschinendaten als Ersatz verwendet.

Die Betriebsbereitschaft der Motorspindeln stellt das Unternehmen ***WEISS Spindel-technologie*** (WEISS) sicher, das *CVi* als Partner hierfür beauftragt hat (siehe Abbildung 37). *WEISS* hat sich auf die Herstellung von Motorspindeln für verschiedene Maschinen-typen spezialisiert und bietet neben dem Verkauf auch einen Instandhaltungsservice speziell für produktionskritische Motorspindeln an, die durch hohe Belastungen schnell an Leistung verlieren oder auszufallen drohen. Das Unternehmen bleibt wie bei *CVi* Eigentümer der Spindeln und sichert als deren Betreiber dem Servicenehmer eine störungsfreie Nutzung und schnelle Instandsetzung im Schadensfall zu. *WEISS* nutzt dabei die durch die Spindeln selbst erfassten und in einem proprietären Format bereitgestellten Daten unter anderem zur Verschleißprognose und um Serviceprozesse bedarfsgerecht planen, steuern und optimieren zu können.

FELDSTRUKTUR

Für die beschriebene Situation des Anwendungsszenarios existiert eine FELDSTRUKTUR, die, wie in Abbildung 38 auf S. 95 im FELDSTRUKTUR-Graph dargestellt, über die FELDOBJEKTE der bei *CVi* eingesetzten Fräsmaschinen (FELDOBJEKT-Knoten mit ungeraden Nummern) und deren Motorspindeln (FELDOBJEKT-Knoten mit geraden Nummern) verfügt.[37] Die FELDOBJEKTE sind entsprechend den Strukturierungs- und Gruppierungsregeln aus Kapitel 4.2 konsistent miteinander verknüpft. Demnach ist jedem FELDOBJEKT-Knoten einer Fräsmaschine genau ein FELDOBJEKT-Knoten einer Motorspindel untergeordnet. Weiterhin ist Abbildung 38 zu entnehmen, dass bspw. die drei typgleichen Maschinen von *GF* (FELDOBJEKT-Knoten 1, 3, und 5; linke Spalte) mit typgleichen Motorspindeln von *WEISS* (FELDOBJEKT-Knoten 2, 4, und 6; linke Spalte) ausgestattet sind. Als Besonderheit verfügen zwei der vier typgleichen Maschinen von *Mazak* (FELDOBJEKT-Knoten 11, und 12;

---

[36] Das NIST streamt über die Internetseite https://smstestbed.nist.gov/vds/current die Livedaten mehrerer Fräsmaschinen der Hersteller GF, Mazak und HURCO. Die Maschinen selbst befinden sich in einem Fertigungslabor des *NIST Fabrication Technology Office* in Gaithersburg (Maryland, USA)

[37] Inhalt und Umfang der in Abbildung 38 gezeigten FELDSTRUKTUR genügen allein dem Anwendungsszenario. Eine wirklich keitsnahe FELDSTRUKTUR verfügt über weitaus mehr FELDOBJEKTE für weitere Maschinen und Motorspindeln und bspw. für diverse maschinennahe Sensoren.

mittlere Spalte) über einen Motorspindeltyp, der auch in den Maschinen von *HURCO* (FELDOBJEKT-Knoten 15, und 16; rechte Spalte) eingesetzt wird. Im historischen Rückblick beruht die FELDSTRUKTUR darauf, dass durch *WEISS* für jede neu hergestellte Motorspindel ein (noch unverknüpftes) FELDOBJEKT in der Datenbank der FELDMANAGEMENTPLATTFORM angelegt wurde, welches jeweils zu einem späteren Zeitpunkt in die SUB-FELDSTRUKTUR einer von *GF*, *Mazak* oder *HURCO* ebenfalls neu hergestellten Fräsmaschine integriert wurde.

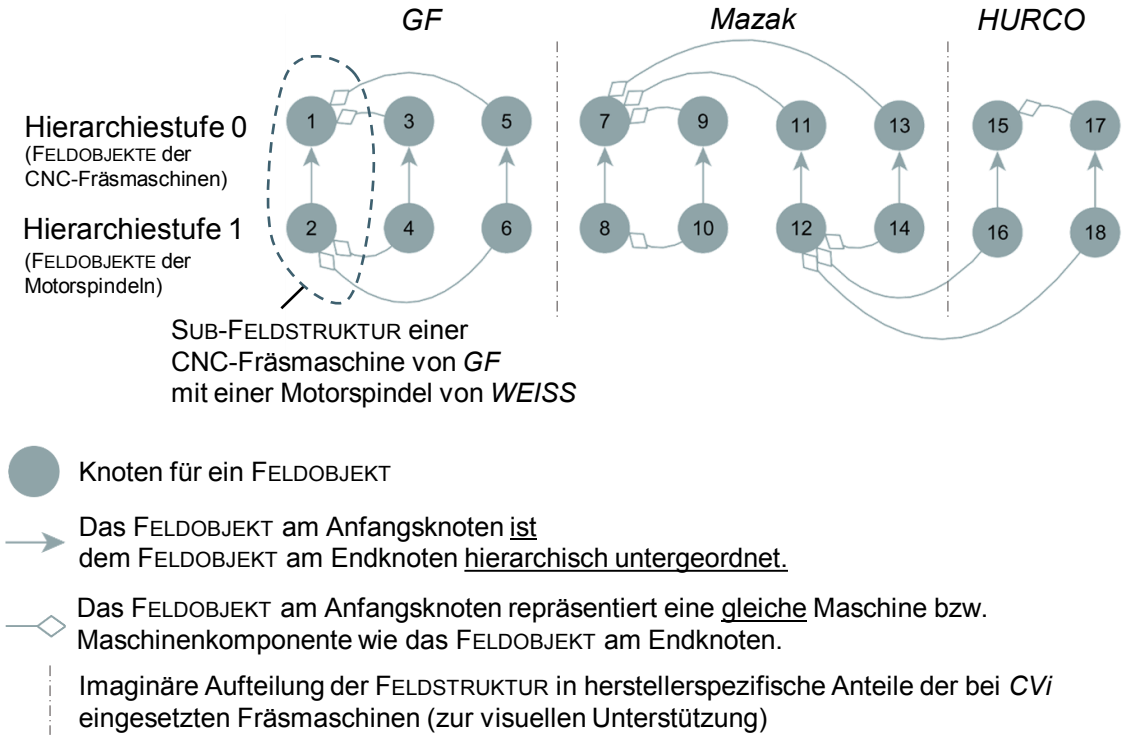


Abbildung 38: FELDSTRUKTUR für das Anwendungsszenario

Abbildung 39 erweitert die in Abbildung 38 herausgestellte SUB-FELDSTRUKTUR um INFORMATIONSRESSOURCE-Knoten und Referenzen zu den Kommunikationsschnittstellen, über die auf die Produkt- und Maschinendatenbestände der jeweils beteiligten Parteien zugegriffen werden kann. Im konkreten Beispiel kann *WEISS* die Maschinendaten einer Motorspindel nur über den FELDOBJEKT-Knoten 1 bzw. über dessen INFORMATIONS-RESSOURCE-Knoten 3‘, der in der FELDSTRUKTUR zugeordneten Fräsmaschine abfragen. Für WEISS ist es dabei unerheblich zu wissen, über welche Netzwerke, Datenbanken und Schnittstellen diese Daten im Einzelnen abgerufen werden müssen. *WEISS* kann in diesem Zusammenhang unter anderem die Identität und den Standort jeder Fräsmaschine und ihres Nutzers abfragen.

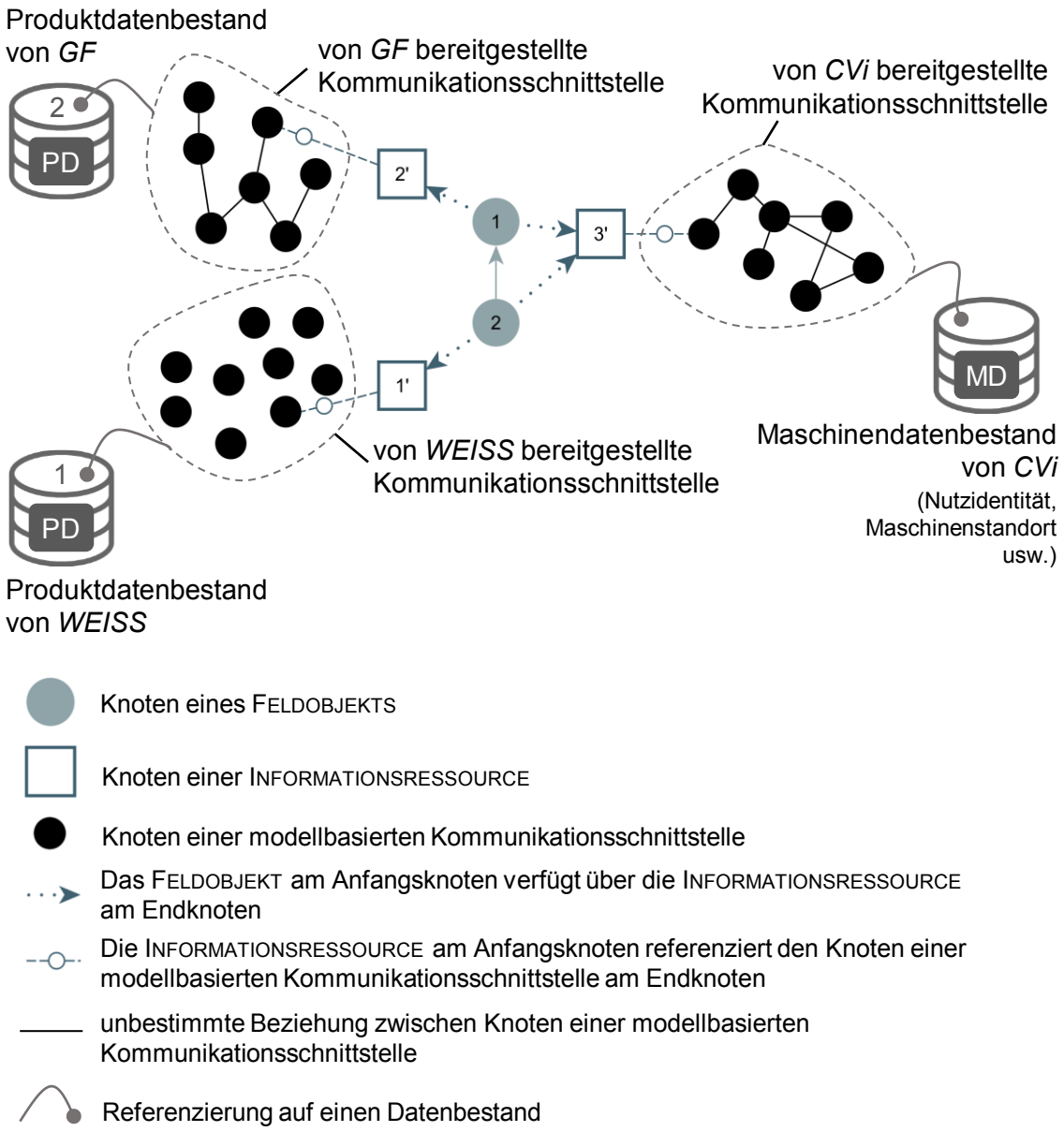


Abbildung 39: Sub-FELDSTRUKTUR mit INFORMATIONSRESSOURCEN für das Anwendungsszenario

Anwendungsfälle

Das Anwendungsszenario umfasst die nachfolgenden Anwendungsfälle zur Validierung des FELDKONZEPT, die in Kapitel 6.2 anhand der vorgegebenen FELDSTRUKTUR (siehe Abbildung 38) und des in Kapitel 6.2 entwickelten Prototyps eines FELDMANAGEMENT-SYSTEMS durchgeführt werden.

1. Anwendungsfall

Das Unternehmen *HURCO* entwickelt einen neuen Typ einer Fräsmaschine.

2. Anwendungsfall

HURCO produziert eine Fräsmaschine des neu entwickelten Typs, die bei *CVi* in Betrieb genommen wird. Die hierfür notwendige Motorspindel und deren FELDOBJEKT stehen durch *WEISS* bereits zur Verfügung.

3. Anwendungsfall

Die bei *GF* eingesetzte Motorspindel mit dem FELDOBJEKT-Knoten 6 ist defekt und wird von *WEISS* durch ein Identteil ausgetauscht.

4. Anwendungsfall

Mazak fragt die Ereignisdaten der letzten 7 Tage aller von *CVi* genutzten, herstellereigenen Fräsmaschinen ab.

5. Anwendungsfall

CVi benötigt für eine Frässimulation die Spezifikations- und Geometrieinformationen 1. des eingesetzten Fräsmaschinentyps von *GF* und 2. des dazugehörigen Motorspindeltyps inkl. der Standzeiten der momentan eingesetzten Spindeln.

6.2 Prototyp eines FELDMANAGEMENTSYSTEMS

Für die Umsetzung der in Kapitel 6.1 aufgeführten Anwendungsfälle wird im Folgenden ein für diesen Zweck entwickelter Prototyp eines FELDMANAGEMENTSYSTEMS beschrieben. Für die Prototypenentwicklung wurden die FELDMANAGEMENTPLATTFORM sowie die für die Systementwicklung notwendigen IT-Elemente von *CVi* als Betreiber mehrerer Fräsmaschinen und deren Herstellern auf eine verbindliche Software-, Hardware- und Schnittstellenauswahl festgelegt, die innerhalb der verfügbaren technologischen Rahmenbedingungen der *Professur für Konstruktionstechnik/CAD* und der *TU Dresden* steht. Der Prototyp erfüllt alle Anforderungen zur Umsetzung des Anwendungsszenarios, wie bspw. den hierfür notwendigen Umfang zu implementierender Anwendungsfunktionen lt. Tabelle 2 auf S. 91.

FELDMANAGEMENTPLATTFORM

Die für den Prototyp der FELDMANAGEMENTPLATTFORM bestimmte Softwareauswahl ist in Abbildung 40, rechts zusammengefasst und dem, aus Abbildung 36 auf S. 89 extrahierten, der FELDMANAGEMENTPLATTFORM konzeptionell zugrundeliegende Dreischichtenmodell gegenübergestellt. Für den Prototyp wurde eine virtuelle Maschine mit dem Betriebssystem *Windows Server 2016* am *Zentrum für Informationsdienste und Hochleistungsrechnen* der *TU Dresden* eingerichtet.

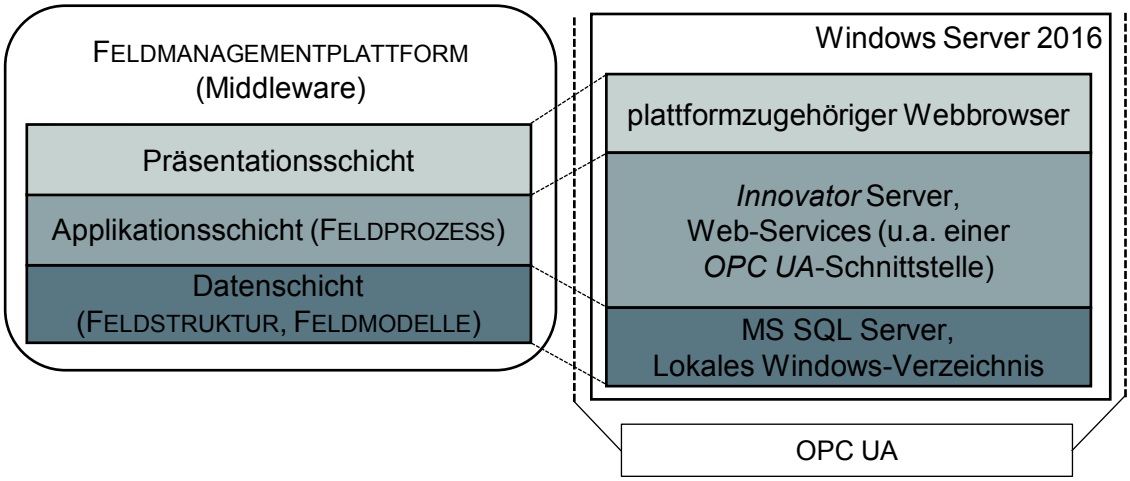


Abbildung 40: Realisierung einer prototypischen FELDMANAGEMENTPLATTFORM

Die **Applikationsschicht** der FELDMANAGEMENTPLATTFORM baut, wie für Anwendungen im *Industrie 4.0*-Umfeld verbreitet, auf lose gekoppelte Web-Anwendungen und Web-Services auf, deren Interoperabilität auf offenen Standards basiert und für deren Realisierung eine serviceorientierte Architektur zum Einsatz kommt (BITKOM, 2016). Im konkreten Fall kommen für den Plattformprototyp *Aras Innovator* und *OPC UA* als Web-Anwendungen zum Einsatz.[38] *Aras Innovator* und *OPC UA* sind fortschrittliche Technologieplattformen, die *HTTP*/*HTTPS*, *SOAP*, *XML* und andere Standards unterstützen, um Anwendungs- und Kommunikationsaktivitäten in verteilten und vernetzten Systemen via Web-Services zu organisieren, zu steuern und zu kontrollieren. Web-Services sind gekapselte, autonome, wiederverwendbare und lose miteinander gekoppelte Funktions- bzw. Logikeinheiten und Kernbestandteil serviceorientierter Architekturen (vgl. Abts & Mülder, 2017, S. S. 152 ff.).

Der Plattformprototyp verfügt über einen *Innovator-Server* als Teil von ***Aras Innovator*** in der Version 11 SP15 und mit einem *Microsoft SQL Server 2014* als Fundament der **Datenschicht**, die den FELDDATENSPEICHER repräsentiert. Für die bedingt durch *Aras Innovator*-Nutzung z.T. notwendige Dateiverwaltung wird darüber hinaus das lokale Verzeichnis der *Windows*-Installation genutzt. Der *Innovator-Server* dient dazu, alle Aktivitäten, die lt. dem Prozessmodell für das FELDKONZEPT der FELDMANAGEMENTPLATTFORM zugeordnet sind, zu realisieren. Hierfür wurden Methoden im *Innovator-Server* implementiert, die als plattformeigene Anwendungsfunktionen in mehreren, neu angelegten Serverprozessen genutzt werden, die ihrerseits die Aktivitätenfolge lt. dem Prozessmodell für das FELDKONZEPT umsetzen (siehe hierzu

[38] Als positiver Nebeneffekt der Projekt- und Abschlussarbeiten von Wollny (2020), Rötschke (2020), Tollkühn (2019), Li (2018_1), Li (2018_2), König (2018), Heinze (2018), Ernstberger (2018) und Klement (2016) sowie im Zuge der Lehrveranstaltung *Produktdatenmanagement* entstand an der *Professur für Konstruktionstechnik/CAD* eine breite Wissensbasis zu Datenmanagement- und Kommunikationslösungen auf der Grundlage von *OPC UA* und *Aras Innovator*.

Tabelle 2 auf S. 91). Nicht zuletzt musste das dem *Innovator-Server* zugrundeliegende Datenmodell um die Elemente aus dem Basisdatenmodell der FELDMANAGEMENT-PLATTFORM erweitert werden, um das Speichern und die Verwaltung von FELDOBJEKTEN und INFORMATIONSRESSOURCEN sowie deren Verknüpfungen und Attribute zu ermöglichen.

Abbildung 41, links zeigt die auf dem *Innovator-Server* angelegten FELDOBJEKTE; rechts ist ein Ausschnitt der erzeugten FELDSTRUKTUR für das Anwendungsszenario dargestellt, wie im FELDSTRUKTUR-Graph in Abbildung 38 auf S. 95 vorgegeben. Die Darstellung erfolgt über den plattformzugehörigen Webbrowser *Mozilla Firefox* in der Version 83. Der Webbrowser ist die zentrale Anwendung der **Präsentationsschicht** und erlaubt als konfigurierter *Innovator Client* den Zugriff auf den Server und dessen Inhalte. (Die Kommunikation mit der FELDMANAGEMENTPLATTFORM soll während des Betriebs hauptsächlich über den computergesteuerten Austausch von Protokollen erfolgen – manuelle Eingriffe in die FELDSTRUKTUR über eine graphische Oberfläche können deren Konsistenz gefährden. Trotzdem ist vor allem zur Administration und Konfiguration der Plattform eine graphische Oberfläche sinnvoll.)

ID ▲	Seriennummer
1	AB23F-T9547B#CC-000A110#1
2	RT545-FF00B#CC-000556#1
3	AB23F-T9547B#CC-000A111#1
4	RT545-FF00B#CC-000576#1
5	AB23F-T9547B#CC-000A112#1
6	RT545-FF00B#CC-000476#1
7	AB23F-GTR4A#CC-0056#1
8	RT545-FF00B#CC-000478#1
9	AB23F-GTR4A#CC-0061#1
10	RT545-FF00B#CC-000601#1
11	AB23F-GTR4A#CC-0044#1
12	RT545-FF00B#CC-000602#1
13	AB23F-GTR4A#CC-0049#1
14	RT545-FF00B#CC-000603#1
15	AB23F-GGRZ7#CC-100AA002#1
16	RT545-FF00B#CC-000338#1
17	AB23F-GGRZ7#CC-100AA004#1
18	RT545-FF00B#CC-000339#1

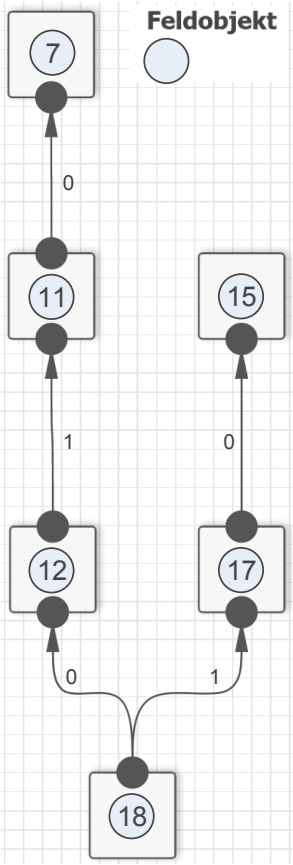


Abbildung 41: Darstellung der FELDSTRUKTUR für das *Anwendungsszenario in Aras Innovator*

Für das Anwendungsszenario wird zur eindeutigen Identifikation der Fräsmaschinen und Motorspindeln das für *Industrie 4.0* zugelassene Identifikationsverfahren *International Registration Data Identifier* angewendet (ISO/IEC IRDI, vgl. Kapitel 2.2 auf S. 16). Demzufolge ist auch jedem FELDOBJEKT eine Seriennummer zugeordnet, die dem in Abbildung 56 im Anhang A3 dargestellten Schema[39] konform ist.

Für den Datenaustausch zwischen der FELDMANAGEMENTPLATTFORM und den IT-Systemen von *CVi* und der Fräsmaschinenherstellern *GF*, *Mazak* und *HURCO* wurde die im Umfeld der Industrieautomation weit verbreitete Kommunikationsschnittstelle ***OPC UA*** eingesetzt.[40] Hierfür wurde in der **Applikationsschicht** der FELDMANAGEMENTPLATTFORM der *Innovator-Server* um die Funktionen eines *OPC UA-Servers* und *OPC UA-Clients* erweitert (siehe Abbildung 42), um (1) den wechselseitigen Datenaustausch mit den hersteller- und betreibereigenen IT-Systemen zu ermöglichen, die ihrerseits ebenfalls über entsprechende Server- und Clientfunktionen verfügen, und um (2) den Zugang zur FELDMANAGEMENTPLATTFORM und deren Inhalte zu steuern. Dementsprechend wurden für den Plattformprototyp neben rollen- und regelgesteuerten Zugangsmechanismen Methoden entwickelt, die die Abfrage von Daten vom bzw. deren Weiterleitung zum *Innovator-Server* realisieren. Die Methoden wurden in die neu entwickelten *OPC UA-Server* und *OPC UA-Clients* implementiert, demzufolge die FELDMANAGEMENTPLATTFORM die Bereitstellung föderierter Produkt- und Maschinendaten (als FELDMODELLE) zulässt.

---

39 Zur Erklärung der Schemaelemente sei an dieser Stelle auf die (ISO/IEC 11179 2015) und (ISO/TS 29002-5 2009) sowie für Seriennummernbeispiele auf Heidel et al. (2017, SS. 64-66) verwiesen.

40 *OPC UA* basiert auf in der Industrie anerkannten Spezifikationen und (für das Internet) standardisierten Kommunikationstechnologien, die die industrielle Konnektivität und produktübergreifende Interoperabilität maßgeblich befördern. *OPC UA* bietet ein großes Potenzial zur Umsetzung eines für Produkt- und Maschinendaten gemeinsamen Konzepts im Kontext von *Industrie 4.0* bzw. *Industrial Internet of Things* (vgl. Zehbold, 2018, S. 82; Bök et al., 2020, S. 371 ff.). Für die Programmierung der Kommunikationsschnittstelle wurde das OPC UA.NET-SDK für C# der Firma *Traeger Industry Components GmbH,* genutzt.

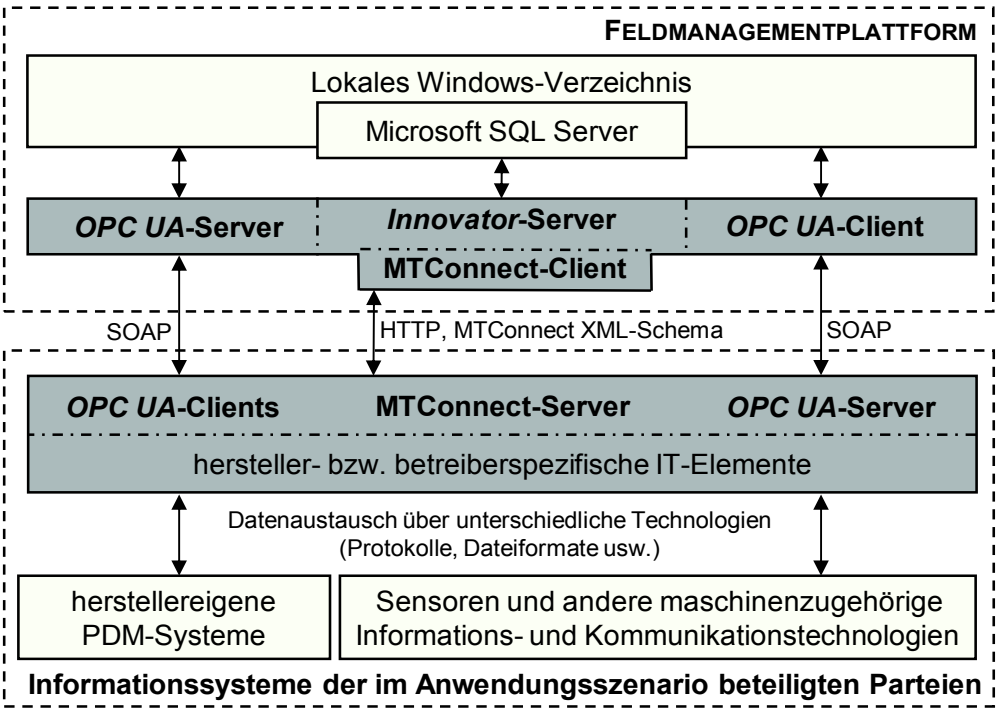


Abbildung 42: Umsetzung der Kommunikationsschnittstellen zwischen FELDMANAGEMENTPLATTFORM und den hersteller- und betreibereigenen Informationssystemen

Der *OPC UA-Server* der FELDMANAGEMENTPLATTFORM verfügt über einen Adressraum[41], in dem die INFORMATIONSRESSOURCEN anhand von Knoten repräsentiert werden und anhand der die FELDOBJEKTE im FELDDATENSPEICHER als Objekte gefunden und abgerufen werden können. Hierfür erfolgt zunächst eine Anfrage an den *OPC UA-Server*, der diese (je nach Berechtigung des Anfragenden) an den *Innovator-Server* weiterleitet, um bspw. die zur Anfrage passenden FELDOBJEKTE anhand des *Seriennummer*-Attributs zu identifizierten.

Abbildung 43 zeigt den Adressraum des plattformeigenen *OPC UA-Servers* für das Anwendungsszenario. Für die Visualisierung wurde ein für entwicklungsbegleitende Testzwecke, mit *Visual Studio 2019* programmierter *OPC UA*-Client mit Benutzeroberfläche verwendet. Im Adressraum des Servers sind die INFORMATIONSRESSOURCE-Knoten gespeichert, die sich durch die jeweilige Seriennummer einer Fräsmaschine bzw. Motorspindel identifizieren lassen. Damit wird die durchgängige Verwendung der Seriennummer erreicht, wodurch wesentlich zum Aufbau und zum Erhalt einer konsistenten (widerspruchsfreien) FELDSTRUKTUR beigetragen wird (siehe Abbildung 25 auf S. 57). Die INFORMATIONSRESSOURCE-Knoten sind unstrukturiert, da eine Strukturierungbildung lt. FELDKONZEPT grundsätzlich nur über die FELDOBJEKTE erfolgt.

[41] Dies ist für modellbasierte Schnittstellentechnologien üblich (vgl. Kapitel 2.3 auf S. 20).

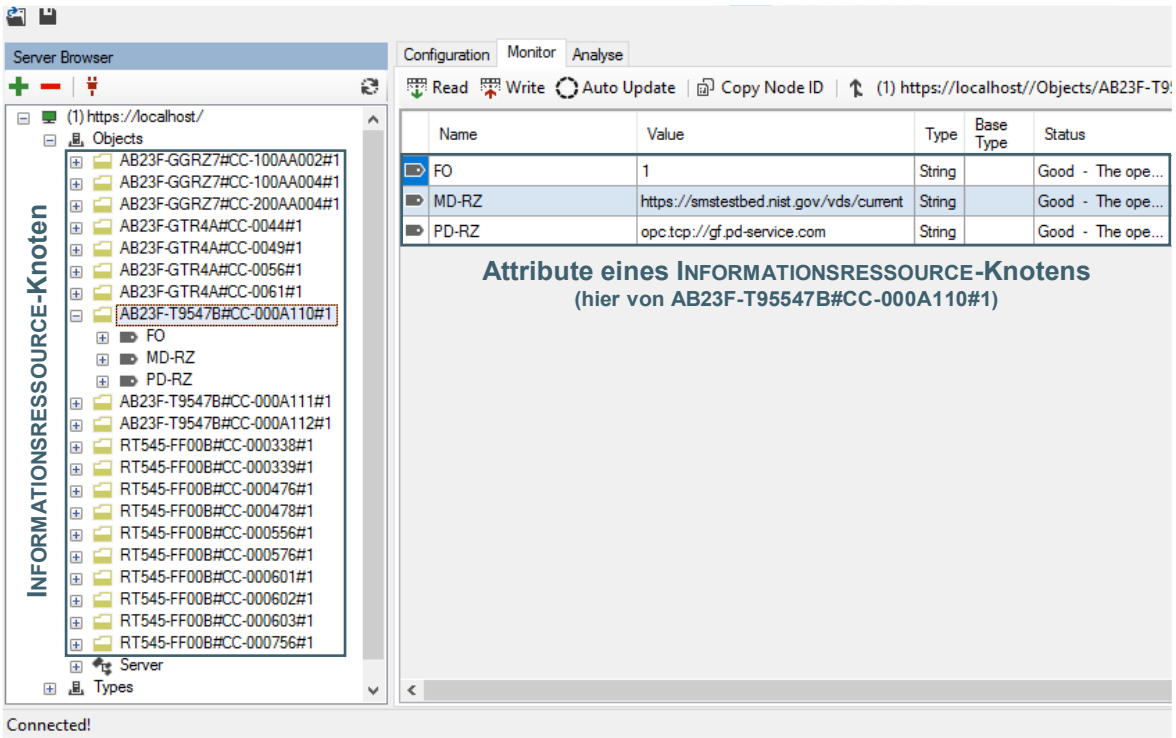


Abbildung 43: Adressraum des plattformeigenen OPC UA-Servers für das Anwendungsszenario - der INFORMATIONSRESSOURCE-Knoten für das FELDOBJEKT 1

Jeder INFORMATIONSRESSOURCE-Knoten verfügt über die Attribute (1) *FO* für das mit der INFORMATIONSRESSOURCE auf dem *Innovator-Server* verknüpfte FELDOBJEKT (optional, da nicht im Basisdatenmodell der FELDMANAGEMENTPLATTFORM vorkommend), (2) *MD-RZ* für den Ressourcenzeiger auf die abrufbaren Maschinendaten und (3) *PD-RZ* für den Ressourcenzeiger auf die abrufbaren Produktdaten. Die Attribute sind in Abbildung 43 exemplarisch für die INFORMATIONSRESSOURCE mit der Bezeichnung AB23F-T95547B#CC-000A110#1 aufgeschlüsselt. Dementsprechend ist mit der INFORMATIONSRESSOURCE das FELDOBJEKT 1 verknüpft und Produkt- und Maschinendaten lassen sich über die URI[42] https://gf.pd-service.com bzw. https://smstestbed.nist.gov/vds/current abrufen.

An dieser Stelle ist besonders hervorzuheben, dass auch die 2. Gruppierungsregel aus dem FELDKONZEPT umgesetzt wurde: „Die FELDOBJEKTE gleicher Maschinen bzw. Maschinenkomponenten nutzen die INFORMATIONSRESSOURCE des zuerst erzeugten FELDOBJEKTS als gemeinsamen, zentralen Zugangspunkt, wenn die mit der INFORMATIONSRESSOURCE verknüpfte Referenz auf einen Produkt- oder Maschinendatenbestand identisch ist“ (siehe S. 54). Ein Beispiel hierfür ist das FELDOBJEKT 3 im Anwendungsszenario, welches lt. der

[42] Zur Umsetzung des FELDKONZEPTS wird das einheitliche Identifikations- und Adressierungsschema *Uniform Resource Identifier* (kurz URI) empfohlen, das die zentrale Grundlage für verschiedene Protokolle im Internet ist und wie das in Kapitel 2.2 auf S. 16 vorgestellte IRDI-Verfahren durch die *Plattform Industrie 4.0* konkret für *Industrie 4.0* zugelassen ist (vgl. Heidel et al., 2017, S. 64; Network Working Group, 1998).

FELDSTRUKTUR auf S. 95 eine baugleiche Fräsmaschine repräsentiert wie das soeben betrachtete FELDOBJEKT 1 und welches ebenfalls im Unternehmen *CVi* betrieben wird. Demzufolge sind die Ressourcenzeiger auf die abrufbaren Produkt- und Maschinendaten beider Maschinen identisch. In diesem Fall wird anstatt der URI ein Verweis auf den zuerst erzeugten INFORMATIONSRESSOURCE-Knoten anhand dessen Seriennummer-Bezeichnung gewählt (siehe Abbildung 44).

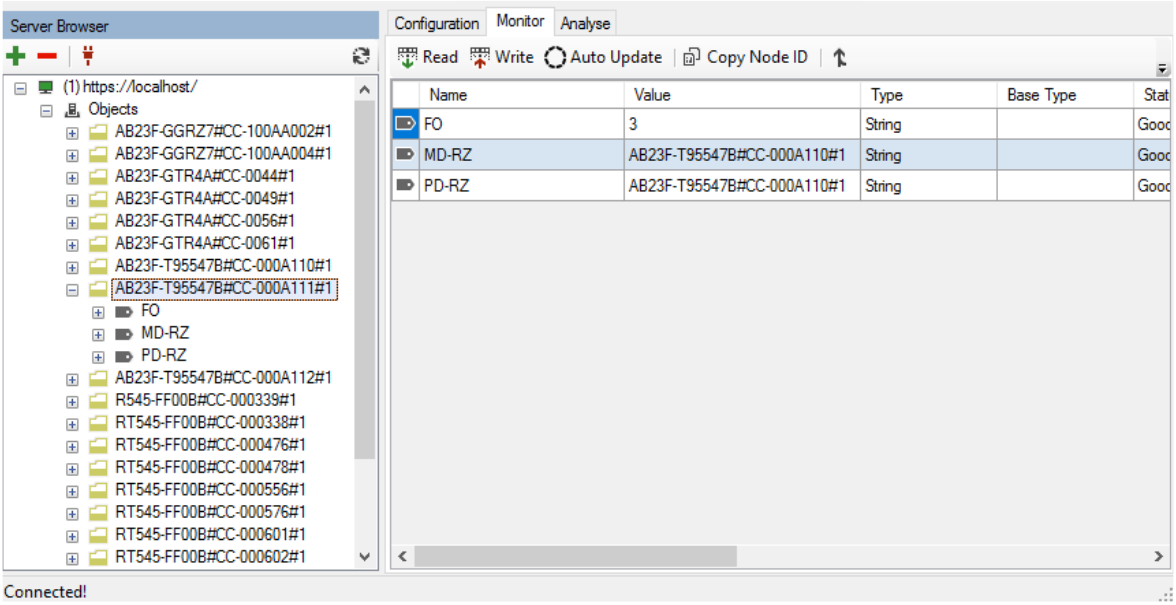


Abbildung 44: Adressraum des plattformeigenen OPC UA-Servers für das Anwendungsszenario – der INFORMATIONSRESSOURCE-Knoten für das FELDOBJEKT 3

Nicht zuletzt wurden dem *Innovator-Server* Funktionen eines *MTConnect*-Clients[43] hinzugefügt (vgl. Abbildung 42), da die vom *NIST Smart Manufacturing Systems Test Bed* stammenden Maschinendaten über eine *MTConnect*-Schnittstelle kommuniziert werden. Der *MTConnect*-Client wurde speziell für die FELDMANAGEMENTPLATTFORM entwickelt und unterstützt als Besonderheit die *OPC UA Companion Specification ‚OPC UA for MTConnect'*, die die Interoperabilität zwischen beiden Standards sicherstellt – ein zentrales Informationsmodell gewährleistet die konsistente Datenübertragung zwischen dem *NIST-MTConnect*-Server und dem plattformeigenen *Innovator-Server*. Mit dem *MTConnect*-Client verbunden sind des Weiteren neu entwickelte Methoden zur statischen Analyse, zur Überwachung und zum Speichern der erfassten Maschinendaten sowie die Möglichkeit, anhand eines vorhandenen Maschinendatenbestands das Verhalten einer oder mehrerer Fräsmaschinen zu reproduzieren.

---

[43] Der *MTConnect*-Client wurde als Webservice (benutzerdefinierte ASP.NET Core-Anwendung) entwickelt und über den *Microsoft Internet Information Services* (IIS) des *Windows Servers* eingebunden. Für die Entwicklung standen die *Aras Innovator*-API (Innovator Object Model) sowie die Open Source-Bibliothek *MTConnectSharp* für C# zur Verfügung.

IT-Elemente des Maschinenbetreibers *CVi*

Das betreibereigene Informationssystem beinhaltet grundsätzlich die in Motorspindeln und Fräsmaschinen integrierten Sensoren, die prozessrelevante Maschinendaten erfassen, die im Weiteren durch maschinenzugehörige Informations- und Kommunikationstechnologien verarbeitet und zur Abfrage vorgehalten werden (siehe Abbildung 42 auf S. 101). Basierend auf dem *MTConnect*-Standard des MTConnect Instituts (2019) kodieren die Maschinendaten für jede Fräsmaschine die Linear- und Rotationsbewegungen der Fräserachsen (Bewegungsdaten), Standzeiten sowie ausgewählte Status- und Ereignisinformationen mit „Zeitstempel“. Die Daten lassen sich vom NIST-Webserver entweder über einen *MTConnect*-Client oder wie in Abbildung 45 gezeigt über einen Internetbrowser abrufen. Im konkreten Beispiel deuten die hierfür ausgewählten, tabellarisch sortierten Daten darauf hin, dass die von *GF* stammende Fräsmaschine der Marke *AgieCharmilles* mit der Nummer 01 online bzw. verfügbar ist und dass kein Notausereignis vorliegt (der Not-Aus ist scharf geschalten). Weiterhin ist erkennbar, dass die Maschine (sehr wahrscheinlich) inaktiv ist, denn die Rotationsachse A verharrt im abgefragten Zeitraum in Nullstellung.

Device: GFAgie01; UUID: mtc_adapter001

Device : GFAgie01

Events

Timestamp	Type	Sub Type	Name	Id	Sequence	Value
2021-02-15T20:43:15.877670	Availability		avail	GFAgie01-dtop_1	375342221	AVAILABLE
2021-02-15T20:43:15.879998	EmergencyStop		estop	GFAgie01-dtop_2	375342222	ARMED

Rotary : A

Samples

Timestamp	Type	Sub Type	Name	Id	Sequence	Value
2021-02-15T21:26:04.425219	Angle	ACTUAL	Aposition	GFAgie01-A_2	375388173	-0.0001

Timestamp	Type	Sub Type	Name	Id	Sequence	Value
2021-02-15T22:02:34.632546	Angle	ACTUAL	Aposition	GFAgie01-A_2	375410330	-0.0002

Abbildung 45: Ausschnitt aus dem Datenstrom vom NIST Smart Manufacturing Systems Test Bed

Produktionsrelevante Maschinendaten lassen sich über die *MTConnect*-Schnittstelle des *NIST Smart Manufacturing Systems Test Bed* nicht abrufen. In diesem Zusammenhang ist nichts über konkrete Datenverwaltungssysteme bzw. IT-Elemente seitens *NIST* bekannt.

IT-Elemente der Hersteller *GF*, *Mazak*, *HURCO* und *WEISS*

GF, *Mazak, HURCO* und *WEISS* verfügen zur Umsetzung des FELDKONZEPTS und damit des Anwendungsszenarios neben jeweils einem PDM-System als Herzstück der herstellereigenen Informationssysteme (siehe Abbildung 42 auf S. 101) über domänenspezifische Entwicklungswerkzeuge zur Identifikation, Auswahl und Dokumentation feldrelevanter Produktkomponenten und der zu veröffentlichenden, feldrelevanten Produkteigenschaften und Maschinenparameter. Ein solches Entwicklungswerkzeug wurde als Erweiterung der CAD-Anwendung SolidWorks entwickelt und als Demonstrator umgesetzt. Dabei können einzelne Komponenten (in Abbildung 46 am Beispiel einer Fräsmaschine von Mazak) im Feature-Manager oder im Grafikbereich ausgewählt und als feldrelevant markiert werden. Über eine Eingabemaske können im Anschluss komponentenspezifisch Produkteigenschaften und Maschinenparameter einzeln ausgewählt und ebenfalls als feldrelevant markiert werden. Die Auswahl wird in der CAD-Datei gespeichert.

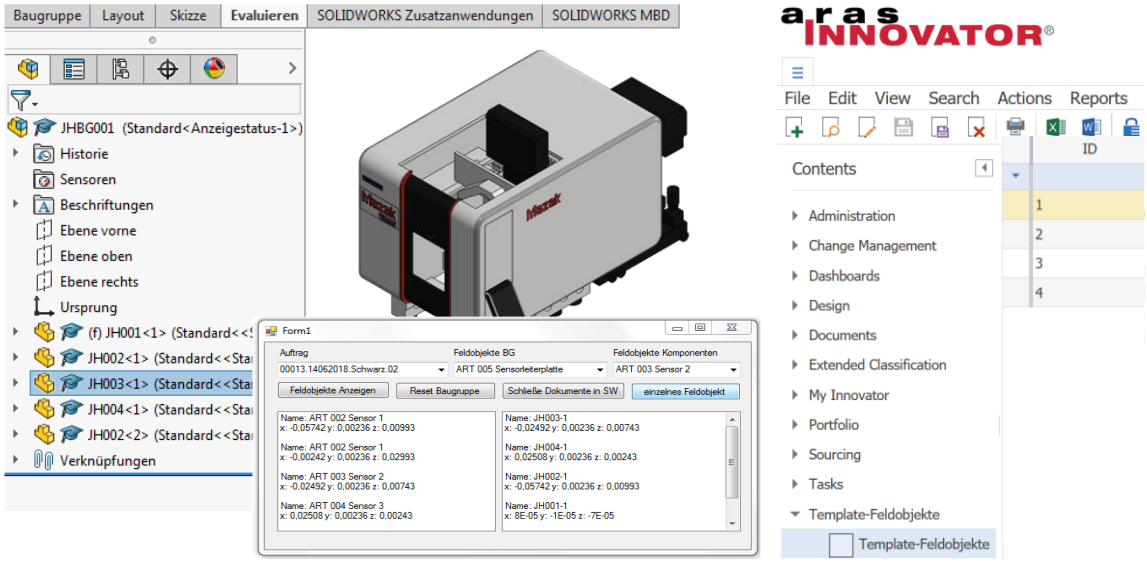


Abbildung 46: Auswahl feldrelevanter Produktkomponenten, Produkteigenschaften und Maschinenparameter in SolidWorks sowie Speichern der Auswahl in Aras Innovator

Über eine ebenfalls entwickelte CAD-PDM-Kopplung werden beim Einchecken eines CAD-Modells in das PDM die Dokument- und Produktstruktur zusammen mit der Template-FELDSTRUKTUR aufgebaut. Für den Demonstrator wurde hierfür die bereits für die FELDMANAGEMENTPLATTFORM eingesetzte PLM-Lösung *Aras Innovator* ausgewählt (siehe Abbildung 46), die eine flexible Steuerung von Strukturen, Prozessen und Lebenszyklen komplexer Systeme gestattet. In den herstellerseitigen *Innovator-Server* wurden demzufolge das erweiterte Basisdatenmodell für PDM (siehe Abbildung 28 auf S. 65) sowie Methoden implementiert, die die Aktivitäten 1, 2 und 3 aus dem Teilprozess I realisieren (siehe Kapitel 4.3.2).

Die Abfrage von Produktdaten erfolgt gemäß den FELDKONZEPT-Festlegungen nicht direkt aus dem PDM-System des Herstellers, sondern über eine gemeinsame Kommunikationsschnittstelle mit der FELDMANAGEMENTPLATTFORM, um einen sichereren Datenaustausch im Kontext geregelter Beziehungen zwischen Maschinenherstellern und -betreibern zu ermöglichen. Hierfür wurde eine Kopplung zwischen *Aras Innovator* und *OPC UA* speziell für die öffentliche Bereitstellung von Produktdaten entwickelt. Die Kopplung zeichnet sich vor allem durch ein besonderes Modell für Produktinformationen aus (Abbildung 47, oben), das auf den Adressraum des herstellerseitigen *OPC UA*-Servers Anwendung findet und die im PDM verfügbare Informationsmenge auf eine für den Datenaustausch sinnvolle Auswahl eingrenzt (Abbildung 47, unten, exemplarisch für *HURCO*).

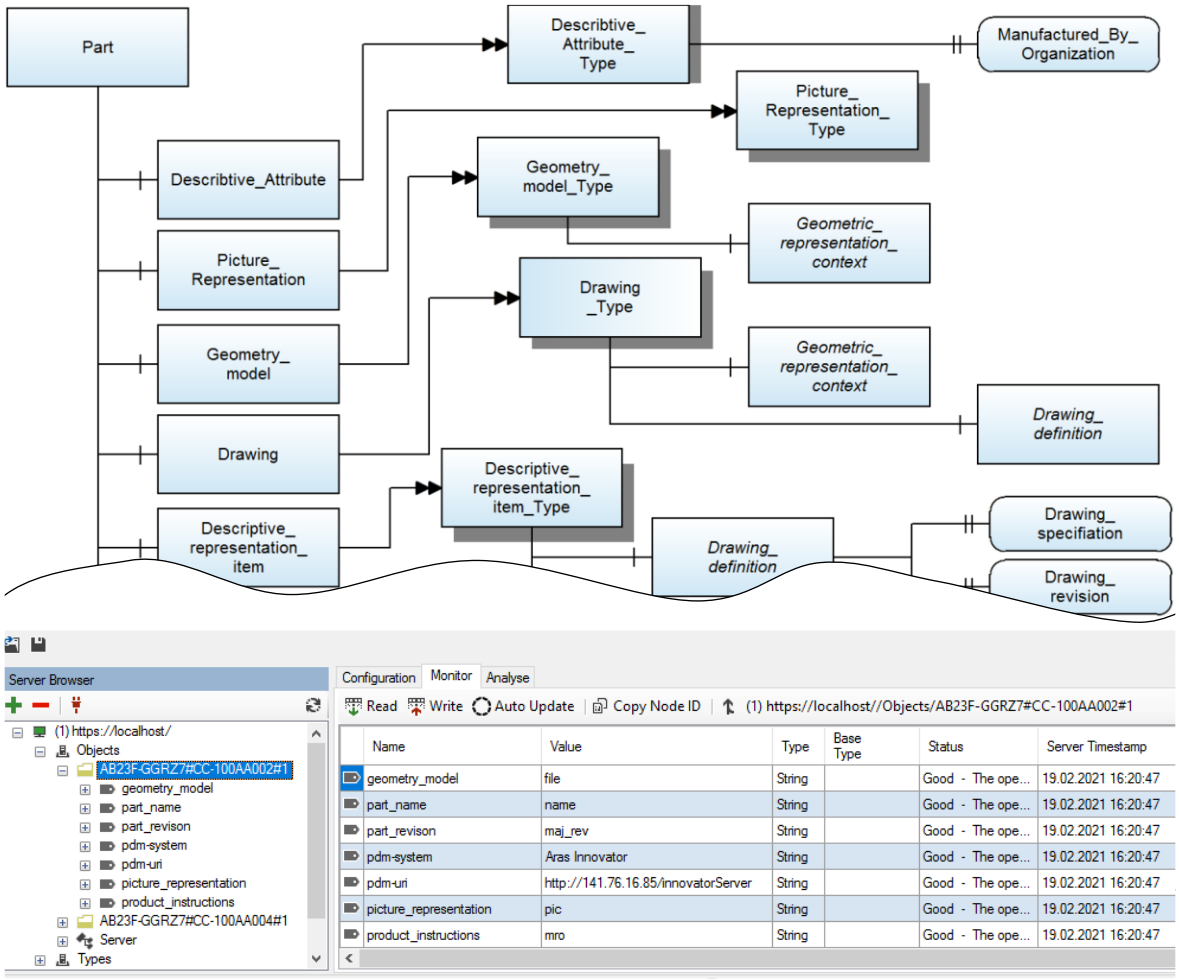


Abbildung 47: Ausschnitt aus dem Produktinformationsmodell für den *OPC UA-Server auf Herstellerseite*

An dieser Stelle kann zusammenfassend festgehalten werden: Sowohl *WEISS* als auch *GF*, *Mazak* und *HURCO* verfügen für das Anwendungsszenario über die oben beschriebene, erweiterte CAD-Anwendung sowie über *Aras Innovator* als PDM-System mit einer

daran gekoppelten *OPC UA*-Schnittstelle inkl. Produktinformationsmodell. Mit der FELDMANAGEMENTPLATTFORM ist damit der Prototyp des FELDMANAGEMENTSYSTEMS vollständig festgelegt und erfüllt alle Anforderungen zur Umsetzung des Anwendungsszenarios.

6.3 Validierungsdurchführung

Für die Validierung des FELDKONZEPTS wird das in Kapitel 6.1 vorgestellte Anwendungsszenario unter Zuhilfenahme des entwickelten Prototyps eines FELDMANAGEMENTSYSTEMS durchgeführt. Damit wird die Eignung und Leistungsfähigkeit des FELDKONZEPTS und der damit bereitgestellten Modelle und teilweisen Realisierungsansätze (Artefakte nach dem Design Science-Ansatz) auf ihren Einsatzzweck hin überprüft bzw. ob diese den Bedürfnissen der sozio-technologischen Umwelt gerecht werden. Darüber hinaus wird überprüft, ob die in Kapitel 3 dieser Arbeit formulierte Zielsetzung erreicht wurde. Mit der Validierung bzw. Eignungsprüfung wird der sog. *Relevanzzyklus* (siehe Abbildung 2 auf S. 7) geschlossen und die Artefakte können als neuer Wissensbeitrag für nachfolgende Forschungsarbeiten genutzt werden (Erkenntnistransfer).

1. Anwendungsfall

(„Das Unternehmen *HURCO* entwickelt einen neuen Typ einer Fräsmaschine.“)

Die Entwicklung eines neuen Fräsmaschinentyps bedeutet, die ersten beiden Aktivitäten aus dem Prozessmodell für das FELDKONZEPT zu durchlaufen (siehe Teilprozess I in Kapitel 4.3.2). Der Ansatz, im Verlauf der Produktentwicklung (1) Template-FELDOBJEKTE für die feldrelevanten Produktkomponenten im PDM-System anzulegen und (2) die zu veröffentlichenden, feldrelevanten Produkteigenschaften und Maschinenparameter als XML-Datei im PDM-System zu speichern bzw. dokumentbasiert zu verwalten, hat sich bereits beim Aufbau des Prototyps eines FELDMANAGEMENTSYSTEMS als erfolgreich herausgestellt. Dementsprechend ist es die Aufgabe von *HURCO,* ein neues Template-FELDOBJEKT in *Aras Innovator* für den neu entwickelten Typ einer Fräsmaschine anzulegen und die zu veröffentlichenden, feldrelevanten Produkteigenschaften und Maschinenparameter via XML- Datei zu speichern. (Auf eine Abbildung wird an dieser Stelle verzichtet, da bereits Abbildung 46 alle wichtigen Informationen darstellt.)

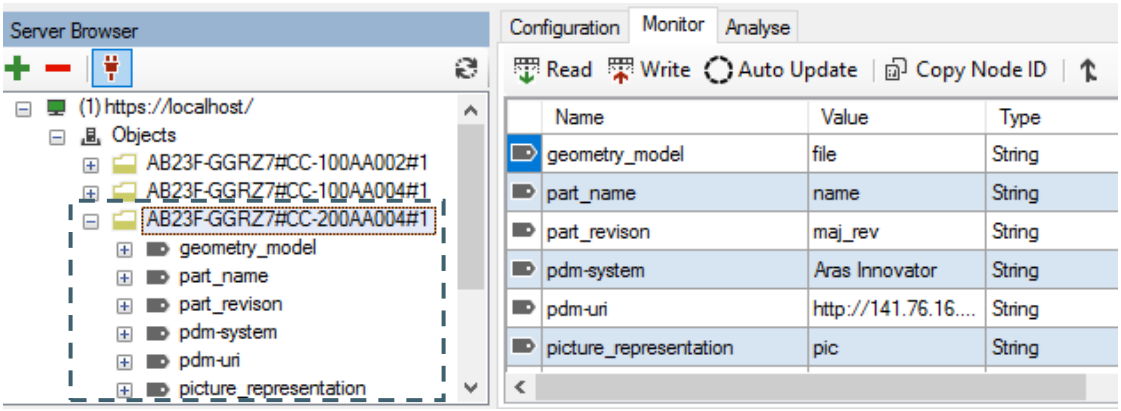
2. Anwendungsfall

(„*HURCO* produziert eine Fräsmaschine des neu entwickelten Typs, die bei *CVi* in Betrieb genommen wird. Die hierfür notwendige Motorspindel und deren FELDOBJEKT stehen durch *WEISS* bereits zur Verfügung.“)

Mit der Produktion und der sich anschließenden Inbetriebnahme neuer Maschinen und Maschinenkomponenten wird die Schnittstelle für Produktinformationen auf Herstellerseite eingerichtet und eine konsistente FELDSTRUKTUR aufgebaut. Hierzu sind die Aktivitäten 3, 4 und 5 aus dem Prozessmodell für das FELDKONZEPT zu durchlaufen (siehe Teilprozess I in Kapitel 4.3.2 sowie Teilprozess II in Kapitel 4.3.3). Dabei werden für die neu produzierte Fräsmaschine wie in Abbildung 48 und Abbildung 49 dargestellt automatisch angelegt:

1. ein neues Objekt mit der Seriennummer AB23F-GGRZ7#CC-200AA004#1 im Adressraum des *OPC UA*-Servers von *HURCO*,
2. ein neuer INFORMATIONSRESSOURCE-Knoten ebenfalls mit derselben Seriennummer im Adressraum des *OPC UA*-Servers der FELDMANAGEMENTPLATTFORM sowie
3. ein neuer FELDOBJEKT-Knoten Nr. 19 auf der FELDMANAGEMENTPLATTFORM

1.



2.

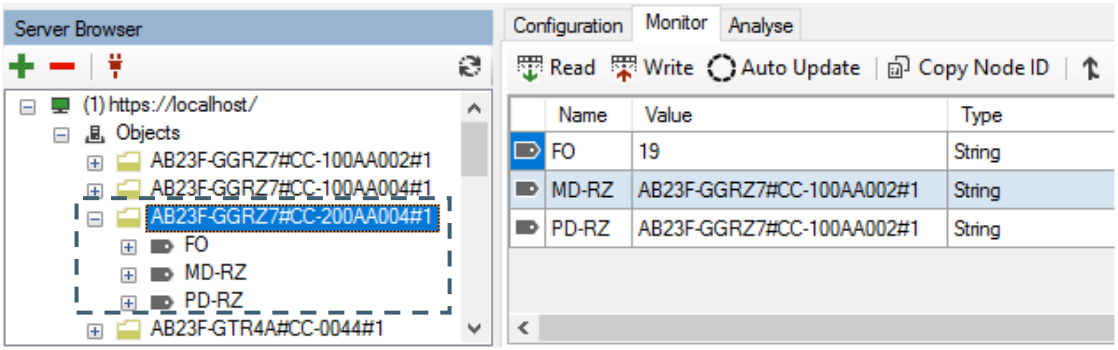


Abbildung 48: Erweiterung der hersteller- und plattformeigenen Adressräume um Knoten für die neu produzierte Fräsmaschine

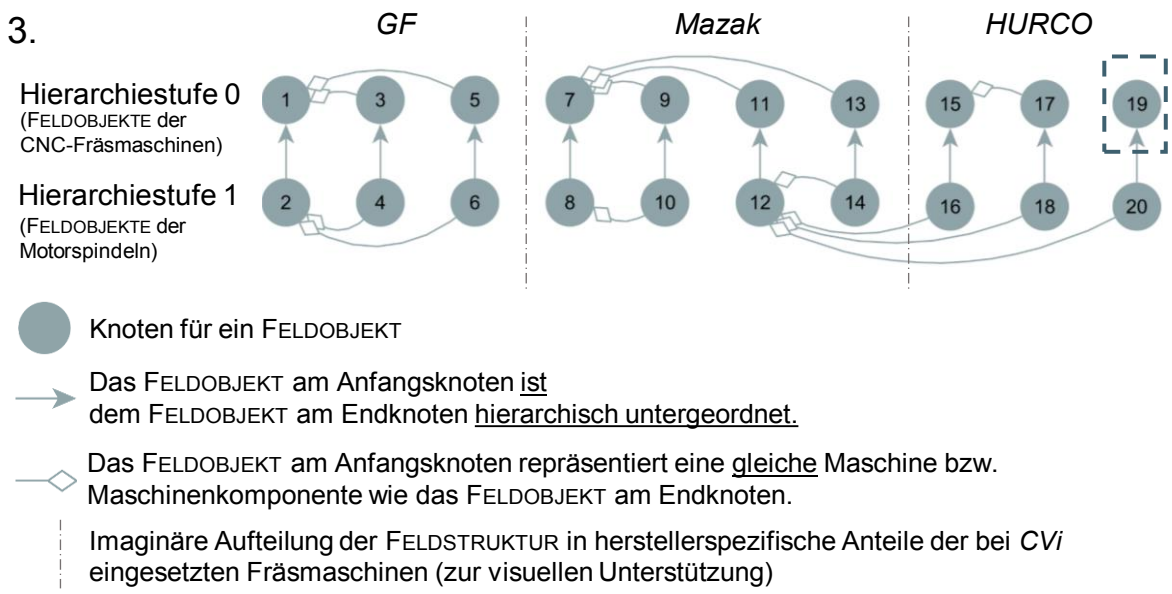


Abbildung 49: Erweiterung der FELDSTRUKTUR um zusätzliche FELDOBJEKTE für die neu produzierte Fräsmaschine und deren zugeordnete Motorspindel

Im Anschluss wird der bereits zur Verfügung stehende, zur Motorspindel zugehörige FELDOBJEKT-Knoten Nr. 20 mit dem unter 2. angelegten FELDOBJEKT-Knoten Nr. 19 verknüpft. Dabei geht aus Abbildung 48 aufgrund fehlender Verknüpfungen hervor, dass für die soeben hinzugefügte Fräsmaschine (noch) keine baugleiche existiert, da diese schließlich erst neu entwickelt wurde. Außerdem ist anhand der FELDSTRUKTUR erkennbar, dass die Motorspindeln typgleich der Motorspindel mit dem FELDOBJEKT-Knoten Nr. 12 ist.

Die Inbetriebnahme der neuen Fräsmaschine samt Motorspindel bei *CVi* erfolgt im Rahmen des Anwendungsszenarios virtuell: Anhand eines zuvor aufgezeichneten Maschinendatenbestands werden das Verhalten der Fräsmaschine und der dazugehörigen Motorspindel reproduziert, wodurch diese über den *MTConnect*-Client wie reale Maschinen erscheinen und deren Daten sich abrufen und nutzen lassen.

3. Anwendungsfall

(„Die bei *GF* eingesetzte Motorspindel mit dem FELDOBJEKT-Knoten 6 ist defekt und wird von *WEISS* durch ein Identteil ausgetauscht.“)

Der Austausch der defekten Motorspindel erfolgt im Rahmen des Instandhaltungsservices von *WEISS*. In diesem Zusammenhang ist der Teilprozess II (siehe Kapitel 4.3.3) anzuwenden, um sowohl die Konsistenz der FELDSTRUKTUR aufrechtzuerhalten als auch um das auf Maschinenbetreiberseite eingesetzte Modell der Kommunikationsschnittstelle zu aktualisieren. Dass in diesem Anwendungsfall ein Identteil verwendet wird, führt dazu, dass die ursprüngliche Konfiguration der betroffenen Fräsmaschine mit dem FELDOBJEKT-Knoten 5 erhalten bleibt (vgl. Abbildung 38 auf S. 95). Die im Vorfeld von *WEISS*

produzierte Ersatzmotorspindel verfügt ebenso wie alle anderen über ein FELDOBJEKT, dessen FELDOBJEKT-Knoten 21 zunächst über keine hierarchische Verknüpfung zu einem anderen FELDOBJEKT-Knoten verfügt (vgl. Abbildung 50, oben). Mit dem Austausch der defekten Motorspindel bzw. mit der Instandsetzung der Fräsmaschine wird die Verknüpfung zwischen den FELDOBJEKT-Knoten 6 und 5 aufgelöst und durch eine Verknüpfung zwischen den Knoten 21 und 5 ersetzt (vgl. Abbildung 50, unten). Der obsolet gewordene FELDOBJEKT-Knoten 6 bleibt in der FELDSTRUKTUR erhalten (siehe ‚Zum Umgang mit obsoleten FELDOBJEKTEN' auf S. 81).

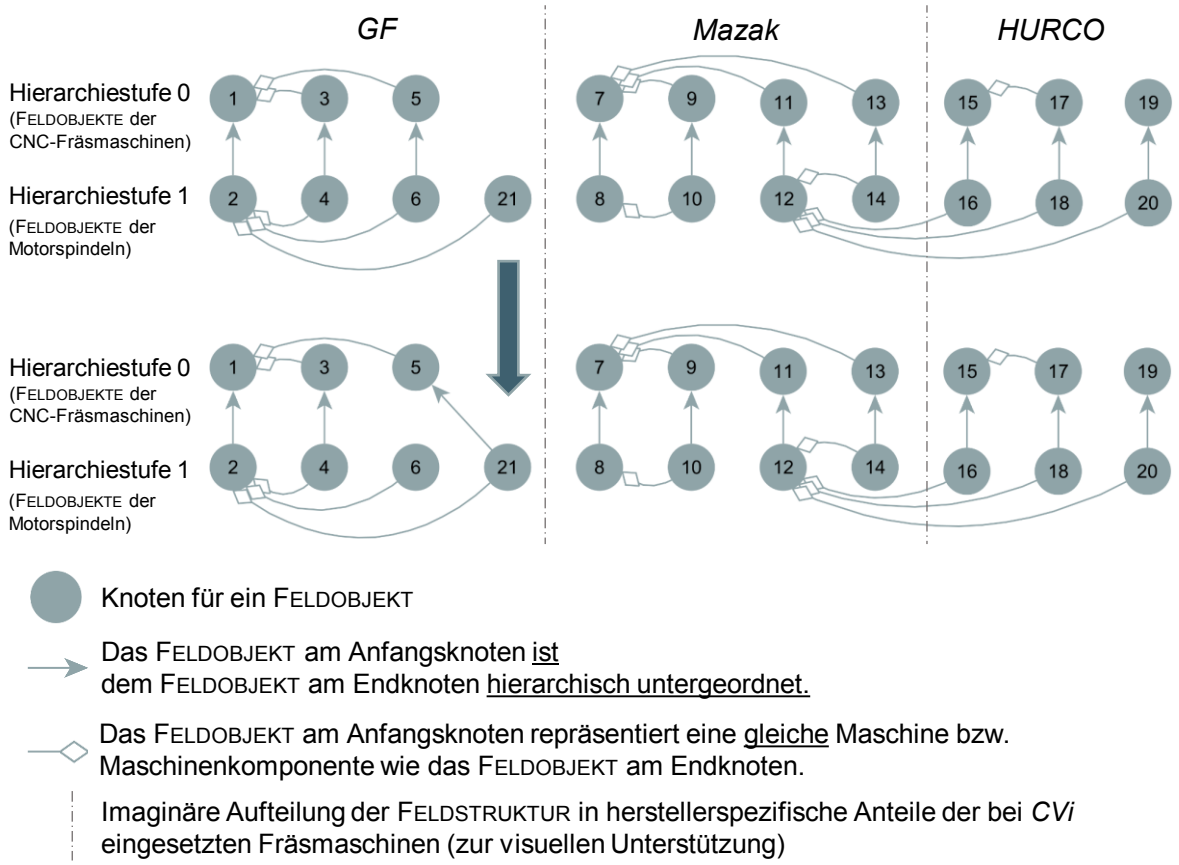


Abbildung 50: Aktualisierung der FELDSTRUKTUR aufgrund der Austauschreparatur der Motorspindel

Das Tracking und die Dokumentation von Austauschreparaturen wie im Fall der Motorspindel wird mittels *OPC UA* und *Aras Innovator* als Demonstratorlösung umgesetzt. Hierbei registrieren sich kommunikationsfähige Produktkomponenten wie die Motorspindel selbstständig im Adressraum des betreiberseitigen *OPC UA*-Servers. Daraufhin werden die Änderungen der Maschinenkonfiguration an die FELDMANAGEMENTPLATTFORM weiterkommuniziert, wonach eine Aktualisierung der FELDSTRUKTUR erfolgt. Als Besonderheit verfügen die INFORMATIONSRESSOURCEN und FELDOBJEKTE in der entwickelten Demonstratorlösung über einen im *Innovator*-Server implementierten Lebenszyklus und je

nach Lebensphase über Eigenschaften wie einen Status – nicht mehr relevante FELDOBJEKTE werden vom Plattformsystem in den Status ‚Obsolet' überführt (siehe Abbildung 51).

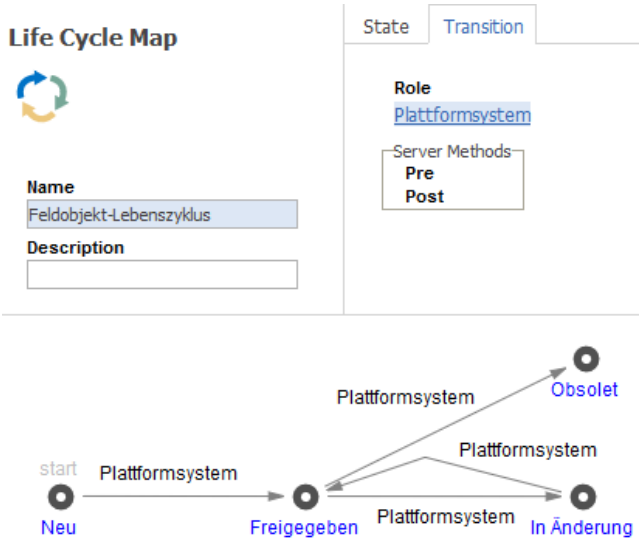


Abbildung 51: FELDOBJEKT-Lebenszyklus in Aras Innovator

4. Anwendungsfall

(„*Mazak* fragt die Ereignisdaten der letzten 7 Tage aller von *CVi* genutzten, herstellereigenen Fräsmaschinen ab.")

Die Übermittlung der Ereignisdaten an *Mazak* erfordert den Aufbau eines FELDMODELLS über die FELDMANAGEMENTPLATTFORM. Zu diesem Zwecke wurde der hierfür notwendige Teilprozess III (siehe Kapitel 4.3.4) mittels *OPC UA* und *Aras Innovator* als Demonstrator umgesetzt. Demzufolge sind die Aktivitäten 6 bis 17 als miteinander gekoppelte Workflows, Methoden und Aktivitäten in den Server- und Clientanwendungen der Kommunikationsschnittstelle zwischen FELDMANAGEMENTPLATTFORM und den hersteller- und betreibereigenen Informationssystemen implementiert (vgl. Abbildung 42). Die Grundlage für den Aufbau und das Speichern von FELDMODELLEN ist das im plattformeigenen *Innovator*-Server verankerte Basisdatenmodell der FELDMANAGEMENTPLATTFORM.

Abbildung 52 zeigt als anschauliches Beispiel eine an die Logik des herstellerseitigen *OPC UA*-Clients gekoppelte, graphische Benutzeroberfläche, die es dem Nutzer gestattet, die Zusammensetzung von FELDMODELLEN entsprechend ihres aufgabenspezifischen Zwecks zu definieren. Das Beispiel demonstriert, wie unter anderem die Aktivitäten 6, 7, 10 und 12 aus dem Teilprozess III realisiert sind.

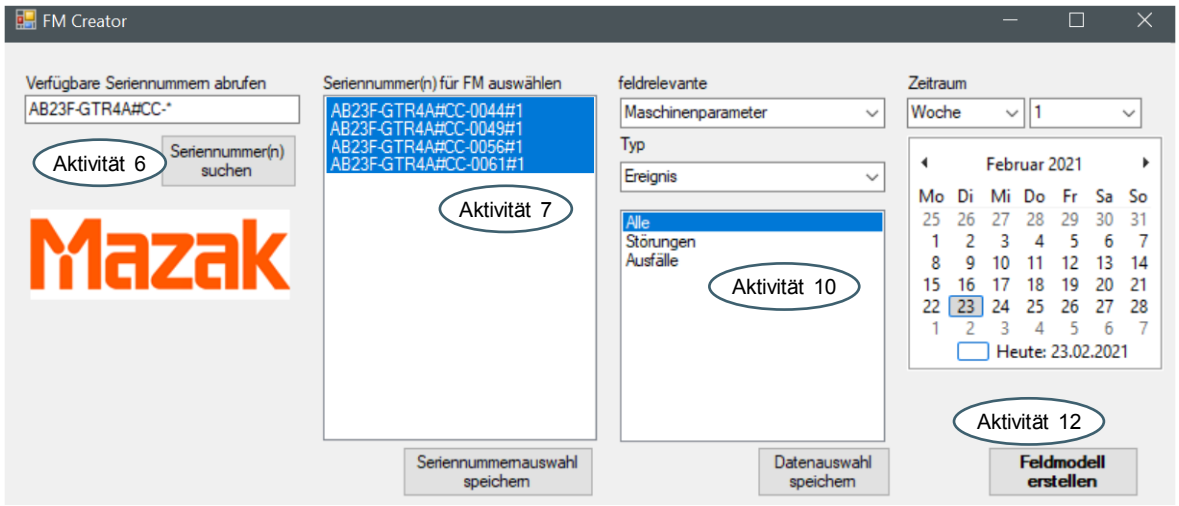


Abbildung 52: Graphische Benutzeroberfläche zur Definition von FELDMODELLEN

Das FELDMODELL ist das Ergebnis der Integration der Ereignisdaten der letzten 7 Tage aller vier von *CVi* genutzten *Mazak*-Fräsmaschinen. Der integrierte Datenbestand wird durch die FELDMANAGEMENTPLATTFORM erzeugt, indem die erforderlichen Daten über die *MTConnect*-Schnittstellen abgerufen und in strukturierter Form in ein XML-Dokument gespeichert werden. In dem in Abbildung 53 gezeigten Dokumentausschnitt sind die Ereignisse als terminierte Logeinträge exemplarisch für die Fräsmaschine mit der Seriennummer AB23F-GTR4A#CC-0056#1 hinterlegt. Daraus geht im Übrigen hervor, dass am 17. Februar 2020 die Maschine für mehr als zwei Stunden nicht im Einsatz war. Für das Unternehmen *Mazak* bedeutet dies bspw., dass für diesen Zweitraum kein Nutzungsentgelt erhoben werden darf. Das an *Mazak* kommunizierte XML-Dokument wird in dessen PDM dokumentbasiert gespeichert und steht für Analysezwecke zur Verfügung.

```
<?xml version="1.0" encoding="ASCII"?>
  <INodes>
    <INode cName="CNC-Fräsmaschine" SN="AB23F-GTR4A#CC-0056#1">
    <FO ID="7“></FO>
      <Events>
        <Event“>
            <Log date="2020-02-17T12:14:05Z" message="STOPPED"></Log>
            <Log date="2020-02-17T14:23:54Z" message="STARTED"></Log>
            <Log date="2020-02-19T09:02:11Z" message="COLLISION DETECTED"></Log>
            <Log date="2020-02-19T09:05:44Z" message="UNAVAILABLE"></Log>
            <Log date="2020-02-19T10:11:03Z" message="AVAILABLE"></Log>
            <Log date="2020-02-22T15:14:33Z" message="STOPPED"></Log>
            <Log date="2020-02-23T15:55:07Z" message="STARTED"></Log>
        </Event>
      </Events>
    </INode>
    <INode cName=" CNC-Fräsmaschine " SN="AB23F-GTR4A#CC-0061#1">
    <FO ID="9“></FO>
      <Events>
```

Abbildung 53: Auszug aus dem XML-Dokument des FELDMODELLS für den 4. Anwendungsfall

5. Anwendungsfall

(„*CVi* benötigt für eine Frässimulation die Spezifikations- und Geometrieinformationen 1. des eingesetzten Fräsmaschinentyps von *GF* und 2. des dazugehörigen Motorspindeltyps inkl. der Standzeiten der momentan eingesetzten Spindeln.“)

Wie im 4. Anwendungsfall erfordert der dargelegte Informationsbedarf von *CVi* ebenfalls den Aufbau eines FELDMODELLS über die FELDMANAGEMENTPLATTFORM. Hierfür kann erneut die bereits vorgestellte Demonstratorlösung für die Umsetzung des dritten Teilprozesses eingesetzt werden. Hierzu wurde die ursprüngliche graphische Benutzeroberfläche um Filter- und Auswahlfunktionen ergänzt, um, wie in diesem Fall, die angezeigte Anzahl typgleicher Maschinen und Maschinenkomponenten zu reduzieren bzw. um parallel auf mehrere Produkt- und Maschinendatenquellen zuzugreifen.

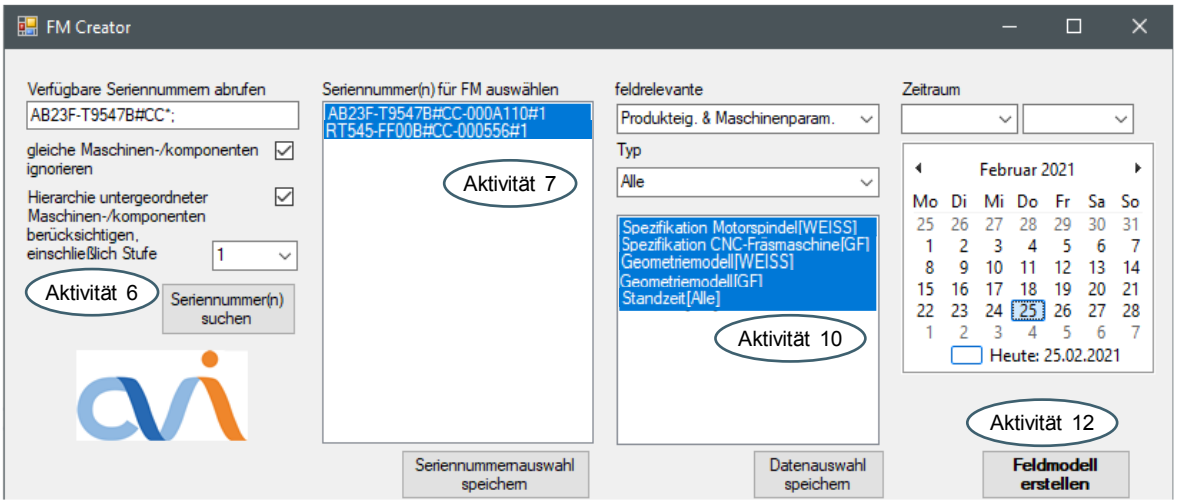


Abbildung 54: Erweiterte graphische Benutzeroberfläche zur Definition von FELDMODELLEN

Der Aufbau des, für den 5. Anwendungsfall erforderlichen, FELDMODELLS geschieht über die Abfrage und Integration

1. der Spezifikations- und Geometrieinformationen als feldrelevante Produkteigenschaften über die *OPC UA*-Schnittstellen von *GF* und *WEISS* sowie
2. der Standzeitinformationen der momentan eingesetzten Motorspindeln als feldrelevante Maschinenparameter über die *MTConnect*-Schnittstelle von *CVi*.

In dem in Abbildung 55 gezeigten Ausschnitt des modellbeschreibenden XML-Dokuments sind für die Motorspindel mit der Seriennummer RT545-FF00B#CC-000556#1 die Spezifikation und das 3D-Modell als verlinkte Dokumente hinterlegt. Über die Verlinkungen lassen sich die dazugehörigen Dateien mit den von *CVi* benötigten Spezifikations- und Geometrieinformationen mittelbar aus PDM-System von *WEISS* abrufen. In gleicher Weise lassen sich über die Verlinkung zum *NIST Smart Manufacturing Systems Test Bed* die

Standzeiten der momentan eingesetzten Spindeln abrufen. Das XML-Dokument wird an *CVi* kommuniziert und kann in Vorbereitung der Frässimulation genutzt werden.


```xml
<?xml version="1.0" encoding="ASCII"?>
  <INodes>
    <INode cName="Motorspindel" SN="RT545-FF00B#CC-000556#1">
      <FO ID="2“></FO>
      <Properties>
        <Property pName="Dokumentation“>
          <Variables>
            <Variable vName="Spezifikation">
              <Items>
                <Item Item-Link="opc.tcp://weiss.pd-service/opcua-srv:4840“/>
              </Items>
            </Variable>
            <Variable vName="3D-Modell">
              <Items>
                <Item Item-Link="opc.tcp://weiss.pd-service/opcua-srv:4840“/>
              </Items>
            </Variable>
          </Variables>
        </Property>
      </Properties>
      <Parameters>
        <Parameter pName="Status“>
          <Variables>
            <Variable vName="Standzeit">
              <Items>
                <Item Ressource-Link=“https://smstestbed.nist.gov/vds/current“/>
              </Items>
            </Variable>
          </Variables>
        </Parameter>
      </Parameters>
    </INode>
    <INode cName="CNC-Fräsmaschine" SN="AB23F-T9547B#CC-000A110#1">
      <FO ID="1“></FO>
      <Properties>
        <Property pName="Spezifikation“>
```


Abbildung 55: Auszug aus dem XML-Dokument des FELDMODELLS für den 5. Anwendungsfall

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Fazit

Die Prozesse aus der Betriebsphase von Maschinen beruhen zunehmend auf Daten, die durch fortschrittliche Technologien zur Datenerfassung, -verarbeitung und -kommunikation bereitgestellt werden. Die damit einhergehende, stetig anwachsende Menge maschinenrelevanter Daten bietet aus Sicht von Maschinenherstellern ein großes Optimierungspotenzial für sowohl aktuelle als auch zukünftige Maschinengenerationen und deren betriebsbegleitende Services. Vor diesem Hintergrund ist es notwendig, die speziell für die Produktentstehung und bspw. die Instandhaltung relevanten Maschinendaten systematisch in den Prozessbereich von PLM zu integrieren. Jedoch verhindert derzeit, neben vorranging organisatorischen Informationsbarrieren auf Maschinenhersteller- und -betreiberseite, der Mangel an einem einheitlichen Schnittstellenkonzept einen geordneten, durchgängigen und organisationsübergreifenden Austausch strukturierter Maschinendaten. Existierende Schnittstellenlösungen knüpfen nicht an die Produktstruktur an und sind individuell nur für bestimmte Produkte bzw. Produktarten, Daten und Nutzungsszenarien anwendbar. Der Zugang zu Maschinen- als auch Produktdaten folgt keinem einheitlichen Prozess. Dies führt im Allgemeinen zur Entfremdung von Maschinen bzw. Maschinenkomponenten von deren Herstellern. Im Gegenzug können auch Maschinenbetreiber nicht auf das Produktmodell und auf die damit verbundenen Entwicklungsergebnisse zugreifen. Datenanfragen erfolgen häufig angesichts verteilter und mitunter veralteter Datenbestände, unterbrochener Kommunikationskanäle, manueller Tätigkeiten usw., die die Datenbeschaffung aufwendig und riskant machen oder gar nicht zulassen.

Zur Lösung der Problemstellung wird in dieser Arbeit das FELDKONZEPT als grundlegende Beschreibung einer einheitlichen Kommunikationsschnittstelle zur systemischen Integration von Maschinendaten in den PLM-Prozessbereich vorgestellt. Die Datenintegration erfolgt virtuell und prozessunterstützt-reproduzierbar auf der Applikationsebene einer FELDMANAGEMENTPLATTFORM als Middleware sowie anhand einer FELDSTRUKTUR als Mapping-Grundlage. Die FELDSTRUKTUR ist eine produktartneutrale, produkt- und organisationsübergreifende Strukturbeschreibung aus der konsistenten Verknüpfung ausgewählter Produktstrukturinformationen mit Strukturinformationen von Maschinen aus deren Betriebsphase. Die als FELDOBJEKTE bezeichneten Elemente der FELDSTRUKTUR sind mit sog. INFORMATIONSRESSOURCEN verknüpft, die über Zugangsdaten für die produkt- und maschinendatenrelevanten Ressourcen der IT-Systeme von Maschinenherstellern und -betreibern verfügen. Der Aufbau und Erhalt einer konsistenter FELDSTRUKTUR wird

durch Anwendung des FELDPROZESSES sichergestellt, der ebenfalls Bestandteil des FELDKONZEPTS ist und an die Prozesse der Produktentstehung und des Maschinenbetriebs anknüpft.

Die Integration von Maschinendaten erfolgt nach Bedarf und ebenfalls unterstützt durch den FELDPROZESS über die Auswahl einzelner oder mehrerer Maschinen und/oder Maschinenkomponenten sowie von Produkteigenschaften und Maschinenparameter, deren zugrundeliegende Daten durch Integration einen gemeinsamen, als FELDMODELL bezeichneten, Datenbestand bzw. Datensatz bilden. Die Datenintegration erfolgt dabei anhand der FELDSTRUKTUR als Mapping-Grundlage.

Das in dieser Arbeit eingeführte FELDMODELL ist das zentrale Vehikel zum Austausch ausgewählter und logisch in einem Datensatz gemeinsam strukturierter Produkt- und/oder Maschinendaten. Für Maschinenhersteller bietet sich damit die Möglichkeit, Maschinendaten entsprechend dem geplanten Nutzungsweck (für z.B. eine Datenanalyse zur vorausschauenden Instandhaltung mehrerer Maschinen) einheitlich und reproduzierbar zu erfassen und dokumentbasiert im PDM zu speichern.

Die Validierung des FELDKONZEPTS erfolgt im Rahmen dieser Arbeit anhand eines fiktiven, durchgehenden Anwendungsszenarios. Mit dem Ziel der Validierungsdurchführung wurde der Prototyp eines FELDMANAGEMENTSYSTEMS entwickelt, in dessen Mittelpunkt eine FELDMANAGEMENTPLATTFORM als eigenständige Middleware-Lösung steht, die sowohl die Verwaltung der FELDSTRUKTUR als auch die wechselseitige Kommunikation zwischen den IT-Systemen von Maschinenherstellern und -betreibern realisiert. Für die Umsetzung des Prototyps wurden *Aras Innovator* und *OPC UA* als fortschrittliche Technologieplattformen verwendet, um Anwendungs- und Kommunikationsaktivitäten modellbasiert, in verteilten und vernetzten Systemen zu organisieren, zu steuern und zu kontrollieren.

Das FELDKONZEPT wird den Bedürfnissen der sozio-technologischen Umwelt gerecht, so das Ergebnis der Validierungsdurchführung. Die mit dem Konzept bereitgestellten Modelle, und teilweisen Realisierungsansätze sind dazu geeignet, einen geordneten, durchgängigen und organisationsübergreifenden Austausch strukturierter Maschinendaten zu verwirklichen und damit verbunden auch die vorrangig organisatorischen Informationsbarrieren auf Maschinenhersteller- und -betreiberseite abzubauen.

7.2 Kritik und weiterführende Arbeiten

Das in dieser Dissertation beschriebene Schnittstellenkonzept bedarf einer kritischen Auseinandersetzung, um offene Problemstellungen für weiterführende Forschungsarbeiten aufzudecken. Demzufolge sind zunächst die die Realität vereinfachenden Annahmen zu

beurteilen. Das FELDKONZEPT zeigt seine Stärke, wenn viele Maschinenbetreiber und Maschinenhersteller (insbesondere auch Zulieferer vom Maschinenkomponenten) gemeinsam bereit sind, die konzepteigenen Modelle und Systeme aufzugreifen, für sich zu adaptieren und als organisationsübergreifende Lösung zu akzeptieren, um Produkt- bzw. Maschinendaten über eine FELDMANAGEMENTPLATTFORM auszutauschen. Dieser Schritt erfordert nicht nur die Bewältigung organisatorischer Informationsbarrieren (wie mit dem FELDKONZEPT visionär in Aussicht gestellt), sondern auch die Überwindung der vorhandenen rechtlichen Defizite und persönlichen Widerstände, unter Berücksichtigung individueller Interessen. Grundlegend ermöglichen können dies klare Regelungen für Rechte und Pflichten zur gegenseitigen Bereitstellung und Nutzung produkt- bzw. maschinenrelevanter Daten, die ggf. zusammen mit dem Kauf einer Maschine vertraglich vereinbart werden. Außerdem lässt sich die Akzeptanz und das Vertrauen in das Schnittstellenkonzept durch einen hohen Verbreitungsgrad unter Beteiligung möglichst einflussreicher Unternehmen steigern. Dadurch können bereits anfängliche Ängste, Abneigungen und Bedenken abgebaut werden, was ansonsten viel Aufklärung und Zeit braucht (→ *Change Management, Kulturwandel*). Nichtsdestotrotz bleibt es unverzichtbar, (1) die Standardisierung von Kommunikationstechnologien und deren Grundlagen voranzutreiben sowie (2) ein solides Rechtsfundament zum Umgang mit Daten und deren rechtliche Zuordnung zu schaffen (→ *Data Governance & Compliance, Urheber- und Eigentumsrechte an Maschinendaten*). Weiterführende Forschungsarbeiten müssen sich mit diesen Problemstellungen auseinandersetzen.

Das FELDKONZEPT in der beschriebenen Form fokussiert im Wesentlichen die Produktentstehung und die Betriebsphase. Eine Erweiterung des Konzepts auf weitere Produktlebensphasen ist möglich, denn neben der Maschinenentwicklung und -nutzung sind, wie etwa für Aktivitäten im Service, im Recycling oder in der Logistik, die Daten verschiedener, in die PLM-Prozesse involvierter Parteien zunehmend relevant. Recyclingunternehmen bspw. besitzen für gewöhnlich keine Kenntnis über konkrete Produkt- und Maschinenmodelle und verfügen nur eingeschränkt über die für sie notwendigen Produkt- und Maschineninformationen, um eigene Aktivitäten planen und durchführen zu können.

Der in dieser Dissertation eingeführte FELDMODELL-Begriff ist zu kritisieren, denn er liefert kein so „vertrautes“ Abbild eines Originals wie z.B. ein 3D-Modell im CAD. Ein FELDMODELL reduziert ein System aus Maschinen und Maschinenkomponenten auf wenige ausgewählte Produkteigenschaften und Maschinenparameter und erfüllt damit für dessen Ersteller für einen bestimmten Zeitraum einen bestimmten Zweck. In diesem Zusammenhang ist auch zu kritisieren, dass der einem FELDMODELL zugrundeliegende Datenbestand statisch ist. Für den Umgang mit zeitlich veränderlichen/dynamischen Daten wie bspw.

Maschinen-Livedaten müssen in weiterführenden Forschungsarbeiten Lösungen gefunden werden.

Ein weiterer Kritikpunkt betrifft das Prozessmodell für das FELDKONZEPT, das zu weit entkoppelt erscheint von den Aktivitäten im Produktentwicklungsprozess und von den Aktivitäten bspw. im Produktions- oder Instandhaltungsprozess. Derlei Prozesse sind jedoch unternehmensindividuell, sodass Modellanpassung notwendig sind – alle mit dem FELDKONZEPT bereitgestellten Modelle und teilweisen Realisierungsansätze besitzen Referenzcharakter. Im Weiteren ist daher bspw. eine direkte Kopplung zwischen FELDPROZESS und dem Änderungs- und Freigabeprozess zu entwickeln. Darüber hinaus ist die Anwendung des Konzepts auch für andere Objekte zu evaluieren, da, wie in dieser Arbeit beschrieben, der Schwerpunkt auf Maschinen und Maschinenkomponenten liegt. Demzufolge können auch nicht physische, feldrelevante Objekte (ohne Repräsentation im PDM oder anderen Systemen) wie thermische oder elektromagnetische Felder, Referenzelemente wie Achsen, Ebenen und Koordinatensysteme, aber auch virtuelle Objekte im Zusammenhang mit dem Digitalen-Zwilling über FELDOBJEKTE verfügen. Unabhängig davon können Informationen über die realen Beziehungen und Wechselwirkungen zwischen Maschinen und/oder Maschinenkomponenten die FELDSTRUKTUR anreichern, indem neben raumbezogenen (topologischen) Informationen bspw. auch Informationen über die physikalischen Eigenschaften der Kopplungsbeziehungen oder über Zusammenhänge aus Kommunikationsnetzwerken in die FELDSTRUKTUR aufgenommen werden.

Die Kritik am FELDMANAGEMENTSYSTEM betrifft zum einen das Fehlen qualifizierter, an die Aktivitäten des FELDPROZESSES anknüpfender Werkzeuge zum Aufbau und zur Nutzung von FELDMODELLEN und zum anderen speziell die Funktionalität der FELDMANAGEMENT-PLATTFORM. Diesbezüglich erscheinen unter anderem Funktionen (1) zur Umsetzung von Interaktionsmustern wie Publish/Subscribe und (2) zur leistungsfähigen, durch Algorithmen unterstützten Navigation innerhalb der FELDSTRUKTUR sinnvoll. Letzteres ist vor allem deshalb von Bedeutung, da die FELDSTRUKTUR den Eindruck eines zentralen Knotenpunkts vermittelt, der sämtliche Strukturinformationen umfasst. Es sind jedoch auch mehrere, dezentrale, hersteller- und betreibernahe Plattformen vorstellbar, die miteinander gekoppelt über Teile der FELDSTRUKTUR verfügen. Maschinenbetreibern erschließt sich dadurch die Möglichkeit, zum Zweck der Produktionsplanung und -optimierung eigene, dezentrale SUB-FELDSTRUKTUREN, unter Einbindung von FELDOBJEKTEN anderer SUB-FELDSTRUKTUREN, aufzubauen. Darüber hinaus ist das Thema Datensicherheit in dieser Dissertation unbeachtet geblieben, obwohl derlei Sicherheitsmechanismen ein elementarer Bestandteil der FELDMANAGEMENTPLATTFORM sein müssen. Diese können bspw. die Sichtbarkeit von

FELDOBJEKTEN und deren Verknüpfungsbeziehungen rollen- und rechtebasiert einschränken, um die Abfrage von Informationen gezielt zu steuern. Es stellt sich die Frage, ob Zulieferer auf Daten Zugriff haben sollen, wenn deren Produkte in diversen Maschinen verbaut sind. Diese Frage kann an dieser Stelle jedoch nicht pauschal beantwortet oder abschließend geklärt werden.

Nicht zuletzt ist auch das in dieser Arbeit zur Validierung des FELDKONZEPTS herangezogene fiktive Anwendungsszenario zu kritisieren, da es die Realität nur unzureichend abdeckt. Das Validierungsergebnis ist dadurch nur begrenzt (im fiktiven Rahmen) aussagefähig. Es braucht Anwendungsfälle im Industriemaßstab, die dazu geeignet sind, die in einem FELDMODELL integrierten, gemeinsam strukturierten Produkt- und Maschinendaten zu analysieren – das FELDKONZEPT muss sich an der Realität messen können!

Quellenverzeichnis

Abramovici, M.; **Krebs**, A.; **Lindner**, A. (2013). *Exploiting Service Data of Similar Product Items for the Development of Improved Product Generations by Using Smart Input Devices*. In: Abramovici, M.; Stark, R. (Hrsg.). Smart Product Engineering. Proceedings of the 23rd CIRP Design Conference. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag. SS. 357-366.

Abramovici, M.; **Savarino**, P.; **Göbel**, J. C.; **Adwernat**, S.; **Gebus**, P. (2018). *Systematization of Virtual Product Twin Models in the Context of Smart Product Reconfiguration during the Product Use Phase*. In: Proceedings of the 25th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference (Procedia CIRP 69). Kopenhagen. Dänemark. SS. 734-739

Abts, D.; **Mülder**, W. (2017). *Grundkurs Wirtschaftsinformatik*. *Eine kompakte und praxisorientierte Einführung.* 9. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg

ADAMOS GmbH (2019). *ADAMOS*. Online: www.adamos.com [abgefragt am 12.08.2019]

Ahrens, K. (2017). *Hacker greifen Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt an*. Online: www.ingenieur.de/technik/wirtschaft/verbraucherschutz/hacker-greifen-deutsches-zentrum-fuer-luft-raumfahrt-an [abgefragt am 29.07.2019]

Alfred Kärcher Vertriebs-GmbH (Kärcher) (2019). *Kärcher Fleet*. Online: www.kaercher-center-pfaeffle.de/de/fleet [abgefragt am 18.07.2019]

Arndt, St. (2019). *Systematisierung digitaler Geschäftsmodellinnovationen für Maschinenbauunternehmen* [Masterthesis]. Linz: Middlesex University / KMU Akademie

Arndt, St.; **Klement**, S.; **Saske**, B.; **Stelzer**, R. (2018). *Machine Operation Research – Product and Machine Data Integration*. In: Scientific Technical Union of Mechanical Engineering "Industry 4.0“ (Hrsg.). Proceedings of the 3th International Scientific Conference Summer Session "Industry 4.0“. International Scientific Journal 3(2). SS. 58-61. Warna. Bulgarien

Arndt, St. (2017). *Realisierung eines Referenzintegrationsdatenmodells für Sensoren im Kontext von Industrial Internet of Things* [Diplomarbeit]. Wismar: Hochschule Wismar

Arndt, St.; **Saske**, B.; **Stelzer**, R. (2016). *Management von Produktinformationen aus Entwicklungs- und Betriebsphase*. In: Stelzer, R. (Hrsg.). Entwerfen Entwickeln Erleben 2016. Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik. Dresden: TUDpress. SS. 623-633

Arndt, St.; **Steger**, W.; **Stelzer**, R. (2015). *Visualisierung von Engineering- und Prozessinformationen technischer Anlagen*. In: Brökel, K. et al. (Hrsg.). Tagungsband zum 13. Gemeinsamem Kolloquium Konstruktionstechnik (KT 2015). Produktentwicklung zur Qualitätssicherung. Clausthal. SS. 179-186

Arnold, V.; **Dettmering**, H.; **Engel**, T.; **Karcher**, A. (2011). *Product Lifecycle Management beherrschen*. *Ein Anwenderhandbuch für den Mittelstand.* 2. Auflage, Dordrecht: Springer Verlag

Autodesk Inc. (Autodesk) (2019). *PROCESS ANALYSIS 360*. Online: www.archiexpo.de/prod/autodesk/product-1773-1611909 [abgefragt am 11.10.2019]

Banerjee, A.; **Dalal**, R.; **Mittal**, S.; **Pande Joshi**, K. (2017). *Generating Digital Twin models using Knowledge Graphs for Industrial Production Lines*. In: Association for Computing Machinery (Hrsg.). Proceedings of the 9th International ACM Web Science Conference (WebSci) 2017. New York, USA. SS. 734-739

Beitz, W. (1994). *Design Science – The Need for a Scientific Basis for Engineering Design Methodology*. In: Journal of Engineering Design 5(2). SS. 129-133

Ben Khedher, A.; **Henry**, S.; **Bouras**, A. (2011). *Integration between MES and Product Lifecycle Management*. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.). Proceedings of the 2011 IEEE 16th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2011). Toulouse, Frankreich. SS. 1-8

Bertsche, B.; **Marwitz**, H.; **Ihle**, H.; **Frank**, R. (1998). *Entwicklung zuverlässiger Produkte*. In: Konstruktion 50 50(4), SS. 41-44.

Bök, P.-B.; **Noack**, A.; **Müller**, M.; **Behnke**, D. (2020). *Computernetze und Internet of Things*. *Technische Grundlagen und Spezialwissen.* Wiesbaden: Springer Vieweg

Bommisetty, S. (2011). *PLM - Highlevel Overview*. Online: saibommisetty.blogspot.com/2011/09/plm-highlevel-overview.html [abgefragt am 28.09.2018]

Bruno, G.; **Faveto**, A.; **Traini**, E. (2020). *An Open Source Framework for the Storage and Reuse of Industrial Knowledge through the Integration of PLM and MES*. In: Management and Production Engineering Review 2. SS. 62-73

Bryzek, J. (2013). *Roadmap for the Trillion Sensor Universe*. Online: **https://de.slideshare.net/LappleApple/t-sensors** [abgefragt am 08.05.2018]

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2015). *Industrie 4.0*. *Volks- und betriebswirtschaftliche Faktoren für den Standort Deutschland. Eine Studie im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm AUTONOMIK für Industrie 4.0.* Berlin

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2016). *Smart Data - Innovationen aus Daten*. *Ein Technologieprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Ergebnisbroschüre.* Berlin.

Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (BITKOM) (2016). *Industrie 4.0*. *Status und Perspektiven*. Berlin

Bundesministerium der Verteidigung (BMVg) (2016). *Militärische Luftfahrtstrategie*. Berlin

Burchardt, C. (2013). *High Definition Product Lifecycle Management an Immersive Decision Making Environment*. In: Abramovici, M.; Stark, R. (Hrsg.). Smart Product Engineering. Proceedings of the 23rd CIRP Design Conference. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag. SS. 61-70

Cai, Y.; **Starly**, B.; **Cohen**, P.; **Lee**, Y.-S. (2017). *Sensor Data and Information Fusion to Construct Digital-twins Virtual Machine Tools for Cyber-physical Manufacturing*. In: Proceedings of the 45th SME North American Manufacturing Research Conference (NAMRC). Procedia Manufacturing 10. SS. 1031-1042

Conrad, S. (1997). *Föderierte Datenbanksysteme*. *Konzepte der Datenintegration.* Berlin, Heidelberg: Springer Verlag

Conrad, S.; **Hasselbring**, W.; **Koschel**, A.; **Tritsch**, R. (2005). *Enterprise Application Integration*. *Grundlagen, Konzepte, Entwurfsmuster, Praxisbeispiele.* München, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag

Cropley, D. H.; **Cropley**, A. J. (2018). *Die Psychologie der organisationalen Innovation*. *Eine Einführung für Führungskräfte.* Wiesbaden: Springer Fachmedien

D'Antonio, G.; **Macheda**, L.; **Sauza Bedolla**, J.; **Chiabert**, P. (2017). *PLM-MES Integration to Support Industry 4.0*. In: Ríos, J. et al. (Hrsg.). Product Lifecycle Management and the Industry of the Future. Proceedings of the 14th IFIP WG 5.1 International Conference. Seville, Spanien. SS. 129-137

Daimler AG (Daimler) (2019). *Die neue Service-Innovation Mercedes-Benz Uptime. Effizienz ist die Summe der Details*. Flyer. Online: https://www.lueg.de/fileadmin/marken/mercedes_benz_nfz/service/mercedes-benz-uptime/downloads/flyer-mercedes-benz-uptime.pdf [abgefragt am 13.04.2018]

dictaJet Ingenieurgesellschaft mbH (2018). *Prozessorientierte Dokumentation für Industrie 4.0 (ProDok 4.0)*. Online: https://www.digivation.de/wp-content/uploads/2017/04/ProDok4_0.pdf [abgefragt am 06.12.2018]

Dietz, M.; **Pernul**, G. (2019). *Digital Twin: Empowering Enterprises Towards a System-of-Systems Approach*. In: Business & Information Systems Engineering 62(2). SS. 179-184

Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (2019). *DIN ISO 10007:2019. Qualitätsmanagement - Leitfaden für Konfigurationsmanagement*. Berlin: Beuth Verlag GmbH

Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (2014). *DIN EN ISO 10303:2014. Industrielle Automatisierungssysteme und Integration - Produktdatendarstellung und -austausch (STEP)*. Berlin: Beuth Verlag GmbH

Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (2012_1). *DIN 31051:2012. Grundlagen der Instandhaltung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH

Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (2012_2). *DIN EN/IEC 62507:2012. Anforderungen an Identifikationssysteme zur Unterstützung eines eindeutigen Informationsaustauschs*. Berlin: Beuth Verlag GmbH

Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (2009). *DIN EN ISO 14040:2009. Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH

Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (2005). *DIN EN 82045-2:2005. Dokumentenmanagement - Metadaten und Informationsreferenzmodelle*. Berlin: Beuth Verlag GmbH

Dispan, J.; **Schwarz-Kocher**, M. (2018). *Digitalisierung im Maschinenbau*. *Entwicklungstrends, Herausforderungen, Beschäftigungswirkungen, Gestaltungsfelder im Maschinen- und Anlagenbau.* Working Paper Forschungsförderung der Hans-Böckler-Stiftung (094)

Duden (2016_1). *Her-stel-ler, der*. *Definition Hersteller.* Online: https://www.duden.de/rechtschreibung/Hersteller [abgefragt am 04.11.2016]

Duden (2016_2). Da-ten-satz*, der*. *Definition Datensatz.* Online: https://www.duden.de/rechtschreibung/Datensatz [abgefragt am 04.11.2016]

Duden (2018). *Se-ri-en-num-mer, die*. *Definition Seriennummer.* Online: www.duden.de/Rechtschreibung/Seriennummer [abgefragt am 08.07.2017]

Dunkel, J.; **Eberhart**, A.; **Fischer**, S.; **Kleiner**, C.; **Koschel**, A. (2008). *Systemarchitekturen für Verteilte Anwendungen*. *Client-Server, Multi-Tier, SOA, Event-Driven Architectures, P2P, Grid, Web 2.0.* München: Hanser Verlag

Edler, A. (2001). *Nutzung von Felddaten in der qualitätsgetriebenen Produktentwicklung und im Service* [Dissertation]. Berlin: Technische Universität Berlin, Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme

egnite GmbH (2018). *Querx WLAN TH*. *WLAN Thermometer, Hygrometer und Datenlogger. WLAN Thermometer, Hygrometer und Datenlogger*. Online: sensors.egnite.de/netzwerksensoren-und-datenlogger/querx-produktuebersicht/querx-wlan-th/ [abgefragt am 24.11.2019]

Eigner, M. (2014). *Product Lifecycle Management (PLM)*. In: Eigner, M. et al. (Hrsg.), Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung. Berlin: Springer Vieweg. SS. 267-300

Eigner, M.; **Dickopf**, T.; **Apostolov**, H. (2019). *Interdisziplinäre Design Methodik*. In: Stelzer, R. (Hrsg.). Entwerfen Entwickeln Erleben in Produktentwicklung und Design 2019. Dresden: TUDpress. Band 2. SS. 415-435

Eigner, M.; **Stelzer**, R. (2009). *Product Lifecycle Management*. *Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management.* 2. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag

Fachverband VDMA Software und Digitalisierung (2018). *Quick Guide. Machine Learning im Maschinen- und Anlagenbau*. Frankfurt am Main

Feldhusen, J.; **Grote**, K.-H.; **Göpfert**, J.; **Tretow**, G. (2013). *Technische Systeme*. In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.), Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. SS. 237-279

Finkenzeller, K. (2015). *RFID-Handbuch*. *Grundlagen und praktische Anwendungen von Transpondern, kontaktlosen Chipkarten und NFC.* 7. Auflage, München: Hanser Verlag

Müller, P.; **Lindow**, K.; **Gregorzik**, S.; **Stark**, R. (2019). Smart Industrial Products. Smarte Produkte und ihr Einfluss auf Geschäftsmodelle, Zusammenarbeit, Portfolios und Infrastrukturen.

Freund, J.; **Rücker**, B. (2017). *Praxishandbuch BPMN*. *Mit Einführung in CMMN und DMN.* 5. Auflage. München: Hanser Verlag

Fuest, B.; **Hegmann**, G. (2015). *Die Angst der Airlines vor den Flugzeug-Hackern*. Online: www.welt.de/wirtschaft/article141007629/Die-Angst-der-Airlines-vor-den-Flugzeug-Hackern.html [abgefragt am 08.08.2019]

Gerhard, D. (2016). *Daten- und Informationsmanagement PDM/PLM*. In: Lindemann, U. (Hrsg.). Handbuch Produktentwicklung. München: Hanser Verlag. SS. 215-246

Gottwald, M. (2014). *Definition Interface*. Online: www.softselect.de/business-software-glossar/interface [abgefragt am 22.06.2020]

GS1 Germany GmbH (GS1) (2021). *GS1 General Specifications*. *The foundational GS1 standard that defines how identification keys, data attrinonobutes and barcodes must be used in business applications.*

Guo, W.; **Zheng**, Q.; **Zuo**, B.; **Shao**, H. (2014). *A Closed-loop PLM Model for Lifecycle Management of Complex Product*. In: Cha, J. et al. (Hrsg.). *Moving integrated product development to service clouds in the global economy*. *Proceedings of the 21st ISPE Inc. International Conference on Concurrent Engineering*. SS. 132-139. Peking, China

Hansen, H.R.; **Neumann**, G.; **Mendling**, J. (2015). *Wirtschaftsinformatik*. 11. Auflage. Berlin: De Gruyter Verlag

Haße, H.; **Li**, B.; **Weißenberg**, N.; **Cirullies**, J.; **Otto**, B. (2019). *Digital Twin for Real-Time Data Processing in Logistics*. In: Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL) 27. Berlin: epubli. SS. 4-28

Hegmann, G. (2018). *Der erbitterte Streit um das Gedächtnis von Flugzeugen*. Online: www.welt.de/wirtschaft/article179728238/Luftfahrt-Der-erbitterte-Streit-um-das-Gedaechtnis-von-Flugzeugen.html [abgefragt am 06.08.2019]

Heidel, R.; **Hoffmeister**, M.; **Hankel**, M.; **Döbrich**, U. (2017). *Industrie 4.0*. *Basiswissen RAMI4.0.* Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.). 1. Auflage. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag

Heinrich, B.; **Linke**, P.; **Glöckler**, M. (2020). *Grundlagen Automatisierung*. *Erfassen – Steuern – Regeln.* 3. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg

Hesse, S.; **Schnell**, G. (2014). *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation*. *Funktion - Ausführung - Anwendung.* 6. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg

Hevner, A. R. (2007). *A Three Cycle View of Design Science Research*. In: Scandinavian Journal of Information Systems 19(2). SS. 87-92

Hevner, A. R.; **March**, S. T.; **Jinsoo**, P.; **Ram**, S. (2004). *Design Science in information systems research*. In: Management Information Systems Quarterly 28(1). SS. 75-105

HIDRALMAC Europe GmbH (2015). *Doppelständerpresse von HIDRALMAC*. Online: www.hidralmac.eu/hidralmac-produkte/doppelstaenderpressen [abgefragt am 01.03.2019]

Hippenmeyer, H.; **Moosmann**, T. (2016). *Automatische Identifikation für Industrie 4.0*. Berlin: Springer Vieweg

Homburg, C. (2017). *Marketingmanagement. Strategie - Instrumente - Umsetzung - Unternehmensführung.* 6. Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler

Hornung, G.; **Lurtz**, H. (2019). *Cyber-physische Systeme zwischen rechtlichen Anforderungen und rechtskonformer Gestaltung*. In: Obermaier, R. (Hrsg.). Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation. Betriebswirtschaftliche, technische und rechtliche Herausforderungen. Wiesbaden: Springer Gabler. SS. 113-136

Institut für Innovation und Technik (iit) (2017). *Eigenschaften und Erfolgsfaktoren digitaler Plattformen. Eine Studie im Rahmen der Begleitforschung des Technologieprogramms AUTONOMIK für Industrie 4.0 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie*. Berlin

Isermann, R. (2008). *Mechatronische Systeme. Grundlagen.* Berlin, Heidelberg: Springer Verlag

Internationale Organisation für Normung (ISO) (2017). *ISO/TS 29002-5:2017. Industrial automation systems and integration – Exchange of characteristic data*. Berlin: Beuth Verlag GmbH

Internationale Organisation für Normung (ISO) (2015). *ISO/IEC EN (IEC) 11179:2015. Information technology - Metadata registries (MDR)*. Berlin: Beuth Verlag GmbH

Internationale Organisation für Normung (ISO) (2007). *ISO 15926:2007. Industrial automation systems and integration. Integration of life-cycle data for process plants including oil and gas production facilities.* Berlin: Beuth Verlag GmbH

it's OWL Clustermanagement GmbH (2019). *it‘s OWL*. Online: www.its-owl.de [abgefragt am 20.08.2020]

Jaekel, M. (2017). *Die Macht der digitalen Plattformen. Wegweiser im Zeitalter einer expandierenden Digitalsphäre und künstlicher Intelligenz.* Wiesbaden: Springer Vieweg

Jun, H.-B.; **Kiritsis**, D.; **Xirouchakis**, P. (2007). *Research issues on closed-loop PLM*. In: Computers in Industry 58(8-9). SS. 855-868

KAESER KOMPRESSOREN SE (KAESER) (2019). *Betreibermodell: SIGMA AIR UTILITY*. Online: www.kaeser.de/produkte/betreibermodell-sigma-air-utility [abgefragt am 01.11.2019]

Kaul, T.; **Hentze**, J.; **Sextro**, W.; **Gräßler**, I. (2019). *Integration von Verlässlichkeitsmodellen der Entwicklung in einen Digitalen Zwilling zur Umsetzung einer vorausschauenden Instandhaltung*. In: Bertram, T. et al. (Hrsg.). Tagungsband zur Fachtagung Mechatronik 2019. Paderborn. SS. 19-24

Kehl, S. (2018). *Marken- und domänenübergreifendes Management industrieller Produktdaten*. Wiesbaden: Springer Gabler

Kiritsis, D. (2011). *Closed-loop PLM for intelligent products in the era of the Internet of things*. In: Computer-Aided Design 43(5). SS. 479-501

Klement, B.; **Saske**, B.; **Arndt**, St.; **Stelzer**, R. (2019). *Das Analysekompetenz-Marktpriorität-Portfolio zum Vergleich von Datenanalyseprojekten in der Produktentwicklung*. In: Stelzer, R. (Hrsg.). Entwerfen Entwickeln Erleben in Produktentwicklung und Design 2019. Dresden: TUDpress. Band 2. SS. 375-392

Klement, S.; **Saske**, B.; **Arndt**, St.; **Stelzer**, R. (2018). *Prozessmodell für Datenanalysen in der Produktentwicklung*. In: Brökel, K. et al. (Hrsg.). Tagungsband zum 16. Gemeinsamem Kolloquium Konstruktionstechnik (KT 2018). Digitalisierung und Produktentwicklung vernetzter Entwicklungsumgebungen. Bayreuth. SS. 168-179

Kletti, J. (2007). *Manufacturing Execution Systems – MES*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag

Kling, B. (2015). *Verbraucherzentrale: Windows 10 macht Nutzerdaten zur Ware*. Online: www.zdnet.de/88243654/verbraucherzentrale-windows-10-macht-nutzerdaten-zur-ware [abgefragt am 02.06.2018]

Klingauf, U.; **Anger**, C.; **Kählert**, A. (2017). *Prädiktive Instandhaltung in der Luftfahrt*. In: Ingenieurspiegel 1. SS. 22-23

Klostermeier, R.; **Haag**, S.; **Benlian**, A. (2020). *Geschäftsmodelle digitaler Zwillinge*. Wiesbaden: Springer Vieweg

Kohn, A. (2013). *Entwicklung einer Wissensbasis für die Arbeit mit Produktmodellen* [Dissertation]. München: Technische Universität München

Kosanke, K. (2006). *ISO Standards for Interoperability: a Comparison*. In: Konstantas, D. et al. (Hrsg.). Interoperability of Enterprise Software and Applications. London, Großbritannien: Springer-Verlag London. SS. 55-64

Kramer-Wolf, T. (2018). *Industrie 4.0 und industrielles Internet von der praktischen Seite*. In: Automatisierung Industrielle Bildverarbeitung. Future Manufacturing (11). Frankfurt am Main: VDMA Verlag GmbH. SS. 12-13

Krcmar, H. (2015). *Informationsmanagement*. 6. Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler

Kühnl, C. (2018). *Plattformen schaffen Mehrwert. Zahlen, Daten, Fakten.* In: Automatisierung Industrielle Bildverarbeitung. Future Manufacturing (11). Frankfurt am Main: VDMA Verlag GmbH. S. 2

Kurbel, K. (2016). *Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management in der Industrie: Von MRP bis Industrie 4.0*. 8. Auflage, München: De Gruyter Oldenbourg Verlag

Lachenmaier, J. F.; **Haußmann**, C.; **Kemper**, H.-G.; **Lasi**, H. (2019). *Entwicklung, Produktion und Einsatz von Industrie 4.0-Komponenten – Betriebswirtschaftliche Potenziale des digitalen Zwillings in der Produktion*. In: Obermaier, R. (Hrsg.), Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation. Betriebswirtschaftliche, technische und rechtliche Herausforderungen. Wiesbaden: Springer Gabler. SS. 317-337

Lee, B.-E.; **Suh**, S.-H. (2009). *An architecture for ubiquitous product life cycle support system and its extension to machine tools with product data model*. In: The International Journal of Advanced Manufacturing 42. SS. 606-620

Leimeister, J. M. (2015). *Einführung in die Wirtschaftsinformatik*. 12. Auflage. Berlin: Springer Gabler

Leimeister, J. M. (2020). *Dienstleistungsengineering und -management. Data-driven Service Innovation.* 2. Auflage. Berlin: Springer Gabler

Lindemann, U. (2009). *Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden.* 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag

Loos, P. (1996). *Geschäftsprozeßadäquate Informationssystemadaption durch generische Strukturen*. In: Vossen, G.; Becker, J. (Hrsg.), Geschäftsprozeßmodellierung und Workflow-Management. Modelle, Methoden, Werkzeuge. Bonn: International Thomson Publishing; Thomson, Bonn, SS. 163-175

Madushela, N.; **Mbohwa**, C.; **Akinlabi**, E. T. (2016). *Data Validation in Life Cycle Assessment: A Review*. In: Ao, S.-I. et al. (Hrsg.). Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science (WCECS) 2016. San Francisco, USA. SS. 408-424.

Mathes, C. A. (2016). *Big Data Has Unique Needs For Information Governance And Data Quality*. In: Journal of Management Science and Business Intelligence (JMSBI) 1(1). SS. 12-20

Mertens, P. (2013). *Integrierte Informationsverarbeitung 1. Operative Systeme in der Industrie.* 18. Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler

MTConnect Instituts (2019). *MTConnect Standard*. Online: www.mtconnect.org/standard20181 [abgefragt am 08.02.2020]

Muggeo, C.; **Pfenning**, M. (2015). *Die Rolle von MBSE und PLM im Industrial Internet*. In: Schulze, S.-O. et al. (Hrsg.). Tag des Systems Engineering. Verteiltes Arbeiten mit ganzheitlicher Kontrolle. München: Hanser Verlag. SS. 279-287.

Nehrenberg, A.; **Mainusch**, J. (2019). *Was ist ein Konzept?* Online: www.kommitment.works/blogartikel/was-ist-ein-konzept/?L=0 [abgefragt am 16.06.2020]

Network Working Group (1998). *Uniform Resource Identifiers (URI). Generic Syntax. Generic Syntax*. Online: www.ietf.org/rfc/rfc2396.txt [abgefragt am Februar 2019]

Neuroth, H.; **Oßwald**, A.; **Scheffel**, R.; **Strathmann**, S.; **Huth**, K. (2010). *Eine kleine Enzyklopädie der digitalen Langzeitarchivierung. Erschienen im Rahmen des Projekts Network of Expertise in Long-Term Storage of Digital Resources (nestor): Kompetenznetzwerk Langzeitarchivierung und Langzeitverfügbarkeit digitaler Ressourcen für Deutschland.* Göttingen

Niemann, J. (2003). *Management des Produktlebenslaufs*. In: Bullinger, H.-J. et al. (Hrsg.). Neue Organisationsformen im Unternehmen. Ein Handbuch für das moderne Management. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag. SS. 813-923

Object Management Group (OMG) (2011). *Business Process Model and Notation (BPMN)*. Version 2.0. OMG Document Number: formal/2011-01-03

OPC Foundation (2017). *OPC Unified Architecture. Part 4: Services. OPC UA Document Number: OPC 10000-4*

Pahl, G.; **Beitz**, W. (1993). *Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung.* 3. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag

Paul, G. et al. (1995). *Produktdatenverwaltungssysteme - Methoden und Werkzeuge zur Unternehmensintegration*. In: CIM-Management 11(4). München: Oldenbourg Verlag

Peffers, K.; **Tuunanen**, T.; **Rothenberger**, M. A.; **Chatterjee**, S. (2007). *A Design Science Research Methodology for Information Systems Research*. In: Journal of Management Information Systems 24(3). SS. 45-77

Peschke, F. (2017). *Product Lifecycle Management (PLM)*. München: Hanser Verlag

Pfeffer, J.; **Graube**, M.; **Reipschläger**, P.; **Arndt**, S. G.; **Urbas**, L.; **Dachselt**, R.; **Stelzer**, R. (2015). *Towards Collaborative Plant Control using a Distributed Information and Interaction Space*. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.). Proceedings of the 2015 IEEE 20th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA). SS. 1-4. Luxemburg, Luxemburg

Plattform Industrie 4.0 (2018_1). *Welche Kriterien müssen Industrie-4.0-Produkte erfüllen? Leitfaden 2018.*

Plattform Industrie 4.0 (2018_2). *Sichere Implementierung von OPC UA für Betreiber, Integratoren und Hersteller. Diskussionspapier.*

Plattform Industrie 4.0 (2016). *Struktur der Verwaltungsschale. Fortentwicklung des Referenzmodells für die Industrie 4.0-Komponente.*

Plattform Industrie 4.0 (2015). *Umsetzungsstrategie Industrie 4.0. Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0.*

proALPHA Business Solutions GmbH (proALPHA) (2019). *Produktiver Fertigen dank Echtzeitdaten*. Online: https://www.it-auswahl.de/Neues-aus-der-Branche/News/Details/1872/Produktiver-Fertigen-dank-Echtzeitdaten [abgefragt am 02.11.2019]

Produkthaftungsgesetz (ProdHaftG) (1989). *Gesetz über die Haftung für fehlerhafte Produkte.*

Quality Services und Wissen GmbH (QSW) (2019). *Maschinendatenerfassung*. Online: www.quality.de/lexikon/mde [abgefragt am 01.10.2019]

Reidt, A.; **Duchon**, M.; **Krcmar**, H. (2017). *Erstellung einer Referenzarchitektur anhand von individuellen Unternehmensanforderungen*. In: Bullinger-Hoffmann, A. C. (Hrsg.). Abschlussveröffentlichung. S-CPS: Ressourcen-Cockpit für Sozio-Cyber-Physische Systeme. Band 1. Verlag aw&I – Wissenschaft und Praxis. Chemnitz. SS. 23-42

Reidt, A.; **Pfaff**, M.; **Krcmar**, H. (2018). *Der Referenzarchitekturbegriff im Wandel der Zeit*. In: HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik 55. SS. 893-906

Reinhart, G. (2017). *Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik.* München: Hanser Verlag

Reinsel, D.; **Gantz**, J.; **Rydning**, J. (2018). *The Digitization of the World. From Edge to World.* IDC White Paper #US44413318

Romero, A.; **Vieira**, D. R. (2014). *Using the Product Lifecycle Management Systems to Improve Maintenance, Repair and Overhaul Practices. The Case of Aeronautical Industry.* In: Fukuda, S. et al. (Hrsg.). Product Lifecycle Management for a Global Market. Proceedings of the *11th IFIP WG 5.1 International Conference*. PLM 2014. Yokohama, Japan. SS. 159-168

Rosemann, M. (1996). *Komplexitätsmanagement in Prozeßmodellen. Methodenspezifische Gestaltungsempfehlungen für die Informationsmodellierung.* Wiesbaden: Gabler Verlag

Rossak, I.; **Filbry**, T. (2013). *Datenintegration. Integrationsansätze, Beispielszenarien, Problemlösungen, Talend Open Studio.* München: Hanser Verlag

Rouse, M. (2017). *Maschinendaten*. Online: www.computerweekly.com/de/definition/Maschinendaten [abgefragt am 01.10.2019]

Russom, P. (2007). *BI Search and Text Analytics: New Additions to the BI Technology Stack*. Online: www.tdwi.org/articles/2007/05/09-what-works/bi-search-and-text-analytics [abgefragt am 17.11.2017]

Rützel, S. (2009). Heute genutzte Datenlinks. In: Teege, G. et al. (Hrsg.). *Militärische Kommunikationstechnik*. Norderstedt: Books on Demand

Saracco, R. (2019). *Digital Twins: Bridging Physical Space and Cyberspace*. In: Computer 52(12). SS. 58-64

Schiersmann, C.; **Thiel**, H.-U. (2018). *Organisationsentwicklung. Prinzipien und Strategien von Veränderungsprozessen.* 5. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien

Schmitt, R.; **Pfeifer**, T. (2015). *Qualitätsmanagement. Strategien - Methoden - Techniken.* 5. Auflage. München: Hanser Verlag

Schneider, H.-J. (1997). *Lexikon Informatik und Datenverarbeitung*. 4. Auflage. Oldenbourg Wiss.-Verlag

Schroeder, G. N.; **Steinmetz**, C.; **Pereira**, C. E.; **Espindola**, D. B. (2016). *Digital Twin Data Modeling with AutomationML and a Communication Methodology for Data Exchange*. In: IFAC-PapersOnLine 49(30). SS. 12-17

Schuh, G.; **Kreutzer**, R.; **Sondermanns**, M. (2018). *Utility Potentials of Cyber-Physical Systems´ Field Data*. In: International Journal of Engineering Research and Development 14(1). SS. 24-71

Schwickert, A. C.; **Fischer**, K. (1996). *Der Geschäftsprozeß als formaler Prozeß*. *Definition, Eigenschaften, Arten.* Arbeitspapier am Lehrstuhl für Allgemeine BWL und Wirtschaftsinformatik (4)

Schwips, S. (2015). *Programmierung in Hochsprache STX nach IEC-61131-3*. Online: www.jetter.de/fileadmin/benutzerdaten/jetter-de/pdf/fachartikel_jetter_ag_hochsprache_stx.pdf [abgefragt am 08.08.2019]

Seitz, M. (2015). *Speicherprogrammierbare Steuerungen für die Fabrik und Prozessautomation*. *Strukturierte und objektorientierte SPS-Programmierung, Motion Control, Sicherheit, vertikale Integration.* 4. Auflage. München: Hanser Verlag

Semantische Allianz für Industrie 4.0 (SemAnz40) (2017). *Semantik für Industrie 4.0-Systeme*. *Die Basis für den Informationsaustausch in Industrie 4.0-Anwendungsszenarien.* Institut für Automatisierungstechnik Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg (Hrsg.). Hamburg

Siemens AG (Siemens) (2020). *MindSphere*. The industrial IoT as a service solution. Broschüre. Online: https://siemens.mindsphere.io/content/dam/mindsphere/partners/overview/MindSphere_Brochure.pdf [abgefragt am 03.010.2020]

Siemens AG (Siemens) (2019). *MindSphere*. Online: new.siemens.com/global/de/produkte/software/mindsphere.html [abgefragt am 23.06.2019]

Siepermann, M. (2018). *Konzeptionelles Datenmodell*. Online: wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/konzeptionelles-datenmodell-40932 [abgefragt am 11.01.2020]

Signavio GmbH (2014). *Die 5 Kategorien der Modellierungsrichtlinien*. Online: www.modeling-guidelines.org/de [abgefragt am 19.02.2019]

Simon, H. A. (1996). *The Science of the Artificial*. 3. Auflage. Massachusetts, USA: MIT Press

Sinsel, A. (2020). *Das Internet der Dinge in der Produktion*. *Smart Manufacturing für Anwender und Lösungsanbieter.* Springer Vieweg, Berlin

SoftSelect GmbH (SoftSelect) (2014). *Definition und Erklärung Interface*. Online: www.softselect.de/business-software-glossar/interface [abgefragt am 25.05.2020]

Spath, D.; **Dangelmaier**, M. (2016). *Produktentwicklung Quo Vadis*. In: Lindemann, U. (Hrsg.), *Handbuch Produktentwicklung*. München: Hanser Verlag. SS. 3-7

Spath, D.; **Schuster**, E.; **Gudszend**, T. (2004). *Betreibermodelle als neue Geschäftsmodelle*. In: Spath, D.; Bullinger, H.-J. (Hrsg.), Forschungs- und Technologiemanagement. Potenziale nutzen - Zukunft gestalten; [Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Hans-Jörg Bullinger]. München: Hanser Verlag, SS. 309-314

Stachowiak, H. (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. Wien, New York: Springer Verlag

Stark, J. (2016). *Product Lifecycle Management (Volume 2)*. *The Devil is in the Details.* 3. Auflage. Cham: Springer Verlag

Stark, J. (2015). *Product Lifecycle Management (Volume 1)*. *21st Century Paradigm for Product Realisation.* 3. Auflage. Cham: Springer International Publishing

Stark, R.; **Grosser**, H.; **Beckmann-Dobrev**, B.; **Kind**, S. (2014). *Advanced Technologies in Life Cycle Engineering*. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Through-life Engineering Services (Procedia CIRP 22). SS. 3-14

Stefan, C. (2002). *Integration heterogener Datenbestände*. In: *Jahrbuch der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf 2002*. Düsseldorf, SS. 189-202

Steiner, R. (2017). *Grundkurs Relationale Datenbanken*. *Einführung in die Praxis der Datenbankentwicklung für Ausbildung, Studium und IT-Beruf.* 9. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg

Stich, V.; **Hicking**, J. (2019). *Smartifizierung von Maschinenbauprodukten mittels einer zielorientierten Methode*. In: HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik 56. SS. 542-556

Stobitzer, C. (2017). *Entity-Relationship-Modell*. Online: www.datenbank-grundlagen.de/entity-relationship-modell.html [abgefragt am 12.12.2019]

Strickmann, J. (2008). *Analysemethoden zur Bewertung von Entwicklungsprojekten*. *Ein integriertes semantisches Modell von Projekt- und Produktdaten zur Bewertung der Entwicklungsleistung im Projektcontrolling.* Berlin: GITO-Verlag

Stürmlinger, T.; **Gladysz**, B.; **Strauch**, M.; **Albers**, A. (2018). *Design with Industry 4.0 - Priorization of Sensor Data for a Smart Data Driven Product Development Process*. In: Horváth, I. et al. (Hrsg.). Tools and methods of competitive engineering. In: Proceedings of the 12th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering (TMCE 2018). Las Palmas de Gran Canaria, Spanien. SS. 439-450

Sun, X.; **Bao**, J.; **Li**, J.; **Zhang**, Y.; **Liu**, S.; **Zhou**, B. (2020). *A digital twin-driven approach for the assembly-commissioning of high precision products*. In: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 61(101839).

Suter, A.; **Vorbach**, S.; **Wild-Weitlaner**, D. (2019). *Die Wertschöpfungsmaschine*. *Prozesse und Organisation aus der Strategie ableiten.* 2. Auflage. München: Hanser Verlag

Tao, F.; **Zhang**, M.; **Nee**, A. (2019). *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*. London: Academic Press

Thomas, O. (2006). *Das Referenzmodellverständnis in der Wirtschaftsinformatik*. *Historie, Literaturanalyse und Begriffsexplikation.* In: Veröffentlichungen des Instituts für Wirtschaftsinformatik im Deutschen Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (187). Saarbrücken

Traeger Industry Components GmbH (2018). *OPC UA Client + Server Development. OPC UA SDK.NET*. Online: https://docs.traeger.de/de/software/sdk/opc-ua/net#download [abgefragt am 17.09.2020]

Tränkler, H.-R. (2014). *Einführung in die Sensortechnik*. In: Tränkler, H.-R.; Reindl, L. M. (Hrsg.), Sensortechnik. Handbuch für Praxis und Wissenschaft. 2. Auflage. Berlin: Springer Vieweg. SS. 3-20

T-Systems International GmbH (T-Systems) (2019). *Industrie 4.0 für KAESER KOMPRESSOREN*. *Mit End-to-End-Lösung zum innovativen Geschäftsmodell. Mit End-to-End-Lösung zum innovativen Geschäftsmodell*. Online: www.t-systems.com/de/de/referenzen/digital/industrie-4-0-kaeser [abgefragt am 11.11.2019]

T-Systems International GmbH (T-Systems) (2018). *Digitalisierung. Konkret! Für mich. Für alle. Für gemeinsamen Fortschritt.* Online: https://www.t-systems.com/blob/864404/656be3936da00635661876a40404f7d3/DL_UseCases_Digitalisierung.pdf [abgefragt am 12.02.2018]

T-Systems International GmbH (T-Systems) (2016). *KAESER KOMPRESSOREN SE setzt auf Industrie 4.0*. *„Druckluft as a Service“ als neues, atmendes Geschäftsmodell mit höchster Ausfallsicherheit dank Predictive Maintenance.* Flyer. Online: https://www.t-systems.com/resource/blob/55642/ 0c58117912be363cdb82aeadadfbb573/DL-Flyer-KAESER-KOMPRESSOREN-SE-t-systems-de-09-2019.pdf [abgefragt am 12.02.2018]

Ulrich, H. (1981). *Die Betriebswirtschaftslehre als anwendungsorientierte Sozialwissenschaft*. In: Sandig, C. et al. (Hrsg.). Die Führung des Betriebes. Herrn Professor Dr. Dr. h.c. Curt Sandig zu seinem 80. Geburtstag gewidmet. Stuttgart: Poeschel Verlag. SS. 1-25

Ulrich, P.; **Hill**, W. (1976). *Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre.* In: Wirtschaftswissenschaftliches Studium: Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt 5 (7-8). SS. 304-309

Vaishnavi, V.; **Kuechler**, B. (2008). Design science research methods and patterns. Innovating information and communication technology. New York, USA: Auerbach Publications

Verein Deutscher Ingenieure e.V. (*VDI) (2016). VDI 2219:2016. Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung. Einführung und Betrieb von PDM-Systemen.* Berlin: Beuth Verlag GmbH

Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (2015). *Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnik in der Ingenieurarbeit der Zukunft.* VDI-Gesellschaft Produkt und Prozessgestaltung (VDI-GPP) (Hrsg.). Thesen und Handlungsfelder. Düsseldorf

VDI-Z Integrierte Produktion (2018). *Kann Industrie 4.0 an zu vielen Datenströmen und Schnittstellen scheitern?* Online: https://www.vdi-z.de/2018/Ausgabe-06/Sonderteil-Industrie-4.0/Kann-Industrie-4.0-an-zu-vielen-Datenstroemen-und-Schnittstellen-scheitern [Zuletzt geprüft am: 08.08.2019]

Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA) (2018). *OPC UA Companion Specifications für Robotik und Industrielle Bildverarbeitung veröffentlicht*. Online: industrie40.vdma.org/viewer/-/v2article/render/26418188 [abgefragt am 08.08.2019]

Vodafone GmbH (2019). *Narrowband-IoT nutzen: Das sind die Vorteile*. Online: www.vodafone.de/business/featured/digitales-business/digitale-geschaeftsprozesse/ [abgefragt am 01.09.2019]

Voet, H.; **Falk**, B.; **Schmitt**, R. H. (2017). *Neue Ansätze des Qualitätsmanagements in der Entwicklung von Smart Products*. In: Gesellschaft für Qualitätswissenschaften e.V. (Hrsg.) Heutige und zukünftige Herausforderungen an die Qualitätswissenschaft in Forschung und Praxis. Bericht zur GQW-Jahrestagung 2017 in Erlangen. Erlangen: FAU University Press. SS 3-26

Wang, Y.; **Wang**, X.; **Liu**, F. (2012). *Equipment quality information and its management during operation phase*. In: Huang, H.-Z. et al., Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.). The Proceedings of 2012 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (ICQR2MSE 2012). Chengdu, China. SS. 1418-1421

Wellsandt, S.; **Hribernik**, K.; **Thoben**, K.-D. (2015). *Sources and Characteristics of Information about Product Use*. In: Shpitalni, M. e. a. (Hrsg.). Proceedings of the CIRP 25th Design Conference Innovative Product Creation (Procedia CIRP 36). Haifa, Israel. SS. 242-247

Wiesner, S.; **Freitag**, M.; **Westphal**, I.; **Thoben**, K.-D. (2015). *Interactions between Service and Product Lifecycle Management*. *Industry Transformation for Sustainability and Business*. In: Proceedings of the 7th Industrial Product-Service Systems Conference (IPSS 2015) (Procedia CIRP 30). Saint-Etienne, Frankreich. SS. 36-41

wpd windmanager GmbH & Co. KG (wpd windmanager) (2019). *Leitwarte*. Online: www.windmanager.de [Zuletzt geprüft am: 06.08.2018]

Yoo, M.-J.; **Grozel**, C.; **Kiritsis**, D. (2016). *Closed-Loop Lifecycle Management of Service and Product in the Internet of Things: Semantic Framework for Knowledge Integration*. *Semantic Framework for Knowledge Integration*. In: Sensors 16(7)

Zafirov, R. (2014). *Modellbildung und Spezifikation*. In: Eigner, M. et al. (Hrsg.). Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung. Berlin: Springer Vieweg. SS. 77-96

Zehbold, C. (2018). *Product Lifecycle Management (PLM) im Kontext von Industrie 4.0*. In: Fend, L.; Hofmann, J. (Hrsg.). Digitalisierung in Industrie-, Handels- und Dienstleistungsunternehmen. Konzepte - Lösungen - Beispiele. Wiesbaden: Springer Gabler. SS. 69-90

ZIEHL-ABEGG SE (2017). *ZAwheel® Achsantriebsmodul*. *Die nächste Generation. Die nächste Generation*. Online: www.ziehl-abegg.com/de/de/produktwelten/automotive/ [abgefragt am 01.09.2019]

Zohm, F. (2004). *Management von Diskontinuitäten*. *Das Beispiel der Mechatronik in der Automobizulieferindustrie.* Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Definition des FO-FO-Attributs Typ 48

Tabelle 2: Zuordnung von Anwendungsfunktionen zu den System- bzw. IT-Elementen 91

Tabelle 3: Übersicht der für das Datenmodell verwendeten ERM-Elemente XX

Tabelle 4: Übersicht der für das FELDPROZESS-Modell verwendeten BPMN-Elemente XXI

Tabelle 5: Liste der betreuten Projekt- und Abschlussarbeiten XXV

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wachstumsprognosen der weltweiten Sensoranzahl 1
Abbildung 2: Vorgehensmodell für die Konzeptentwicklung nach dem Design-Science Paradigma 7
Abbildung 3: Forschungsprozess nach Ulrich (1981) und Gliederung der Arbeit 9
Abbildung 4: Produktlebenszyklusvarianten 10
Abbildung 5: Überdeckung von Produktlebensphasen 12
Abbildung 6: Beschreibung einer Produktionsanlage anhand unterschiedlicher Modelle 18
Abbildung 7: Dreischichtenmodell kontra Integrationsebenen 22
Abbildung 8: Systemarchitektur zur Datenintegration auf Präsentationsebene 24
Abbildung 9: Beispiel einer mit SCADA-Funktionen ausgestatten Windparkleitwarte der Firma wpd windmanager GmbH & Co. KG 24
Abbildung 10: Ausschnitt der Benutzeroberfläche der Kärcher Fleet-Plattform 25
Abbildung 11: Systemarchitektur zur Datenintegration auf Applikationsebene 26
Abbildung 12: Architektur der KAESER KOMPRESSOREN SE für das Angebot „Druckluft-as-a-Service* 27
Abbildung 13: Systemarchitektur zur Datenintegration auf Datenebene 28
Abbildung 14: Markierung des defekten Ventils im Teilprozess einer Versuchsanlage 30
Abbildung 15: Begriffssystems für das FELDKONZEPT 37
Abbildung 16: Die FELDSTRUKTUR als strukturelle Schnittstelle am Beispiel einer einfachen Maschinenkonfiguration 40
Abbildung 17: Beispiel einer FELDSTRUKTUR für ein Bearbeitungszentrum 41
Abbildung 18: Beispiel einer FELDSTRUKTUR für zwei Bearbeitungszentren einer Produktionsanlage 41
Abbildung 19: Beispiel für den Zusammenhang zwischen FELDSTRUKTUR und FELDMODELL 43
Abbildung 20: Das Basisdatenmodell der FELDMANAGEMENTPLATTFORM 46
Abbildung 21: Aufbau eines FELDMODELLS unter Einsatz des generischen FELDOBJEKT-Attributs *gen_FO-A* 47
Abbildung 22: Beispiel für den Aufbau einer FELDSTRUKTUR für Reinraumarbeitsplätze 50
Abbildung 23: Referenzierung von Produkt- und Maschinendaten durch INFORMATIONSRESSOURCEN 53
Abbildung 24: INFORMATIONSRESSOURCEN für die typgleichen Sensoren der Reinraumarbeitsplätze I und III 55
Abbildung 25: Die durchgängige Verwendung der Seriennummer 57

Abbildung 26: Das Prozessmodell für das FELDKONZEPT 61

Abbildung 27: Auszug aus dem FELDPROZESS-Modell:
Der Teilprozess I als BPMN-Flussdiagramm 63

Abbildung 28: Das erweiterte Basisdatenmodell für PDM 65

Abbildung 29: Achsantriebsmodul für Busse 67

Abbildung 30: Nutzung domänenspezifischer Modelle zur Ableitung von
Template-FELDOBJEKTEN 68

Abbildung 31: XML-Schema für Produkteigenschaften 73

Abbildung 32: XML-Dokumente für die Eigenschafts- und Parameterauswahl
eines Multisensors 74

Abbildung 33: Subprozess zum Aufbau bzw. zur Aktualisierung der FELDSTRUKTUR 77

Abbildung 34: Auszug aus dem FELDPROZESS-Modell:
Der Teilprozess II als BPMN-Flussdiagramm 79

Abbildung 35: Auszug aus dem FELDPROZESS -Modell:
Der Teilprozess III als BPMN-Flussdiagramm 84

Abbildung 36: Schema des FELDMANAGEMENTSYSTEMS 89

Abbildung 37: Verbindungen zwischen den Beteiligten im Anwendungsszenario 93

Abbildung 38: FELDSTRUKTUR für das Anwendungsszenario 95

Abbildung 39: Sub-FELDSTRUKTUR mit INFORMATIONSRESSOURCEN für das Anwendungsszenario .. 96

Abbildung 40: Realisierung einer prototypischen FELDMANAGEMENTPLATTFORM 98

Abbildung 41: Darstellung der FELDSTRUKTUR für das Anwendungsszenario in *Aras Innovator* 99

Abbildung 42: Umsetzung der Kommunikationsschnittstellen zwischen FELDMANAGEMENTPLATTFORM
und den hersteller- und betreibereigenen Informationssystemen 101

Abbildung 43: Adressraum des plattformeigenen *OPC UA*-Servers für das Anwendungs-
szenario - der INFORMATIONSRESSOURCE-Knoten für das FELDOBJEKT 1 102

Abbildung 44: Adressraum des plattformeigenen *OPC UA*-Servers für das Anwendungs-
szenario - der INFORMATIONSRESSOURCE-Knoten für das FELDOBJEKT 3 103

Abbildung 45: Ausschnitt aus dem Datenstrom vom
NIST Smart Manufacturing Systems Test Bed 104

Abbildung 46: Auswahl feldrelevanter Produktkomponenten, Produkteigenschaften und Maschinen-
parameter in *SolidWorks* sowie Speichern der Auswahl in *Aras Innovator* 105

Abbildung 47: Ausschnitt aus dem Produktinformationsmodell für den *OPC UA*-Server
auf Herstellerseite 106

Abbildung 48: Erweiterung der hersteller- und plattformeigenen Adressräume um Knoten
für die neu produzierte Fräsmaschine 108

Abbildung 49: Erweiterung der FELDSTRUKTUR um zusätzliche FELDOBJEKTE für die neu produzierte Fräsmaschine und deren zugeordnete Motorspindel 109

Abbildung 50: Aktualisierung der FELDSTRUKTUR aufgrund der Austauschreparatur der Motorspindel 110

Abbildung 51: FELDOBJEKT-Lebenszyklus in *Aras Innovator* 111

Abbildung 52: Graphische Benutzeroberfläche zur Definition von FELDMODELLEN 112

Abbildung 53: Auszug aus dem XML-Dokument des FELDMODELLS für den 4. Anwendungsfall ... 112

Abbildung 54: Erweiterte graphische Benutzeroberfläche zur Definition von FELDMODELLEN 113

Abbildung 55: Auszug aus dem XML-Dokument des FELDMODELLS für den 5. Anwendungsfall ... 114

Abbildung 56: Seriennummernschema nach IRDI (International Registration Data Identifier) XXIV

Anhang

A1 Übersicht der verwendeten Modellierungselemente I XX

A2 Übersicht der verwendeten Modellierungselemente II XXI

A3 Seriennummernschema nach IRDI XXIV

A4 Verzeichnis betreuter Projekt- und Abschlussarbeiten XXV

A 1 Übersicht der verwendeten Modellierungselemente I

Tabelle 3: Übersicht der für das Datenmodell verwendeten ERM-Elemente

Element	Symbol	Erläuterung nach Abts & Mülder (2017, SS. 164-166)
Entitätstyp		Ein Entitätstyp fasst gleichartigen Entitäten zusammen bzw. dient dazu, eine Entitätsmenge abzubilden. Eine Entität ist ein eindeutig bestimmtes, reales oder virtuelles, materielles oder immaterielles bzw. ein konkretes oder abstraktes Objekt eines Informationssystems, über das Informationen gespeichert werden. Jedes Datenmodell besteht aus einer begrenzten Anzahl und spezifischen Kombinationen von Entitäten.
Beziehungstyp		Gleichartige Beziehungen zwischen Entitätstypen werden als Beziehungstypen klassifiziert. Ein Beziehungstyp erlaubt es demzufolge, eine gleichartige Menge von Beziehungen (Zuordnungen oder Relationen) zwischen Entitäten abzubilden.
Kardinalität	ohne Symbol	Eine Kardinalität am Beziehungstyp gibt Aufschluss darüber, wie viele Entitäten des einen Entitätstyps mit genau einer Entität des anderen Entitätstyps in Beziehung stehen können. cm:cn gibt an, dass eine Entität mit keinem oder beliebig vielen Entitäten eines anderen Typs verknüpft sein kann und vice versa.
(allgemeines) Attribut		Attribute bilden die Eigenschaften von Entitäts- und Beziehungstypen im Datenmodell ab. Die konkreten Ausprägungen von Attributen werden Attributwerte genannt, die gemeinsam betrachtet den Attributwertebereich definieren. Grundsätzlich muss jeder Entitätstyp über ein Schlüsselattribut verfügen, welcher eine eindeutige Identifikation der zugrundeliegenden Entitäten ermöglicht. Schlüsselattribut für Beziehungstypen setzen sich aus den Schlüsselattributen der Entitäten zusammen.
generisches Attribut		Generische Attribute sind beim Datenbankaufbau in Anzahl und Typ unbekannt und werden für jede Entität individuell festgelegt (siehe die Beschreibung des FELDOBJEKT-Attributs *gen_FO-A* auf S. 46)

A 2 Übersicht der verwendeten Modellierungselemente II

Tabelle 4: Übersicht der für das FELDPROZESS-Modell verwendeten BPMN-Elemente

Element	Symbol	Erläuterung nach Freund & Rücker (2017)
Pool	Pool	Ein Pool ist ein Bereich und repräsentiert einen Aktor oder ein System. In einem Pool wird der dem Bereich zugehörige Sequenzfluss dargestellt.
Aktivität		Aktivitäten beschreiben Tätigkeiten zur Problemlösung, die aus mehreren elementaren Aufgaben bestehen kann.
Subprozess (kollabiert)		Ein Subprozess beschreibt einen detaillierten Ablauf einer komplexen Aktivität. Durch einen Subprozess können Verschachtelungen und Prozesshierarchien gebildet werden, ohne die Übersichtlichkeit eines Sequenzfluss zu stören.
Mehrfachaktivität in sequenzieller Bearbeitung		Eine Mehrfachaufgabe (eine Aktivität) wird in einer Schleife abgearbeitet, wobei die Instanzen der Mehrfachaufgabe sequenziell, d.h. einzeln aber ohne vorgegebene Reihenfolge bearbeitet werden.
Gateway		Gateways sind Entscheidungspunkte, um das Zusammenspiel von eingehenden und ausgehenden Prozesspfaden zu steuern.
Paralleles Gateway (AND)		Bei der Zusammenführung erfolgt die Prozessfortsetzung, wenn alle eingehenden Pfade eingetroffen sind. Bei der Verzweigung werden alle ausgehenden Pfade simultan aktiviert.
Inklusives Gateway (OR)		Bei der Zusammenführung erfolgt die Prozessfortsetzung, wenn alle eingehenden Pfade eingetroffen sind, deren jeweilige Eingangsbedingungen zutreffen. Ein oder mehrere Eingangspfade sind möglich. Bei der Verzweigung wird separat für jeden ausgehenden Pfad, anhand einer Ausgangsbedingung geprüft, ob dieser zu aktivieren ist. Ein oder mehrere Ausgangspfade sind möglich.

Exklusives Gateway (XOR)		Bei der Zusammenführung erfolgt die Prozessfortsetzung, wenn mindestens eingehender Pfad eintrifft, dessen Eingangsbedingung zutrifft. Bei der Verzweigung wird nur der ausgehende Pfad durchlaufen, dessen Ausgangsbedingung zuerst zutrifft.
Ereignis		Ereignisse treten im Laufe eines Prozesses auf und beeinflusst dessen Ablauf.
Allgemeines Startereignis		Das allgemeine Startereignis kennzeichnet den ersten Prozessschritt ohne nähere Angabe.
Allgemeines Endereignis		Das allgemeine Endereignis kennzeichnet den letzten Prozessschritt ohne nähere Angabe.
Nachricht als Startereignis		Eine Nachricht löst einen Prozess aus.
Ausgelöste Nachricht als Zwischenereignis		Eine Nachricht, die nach Abschluss einer Aktivität ausgelöst wird.
Empfangene Nachricht als Zwischenereignis		Eine Nachricht, die als Eingabe einer Aktivität empfangen wird.
Nachricht als Endereignis		Eine Nachricht beendet einen Prozess aus.
Bedingung als Zwischenereignis		Eine Aktivität wird durchgeführt bzw. aufgehalten, bis der Ausdruck Wahr ergibt. Das Ergebnis des Ausdrucks muss von Falsch auf Wahr wechseln, um das bedingte Ereignis auszulösen.
Artefakt		Artefakt werden benutzt, um Informationen zur Verfügung zu stellen.
Datenobjekt		Ein Datenobjekt stellt Informationen bereit, die eine Aktivität zur Ausführung benötigt und/oder produziert. Die Gültigkeit eines Datenobjekts ist auf die Dauer einer Prozessinstanz beschränkt.
Datenspeicher		Ein Datenspeicher ist eine Zusammenstellung persistenter Daten, die über die Dauer einer Prozessinstanz hinaus verfügbar sind.

Kante		Kanten sind gerichtete Beziehungen zwischen Prozess-elementen.
Sequenzfluss		Ein Sequenzfluss zeigt die Reihenfolge, in der Aktivitäten ausgeführt werden.
Nachrichtenfluss		Ein Nachrichtenfluss zeigt den Nachrichtenverlauf zwischen Teilnehmern, die sich in separaten Pools befinden und deren Prozesse Aktivitäten zum Senden und Empfangen enthalten.
Datenassoziation		Eine Datenassoziationen verbindet ein Datenobjekt mit einer Aktivität oder einem Ereignis.

A 3 Seriennummernschema nach IRDI

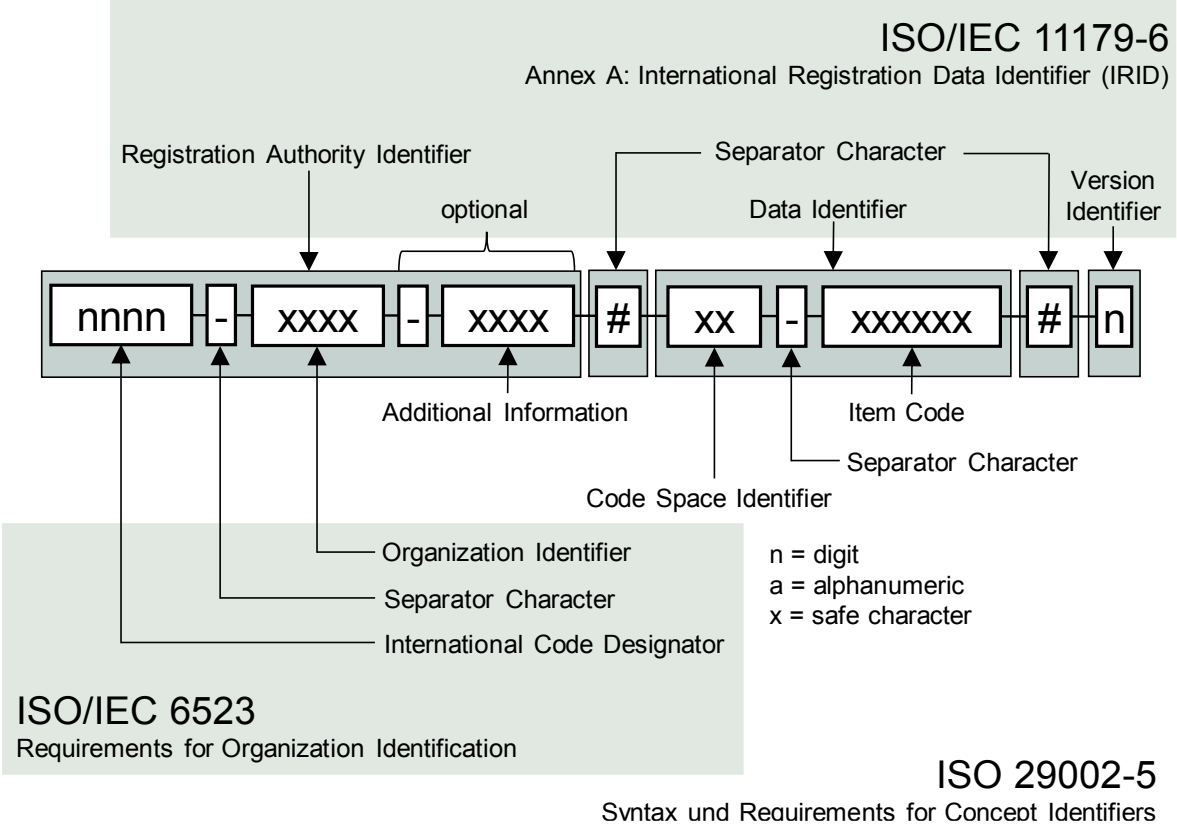


Abbildung 56: Seriennummernschema nach IRDI (International Registration Data Identifier) (Quelle: Heidel et al., 2017, S. 65)

A 4 Verzeichnis betreuter Projekt- und Abschlussarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD der Technischen Universität Dresden in den Jahren von 2014 bis 2019 unter fachlicher Begleitung des Autors die in Tabelle 5 aufgeführten studentischen Arbeiten. Entstandene Ergebnisse sind teilweise in das vorliegende Dokument eingeflossen. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Tabelle 5: Liste der betreuten Projekt- und Abschlussarbeiten

Jahr	Nachname der/des Studierenden	Art der Arbeit	Titel
2021	Hüttich	Projektarbeit	Entwicklung eines Fahrradanhängeraufbaus für den Transport von Lebensmitteln und Getränken
	Schubert	Diplomarbeit	Anpassung eines Rollenrosts als Kontroll- und Steuerungsinstrument bei der Pelletherstellung
2020	Eltz	Forschungsarbeit	Entwicklung eines Werkzeugs zur Maschinendatenprognose
	Conrad	Forschungsarbeit	Entwicklung eines generativ gefertigten Luftprobenentnahmemoduls für Passagierflugzeuge
	Werner	Forschungsarbeit	Entwicklung eines montageoptimierten Schweißbrennerhandgriffs mit integriertem Brennerhals
	Klaus	Projektarbeit	Konstruktion einer Befestigungsvorrichtung zur Montage einer Fingerkamera an eine medizinische Stirnlampe
	Haupt	Forschungsarbeit	Toleranzanalysen in 3D-CAD – Eine Untersuchung zum Stand der Technik
	Schubert	Forschungsarbeit	Planungsprozess für eine Simulationsumgebung
	Könen	Forschungsarbeit	Untersuchung von CATIA V5R21 bzgl. der Erstellung normkonformer PMI in 3D-Modellen
	Michels	Forschungsarbeit	Untersuchung von SolidWorks 2019 bzgl. der Erstellung normkonformer PMI in 3D-Modellen
	Rötschke	Forschungsarbeit	Tracking von Austauschreparaturen
	Engelberts	Forschungsarbeit	Entwicklung einer Fallvorrichtung für die Zertifizierung von Kraftfahrzeugsitzen
	Rees	Diplomarbeit	Entwicklung einer Methode zur Absicherung der semantisch korrekten Tolerierung von 3D-Bauteilen
2019	Wollny	Forschungsarbeit	Aufbau einer Objektstruktur für einen Maschinenpark
	Song	Bachelor Thesis	Implementierung einer QIF-Schnittstelle für SolidWorks
	Reinecke	Forschungsarbeit	Methodik zur Entwicklung einer Strahlungsabschirmung
	Scholz	Projektarbeit	Konzeptanpassung einer Hyperthermieliege
	Cheng	Forschungsarbeit	Gamification in der Produktentwicklung
	Biefang	Forschungsarbeit	Gamification und Produktdatenmanagement

	Schubert	Projektarbeit	DEM-Simulationsmodell für ein Laborrollenrost
	Tollkühn	Forschungsarbeit	OPC UA-Informationsmodell zur Kommunikation von Produktdaten
	Engelberts	Forschungsarbeit	Entwicklung einer Methode für die Konstruktion von Spannband-werkzeugen
2018	Li	Bachelor Thesis	Statistische Erstauswertung von Maschinendaten
	Li	Bachelor Thesis	Softwareanwendung zur Auswertung von Live-Maschinendaten
	König	Forschungsarbeit	Entwicklung einer OPC UA-basierten, bidirektionalen Kommunikations-lösung zwischen Smarten Sensoren und Aras Innovator
	Engelberts	Projektarbeit	Entwicklung eines Werkzeugs zur Auswahl und Platzierung von Führungssäulen und Führungsbuchsen in Catia V5
	Hollmer	Forschungsarbeit	Digitales Führerstandsmodell für den Einsatz in Virtueller Realität
	Heinze	Diplomarbeit	Erweiterung einer CAD-Anwendung zur Entwicklung von Feldmodellen
	Ernstberger	Diplomarbeit	Erarbeitung eines Konzepts zur Erfassung, Kommunikation und Speicherung von Betriebsdaten
2017	Elsner	Forschungsarbeit	Einrichtung eines Hilfsmittels zur Durchführung gesetzlich konformer Risikobeurteilungen
	König	Forschungsarbeit	Vorausschauende Instandhaltung mithilfe Künstlicher Intelligenz – Entwicklung und Validierung eines Prüfstands für ein Stör- bzw. Ausfall-szenario
	Tollkühn	Projektarbeit	Entwicklung einer Internetanwendung für die Bereitstellung von Produkt-informationen im Maschinen- und Anlagen-service
	Wolf	Forschungsarbeit	Konzeption für das Produkt- und Prozessdatenmanagement zur Herstellung individueller Implantate
	Wang	Forschungsarbeit	Cloudbasiertes PDM: Eine Studie zum aktuellen Entwicklungsstand
	Jiang	Forschungsarbeit	Cloudbasiertes CAD: Eine Studie zum aktuellen Entwicklungsstand
2016	Mavryn	Master Thesis	Auswahl eines Produktdatenmanagementsystems für virTUro und Entwicklung eines projektspezifischen Einführungskonzepts
	Klement	Diplomarbeit	Betrachtung von Maschinenkommunikation in verteilten Systemen
	Mögel	Diplomarbeit	Ergonomieuntersuchung von Maschinen im Kontext von Fabrikplanung unter Einsatz von Virtueller Realität
	Gärtner	Diplomarbeit	Konzeptstudie zur Hubbewegung von Palettenwechslern der Fa. TRUMPF im Zusammenhang mit funktionalen Erweiterungsmöglich-keiten
2014	Bernard	Diplomarbeit	Untersuchung und Auswahl einer geeigneten Lösung zur Verbesserung der Rutschhemmung auf Treppenstufen- und Arbeitsbühnenbelägen