

REIHE 08

MESS-,
STEUERUNGS-
UND REGELUNGS-
TECHNIK



Fortschrift- Berichte VDI

Lars Nothdurft, M. Sc.,
Aachen

NR. 1274

Konzept für ein rollen-
zentrisches Plug and
Produce zur Inbetrieb-
nahme und zum
Austausch von Feldgeräten

BAND

1|1

VOLUME

1|1



Lehrstuhl für
Prozessleittechnik
der RWTH Aachen

Konzept für ein rollenzentrisches Plug and Produce zur Inbetriebnahme und zum Austausch von Feldgeräten

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Lars Nothdurft, M. Sc. RWTH

aus Aschaffenburg.

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Epple
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Diedrich
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Tobias Kleinert

Tag der mündlichen Prüfung: 21.01.2022



REIHE 08

MESS-,
STEUERUNGS-
UND REGELUNGS-
TECHNIK



Fortschritt- Berichte VDI

Lars Nothdurft, M. Sc.,
Aachen

NR. 1274

Konzept für ein rollen-
zentrisches Plug and
Produce zur Inbetrieb-
nahme und zum
Austausch von Feldgeräten

BAND
1|1

VOLUME
1|1

ACPLT
AACHENER
PROZESSLEITTECHNIK

Lehrstuhl für
Prozessleittechnik
der RWTH Aachen

Nothdurft, Lars

Konzept für ein rollenzentrisches Plug and Produce zur Inbetriebnahme und zum Austausch von Feldgeräten

Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 08, Nr. 1274. Düsseldorf: VDI Verlag 2022.

102 Seiten, 35 Bilder, 10 Tabellen.

ISBN 978-3-18-527408-4, E-ISBN 978-3-18-627408-3, ISSN 0178-9546

43,00 EUR/VDI-Mitgliederpreis: 38,70 EUR

Für die Dokumentation: Plug and Produce – automatisierte Konfiguration – Geräterollen – Eigenschaftsausprägungsaussagen – Prozessleittechnik

Keywords: Plug and Produce – automatic configuration – device role – property value statements – process control technology

Die vorliegende Arbeit wendet sich an Ingenieur*innen und Wissenschaftler*innen aus der Prozessindustrie. Sie behandelt ein Plug and Produce Konzept für Feldgeräte in der Prozessleittechnik. Basis hierfür ist die formale Beschreibung von funktionalen Anforderungen in Form von Geräterollen und der Abgleich dieser mit Zusicherungen von Seiten des Geräts sowie dessen zugehörigen Gerätetyps. Kern der Arbeit ist die Definition und Strukturierung der erforderlichen Informationen sowie die Beschreibung eines allgemeinen Ablaufs des Plug and Produce Vorgangs. Weiter wird die Umsetzbarkeit des Konzepts mit industrieüblichen Technologien untersucht, um die Anwendbarkeit des Konzepts in der Praxis zu beurteilen. Das Konzept wurde in einem Demonstrator mit HARTfähigen Feldgeräten realisiert. Die nötigen Daten zu Rollen und Gerätetypen werden hierbei in Form von Verwaltungsschalen bereitgestellt.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek (German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at www.dnb.de.

D82 (Diss. RWTH Aachen University, 2022)

© VDI Verlag GmbH | Düsseldorf 2022

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten. Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISBN 978-3-18-527408-4, E-ISBN 978-3-18-627408-3, ISSN 0178-9546

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Prozessleittechnik der RWTH Aachen entstanden. Diese Zeit am Lehrstuhl bildet einen sehr positiven Abschnitt meines Lebens mit vielen neuen Erfahrungen, einer tollen Gemeinschaft und viel Freude. An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich in dieser Zeit in Aachen begleitet und unterstützt haben.

Zunächst gilt mein besonderer Dank Herrn Professor Dr.-Ing. Ulrich Epple für die Betreuung meiner Promotion. Er hat mich mit vielen, teils kritischen Diskussionen unterstützt und geholfen, den Fokus der Arbeit auf die wesentlichen Aspekte auszurichten. Zudem hat er mit seinem Führungsstil das kollegiale Arbeitsklima und freie, angeregte Diskussionen unter den Mitarbeitern ermöglicht.

Weiter bedanke ich mich bei Herrn Professor Dr.-Ing. Christian Diedrich, Inhaber des Lehrstuhls Integrierte Automation der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, für die Übernahme der Rolle des Zweitgutachters.

Auch möchte ich mich bei Herrn Professor Dr.-Ing. Tobias Kleinert, jetziger Inhaber des Lehrstuhls für Prozessleittechnik, für die konstruktive Kritik und die Verbesserungsvorschläge zu dieser Arbeit bedanken.

Großer Dank geht zudem an meine Kollegen am Lehrstuhl. Es hat mich gefreut, mit euch zusammen zu arbeiten und den Arbeitsalltag zu bestreiten. Besonderer Dank gebührt Christian, Mahyar und Torben für die interessanten Diskussionen zu den Themen dieser Arbeit. Zudem danke ich Martina Uecker für die Unterstützung beim Aufbau des Demonstrators sowie Frau Margarete Milescu für die Unterstützung bei organisatorischen Angelegenheiten.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie für die moralische Unterstützung in den stressigen Zeiten der Promotion bedanken. Ihr habt mir in diesen Zeiten die Motivation gegeben, die Promotion zügig durchzuziehen.

Aachen, 2022

Lars Nothdurft

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Symbole	VIII
Kurzfassung	X
Abstract	XI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Struktur der Arbeit	2
2 Problembeschreibung und Anforderungen	3
2.1 Aufgabe des Plug and Produce	3
2.2 Informationsmodelle	5
2.3 Kommunikation	6
2.4 Prozessleitechnische Randbedingungen	7
2.5 Problemszenarien	8
2.6 Zusammenfassung	8
3 Grundlagen und Stand der Technik	9
3.1 Gerätebeschreibung	9
3.1.1 Geräterollen	9
3.1.2 Gerätetyp	10
3.1.3 Gerätekasse	11
3.1.4 Geräteinstanz	11
3.2 Beschreibung von Semantik	14
3.2.1 Merkmalbibliotheken	14
3.2.2 Strukturierung von Eigenschaftsaussagen	15
3.3 Informationsbereitstellung	17
3.3.1 Verwaltungsschalen	17
3.3.2 Engineering-Werkzeuge	17
3.4 Kommunikation	18
3.4.1 HART	18
3.4.2 Profibus	20
3.4.3 IP-Netzwerke	21
3.4.4 Profinet	21
3.4.5 OPC UA	22
3.5 NOA	23
3.6 FDI	26
3.6.1 FDI-Package	26
3.6.2 FDI Architektur	26

3.6.3	FDI Informationsmodell	28
3.7	MTP	28
3.8	Eigene Vorarbeiten	29
3.9	Andere Plug-and-Produce-Konzepte	30
3.9.1	Prozesstechnik	30
3.9.2	Fertigungstechnik	31
3.9.3	Zusammenfassung	33
4	Konzept	35
4.1	Akteure	35
4.1.1	Informationsmodelle	37
4.1.2	Akteure der operativen Ebene	37
4.1.3	Akteure der Managementebene	39
4.2	Plug-and-Produce-Ablauf	45
4.2.1	Sicherung, Außerbetriebnahme und Umbau	46
4.2.2	Anschlusserkennung und Identifikation	47
4.2.3	Rollenverknüpfung	49
4.2.4	Datenaggregation und Eignungsprüfung	51
4.2.5	Umkonfiguration	52
5	Übertragung des Konzepts auf technische Realisierungen	59
5.1	Umsetzung der Informationsmodelle	59
5.1.1	Modellierung der Geräterolle	59
5.1.2	Modellierung von Gerätetypen	61
5.1.3	Modellierung von Geräteinstanzen	62
5.1.4	Modellierung des Rollen-Managers	63
5.1.5	Modellierung der Kommunikationssysteme	64
5.2	Technologie-Mapping	66
5.2.1	Technologien für die Informationsbereitstellung	66
5.2.2	Technische Umsetzung der Netzwerkdienste	67
5.3	Anwendungsszenarien	71
5.3.1	Anwendungsfall 1: Feldgeräte mit konventioneller Verdrahtung	71
5.3.2	Anwendungsfall 2: Feldgeräte mit digitaler Prozesswertübertragung	75
5.3.3	Anwendungsfall 3: MTP-Module	78
6	Prototyp-Implementierung	81
6.1	Aufbau	81
6.2	Implementierung der Kernautomatisierungsseite	83
6.3	Implementierung des M+O-Servers	85
6.3.1	Verwaltungsschalen	85
6.3.2	PnP-Manager	86
7	Diskussion und Ausblick	88
7.1	Diskussion	89
7.2	Ausblick	89

A Anhang	91
A.1 Rollendaten für Anwendungsfälle 1 und 2	92
A.2 Zusätzliche Abbildungen zur prototypischen Implementierung	93
Literatur	94

Abkürzungen und Symbole

- AP** Applikationsprozess
- ASE** Applikationsdiensteinheit
- AML** AutomationML
- CAE** Computer Aided Engineering
- CAEX** Computer Aided Engineering Exchange
- CDD** Common Data Dictionary
- DCP** Discovery and basic Configuration Protocol
- DHCP** Dynamic Host Configuration Protocol
- DNS** Domain Name System
- DT** Digital Twin
- EDD** Electronic Device Description
- EDDL** Electronic Device Description Language
- FDI** Field Device Integration
- FDT** Field Device Tool
- FTP** File Transfer Protocol
- HART** Highway Addressable Remote Transducer
- HTTP** Hypertext Transfer Protocol
- ID** Identifikator
- IP** Internet Protocol
- IRDI** International Registration Data Identifier
- I&M** Identification & Maintenance
- LLDP** Link Layer Discovery Protocol
- M+O** Monitoring and Optimization
- MES** Manufacturing Execution System

MTP Module Type Package

NOA Namur Open Architecture

NS Namespace

OPC Open Platform Communications

OPC UA OPC Unified Architecture

OPC UA LDS OPC UA Local Discovery Server

OSI Open Systems Interconnection

PA-DIM Process Automation Device Information Model

PLS Prozessleitsystem

PLT Prozessleittechnik

PnP Plug and Produce

PVS Property Value Statement

R&I-Fließbild Rohrleitungs- und Instrumentenfließbild

SPS speicherprogrammierbare Steuerung

SSC Sequential State Chart

TCP Transmission Control Protocol

TSN Time-Sensitive Networking

UDP User Datagram Protocol

UML Unified Modeling Language

URI Uniform Resource Identifier

VoR Verification of Request

Kurzfassung

Die Strategie Industrie 4.0 ist eine deutsche Initiative zum Vorantreiben der Vernetzung und Digitalisierung in der Industrie. Ein Konzept im Zusammenhang mit Industrie 4.0 ist das „Plug and Produce“, die automatisierte Integration von Komponenten in eine Produktionsumgebung. Bestehende Ansätze bauen meist auf modernen Technologien aus dem Industrie-4.0-Umfeld auf und sind zu bestehenden Anlagen nicht kompatibel. Existierenden Konzepten, die mit alten Technologien funktionieren, fehlt es hingegen an Flexibilität und Anwendungsbreite.

In dieser Arbeit wird ein allgemeines Plug-and-Produce-Konzept für Feldgeräte in der Prozesstechnik entwickelt. Das Konzept kann für die erste Inbetriebnahme sowie den Wechsel eines Geräts nach einem Ausfall genutzt werden. Zudem ist es in einer Weise konzipiert, dass es auch Bestandsanlagen mit älteren Technologien unterstützt.

Kern des Konzepts ist die explizite Betrachtung der funktionalen Aufgaben (Rollen) in der Anlage und die automatisierte Zuordnung von Geräten zu diesen Aufgaben. Die Zuordnung wird durch einen Abgleich von Anforderungen auf Seite der Rolle und Zusicherungen auf Seite des Geräts erzielt. Dabei wird zwischen Eigenschaften und Fähigkeiten unterschieden. Letztere spiegeln die Funktion des Geräts wider. Für die Formulierung der Anforderungen und Zusicherungen wird das Eigenschaftsausprägungsaussagen-Modell genutzt. Die Zusicherungen des Geräts werden in feste Merkmale des Gerätetypus und veränderliche Eigenschaften der Geräteinstantz (die Parameter) unterteilt. Für eine erfolgreiche Eingliederung muss die Konfiguration des Geräts angepasst sowie die Prozesskommunikation zwischen Gerät und überlagerter Steuerung hergestellt werden.

Das Konzept teilt sich in zwei Aspekte auf. Zunächst umfasst dies eine Betrachtung der benötigten Informationen und Funktionen der beteiligten Komponenten. Die Komponenten im Kontext des Konzepts sind die Rolle, der Gerätetyp, die Geräteinstantz sowie die Kommunikation. Der zweite Aspekt beschreibt die Prozedur, die zum Absolvieren eines PnP-Vorgangs durchlaufen wird. Die Prozedur wird in fünf Blöcke von Schritten unterteilt. Der erste Block regelt die Vorbereitung bei einem Gerätewechsel. Anschließend wird das neue Gerät in die Kommunikation eingebunden und identifiziert. Im Folgenden werden dem Gerät die Rollen zugeordnet, welche das Gerät übernehmen soll. Ob das Gerät die gewählten Rollen übernehmen kann, wird anhand einer Eignungsprüfung zwischen Anforderungen der Rolle und Zusicherungen des Geräts getestet. Abschließend wird das Gerät konfiguriert, die Anbindung an die Steuerung angepasst und die Kommunikation zwischen beiden aufgebaut.

Nach der Beschreibung des Konzepts wird dessen Umsetzung mit technischen Lösungen analysiert. Es wird untersucht, wie geforderte Funktionalitäten mit gängigen Technologien bereitgestellt werden können. Weiter wird die technische Realisierung anhand von Anwendungsfällen durchexerziert. Die Umsetzbarkeit wird zudem an einer prototypischen Implementierung demonstriert. Abschließend werden offene Punkte und Möglichkeiten zur Erweiterung des Konzepts diskutiert.

Abstract

The Industrie 4.0 strategy is a German initiative to drive forward networking and digitalization in industry. One concept related to Industrie 4.0 is 'Plug and Produce', the automated integration of components into a production environment. Existing approaches are mostly based on modern technologies from the Industrie 4.0 environment and are not compatible with existing plants. Existing concepts that work with old technologies, on the other hand, lack flexibility and application breadth.

In this work, a general Plug and Produce concept for field devices in process technology is developed. The concept can be used for initial commissioning as well as for changing a device after failure. Furthermore, it is designed in a way that it also supports existing plants with older technologies.

The core of the concept is the explicit consideration of functional tasks (roles) in the plant and the automated assignment of devices to these tasks. The assignment is achieved by matching requirements on the role side and assurances on the device side. A distinction is made between properties and capabilities. The latter reflect the function of the device. The property value statement model is used to formulate the requirements and assurances. The assurances of the device are divided into fixed characteristics of the device type and variable characteristics of the device instance (the parameters). For a successful incorporation, the configuration of the device must be adjusted and the process communication between the device and the higher-level controller must be established.

The concept is divided into two aspects. First, this includes a consideration of the required information and functions of the components involved. The components in the context of the concept are the role, the device type, the device instance, and the communication. The second aspect describes the procedure that is followed to complete a PnP sequence. The procedure is divided into five blocks of steps. The first block regulates the preparation in case of a device change. Then, the new device is included in the communication and identified. In the following, the device is assigned the roles that the device is to assume. Whether the device can assume the selected roles is tested by means of a suitability test between the requirements of the role and the assurances of the device. Finally, the device is configured, the connection to the controller is adapted and the communication between the two is established.

After describing the concept, its implementation is analyzed with technical solutions. It is examined how required functionalities can be provided by common technologies. Furthermore, the technical realization is demonstrated by means of use cases. The feasibility is also demonstrated using a prototype implementation. Finally, open points and possibilities for extending the concept are discussed.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Strategie Industrie 4.0 ist eine deutsche Initiative zum Vorantreiben der Vernetzung und Digitalisierung in der Industrie [82]. Durch die Vernetzung sollen Wertschöpfungsketten flexibler und effizienter gestaltet werden können. Autonome Systeme können miteinander kommunizieren und sich mittels kompatibler Modelle untereinander koordinieren. Dies ist in einem größeren Umfang möglich als durch manuelle Eingriffe von Menschen und bietet damit völlig neue Arbeitsweisen und Geschäftsmodelle.

Unter dem Schlagwort Plug and Produce (PnP) wird die automatisierte Integration eines Geräts in eine Produktionsanlage verstanden. Dabei wird aus einer (Selbst-)Beschreibung des Geräts und zusätzlichen Informationen zum Einsatzort (wie Anlagentopologie, Produktionsprozess usw.) die funktionale Aufgabe des Geräts im Kontext der Produktion bestimmt. Gefolgt wird dies von der kommunikativen Eingliederung in das Automatisierungssystem und der Aufnahme produktiver Tätigkeiten.

Die Prozessindustrie ist bei der Übernahme neuer Technologien eher konservativ. Etablierte Lösungen haben den Test der Zeit überstanden und sich als zuverlässig und robust erwiesen. Dennoch zeigen Arbeiten wie z. B. die Namur Open Architecture (NOA) [50], dass Interesse an diesen neuen Technologien besteht und der potentielle Mehrwert durch diese gesehen wird. Gleichzeitig wird durch den additiven Charakter von NOA verdeutlicht, dass große Änderungen an bestehenden Konstrukten in Automatisierungssystemen in der Prozessindustrie kritisch betrachtet werden.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines allgemeinen PnP-Konzepts für die Prozesstechnik. Dieses soll sowohl die erste Inbetriebnahme als auch den Austausch eines Geräts abdecken und die leittechnische Integration weitestgehend autonom absolvieren. So sollen der manuelle Aufwand und das Potential für Fehler dieser Tätigkeiten reduziert werden. Als Resultat lassen sich Integrationsprozesse durch die automatisierte Abwicklung beschleunigen.

Wie NOA gezeigt hat, ist die Nachrüstung von Bestandsanlagen um I4.0-Konzepte ein relevantes Thema. Auch ist kein abrupter Wechsel der genutzten Technologien in der Prozessautomation zu erwarten, sodass ein allgemeines PnP-Konzept diese älteren Technologien mit berücksichtigen sollte. Weiter ist es hilfreich für die Akzeptanz und die Nachrüstbarkeit, die Anpassungen in der Anlagenautomatisierung möglichst gering zu halten. Es ist darauf zu achten, dass Eingriffe in kritische Bereiche des Automatisierungssystems abgesichert sind und die Verfügbarkeit und Sicherheit nicht kompromittieren. Zudem sollte auf die Verwendung bestehender Normen oder Standards geachtet werden. Dies erhöht die Synergie mit vorhandenen technischen Lösungen und erleichtert die Einführung des Konzepts.

Existierende Konzepte und Ansätze für Plug and Produce richten sich auf moderne Technologien aus und erfordern große strukturelle Änderungen im Automatisierungssystem.

Auch werden meist Anforderungen an die Feldgeräte gestellt, die viele bestehende Technologien ausschließen. Aus diesem Grund erschien es sinnvoll und notwendig, ein neues allgemeines Konzept zu entwickeln, das in stärkerem Maße bestehende Technologien berücksichtigt.

1.2 Struktur der Arbeit

Zu Beginn dieser Arbeit wird in Kapitel 2 die grundlegende Problemstellung des Plug and Produce beschrieben. Dazu gehört die Aufgabenstellung, die von einer PnP-Lösung bewältigt werden soll. Zudem werden die wichtigen Aspekte Informationsmodelle sowie Kommunikation erörtert und welche Rolle diese im Kontext eines PnP-Konzepts einnehmen. Anschließend werden Randbedingungen für eine Lösung aufgrund des prozesstechnischen Umfelds diskutiert. Abschließend werden einige Anwendungsszenarien skizziert, die im Zuge der Arbeit betrachtet werden sollen.

Kapitel 3 behandelt die Grundlagen und den Stand der Technik. Es werden zunächst bestehende Modellierungsansätze für funktionale Rollen und Feldgeräte beschrieben. Im Anschluss werden Konzepte zur Darstellung maschinenlesbarer Semantik sowie Möglichkeiten, die relevanten Informationen semantisch annotiert bereitzustellen, betrachtet. Danach werden einige gängige Kommunikationsprotokolle aus dem industriellen Umfeld beschrieben, mit denen die Umsetzung der entwickelten Lösung überprüft werden soll. Abschließend werden bestehende PnP-Konzepte in der Literatur betrachtet.

Das neu entwickelte PnP-Konzept wird in Kapitel 4 abstrakt beschrieben. Dazu werden die Akteure definiert, die verschiedene Aspekte des PnP-Konzepts beinhalten. Für diese Akteure werden abstrakte Modelle beschrieben, welche die nötigen Informationen enthalten. Anschließend wird eine allgemeine Prozedur für die Durchführung des PnP-Prozesses spezifiziert.

In Kapitel 5 wird die technische Realisierung des entwickelten PnP-Konzepts untersucht. Dazu wird zunächst eine beispielhafte Modellierung der Informationsmodelle vorgestellt. Im Anschluss wird die Umsetzung des Konzepts mit bestehenden Technologien in Form einer Zuordnung von benötigten Funktionen und bereitgestellten Features überprüft. Abschließend wird die Umsetzung an drei Anwendungsfällen anschaulich beschrieben.

Eine prototypische Implementierung des Konzepts wird in Kapitel 6 präsentiert. Zum Abschluss der Arbeit werden die erreichten Ergebnisse diskutiert und in einem Ausblick sinnvolle Schritte zur Weiterentwicklung des Konzepts vorgeschlagen.

2 Problembeschreibung und Anforderungen

In diesem Kapitel werden die grundlegende Problemstellung des Plug and Produce (PnP) erläutert und die sich daraus ergebenden Anforderungen im Kontext der Prozessautomation behandelt. Dazu erfolgt zunächst eine Beschreibung der Aufgaben, die von einem PnP-System erbracht werden müssen. Anschließend wird auf Voraussetzungen bei der Beschreibung von Geräten und Gerätetypen sowie Randbedingungen für die Beschreibung funktionaler prozesstechnischer Aufgaben, auch Rollen genannt, eingegangen. Weiter werden Anforderungen bezüglich der Modellierung von Kommunikationswegen formuliert. Danach werden wichtige Einschränkungen als Resultat des prozesseitentechnischen Umfelds erörtert. Abschließend werden einige technische Szenarien skizziert.

2.1 Aufgabe des Plug and Produce

Das Ziel einer Anlage ist es, einen Produktionsprozess durchzuführen. In der Prozessindustrie startet die Planung der Anlage mit der chemischen Synthese. Diese wird in der Verfahrensauslegung in verfahrenstechnische Schritte überführt. Daraufhin werden technische Geräte zur Realisierung der einzelnen Schritte ausgewählt. Abschließend erfolgt die Planung des Automatisierungssystems, welches die Steuerung der Anlage und die korrekte Durchführung des Produktionsprozesses sicherstellen soll.

Das Automatisierungssystem muss mit der physikalischen Anlage interagieren, um auf den Prozess einzuwirken. Dazu werden entsprechende Schnittstellen benötigt, die in der Prozessautomatisierung häufig als PLT-Stellen bezeichnet werden. Die Art der Interaktion kann je nach Komplexität des Geräts unterschiedliche Formen annehmen. Einfache Geräte interagieren über singuläre Werte mit dem Automatisierungssystem. Diese können zum einen lesend (Messwerte bzw. Rückmeldungen), zum anderen schreibend (Aktoren) in der Steuerung eingebunden sein. Zudem kann ein Gerät mehrere Werte zum Austausch besitzen, z. B. im Falle von multivariablen Sensoren oder Aktoren mit Rückmeldung [61].

Bei komplexeren Geräten ist zusätzlich die Nutzung von Diensten eine Möglichkeit der Interaktion. Durch Dienste kann die Breite der Schnittstelle verringert und die Interaktion flexibler gestaltet werden. In aktuellen Arbeiten werden Dienste als zentrales Interaktionsmuster vorgesehen [1, 16]. Einwirkungen auf das Gerät erfolgen über die Dienstschnittstelle, während aktuelle Zustände des Geräts und einzelner Dienste über Zustandsvariablen abgefragt werden.

Aufgabe des Plug and Produce ist, ein neues Gerät soweit einzubinden, dass dieses seine zugedachte Aufgabe innerhalb der Anlage und im Zusammenspiel mit dem Automatisierungssystem durchführen kann. Die manuelle Einrichtung soll somit weitestgehend automatisiert werden. Dabei gibt es drei wesentliche Aspekte, die berücksichtigt werden müssen:

- **Feldgerätekonfiguration:** Feldgeräte haben in der Regel konfigurierbare Parameter, um deren Verhalten zu bestimmen und sie vielseitig einsetzbar zu machen. Damit ein Feldgerät seine Aufgabe korrekt durchführen kann, muss auch die Konfiguration auf diese abgestimmt werden.
- **Kommunikation:** Das Automatisierungssystem und das Feldgerät müssen Informationen miteinander austauschen. Abgesehen von einfachen Signalverbindungen bedarf dies einer Konfiguration des betreffenden Kommunikationssystems. So müssen z.B. oft Adressen vergeben und Kommunikationswege (Routing) eingerichtet werden.
- **Steuerung:** Auf der untersten Ebene der Steuerung befindet sich die Anbindung der Geräte über das Kommunikationssystem an die Steuerungslogik. Ändert sich die Adresse des Feldgeräts, die Art des Kommunikationssystems oder der endpunktsspezifische Zugriff, müssen auf dieser Ebene Anpassungen vorgenommen werden.

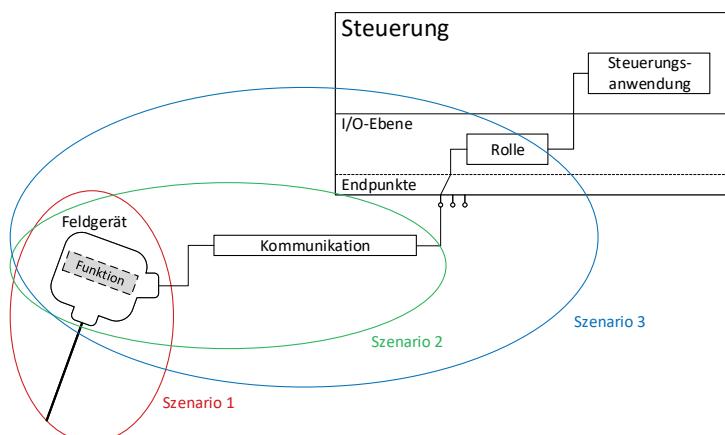


Abbildung 2.1: Problemstellung des Plug and Produce

Abb. 2.1 illustriert die Realisierung einer funktionalen Aufgabe durch ein Feldgerät. Das physikalische Gerät (unten links) verfügt über eine prozesseitliche Funktion und ist über ein Kommunikationssystem mit einer Steuerung verbunden. Das Kommunikationssystem kann sowohl aus einer einfachen Verbindung als auch einer komplexen Infrastruktur mit Routern, Gateways usw. bestehen. Die Steuerung ist über Interfaces an verschiedene Kommunikationssegmente angebunden. Geräte sind in der Steuerung durch Endpunkte an einem spezifischen Interface referenziert, welche durch das Kommunikationssystem definiert werden. Innerhalb der Steuerung, oberhalb der Interface-Ebene, gibt es die I/O-Ebene mit Rollen, welche den Datenaustausch über das Kommunikationssystem verwalten und die Funktionen der Feldgeräte den Steuerungsanwendungen zur Verfügung stellen. Damit sind Mess- und Stellwerte als einfache Variablen im Automatisierungssystem verfügbar. Dienste

können durch Rollen mit entsprechenden I/O-Bausteinen ebenfalls bereitgestellt werden. Die Ellipsen beziehen sich auf Szenarien, die in Kapitel 2.5 skizziert sind.

2.2 Informationsmodelle

Für die Durchführung des Plug and Produce wird eine Reihe von Daten benötigt. Dies umfasst Informationen zu funktionalen Aufgaben in der Anlage, Gerätetypenbeschreibungen und Daten zum aktuellen Zustand der Gerätekonfiguration.

Zunächst müssen alle Daten digital vorliegen, sodass eine automatische Verarbeitung möglich ist. Weiterhin müssen die Informationen Teil eines durchgängigen Modells sein oder sich in ein solches abbilden lassen. So können die notwendigen semantischen Verknüpfungen zwischen den Datenpunkten der einzelnen Modelle bestimmt werden.

Das PnP-System muss zudem Zugriff auf die Daten besitzen. Abhängig davon, wo ein solches System in der Automatisierungshierarchie verortet ist, ergeben sich unterschiedliche Herausforderungen. Ist das PnP-System Teil des Automatisierungssystems, müssen von außerhalb kommende Daten auf ihre Integrität überprüft werden. Befindet sich das PnP-System hingegen selbst außerhalb der Automatisierungspyramide, muss der Zugriff auf Daten der Prozessautomation ermöglicht werden. Eine weitere Anforderung an die bereitgestellten Daten ist, dass diese mit einer maschinenlesbaren Semantik angereichert sind. Einzelne Datenpunkte müssen in Relation gesetzt und verglichen werden können.

Die Informationen zu den in der Anlage benötigten Aufgaben sind in den Planungsunterlagen enthalten. Aus der Prozessindustrie ist der Begriff der Rolle gebräuchlich. Eine Rolle kann von einem Gerät eingenommen werden, welches die mit dieser Rolle verbundene leittechnische Aufgabe ausführt. Die Rolle bildet zudem eine Sammlung aller funktionalen Anforderungen, die an das Gerät gerichtet sind. Das PnP-System benötigt diese Beschreibung der Rolle, d. h. des funktionalen Anforderungsprofils, um einen Sollzustand für das Gerät zu generieren. Prinzipiell sind sowohl verfahrenstechnische als auch leittechnische Anforderungen zu berücksichtigen.

- **Verfahrenstechnische Sicht:** Die Sicht umfasst die physikalischen Eigenschaften und das physikalische Verhalten des Geräts. Darunter fallen statische Eigenschaften wie z. B. Abmessungen, Geometrien und Leistungsmerkmale. Zusätzlich kann ein Gerät konfigurierbares Verhalten besitzen (z. B. Anfahrkurven bei Motoren).
- **Leittechnische Sicht:** Diese Sicht umfasst alle Eigenschaften und Einstellungen, welche die Umwandlung von physikalischen Einwirkungen in Informationen (Sensor) bzw. Umwandlung von Informationen in physikalische Wirkung (Aktor) betreffen. Dazu zählen auch Punkte, welche die Codierung der Information und deren Transport betreffen.

Die Beschreibung muss alle für die Durchführung der vorgesehenen Aufgabe benötigten Aspekte enthalten. Dies beginnt bei der Grundfunktion des Feldgeräts und erstreckt sich bis zu konkreten Parametereinstellungen. Aspekte, die nicht beschrieben sind, dürfen die operative Funktion nicht beeinflussen. Dies umfasst z. B. rein kosmetische Einstellungen einer lokalen Anzeige. Solche nicht-funktionalen Aspekte können bei Bedarf aus der Konfiguration eines Vorgängergeräts entnommen werden.

Das PnP-System benötigt weiterhin Informationen zu einzelnen Gerätetypen. Diese fassen die Fähigkeiten der Typen zusammen, die gegen die Anforderungen der Rolle abgeglichen werden können. Neben statischen Leistungsmerkmalen muss der Gerätetyp auch Informationen zu einstellbaren Parametern enthalten, einerseits um generell aufzuzeigen, welche Parameter zur Verfügung stehen, und andererseits um die Bereiche, in denen diese eingestellt werden können, zu beschreiben. Somit kann ein Abbild der Fähigkeiten des Gerätetyps (und damit auch eines einzelnen Geräts) erstellt werden.

Die aktuellen Einstellungen des Geräts sind für PnP in zweierlei Hinsicht relevant. Bevor das eingerichtete Gerät in Betrieb genommen werden kann, muss die korrekte Durchführung der PnP-Prozedur überprüft werden. Dazu gehört der Abgleich der aktuellen Gerätekonfiguration mit den Anforderungen aus der Rolle. Die Gerätekonfiguration kann nur aus dem Gerät selbst abgerufen werden.

Der zweite Nutzen der aktuellen Einstellungen bietet sich bei der Übertragung der neuen Konfiguration. Zum einen ist es möglich, die gesamte Konfiguration von der Rolle abzuleiten und alle betroffenen Parameter zu übertragen. Eine zweite Möglichkeit ist, einen Abgleich zwischen aktuellen und benötigten Geräteeinstellungen durchzuführen. So müssen bereits passende Werte nicht erneut an das Feldgerät übertragen werden. Dieser Schritt dient in erster Linie der Performanz.

2.3 Kommunikation

Für das Kommunikationssystem, d. h. die technischen Einrichtungen zur Übertragung der Prozessinformationen zwischen Feldgerät und Steuerung, existieren eine Reihe von Anforderungen, um einen PnP-Vorgang erfolgreich durchzuführen.

Zunächst muss das System erkennen können, wenn ein Gerät angeschlossen wird. Für die weitere Bearbeitung ist es zudem von Vorteil, wenn nähere Informationen zum Anschlussort, d. h. der topologischen Stellung in der Kommunikationsstruktur, bereitgestellt werden. Dadurch kann eine grobe physikalische und funktionale Voreinordnung vorgenommen werden. Unter der Voraussetzung, dass keine neuen Kabel in der Anlage verlegt werden, ist ein Kommunikationsnetzwerksegment nur an einer begrenzten Anzahl von Orten in der Anlage verfügbar. Dies ermöglicht die physikalische Einordnung. Da Rollen ebenfalls eine spezifische Position in der Anlage haben, ist mit Informationen über mögliche Gerätepositionen eine Eingrenzung der Funktion möglich.

Das PnP-System braucht Informationen direkt von dem neuen Gerät. Dazu muss die Kommunikation mit dem Gerät aufgebaut werden. Benötigt das Gerät für das Kommunikationsprotokoll eine Adressierung, muss ein Mechanismus zur automatischen Vergabe von Adressen vorhanden sein. In vielen Anlagen mit Feldbusssystemen sind die Geräteadressen im Leitsystem fest projektiert und so mit den Rollen gekoppelt. In solchen Fällen ist die automatisch vergebene Adresse nur temporär, bis die Rolle des Geräts bestimmt und die korrekte Adresse eingerichtet wurde.

Für einen erfolgreichen Abschluss des PnP muss die Konfiguration des Geräts angepasst werden können. Dazu können Geräte eine dedizierte Schnittstelle anbieten, in der Regel wird die Konfiguration aber über dieselbe Schnittstelle wie die Anbindung an das Automatisierungssystem durchgeführt. Für das PnP muss diese Schnittstelle zumindest zentral (und nicht nur lokal am Gerät) verfügbar sein und alle benötigten Konfigurationseinstellungen lesen und schreiben können.

2.4 Prozessleittechnische Randbedingungen

Plug and Play gibt es in der Computertechnik bereits seit über 20 Jahren. In der Prozesstechnik hingegen gibt es bis heute keine entsprechende durchgängige und verbreitete Lösung für Plug and Produce. Dies lässt sich unter anderem auf einige Randbedingungen der Prozessleittechnik zurückführen:

- In der klassischen Prozessautomatisierung haben Anlagen lange Lebenszyklen. Mit Ausnahme von Wartungs- und Modernisierungsmaßnahmen gibt es in dieser Betriebsphase kaum Änderungen an der Anlage und ihren Geräte. Das bedeutet, dass das Anschließen und Konfigurieren eines Geräts nur einen kleinen Aufwand im Lebenszyklus des Geräts einnimmt.
- In der Prozessautomation gibt es eine Vielzahl verschiedener Protokolle, die in ihrer Komplexität und Mächtigkeit stark variieren. Dies erschwert die Entwicklung eines übergreifenden PnP-Konzepts, welches alle (oder zumindest einen Großteil) der Schnittstellen und Protokolle abdeckt.
- Die Einsatzmöglichkeiten eines Feldgeräts sind deutlich vielfältiger als bei Geräten aus der IT-Welt. Dies spiegelt sich auch in der deutlich höheren Anzahl an konfigurierbaren Parametern wider. Zudem kann die prozesstechnische Funktion eines Geräts sich je nach Einbauort unterscheiden.
- Unter den PLS-Herstellern gibt es keinen führenden Anbieter, der die Schnittstellen und Prozeduren durch seine Marktmacht diktieren könnte. Bisher umgesetzte PnP-Funktionen endeten somit als herstellerspezifische Features, ohne eine durchgängige Lösung für den Anwender zu bieten.

Eine PnP-Lösung muss zudem den Anforderungen der Prozessindustrie nachkommen. Die Verfügbarkeit einer Anlage ist für ein Unternehmen extrem wichtig. Ein ungeplanter Stillstand kann hohe Kosten verursachen. Während die Einführung des PnP die Stillstandszeiten durch eine schnellere Neukonfiguration reduzieren soll, kann eine fehlerhafte Konfiguration den Betrieb der Anlage direkt oder verzögert beeinträchtigen. Auch die funktionale Sicherheit einer Anlage kann durch fehlerhafte Konfigurationen gestört werden. Hier reichen die Folgen von Schäden an der Anlage bis zur Gefährdung von Menschen und Umwelt. Daher müssen Mechanismen vorgesehen werden, um Änderungen auf Plausibilität und Korrektheit zu überprüfen.

Ein weiterer Aspekt ist das Thema Security. In vielen (vor allem älteren) Anlagen wird die IT-technische Sicherung der Automatisierungssysteme durch eine weitgehende Abkopplung von anderen Netzwerken realisiert. Ein PnP-Konzept muss die Möglichkeit bieten, benötigte Daten aus der Feld- und Prozesseitebene sicher bereitzustellen.

In der Prozessindustrie besitzen Anlagen oft Laufzeiten von mehreren Jahrzehnten. Ein PnP-Konzept, welches moderne Technologien voraussetzt, könnte nur bei neu gebauten Anlagen eingesetzt werden. Eine Nachrüstung bestehender Anlagen mit neuen Feldgeräten und neuer Kommunikationsinfrastruktur wäre nicht ökonomisch. Ein Konzept, welches mit gebräuchlicher Hardware und Software-Updates einsetzbar ist, würde einen deutlich größeren Anwendungsbereich besitzen.

2.5 Problemszenarien

In die in Kapitel 2.1 beschriebene Struktur können Szenarien mit verschiedenen technischen Randbedingungen eingeordnet werden. Die für die Szenarien relevanten Aspekte sind in Abb. 2.1 mit den Ellipsen gekennzeichnet.

Den einfachsten Fall stellen 4–20 mA Feldgeräte mit Unterstützung des HART-Protokolls dar. Die steuerungstechnisch relevanten Informationen werden über die physikalische Größe, d. h. den Strom, übertragen. Daher wird für den Aspekt des Kommunikationssystems keine weitere Konfiguration benötigt (vgl. Abb. 2.1 roter Kreis). Die Anbindung an die Steuerung ist in der Regel ebenfalls fest projektiert. Letztlich bleibt die Konfiguration der Geräteparameter, um die Funktionseigenschaften des Geräts festzulegen. Die digitale Anbindung über das HART-Protokoll ist nötig, um die automatische Konfiguration der Geräteparameter zu ermöglichen.

Feldgeräte mit Anbindung über ein Bus-Protokoll an das Automatisierungssystem erfordern weitergehende Schritte (vgl. Abb. 2.1 grüner Kreis). Das Gerät muss zunächst in die Bus-Kommunikation eingebunden werden, um einen grundlegenden Informationsaustausch zu ermöglichen. Dies erfordert die Vergabe einer (temporären) Adresse. In der Steuerung ist auch diese Gruppe von Geräten in der Regel statisch projektiert. Demnach muss die Adresse des Geräts auf den von der Steuerung erwarteten Wert abgestimmt werden. Analog zu den 4–20 mA-Geräten wird auch hier die Anpassung der Funktion über Parameter benötigt.

Ein weiteres Szenario stellen (MTP-)Module dar (blauer Kreis in Abb. 2.1). Die Module agieren als autonome Einheiten, welche über eine Dienstschnittstelle angebunden sind. Die Dienste verfügen über Parameter, welche die genaue Funktionsweise der Dienste regulieren. Die Kommunikation mit dem Modul erfolgt in den Referenzimplementierungen über OPC Unified Architecture (OPCUA) und damit über ein IP-basiertes Protokoll. Für die Einbindung von Modulen ist folglich eine Anpassung auf der Kommunikationssystem-Ebene nötig. Zudem ist potentiell die Anpassung der unteren Ebenen in der Steuerung erforderlich. Zum einen muss der Endpunkt (Adresse) angepasst werden, des weiteren können Änderungen bei relativen Referenzen (z. B. Knoten-IDs) nötig sein.

2.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die zentrale Aufgabe des Plug and Produce und die Randbedingungen eines solchen PnP-Systems beschrieben. Das PnP soll die leittechnische Eingliederung eines Feldgeräts in eine Anlage automatisieren. Für diese Eingliederung ist die Anpassung der Gerätekonfiguration, des Kommunikationssystems und der Anbindung in der Steuerung nötig. Dazu werden Beschreibungen der Rollen in der Anlage und der Fähigkeiten des Feldgeräts in Form von geeigneten durchgängigen Modellen benötigt.

Für den Einsatz in Bestandsanlagen ist zudem die Kompatibilität des PnP-Konzepts mit standardisierten technischen Lösungen zu berücksichtigen. Ebenso ist wichtig, das Konzept herstellerunabhängig zu gestalten, um eine weite Verbreitung und Akzeptanz zu erreichen. Um den Mehrwert einer automatisierten Feldgerätekonfiguration zu nutzen, bedarf es eines neuen PnP-Konzepts speziell für die Prozessautomation.

3 Grundlagen und Stand der Technik

In diesem Kapitel werden grundlegende Ansätze, auf denen das PnP-Konzept aufbaut, vorgestellt. Zunächst werden Möglichkeiten zur Beschreibung von Feldgeräten betrachtet, sowohl aus Anforderungssicht als auch aus Typ- und Instanzsicht. Anschließend werden bestehende Ansätze zur maschinenlesbaren Beschreibung von Semantik behandelt. Weiter werden Mechanismen beschrieben, die für die Bereitstellung benötigter Informationen genutzt werden können. Danach werden einige Kommunikationstechnologien aus dem industriellen Umfeld vorgestellt. Die Konzepte zu NOA, FDI und MTP werden aufgrund ihres Charakters als Querschnittsthemen einzeln beschrieben. Abschließend werden meine Vorarbeiten zum Thema vorgestellt und andere PnP-Konzepte aus der Literatur betrachtet.

3.1 Gerätebeschreibung

Für die Planung einer Anlage ist es notwendig, die benötigten Geräte zu beschreiben. Dabei lassen sich verschiedene Aspekte identifizieren. Die Anlage soll einen oder einige Prozesse durchführen können. Dazu werden Funktionen benötigt, welche in der Prozessindustrie oft als Rollen bezeichnet werden. Die Rolle eines Geräts ist der erste Ansatz einer Beschreibung des Geräts, welches die benötigte Funktion später ausführen soll. Zur Auswahl eines passenden Geräts werden Beschreibungen der Gerätetypen verwendet, wie sie in Katalogen von Herstellern vorzufinden sind. Die Entscheidung für einen konkreten Gerätetyp findet in der Regel relativ spät im Planungsprozess statt und wird auch von wirtschaftlichen Aspekten beeinflusst. Aus diesem Grund kann die Definition von Geräteklassen, d. h. Gruppierungen von Gerätetypen mit einem Subset von gleichen oder ähnlichen Eigenschaften, sinnvoll sein. Der letzte Schritt in der Planung ist die Beschreibung der spezifischen Einstellungen, die bei einem Gerät eingestellt werden müssen.

Alle diese Konzepte sind schon lange bekannt und etabliert [3]. Für die Verwendung im PnP-Konzept müssen diese Daten in digitaler Form vorliegen und die Semantik formal beschrieben sein. Im Folgenden werden bestehende Konzepte für die verschiedenen Aspekte vorgestellt.

3.1.1 Geräterollen

Die DIN SPEC 40912 definiert eine Rolle als „ein Element, das auf der einen Seite eine Realisierungseinheit in einem Modellsystem (Rollensystem) vertritt und auf der anderen Seite die Anforderungen an eine Realisierungseinheit spezifiziert“ [8]. Eine Geräterolle ist demnach ein Platzhalter für ein spezifisches Gerät in der Anlagenplanung, mit dem die benötigte Funktion beschrieben wird. Aus Sicht der Prozessautomatisierung gibt es Rollen für Feldgeräte, Kommunikationsinfrastrukturkomponenten sowie Steuerungsgeräte. In dieser Arbeit liegt der Fokus vornehmlich auf den Feldgeräten.

Die Feldgeräte bilden die Schnittstelle der Prozessautomatisierung zum Prozess. Über Sensoren kann Information aus dem Prozess generiert und über Aktoren auf diesen einwirkt werden. Diese Schnittstellen werden in der Prozessautomation oft als PLT-Stellen bezeichnet. Im R&I-Fließbild werden über PLT-Stellenkreise Eingriffspunkte in der Struktur der Anlage gekennzeichnet. Dabei wird nur der wichtigste Teil der Funktion spezifiziert. Die Darstellung von PLT-Stellen und eine Repräsentation in elektronischer Form wird in der IEC 62424 [34] standardisiert.

Eine volle Spezifikation der Funktion findet sich im sogenannten PLT-Stellenblatt [74]. Für dieses gibt es ebenfalls Ansätze zur Darstellung in elektronischer Form. Die NE 150 [63] spezifiziert eine Liste der wichtigen Eigenschaften aus Sicht des Leitsystem-Engineerings. Die Beschreibung der verfahrenstechnischen Sicht auf die PLT-Stelle ist in der NE 159 [64] festgehalten. Beide Sichten werden in der VDI/VDE Richtlinie 3697 formal als CAEX-Modell spezifiziert (NE150 in Blatt 1 [87]; NE159 in Blatt 2 [88]).

3.1.2 Gerätetyp

Die Großzahl der eingesetzten Feldgeräte sind keine Einzelanfertigungen, sondern Serienprodukte. Diese Serien lassen sich, unter Beachtung der Revision, als Gerätetypen beschreiben. Ein Gerätetyp fasst die gemeinsamen Merkmale seiner zugehörigen Geräteinstanzen zusammen. Dies macht den Gerätetyp im Engineeringprozess zu einem ausreichend genauen Planungsobjekt für das später eingesetzte Gerät. Für Gerätetypen existieren verschiedene Beschreibungsformen, abhängig von der benötigten Sicht auf das Gerät. Im Folgenden werden drei Ansätze zur Modellierung von Gerätetypen vorgestellt.

Die NE 100 [59] beschreibt eine Modellierungsform für Gerätetypen ausgelegt auf die Beschaffung passender Geräte für eine Anlagenplanung. Dabei kommen verschiedene Merkmalisten zum Einsatz, die in Transaktionen zwischen Betreiber und Lieferanten ausgetauscht werden. Neben organisatorischen Merkmalen unterscheidet die NE 100 hauptsächlich zwischen Gerät- und Betriebsmerkmalen. Gerätmerkmale beschreiben die technischen Eigenschaften des Gerätetyps. Dies können Ausstattung, Leistungsdaten usw. sein. Betriebsmerkmale beschreiben hingegen das betriebliche Umfeld, in dem das Gerät später betrieben werden soll, z. B. die maximale Umgebungstemperatur oder der maximale Prozessdruck. Damit werden, ähnlich zur Rolle, Anforderungen an das Gerät definiert, welche wiederum von entsprechenden Gerätmerkmalen erfüllt werden müssen. Alle Merkmale in der NE 100 werden über semantische IDs beschrieben.

Diedrich und Neumann [7] beschreiben ein Gerätetypmodell für Feldgeräte. Als Anforderungen für ein Modell werden fünf Gesichtspunkte definiert, die abgedeckt werden müssen: Deklaration von Elementen, Attribute für Elemente, Beziehungen zwischen Elementen, Bedingungen für Attribute und Bedingungen für Beziehungen. Die Strukturierung des Geräts erfolgt über drei Arten von Blöcken, in denen Parameter des Geräts organisiert sind. Ein Function-Block steht für eine Funktion des Geräts und enthält die diese Funktion betreffenden Parameter. Ein Transducer-Block beschreibt Parameter für die Mess- bzw. Stelleinheit des Feldgeräts. Letztlich enthält der Physical-Block Parameter, die das Gerät im Ganzen betreffen. Die Parameter können den Blöcken als Eingang, Ausgang oder interne Parameter zugewiesen werden. Bedingungen für den Wert eines Parameters sind über ein zusätzliches Modellelement spezifiziert.

Electronic Device Descriptions (EDDs) sind eine weitere Möglichkeit, Gerätetypen zu beschreiben. EDDs sind ein textuelles Beschreibungsformat, welches vor der Verwendung

zu Gerätemanagementzwecken von einem Interpreter verarbeitet werden muss. Das Modell für Gerätetypen in den EDDs ist in der IEC 61804-2 [31] spezifiziert. Die verfügbaren Sprachelemente der Electronic Device Description Language (EDDL) sind im folgenden Teil der Norm definiert [32]. Das Modell der EDDs folgt ebenfalls dem Funktionsbaustein-schema. Eingänge, Ausgänge und Parameter sind als Variablen definiert und können in Blöcken organisiert werden. Die Referenzierung erfolgt dabei über einen eindeutigen Namen. Eine maschinenlesbare Semantik stellt die EDDL nicht bereit. Des Weiteren erlaubt die Sprache die Definition von Bedienungsmenüs und Graphen, die für das PnP jedoch nicht relevant sind.

Neben der Struktur beschreibt die EDD auch Abläufe (Business-Logik). Dazu können Methoden definiert werden, die entweder alleinstehend oder in Verbindung mit spezifischen Ereignissen, z. B. beim Lesen oder Setzen eines Werts, Anwendung finden. So können auch Abhängigkeiten zwischen Parametern beschrieben und ein konsistenter Konfigurationsstand des Geräts sichergestellt werden. Ein weiterer Punkt ist die Spezifikation von Interaktionsmustern für verwendete Kommunikationsprotokolle. Über diese Muster wird der Aufbau der Nutzdaten für die Kommunikation beschrieben. Die Beschreibung definiert die Struktur der Daten für den Aufruf und die Antwort des Geräts und verknüpft diese mit den zuvor definierten Variablen. So können für beliebige herstellerspezifische Elemente Interaktionen dargestellt werden [32].

3.1.3 Gerätekasse

Die Festlegung auf einen konkreten Gerätetyp in den anfänglichen Phasen der Anlagenplanung ist selten praktikabel oder sinnvoll. Wird für eine Rolle keine spezielle Funktionalität benötigt, gibt es eine Vielzahl passender Gerätetypen. Ein abstrakter Typ, welcher Gerätetypen mit einer Schnittmenge gleicher Eigenschaften zusammenfasst, soll hier als Gerätekasse bezeichnet werden.

Wird in der Planung eine Gerätekasse spezifiziert, ist es aus prozessleittechnischer Sicht egal, welcher Gerätetyp gewählt wird. Dies schafft die Möglichkeit, Geräte anhand anderer Kriterien, wie z. B. Beschaffungskosten, Lieferzeiten oder Lagerbeständen, auszuwählen. Die NE 131 definiert eine Reihe von NAMUR-Standardgeräten für einige häufig auftretende Gerätefunktionen [60]. Auf der Sensorseite gibt es Geräteklassen für die Messgrößen Temperatur, Druck, Durchfluss und Füllstand. Für Aktorik wird nur die Positionsstellung behandelt. Die NE spezifiziert Eigenschaften und Parameter für die Geräteklassen, mit denen 80 % der Anwendungsfälle abgedeckt werden sollen. Dabei gibt es einen Satz, welcher für alle Klassen identisch ist. Den einzelnen abgeleiteten Klassen werden dann weitere funktionsspezifische Eigenschaften und Parameter hinzugefügt. Dadurch ergibt sich eine Vererbungsstruktur vom generellen NE-131-Standardgerät bis zum spezifischen Gerätetyp eines Herstellers.

3.1.4 Geräteinstanz

OPC UA spezifiziert ein eigenes Modell für Geräte (OPC UA DI) in Teil 100 der Norm [36]. Grundelement ist hierfür ein abstraktes Topologielement (*TopologyElement*). Diesem können Parameter und Methoden strukturiert in einem Parameter- bzw. Methoden-Set zugeordnet werden. Für eine funktionale Gruppierung steht ein weiteres Modellelement

zur Verfügung. Dabei können Parameter und Methoden in mehreren Gruppen verwendet werden.

Eine Spezialisierung des Topologieelements ist das Gerät (*Device*). Dieses Element ist ebenfalls abstrakt und muss vor Nutzung zu einem konkreten Gerätetyp spezialisiert werden. Danach können Geräteinstanzen beschrieben werden. Für das Modellelement Gerät werden zudem weitere Elemente beschrieben. Zum einen umfasst dies gerätespezifische Daten wie Seriennummer, Hersteller, Modell usw. Eine Variable für die Gerätegesundheit und Objekte zur Dokumentation des Geräts können optional beschrieben werden. Auch Angaben zu unterstützten Protokollen und Kommunikationsanschlusspunkten sind spezifizierbar.

Das Topologieelement kann zudem zu Blocktypen spezialisiert werden. Diese finden Anwendung für Geräte, die nach dem Funktionsbausteinschema beschrieben werden. Auch diese sind abstrakt und müssen erneut als spezifische Blocktypen modelliert werden. Für die Blöcke stehen die Elemente Parameter, Methoden und funktionale Gruppen durch die Vererbung zur Verfügung. Die Blöcke können dann unter einem Gerät genutzt werden.

Das Process Automation Device Information Model (PA-DIM) ist eine Companion Spezifikation für OPC UA, entwickelt von einem Konsortium aus FieldComm Group, OPC Foundation und PROFIBUS Nutzerorganisation e.V. [72]. Ziel der Spezifikation ist ein Modell zur einheitlichen Darstellung von Feldgeräten der Prozessindustrie in OPC UA. Abb. 3.1 zeigt eine vereinfachte Darstellung des PA-DIM. Das zentrale Element ist der *PADIMType*. Diesem können eine Reihe von Variablen (abgerundete Rechtecke) und Funktionen (Ellipsen) zugeordnet werden. Zudem existieren Elemente mit weiteren Unterelementen, welche durch Rechtecke gekennzeichnet sind.

Die Variablen und Funktionen sind thematischen Bereichen zugeordnet, für die PA-DIM zusätzlich Interface-Klassen definiert. Die Strukturierung der Bereiche und der enthaltenen Daten und Funktionen orientieren sich unter anderem an den in NOA (vgl. Kap. 3.5) definierten Use-Cases.

Der Bereich *TagNameplate* beinhaltet nur eine ID für das Asset (hier das Gerät). Hinzu kommt der Bereich *VendorNameplate*. Dieser enthält Informationen zu Seriennummer, Hersteller, Gerätemodell und weiterem. Als nächstes ist der Bereich *Administration* zu nennen. Dieser enthält Daten zur Anzeigesprache und den Zeitpunkt der letzten Änderung sowie eine Funktion zum Zurücksetzen der Einstellungen. Des Weiteren existiert ein Bereich für den Gesundheitszustand des Geräts.

Schließlich existiert ein Bereich für Signale. Alle Signale werden in einem Set zusammengefasst. Die Typen für Signale werden für einzelne Messgrößen weiter spezialisiert. Jedes Signal verfügt mindestens über einen Tag und optional eine Einstellung zum Aktivieren eines Simulationsmodus. Grundsätzlich unterscheidet PA-DIM zwischen kontinuierlichen und diskreten Signalen. Den simpelsten Fall eines diskreten Signals stellt ein binärer Aktor oder Sensor dar. Kontinuierliche Signale stellen analoge Mess- und Stellwerte dar. Beide Arten von Signalen besitzen einen Wert. Für Anwendungsfälle, in denen eine Simulation verfügbar ist, wird zusätzlich zwischen dem echten und dem simulierten Wert differenziert.

Für analoge Signale existieren weitere Spezialisierungen für verschiedene Mess- bzw. Stellgrößen. Diese bieten typspezifische Eigenschaften und Methoden. Eine Übersicht der spezifizierten Spezialisierungen mit den hinzugefügten Attributen ist in Tab. 3.1 gezeigt.

Zur Spezifikation der Semantik besitzt jedes Element eines PA-DIM-Modells eine Referenz auf einen Eintrag in einem IRDI-Dictionary. Diese Verweise sind aus Gründen der Übersichtlichkeit in der Abbildung nicht mit dargestellt. Die Dictionary-Einträge besitzen

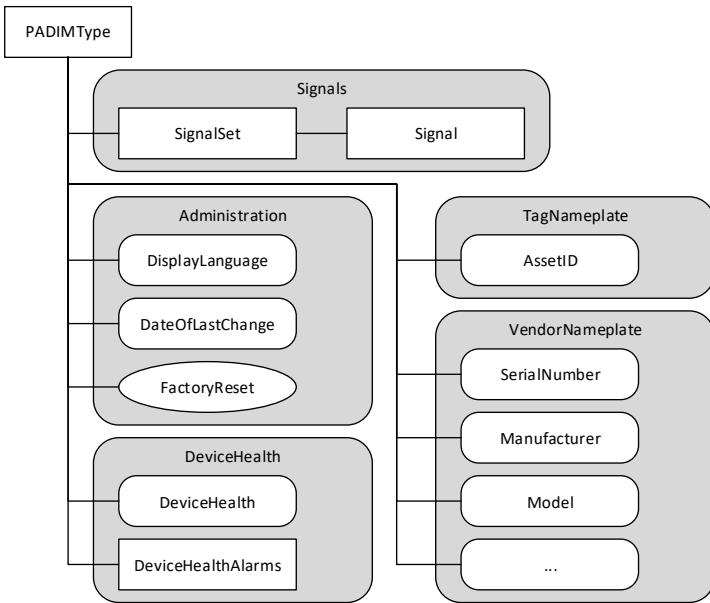


Abbildung 3.1: Vereinfachtes Modell von PA-DIM

Tabelle 3.1: Spezialisierung für analoge Signale in PA-DIM

Signaltyp	Zusätzliche Attribute
Analytische Messung	-
Druck	-
Füllstand	-
Durchfluss (Masse, Volumen, Normvolumen)	Fließrichtung, Unterer Schwellenwert
Temperatur	Sensortyp, Verbindungstyp, Referenzwert
Dichte	-
Regelung	Sollwert, Wirkrichtung, Aktortyp
Totalisierer	Pulsbreite, Pulswert

eine semantische ID und referenzieren eine Eigenschaft aus dem CDD. Durch die Modellierung als Referenz können alle Verwendungen einer ID effektiv bestimmt werden.

FDI besitzt als Feldgeräteintegrationskonzept ebenfalls ein Darstellungsschema für Geräteinstanzen. Dieses wird in Kapitel 3.6 zusammen mit den anderen Aspekten von Field Device Integration (FDI) beschrieben.

3.2 Beschreibung von Semantik

Damit ein PnP-Konzept funktioniert, müssen Anforderungen, Zusicherungen und Konfiguration in Einklang gebracht werden. Dafür muss eine automatische Analyse dieser Aspekte ermöglicht werden. Neben den einzelnen Eigenschaftswerten erfordert dies eine strukturierte und maschinenlesbare Beschreibung der Semantik einzelner Datenpunkte.

Es ist entscheidend, zu welcher Eigenschaft eine Aussage getroffen wird und in welcher Beziehung das Datum der Aussage mit der Eigenschaft steht. Diese Punkte werden in den folgenden Abschnitten behandelt.

3.2.1 Merkmalbibliotheken

In der Prozess- und Fertigungsindustrie wird Semantik durch Bezüge auf sogenannte Merkmalbibliotheken beschrieben. Eine Merkmalbibliothek ist ein Modell, in dem Merkmale und deren Beziehungen zueinander beschrieben werden. Merkmale können in einer Spezialisierungshierarchie von generelleren Merkmalen abgeleitet und in thematischen Gruppen organisiert werden. Jedes Merkmal in einer Bibliothek erhält eine eindeutige Kennung, mit der auf diesen Eintrag verwiesen werden kann. Die IEC 61360-2 [28] definiert ein solches Modell zur Strukturierung und erläutert eine Vorschrift zur Erzeugung der referenzierbaren Kennung, einer sogenannten semantischen ID.

Die Merkmalbibliothek eCl@ss vom gleichnamigen Verein ist eine, in der deutschen Industrie weit verbreitete, Lösung. Aufgrund der initialen Entwicklung für den Produktein- und -verkauf, ist eCl@ss nach Produkten organisiert, welche durch eine vierstufige Hierarchie gegliedert sind. Den einzelnen Produkten sind dann eine Reihe von Merkmalen zugeordnet, die zur Beschreibung dieses Produkts angewendet werden können. Ein Merkmal kann dabei wiederverwendet und beliebig vielen Produkten zugeordnet werden.

Eine internationale Alternative zu eCl@ss ist das Common Data Dictionary (CDD). Das CDD wird von der IEC unterhalten und bietet ebenfalls eine elektronische Schnittstelle an. Zur Zeit gibt es Bibliotheken zu drei unterschiedlichen Gebieten, formal definiert durch einzelne Normen bzw. Normreihen:

- IEC 61360-4 für elektronische Komponenten
- IEC 61987 für die Prozessautomation
- IEC 62683 für Niederspannungsschaltgeräte

Für das PnP sind besonders die Merkmalisten für Feldgeräte aus der IEC 61987 [33] von Interesse. Die Norm unterscheidet dabei zwischen Merkmalisten für betriebsbezogene Merkmale und gerätebezogene Merkmale. Unter beiden Kategorien gibt es Listen für verschiedene Aufgaben bzw. Geräteklassen.

Innerhalb des Modells einer Merkmalbibliothek ist es im begrenzten Umfang möglich, Relationen zwischen Merkmalen zu ermitteln, wenn diese über die Vererbungshierarchie verknüpft sind. Ein Abgleich zwischen verschiedenen Bibliotheken ist in einigen Fällen selbst für einen Menschen schwierig und teilweise nicht eindeutig möglich. In der Praxis wird in der Regel nur auf Gleichheit der semantischen IDs geprüft, um zwei Datenpunkte einander zuzuordnen.

3.2.2 Strukturierung von Eigenschaftsaussagen

Die Definition von Merkmalen ist nur der erste Schritt. Um diese Merkmale nutzen zu können, bedarf es eines Schemas zur Verknüpfung mit einem Wert. Eigenschaftsaussagen, oder genauer Eigenschaftsausprägungsaussagen, bilden einen generischen Ansatz für eine solche Verknüpfung.

Kampert und Epple [49] beschreiben ein Konzept zur semantischen Beschreibung von Assets. Grundlage der Beschreibung sind Eigenschaften und Aussagen zu diesen Eigenschaften. Eigenschaften können einem Träger oder Trägertyp zugeordnet werden, den sie charakterisieren. Da Eigenschaften der realen Welt oft nicht exakt bekannt sind, werden stattdessen Aussagen getroffen, die mit einer gewissen Unsicherheit behaftet sein können. Bei den Aussagen wird zwischen Anforderungen, Zusagen und Aktualwerten unterschieden.

Epple et al. [14] präsentieren eine Weiterentwicklung des Konzepts. Träger werden hier als Dinge bezeichnet, die einen oder mehrere Trägertypen realisieren können. Die spezifischen Eigenschaften sind diesem Ding zugeordnet. Trägertypen verfügen über generelle Eigenschaften, die in einem Beschreibungsmo dell unabhängig vom Trägertyp definiert sind. Die Eigenschaftsaussagen bilden ein eigenständiges Modell und verweisen nur noch auf das Ding (und sind diesem nicht untergeordnet) sowie auf die Beschreibung der generellen Eigenschaft. Zudem wird die Modellstruktur der Aussagen konkretisiert. Als Aussagetypen wird neben Anforderung und Zusage noch zwischen Messung und Einstellung unterschieden.

Auf der Basis dieses Modells spezifiziert die DIN SPEC 92000 [10] ein Modell für die Formulierung von Eigenschaftsaussagen. Die Modellierung teilt sich in eine abstrakte und eine konkrete Ebene auf (vgl. Abb. 3.2). Ein Grundgedanke des Modells ist, dass Eigenschaften einem Träger zugeordnet sind. Auf der abstrakten Ebene gibt es Eigenschaftsträgerurtypen. Diesen Urtypen werden allgemeine Eigenschaften zugeordnet, die eine Beschreibung einer Eigenschaft darstellen. Auf der abstrakten Ebene kann so beschrieben werden, dass z.B. ein „Tisch“ die Eigenschaft „Höhe“ besitzt und was „Höhe“ bedeutet.

Die konkrete Ebene befasst sich mit der Beschreibung von spezifischen Objekten. Die Objekte sind Träger von Eigenschaften und können Eigenschaftsträgerurtypen zugeordnet werden. Den Objekten können weiter konkrete Eigenschaften angehängt werden, welche wiederum von den allgemeinen Eigenschaften des Trägerurtyps beschrieben sind. Den konkreten Eigenschaften können Eigenschaftswerte zugewiesen werden.

Die Festlegung der Eigenschaftswerte eines Objekts ist jedoch nur eine Modalität, eine Eigenschaftsaussage zu treffen. Die DIN SPEC 92000 beschreibt eine Reihe von Aspekten für Eigenschaftsaussagen:

- **Eigenschafts-ID:** Ein Verweis auf die Beschreibung der Eigenschaft. Hier werden in vielen Fällen die semantischen IDs aus den Merkmalbibliotheken verwendet.
- **Subjekt-ID:** Verweis auf den Träger der Eigenschaft.

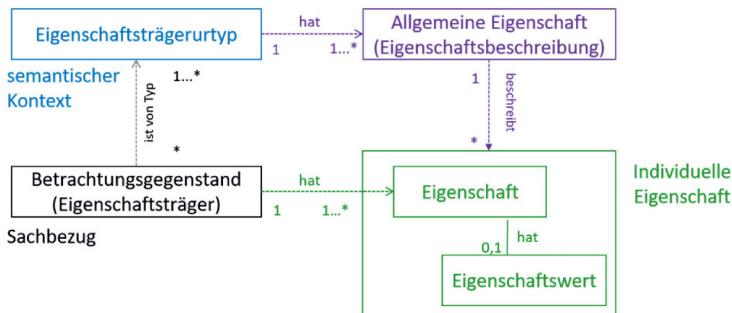


Abbildung 3.2: Grundlegendes Eigenschaftsmodell (aus DIN SPEC 92000 [10])

- **Aussagesemantik:** Die Semantik, welche mit der Aussage verknüpft ist. Die DIN SPEC nennt hier Anforderung, Zusicherung, Angebot, Istwert und Statement.
- **Aussagewert:** Der Referenzwert, der mit dem Eigenschaftswert in Relation gesetzt wird.
- **Aussagerelation:** Der Relationsoperator, mit dem Aussagewert und Eigenschaftswert verknüpft sind. Je nach Skala des Eigenschaftswerts sind hier verschiedene Optionen möglich. Die DIN SPEC kennt unter anderem Operatoren für gleich, ungleich, kleiner, größer und inner- oder außerhalb eines Intervalls. Operatoren für diskrete Mengen sind in der aktuellen Version nicht berücksichtigt.

Mit diesen Aspekten können eine Reihe von Aussagen getroffen und miteinander abgeglichen werden. Die verschiedenen Modalitäten, die ein solcher Abgleich von Aussagen annehmen kann, werden von Deppe et al. [5] ausführlich erörtert. Für das PnP ist vornehmlich der Abgleich zwischen Anforderungen (von der Rolle) sowie Zusicherungen (vom Gerätetyp) und Statements (zu Parametern im Gerät) von Bedeutung. In welchen Konstellationen eine Anforderung erfüllt wird, hängt maßgeblich von der Aussagerelation ab. Wird eine Gleichheit gefordert, muss die Zusicherung bzw. das Statement ebenfalls eine Gleichheitsaussage sein. Bei Intervallen als Anforderungen muss die Gegenseite eine Gleichheit oder ein Intervall sein, welches komplett im Intervall der Anforderung enthalten ist.

Die Beschreibung der Grenzen, in denen Parameter eingestellt werden können, stammen aus dem Gerätetyp und sind in der Form von Zusicherungen formuliert. Bei der Behandlung im Abgleich wechselt hier jedoch die Rolle von Anforderung und Zusicherung. Die Parametergrenzen beschreiben alle Werte, die der Parameter annehmen kann. Die Anforderung bezieht sich hingegen auf den Parameterwert, welcher später im Gerät konfiguriert wird. Der Bereich der Zusicherungen muss in diesem Fall den Bereich der Anforderung einschließen.

Die DIN SPEC sieht in der aktuellen Fassung keine Werteklasse für Mengen vor. Im Rahmen von PnP treten Eigenschaften auf, die nur als Menge von Werten ausgedrückt werden können. Dies betrifft die Beschreibung von Parametern, die nur diskrete Werte

annehmen können. Beispiele hierfür sind Mengen von numerischen Werten oder Optionen, in denen Kategorien ausgewählt werden müssen, wie bei der Auswahl von Messeinheiten aus einer Liste von zutreffenden Optionen, usw. Dadurch ergeben sich neue Aussagerelationen in Bezug auf Mengen. Diese umfassen unter anderem „ist enthalten“, „ist Untermenge“ und „ist identisch“.

3.3 Informationsbereitstellung

Zur Durchführung einer automatischen Konfiguration im Rahmen des PnP bedarf es spezifischer Informationen zu Rollen, Gerätetypen und konkreten Feldgeräten. Im Folgenden sind einige Mechanismen zur Bereitstellung solcher Informationen beschrieben.

3.3.1 Verwaltungsschalen

Zum Voranbringen der Digitalisierung in der Industrie hat die Plattform Industrie 4.0¹ das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0) erarbeitet. Zentraler Punkt der Architektur ist die Definition von sogenannten I4.0-Komponenten [86]. Diese sind ein Zusammenschluss eines werthaltigen Objekts, dem Asset, und einer diesem Asset zugeordneten Verwaltungsschnittstelle, einer Verwaltungsschale [9]. Beim Asset kann es sich um ein physisches Ding oder ein Objekt in der Informationswelt handeln. I4.0-Komponenten sind über IDs global eindeutig identifizierbar. Ein Zusammenschluss mehrerer I4.0-Komponenten bildet ein I4.0-System, in dem Teilnehmer über I4.0-konforme Kommunikation miteinander interagieren können [82].

Ein frühes Modell für Verwaltungsschalen ist von Palm und Epple [75] beschrieben. Das Modell stützt sich stark auf Property Value Statements (PVSen), um Informationen zum Assets darzustellen. Die PVSen sind in Listen organisiert. Eine Strukturierung mittels Teilmodellen ist optional. Weitere Modellelemente sind ein Lebenszyklusarchiv sowie Sichten und Dienste.

Ein weiterentwickeltes Modell der Verwaltungsschale wird von der Plattform Industrie 4.0 spezifiziert [6]. Dabei sind die verpflichtenden Angaben zur Referenzierung des Assets umfangreicher. Zudem ist die Nutzung von Teilmodellen vorgeschrieben. Die Elemente in einem Teilmodell umfassen Eigenschaften, Sammlungen, Operationen, Dateien und weitere. Die Teilmodellelemente sind über Referenzen auf (externe) Eigenschaftsbeschreibungen semantisch annotiert. Zudem können solche Elemente über Qualifizierer um weitere Aspekte ergänzt werden. Dies erlaubt eine leichtere Abbildung anderer Modelle im Modell der Verwaltungsschale.

3.3.2 Engineering-Werkzeuge

In der Regel werden Planungsprozesse in der Prozessautomation durch CAE-Werkzeuge unterstützt oder komplett in ihnen abgewickelt. Für verschiedene Gewerke kommen dabei unterschiedliche Werkzeuge zum Einsatz. Für eine Erhöhung der Durchgängigkeit von Planungsdaten werden standardisierte Austauschformate benötigt. CAEX und AML bieten

¹<https://www.plattform-i40.de>

zwei Sprachen zur Definition solcher Formate im Kontext der Prozess- und Fertigungstechnik [34, 40]. Die Meta-Modelle für konkrete Aspekte werden durch die Definition von Bibliotheken erstellt. Die spezifische Semantik einzelner Modellelemente kann implizit (durch den Typ) oder explizit (mittels semantischer IDs) enthalten sein. Beispiele für solche Meta-Modelle sind PLCopen, MTP oder die PLT-Stellenbeschreibung nach NE 150 [21, 89, 87].

Planungsdaten können mithilfe dieser Modelle exportiert und in anderen Systemen wieder importiert werden. Dies kann auch für das PnP genutzt werden, in dem Informationen aus der Planung bezüglich vorgesehener Rollen benötigt werden.

3.4 Kommunikation

Kommunikation ist ein zentrales Thema in der Prozessautomation. Über Kommunikationssysteme werden Informationen zwischen verschiedenen Orten und Systemen in der Anlage und darüber hinaus übertragen. In der Prozessautomation wird dabei oft zwischen Prozesskommunikation und zusätzlicher Kommunikation unterschieden. Dabei gelten für die Prozesskommunikation strengere Anforderungen, vor allem in Hinsicht auf Verfügbarkeit, Verlässlichkeit und Echtzeitfähigkeit. Aus diesem Grund gibt es viele Ansätze zur logischen und teilweise physikalischen Trennung dieser beiden Arten von Kommunikation. Hier wird auch oft vom „zweiten Kanal“ gesprochen.

Im Laufe der Zeit wurden eine Vielzahl von Protokollen entwickelt, jedes mit seinen eigenen Vor- und Nachteilen. Rein signalbasierte Lösungen müssen in dieser Arbeit ausgeklammert werden, da sie keine Fernkonfiguration der Geräte erlauben und damit die Anforderungen aus Kapitel 2 nicht erfüllen.

Ein Standardmodell, um Kommunikationsprotokolle zu beschreiben und einzuordnen, ist das OSI-Referenzmodell [46]. Dieses teilt Kommunikationssysteme in 7 Schichten auf, die unterschiedliche Funktionen erfüllen sollen. Dabei ist angedacht, dass Technologien auf einer Schicht durch eine andere Technologie ausgetauscht werden können, ohne über- bzw. unterlagerte Schichten zu beeinflussen. Die Schichten sind, in aufsteigender Reihenfolge: Bitübertragung, Sicherung, Vermittlung, Transport, Sitzung, Darstellung und Anwendung.

Die IEC 61158 [29] enthält einheitliche Beschreibungen für verschiedene industrielle Kommunikationsprotokolle. Das vereinheitlichte Modell der Norm umfasst hier nur die beiden unteren und die Anwendungs-Schicht des OSI-Modells.

3.4.1 HART-Protokoll

Das Highway Addressable Remote Transducer (HART)-Protokoll wird meist im Zusammenhang mit der 4–20 mA-Technik verwendet. Das Protokoll wird in der IEC 61158 [22] spezifiziert. 4–20 mA-Geräte finden, wegen ihres simplen Wirkprinzips und der damit verbundenen Robustheit, auch heutzutage noch breite Anwendung. Mit dem HART-Protokoll kann, neben der Übertragung des Prozesswerts über das Stromsignal, digital mit dem Feldgerät kommuniziert werden.

Die Übertragung der Bits erfolgt über das Aufmodulieren von hochfrequenten Schwingungen auf das Stromsignal mittels Frequenzumtastung (engl. Frequency Shift Keying, FSK). Dabei kommen die Frequenzen 1200 Hz (1) und 2200 Hz (0) zum Einsatz. Diese Frequenzen liegen in der Regel deutlich über den Frequenzen des Mess- bzw. Stellsignals und lassen sich durch Filter gut von diesem trennen. [23]

Neben der Verwendung bei Punkt-zu-Punkt-Verbindungen sieht die HART-Spezifikation die sogenannte „Multidrop“-Konfiguration vor. Bei dieser Konfiguration werden die Geräte meist parallel verschaltet. Dies bedeutet, dass das 4–20 mA-Signal nicht genutzt werden kann. In diesen Fällen kann HART wie ein Feldbus genutzt und die Prozesswerte können mittels Nachrichten übertragen werden. Alternativ kann die HART-Kommunikation zusätzlich zu einer regulären Signalverbindung genutzt werden. Durch die Verknüpfung mehrerer Feldgeräte kann die Anzahl benötigter HART-Modems auf Seiten der Steuerung bzw. Remote-IO eingespart werden. Eine Zusammenschaltung in Reihe ist ebenfalls möglich, solange nur ein Gerät das analoge Signal benötigt oder mehrere Geräte in einer Split-Range-Konfiguration dasselbe Signal nutzen. In einer direkten Verschaltung können maximal 16 Geräte zusammen betrieben werden. [56]

Über die Zeit gab es mehrere Revisionen des Standards. Dabei wurden neue Funktionen hinzugefügt und bestehende erweitert. Seit der aktuellen Revision 7 ist WirelessHART hinzugekommen. Dabei werden die unteren Ebenen der Kommunikation durch eine 2.4 GHz Funkverbindung abgedeckt.

In Konfigurationen mit mehreren HART-Geräten ist es nötig, Geräte adressieren zu können, um mit einem spezifischen Feldgerät zu interagieren. Für diesen Zweck sieht das Konzept zwei Arten von Adressen vor. Die erste ist die sogenannte Polling-Adresse. Diese ist eine Zahl zwischen 0 und 15 und kann zum Finden aller angeschlossenen Geräte verwendet werden. Zusätzlich gibt es eine eindeutige (engl. unique) Adresse, welche aus der HART-Gerätetypkennung und einer Gerät-ID gebildet wird. Die Informationen hierfür können über das HART-Kommando 0 abgerufen werden. [24]

Die Kommunikation über HART funktioniert mittels Kommandos [26]. Diese Kommandos werden von einem Master verschickt und von dem adressierten Feldgerät beantwortet. Die Art des Kommandos und die damit verbundene Funktion wird über eine Zahl, die Kommandonummer, spezifiziert.

Das Kommando 0 ist eine Basisfunktion, mit der identifizierende Informationen durch Angabe einer Polling-Adresse ausgelesen werden können. Die Kommandos 11 und 21 geben diese Informationen ebenfalls zurück, jedoch nur, wenn der im Kommando definierte Tag mit dem im Gerät konfigurierten übereinstimmt. Generell lassen sich die Kommandos in drei Kategorien einteilen:

1. **Universell:** Diese Kommandos müssen von jedem HART-Gerät unterstützt und implementiert werden. Kommandos mit den Nummern 0 bis 30 fallen in diese Kategorie. Das Format des Kommandos und der Antwort ist in der Spezifikation festgelegt.
2. **Gebräuchlich (engl. Common Practice):** Diese Kommandos sind optional und müssen nicht unterstützt werden. Dies ist meistens der Fall, wenn das Kommando eine Funktion betrifft, die das Gerät nicht besitzt. Die Strukturierung der Daten ist ebenfalls fest spezifiziert. Ein Gerät implementiert das Kommando in der definierten Form oder gar nicht. Diese Kategorie umfasst die Kommandos 32 bis 126.
3. **Herstellerspezifisch:** Diese Kommandos können frei vom Gerätehersteller definiert und verwendet werden. Geräte von unterschiedlichen Typen können unter dem gleichen Kommando andere Funktionen implementieren. Die im Kommando und der Antwort mitgelieferten Informationen und deren Format können beliebig gewählt werden. Die Kommandonummern 128 bis 253 sind für diese Kategorie reserviert.

Für die universellen und gebräuchlichen Kommandos kann die Generierung der Kommandos und Interpretierung der Antworten mit den Informationen der Spezifikation durchgeführt werden. Die Verwendung der weiteren Kommandos erfordert eine Beschreibung verfügbarer Kommandos und des Aufbaus der ausgetauschten Nutzdaten.

3.4.2 Profibus

Profibus ist ein Feldbusstandard für die Automatisierungstechnik. Das Protokoll wurde in den 90er Jahren mit öffentlicher Förderung in Deutschland entwickelt und wird seitdem durch die PROFIBUS Nutzerorganisation e.V. verwaltet. Profibus ist auch Bestandteil der IEC 61158, in der verschiedene Feldkommunikationsprotokolle nach einem einheitlichen Aufbau beschrieben werden [22].

Profibus verfügt über zwei Profile, DP (Dezentrale Peripherie) und PA (Prozess-Automation). Das DP-Profil erlaubt höhere Übertragungsraten im Vergleich zu PA. Als Übertragungsmedium kommen verdrillte Zweidrahtleitungen oder Lichtwellenleiter zum Einsatz. Für die Prozessindustrie bietet das PA-Profil den Vorteil, dass mit geeigneten Einspeisegeräten ein eigensicherer Explosionsschutz erzielt werden kann und gleichzeitig die Feldgeräte über die Busleitung mit Energie versorgt werden. Damit bildet Profibus eine digitale Alternative zur klassischen Verdrahtung. In der Praxis werden häufig Feldgeräte über das PA-Profil an Remote-IOs außerhalb der explosionsgefährdeten Bereiche angeschlossen. Die Daten aus den Remote-IOs können dann über das DP-Profil mit seinen höheren Übertragungsraten an das Leitsystem geleitet werden [55].

Profibus unterscheidet zwischen drei Klassen von Geräten: Master Klasse 1 und 2 sowie Slaves. Die Kommunikation auf dem Bus wird durch die Master-Geräte koordiniert. Bei mehreren Mاستern an einem Bus wird ein Token-Verfahren für den Wechsel des aktiven Masters verwendet. Der Unterschied zwischen den beiden Master-Klassen besteht darin, dass nur Master der Klasse 1 Prozesswerte mit den Slaves austauschen. Master der Klasse 2 sind für Konfigurations- oder Diagnoseaufgaben zuständig. Slave-Geräte sind meist Feldgeräte, welche Prozesswerte bereitstellen.

Profibus definiert die Schichten 1, 2 und 7 des OSI-Modells. Aus Sicht des PnP sind die bereitgestellten Funktionen in Schicht 7 von Interesse. Die Funktionen eines Slaves können durch Applikationsprozesse (APs) strukturiert werden. Dies findet besonders bei modularen Gerät Anwendung. Jedes Slave-Gerät muss mindestens über einen AP mit dem Index 0 verfügen. Dieser AP ist für das Gerät als Ganzes zuständig. Orthogonal zu den APs sind Applikationsdiensteinheiten (ASEs) definiert. Jede ASE ist für einen spezifischen Aspekt verantwortlich. Beispiele für ASEs sind *Context*, *I/O Data*, *Alarm* usw. Für das PnP sind die *Context*-ASEs für die Konfiguration des Geräts und die *Function-Invocation*-ASE für die Bereitstellung von Identifikationsmethoden relevant. Aus Prozessführungssicht sind weiterhin die *I/O-Data*-ASE für die Bereitstellung der Prozesswerte und die *Application-Relationship*-ASE zum Aufbau der Kommunikationsverbindung zwischen der Steuerung und dem Feldgerät wichtig.

Die Adressierung in Profibus erfolgt über numerische IDs zwischen 0 und 127. Bei der Adresse 127 handelt es sich um die Broadcast-Adresse, um Nachrichten an alle Geräte simultan zu senden. Die Adresse 126 ist als Standardadresse für neue Geräte designiert, welche noch nicht in die Buskommunikation integriert wurden [27].

3.4.3 IP-Netzwerke

Das Internet Protocol (IP) [80] bildet die Grundlage für das moderne Internet mit all seinen Technologien und Diensten. Dies hat dazu geführt, dass viele Ressourcen für die Weiterentwicklung dieser Technologien aufgewendet wurden und kompatible Hardware günstig produziert werden kann. Die hohe Verfügbarkeit kompatibler Geräte und die hohe Leistungsfähigkeit im Vergleich zu älteren Kommunikationsstandards aus der Prozessindustrie haben zur Entwicklung IP-basierter Protokolle für leittechnische Systeme geführt. Da die als IP-Suite bezeichnete Sammlung von Mechanismen oft auch von auf IP aufbauenden Protokollen genutzt werden, werden diese Mechanismen hier separat vorgestellt.

IP beschreibt die dritte Schicht des Open Systems Interconnection (OSI)-Modells. Für Netzwerke mit elektrischen Leitern als Verbindung zwischen den Komponenten kommt in der Regel Ethernet [45] als Technologie für die Schichten 1 und 2 zum Einsatz. Der Standard beschreibt eine Reihe von physikalischen Trägern, der gebräuchlichste ist ein Kabel mit vier verdrehten Kabelpaaren und verschiedenen Stufen von Schirmung. Diese Kabel bilden Punkt-zu-Punkt-Verbindungen zwischen den verschiedenen Netzwerkkomponenten, sodass das physikalische Medium nicht zwischen Teilnehmern geteilt werden muss. Über den *Auto-Negotiation*-Mechanismus wird das Herstellen der Verbindung signalisiert und die von beiden Seiten unterstützte Übertragungsrate verhandelt [45].

Für IP existieren zwei dominante Versionen, IPv4 und IPv6. IPv6 stellt einen erheblich größeren Adresspool zur Verfügung. Für die abgetrennten Netzwerke der Prozessautomation sind die privaten Adressbereiche von IPv4 jedoch mehr als ausreichend².

Durch den Überfluss an Adressen kann IPv6 Mechanismen zur automatischen Adressvergabe bereitstellen, bei denen kein weiteres System benötigt wird [85]. Für IPv4 steht hier der DHCP-Mechanismus zur Verfügung [12]. Dabei koordiniert ein DHCP-Server die Vergabe von Adressen. Die Anfrage für eine Adresse erfolgt über eine Broadcast-Nachricht auf der unterlagerten Schicht.

Ein weiterer, viel genutzter Standard ist das Domain Name System (DNS) [58]. Dieses System ermöglicht die dynamische Auflösung von Domännamen zu IP-Adressen. So können Wechsel der Adressen abgefangen werden, ohne die Adresse beim anfragenden System anpassen zu müssen.

Das IP-Protokoll und der meist unterlagerte Ethernet-Layer sind fundamental dezentral organisiert und nicht deterministisch echtzeitfähig. Im industriellen Umfeld wird oft mit Reserven in der Bandbreite gearbeitet, um die Wahrscheinlichkeit für eine Verletzung der Echtzeit unter einen akzeptierten Grenzwert zu senken [30]. Für Anwendungsfälle, in denen eine deterministische Einhaltung der Echtzeit erforderlich ist, besteht die Möglichkeit, den Ethernet-Layer durch einen deterministischen Layer zu ersetzen, z. B. Time-Sensitive Networking (TSN) [19].

3.4.4 Profinet

Profinet ist ein offener Kommunikationsstandard für die Prozessautomation, aufbauend auf Ethernet und mit optionaler Kompatibilität zu IP. Das Protokoll ist in der IEC 61187 unter der Protokollfamilie 3 mit der Typnummer 10 spezifiziert [22].

Profinet spezifiziert vier Gerätetassen. Steuerungen gehören in die Klasse *IO-Controller* und sind für die Prozessführung zuständig. *IO-Devices* sind die Feldgeräte, die von den

²Der größte private Bereich enthält mehr als 16 Mio. Adressen.

IO-Controllern gesteuert werden. Die Klasse *IO-Supervisor* ist für Engineering-Werkzeuge gedacht, welche Diagnose- und Konfigurationsaufgaben für die Feldgeräte durchführen. Die vierte Klasse umfasst weitere Netzwerkkomponenten, die für die Verteilung und Weiterleitung von Datenpaketen zuständig sind.

In der Regel nutzt Profibus Ethernet auf den Schichten 1 und 2 des OSI-Modells, wahlweise über elektrische oder Lichtwellenleiter. In einigen Profilen ist auch die Nutzung von drahtlosen Technologien zulässig. Die Adressierung von Geräten erfolgt über IPv4-Adressen oder einen Gerätenamen. Die Nutzung von IP- und UDP- bzw. TCP-Schichten ist optional, d. h. die Applikationsschicht von Profinet kann auch direkt über Schicht 2 agieren. Die Vergabe der IP-Adressen erfolgt über das Discovery and basic Configuration Protocol (DCP). Alternativ kann über DCP auch die Nutzung von DHCP konfiguriert werden. Weitere optional unterstützte Features sind unter anderem Remote Procedure Call [93], IP-Multicasts und DNS [25].

Profinet spezifiziert mehrere Profile (A-C), die Anforderungen an die unterstützten Features und die Leistungsdaten der konformen Geräte stellen [30]. Features können uneingeschränkt oder eingeschränkt enthalten, optional oder nicht enthalten sein. Jedes Profil, angefangen bei A, erweitert dabei den Funktionsumfang.

Für die Prozesskommunikation nutzt Profinet auf der Applikationsschicht dasselbe Modell wie Profibus. Einzelne Funktionen der Feldgeräte sind in APs organisiert. Verschiedene Aspekte dieser APs sind ebenfalls über ASEs strukturiert. Die zur Verfügung gestellten Typen von ASEs bauen auf denen des Profibus-Protokolls auf. Von großer Bedeutung (vor allem im Kontext des PnP) sind die *Real-Identification-, Application-Relationship- und Communication-Interface-Management-ASE* [25]. Die *Real-Identification-ASE* ist für den Zugriff auf die Feldgeräte zuständig. Dies umfasst den Austausch von IO-Daten, die Parametrierung des Geräts und die Bestimmung von Identifikationsdaten. Mit der *Application-Relationship-ASE* werden Verbindungen zwischen Steuerungen und Feldgeräten verwaltet. Es wird hauptsächlich zwischen zyklischen (IO-Daten), azyklischen (Parametrierung) und eventbasierten (Alarmmeldung) Verbindungen unterschieden. Die *Communication-Interface-Management-ASE* ist für die Einrichtung des Gerätenamens und der Adresse zuständig.

3.4.5 OPC UA

OPC Unified Architecture (OPC UA) ist ein offenes, standardisiertes Kommunikationsprotokoll für die Kommunikation zwischen Maschinen in der industriellen Automation. Das Protokoll ist in der IEC 62541 [44] standardisiert. Zu den wesentlichen Merkmalen gehören das integrierte und erweiterbare Informationsmodell, der starke Fokus auf Security sowie die Verfügbarkeit von Implementierungen für viele Plattformen und Programmiersprachen. OPC UA funktioniert nach einem Client-Server-Modell und setzt eine serviceorientierte Architektur um. Im OSI-Modell belegt OPC UA die Schichten oberhalb der Transportschicht (5-7). Auf der Transportschicht (4) und der Vermittlungsschicht (3) ist TCP/IP vorgeschrieben.

OPC UA-Server verfügen über ein Informationsmodell, welches zur Laufzeit erkundet werden kann. Das Informationsmodell besteht aus einer Hierarchie aus Knoten (engl. Nodes), welche über Referenzen miteinander verknüpft werden können. Informationen zu Daten-, Knoten- und Referenztypen werden unter einem festgelegten Pfad im Server hinterlegt und sind ebenfalls zur Laufzeit verfügbar. Für die Bereitstellung von Funktionen

existieren zudem noch Methodentypen. Eine weitere Strukturierungsmethode in OPC UA ist die Verwendung von „Namespaces“. Namespaces (NSs) stellen getrennte Bereiche im Server dar, mit denen Modelle voneinander abgegrenzt und so Namenskonflikte vermieden werden können. Zudem erleichtern diese die Wiederverwendung einzelner Modelle (in erster Linie Typmodelle). Besonders ist hier der NS 0. In diesem wird das umfangreiche Basis-typmodell von OPC UA beschrieben und die Grundstruktur des Servers festgelegt. Dies umfasst, neben einer Reihe von Datentypen, Knoten- und Referenztypen zur Beschreibung weiterer Typmodelle. [39]

Die Interaktion mit dem OPC UA-Server erfolgt über Dienste zur Erkundung und Modifikation des Informationsmodells. Die Referenzierung der einzelnen Knoten im Server geschieht über Knoten-IDs (Node IDs). Diese IDs bestehen aus der Festlegung des Namespaces zusammen mit einem in diesem Namespace eindeutigen Identifikator, zumeist einer Zahl. Ist die ID eines gewünschten Knotens bekannt, kann mit dieser ID direkt auf diesen zugegriffen werden. Ist die ID nicht bekannt, kann der Server über Erkundungsdienste, ausgehend von der vorgegebenen Struktur aus dem NS 0, durchsucht werden, bis der gewünschte Knoten erreicht wird. [44]

Das umfangreiche Meta-Modell von OPC UA ermöglicht die Darstellung vieler Modelle. Jedoch ist diese Darstellung meist auf verschiedene Arten möglich. Dies führt zu inkompatiblen Modellen und würde eine akribische Modellierung der Semantik erfordern, welche von Clients erst analysiert werden müsste. Aus diesem Grund gibt es eine Vielzahl von sogenannten „Companion-Spezifikationen“, in denen von Gremien Modelle für die verschiedenen Anwendungsfälle erarbeitet worden sind. [15]

In der IEC 62541-14 [38] wird OPC UA um das Publish-Subscribe-Interaktionsmuster erweitert. Mit diesem ist es effizienter möglich, Werte zyklisch zu lesen oder zu schreiben. Dazu können Sammlungen von Werten definiert werden. Clients können diese dann abonnieren und die Daten werden vom Server an alle Abonnenten versandt. Dadurch muss der Server weniger Anfragen bearbeiten und es müssen nur die veränderlichen Werte übertragen werden. Dies ist besonders für die Übertragung von Prozesswerten relevant, die in einem festen Zyklus benötigt werden, um die Effizienz zu erhöhen und Last für den OPC UA-Server und das Netzwerk zu reduzieren.

Mit der Möglichkeit, OPC UA-Knoten über numerische IDs direkt zu adressieren, kann der Zugriff auf einen OPC UA-Server auf einem Gerät echtzeitfähig gestaltet werden. Reguläre TCP/IP-Netzwerke stellen jedoch keine echtzeitfähige Kommunikation bereit. Für Fälle, in denen harte Echtzeit benötigt wird, können die unteren Schichten des OSI-Modells durch ein TSN-Netzwerk ersetzt werden.

Für OPC UA werden in der IEC 62541-12 [37] zusätzlich Mechanismen zur Erkundung und Bekanntmachung von Serverinstanzen vorgesehen. Dies kann auf drei Ebenen erfolgen. Zunächst besteht die Möglichkeit, einen Server lokal auf einem Host bekannt zu machen. Über die Erweiterung mit Multicasts kann der Bereich auf eine Multicast-Domäne im Netzwerk ausgedehnt werden. Letztlich kann eine globale Bekanntmachung über dedizierte OPC UA-Discovery-Server erfolgen.

3.5 Namur Open Architecture (NOA)

Das zentrale Ziel der NOA ist die Schaffung eines Zugriffswegs für Dienste in der IT-Domäne auf Daten der Feldebene. Besonderer Fokus wird dabei auf Herstellerunabhängig-

keit, IT-Security sowie die Erhaltung von funktionaler Sicherheit und Verfügbarkeit gelegt. Inhaltlich teilt sich das Konzept in vier Punkte auf, namentlich:

1. Informationsmodell
2. NOA Diode und IT-Security
3. Verification of Request (VoR)
4. Aggregating-Server

Das NOA-Konzept hat zudem eine spezielle Sicht auf die Automatisierungsinfrastruktur und die außerhalb liegenden Zusatzdienste, welche die Daten erhalten sollen. In diese Sicht ordnen sich die oben genannten Aspekte des NOA-Konzepts ein. Abb. 3.3 zeigt eine Übersicht der relevanten Bereiche und Systeme für NOA. Im Bereich der Kern-Prozessautomatisierung finden sich alle Elemente, die klassisch der Feld- und Prozessleitebene der Automatisierungspyramide zugeordnet werden. Dies beinhaltet die feste Projektierung der Systeme, hohe Anforderungen an Verfügbarkeit und Sicherheit sowie echtzeitkritische Applikationen.

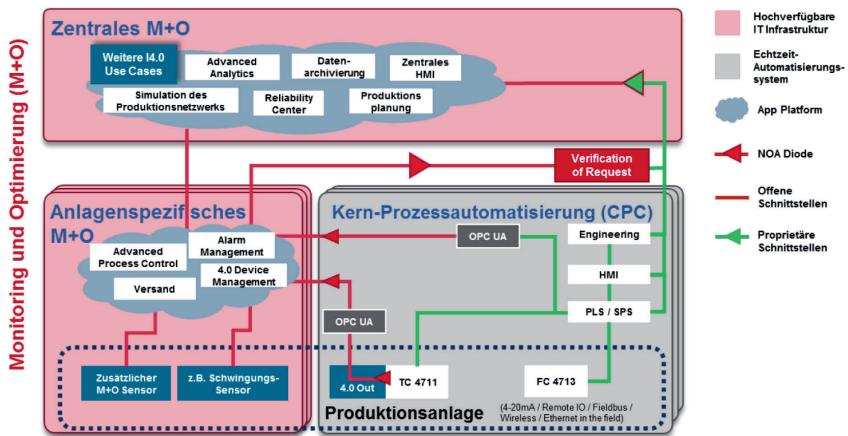


Abbildung 3.3: Übersicht der NOA-Architektur (aus NE 175 [65])

Neben der Kern-Automatisierung gibt es Bereiche für Monitoring and Optimization (M+O). In den M+O-Bereichen sind Dienste verortet, die nicht direkt an der Prozessführung beteiligt sind. Damit unterliegen sie geringeren Anforderungen für Verfügbarkeit und Echtzeitverhalten. Bei M+O unterscheidet NOA zwischen einem anlagenspezifischen und einem zentralen Bereich. Das anlagenspezifische M+O bezieht sich auf Dienste für eine konkrete Anlage, z. B. Gerätemanagement, Alarne, usw. Auch die Verwendung zusätzlicher Sensortechnik in der Anlage zur Erhebung wartungsrelevanter Daten fällt in diesen Bereich. Dabei besteht eine klare Abgrenzung zu den Sensoren in der Kern-Prozessautomatisierung,

da die von diesen Sensoren erhobenen Daten nicht für die Prozessführung verwendet werden. Das zentrale M+O befasst sich mit Aufgaben, die mehrere Anlagen betreffen oder mit Aspekten außerhalb der Prozessautomatisierung interagieren. Dies umfasst z. B. Produktionsplanung, Archivierung von Prozess- und Chargendaten und Datenanalyse.

Die Daten aus der Kern-Automatisierung werden über NOA-Dioden (rote Pfeile in Abb. 3.3) in die M+O-Bereiche geleitet. Dabei können die Daten auf verschiedenen Ebenen der Prozessautomatisierung herausgeführt werden. Die erste Möglichkeit stellen die Feldgeräte dar. Dazu müssen diese jedoch über eine entsprechende Schnittstelle verfügen, welche sich nur schlecht und meist gar nicht nachrüsten lässt. Eine weitere Möglichkeit bieten Remote-IOs. Diese können durch Nachrüstung oder Austausch gleich mehrere Geräte abdecken. Letztlich kann auf der PLS-Ebene eine Schnittstelle geschaffen werden.

Ein zentraler Punkt für NOA ist, dass Daten einheitlich und herstellerunabhängig dargestellt werden. Aus diesem Grund spezifiziert NOA das zu benutzende Informationsmodell. Das PA-DIM (vgl. 3.1.4) stellt bereits ein geeignetes Informationsmodell zur Verfügung und wurde von NOA übernommen [66]. Neben der Strukturierung der Gerätedaten wird ebenfalls festgelegt, welche Datenpunkte in der NOA-Schnittstelle bereitgestellt werden können. Dies stellt sicher, dass präsentierte Daten einheitliche semantische IDs aufweisen und verhindert so eine aufwendige Analyse der Semantik. Daraus folgt, dass immer nur ein festgelegter Satz an Daten bereitgestellt werden kann. Welche Eigenschaften und Merkmale dies sind, wird von der NE 176 [66] festgelegt. Aufgenommen werden Eigenschaften, die von relevanten Use-Cases benötigt werden. Die Liste der betrachteten Use-Cases soll mit der Zeit erweitert werden.

NOA erhebt den Anspruch, Verfügbarkeit und Sicherheit in der Kern-Prozessautomatisierung nicht negativ zu beeinflussen. Zu diesem Zweck sieht das Konzept eine sogenannte NOA-Diode vor. In Anlehnung an ihr elektronisches Pendant soll die NOA-Diode eine informationstechnische Rückwirkung in den Bereich der Kern-Automatisierung verhindern und ausschließlich den Fluss von Daten nach außen zulassen. Das Thema der IT-Security ist eng mit der Diode verbunden. Ohne eine sicherheitstechnische Betrachtung und Abwägung ergibt sich ein Potenzial für Sicherheitslücken, was die gewünschte Rückwirkungsfreiheit untergräbt. Die NE 177 [67] definiert die Strukturierung der NOA-Diode sowie Punkte für eine Sicherheitsevaluation. Die Diode soll als separate Einheit realisiert werden, sodass eine Rückwirkung strukturell ausgeschlossen werden kann. Die Sicherheitsevaluation unterscheidet zwischen zwei Stufen, abhängig von der Kritikalität des betrachteten Anwendungsfalls.

Der dritte Aspekt befasst sich mit Verification of Request (VoR). Bis zu diesem Punkt können Daten aus der Kern-Automatisierung herausgeschleust und verarbeitet werden. Viele Anwendungsfälle benötigen jedoch die Möglichkeit, auf die Kern-Automatisierung zurückzuwirken, um einen Mehrwert zu generieren [18]. Eine Rückwirkung birgt jedoch Potenzial für negative Auswirkungen. Um diesen entgegenzuwirken, sieht das NOA-Konzept eine strenge Überprüfung der gewünschten Rückwirkung vor: die Verification of Request. Dabei müssen vorrangig zwei Aspekte beleuchtet werden: ob der Initiator berechtigt ist, die Änderung vorzunehmen, und ob die Änderung funktional korrekt ist. Der erste Punkt kann durch Mittel der IT wie Benutzerauthentifizierung und Rechtemanagement gelöst werden. Der zweite Punkt benötigt eine semantische Analyse und Kontextualisierung der Änderung, um beurteilen zu können, ob negative Effekte resultieren können. Alternativ kann diese Analyse für spezifische Fälle vorab durchgeführt und formal abgelegt oder manuell vor Zulassung der Änderung durchgeführt werden.

NOA bietet mit Aggregating-Servern die Möglichkeit, Daten von mehreren Quellen zu sammeln und gemeinsam bereitzustellen [50]. Dies kann dazu genutzt werden, um die Anzahl relevanter Endpunkte für externe Dienste zu reduzieren. Weiter ermöglicht dies, Authentifizierungs- und Autorisierungsdienste zu konzentrieren. Auch können so Anfragen an leistungsschwächere Systeme reduziert werden. Die Verwendung von Aggregating-Servern ist für das NOA-Konzept rein optional.

3.6 Field Device Integration (FDI)

Field Device Integration (FDI) ist ein Konzept und eine Technologie für die Integration von Feldgeräten im industriellen Umfeld. Es baut auf zwei vorhergehenden Technologien (EDDL und FDT) auf und fasst die Funktionalitäten beider in einem Werkzeug zusammen. FDI ist in der IEC 62769 [41] standardisiert. In den folgenden Kapiteln werden die Aspekte der FDI-Packages, der Architektur und des Informationsmodells näher beleuchtet.

3.6.1 FDI-Package

Die Informationen über Gerätetypen, d. h. ihre interne Struktur sowie enthaltene Parameter und Funktionen, werden bei FDI in sogenannten FDI-Packages bereitgestellt. Diese Pakete sind vergleichbar zu einem Gerätetreiber. Die Struktur eines FDI-Packages ist in Abb. 3.4 dargestellt.

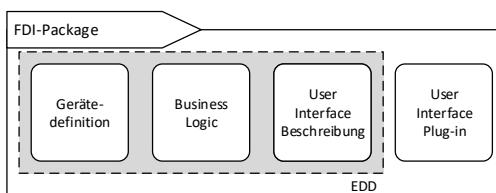


Abbildung 3.4: Aufbau eines FDI-Packages

Ein FDI-Package besteht aus vier Elementen [41]. Zunächst enthält es eine Gerätedefinition, welche die Struktur des Geräts beschreibt. Der FDI-Server nutzt diese Informationen, um das Gerätemodell zu generieren. Mit der Business-Logic werden Abhängigkeiten zwischen Elementen des Datenmodells beschrieben. Außerdem umfasst sie die Beschreibung der möglichen Kommunikationstransaktionen. Weiter kann das Paket zwei Arten von Bedienbildern enthalten. Einerseits können diese in einer deklarativen Form vorliegen. Alternativ können Bedienbilder in einer kompilierten Form als Plug-in enthalten sein. Für die ersten drei Aspekte werden Konzepte der EDDL genutzt.

3.6.2 FDI Architektur

Die Architektur von FDI ist in drei Ebenen eingeteilt. Ziel ist, eine generische Sicht auf die Feldgeräte zu erzeugen und die technologischen Einzelheiten der Gerätestrukturierung

und -kommunikation zu abstrahieren. Eine Darstellung der Architektur ist in Abb. 3.5 aufgeführt.

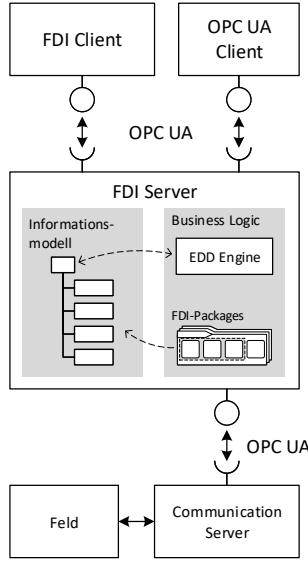


Abbildung 3.5: Vereinfachte Darstellung der Architektur von FDI

Zentrales Element ist der FDI-Server. Dieser beinhaltet Informationsmodelle für die von ihm verwalteten Geräte (links) und eine Komponente zur Verarbeitung der FDI-Packages einschließlich der darin enthaltenen EDDL-Strukturen (rechts). Das Informationsmodell für ein Gerät wird entsprechend der Informationen des zugehörigen Packages generiert. Es bildet die Daten des Geräts ab und dient Clients als Abbild des Feldgeräts. Über die Business-Logic wird die Integrität des Informationsmodells sichergestellt und der Transfer von Daten zwischen Modell und Gerät koordiniert.

Die Kommunikation in Richtung der Feldgeräte erfolgt über OPC UA. Unterstützt das Feldgerät keine Kommunikation über OPC UA, kommt ein *Communication Server* zum Einsatz [43]. Dieser bildet die spezifische Feldkommunikationsschnittstelle auf OPC UA-Dienste ab, die vom FDI-Server genutzt werden können. Für ausgewählte Protokolle und Technologien kann diese Funktion auch direkt mit in den FDI-Server integriert werden.

Oberhalb des FDI-Servers befinden sich die FDI-Clients. Diese verwenden die im FDI-Package enthaltenen Bedienbilder, um die Interaktion mit dem Feldgerät zu ermöglichen. Die Schnittstelle zwischen FDI-Client und -Server basiert ebenfalls auf OPC UA und der Client nutzt das Informationsmodell des spezifischen Geräts. Der FDI-Server kann auch von generischen OPC UA-Clients genutzt werden.

3.6.3 FDI Informationsmodell

FDI nutzt als Grundlage das Gerätemodell von OPC UA und erweitert dieses um einige Funktionalitäten [42]. Zum einen unterscheidet das Modell zwischen Offline- und Online-Daten. Dies ermöglicht es, explizit zwischen den beiden Datenständen zu unterscheiden. Weiter wird der Gerätezustand nach NE 107 als Modellelement definiert. Zusätzlich werden einige Methoden für die Koordinierung des Datenaustauschs zwischen Modell und Feldgerät hinzugefügt. Die Semantik der Modellelemente wird durch die OPC UA-Typen festgelegt.

3.7 Module Type Package (MTP)

Das Module-Type-Package-Konzept zielt auf eine vereinfachte Einbindung von Modulen in prozesstechnische Anlagen im Engineering und im Betrieb ab. So sollen modulare Anlagen effizienter errichtet und umgebaut werden können. Das Konzept wurde zunächst in der NE 148 [62] als Anforderungsprofil beschrieben. In der Richtlinienreihe VDI/VDE/NAMUR 2658 [89] wird das Konzept konkret beschrieben und ein Austauschformat für diese Modultypen, das Module Type Package (MTP), spezifiziert.

Das MTP-Konzept beschreibt mehrere Aspekte im Zusammenhang mit Modulen und modularen Anlagen. Diese müssen klar voneinander abgegrenzt werden:

- Das **Module Type Package** ist die Beschreibung eines konkreten Modultyps. Es wird zum Datenaustausch und zur Integration des Moduls in ein Zielsystem während des Engineerings genutzt.
- Das **MTP-Format** ist die Spezifikation, wie ein MTP aufgebaut ist und wie die verschiedenen Aspekte des Modultyps dargestellt werden. Dies umfasst die benötigten AML-Bibliotheken sowie die Regeln zur Strukturierung der Daten. Das Format ist in der VDI/VDE/NAMUR Richtlinie beschrieben.
- Die **MTP-Schnittstelle** ist die Kommunikationsschnittstelle, über die ein MTP-Modul in die überlagerte Prozessführung eingebunden wird. Diese umfasst alle Dienstschnittstellen und zusätzlichen Datenpunkte aus dem MTP.
- Ein **MTP-Modul** ist ein Modul, welches alle Anforderungen des MTP-Konzepts erfüllt und für welches ein MTP vorliegt.

Im MTP-Konzept wird nur eine Teilmenge möglicher Module betrachtet [89]. MTP-Module müssen über eigene Intelligenz, d. h. eine eigene Steuerung, verfügen. Weiterhin muss es sich um integrierbare Module handeln. Die interne Struktur wird auf einer Graybox-Ebene modelliert, d. h. einige interne Strukturen (z. B. Messstellen) werden abgebildet, dies aber nicht bis ins letzte Detail.

Die Aufgabe des MTP ist, den Modultyp im Kontext der Modulintegration hinreichend zu beschreiben. Dazu werden Informationen zur Kommunikationsschnittstelle, zu Steuerungsmöglichkeiten, zu Bedienbildern, zu Alarmmeldungen und zum Diagnosesatus benötigt. Diese müssen über das Austauschformat beschrieben sein, sodass sie bei der Integration genutzt werden können. Das in dieser Arbeit beschriebene PnP-Konzept legt den Fokus auf die funktionale Einbindung von Feldgeräten. Demnach sind die Kommunikationschnittstelle und die Steuerungsmöglichkeiten von besonderem Interesse. Die Beschreibung

des MTP erfolgt in AML. Jeder funktionale Aspekt wird dabei durch dedizierte AML-Bibliotheken beschrieben und als separates Modell gehandelt. Über ein Manifest werden alle Modelle referenziert und miteinander in Verbindung gebracht. So ist die nachträgliche Addition weiterer Aspekte problemlos möglich.

Das MTP enthält eine Beschreibung der Schnittstelle, über die mit dem Modul interagiert werden kann. Der erste Teil der Schnittstelle befasst sich mit den Diensten des Moduls. Über diese wird der Prozess im Modul geregelt. Die Dienste bilden dabei autonome Einheiten, denen durch Befehle Anweisungen gegeben werden können. Der aktuelle Status eines Dienstes ist über dessen Dienztzustand in der überlagerten Prozessführung ersichtlich. Die Beschreibung der Dienste ist in Blatt 4 der Richtlinie spezifiziert [90]. Dienste können über Konfigurationsparameter und Prozedurparameter angepasst werden. Erstere betreffen grundlegende Einstellungen, letztere in der Regel aufrufspezifische Vorgaben.

Neben den Diensten können auch einzelne Datenpunkte nach außen sichtbar sein. Für diese wird im MTP ein Serverendpunkt (*ServerAssembly*) und darunter Datenpunkte (*DataItem*) definiert. Die Datenpunkte können auch in funktionalen Gruppen (*DataAssembly*) zusammengefasst werden, so z. B. für eine Analogwertanzeige. OPC UA ist für MTP als präferiertes Kommunikationsprotokoll gesetzt, die Spezifikation erlaubt aber auch die Nutzung anderer Protokolle.

Der von einem MTP beschriebene Modultyp ist äquivalent zum Gerätetyp bei den einfachen Feldgeräten. Die Definition der angebotenen Dienste und Prozesswerte erlaubt eine große Freiheit in der Erstellung. Genau diese Freiheit führt jedoch dazu, dass die meisten Modultypen Unikate werden und nicht durch andere Modultypen ersetzt werden können. Blumenstein et al. [2] schlagen ein Konzept für ein rollenbasiertes Engineering mit MTP-Modulen vor. Dabei werden funktionale Einheiten (Modulrollen) genutzt, um den Produktionsprozess zu planen. Für die Bildung der funktionalen Einheiten werden aus Diensten unterschiedlicher Module abstrakte Dienste (Super-Services) generiert, die eine generalisierte Version der Funktion darstellen (z. B. Röhren). Bei der Auflösung der Rollen in konkrete Module ist so keine Festlegung auf einen spezifischen Modultyp vorhanden. Weiterhin können über den Super-Service die Argumente für die Dienstaufrufe angepasst werden.

3.8 Eigene Vorarbeiten

Dieses Kapitel beschreibt meine Vorarbeiten, die direkt oder indirekt für das hier vorgestellte rollenbasierte PnP-Konzept relevant sind.

Im Rahmen der Arbeitskreisaktivitäten zur Namur Open Architecture wurde ein Use-Case und ein Demonstrator mit dem Fokus PnP entwickelt [69]. In diesem wurde eine automatische Konfiguration eines Durchflusssensors mit separater NOA-Schnittstelle entwickelt und umgesetzt. Die prozesstechnische Anbindung des Sensors erfolgte über ein 4–20 mA-Signal und die Rückschreibung der Konfiguration über HART. Die Beschreibung der Rolle mit den gewünschten Parametern wurde über eine Verwaltungsschale bereitgestellt.

In Deppe et al. [5] beschreiben wir den Aufbau von Eigenschaftsausprägungsaussagen und wie diese für PnP-Konzepte genutzt werden können. Es wird aufgezeigt, wie Aussagen zu Eigenschaften und Merkmalen beschrieben und miteinander in Beziehung gesetzt werden. Besonders das Zusammenspiel von Anforderungen und Zusicherungen wird genauer

betrachtet. Ein erstes Beispiel ist die Eignungsprüfung eines Gerätetyps für eine technische Aufgabe. Hier stehen die Rollen auf der Anforderungsseite und die Gerätetypen auf der Zusicherungsseite. In einem weiteren Beispiel wird das Vorgehen beim Vergleich von Ist- und Soll-Konfiguration betrachtet.

Im Zuge eines BMBF³-geförderten Forschungsprojekts wurden bestehende Normen und Standards in Hinblick auf I4.0-relevante Use-Cases analysiert und auf Lücken in der Normung untersucht. Einer von drei Use-Cases befasste sich mit der Entwicklung eines PnP-Konzepts für den Feldgerätetausch auf Basis von bestehenden Normen und Standards [71]. Auf dieser Basis wurde ein abstraktes PnP-Konzept entwickelt, welches ein einheitliches Vorgehen mit einer Vielzahl unterschiedlicher Technologien ermöglicht.

In Nothdurft und Epple [70] wird das im Projekt entwickelte Konzept für einen konkreten Anwendungsfall umgesetzt und beschrieben. Das Szenario umfasst Temperatursensoren mit 4–20 mA-Signalanbindung und HART als klassisch angebundene Feldgeräte sowie die Verwendung der NOA-Architektur.

In dieser Arbeit werden die bisher entwickelten Konzepte um das PVS-Modell erweitert und die PnP-Prozedur verfeinert. Weiter werden die technischen Umsetzungsmöglichkeiten genauer untersucht und sich ergebende Einschränkungen diskutiert.

3.9 Andere Plug-and-Produce-Konzepte

In der Literatur gibt es zahlreiche Ansätze für PnP-Konzepte. Einige dieser Ansätze sollen im Folgenden kurz beschrieben werden. Dabei wird zwischen Konzepten für die Prozesstechnik und für die Fertigungstechnik unterschieden, da in diesen Bereichen grundlegende Unterschiede in den Randbedingungen existieren. Abschließend werden die vorgestellten Arbeiten zusammengefasst und mit den Zielen der vorliegenden Arbeit verglichen.

3.9.1 Prozesstechnik

Krüning und Epple [54] beschreiben ein PnP-Konzept für die automatische Einbindung von Feldbusgeräten. Dazu kommt das UniFeBu-Konzept zum Einsatz, welches eine Abstraktionsschicht für mehrere Feldbusprotokolle bildet. Die PnP-Funktion wird dabei direkt in der Steuerung hinterlegt. Ein Agent scannt regelmäßig den Bus und sucht nach neuen Geräten. Wird ein neues Gerät gefunden, wird eine Basiskommunikation mit diesem aufgebaut und seine Fähigkeiten werden bewertet. Anschließend werden für die bereitgestellten Prozesswerte Kommunikationskanäle aufgebaut, sodass diese in der Steuerung verfügbar sind.

In der vorliegenden Arbeit wird vorrangig die Zuordnung von Geräten zu funktionalen Rollen betrachtet. Der automatische Aufbau der Kommunikation ist nur ein Bestandteil dieses Prozesses.

Burger, Koziolek et al. beschreiben in mehreren Arbeiten [4, 51, 52] eine Referenzarchitektur für PnP-fähige Systeme in der Prozesstechnik. Zentrale Maßgabe für die Architektur ist die Verwendung von OPC UA für die Prozess- und Konfigurations-Kommunikation. Diezyklische Prozesskommunikation soll über das Publish/Subscribe-Muster erfolgen, wohin-

³Bundesministerium für Bildung und Forschung

gegen das PnP reguläre Server/Client-Kommunikation nutzt. Die Anmeldung von Komponenten im Netzwerk erfolgt über OPC UA Local Discovery Server (OPC UA LDS).

In der Architektur sind die funktionalen Rollen über den Tag referenziert. Informationen zu den Rollen liegen in einem *Engineering-Repository* vor und können als AML nach dem NE-150-Modell exportiert werden. Die Geräte stellen eine Basisbeschreibung nach OPC UA für Geräte [36] bereit, welche durch einen Gerätetreiber (aus einem öffentlichen Repository) ergänzt werden kann. Die Zuordnung von Geräten zu Rollen erfolgt über den im Gerät vorkonfigurierten Tag. Die bereitgestellten Signalschnittstellen sind in der Steuerung und den Geräten über PLCopen im OPC UA-Server beschrieben. Die Zuordnung der Signale erfolgt über deren Bezeichnung. Parameter werden aus den Engineering-Daten über semantische Referenzen (CDD) mit den Parametern im Geräteinformationsmodell abgeglichen. Die Architektur ermöglicht neben der Einrichtung von Feldgeräten auch die automatische Einbindung von Steuerungskomponenten. Dabei sind Abläufe für die Erstinbetriebnahme und den Gerätewechsel beschrieben.

In der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus auf einem allgemeinen Konzept, welches auch ältere Kommunikationstechnologien unterstützt und für Bestandsanlagen eingesetzt werden kann. Daraus ergibt sich auch die Ansiedlung des PnP außerhalb der Kernautomatisierung. Zudem wird keine dynamische Zuordnung der Rollen vorgenommen, sodass eine Vorkonfiguration der Geräte notwendig ist.

Panda et al. [76] beschreiben ein PnP-Konzept mit I4.0-Komponenten. Die Komponenten nutzen OPC UA für die Kommunikation und die Discovery-Dienste, die das Protokoll bietet, für die Eingliederung neuer Komponenten. Kern der Arbeit ist die automatische Erstellung von I4.0-Komponenten mit Geräten, die nicht den Anforderungen solcher Komponenten genügen. Dazu wird die EDD des Feldgeräts auf das Modell der IEC 62541-100 (OPC UA für Geräte) [36] abgebildet. Mit der Abbildung wird ein OPC UA-Server erstellt, welcher mit dem Feldgerät über eine Feldkommunikationsschnittstelle verbunden ist und dessen Variablen und Funktionen über OPC UA zur Verfügung stellt. Der neu erstellte OPC UA-Server und das Feldgerät bilden zusammen eine I4.0-Komponente, welche automatisch eingebunden werden kann.

In der vorliegenden Arbeit werden Szenarien berücksichtigt, die mit klassischen Kommunikationsprotokollen funktionieren. So ist auch eine partielle Nachrüstung in Bestandsanlagen möglich.

3.9.2 Fertigunsttechnik

Hammerstingl und Reinhart [17] präsentieren eine einheitliche Architektur für die automatische Einbindung von Feldgeräten. In dieser werden sowohl komplexe wie auch einfache Feldgeräte betrachtet. Die Beschreibung der Funktionen erfolgt über Fähigkeiten, die, wenn sie nicht im Gerät selbst modelliert sind, von einer PnP-Komponente abstrahiert werden. Für die Zuordnung von Gerätefunktionen zu Prozessfunktionen wird ein Abgleich von Benennungen vorgeschlagen. Die Architektur des Konzepts sieht eine PnP-Komponente vor, welche eine Business Logic für das PnP enthält. Zudem sind Treiber für einzelne Steuerungen und deren Kommunikationsinterfaces vorgesehen. Die einzelnen Typen von Treibern werden über Repositories (lokal oder online) bereitgestellt.

Das Konzept sieht keine genauere Beschreibung von funktionalen Rollen vor. Stattdessen soll ein Planungsalgorithmus die Koordination der Fähigkeiten übernehmen. Dieser

ist jedoch nicht näher beschrieben. Ebenso wird erwähnt, dass Konfigurationsparameter übertragen werden müssen. Ein Lösungsweg dafür wird nicht präsentiert.

Kainz et al. [48] beschreiben einen Ansatz einer PnP-Architektur für die Fertigungstechnik. Ziel der Arbeit ist, die Wandelbarkeit von Produktionsanlagen zu erhöhen. Dazu wird die Anlage über Stationen, bestehend aus einzelnen Modulen, beschrieben. Den Modulen sind Fähigkeiten zugeordnet, die sie anbieten. Über periodische Lebenszeichen signale der Station und eine Nachbarschaftserkennungsfunktion wird die Struktur der Anlage ermittelt. Die Orchestrierung des Produktionsprozesses soll dynamisch zur Laufzeit erfolgen.

Dorofeev et al. [11] präsentieren ein Geräte-Adapter-Modell für die Umsetzung von Plug and Produce. Parallel beschreiben Profanter et al. [81] dazu ein Konzept zur automatischen Gerätekennung über OPC UA mittels Discovery-Mechanismen. Einzelne Geräte werden durch Hinzufügen von Verwaltungsschalen zu I4.0-Komponenten, die über einen *Manufacturing Service Bus* kommunizieren. Auch hier stellen die Komponenten Fähigkeiten bereit. Die Geräte-Adapter bilden dabei die Brücke zwischen den proprietären Gerätfunktionen und den Fähigkeiten der I4.0-Komponente. Produkte verfügen über ein Rezept, welches eine Reihe von Produktionsschritten enthält. Diese Schritte werden den einzelnen Fähigkeiten von Geräten zugeordnet. Die Konfiguration von Fähigkeitsparametern erfolgt beim Aufruf der Fähigkeit. Die Bekanntmachung von neuen Geräten und der Austausch bereitgestellter Fähigkeiten erfolgt über OPC UA unter Zuhilfenahme von OPC UA LDS.

Miranda et al. [57] beschreiben die Struktur eines *Manufacturing Service Bus* als Grundlage für ein PnP und eine wandelbare Produktion. Dabei sind der von Dorofeev et al. [11] entwickelte Geräte-Adapter sowie die Erkundungsfunktion von Profanter et al. [81] zentrale Elemente der Architektur. Neben der Anbindung an die Geräte wird auch die Verbindung zu Bedienstationen und Cloud-Diensten betrachtet. Zudem wird die Durchführung von Produktionsprozessen in der Architektur erörtert.

Die zuletzt betrachteten Arbeiten [48, 11, 81, 57] setzen eine grundlegend andere Anlagenstruktur voraus und sind daher nicht für die Prozessautomation geeignet.

Otto, Niggemann et al. [73, 68] stellen ein Konzept für Plug and Produce mit cyberphysischen Systemen vor. Statt eine konkrete Software für die Produktion bereitzustellen, soll diese aus einer Produktbeschreibung generiert werden. Dazu wird ein Prozedurplan erzeugt, welcher aus vordefinierten Software-Komponenten zusammengesetzt wird. Der konkrete Fertigungsprozess wird durch die Parametrierung dieser Komponenten realisiert. Für die Bestimmung der optimalen Parameter wird eine Optimierung mit einem simulierten Modell der Anlage vorgesehen.

Die vorliegende Arbeit hat die Einbindung von Feldgeräten in eine bestehende Automatisierungsstruktur zum Ziel. Der Aspekt der Orchestrierung ist deshalb nicht von Relevanz.

Jasperneite et al. [47] veranschaulichen den PnP-Prozess für Fertigungsanlagen anhand zweier Beispielsysteme. Der Prozess wird in 6 Schritte unterteilt, begonnen bei der Generierung eines neuen Arbeitsplans und gefolgt vom physischen Umbau des Systems. Anschließend machen sich die einzelnen Komponenten im Netzwerk bekannt. Danach werden die Fähigkeiten der Komponenten kommuniziert und in einem Verzeichnis zusammengefasst. Abschließend werden die Betriebsmittel mit dem Arbeitsplan verknüpft und die Betriebsmittel entsprechend konfiguriert.

Erneut steht die Orchestrierung im Vordergrund, sodass nur eine geringe Relevanz für die vorliegende Arbeit besteht. Die Prozedur enthält Parallelen zu dem hier verwendeten Ablauf, ist jedoch im Detail für klassische Prozessanlagen nicht kompatibel.

Dürkop und Jasperneite [13] analysieren bestehende PnP-Ansätze und teilen diese in serviceorientierte und middleware-basierte Architekturen auf. Zudem stellen sie für middleware-basierte Systeme einen Ansatz für die automatische Einrichtung von Echtzeitkommunikationskanälen vor. So sollen den Variablen der Feldgeräte und Steuerungsapplikationen semantische Annotationen hinzugefügt werden, über welche eine Zuordnung erfolgen kann. Die Informationen zum Gerät werden über einen zweiten nicht-echtzeitfähigen Kanal zum Gerät bereitgestellt.

Für ein allgemeines PnP-Konzept kann keine vollständige Selbstbeschreibung des Geräts vorausgesetzt werden. Aus diesem Grund kann dieser Ansatz nicht für das Konzept der vorliegenden Arbeit genutzt werden.

Profrommer et al. [79] beschreiben einen PnP-Ansatz über ein generisches Fähigkeitenmodell. Dazu wird das Produkt-Prozess-Ressourcen-Modell um Transformationen, Fähigkeiten sowie Aktionen erweitert und eine formale Beschreibung für das erweiterte Modell definiert. So können Anlagenzustände und mögliche Übergänge beschrieben werden. Für Geräte wird eine fähigkeits- und serviceorientierte Anbindung vorausgesetzt. Die formale Beschreibung des Produktionsprozesses erlaubt, auf neue Maschinen mit weiteren Fähigkeiten dynamisch zu reagieren und eine neue Planung durchzuführen.

Wie zuvor liegt der Fokus auf der Orchestrierung.

Ye et al. [94] beschreiben ein PnP-Konzept auf Basis von Verwaltungsschalen. Über einen I4.0-Adapter werden Geräte und Module I4.0-fähig gemacht. Aus einer AML-Beschreibung wird anschließend eine Verwaltungsschale generiert und eine Verbindung zwischen dieser und dem Adapter aufgebaut. Die Prozessinteraktion erfolgt danach über Teilmodelle der Verwaltungsschalen. Dabei sind einzelne asset-spezifische Teilmodelle für die Fähigkeiten der Geräte vorgesehen. Über ein *PnP-interaction*-Teilmodell wird die Interaktion der Geräte untereinander koordiniert.

Das Konzept der vorliegenden Arbeit soll auch für bestehende Anlagen umsetzbar sein. Eine Erweiterung der Hardware und komplettete Umstrukturierung der Kommunikation stellen eine zu große Änderung dar, als dass sie aus ökonomischen Gesichtspunkten praktikabel wäre.

Walter et al. [92] präsentieren einen PnP-Ansatz für dezentral organisierte Fertigungssysteme mit IEC 61499. Einzelne Geräte bieten Dienste an, welche von anderen Geräten angefragt werden können. Die initiale Anfrage erfolgt von einer Auftragsliste. Nach der Vergabe eines Auftrags ist das empfangende Gerät für die weitere Abarbeitung zuständig. Die Bekanntmachung und Anfrage von Diensten erfolgt über OPC UA nach dem Publish/Subscribe-Muster. Durch diese dezentrale Struktur ist die Wegnahme und das Hinzufügen neuer Geräte dynamisch möglich.

Ein genaues Konzept, wie Dienste beschrieben werden, wird nicht gegeben. Zudem liegt der Fokus auf der automatischen Verteilung und Bearbeitung von Aufträgen. Daher ist der Ansatz für das Konzept dieser Arbeit nicht geeignet.

3.9.3 Zusammenfassung

Viele der in diesem Abschnitt betrachteten Konzepte und Ansätze stützen sich auf OPC UA und dessen Fähigkeiten der Selbstbeschreibung. In der Prozessautomation wird jedoch in der Anbindung von Feldgeräten noch stark auf bewährte Technologien gesetzt, sodass

eine schnelle und flächendeckende Übernahme von OPC UA als Standardprotokoll für die einfache Feldkommunikation nicht zu erwarten ist.

Die Ansätze für die Fertigungstechnik haben oft die dynamische Orchestrierung des Produktionsprozesses zum Ziel. Diese Problemstellung ist bei Prozessanlagen meist nicht gegeben. Ausnahme bilden hier rein modulare Anlagen, welche nur einen Teil aller Anlagen ausmachen.

Der Einsatz von Adaptersystemen [76, 94, 11] hat, ähnlich zu den Konzepten mit OPC UA, die komplette Umstrukturierung der Prozesskommunikation zufolge. Zudem fallen für die Adapter zusätzliche Kosten an.

Die größte Relevanz für die vorliegende Arbeit haben die Beiträge von Burger, Koziolek et al. [4, 51, 52]. Jedoch wird auch hier OPC UA als Kommunikationsschnittstelle zum Feldgerät vorausgesetzt. Zudem erfolgt die Zuordnung von funktionalen Rollen und Geräten über einen Namensabgleich, was eine Vorkonfiguration des Geräts bedingt.

In keiner der Arbeiten wurde ein Abgleich der statischen Geräteeigenschaften mit den Anforderungen der Rolle durchgeführt. Auch der semantische Abgleich von hersteller-spezifischen Parametern wird nicht behandelt.

4 Konzept

In diesem Kapitel wird das neue rollenbasierte PnP-Konzept beschrieben. Wie in Kapitel 2 erläutert, ist das Ziel des PnP, neue Feldgeräte weitestgehend automatisch in das Automatisierungssystem zu integrieren und für den produktiven Einsatz vorzubereiten. Die Steuerung benötigt funktionale Einheiten in der Anlage (beschrieben durch Rollen), welche durch Feldgeräte (und den von ihnen bereitgestellten Funktionen) realisiert werden sollen. Dafür muss das Feldgerät korrekt konfiguriert und eine Kommunikationsverbindung zwischen Feldgerät und Steuerungsanwendung etabliert werden. Bei der Umsetzung sind die Randbedingungen der Prozessleittechnik bezüglich Integrität und Verfügbarkeit zu beachten.

Das Konzept ist in zwei Aspekte unterteilt. Der erste beschäftigt sich mit den verschiedenen beteiligten Systemen, den Daten, die diese benötigen, und wie diese strukturiert und modelliert werden. Der zweite Aspekt befasst sich mit den Prozeduren, die zur operativen Ausführung des PnP-Prozesses erforderlich sind.

4.1 Akteure

Für einen Überblick sind in Abb. 4.1 die verschiedenen Akteure des PnP-Konzepts und deren Beziehungen zueinander dargestellt. Der untere Teil der Abbildung stellt die operative Ebene dar, welche die klassische Prozessautomation enthält. Der obere Teil hingegen stellt die Managementebene aus Sicht des PnP dar. Diese umfasst die Akteure, die das PnP-Konzept neben den operativen Systemen benötigen.

Zu den Systemen der operativen Ebene gehören die Feldgeräte, das Kommunikationssystem und das Automatisierungssystem. Das Kommunikationssystem verbindet die Feldgeräte mit dem Automatisierungssystem und ermöglicht so die Bereitstellung der Feldgerätfunktion. Das Automatisierungssystem ist für die Prozessführung zuständig. Die Darstellung des Automatisierungssystems ist hier als monolithische Einheit gewählt, in der Umsetzung kann dies jedoch auch durch verteilte Systeme erfolgen.

Im oberen Bereich der Abbildung ist die Management-, Optimierungs- und Instandhaltungsebene abgebildet. Im Weiteren wird diese abgekürzt als Managementebene referenziert. In der Managementebene ist zunächst das PnP-System zu nennen, welches den PnP-Vorgang koordiniert. Die Akteure der operativen Ebene sind auf dieser Ebene durch Digital Twins abgebildet. Ein Digital Twin (DT) ist eine digitale Repräsentanz eines Objekts oder Systems aus der physischen Welt [53]. Die Digital Twins bilden zusammen mit den zugehörigen Akteuren der operativen Ebene I4.0-Komponenten, beispielsweise das physikalische Feldgerät und der Feldgerät DT.

Weiterhin stehen auf der Managementebene eine Reihe von Informationsmodellen bereit, die für das PnP genutzt werden. In der Mitte der Abbildung ist die Rolle dargestellt, welche eine funktionale Aufgabe in der Anlage spezifiziert. Die Rollen sind indirekt durch den DT des Automatisierungssystems definiert. Die Rolle kann einem Rollentyp zugeordnet werden.

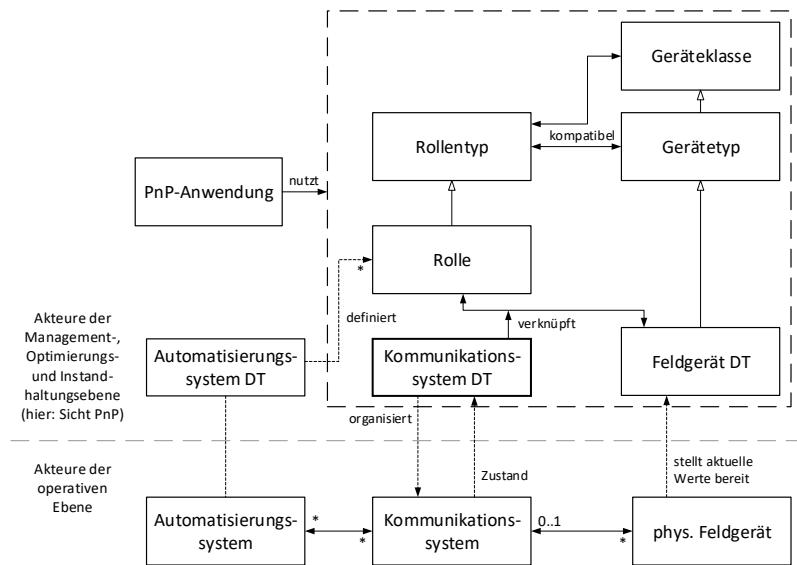


Abbildung 4.1: Übersicht der Akteure des PnP

den, welcher die allgemeine Aufgabe beschreibt (z. B. Temperaturmessung, Druckmessung usw.), ohne alle relevanten Anforderungen zu spezifizieren.

Auf der rechten Seite der Abbildung ist der DT des Feldgeräts gezeigt, welcher die digitale Repräsentanz des physikalischen Feldgeräts darstellt. Zwischen dem physikalischen Feldgerät und dem DT besteht eine Verbindung insofern, dass zeitlich variante Werte (Parameter und Messwerte) vom Feldgerät in den Feldgerät DT synchronisiert werden. Dabei ist, technologisch gesehen, keine direkte Verbindung zwischen den beiden Einheiten notwendig, eine indirekte Verbindung über andere Systeme ist möglich. Gerät und Rolle können miteinander verknüpft sein, wenn das Gerät die Funktion der Rolle ausführt. Die Verknüpfung erfolgt über das Kommunikationssystem.

Über dem DT des Feldgeräts ist der Gerätetyp angeordnet. Dieser fasst Fähigkeiten und Eigenschaften seiner zugehörigen Geräte zusammen. Diese Typbeziehung gilt sowohl für das physikalische Gerät als auch für den Digital Twin. Gerätetypen können weiter zu Geräteklassen abstrahiert werden und Gerätetypen z. B. anhand ihrer grundlegenden Funktion zusammenfassen. Geräteklassen stellen einen abstrakten Gerätetyp dar. Rollentyp und Gerätetyp bzw. Gerätekasse können zueinander kompatibel sein, wenn die Aufgabe des Rollentyps vom Gerätetyp bzw. von der Gerätekasse bereitgestellt wird.

Der Kommunikationssystem DT organisiert das Kommunikationssystem auf der operativen Ebene und erfasst dessen aktuellen Zustand.

4.1.1 Informationsmodelle

In diesem Abschnitt werden die Informationsmodelle für die Akteure dieses PnP-Konzepts vorgestellt. Zuvor werden einige grundlegende Modellierungsparadigmen zu Verwaltungsschalen, Eigenschaftsausprägungsaussagen sowie semantischen Identifikatoren und deren Relation zu dem hier entwickelten PnP-Konzept erörtert.

Die Akteure werden hier als Entitäten beschrieben. Eine Entität umfasst dabei alle Aspekte des betreffenden Akteurs. Die Akteure der operativen Ebene und die zugehörigen DTs in der Managementebene gehören hier zu einer Entität.

Der erste Aspekt ist der Verwaltungsschale. Angelehnt an das Konzept der Verwaltungsschale verfügt jede Entität über eine Verwaltungsinstantz [82]. Diese dient als einheitliche Schnittstelle für externe Nutzer, welche auf Daten und Dienste der Entität zugreifen wollen. Der zweite Aspekt umfasst die verschiedenen Informationsmodelle, die der Entität zugeordnet sind und diese beschreiben. Der dritte Aspekt ist eine Realisierungseinheit, welche den Akteur umsetzt. Bei einem Feldgerät ist dies das physikalische Gerät mit all seinen Komponenten. Für immaterielle Objekte, wie z. B. eine Rolle, ist die Realisierungseinheit hingegen eine Softwarekomponente (Manager), welche dieses Objekt implementiert. Im Kontext der Verwaltungsschale wird der Begriff des Assets verwendet. Das Asset ist das werthaltige Objekt, welches von der Verwaltungsschale verwaltet wird [9].

In diesem PnP-Konzept soll ein automatischer Abgleich zwischen den von der Rolle benötigten und den vom Feldgerät bereitgestellten Eigenschaften und Fähigkeiten durchgeführt werden. Die DIN SPEC 92000 bietet ein Modell für Aussagen zu Eigenschaften, welches die Anforderungen und Zusicherungen abbilden kann und eine maschinenlesbare Beschreibung der Semantik enthält [10]. Die Eigenschaftsausprägungsaussagen (engl. Property Value Statement (PVS)) werden in dieser Arbeit in den Informationsmodellen der Entitäten genutzt. Informationsmodellkomponenten, deren Daten in dieser Form vorliegen müssen, sind in den Diagrammen mit einer entsprechenden Annotation gekennzeichnet.

Die semantische Annotation von PVSen und weiteren Informationen ist ein zentraler Aspekt des PnP-Konzepts. In der Prozessindustrie ist die Verwendung von semantischen IDs, organisiert in Merkmalbibliotheken (vgl. Kap. 3.2), ein gängiger Ansatz. Dabei wird die Annahme getroffen, dass Elemente mit gleicher semantischer ID sich auf dieselbe Eigenschaft beziehen. In dieser Arbeit wird darüber hinaus vorausgesetzt, dass auch der Umkehrschluss gültig ist, d. h. dieselbe Eigenschaft immer mit der gleichen ID bezeichnet wird. Im Ausblick (Kap. 7.2) wird erörtert, wie in Fällen verfahren werden kann, in denen diese Voraussetzung nicht gegeben ist.

Die Akteure aus Abb. 4.1 lassen sich in vier zu betrachtende Entitäten aufteilen. Dabei werden Feldgerät und Kommunikationssystem mit deren DTs in jeweils einer Entität zusammengefasst. Das Automatisierungssystem und dessen DT ist nur in Hinsicht auf die darin definierten Rollen relevant und wird hier nicht näher betrachtet. Das Resultat sind Entitäten für die Rolle, das Feldgerät, den Typ des Feldgeräts und das Kommunikationssystem. Diese sind in den folgenden Kapiteln genauer beschrieben.

4.1.2 Akteure der operativen Ebene

Die Akteure der operativen Ebene sind das Automatisierungssystem, das Kommunikationssystem und das Feldgerät. Die Strukturen und Modelle auf dieser Ebene werden durch die in einer Anlage eingesetzten Systeme und Komponenten bestimmt. Zur Umsetzung

eines allgemeinen Konzepts und mit dem Einbeziehen von Bestandsanlagen folgt, dass die Modellierung auf dieser Ebene technologieabhängig ist. Durch den Einsatz von DTs auf der Managementebene wird diese Technologieabhängigkeit aufgelöst. Dennoch lassen sich für die Akteure dieser Ebene einige Aspekte herausstellen.

Das operative Modell eines Feldgeräts ist in Abb. 4.2 dargestellt. Eine Verwaltung ist für die Interaktion mit dem Gerät verantwortlich. Diese stellt den Zugriff auf die Informationen im Gerät und Funktionen bereit. Weiter verfügt das Gerät über Information z. B. zur Konfiguration oder zu Interfaces. Zudem stellt das Feldgerät die operative Mess- bzw. Stellfunktion bereit, mit der es seine Aufgabe in der Anlage erfüllt.

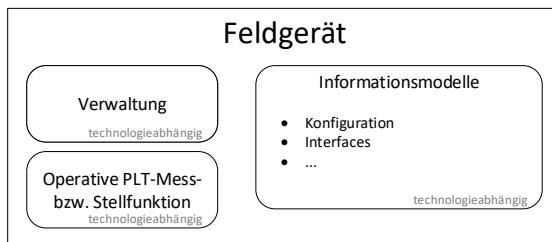


Abbildung 4.2: Operatives Modell des Feldgeräts

Das Modell des Kommunikationssystems auf der operativen Ebene ist in Abb. 4.3 gezeigt. Das Kommunikationssystem besitzt ebenfalls eine Verwaltung, mit der Funktionen genutzt und Informationen abgerufen werden können. Informationen dieses Akteurs betreffen beispielsweise angeschlossene Teilnehmer und Kommunikationskanäle. Die operative Funktion des Kommunikationssystems ist die Übertragung der Daten zwischen Feldgeräten und Automatisierungssystem.

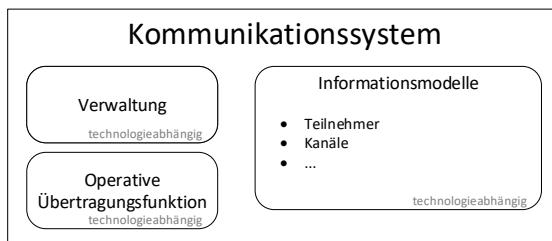


Abbildung 4.3: Operatives Modell des Kommunikationssystems

Wie im vorigen Kapitel erwähnt, ist das Automatisierungssystem nur von geringer Relevanz und wird nicht genauer betrachtet. Der relevante Aspekt des Automatisierungssystems, die Umsetzung der funktionalen Rollen, wird der Entität der Rolle zugeordnet.

4.1.3 Akteure der Managementebene

In diesem Kapitel werden die wichtigen Akteure der Managementebene näher beschrieben. Dies umfasst die Rolle, den Gerätetyp sowie die DTs des Feldgeräts und des Kommunikationssystems. Der Rollentyp und die Gerätekasse sind abstrakte Varianten der Rolle bzw. des Gerätetyps und für das PnP-Konzept nicht essentiell. Daher werden diese nicht weiter betrachtet. Ebenso ist der Automatisierungssystem DT nur für die Definition der Rollen und deren automatisierungstechnischen Schnittstellen relevant und wird nicht näher beachtet.

Die Strukturierung der Akteure der Managementebene folgt einigen grundlegenden Annahmen. Die Akteure werden im Netz als Verwaltungsschalen dargestellt. Die einzelnen Informationsmodelle und Dienste sind in diesen als Teilmodelle realisiert. Für den Zugriff auf die Informationsmodelle und Dienste verfügt jeder Akteur über einen Satz von Verwaltungsdiensten, welche diesen Zugriff verwaltungsschalenkonform ermöglicht. Zudem können bestimmte Akteure zusätzliche Dienste zur Konfiguration von operativen Einheiten bereitstellen.

Rolle

Die Rolle stellt ein Planungsobjekt dar und stellt funktionale Anforderungen an ein Feldgerät. Gleichzeitig werden in diesem PnP-Konzept Realisierungskomponenten in der Software des Automatisierungssystems für die einzelnen Rollen vorgesehen. Das Informationsmodell für eine Rollen-Entität ist in Abb. 4.4 dargestellt.

Wie für jede Entität existiert eine Verwaltungsinstanz für den Zugriff auf die restlichen Aspekte. Daneben gehören zur Entität verschiedene Informationsmodelle sowie ein Rollen-Manager, welcher die Rolle in der Steuerung abbildet und organisiert.

Bei den Informationsmodellen sind die Anforderungen an das ausführende Feldgerät modelliert. Dabei sind an dieser Stelle nur funktionale Anforderungen beschrieben, die für die Ausführung der Funktion notwendig sind. Gleichzeitig müssen hier alle funktionalen Anforderungen erfasst sein, sodass, wenn diese erfüllt sind, auch die Durchführung der Funktion möglich ist. Die Anforderungen teilen sich in dieser Arbeit in Fähigkeiten und Eigenschaften auf.

Für die Modellierung von Fähigkeiten existieren verschiedene Ansätze. Besonders in der Fertigungstechnik wurden Konzepte entwickelt, um komplexe Fähigkeiten aus einzelnen Basisfähigkeiten und unter Berücksichtigung von Randbedingungen zu beschreiben [77, 78]. Für die Prozessindustrie und besonders auf der Ebene der einzelnen Feldgeräte lassen sich Fähigkeiten in der Regel auf die Bereitstellung bestimmter Prozesswerte oder einfacher Dienstschnittstellen reduzieren. Aus diesem Grund wird die Beschreibung von Fähigkeiten in dieser Arbeit durch eine Typisierung gelöst. Das heißt, dass die Rolle Fähigkeiten von bestimmten Typen fordert; Feldgeräte können diese Anforderung dann erfüllen, indem sie eine Fähigkeit von einem kompatiblen Typ (gleicher oder spezialisierter Typ) bereitstellen. Die Referenzierung von Typen kann durch semantische IDs oder Bezeichnungen in einem definierten Namensraum (z. B. Dienststart in einem bekannten Gerätetyp) erfolgen. Prinzipiell muss sichergestellt sein, dass eine Übereinkunft bezüglich der Semantik der Fähigkeit erreicht werden kann.

Neben den Fähigkeiten spezifiziert die Rolle Anforderungen an Eigenschaften des Feldgeräts. An dieser Stelle ist irrelevant, ob die Eigenschaft durch ein statisches Merkmal

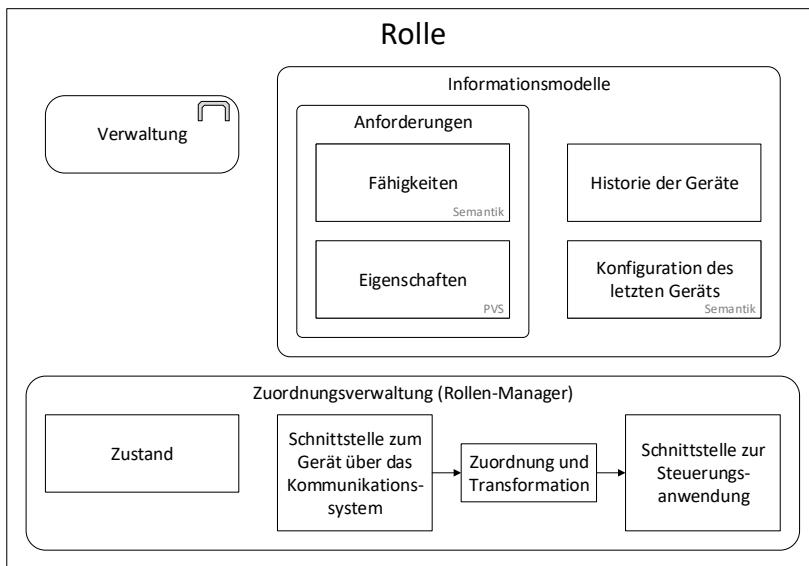


Abbildung 4.4: Bestandteile des Informationsmodells für Rollen

des Gerätetyps oder die Konfiguration eines Parameters im Feldgerät erfüllt wird. Die Anforderungen an die Eigenschaften müssen in Form von PVSen bereitgestellt werden.

Neben den Anforderungen enthält die Rolle eine Historie der Feldgeräte sowie die Konfiguration des Geräts, welches die Rolle zuletzt eingenommen hat. Die Daten des letzten Feldgeräts können genutzt werden, um nichtfunktionale Einstellungen zu übertragen und so einen möglichst reibungslosen Übergang für Wartungs- und Betriebspersonal zu erzielen. Die Informationen zur Konfiguration müssen semantisch annotiert vorliegen.

Der letzte Aspekt der Entität Rolle ist eine Zuordnungsverwaltung, der Rollen-Manager. Dieser ist im Automatisierungssystem verortet und regelt den Belegungszustand der Rolle sowie die reibungslose Bereitstellung der Feldgerätfunktion für überlagerte Steuerungsanwendungen. Der Belegungs- und Konfigurationszustand wird in einem Zustandsautomaten festgehalten. Mögliche Zustände sind hier:

- Gerät nicht vorhanden:** Die Rolle ist von keinem Feldgerät belegt.
- Gerät nicht betriebsbereit:** Der Rolle ist ein Gerät zugeordnet; dieses ist jedoch noch nicht konfiguriert und somit nicht betriebsbereit.
- Gerät ist betriebsbereit:** Die Rolle ist von einem fertig konfigurierten Gerät belegt und kann von der Prozessführung genutzt werden.

Zur Bereitstellung der Gerätfunktionen sind drei Schritte vorgesehen. Zunächst bildet der Rollen-Manager einen Kommunikationskanal über das Kommunikationssystem zu dem

Feldgerät. Diese Schnittstelle wird in der Regel durch protokollabhängige I/O-Bausteine realisiert. Auf der anderen Seite stellt die Rolle eine fest definierte Darstellung der Prozesswerte und Dienste für Steuerungsanwendungen bereit. Zwischen den beiden Schnittstellenschichten ist eine Zuordnung einzelner Datenelemente und gegebenenfalls eine Transformation (z. B. Skalierung von Prozesswerten oder Umformung von Dienstaufrufen) erforderlich. Mit diesen Schritten wird eine dynamische Kopplung zwischen der Schnittstelle des Feldgeräts und der Schnittstelle für die Steuerungsanwendungen erzielt.

Gerätetyp

In diesem PnP-Konzept werden Gerätetypen als eigene Entitäten angesehen und modelliert. Sie beschreiben die gemeinsamen Fähigkeiten, Eigenschaften und Strukturen für eine Gruppe von Feldgeräten. Die Bestandteile einer Gerätetyp-Entität sind in Abb. 4.5 abgebildet.

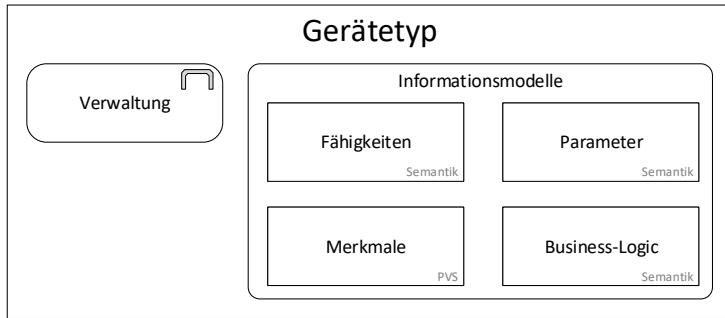


Abbildung 4.5: Bestandteile des Informationsmodells für Gerätetypen

Zentraler Aspekt eines Gerätetyps sind die Informationsmodelle. Für das PnP sind hier die Punkte Fähigkeiten, Merkmale, Parameter und Business-Logic von Bedeutung. Mit dem Modell der Fähigkeiten wird beschrieben, welche Fähigkeiten ein Feldgerät vom entsprechenden Gerätetyp bereitstellen kann. Die Fähigkeiten sind analog zu den Fähigkeitsanforderungen in der Rolle modelliert und bilden damit das Komplement zu diesen. Die Merkmale beschreiben fixe Eigenschaften, welche für alle Mitglieder des Gerätetyps gelten und so nicht für jedes Feldgerät einzeln definiert werden müssen.

Weiterhin wird eine Beschreibung der Parameter benötigt. Diese gibt an, welche Parameter verfügbar sind und wie diese eingestellt werden können. Für die Beschreibung sind folgende Elemente nötig:

- **Parametertyp:** Der Parametertyp gibt an, welche Eigenschaft des Feldgeräts vom Parameter beeinflusst wird. Dies entspricht der semantischen ID, welche bei statischen Merkmalen genutzt würde.

- **Parameterwerte:** Dies beschreibt die Werte, auf die der Parameter im Feldgerät konfiguriert werden kann. Möglich sind hier Wertebereiche oder diskrete Mengen von Werten sowie der Datentyp.
- **Zugriffsbeschreibung:** Die Zugriffsbeschreibung gibt an, wie der Parameter im Feldgerät gelesen und geschrieben werden kann. Diese Beschreibung ist Teil der Business-Logic und sollte hier als Verweis auf dieses Teilmmodell umgesetzt werden.
- **Abhängigkeiten:** Parameter können in ihren Einstellungen von anderen Parametern abhängig sein. Diese Abhängigkeiten müssen hier beschrieben sein. Die Reihenfolge, in der die Parameter während der PnP-Prozedur konfiguriert werden können, wird ebenfalls von diesen Abhängigkeiten beeinflusst. Die Abhängigkeiten von Parametern werden in dieser Arbeit nicht betrachtet und es wird davon ausgegangen, dass jeder Parameter individuell eingestellt werden kann.

Abschließend ist der Aspekt der Business-Logic enthalten. Dieser beschreibt, wie mit einem Feldgerät des Gerätetyps interagiert werden kann. Dies umfasst bereitgestellte Funktionen, Abfolgebeschreibungen zur Durchführung von gewissen Aktionen sowie die Beschreibung von Kommunikationsaufrufen. Unter anderem umfasst dies, wie Prozesswerte und Parameter mit dem Gerät ausgetauscht werden. Die einzelnen Funktionen und die Kommunikationsaufrufe müssen semantisch annotiert sein.

Die Gerätetypverwaltung bildet den Zugriffspunkt auf die Daten der Gerätetyp-Entität.

Mit der hier vorgestellten Beschreibung der Gerätetypen kann die gesamte mögliche Funktionalität eines Feldgeräts abgebildet werden. So kann die Eignung eines Gerätetyps für eine Rolle ohne Betrachtung des eingesetzten Feldgeräts bewerkstelligt werden.

Feldgerät DT

Der Feldgerät DT umfasst die Informationen zum Feldgerät und stellt diese standardisiert bereit. Die Bestandteile des Feldgerät DT sind in Abb. 4.6 abgebildet. Enthalten sind die Feldgeräteverwaltung, verschiedene Informationsmodelle und eine Zustandssynchronisation zum physikalischen Gerät.

Bei den Informationsmodellen sind die Punkte Fähigkeiten, Merkmale, Konfiguration und Lebenszyklusdaten enthalten. Fähigkeiten und Merkmale sind dabei durch den Gerätetyp definiert, aufgrund ihrer prominenten Stellung im PnP sind sie hier explizit erneut aufgeführt. Die aktuelle Konfiguration stammt aus dem physikalischen Feldgerät, muss jedoch für das PnP um semantische Annotationen erweitert werden. So bildet sich daraus ein eigenständiges Informationsmodell. PA-DIM und NOA bieten beispielsweise Modelle zur Strukturierung dynamischer Feldgerätedaten, inklusive der Konfiguration (vgl. Kap. 3.1.4). In den Daten zum Lebenszyklus sind Ereignisse mit Bezug zum Feldgerät festgehalten. Dies umfasst, unter anderem, Zuordnungen zu Rollen und Konfigurationsereignisse. Direkte Auswirkungen auf den PnP-Ablauf haben diese Informationen nicht.

Die Zustandssynchronisation regelt den Austausch von Informationen zwischen dem physikalischen Gerät und dem Feldgerät DT. So kann der aktuelle Zustand des Feldgeräts (besonders dessen Konfiguration) in den Digital Twin übertragen und so ein konsistentes Abbild des Feldgeräts erreicht werden. Das PnP-System kann auf dieses Abbild zugreifen, ohne direkt auf das physikalische Gerät zuzugreifen. Aus Sicherheitsgründen erfolgt die Synchronisation nur vom Feldgerät zum Digital Twin.

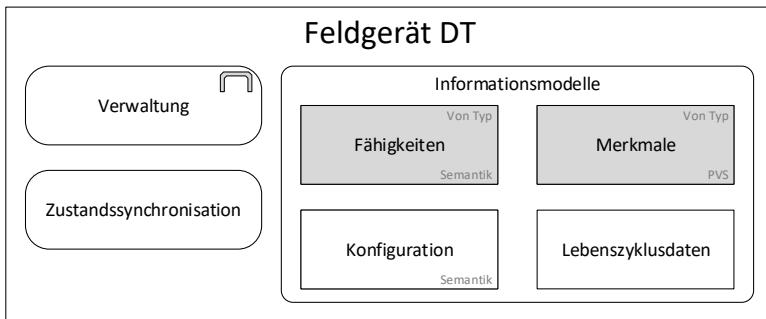


Abbildung 4.6: Bestandteile des Informationsmodells für Feldgeräte

Kommunikationssystem DT

Die Kommunikation erlaubt den Austausch von Daten und die Verwendung von Diensten zwischen Automatisierungssystem und Feldgeräten. Im Umfang dieser Arbeit wird die Struktur der Kommunikationssysteme als gegeben betrachtet. Eine genaue Modellierung der Topologie sowie der Übersetzung zwischen Kommunikationssegmenten ist daher an dieser Stelle nicht nötig. Ohne Beschränkung der Allgemeingültigkeit wird angenommen, dass Feldgerät und Steuerung im selben Netzwerksegment angesiedelt sind, sodass die Spezifikation einer Adresse für den Aufbau der Kommunikation genügt.

Die einzelnen Segmente des Kommunikationssystems werden in dieser Arbeit als Entitäten angesehen. Die Struktur solcher Entitäten ist in Abb. 4.7 dargestellt. Die Kommunikationsverwaltung bietet Zugriff auf die Dienste und Informationen der Entität.

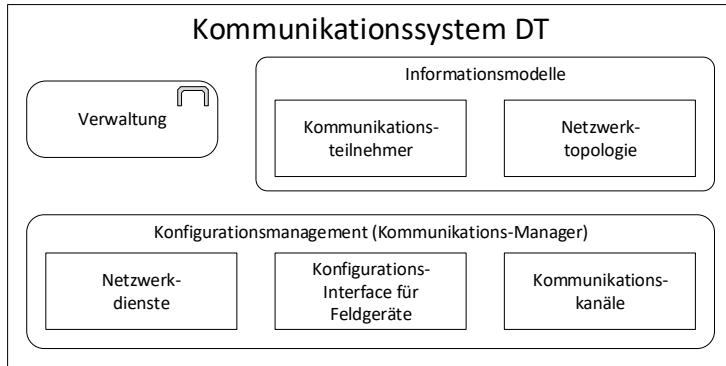


Abbildung 4.7: Bestandteile des Informationsmodells des Kommunikationssystems

Die Kommunikation verfügt generell über Informationsmodelle zur Netzwerktopologie und zu Kommunikationsteilnehmern. Die Netzwerktopologie spielt in diesem Konzept eine untergeordnete Rolle, da die Struktur als fix angenommen wird. Sie kann jedoch für die Einordnung der räumlichen Position von Feldgeräten genutzt werden. Die Genauigkeit dieser Einordnung hängt stark von den Randbedingungen der verwendeten Technologie ab. Weiterhin sind Informationen zu angeschlossenen Feldgeräten und Steuerungskomponenten hinterlegt. So kann die Möglichkeit zum Aufbau eines Kommunikationskanals überprüft werden.

Für das PnP-Konzept ist ein Konfigurationsmanagement, der Kommunikations-Manager, vorgesehen, welcher Zugriff auf die Feldkommunikationsmedien besitzt. Die wichtigste Funktion ist hier die Bereitstellung von Netzwerkdiensten, welche für die Durchführung des PnP notwendig sind. Diese Dienste können vom Kommunikations-Manager angeboten oder durch Mechanismen des verwendeten Kommunikationsprotokolls umgesetzt werden. Die Bereitstellung durch Mechanismen betrifft in erster Linie dezentral organisierte Netzwerke. Für das PnP sind folgende Netzwerkdienste vorgesehen.

1. Gerätanschluss erkennen:

Der Anschluss eines neuen Geräts wird vom Kommunikations-Manager über diesen Dienst erkannt. So ist es möglich, den PnP-Vorgang anzustoßen. Wann ein Gerät als angeschlossen gilt, hängt vom verwendeten Protokoll ab. Es muss zumindest eine logische Verbindung bestehen (Schicht 2 im OSI-Modell). Teilen sich verschiedene Protokolle ein physikalisches Netzwerk, muss nach unterstützten Protokollen auf dem Gerät gesucht werden. Alternativ kann ein Protokoll vorsehen, dass sich Geräte im Netzwerk melden.

2. Gerät lokalisieren:

Der Kommunikations-Manager liefert Informationen zur Anschlussstelle eines Geräts. Zusammen mit der Netzwerktopologie können daraus Rückschlüsse über den physischen Ort des Geräts getroffen werden. Die Aussagekraft hängt dabei stark von der Netzwerktopologie ab. Bei der Lokalisierung wird zunächst die Annahme getroffen, dass vorhandene Leitungen genutzt werden. Durch Folgen der Leitung ergibt sich ein Satz möglicher Positionen. Bei Punkt-zu-Punkt-Verbindungen bedeutet dies genau einen Standort. Bei Bus-Protokollen kann auf eine Reihe von Orten entlang des Busses eingeschränkt werden. In Netzwerken mit Switch-Komponenten und/oder Gateway-Komponenten ergibt sich bei fester Zuordnung der Anschlusspunkte ein ähnliches Bild wie bei den Punkt-zu-Punkt-Verbindungen. Ohne feste Zuordnung kann dennoch die Menge zu betrachtender Orte reduziert werden. Bei Funkverbindungen schränkt der genutzte Empfangsknoten und dessen Reichweite den Standort ein.

3. Gerät identifizieren:

Dieser Dienst wird vom Kommunikations-Manager initiiert, jedoch vom Konfigurations-Interface bearbeitet. Ziel ist die Bestimmung identifizierender Merkmale, wie eine Seriennummer. Zudem müssen Informationen über den genauen Typ des Geräts ermittelt werden. Weitere Informationen wie Hersteller und Revisionsstände sind optional.

4. Geräteentfernung erkennen:

Wird ein Gerät entfernt, wird dies ebenfalls vom Kommunikations-Manager registriert. Ob ein Gerät nur zeitweise nicht verfügbar ist, z. B. wegen fehlender Stromversorgung oder Aussetzern, oder ob ein Ausbau stattgefunden hat, muss über passende Mechanismen bestimmt werden. Bei einem Ausbau wird die Steuerung, in der das Gerät eine Rolle besetzt, verständigt; die Rolle wechselt in den Zustand „Gerät nicht vorhanden“.

5. Adresse zuweisen:

Einem neuen Gerät wird eine Adresse zugeteilt. Dieser Dienst existiert nur bei Protokollen, die eine Adressierung verwenden. Diese, unter Umständen temporäre, Adresse wird für die Identifikation des Geräts benötigt.

6. Adresse ändern:

Die Adresse eines Geräts wird auf eine andere geändert. Dies kann nötig sein, wenn die Gerätedresse in der Steuerung nicht geändert werden kann oder soll.

7. Gerätedaten publizieren:

Die aktuellen Parameter- und Prozesswerte werden in einer von extern zugänglichen Schnittstelle zur Verfügung gestellt. Dieser Zugriff soll rein lesend erfolgen und keinen Einfluss auf das Automatisierungssystem haben. Die Aktualisierung der Daten kann zyklisch erfolgen oder durch externe Anfragen erbeten werden. Die Entscheidung, zu welchem Zeitpunkt und mit welcher Geschwindigkeit, wird vom Kommunikations-Manager selbst bestimmt. Für eine effiziente Umsetzung ist das Zwischenspeichern von Werten ratsam, sodass nicht für jede Anfrage ein Austausch mit dem Gerät stattfinden muss.

Die Kommunikation mit den Feldgeräten erfordert protokoll- und gerätespezifische Informationen, vor allem für die Konfiguration der Geräte. Hierfür stellt der Kommunikations-Manager ein Konfigurations-Interface bereit. Für klassische Feldkommunikationsprotokolle bieten FDI [41] und FDT [35] hier etablierte Technologien zur Umsetzung einer solchen Schnittstelle. Beiden Umsetzungen fehlen jedoch semantische Annotationen der Dienste und Parameter. Diese müssen für den Einsatz in diesem Konzept ergänzt oder von außerhalb bereitgestellt werden. Weiterhin ist der Kommunikations-Manager für den Aufbau der Kommunikationskanäle zwischen Feldgeräten und Steuerungskomponenten verantwortlich.

4.2 Plug-and-Produce-Ablauf

In diesem Abschnitt wird der Ablauf eines Feldgerätetauschs mit dem neuen PnP-Konzept beschrieben. Abb. 4.8 zeigt eine Übersicht mit den Hauptschritten. Die Schritte sind in fünf Blöcken zusammengefasst, welche in den Kapiteln 4.2.1-4.2.5 detailliert beschrieben sind. Die einzelnen Blöcke sind in der Abbildung mit den römischen Ziffern I – V gekennzeichnet.

Der erste Block befasst sich mit vorbereitenden Schritten für das PnP im Fall eines Gerätetauschs. In diesem geht es um die Sicherung der aktuellen Konfiguration, die Vorbereitung für den Ausbau sowie den physikalischen Umbau. Im zweiten Block wird ermittelt, dass und welches Gerät neu angeschlossen wurde. Daraufhin wird das Gerät im dritten Block mit einer Rolle verknüpft. In Block vier wird geprüft, ob das neue Feldgerät für

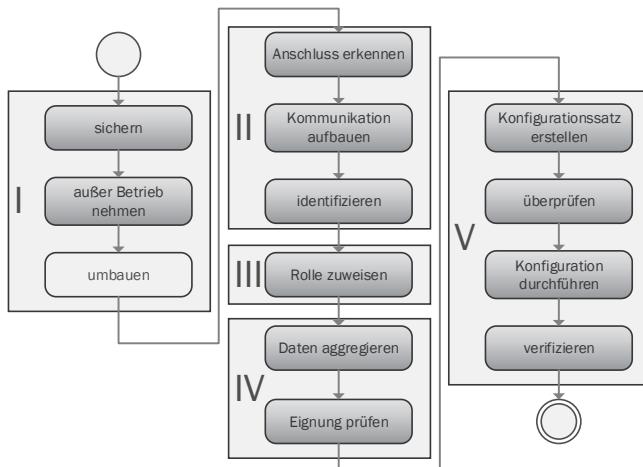


Abbildung 4.8: Grober Ablauf des PnP

die Rolle geeignet ist. Abschließend wird im fünften Block die Konfiguration des Geräts angepasst und anschließend verifiziert.

4.2.1 Sicherung, Außerbetriebnahme und Umbau

Dieser Block beinhaltet vorbereitende Schritte für das PnP, welche nur im Fall eines Gerätewechsels relevant sind. Bei diesem PnP-Konzept können die Einstellungen des vorherigen Feldgeräts genutzt werden, um nichtfunktionale Einstellungen zu übertragen. Dazu muss sichergestellt sein, dass die alten Gerätedaten auf einem aktuellen Stand vorliegen. Um dies sicherzustellen, kann eine von drei Strategien verfolgt werden:

1. Die Sicherung wird zyklisch durchgeführt.
2. Die Sicherung wird bei jeder Änderung der Geräteparameter durchgeführt.
3. Die Sicherung erfolgt direkt vor der Außerbetriebnahme.

Jede Strategie hat ihre eigenen Vor- und Nachteile. Bei einer zyklischen Sicherung wird das Kommunikationsmedium auch belastet, wenn keine Änderungen vorliegen. Dafür ist immer ein relativ aktueller Stand verfügbar. Wird nur bei Änderungen eine neue Sicherung durchgeführt, reduziert dies den Kommunikationsaufwand. Jedoch müssen entsprechende Mechanismen und Abläufe eingerichtet sein, die das Initiiieren der Sicherung in Falle einer Änderung garantieren. Die Sicherung vor der Außerbetriebnahme verursacht den geringsten Kommunikationsaufwand. Bei einem kompletten Ausfall des Geräts können die Einstellung jedoch nicht mehr gesichert werden.

Für alle diese Fälle ist der zu durchlaufende Prozess identisch. Ein Aktivitätsdiagramm hierfür ist in Abb. 4.9 dargestellt. Bei diesem Prozess sind eine Vielzahl von Systemen beteiligt. Darunter fallen die Rollenverwaltung, die Geräteverwaltung, der Kommunikations-Manager, das Konfigurations-Interface und das Gerät.

Der Vorgang beginnt mit einer externen Anregung (Zeit oder Event). Da es um die Sicherung der letzten Geräteeinstellung geht, wird bei der Rollenverwaltung begonnen. Diese stößt eine Sicherung an und stellt eine Anfrage bei der Verwaltung des Geräts, die dynamischen Werte zu aktualisieren. In der Regel besitzt die Geräteverwaltung keine direkte Verbindung zum physikalischen Gerät. Deshalb wendet sich diese an den Kommunikations-Manager, an dem das Gerät angeschlossen ist, und erbittet die Publikation der aktuellen Gerätereekte. Die Anfrage wird an das Konfigurations-Interface weitergeleitet, welches direkten Zugriff auf das Gerät hat. Die neuen Werte werden vom Gerät abgefragt und vom Konfigurations-Interface im Kommunikations-Manager publiziert. Daraufhin werden die Daten erst in der Geräteverwaltung und abschließend in der Rolle aktualisiert.

Ist die Sicherung abgeschlossen, kann die Vorbereitung für den Gerätewechsel erfolgen. Zuerst muss der Prozess in einen Zustand versetzt werden, in dem der Ausbau physikalisch möglich ist. Weiterhin müssen von den Prozesswerten des Geräts abhängige Systeme in geeignete Zustände geschaltet werden. Dies betrifft vor allem Regelkreise. So werden unnötige Alarmmeldungen und Verriegelungen vermieden.

Sind die Vorbereitungen abgeschlossen, kann der physikalische Umbau beginnen. Das alte Gerät wird ausgeschaltet und demontiert. Danach wird das neue Gerät eingebaut und mit der elektrischen Versorgung und dem Kommunikationssystem verbunden.

4.2.2 Anschlusserkennung und Identifikation

In diesem Block wird der PnP-Vorgang initiiert. Das Vorgehen dafür ist im Aktivitätsdiagramm in Abb. 4.10 aufgeführt. An dem Vorgang beteiligt sind die Komponenten Kommunikations-Manager, Konfigurations-Interface und PnP-Manager, dargestellt durch die vertikalen Bereiche. Der Bereich „Extern“ steht für Komponenten oder Akteure, die außerhalb der betrachteten Komponenten liegen.

Der Vorgang beginnt mit dem Anschließen des neuen Geräts durch einen Installateur. Daraufhin wird dieser Anschluss vom Kommunikations-Manager registriert und der Anschlussort bestmöglich lokalisiert. Das Anschließen kann auf mehreren Ebenen erkannt werden, angefangen bei der physischen Schicht über die logische bis hin zur Applikations-schicht des OSI-Modells. Nach der Erkennung sollte das Gerät kommunikationstechnisch voll einsatzbereit sein. Sofern es sich bei dem betrachteten Kommunikationsmedium um ein adressbasiertes Verfahren handelt, wird dem Gerät eine (vorläufige) Adresse zugewiesen. Danach wird das Gerät mittels des Konfigurations-Interfaces identifiziert. Dabei werden zumindest eine gerätespezifische ID und der Gerätetyp ermittelt. Zusätzlich können Informationen zu Hersteller und Revisionsstand bestimmt werden. Ist nicht sichergestellt, dass die ID global eindeutig ist, kann durch Verbindung der Datenpunkte ID, Gerätetyp und Hersteller immer eine global eindeutige ID generiert werden. Anschließend wird ein Auftrag für einen PnP-Vorgang generiert und an den PnP-Manager übermittelt. In dem Auftrag sind Daten zum Anschlusspunkt, zur Adresse (falls zutreffend) und zu den Informationen aus der Identifikation enthalten.

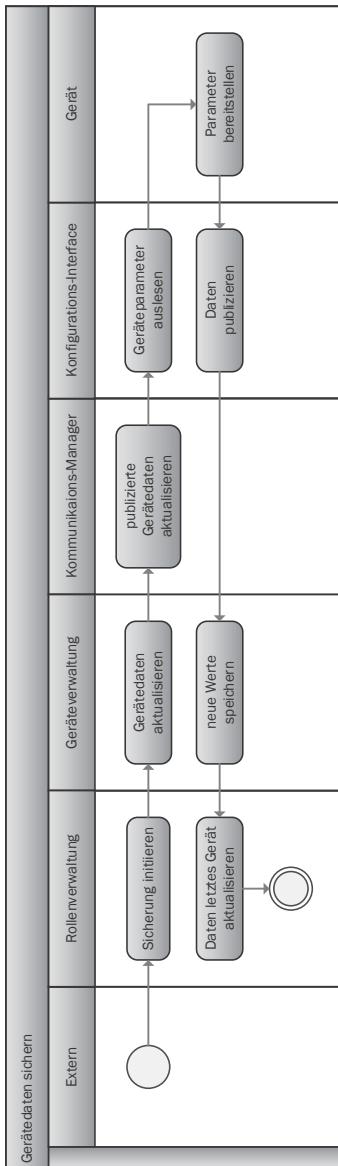


Abbildung 4.9: Ablauf zur Sicherung der aktuellen Gerätedata

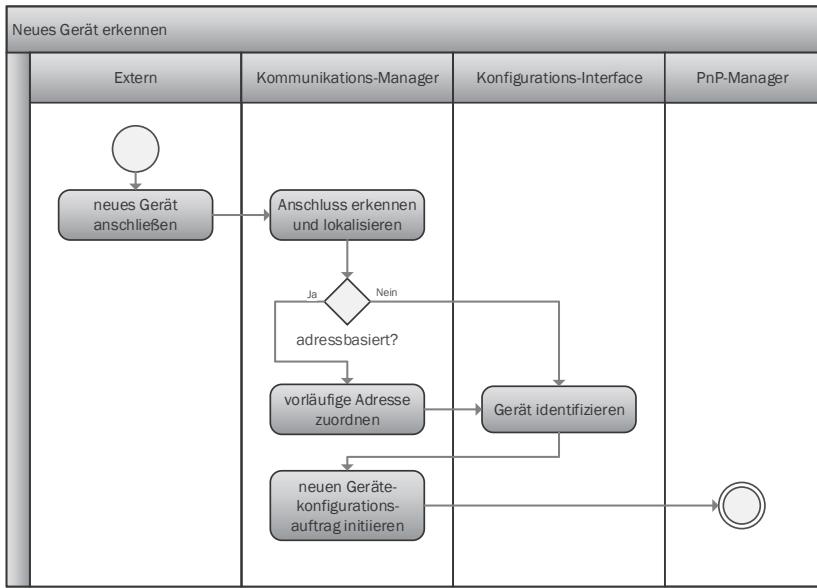


Abbildung 4.10: Ablauf beim Anschluss eines neuen Geräts

4.2.3 Rollenverknüpfung

Nach der Erkennung des neuen Geräts erfolgt die Verknüpfung mit der Rolle (vgl. Block III in Abb. 4.8). Dies ist synonym zur Auswahl der Funktion in der Anlage. Ein Aktivitätsdiagramm für diesen Schritt ist in Abb. 4.11 dargestellt. Beteiligte Komponenten sind der PnP-Manager sowie die Gerätetyp- und Rollenverwaltung. Es gibt ebenfalls einen Bereich für Extern.

Zu Beginn erhält der PnP-Manager den Auftrag aus dem vorherigen Schritt. Anschließend werden die Daten für den spezifischen Gerätetyp bei der Gerätetypverwaltung abgefragt. Dabei werden zunächst nur einige grobe Eckdaten, wie z. B. die leittechnische Funktion und Fähigkeiten, übermittelt. Parallel wird eine Liste der verfügbaren Rollen von den Rollenverwaltungen abgerufen.

Die letztendliche Festlegung der Geräterolle soll aus Gründen der Integrität des PLS manuell durch einen Menschen erfolgen. Diese Auswahl kann durch das PnP-Konzept unterstützt werden. Dazu wird in einem nächsten Schritt die Anzahl der betrachteten Rollen reduziert, bis idealerweise nur eine einzige verbleibt. Dazu können die Rollen nach gewissen Gesichtspunkten gefiltert werden.

Zuerst sind alle Rollen zu entfernen, die bereits mit einem Gerät verknüpft und die damit belegt sind. Im Anschluss können alle Rollen ausgeschlossen werden, deren geforderte Fähigkeiten nicht vom Gerät unterstützt werden. In den meisten Fällen betrifft dies die

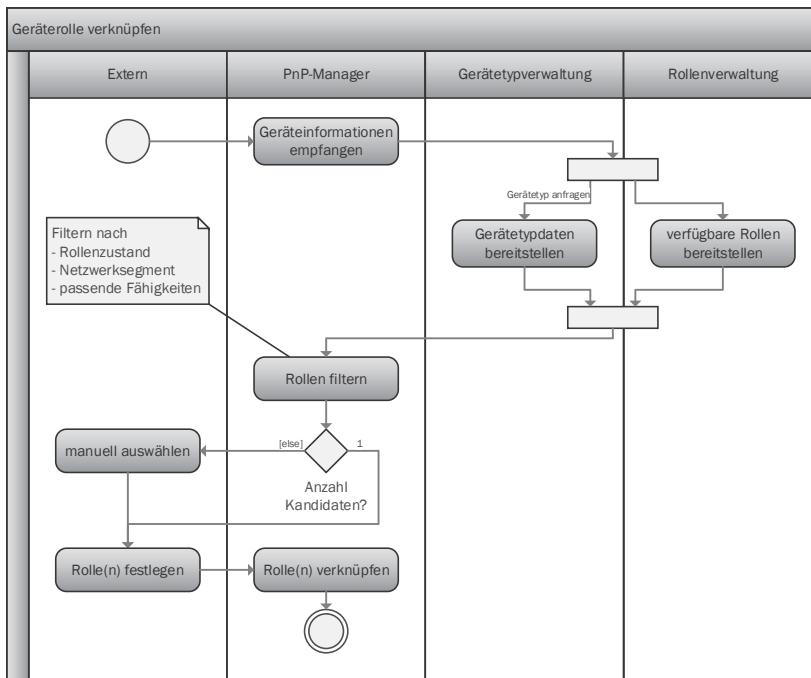


Abbildung 4.11: Ablaufdiagramm für die Zuweisung der Rolle

Mess- bzw. Stellauflage, bei komplexen Geräten kann dies auch eine Dienstschnittstelle sein.

Abschließend kann nach dem Netzwerksegment gefiltert werden. Die Steuerung, in der die Rolle angesiedelt ist, und das neue Feldgerät müssen im selben Segment des Netzwerks verortet sein, damit ein Kommunikationskanal aufgebaut werden kann. Bei Punkt-zu-Punkt-Verbindung ergibt sich so eine eindeutige Zuordnung.

Die nach der Filterung verbleibenden Rollen werden einem Operator präsentiert. Dieser legt die Rollen für das neue Feldgerät fest. Verbleibt genau eine Rolle, kann diese einfach bestätigt werden. Sind noch mehrere Rollen vorhanden, muss eine manuelle Auswahl getroffen werden. Multivariable Geräte können in der Anlage dabei mehrere Aufgaben übernehmen und damit auch mehrere Rollen belegen. Werden alle Rollen bzw. die gewünschte Rolle ausgefiltert, kann der PnP-Vorgang nicht fortgesetzt werden. Bei einer manuellen Prüfung können herausgefilterte Rollen betrachtet werden, um die Quelle des Problems zu analysieren. Nach der Festlegung durch den Operator wird das Gerät mit den gewählten Rollen verknüpft und mit dem PnP-Vorgang fortgefahrene.

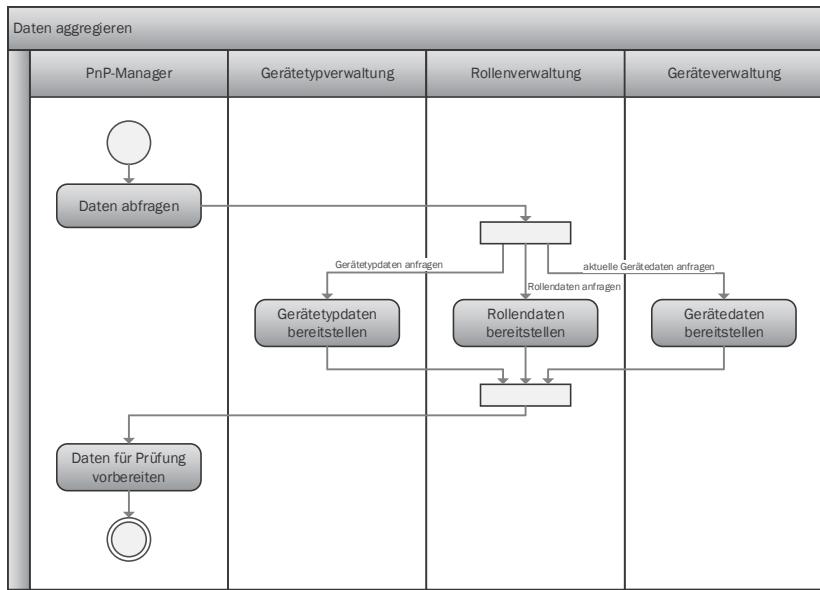


Abbildung 4.12: Ablaufdiagramm für die Aggregation der benötigten Daten

4.2.4 Datenaggregation und Eignungsprüfung

Im vierten Block (vgl. Abb. 4.8) werden zunächst die nötigen Informationen für den PnP-Vorgang aus den Entitäten aggregiert. Anschließend müssen diese Daten für die Eignungsprüfung in die Form von PVS überführt werden. Danach kann die Eignung des neuen Feldgeräts für die ausgewählten Rollen überprüft werden.

Datenaggregation

Zunächst werden alle relevanten Daten über Gerätetyp, Rolle und Feldgeräteinstanz aggregiert. An der Aggregation beteiligt sind der PnP-Manager sowie die Verwaltungen für Gerätetyp, Rolle und Feldgerät. Der Vorgang ist in Abb. 4.12 dargestellt.

Die Aggregation beginnt beim PnP-Manager, welcher bei den Verwaltungseinheiten Anfragen stellt. Die Anfragen sind unabhängig voneinander und können parallel durchgeführt werden. Vom Gerätetyp werden alle statischen Merkmale und die Beschreibungen aller Parameter erfragt. Weiterhin werden die angebotenen Fähigkeiten, d. h. verfügbare Prozesswerte und Dienstschnittstellen, bereitgestellt. Bei der Rollenverwaltung werden die Anforderungen aller beteiligten Rollen ermittelt. Zudem werden die Daten des neuen Feldgeräts abgefragt.

Transformation in PVS-Form

Die gesammelten Informationen werden für den Abgleich zwischen Anforderungen und Zusage vorbereitet. Hierzu werden die Daten in PVSen transformiert. Die Anforderungen der Rolle und statischen Merkmale des Gerätetyps liegen bereits in der korrekten Form vor. Die Parameterbeschreibungen des Typs enthalten Informationen zu den Grenzen, in denen der Parameter eingestellt werden kann. Bei kontinuierlich einstellbaren Parametern wird eine Aussage zu einem geschlossenen Intervall generiert. Alternativ können zwei Aussagen mit „ \leq “ bzw. „ \geq “ als Aussagerelation gebildet werden. Kann ein Parameter nur diskrete Werte annehmen, können die validen Werte mittels einer Menge dargestellt werden. Die Einstellungen des Feldgeräts werden in PVSen mit Aussagesemantik „Istwert“ und Aussagerelation „=“ gewandelt.

Eignungsprüfung

Im nächsten Schritt kann geprüft werden, ob das Felderät für die ausgewählten Rollen geeignet ist. Dazu genügt die Betrachtung des Gerätetyps, da in diesem alle möglichen Einstellungen beschrieben sind. Die Bereitstellung der nötigen Fähigkeiten wurde bereits bei der Auswahl der Rolle überprüft. Verbleibend ist die Prüfung der Merkmale und Einstellungen. Aus der Datenaggregation liegen alle relevanten Informationen des Typs bereits in PVS-Form vor. Der Abgleichprozesses ist in Abb. 4.13 skizziert.

Bei dem Prozess wird über alle Anforderungen iteriert. Nach Auswahl einer Anforderung wird zunächst geprüft, dass mindestens eine Zusage zu dieser existiert. Anschließend wird überprüft, dass alle Zusicherungen die Anforderung erfüllen. Sind beide Schritte erfolgreich verlaufen, wird mit der nächsten Anforderung fortgefahrene.

Ist zu einer Anforderung keine Zusage vorhanden oder wird die Anforderung von einer Zusage nicht erfüllt, schlägt die Eignungsprüfung fehl. Das eingesetzte Gerät ist dann nicht für die ausgewählte Rolle geeignet und der Fall muss manuell behandelt werden. Treten bei der Bearbeitung keine Komplikationen auf, ist die Prüfung bestanden und es kann zum Block „Umkonfiguration“ übergegangen werden.

Wird mehr als eine Rolle zugewiesen, muss zusätzlich auf inkompatible Anforderungen geprüft werden. Ist eine Eigenschaft in mehr als einer Rolle enthalten, so dürfen sich die diese Eigenschaft betreffenden Anforderungen nicht gegenseitig ausschließen, damit ein Lösungsraum existiert. Bei Gleichheitsanforderungen müssen die Werte übereinstimmen, bei Intervallanforderungen muss eine Schnittmenge existieren.

4.2.5 Umkonfiguration

Der abschließende Block der Umkonfiguration verfolgt das Ziel, die Konfiguration des Geräts anzupassen und somit für den Produktionseinsatz bereit zu machen. Die Umkonfiguration unterteilt sich in vier Schritte, welche in den folgenden Abschnitten detailliert beschrieben werden. Angefangen wird mit der Bestimmung der neuen Konfiguration. Anschließend wird das Konfigurationsvorhaben auf Korrektheit und Plausibilität überprüft. Gefolgt wird dies von der Durchführung der Konfiguration und einer abschließenden Verifikation des Konfigurationsvorgangs.

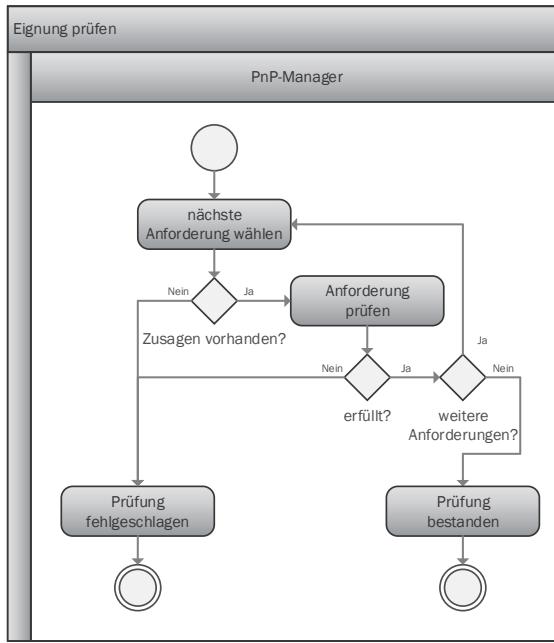


Abbildung 4.13: Ablaufdiagramm zur Eignungsprüfung

Berechnung der neuen Konfiguration

Zunächst muss bestimmt werden, in welcher Weise das neue Feldgerät zu konfigurieren ist. Dieser Prozess lässt sich in zwei Aspekte unterteilen. Vorrangig sind die Forderungen der Rolle zu betrachten. Weiterhin soll jedoch auch die Konfiguration des vorherigen Feldgeräts beachtet werden. Abhängig von der Relation zwischen altem und neuem Gerät ist die Übertragung der Konfiguration unterschiedlich aufwendig. In Tab. 4.1 sind mögliche Relationen und die dabei auftretenden Differenzen aufgeführt. Die Relationen sind mit steigender Differenz und damit aufwendigerer Übertragung der Konfiguration aufgelistet.

Der Austausch mit einem baugleichen Feldgerät ist unproblematisch, da die Parameter eins zu eins übertragen werden können. Bei Revisionen und Nachfolgermodellen sind nur geringfügige Abweichungen zu erwarten. Durch eine konsistente Nutzung derselben semantischen IDs sollte ein Übertrag der Konfiguration ohne größere Probleme möglich sein. Bei Geräten von unterschiedlichen Herstellern sind größere Abweichungen zu erwarten. Dies betrifft zum einen herstellerspezifische Parameter, welche z. B. Zusatzfunktionalitäten betreffen. Zum anderen können andere Merkmalbibliotheken genutzt werden, sodass zusätzlich die Äquivalenz zwischen semantischen IDs von alten und neuen Parametern untersucht werden muss.

Die Änderungen der Konfiguration werden vom PnP-Manager berechnet. Der Ablauf ist im Aktivitätsdiagramm in Abb. 4.14 dargestellt. Als Basis für die Berechnung werden die transformierten Daten aus dem Aggregationsschritt (vgl. Kap. 4.2.4) verwendet.

Zunächst wird über die Anforderungen der Rolle, welche Parameter betreffen, iteriert. Diese müssen in jedem Fall korrekt konfiguriert sein. Demnach können diese bei Vernachlässigung der aktuellen Konfiguration direkt als zu konfigurerende Änderung erfasst werden. Sollen nur Abweichungen behandelt werden, folgt hingegen ein Vergleich mit dem aktuellen Wert aus dem Gerät. Die Zuordnung erfolgt dabei über die semantischen IDs. Nur wenn eine Abweichung existiert, wird eine Änderung hinzugefügt. Anschließend wird die nächste Anforderung behandelt.

Sind sämtliche Anforderungen abgearbeitet, wird mit den Parametern des vorherigen Geräts fortgefahren. Diese umfassen alle Parameter, die nicht bereits durch die Anforderungen abgedeckt sind. Zunächst muss überprüft werden, ob der Parameter übertragbar ist. Dazu wird nach äquivalenten Parametern im neuen Gerät gesucht, welche über die semantischen IDs zugeordnet werden. An dieser Stelle sind, besonders bei Geräten unterschiedlicher Hersteller, möglicherweise unterschiedliche Semantikbibliotheken zur Anwendung gekommen. In diesem Fall muss eine genauere Analyse der Semantik erfolgen. Ist der Parameter nicht übertragbar, wird mit dem nächsten fortgefahren. Kann der Parameter hingegen übertragen werden, wird analog zu den Anforderungen verfahren. Zunächst stellt sich die Frage, ob nur Abweichungen übertragen werden sollen. Falls dies zutrifft, wird der aktuelle Wert mit dem alten Parameterwert verglichen und entsprechend eine Änderung addiert.

Durch einen Vergleich mit der aktuellen Konfiguration des neuen Geräts müssen nur die nötigen Parameter modifiziert werden. Dadurch reduziert sich die Menge der Konfigurationsaufrufe, was besonders bei Protokollen mit niedrigen Übertragungsgeschwindigkeiten eine substanziale Beschleunigung bedeuten kann. Der Vergleich ermöglicht zudem Aussagen zur Abweichung von der vorherigen Konfiguration.

Überprüfung der Konfiguration

Bevor Einstellungen in der Feld- und Leitebene geändert werden, müssen diese Änderungen auf Korrektheit und Plausibilität überprüft werden. Ansonsten droht Fehlverhalten der Anlage, was wiederum Verfügbarkeit und Sicherheit gefährdet. Das PnP-Konzept sieht vor dem Schreiben der Konfiguration einen Überprüfungsschritt vor. Das einfachste Verfahren ist die Überprüfung durch einen Menschen. Automatische Verfahren, welche zusätzliche

Tabelle 4.1: Übersicht der möglichen Differenzen zwischen neuem und altem Gerät

Relation	zu erwartende Differenzen
gleicher Gerättyp	keine Differenzen in Parametern oder semantischen Annotationen
Revision des Gerätetyps	alle bisherigen Parameter; wenige bis keine neuen Parameter; gleiche semantische IDs
Nachfolgermodell	Änderungen bei den verwendeten Parametern; weitestgehend konsistente semantische Annotationen
anderer Hersteller	andere Strukturierung der Parameter und Verwendung anderer Merkmalbibliotheken

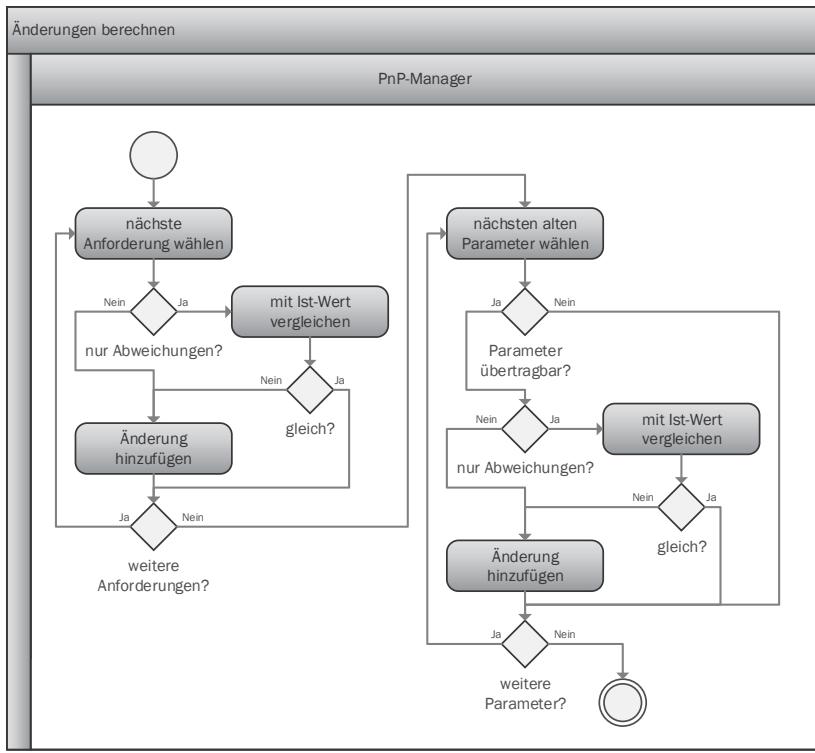


Abbildung 4.14: Ablaufdiagramm zur Bestimmung der nötigen Änderungen

Daten über die Anlage, Prozesse und Physik mit einbeziehen, sind denkbar, liegen allerdings außerhalb des Umfangs dieser Arbeit. Das Vorgehen ist in Abb. 4.15 dargestellt. Beteilt sind der PnP-Manager und der Operator als Mensch, an einem entsprechenden System, als externer Akteur.

Zuerst müssen die nötigen Informationen für die Überprüfung zusammengestellt werden. Diese sind in vier Kategorien unterteilt:

1. Parameter, welche bereits auf den gewünschten Wert eingestellt sind. Werden nur Änderungen an das Gerät übertragen, haben diese Einträge keine Aktion zur Folge. Dennoch ist die Information, dass dieser Abgleich stattgefunden hat, relevant.
2. Parameter, welche angepasst werden müssen. Diese werden in den nächsten Schritten auf das Gerät übertragen. Neben der ID des Parameters werden alter und neuer Wert angegeben sowie, ob es sich um eine Anforderung oder alte Einstellung handelt.

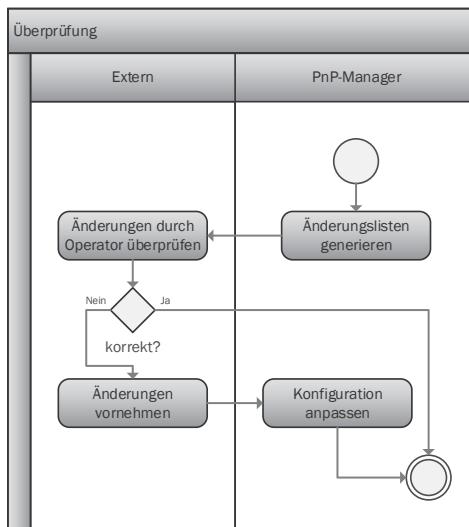


Abbildung 4.15: Ablaufdiagramm zur manuellen Überprüfung der neuen Konfiguration

3. Parameter, welche nur im neuen Gerät verfügbar sind. Für diese Parameter gibt es keine Anforderung und keine Einstellung im alten Gerät.
4. Parameter, welche nur im alten Gerät verfügbar waren. Diese sind nicht im neuen Gerät vorhanden und können deshalb nicht übertragen werden.

Nach Zusammenstellung der Änderungslisten werden diese einem Operator auf einer geeigneten Oberfläche präsentiert. Dieser kann nun entscheiden, wie weiter verfahren wird. Sind alle Einträge passend, wird mit der Konfiguration fortgefahrene.

Gibt es Änderungswünsche, können diese über die Oberfläche eingetragen werden. Dabei sind mehrere Gründe denkbar. Zum einen kann eine alte Einstellung ein Äquivalent im neuen Gerät besitzen, die nicht vom System erkannt wurde und dann manuell nachgetragen werden kann. Zudem können abweichende Einstellungen gewünscht sein. Zuletzt kann neuen Parametern der gewünschte Wert zugewiesen werden. Nach Spezifikation der Änderungswünsche werden diese im PnP-Manager übernommen.

Übertragung der Konfiguration

Mit Zustimmung des Operators kann die neue Konfiguration an das Gerät übertragen werden. Der Vorgang ist in Abb 4.16 dargestellt. An diesem Prozess beteiligt sind der PnP-Manager, die Gerätetypverwaltung, der Rollen-Manager und das Konfigurations-Interface.

Zu Beginn werden alle Parameter bestimmt, für die eine Änderung erfolgen soll. Für diese wird in der Gerätetypverwaltung die Zugriffsbeschreibung für das Setzen des Parameters

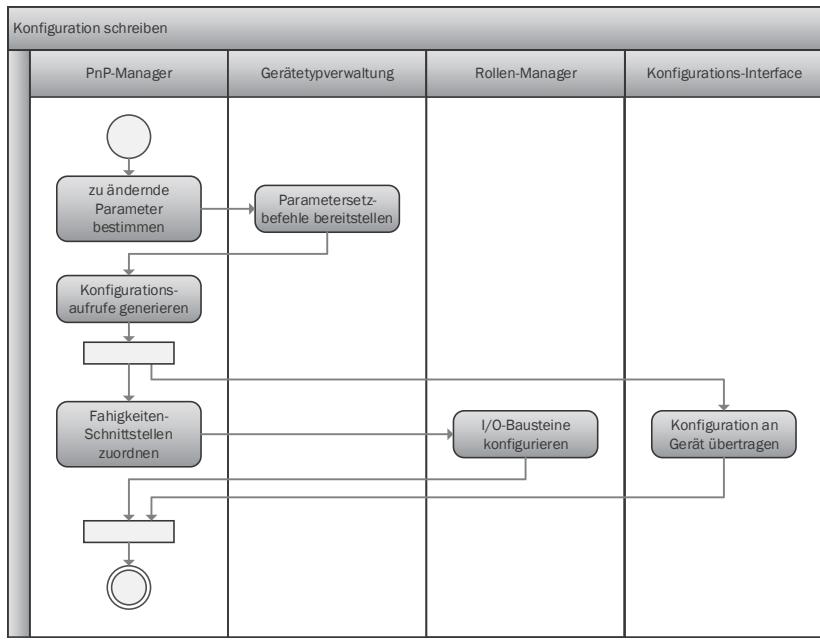


Abbildung 4.16: Ablaufdiagramm zum Übertragen der neuen Konfiguration

nachgeschlagen. Mit diesen Informationen werden anschließend die Konfigurationsaufrufe generiert. Diese Aufrufe werden dann mittels des Konfigurations-Interfaces an das Gerät übertragen. In Situationen, in denen das Konfigurations-Interface bereits über sämtliche Zugriffsbeschreibungen verfügt, können die Parameter und deren Soll-Wert direkt an das Konfigurations-Interface übertragen werden. Dies betrifft vor allem Parameter, deren Zugriff bereits im Protokoll spezifiziert ist.

Parallel zum Schreiben der Parameter auf dem Gerät werden die Einstellungen im Rollen-Manager angepasst. Dazu werden die Schnittstellen der Fähigkeiten der Rolle und des Gerätetyps einander zugeordnet. Anschließend erfolgt die Konfiguration der I/O-Bausteine im Rollen-Manager. Hier wird zunächst der Geräteendpunkt global im Manager angepasst. Im Anschluss können eventuelle Änderungen in den Bausteinen vorgenommen werden, z. B. Anpassen einer Node-ID in OPC UA oder Modifikation der Struktur eines Leseaufrufs bei Profibus.

Verifikation

Bevor das Gerät für den Betrieb freigegeben wird, muss der erfolgreiche und korrekte Verlauf der Konfiguration gesichert sein. Zu diesem Zweck wird die aktuelle Konfiguration erneut mit den Anforderungen abgeglichen. An der Verifikation sind der PnP-Manager und

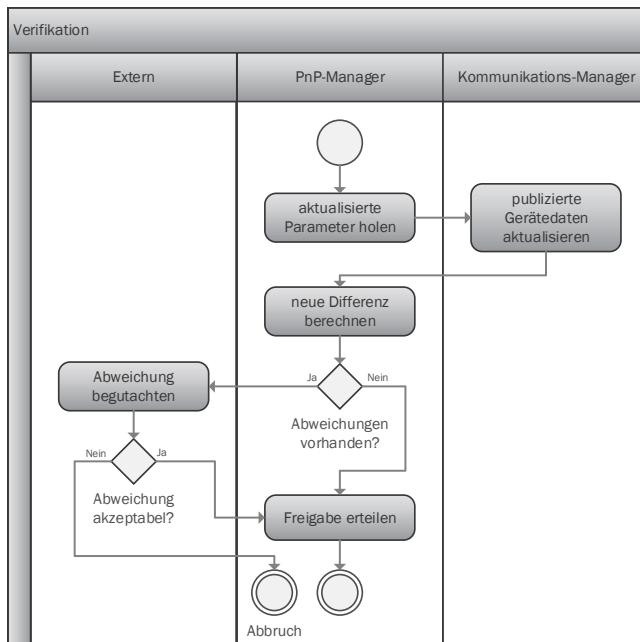


Abbildung 4.17: Ablaufdiagramm zur Verifikation der Konfiguration

der Kommunikations-Manager beteiligt. Zusätzlich gibt es externe Akteure. Der Ablauf ist in Abb. 4.17 gezeigt.

Zuerst müssen die neuen Parameterwerte des Geräts besorgt werden. Zu diesem Zweck sendet der PnP-Manager einen Auftrag an den Kommunikations-Manager, die publizierten Gerätedaten zu erneuern. Die unterlagerten Schritte für diesen Prozess sind im Block für die Sicherung (vlg. Kap. 4.2.1) dargestellt. Anschließend wird nach Abweichungen von der Soll-Konfiguration gesucht. Sind keine Abweichungen vorhanden, wird das Gerät freigegeben und kann für die Prozessführung verwendet werden.

Treten nach dem Konfigurieren Differenzen zur Soll-Konfiguration auf, werden diese einem Operator zur Begutachtung vorgelegt. Dieser entscheidet, ob diese Abweichungen akzeptabel sind, so z. B. wenn aufgrund diskreter Parameterwerte keine exakte Gleichheit erzielt wurde. Sind Abweichungen nicht akzeptabel, wird der PnP-Vorgang abgebrochen.

5 Übertragung des Konzepts auf technische Realisierungen

In Kapitel 4 wurde das neue rollenbasierte PnP-Konzept beschrieben. Dieses Kapitel soll zeigen, wie das Konzept technologisch umgesetzt werden kann. Begonnen wird dabei mit der konkreten Modellstruktur der Informationsmodelle der Akteure. Danach wird diskutiert, welche standardisierten und etablierten Technologien zur Umsetzung des Konzepts genutzt werden können. Zu diesem Zweck wird in Abschnitt 5.2 eine Gegenüberstellung von benötigten Funktionalitäten des PnP und bereitgestellten Features der Technologien diskutiert.

Im weiteren Verlauf des Kapitels werden drei Anwendungsfälle mit Geräten unterschiedlicher Komplexität geschildert und der PnP-Ablauf in den einzelnen Fällen erörtert. Die Beschreibung der Anwendungsfälle umfasst eine Darstellung der vorliegenden Infrastruktur, eine Auflistung der Daten zu Rollen, Gerätetypen und Geräten sowie eine Erörterung der durchlaufenen Prozedur.

5.1 Umsetzung der Informationsmodelle

Die Informationsmodelle der Akteure im PnP-Konzept wurden in Kapitel 4 abstrakt beschrieben. In den folgenden Abschnitten werden die Modelle konkretisiert. Die vorgestellten Modelle stellen dabei eine mögliche Modellierung dar, die für die Durchführung der PnP-Prozedur genügt.

5.1.1 Modellierung der Geräterolle

Die Geräterolle formuliert die Anforderungen an eine Ausführungseinheit. Für das PnP wird eine Beschreibung dieser Rollen benötigt. Die konkrete Struktur der Rolle ist in Abb. 5.1 als Klassendiagramm dargestellt.

Die Rolle enthält eine Reihe von Anforderungen. Diese Anforderungen sind als PVSen formuliert, wobei die Aussagesemantik auf „Anforderung“ festgelegt ist. Träger dieser Eigenschaften ist die Rolle selbst oder eine der enthaltenen Fähigkeiten. Logik, Skala des Aussagewerts und Aussagewert sind abhängig von der jeweiligen Anforderung. In der Regel werden Anforderungen an Leistungsmerkmale mittels Bereichen beschrieben (\geq und \leq), wohingegen Anforderungen an Parameter als Gleichheit formuliert werden.

Eine Rolle kann als Bestandteil eines Rollenplans verwaltet werden. Ein Rollenplan kann ein Produkt des Anlagenplanungsprozesses sein, z. B. ein erweitertes R&I-Fließbild. Diese Sicht der Rolle reiht sich gut in die etablierten Planungsprozesse ein und bietet gleichzeitig eine bessere Einordnung in die Anlagenstruktur.

Die zentrale Aufgabe, die eine Feldgeräterolle beschreibt, ist die Bereitstellung von Fähigkeiten für die Prozessführung. Bei diesen Fähigkeiten kann es sich (im Rahmen der

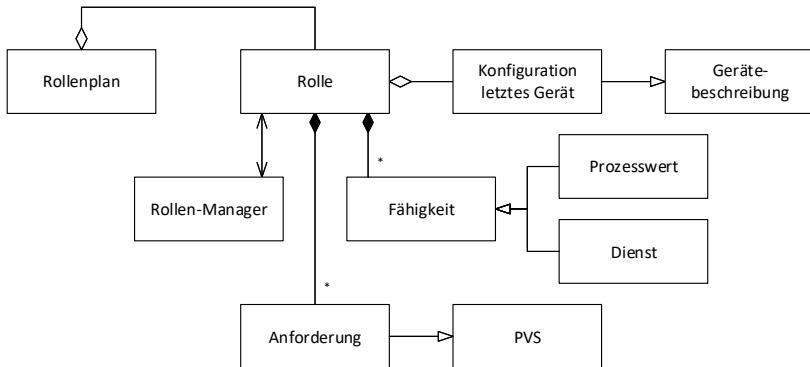


Abbildung 5.1: Rollen-Modell

Prozesstechnik) um einen Prozesswert (Mess- bzw. Stellwert) oder eine Dienstschnittstelle handeln. In vielen Anwendungsfällen benötigt eine Rolle nur einen Prozesswert. In einigen Situationen werden jedoch voneinander abhängige Prozesswerte benötigt. Ein gutes Beispiel hierfür stellen Akteure mit Rückmeldungen dar. Hier sind der Stellwert und die Rückmeldung eng miteinander verknüpft und kommen vom selben Gerät. Da die beiden Prozesswerte nicht unabhängig voneinander genutzt werden können, ist es sinnvoll, diese als eine gemeinsame Rolle darzustellen. Zu diesem Zweck kann die Rolle eine Mehrzahl von Prozesswerten enthalten. Die erwarteten Prozessgrößen sind durch Typisierung mit semantischen IDs festgelegt. Neben der Interaktion mittels Prozesswerten kann mit moderneren Geräten über Dienste interagiert werden. Mit Diensten können komplexe Aufgaben angestoßen und über einen (Dienst-)Zustand überwacht werden. Dienste sind ebenfalls mit einer ID typisiert. Aufgrund der großen Anzahl möglicher Typen ist ein benutzerdefinierter Bezeichner (z. B. eine URI) als ID sinnvoll.

Die Rolle verfügt weiterhin über einen Verweis auf einen „Rollen-Manager“, näher beschrieben in Kapitel 5.1.4. Dieser stellt die in der Rolle beschriebenen Fähigkeiten der überlagerten Prozessführung bereit.

Letztlich enthält die Rolle die Konfiguration des Feldgeräts, von dem sie zuletzt besetzt war. So kann bei einem Wechsel das neue Gerät möglichst ähnlich konfiguriert werden. Die letzte Konfiguration kann in Form einer Gerätbeschreibung (vgl. Kap. 5.1.3) abgebildet werden. Da sich die Konfiguration des alten Geräts vor dem Einsatz eines neuen Geräts verändern kann, ist es vorteilhaft, in der Rolle eine Kopie der Daten vorzuhalten. So ist der letzte Konfigurationsstand in Bezug auf die Rolle sichergestellt.

In der Praxis kommen Multivariable-Geräte, d. h. Geräte, die mehr als einen Prozesswert besitzen, zum Einsatz. Bestes Beispiel hierfür sind Coriolis-Massendurchflussmesser. [61] Diese liefern neben dem Massendurchfluss meist auch Informationen zu Temperatur und Dichte sowie abgeleitete Größen wie Volumendurchfluss und Fließgeschwindigkeit. Werden mehrere dieser Messgrößen genutzt, werden diese in den aktuellen Projektierungen als ei-

gene PLT-Stellen geplant [34]. Analog werden im PnP-Konzept Funktionen, die auch von getrennten Geräten realisiert werden können, als separate Rollen modelliert. Die Zusammenfassung der Rollen in einem Feldgerät erfolgt durch entsprechende Zuordnungen in der Prozedur des PnP.

5.1.2 Modellierung von Gerätetypen

Ein Gerätetyp formuliert die gemeinsamen Eigenschaften einer Gruppe von Feldgeräten. Im PnP-Konzept wird diese Beschreibung genutzt, um die generelle Eignung eines Feldgeräts für eine Rolle zu bestimmen. Abb. 5.2 zeigt das konkrete Modell für einen Gerätetyp. Der Gerätetyp kann einerseits statische Eigenschaften besitzen. Diese werden als PVSen modelliert und geben Aussagen zu Leistungsmerkmalen des Typs.

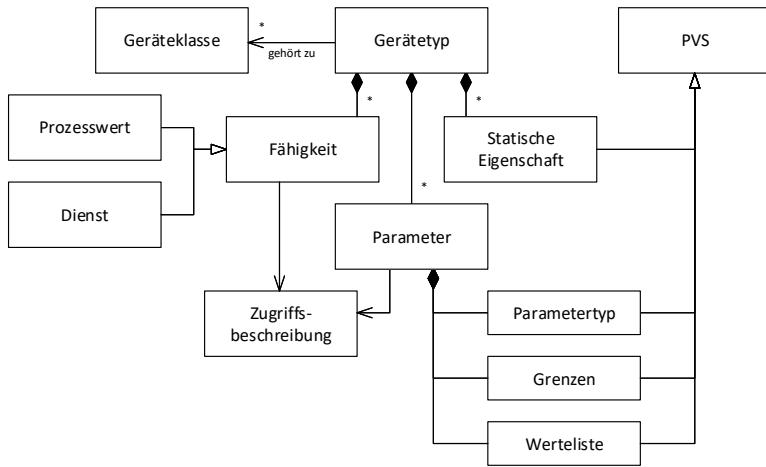


Abbildung 5.2: Gerätetyp-Modell

Daneben kann ein Gerätetyp eine beliebige Anzahl von Parameterbeschreibungen enthalten. In der Beschreibung des Parameters wird über den Parametertyp festgelegt, welcher Parameter beschrieben wird. Dazu können die semantischen IDs, wie in Kap. 3.2 erörtert, genutzt werden. Weiterhin sind die Grenzen, in denen der Parameter variiert werden kann, spezifiziert. Für Parameter mit diskreten Werten ist alternativ die Nutzung von Wertelisten möglich, welche alle validen Parameterwerte enthalten. Zuletzt existiert eine Zugriffsbeschreibung für den Parameter. Über diese werden mögliche Wege für das Lesen und Setzen des Parameters auf dem Gerät dargestellt. Dies erfolgt für alle vom Gerät unterstützten Kommunikationschnittstellen und -protokolle. Die EDDL (vgl. Kap. 3.1.2) stellt hier gute und etablierte Mechanismen bereit.

Zusätzlich beschreibt der Gerätetyp, welche Fähigkeiten das Gerät bereitstellen kann. Dies sind im Umfang dieser Arbeit entweder Prozesswerte oder Dienstschnittstellen. Die

Zugriffswege für diese Schnittstellen werden ebenfalls über eine Zugriffsbeschreibung spezifiziert.

Ein Gerätetyp kann zu einer Gerätekasse gehören. Die Gerätekasse ist ein abstrakter Gerätetyp und kann beliebig viele spezifischere Gerätetypen enthalten. Die Mitglieder einer Gerätekasse erben sämtliche Eigenschaften und Parameter von dieser. So kann zum einen die Modellierung der Gerätetypen verschlankt werden, da gemeinsame Aspekte nur einmal abgelegt sind. Zum anderen können Eignungsprüfungen zwischen Klassen und Rollen durchgeführt werden, wenn ein genauer Typ noch nicht feststeht oder nach einem Ersatz gesucht wird.

5.1.3 Modellierung von Geräteinstanzen

Für das PnP werden Daten aus dem Gerät benötigt. Dies umfasst in erster Linie die Parameter und ihre aktuell eingestellten Werte. Weiterhin sind identifizierende Merkmale hilfreich, um eine spezifische Geräteinstanz zu finden und zu verifizieren. Eine Zuordnung kann jedoch auch über einen externen Dienst erstellt werden. Die Modellierung der Geräteinstanz ist an PA-DIM angelehnt [72]. Das Modell ist in Abb. 5.3 gezeigt.

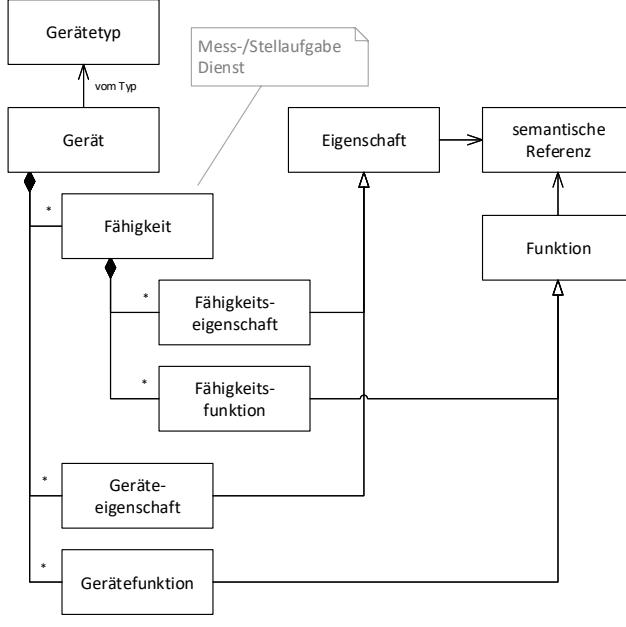


Abbildung 5.5: Geräteinstanz-Modell

Zum Beschreiben des Geräts werden Eigenschaften verwendet, die einen Eigenschaftswert enthalten und einen Verweis auf eine semantische Referenz besitzen. Die semantische

Referenz kann z. B. eine semantische ID oder ein Verweis auf ein Element eines semantischen Wörterbuchs sein.

Mit den Eigenschaften können sowohl statische Merkmale als auch Parameter und Messwerte dargestellt werden. Diese werden in zwei Kategorien unterteilt – Geräteeigenschaften und fähigkeitsbezogene Eigenschaften (Aufgabeneigenschaften in PA-DIM). Geräteeigenschaften beziehen sich direkt auf das Gerät und können sinnvoll auch nur ein einziges Mal angewendet werden. Dagegen beziehen sich Fähigkeitseigenschaften auf eine Mess- bzw. Stellaufgabe oder einen Dienst. Da ein Gerät mehrere Prozesswerte bzw. Dienste und damit auch mehrere Fähigkeiten bereitstellen kann, können fähigkeitsbezogene Eigenschaften mehrfach auftreten. Um diese voneinander unterscheiden zu können und um diese zu gruppieren, werden diese unter der entsprechenden Fähigkeit eingeordnet.

Weiter werden bereitgestellte Funktionen auf Geräte- und Fähigkeitsebene beschrieben. Diese Funktionen spielen für das PnP-Konzept eine untergeordnete Rolle und werden in den meisten Fällen nicht benötigt. Ausnahmen bilden spezielle Funktionen zur Initialisierung des Geräts oder Funktionen, die zum Einstellen bestimmter Parameter benötigt werden.

Mit diesem Modell können die aus Sicht des PnP nötigen Eigenschaften eines Geräts dargestellt werden. Für die Verarbeitung im PnP-Konzept müssen diese jedoch noch in ein zu den anderen Daten kompatibles Format, d. h. in PVS-Form, überführt werden. Daten aus dem Gerät werden benötigt, um den aktuellen Zustand zu erfassen. Folglich kann davon ausgegangen werden, dass nur Äquivalenzzusagen auftreten. Eigenschaften, die eine andere Aussagelogik benötigen, sind bereits im Gerätetyp definiert und können in der Geräteinstantz ignoriert werden. Bezuglich der Aussagesemantik kann es sich entweder um ein Statement oder um einen Istwert handeln. Für das PnP-Konzept ist dies irrelevant, da beides ein Gegenstück zur Anforderung darstellt.

5.1.4 Modellierung des Rollen-Managers

Das PnP-Konzept nutzt Rollen für die Zuordnung von Feldgeräten zu leittechnischen Funktionen. Für ein Gelingen des Konzepts müssen diese Strukturen ebenfalls in den Steuereinheiten abgebildet sein, um eine dynamische Kopplung zwischen Feldgerät und Steuerungsanwendung sicherzustellen. Hierarchisch oberhalb der Kommunikationsschicht ist deshalb eine Rollenebene vorgesehen. Die zentrale Aufgabe dieser Ebene ist die korrekte Verknüpfung der Feldgeräte, via des Kommunikationssystems, mit den Schnittstellen der Steuerungsapplikationen. Im Rollen-Manager wird ebenfalls der Zustand der Rolle festgehalten. Für jede einzelne Rolle existiert auf dieser Ebene eine Managerinstanz, welche diese Aufgaben realisiert. Das Modell eines Rollen-Managers ist in Abb. 5.4 dargestellt.

Der Rollen-Manager ist die Repräsentanz der Rolle in der Steuerung. Der Belegungs- und Konfigurationszustand der Rolle wird über einen Zustandsautomaten geregelt. Mögliche Zustände sind „Gerät nicht vorhanden“, „Gerät nicht betriebsbereit“ und „Gerät ist betriebsbereit“ (vgl. Kap. 4.1.3).

In den beiden letzteren Zuständen ist der Rolle ein Kommunikations-Manager zugewiesen, über dessen Netzwerk das belegende Feldgerät erreichbar ist. Die Adresse des Geräteendpunktes, falls anwendbar, wird im Rollen-Manager hinterlegt. Somit ist der Kommunikationsweg zum Gerät vollständig spezifiziert.

Die Rolle verfügt weiter über eine oder mehrere Schnittstellen für die in der Rolle spezifizierten Fähigkeiten. Diese sind über statische Verbindungen mit der Prozessführung verbunden und bilden somit eine Abstraktionsschicht für die Kommunikation mit dem Ge-

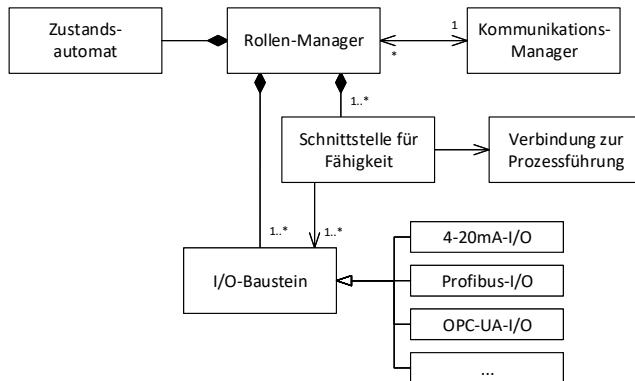


Abbildung 5.4: Modell des Rollen-Managers

rät. Analog zu den vorherigen Modellen kann eine Fähigkeit entweder ein Prozesswert oder eine Dienstschnittstelle sein.

Der Austausch der Prozesswerte und Dienste mit dem Gerät erfolgt über I/O-Bausteine. Für jedes Protokoll existieren dedizierte Bausteinintypen, die angemessen parametrisiert werden können. Soll eine Rolle durch Geräte mit unterschiedlichen Protokollen (z. B. Profibus und OPC UA) belegt werden können, kann dies im Rollen-Manager auf zwei unterschiedlichen Wegen vorgesehen werden. In Systemen, die zur Laufzeit wandelbar sind, können die benötigten Bausteine während des Konfigurationsvorgangs instanziert werden. Die Parameter der Bausteine sind dabei der Zugriffsbeschreibung im Gerätetypmodell zu entnehmen. In statisch projektierten Systemen können mehrere I/O-Bausteinen für verschiedene Protokolle angelegt werden. Je nach Typ des Geräteendpunktes wird dann auf den korrekten Satz von I/O-Bausteinen gewechselt.

5.1.5 Modellierung der Kommunikationssysteme

Die verschiedenen Kommunikationssysteme verbinden die einzelnen Komponenten des Automatisierungssystems und erlauben diesen, Werte miteinander auszutauschen. Einige bilden dabei komplexe Netzwerke, wohingegen andere lediglich lineare Strukturen bilden.

Die Eigenschaften des genutzten Kommunikationssystems haben maßgeblichen Einfluss auf die benötigten Netzwerkdienste und deren Organisation. Eine Übersicht bezüglich der Struktur der Netzwerke, der Schemata der Adressierung sowie der Koordinierung ist in Tab. 5.1 für eine Auswahl von Protokollen gegeben.

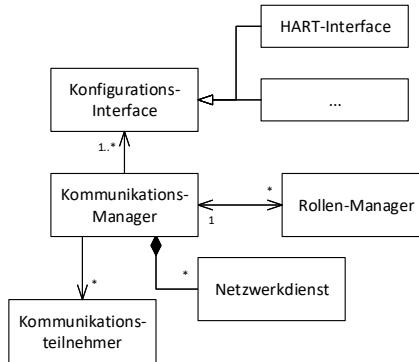
Bei Struktur wird zwischen Punkt-zu-Punkt, Bus und Netzwerk unterschieden. „Punkt-zu-Punkt“, wie der Name andeutet, verbindet genau zwei Kommunikationspartner miteinander. Die Struktur „Bus“ verbindet mehrere Geräte miteinander, ohne dass die Positionen der einzelnen Geräte unterschieden werden können. Physikalisch sind Topologien wie z. B. Linie, Stern oder eine Kombination von beiden denkbar. Ausschlaggebend ist das von allen

Tabelle 5.1: Eigenschaften betrachteter Kommunikationssysteme

Kommunikationssystem	Struktur	Koordination	Adressierung
HART	Punkt-zu-Punkt	zentral	-
HART (multidrop)	Bus	zentral	HART-Adresse
Profibus	Bus	zentral	Bus-Adresse
Ethernet/IP-basiert	Netzwerk	dezentral	IPv4 / IPv6

Teilnehmern geteiltes Kommunikationsmedium. Mit „Netzwerk“ sind Strukturen beschrieben, welche über mehrere Mediumsegmente verfügen und über Switch- bzw. Gatewayähnliche Komponenten verschaltet sind. Die Spalte Koordination unterscheidet zwischen zentral und dezentral und beschreibt, wie die Kommunikation organisiert und bearbeitet wird. Relevant ist hier, ob ein übergeordneter Kommunikationsteilnehmer (Master) existiert, welcher das Kommunikationsaufkommen regelt. Abschließend wird der Punkt Adressierung betrachtet. Dieser zeigt an, inwiefern Adressen genutzt werden und welche Form diese Adressen annehmen.

Für das PnP müssen auf Ebene der Kommunikation einige Funktionen zur Verfügung stehen. Diese werden in diesem Konzept über einen „Kommunikations-Manager“ bereitgestellt und koordiniert. Das entsprechende Modell ist in Abb. 5.5 gezeigt. Der Kommunikations-Manager erhält Verweise auf mit ihm verbundene Kommunikationsteilnehmer. Über diese können Steuerungen über neue Geräte informiert werden. Zudem sind dem Kommunikations-Manager die verbundenen Rollen-Manager bekannt. Der Wegfall eines Geräts wird so dem betroffenen Rollen-Manager mitgeteilt und die Rolle kann (unter den gegebenen Umständen) als unbelegt markiert werden.

**Abbildung 5.5:** Modell des Kommunikations-Managers

Weiterhin sind dem Kommunikations-Manager Konfigurations-Interfaces zugeordnet. Diese bieten Funktionen zum Lesen und Schreiben der Gerätekonfiguration. Werden mehrere Protokolle parallel verwendet, besteht die Möglichkeit, mehr als ein Konfigurations-Interface zu nutzen. Entsprechend des Protokolls, über welches das Feldgerät angebunden

wird, muss dann das richtige Interface genutzt werden.

Der Kommunikations-Manager stellt zudem die in Kapitel 4.1.3 beschriebenen Netzwerkdiene bereit. Die Umsetzung der Dienste ist dabei vom Kommunikationsprotokoll abhängig. Der Kommunikations-Manager ist mit diesen Diensten in der Lage: den Anschluss neuer Geräte zu erkennen, neue Geräte zu identifizieren, Adressen der Feldgeräte zu verwalten und Gerätetypen über eine offene Schnittstelle bereitzustellen.

Die Instanziierung eines Kommunikations-Managers kann an verschiedenen Stellen erfolgen. Für verteilte und dezentral organisierte Kommunikationssysteme bietet sich ein alleinstehendes System an, welches die Koordinierung eines oder mehrerer Protokolle übernimmt. Die IT-Welt stellt hier eine Großzahl von Lösungen bzw. Lösungskonzepten zur Verfügung. Bei zentral verwalteten Kommunikationssystemen gibt es eine oder wenige Einheiten, welche das Kommunikationsmedium kontrollieren. Meist übernimmt die Steuerung diese zentrale Rolle, so z. B. bei HART oder Profibus. In diesen Fällen ist es sinnvoll, die Funktionen des Kommunikations-Managers in dieser zentralen Einheit anzusiedeln. Das Konfigurations-Interface kann an dieser Stelle unabhängig vom Kommunikations-Manager in einem anderen System verortet sein.

5.2 Technologie-Mapping

In diesem Abschnitt werden mögliche Technologien für die Umsetzung der Funktionen des PnP vorgestellt. Die Funktionen sind in Möglichkeiten der Informationsbereitstellung und Dienste des Kommunikationssystems aufgeteilt und werden separat erörtert.

5.2.1 Technologien für die Informationsbereitstellung

Die für das PnP benötigten Informationen müssen in geeigneter Form, d. h. semantisch annotiert oder als PVSei, bereitgestellt werden. Im Folgenden werden Verwaltungsschalen und Engineering-Werkzeuge als mögliche Datenquellen erörtert. Es wird betrachtet, für welche Informationsmodelle bestimmte Quellen geeignet sind und welche Vor- sowie Nachteile diese bieten.

Verwaltungsschalen

Verwaltungsschalen eignen sich hervorragend für die Informationsbereitstellung in diesem PnP-Konzept [9]. Zunächst bieten sie einen assetbezogenen Zugriff. Da Rollen, Gerätetypen und Feldgeräte als Assets angesehen werden, kann so direkt auf die relevanten Informationen zugegriffen werden. Des Weiteren sieht die Verwaltungsschale die Beschreibung der Semantik einzelner Modellelemente vor, wodurch diese Anforderung des Konzepts erfüllt ist. Die Forderung, bestimmte Daten als PVS bereitzustellen, ist durch die Nutzung von Verwaltungsschalen nicht direkt gegeben. Durch die Nutzung von Qualifizierern können die fehlenden Aspekte Aussagesemantik und Aussagelogik ergänzt werden. Die Daten für das PnP könnten zudem in einem eigenen Teilmodell organisiert werden, sodass ein effizienter Zugriff ermöglicht wird. Aufgrund ihrer hohen Flexibilität können Verwaltungsschalen für alle vom PnP benötigten Informationen genutzt werden. Dies umfasst auch Dateien, wie FDI-Packages oder exportierte Planungsdaten, welche direkt als Elemente von Teilmodellen abgelegt werden können.

Engineering-Werkzeuge

Planungsdaten aus Engineering-Werkzeugen können über geeignete Schnittstellen ebenfalls für das PnP genutzt werden. Dies betrifft in erster Linie die Informationen zu den Rollen, die ein direktes Ergebnis der Planung darstellen. Als Schnittstelle bieten sich die Exportfunktionen und -formate an, die im Zusammenhang mit dem durchgängigen Engineering entwickelt werden [83]. Für den Export der Rolle kann das Modell der NE 150 für die leittechnischen Aspekte und die NE 159 für die verfahrenstechnischen Aspekte genutzt werden [87, 88]. Für die Umwandlung der im Export enthaltenen Anforderungen bedarf es jedoch noch einer Umwandlung in die PVS-Form. Die Auswahl der benötigten Aussagelogik und -relation kann dabei anhand der Klassen der AML-Bibliotheken abgeleitet werden. Dies erfordert eine vorab bereitgestellte Transformationsfunktion. Hinzu kommt, dass die Exportdateien vom PnP während der Prozedur im Ganzen behandelt werden müssen und nicht nur relevante Teile der Informationen abgerufen werden können.

Ein weiterer Punkt ist die eigentliche Bereitstellung der exportierten Dateien. Hierfür steht eine Reihe von Möglichkeiten zur Verfügung, angefangen bei Verwaltungsschalen über Datenbanken bis hin zu Webtechnologien wie HTTP und FTP. Die Verwaltungsschale bietet hier wegen der oben genannten Vorteile die beste Wahl.

5.2.2 Technische Umsetzung der Netzwerkdienste

In Kapitel 5.1.5 wurde ein Modell für den Kommunikations-Manager beschrieben. Dieser stellt einige Netzwerkdienste bereit, die in einer technischen Umsetzung realisiert werden müssen. Tab. 5.2 zeigt in den Zeilen die einzelnen Dienste. Die Spalten enthalten einige gängige Kommunikationsprotokolle, für die eine Umsetzung untersucht wird. In den Zellen der Tabelle ist aufgetragen, welche Features der Protokolle zur Realisierung der Funktionen genutzt werden können. Einige Funktionen sind von den Protokollen nicht oder nur teilweise realisierbar. Bei anderen stehen mehrere Lösungsmöglichkeiten zur Verfügung.

HART

Bei HART ist das Feldgerät an einem einzelnen Klemmenpaar angeschlossen und der Prozesswert wird über das Stromsignal übertragen. Über den Strom kann die Steuerung direkt erkennen, wenn ein Gerät angeschlossen wird. Das Gerät selbst kann sich nicht bei der Steuerung melden, da es sich bei HART um ein Master-Slave-Protokoll handelt und nur die Steuerung eine Kommunikation initiieren darf. Eine Adressierung des Geräts ist nur für die Konfiguration nötig und muss daher nicht geändert werden. Ist die HART-Polling-Adresse nicht auf den Standardwert 0 eingestellt, können die anderen 15 möglichen Adressen überprüft werden. Zur Identifikation des Geräts mit Geräte-ID, Gerätetyp und Hersteller steht das HART-Kommando 0 bereit. Als Publikationsschnittstelle, um die Daten sicher aus der Kernautomatisierung zu führen, bietet sich NOA an – eventuell in Verknüpfung mit FDI, um den Zugriff auf herstellerspezifische Parameter zu vereinfachen. Als Konfigurations-Interface kann FDI oder ein proprietäres System genutzt werden.

HART als Bus mit Multidrop

Wird HART als Bussystem in einer Multidrop-Konfiguration genutzt, werden die Geräte in der Regel parallel angeschlossen. Aus diesem Grund ist eine automatische Erkennung

Tabelle 5.2: Technologie-Mapping der Netzwerkdienste

Funktion	HART	HART (als Bus)	Profibus PA	Ethernet / IP	Profinet	OPCUA
Gerätekennung (Infrastruktur)	Strom- signal	Abfrage Adresse 0	Abfrage Adresse 126	Auto-Neg. + Scan	(←IP) + DCP (Identify)	(←IP) + Scan
Gerätekennung (Gerät)	N/A	N/A	N/A	DHCP + Scan	(←IP) + DCP (Hello)	OPCUA-Discovery
Initiale Adressvergabe	N/A	N/A	Adresse 0	Adresse 126	DHCP / IPv6 auto config	(←IP) + DCP (←IP)
Adresse ändern	N/A	HART CMD 7	Kontext ASE	DHCP / DNS	(←IP) + DCP	(←IP)
Identifikation	HART CMD 0	HART CMD 0	I&M Profil	N/A	Real Identifica- tion ASE	OPCUA
Publikation	NOA / FDI	NOA / FDI	NOA / FDI	N/A	NOA / FDI	Aggregating-Server / sep. Interface / NOA
Konfigurations- Interface	FDI / Prop.	FDI / Prop.	FDI / Prop. Prop.	N/A	FDI / Prop.	OPCUA

des physikalischen Anschlusses nicht möglich. Da sich das Gerät nicht selbst melden kann, muss ein zyklischer oder manuell initierter Scan der Polling-Adressen von Seiten der Steuerung erfolgen. Zudem muss sichergestellt sein, dass das neue Gerät keine bereits genutzte Adresse verwendet, da dies sonst zu Kollisionen führt. Eine Lösung für dieses Problem ist die Designation einer Polling-Adresse für neue Geräte (z. B. 0 als Standardadresse). Die Zuweisung der gewünschten Adresse kann dann mithilfe des HART-Kommandos 7 erfolgen. Die Identifikationsdaten können erneut über das HART-Kommando 0 abgerufen werden. Die Publikationsschnittstelle und das Konfigurations-Interface sind analog zu HART mit 4–20 mA-Signal. Bei der technischen Umsetzung muss jedoch darauf geachtet werden, dass diese Funktionen die Übertragung der Prozesswerte nicht behindern.

Profibus PA

Bei Profibus PA muss die Erkennung neuer Geräte ebenfalls von Seiten der Infrastruktur erfolgen, da ein Slave-Gerät nicht berechtigt ist, eine Übertragung zu initiieren. Ein Master-Gerät kann nach einem Gerät mit Adresse 126 suchen, welche laut Spezifikation für nicht integrierte Geräte verwendet werden soll [27]. Aus selbigem Grund entfällt die initiale Adressvergabe. Die endgültige Adresse kann mittels der Kontext-ASE von einem Profibus-Master (Klasse 1 oder 2) gesetzt werden. Soll das PnP für mehrere Geräte parallel nutzbar sein, muss nach dem Erkennen direkt eine ungenutzte Adresse konfiguriert werden. So steht die Adresse 126 für das nächste Gerät schnellstmöglich wieder bereit. Für die Identifikation des Geräts stellt Profibus Dienste im Rahmen des Identification & Maintenance (I&M) Profils bereit [27]. Für die Publikation und Konfiguration kann, analog zu den vorherigen Protokollen, eine Kombination von NOA und FDI genutzt werden. Diese entsprechenden Systeme nehmen im Feldbuskontext die Rolle eines Klasse 2 Masters ein [27].

Ethernet und IP

Ein IP-basiertes Netzwerk bietet alleine noch keine hinreichenden Möglichkeiten, um Prozesswerte zu übertragen. Es sind jedoch eine Reihe von Technologien für IP-Netzwerke verfügbar, welche für auf IP aufbauende oder mit IP kompatible Protokolle genutzt werden können. Dies umfasst in dieser Arbeit OPC UA, welches auf TCP/IP aufsetzt, und Profinet als zu IP kompatibles Protokoll. In den meisten Fällen wird Ethernet als unterlagerte Schicht für IP genutzt.

Der Anschluss eines neuen Geräts wird bei Ethernet über den Auto-Negotiation-Mechanismus auf beiden Seiten erkannt. Zur Bestimmung der vom Gerät unterstützten Protokolle bedarf es jedoch eines Scans. Ein Scan kann durch Anfragen auf spezifischen Ports oder durch sonstige Identifikationsaufrufe geschehen. Da es sich bei IP um ein dezentral organisiertes Netzwerk handelt, kann sich das Gerät selbst melden. Wird in einem Netzwerk DHCP genutzt, kann der DHCP-Server Anfragen von unbekannten Geräten registrieren und melden. Auch hier muss die Identifizierung der unterstützten Protokolle durch einen Scan erfolgen. Die eigentliche Aufgabe von DHCP ist die Vergabe von Adressen. Somit kann mit der Anfrage eine (temporäre) Adresse vergeben werden. Wird IPv6 genutzt, steht zudem die zustandslose Adressenautokonfiguration zur Verfügung [85].

Um die Adresse eines Geräts mit DHCP vor Ablauf der Gültigkeit zu ändern, wird in RFC 3203 [84] eine optionale Erweiterung (force renew) definiert. Hierüber kann beim Empfänger vorzeitig eine Aktualisierung der Adresse ausgelöst werden. Eine weitere Mög-

lichkeit ist die Nutzung von DNS. Hierbei würden in den Steuerungen Domainnamen für die Feldgeräte definiert, welche vom DNS-Server auf die Adressen der entsprechenden Feldgeräte gesetzt werden. Problematisch ist hier die Gültigkeitsdauer der Domainnamen, wenn die Adresse eines Eintrags geändert wurde.

Die Punkte zu Publikation und Konfiguration finden hier keine Anwendung, da es sich nur um unterlagerte Schichten ohne die Applikationsschicht handelt.

Profinet

Als Ethernet-basiertes und zu IP kompatibles Protokoll wird bei Profinet-Systemen eine Vielzahl von auf IP aufbauenden Technologien optional unterstützt. Dies betrifft in erster Linie DHCP und DNS. Dementsprechend können diese Funktionen (wenn unterstützt) auch bei Profinet für die Funktionen des PnP genutzt werden. Die Kompatibilität beschränkt sich jedoch auf IPv4, sodass Features für IPv6 nicht unterstützt werden können.

Profinet verfügt zudem über das Discovery and basic Configuration Protocol (DCP), einen Satz von Diensten zur Erkundung und Basiskonfiguration von Geräten. Über den *Identify*-Dienst kann nach Geräten gesucht werden. Zur Einschränkung der Antworten stehen hier eine Reihe von Filterkriterien zur Verfügung. Weiterhin gibt es den *Hello*-Dienst, mit dem sich Geräte nach dem Anschluss selbst im Netzwerk melden können. Für die Vergabe von IP-Adressen verfügt DCP über einen *Set*-Dienst, mit dem Einstellungen zur Adresse aber auch zum DHCP- und DNS-Verhalten gesetzt werden können.

Profinet bietet für die Identifikation eine separate ASE: die *Real Identification* ASE [25]. Diese bietet über eine Teilfunktion I&M-Daten analog zum I&M-Profil bei Profibus. Für die Publikation der Gerätedaten und das Konfigurations-Interface stehen erneut NOA und FDI zur Verfügung.

OPC UA

Als TCP/IP-basiertes Protokoll stehen für OPC UA sämtliche Mechanismen für IP-Netzwerke zur Verfügung. Dies betrifft die Geräteerkennung über die Infrastruktur sowie die beiden Dienste für die Vergabe von IP-Adressen. Im Gegensatz zu Profinet unterstützt OPC UA auch IPv6 und somit besteht die Möglichkeit, dessen automatisches Adressierungsverfahren zu nutzen. Eine Identifikation des Geräts erfolgt durch die Selbstbeschreibung im OPC UA-Server.

Für die Publikation der Daten kann ein Aggregating-Server genutzt werden. So wird das Feldgerät vor dem direkten Zugriff aus unsicheren Bereichen geschützt. Feldgeräte können auch selbst eine separate und gesicherte Schnittstelle bieten, über die auf die Gerätedaten lesend zugegriffen werden kann. Beide Ansätze sind auch mit NOA kombinierbar, sodass die Gerätedaten in einer definierten Struktur und mit bekannter Semantik bereitstehen.

Die Konfiguration eines OPC UA-basierten Feldgeräts kann über OPC UA selbst erfolgen. Die nötigen Informationen zum Finden der Parameter können über die Selbstbeschreibung des OPC UA-Servers erhalten werden. In Fällen, in denen die Selbstbeschreibung nicht gegeben ist, ist eine Zugriffsbeschreibung wie bei den anderen Protokollen möglich.

5.3 Anwendungsszenarien

In den folgenden Abschnitten wird in drei Anwendungsszenarien der Ablauf des Plug and Produce beschrieben. Ein Szenario beginnt mit der Beschreibung der vorliegenden Anlagenstruktur und der modellierten Daten. Dies umfasst den topologischen Aufbau des Kommunikationssystems mit den Positionen für einzelne Rollen bzw. Feldgeräte und die Anbindung an die Steuerung. Weiterhin werden die für die Anlage geplanten Rollen mit ihren Anforderungen beschrieben. Auf Seite der Feldgeräte sind der Gerätetyp und die Ausgangskonfiguration der Geräteinstanz gegeben. Im Anschluss wird der Ablauf nach Anschließen des neuen Feldgeräts beschrieben.

Der erste Anwendungsfall betrachtet den Anschluss eines einfachen Temperatursensors mit konventioneller 4–20 mA-Verbindung und HART. Die Rollen sind hier fest mit den diversen Anschlussklemmen verknüpft. Deshalb liegt der Fokus dieses Anwendungsfalls auf der Eignungsprüfung des Gerätetyps für die ausgewählte Rolle. Im zweiten Szenario wird ein Drucksensor über ein Profibus-System angeschlossen. Hier steht die Auswahl der korrekten Rolle für den Sensor im Fokus.

In Anwendungsfall 3 soll diskutiert werden, wie das hier entwickelte PnP-Konzept für die Einbindung von MTP-Modulen in eine Prozessorchestrierung genutzt werden könnte.

Die Strukturierung der Komponenten außerhalb der Kernautomatisierung ist für alle Anwendungsfälle identisch. Der PnP-Manager, welcher die Prozedur koordiniert, ist in einem separaten System instanziert. Die Informationen zu Rollen, Gerätetypen und Geräteinstanzen sind in Verwaltungsschalen bereitgestellt. Für Gerätetypen und -instanzen stehen unterschiedliche identifizierende Merkmale zur Verfügung, so z. B. die Gerätetypbezeichnung und die entsprechende Kennung aus der HART-Spezifikation für diesen Typ. Im Rahmen der Anwendungsfälle wird angenommen, dass Mechanismen bereitstehen, um mit jedem dieser Merkmale die richtige Verwaltungsschale zu finden.

5.3.1 Anwendungsfall 1: Feldgeräte mit konventioneller Verdrahtung

Dieser Anwendungsfall betrachtet den Anschluss eines Temperatursensors über 4–20 mA an eine Steuerung. Für die Kommunikation mit dem Feldgerät steht HART zur Verfügung. In dem betrachteten Szenario gibt es eine Steuerung mit 4 Zweidrahtterminals.

Der Aufbau ist in Abb. 5.6 dargestellt. Jedem Klemmenpaar ist genau eine Rolle zugeordnet, dargestellt durch die Verbindungslien als Stellvertreter für die verlegten Kabel. Zudem stellt die Steuerung die Rollen-Manager, den Kommunikations-Manager und eine NOA-Schnittstelle bereit. Der Kommunikations-Manager stellt neben den Netzwerkdiensten auch das Konfigurations-Interface als proprietäre Schnittstelle bereit. Zudem ist er für die Synchronisation der NOA-Schnittstelle mit den aktuellen Daten der Feldgeräte verantwortlich.

In diesem Fall soll ein neuer Sensor für die Rolle *T65* eingebaut werden. Tab. 5.3 zeigt die Anforderungen, die von der *T65* formuliert werden. Eine Übersicht über die Informationen der anderen Rollen findet sich im Anhang A.1. Die Spalte „Name“ gibt eine Bezeichnung für den Eintrag. Der „Typ“ spezifiziert, um welche Art von Eintrag es sich handelt. In der Spalte „Wert“ wird der Wert der Anforderung spezifiziert. In der letzten Spalte ist die semantische ID gegeben, welche die betrachtete Eigenschaft referenziert.

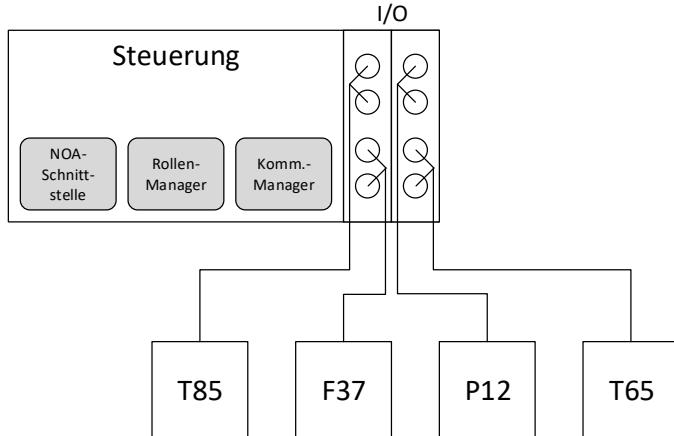


Abbildung 5.6: Aufbau des ersten Szenarios

Tabelle 5.3: Rollendaten für T65

Name	Typ	Wert	semantische ID
Temperatur	Prozesswert	N/A	0112/2///61987#ABA927
Tag	Anforderung/P	T65	0112/2///61987#ABB271
obere Messwertgrenze	Anforderung/P	120	0112/2///61987#ABA359
untere Messwertgrenze	Anforderung/P	-10	0112/2///61987#ABA358
Einheit	Anforderung/P	°C	0112/2///61987#ABH950
Dämpfung	Anforderung/P	1 s	0112/2///61987#ABH526
max. Umgebungstemperatur	Anforderung/G	> 40 °C	0112/2///61987#ABA623
max. Prozesstemperatur	Anforderung/G	> 150 °C	0112/2///61987#ABA919

Tabelle 5.4: Ausschnitt aus den Gerätetypdaten für Sitrans TH300

Prozesswerte		semantische ID	
Temperatur (PW-1)		0112/2///61987#ABA927	
Parameter	Träger	Einschränkung	Parametertyp
Tag-Name	PW-1	String[8]	0112/2///61987#ABB271
Dämpfung	PW-1	[0 s, 30 s]	0112/2///61987#ABH526
obere Messwertgrenze	PW-1	[−190 °C, 850 °C]	0112/2///61987#ABA359
untere Messwertgrenze	PW-1	[−200 °C, 840 °C]	0112/2///61987#ABA358
Einheit	PW-1	{°C, °F}	0112/2///61987#ABH950
Merkmale	Träger	Wert	semantische ID
Gerätetyp	Gerätetyp	Sitrans TH300	0112/2///61987#ABA566
Hersteller	Gerätetyp	Siemens	0112/2///61987#ABA565
max. Prozesstemp.	Gerätetyp	850 °C	0112/2///61987#ABA919
max. Umgebungstemp.	Gerätetyp	85 °C	0112/2///61987#ABA623
min. Umgebungstemp.	Gerätetyp	−40 °C	0112/2///61987#ABA621
Genauigkeit	PW-1	0.06 °C	0112/2///61987#ABB216

Einträge vom Typ „Prozesswert“ geben an, dass das Gerät den entsprechenden Wert als Fähigkeit bereitstellen muss. Ein Wert kann hier nicht angegeben werden, da dieser Eintrag nur die Existenz des Prozesswerts beschreibt. Die ID gibt die gemessene bzw. beeinflusste Größe an. Neben Prozesswerten enthält die Rolle Anforderungen. Diese können sich einerseits auf das Gerät (G) im allgemeinen oder auf einen Prozesswert (P) beziehen. In den PVSen entspricht dies dem Träger der Eigenschaft. In der Tabelle ist der Bezug durch ein angehängtes „G“ bzw. „P“ gekennzeichnet. Da im betrachteten Fall nur ein Prozesswert existiert, muss nicht zwischen verschiedenen Prozesswerten unterschieden werden. Für Anforderungen mit einer anderen Aussagelogik als „gleich“ ist die Logik in der Wertspalte mit aufgeführt.

Bei dem neuen Feldgerät handelt es sich in diesem Beispiel um einen Sitrans TH300. Ein Ausschnitt der modellierten Eigenschaften des TH300-Gerätetyps ist in Tab. 5.4 aufgelistet. Im ersten Bereich der Tabelle sind die bereitgestellten Prozesswerte aufgeführt. Bei diesem Gerätetyp steht nur eine Temperaturmessung zur Verfügung. Diese entspricht der Fähigkeit des Geräts, wie in Kapitel 4.1.3 beschrieben. Für die Referenzierung dieser Fähigkeit wird im Folgenden die Abkürzung „PW-1“ genutzt.

Nach den Prozesswerten sind die verfügbaren Parameter gelistet. Jeder Parameter ist einem Träger zugeordnet, dessen Eigenschaften er beeinflusst. In diesem Beispiel gibt es nur Parameter, die die Messgröße betreffen, und keine, die direkt das Gerät betreffen. Der Parametertyp enthält die semantische ID der Eigenschaft, die durch diesen eingestellt wird. Letztlich gibt die Spalte „Einschränkungen“ die zulässigen Parameterwerte an. In den meisten Fällen sind für numerische Parameter die gültigen Werte durch ein Intervall beschrieben. Ausnahmen bilden hier der Tag-Name und die Einheit. Der Tag wird durch einen String mit einer Länge von 8 Zeichen eingestellt. Für die Einheit ist nur eine Auswahl zwischen Celsius und Fahrenheit möglich.

Der untere Bereich der Tabelle zeigt die statischen Merkmale des Gerätetyps an. Dar-

Tabelle 5.5: Eigenschaften des neuen Temperatursensors vor dem PnP

Eigenschaft	Träger	Wert	semantische ID
Seriennummer/ID	Gerät	E90542	0112/2///61987#ABA951
Tag-Name	PW-1	T1	0112/2///61987#ABB271
Dämpfung	PW-1	1 s	0112/2///61987#ABH526
obere Messwertgrenze	PW-1	100	0112/2///61987#ABA359
untere Messwertgrenze	PW-1	0	0112/2///61987#ABA358
Einheit	PW-1	°C	0112/2///61987#ABH950

unter fallen allgemeine Eigenschaften wie Hersteller und die Bezeichnung des Gerätetyps. Weiterhin existieren Zusicherungen, unter welchen Betriebsbedingungen Geräte des Typs eingesetzt werden können. Zu den Merkmalen gehören auch Eigenschaften, welche sich auf Prozesswerte beziehen. In diesem Fall wird eine Aussage zur Genauigkeit der Temperaturmessung getroffen.

Zuletzt soll betrachtet werden, welche Einstellungen das neue Feldgerät zu Beginn der PnP-Prozedur enthält. Diese sind in Tab. 5.5 aufgeführt. Mit Ausnahme der Seriennummer beziehen sich alle Einträge auf Parameter. Eigenschaften aus dem Gerätetyp sind nicht mit aufgeführt, sind per Definition jedoch ebenfalls für die Geräteinstanz gültig.

Der PnP-Prozess beginnt mit dem Anschließen des neuen Feldgeräts an seinem Einbauort. Zu diesem Zeitpunkt befindet sich die Rolle *T65* in der Steuerung im Zustand „Gerät nicht vorhanden“. Durch den Anschluss des Geräts wird dieses mit Energie versorgt und fährt hoch. Anschließend übermittelt es den Prozesswert über das Stromsignal. Dieser Wechsel von einem invaliden zu einem gültigen Stromwert wird vom Kommunikations-Manager erkannt. Der Kommunikations-Manager führt dann eine Identifikation des Sensors über das Konfigurations-Interface mit dem HART-Kommando 0 durch.

Der Kommunikations-Manager kann mit den Daten aus der Identifikation und dem Anschlusspunkt des neuen Feldgeräts einen PnP-Auftrag an den PnP-Manager schicken. Parallel dazu startet der Kommunikations-Manager die Synchronisation der NOA-Schnittstelle für die Daten des neuen Geräts.

Mit der Information über den Anschlusspunkt ist in diesem Szenario auch die Rolle festgelegt, da beide Aspekte hier fest miteinander verknüpft sind. Für die Zuweisung der Rolle steht somit nur eine einzige Rolle zur Verfügung. Aus der Verwaltungsschale der Rolle und des Gerätetyps werden die geforderten und bereitgestellten Fähigkeiten (in diesem Fall Prozesswerte) bestimmt. Hier stellt der Gerätetyp genau den benötigten Prozesswert bereit. Die Rolle wird einem Operator zur Bestätigung präsentiert.

Anschließend kann mit der Eignungsprüfung fortgefahrene werden. Zu diesem Zweck werden die Informationen der Rolle und des Gerätetyps aus der Verwaltungsschale abgerufen. Für den späteren Abgleich der Ist-Konfiguration wird diese über die Verwaltungsschale des Geräts aus der NOA-Schnittstelle abgerufen. Die Anforderungen werden über die semantischen IDs den Merkmalen und Parametern zugeordnet. Bei den Merkmalen ergibt sich die maximale Prozess- und Umgebungstemperatur. Beide Anforderungen werden durch die Zusicherung des Gerätetyps erfüllt. Die restlichen Anforderungen beziehen sich auf Parameter. Bei diesen wird überprüft, dass die geforderten Werte für den Parameter konfigurierbar sind. Die Messwertgrenzen und die Dämpfung liegen im konfigurierbaren Bereich. Ebenso ist für die Einheit der passende Wert verfügbar und der Tag-Name passt zu dem

Parameter. In Zusammenfassung ist für jede Anforderung eine Merkmalzusage oder ein Parameter vorhanden, welche bzw. welcher die Anforderung erfüllt.

Nachdem die Eignung festgestellt wurde, beginnt der Konfigurationsblock der PnP-Prozedur. In diesem Anwendungsfall sollen nur die Abweichungen von der Soll-Konfiguration an das Gerät übertragen werden. Die dafür notwendige Ist-Konfiguration wurde bereits ermittelt. Zur Berechnung der Konfigurationsänderungen werden die Anforderungen nacheinander durchgegangen. Als erstes wird getestet, ob für die Eigenschaft ein Parameter existiert. Ist dies der Fall, wird der aktuelle Wert mit der Anforderung verglichen. Bei einer Diskrepanz wird die Konfigurationsänderung vorgemerkt. Nach der Berechnung verbleiben Änderungen für den Tag-Namen und die beiden Messwertgrenzen. Die Parameter für die Einheit und Dämpfung besitzen bereits den korrekten Wert.

Bevor die Konfiguration auf das Gerät zurückgeschrieben wird, erfolgt eine Überprüfung durch einen Operator. Hierzu werden die geplanten Änderungen und die bereits passenden Parameter in zwei Listen sortiert und auf einer Bedienoberfläche gezeigt. Die Listen der neu hinzugekommenen und der nicht mehr vorhandenen Parameter ist in diesem Anwendungsfall leer. Die geplanten Änderungen werden vom Operator begutachtet und bestätigt. Damit hat das PnP-System die Genehmigung, in die Kernautomatisierung einzugreifen.

Daraufhin generiert der PnP-Manager die nötigen Konfigurationsaufrufe. In der Regel wird dazu auf die Zugriffsbeschreibung der Parameter im Gerätetyp zurückgegriffen. In diesem Anwendungsfall sind nur Parameter betroffen, die über den HART-Standard definiert sind (universelle Kommandos; vgl. 3.4.1). Diese sind im PnP-Manager selbst hinterlegt. Anschließend werden die Konfigurationsaufrufe über den Kommunikations-Manager an das Konfigurations-Interface übertragen. Dieses führt die Aufrufe durch und ändert so die Konfiguration des Temperatursensors.

Bevor das Messsignal des Sensors für die Prozessführung freigegeben wird, erfolgt eine Verifikation der Konfiguration. Dazu werden die Gerätedaten über den Kommunikations-Manager erneut publiziert, d. h. die NOA-Schnittstelle synchronisiert. Abschließend wird die Differenz zwischen der Soll- und Ist-Konfiguration berechnet (analog zur Berechnung der Konfigurationsaufrufe). In diesem Beispiel sind beide Konfigurationen identisch und das Messsignal wird freigegeben. Der Sensor kann jetzt für die Steuerung der Anlage genutzt werden.

5.3.2 Anwendungsfall 2: Feldgeräte mit digitaler Prozesswertübertragung

In diesem Anwendungsfall wird der Anschluss eines Drucksensors über Profibus PA betrachtet. Besonderer Fokus liegt in diesem Szenario auf der Auswahl der Rolle und dem Umgang mit mehreren bereitgestellten Fähigkeiten.

Der Aufbau des Szenarios ist in Abb. 5.7 gezeigt. Zentrales Element ist die Steuerung. Als Kommunikations-Master sind die Funktionalitäten des Kommunikations-Managers in der Steuerung angesiedelt. Daneben verfügt die Steuerung für alle Rollen über einen Rollen-Manager. Das Konfigurations-Interface ist in diesem Fall getrennt vom Kommunikations-Manager und wird durch einen FDI-Server, der als sekundärer Master an den Bus angeschlossen ist, realisiert. Für die Publikation der Feldgerätedaten ist eine NOA-Schnittstelle über den FDI-Server vorgesehen.

In diesem Szenario teilen sich mehrere Feldgeräte ein Kommunikationsmedium. Die Rol-

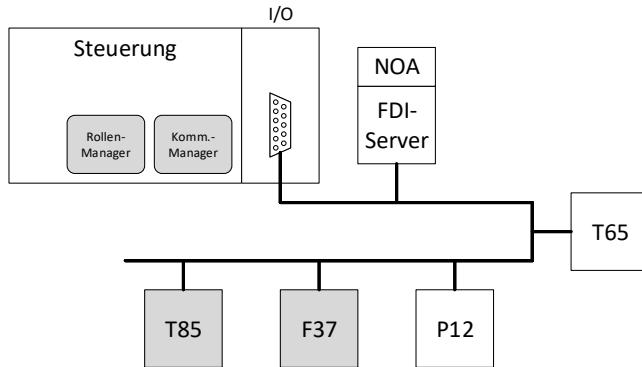


Abbildung 5.7: Aufbau des zweiten Szenarios

Tabelle 5.6: Rollendaten für P12

Name	Typ	Wert	semantische ID
Überdruck	Prozesswert	N/A	0112/2///61987#ABB182
Tag	Anforderung/P	P12	0112/2///61987#ABB271
obere Messwertgrenze	Anforderung/P	50	0112/2///61987#ABA357
untere Messwertgrenze	Anforderung/P	-1	0112/2///61987#ABA356
Einheit	Anforderung/P	kPa	0112/2///61987#ABH950
Dämpfung	Anforderung/P	0.5 s	0112/2///61987#ABH526
Anzeigesprache	alte Einstellung	de	0112/2///61987#ABB085

len bzw. Geräte sind entlang des Buskabels angeordnet. Der direkte Anschluss erfolgt jeweils über eine Abzweigung, sodass Geräte verbunden und getrennt werden können, ohne die restliche Kommunikation zu hindern. Für die grau markierten Rollen sind in diesem Anwendungsfall bereits Geräte angeschlossen. Nun soll ein OPTIBAR 5060 für die Rolle *P12* hinzugefügt werden.

In Tab. 5.6 sind die Daten der Rolle gelistet. Als Fähigkeit wird der Relativdruck zur Umgebung als Prozesswert gefordert. In diesem Beispiel ist eine Einstellung des vorherigen Geräts (Anzeigesprache) enthalten.

Für den Gerätetyp sind die Daten in Tab. 5.7 gegeben. Dieser bietet zwei Prozesswerte an: den Überdruck und den Absolutdruck. Bei den Parametern wird erneut nur eine Auswahl der verfügbaren Parameter dargestellt. Ebenso werden die statischen Leistungsmerkmale vernachlässigt, da sie analog zum ersten Anwendungsfall behandelt werden können. Die Messwertgrenzen gehören bei diesem Gerätetyp zu den statischen Merkmalen, da der Prozesswert digital übertragen wird.

In diesem Anwendungsfall soll das PnP ohne Beachtung der aktuellen Einstellungen erfolgen. Dementsprechend muss die aktuelle Gerätekonfiguration nicht berücksichtigt werden.

Tabelle 5.7: Ausschnitt aus den Gerätetypdaten für OPTIBAR 5060

Prozesswerte		semantische ID	
Überdruck (PW-1)		0112/2///61987#ABB182	
Absolutdruck (PW-2)		0112/2///61987#ABB181	
Parameter	Träger	Einschränkung	Parametertyp
Tag-Name	PW-1	String[19]	0112/2///61987#ABB271
Dämpfung	PW-1	[0s, 999s]	0112/2///61987#ABH526
Einheit	PW-1	{bar, kPa, ...}	0112/2///61987#ABH950
Anzeigesprache	Gerät	{en, de}	0112/2///61987#ABB085
Merkmale	Träger	Wert	semantische ID
Gerätetyp	Gerätetyp	OPTIBAR 5060	0112/2///61987#ABA566
Hersteller	Gerätetyp	Krohne	0112/2///61987#ABA565
obere Messwertgrenze	PW-1	100 bar	0112/2///61987#ABA357
untere Messwertgrenze	PW-1	-0.975 bar	0112/2///61987#ABA356

Der PnP-Vorgang beginnt mit dem Anschließen des Sensors. Aufgrund der technischen Gegebenheiten kann das System über dieses Anschließen nicht automatisch informiert werden. Im vorliegenden Fall wird diese Information über eine manuelle Nachricht an den Kommunikations-Manager übertragen. Anschließend sucht der Kommunikations-Manager nach einem Gerät auf der Busadresse 126, der Standardadresse für neue Geräte, und identifiziert dieses über die Funktionen des I&M-Profil. Mit den Daten über das Gerät wird ein PnP-Auftrag generiert und an den PnP-Manager übermittelt.

Das PnP-System muss zunächst dem neuen Feldgerät die passende Rolle zuweisen. Aus dem Gerätetyp werden dazu die unterstützten Fähigkeiten bestimmt. Für die Rolle werden zunächst alle am Bus verfügbaren Rollen betrachtet. Danach wird diese Liste gefiltert. Zunächst werden alle Rollen entfernt, welche bereits durch ein Gerät belegt sind. Es verbleiben *P12* und *T65*. Anschließend werden die benötigten Fähigkeiten betrachtet. Der neue Sensor verfügt über keine Temperaturmessung, womit *T65* ausscheidet. Die Druckmessung von *P12* wird vom Sensor unterstützt und verbleibt somit als einzige Rolle. Der Operator wird über diese Zuweisung informiert und um Bestätigung gebeten.

Nach Festlegung der Rolle werden die gesamten Informationen des Gerätetyps und der Rolle abgerufen. Für die Eignungsprüfung werden zunächst die Anforderungen an die Merkmale betrachtet. An dieser Stelle muss eine Sonderregel für die Messwertgrenzen vorgesehen werden. Die Grenzen sind in der Rolle als Gleichheitsanforderungen formuliert (analog zu Anwendungsfall 1). Da bei diesem Sensor der Messwert digital übertragen wird, können diese Grenzen jedoch nicht geändert werden. Für ein durchgängiges und einheitliches Vorgehen wird ein Konditionalkonstrukt für die PVSen benötigt, sodass abhängig von der Kommunikationsart andere Anforderungen gelten. Praktisch genügt es, wenn die Messwertgrenzen der Rolle im Messbereich des Sensors liegen. Mit den Anforderungen an die Parameter wird analog zum ersten Fall verfahren. Die Einstellung des letzten Geräts wird zu diesem Zeitpunkt nicht betrachtet, da sie keine funktionale Relevanz besitzt. Die Eignungsprüfung wird erfolgreich abgeschlossen.

Im nächsten Schritt wird die neue Konfiguration ermittelt. Da die aktuelle Konfiguration

nicht beachtet wird, erstellt der PnP-Manager für jede Anforderung, die einen Parameter betrifft, eine Änderung. In diesem Beispiel sind dies der Tag, die Einheit und die Dämpfung. Anschließend wird versucht, die Einstellungen des letzten Geräts zu übertragen. Hier ist die Anzeigesprache als alte Einstellung hinterlegt und auch der neue Sensor verfügt über diese Einstellung mit dem benötigten Wert. So wird für die Anzeigesprache eine weitere Änderung hinzugefügt.

Die berechneten Änderungen werden einem Operator zur Kontrolle übermittelt. Nach der Bestätigung werden für die betroffenen Parameter die Zugriffsbeschreibungen aus dem Gerätetyp bestimmt. Da in diesem Beispiel ein FDI-Server zum Einsatz kommt, genügt an dieser Stelle die Definition der Konten im FDI-Gerätemodell. Die Konfiguration kann dann über FDI erfolgen. Die Busadresse des Geräts wird angepasst und die I/O-Bausteine im Rollen-Manager werden entsprechend parametrisiert, sodass der erste Prozesswert des Typs übertragen wird. Der Kanalaufbau zwischen Steuerung und Feldgerät erfolgt über das unterlagerte Kommunikationssystem.

Nach der Konfiguration wird die aktuelle Konfiguration über die NOA-Schnittstelle am FDI-Server ausgelesen. Nun erfolgt die Verifikation der korrekten Konfiguration des Sensors. Diese endet erfolgreich und der Prozesswert der Rolle wird freigegeben.

5.3.3 Anwendungsfall 3: MTP-Module

In diesem dritten Anwendungsfall soll erörtert werden, wie das neu entwickelte PnP-Konzept im Zusammenhang mit MTP-Modulen umgesetzt werden könnte. Dazu ist wichtig, wie der vorgesehene Planungsprozess für solche Module aussieht. Das MTP-Konzept sieht vor, dass die überlagerte Steuerung, die Orchestrierungsebene, mit Hilfe des MTP gegen einen spezifischen Modultyp geplant wird. Mit der großen Freiheit, wie ein Modul hinsichtlich seines Aufbaus und seiner Schnittstelle gestaltet werden kann, stellt jeder Modultyp in der Regel ein Unikat dar, welches nicht mit anderen Modultypen kompatibel ist. Schon die Änderung der relativen Adressierung eines Datenpunkts, z. B. einer Node ID in OPC UA, kann einen direkten Wechsel mit zweierlei Modultypen behindern.

Für den Einsatz eines exakten Modultyps ist der PnP-Prozess relativ simpel. In Abb. 5.8 ist ein exemplarischer Aufbau für einen solchen Fall dargestellt. Die Kommunikation zwischen den Teilnehmern wird über ein Ethernetnetzwerk und OPC UA realisiert. In der Steuerung existiert ein Rollen-Manager für die Aufgabe des MTP. Der Kommunikations-Manager ist als separate Komponente im Netzwerk verfügbar und stellt die Netzwerkdienste bereit. Das MTP sowie alle anderen Komponenten sind über einen Switch miteinander verbunden.

Die PnP-Prozedur beginnt auch hier mit dem Anschluss des Moduls. Dieses fragt über DHCP nach einer Adresse, welche vom Kommunikations-Manager bereitgestellt wird. Mit der DHCP-Anfrage weiß der Kommunikations-Manger auch, dass ein neues Gerät im Netzwerk verfügbar ist. Anschließend ermittelt der Kommunikations-Manager mit einem Port-Scan die geöffneten Ports und testet auf unterstützte Protokolle. So wird erkannt, dass das Modul einen OPC UA-Server bereitstellt, welcher durch Erkundung die Identifikationsdaten des MTP-Moduls preisgibt. Mit diesen Informationen wird ein PnP-Auftrag abgesetzt.

Der PnP-Manager erhält den Auftrag und sucht nach Rollen für das Modul. Diese werden über den Modultyp und das Netzwerksegment vorgefiltert und auf bekannte Weise ausgewählt. Die Eignungsprüfung kann über den Abgleich der Modultypen erfolgen. Eine genauere Analyse der Fähigkeiten liegt außerhalb des Umfangs dieser Arbeit, da diese eine

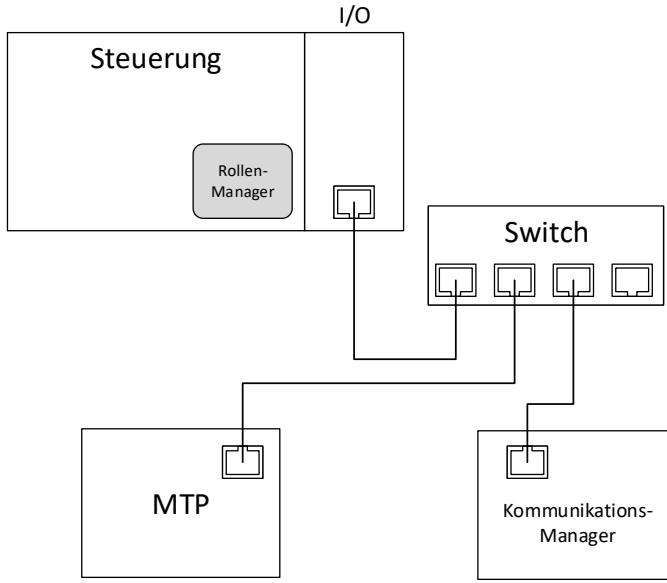


Abbildung 5.8: Aufbau des dritten Szenarios

Berücksichtigung der Topologie sowie der Semantik einzelner Dienste und Datenpunkte erfordern würde.

Die Konfiguration für das MTP-Modul umfasst die Konfigurationsparameter für die einzelnen Dienste, die in der Rolle des Moduls spezifiziert sind. Die Prozedurparameter werden von der überlagerten Steuerung gesetzt und müssen nicht vorab behandelt werden. Die Parameter werden von einem Menschen überprüft. Neue oder weggefallene Parameter können nicht auftreten, da es sich um denselben Typ handelt. Nach dem Übertragen der Konfigurationsparameter muss noch die Adresse des Moduls in der Steuerung angepasst werden. Die Verifikation kann über ein rein lesendes Abbild des MTP im Kommunikations-Manager erfolgen.

Auf dieser Basis ist der Einsatz oder Wechsel eines MTP-Moduls möglich. Die Beschränkung auf einen spezifischen Modultyp, auch wenn ein anderes Modul die gewünschte Aufgabe ebenfalls ausführen könnte, verringert den Anwendungsbereich des PnP-Konzepts. Mit dem Konzept der Super-Services ist ein erster Schritt für eine Interoperabilität gegeben [2]. Eine Möglichkeit, dies auf das PnP-Konzept zu übertragen, wäre die Definition von sogenannten Modultyp-Prototypen. Diese Prototypen sind analog zu den Geräteklassen bei den Feldgeräten insofern, dass sie einen abstrakten MTP-Modultyp beschreiben, dessen Funktion von einer Reihe von konkreten Modulen ausgeführt werden kann. Die Rollen werden dann gegen diese Prototypen implementiert. Einzelne MTPs können dann spezifizieren,

welche Prototypen sie unterstützen zusammen mit einer Mapping-Vorschrift, wie Bestandteile des konkreten MTPs auf die des Prototyps abgebildet werden. In der PnP-Prozedur änderst sich durch ein solches Vorgehen die Eignungsprüfung und die Konfiguration. Bei der Eignungsprüfung muss überprüft werden, ob der geforderte Prototyp unterstützt wird. Bei der Konfiguration müssen im Modul die Konfigurationsparameter über das Mapping ermittelt werden. Weiter müssen in der Steuerung die relativen Adressen im Modul angepasst werden. Werden in Modul und Prototyp unterschiedliche Werte verwendet, z. B. für Dienstzustände, so kann eine Übersetzung zwischen Steuerungsapplikation und Modul erforderlich sein.

6 Prototyp-Implementierung

Zur Testung des in Kapitel 4 beschriebenen neuen PnP-Konzepts wurde eine prototypische Implementierung in Form eines Demonstrators erstellt. Die Implementierung ähnelt dem ersten Anwendungsfall (vgl. Kap. 5.3.1) und betrachtet den Anschluss von Temperatursensoren über 4–20 mA-Signale mit Unterstützung für HART. In dem Aufbau sind drei unterschiedliche Rollen für Temperaturmessungen vorgesehen, für welche die Sensoren konfiguriert werden müssen. Zum Einsatz kommen Sensoren verschiedener Hersteller.

Die Beschreibung des Demonstrators erfolgt in drei Abschnitten. Zunächst wird der generelle Aufbau des Systems dargestellt. Anschließend wird die Steuerung in der Kernautomatisierung näher betrachtet. Abschließend wird das PnP-System außerhalb der Kernautomatisierung vorgestellt.

6.1 Aufbau

Der Aufbau des Demonstrators ist in Abb. 6.1 als Foto und schematische Skizze dargestellt. Im Foto ist die Trennung der Kernautomatisierung und der Zusatzfunktionen (hier das PnP) deutlich hervorgehoben. Auf der linken Seite befindet sich die Steuerung, ein WAGO IPC, mit den drei Signalverbindungen in die Feldebene. Jede Rolle ($T12$, $T27$ und $T42$) ist dabei einem Anschluss zugeordnet. Für einen einfachen Wechsel der Sensoren wurden Steckverbindungen hinzugefügt.

Der IPC verfügt über zwei Netzwerkverbindungen. Die erste Verbindung (grau) dient der Kommunikation innerhalb der Kernautomatisierung. Zur Visualisierung der aktuellen Messwerte ist in der MES-Ebene eine Anzeige angebracht, in der auch der Messsignalstatus über die Farbe ersichtlich ist. Die zweite Verbindung (rosa) führt aus dem gesicherten Bereich hinaus in einen offenen M+O-Bereich, wie im NOA-Konzept vorgesehen. Im M+O-Bereich ist ein M+O-Server durch einen Raspberry Pi realisiert. Dieser enthält den PnP-Server, welcher die Koordination des PnP-Vorgangs übernimmt. Zudem stellt das System eine Plattform mit Verwaltungsschalen für den Datenzugriff bereit.

Anhand der schematischen Darstellung ist der interne Aufbau der Systeme zu erkennen. Der Sensor ist in der Steuerung an einer I/O-Schnittstelle mit HART angebunden. Diese ist mit dem Rollen-Manager verbunden. Wegen der festen Verknüpfung der Rollen mit den I/Os wurden die Funktionen des Kommunikations-Managers mit in den Rollen-Manager integriert. Weiterhin existiert eine NOA-Schnittstelle, welche über den Rollen-Manager mit den nötigen Daten versorgt wird. Die NOA-Schnittstelle ist über die zweite Netzwerkverbindung erreichbar und so konfiguriert, dass ein rein lesender Zugriff im Sinne der NOA-Diode gegeben ist. Im M+O-Server ist der PnP-Manager angesiedelt, welcher die Schritte der PnP-Prozedur implementiert und koordiniert. Zudem sind hier die Daten für Rollen, Gerätetypen und Geräte in Form von Verwaltungsschalen verfügbar. Der offene Bereich ist durch den rosa Hintergrund angedeutet. Der PnP-Manager erstreckt sich bewusst über den gesicherten und offenen Bereich, da er die Funktion des VoR mit übernimmt und direkten

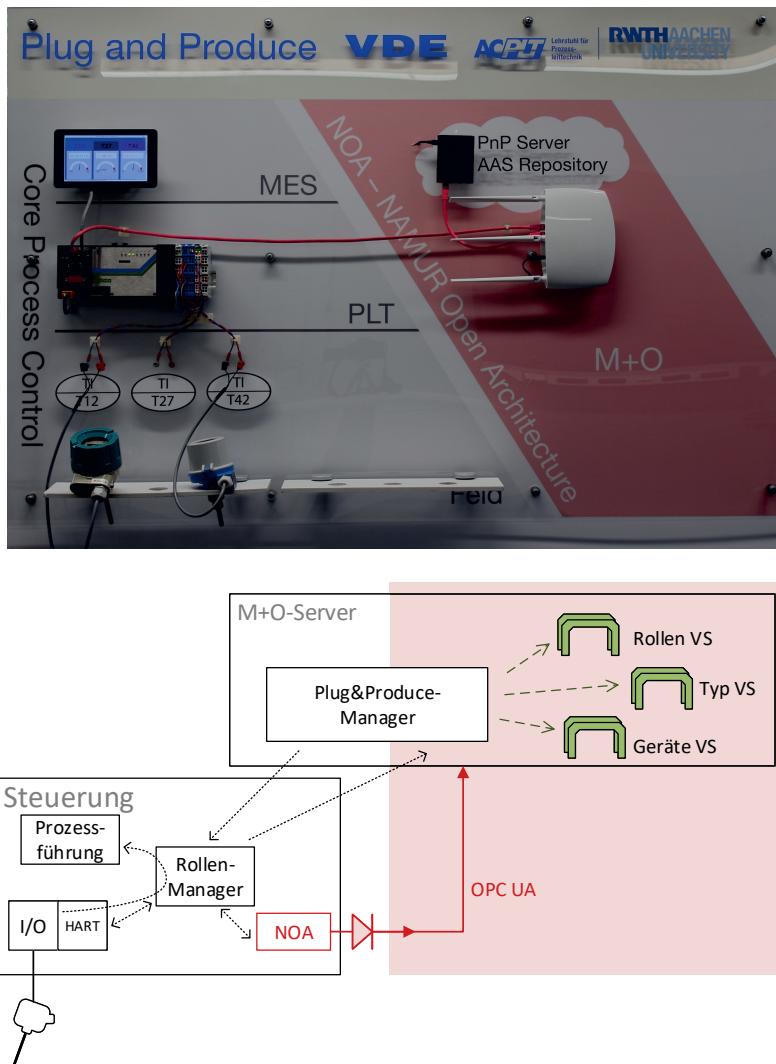


Abbildung 6.1: Foto und schematischer Aufbau des Demonstrators

Zugriff auf die Kernautomatisierung besitzt. Der VoR ist in dieser Implementierung durch eine einfache Benutzerbestätigung nur symbolisch umgesetzt.

6.2 Implementierung der Kernautomatisierungsseite

In der Steuerung, dem WAGO IPC, sind die Feldanbindung, die Rollen-Manager und die NOA-Schnittstelle realisiert. Als Laufzeitumgebung wurde das am Lehrstuhl für Prozessleittechnik entwickelte ACPLT/RTE [91] verwendet. Für die softwaretechnische Anbindung der I/O-Karten wurden entsprechende Treiberbausteine implementiert, welche die Prozesswertübertragung und HART-Kommunikation unterstützen. Die Prozesswerte werden nach dem zyklischen SPS-Prinzip behandelt.

Die Rollen-Manager wurden als Sequential State Charts (SSCs) implementiert. SSCs sind eine Mischung aus Sequential Function Charts aus der IEC 61131 [20] und State Charts aus UML und werden zur Beschreibung von Abläufen genutzt [91]. Der Rollen-Manager ist im Kern ein Zustandsautomat, welcher den Belegungsstatus der Rolle erfasst und die nötigen Identifizierungsmechanismen koordiniert. Die Implementierung des Rollen-Managers für *T12* ist in Abb. 6.2 in der Engineeringoberfläche gezeigt.

Der Anfangsschritt führt direkt in den *unplugged*-Schritt, in dem kein Gerät angeschlossen ist. Der Prozessrohwert vom Treiberbaustein gelangt über den Eingang *pv* in den Rollen-Manager. Mittels des enthaltenen Signalstatus kann über den *plugDetect*-Baustein der Anschluss eines neuen Feldgeräts erkannt werden. Danach wechselt der Rollen-Manager in den *plugged*-Schritt. Durch den Wechsel in diesen Schritt wird die Identifizierung des Geräts durch das HART-Kommando 0 über den *hartT12*-Baustein angestoßen. Da der Rollen-Manager in dieser Implementierung ebenfalls für die Netzwerkdienste zuständig ist und um die zeitliche Abfolge der folgenden Schritte zu vereinfachen, wird hier zunächst die Synchronisation der NOA-Schnittstelle durchgeführt. Dies erfolgt mittels des *noaFactory*-Bausteins unter Nutzung des *hartT12*-Bausteins. Die ermittelten Informationen werden in einem getrennten Teil des Systems gespeichert, welcher in der NOA-Schnittstelle über OPC UA bereitgestellt wird. Diese Zwischenspeicherung vereinfacht es, die NOA-Schnittstelle rückwirkungsfrei zu gestalten. Über das proprietäre Kommunikationsprotokoll kann die Synchronisation mittels dieses Bausteins auch aktualisiert werden. Auf eine zyklische Synchronisation der NOA-Schnittstelle wurde an dieser Stelle verzichtet.

Nach Abschluss der Synchronisation wechselt der Rollen-Manager in den *synced*-Schritt. In diesem wird der Konfigurationsauftrag an das PnP-System generiert. Der Auftrag enthält die nötigen Informationen zu Gerät, Gerätetyp und Rolle. Weiter werden die Pfade zum HART-Baustein und dem Geräteneintrag in der NOA-Schnittstelle mit übermittelt, um diese Pfade im PnP-System nicht durch eine Erkundung bestimmen zu müssen.

Nachdem die Konfiguration erfolgreich abgeschlossen wurde, wechselt der Rollen-Manager in den Schritt *configured*. Der Rollen-Manager kehrt aus jedem Schritt in den *unplugged*-Schritt zurück, wenn das Gerät entfernt wird. Ein eventuell noch laufender PnP-Vorgang für diesen Anschlusspunkt wird durch eine Nachricht an das PnP-System abgebrochen.

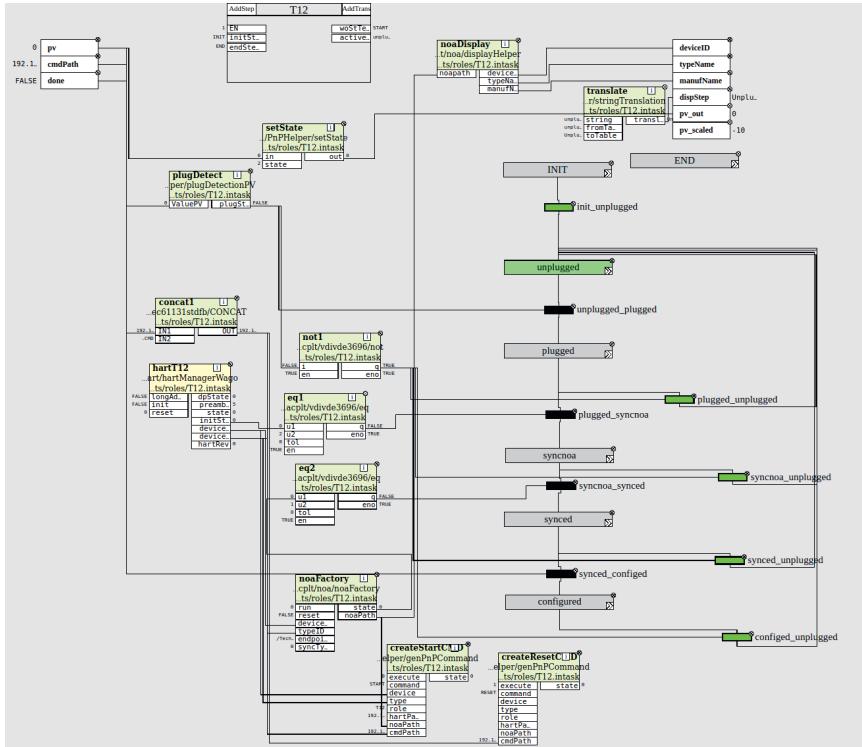


Abbildung 6.2: Rollen-Manager für T12 in der Steuerung

6.3 Implementierung des M+O-Servers

Der M+O-Server enthält die PnP-Manager und die Plattform für die Verwaltungsschalen. Beide Aspekte sind in der Laufzeitumgebung ACPLT/RTE realisiert. Die PnP-Manager sind als SSC umgesetzt. Im Demonstrator existiert für jede Rolle eine eigene Manager-Instanz, für ein Produktivsystem wäre eine dynamische Instanziierung der Manager angemessen. Als Plattform für die Verwaltungsschalen kommt eine Implementierung des *openAAS*-Modells [75] zum Einsatz, welche explizit das PVS-Modell verwendet. Wie in 5.2.1 beschrieben, lassen sich die PVSen auch im aktuellen Meta-Modell der Verwaltungsschale darstellen, sodass diese Funktion ebenfalls durch Implementierungen mit dem aktuellen Modell umsetzbar sind.

6.3.1 Verwaltungsschalen

Die in der prototypischen Implementierung genutzten Verwaltungsschalen sind nach dem *openAAS*-Modell aufgebaut. Die Adressierung der Verwaltungsschalen erfolgt über eine *AASID*. Diese sind im Demonstrator durch eine URI beschrieben und aufgebaut aus einem Präfix, dem Typ der Verwaltungsschale (Rolle, Typ, Gerät) und der Bezeichnung des beschriebenen Assets. Bei den Gerätetypen und Geräten wurden dabei die HART-spezifischen Hexadezimal-IDs genutzt. Bei den Rollen wurde der Rollenname verwendet. Die Daten in den Verwaltungsschalen teilen sich in verwaltungsspezifische (*Header*) und assetspezifische (*Body*) Daten auf. Für die Strukturierung der Daten stehen PVS-Listen zur Verfügung, unter denen einzelne PVSen angelegt sind. Im Folgenden wird die Struktur der einzelnen Verwaltungsschalentypen beschrieben.

Rolle

Eine Rollenverwaltungsschale verfügt im *Body* über zwei PVS-Listen:

- *RoleRequirements*: die in der Rolle enthaltenen Anforderungen an das Feldgerät
- *PreviousDeviceSettings*: die Einstellungen des letzten Geräts.

Gerätetyp

Ein Gerätetyp enthält im *Body* eine PVS-Liste *Parameters*. Diese beinhaltet die verfügbaren Eigenschaften, die der Gerätetyp besitzt. Für Merkmale sind diese mit festen Werten versehen, Parameter sind auf einen NULL-Wert gesetzt.

Im *Header* kann zusätzlich eine Referenz auf eine Gerätekasse spezifiziert werden. Alle Eigenschaften, die in dieser grundlegenden Klasse definiert werden, werden an den Gerätetyp vererbt. Eine Gerätekasse kann zudem wieder auf eine abstrakttere Klasse verweisen.

Geräteinstanz

Geräteinstanzen besitzen dieselbe Struktur wie die Gerätetypen. Die Referenz im *Header* verweist hier jedoch auf den spezifischen Gerätetyp. Die Verwaltungsschalen der einzelnen Geräte sind beim Start des Demonstrators noch nicht vorhanden und werden nach Bedarf erstellt. Dazu wird die Struktur aus dem Gerätetyp inklusiv der statischen Merkmale kopiert und im Anschluss um die aktuellen Konfigurationswerte ergänzt.

6.3.2 PnP-Manager

Die PnP-Manager bilden das zentrale Gebilde des Demonstrators. Sie werden über eine Auftragsschmittstelle bedient. Jeder PnP-Manager verfügt über einen Speicherbaustein, in dem Informationen zum PnP-Auftrag und Daten aus den Verwaltungsschalen zwischengespeichert werden.

Der funktional wichtige Teil des Managers ist durch ein SSC, den *functionAutomaton*, realisiert. Die Engineeringssicht auf diesen Automaten in der Rolle *T12* ist in Abb. 6.3 dargestellt. Die Funktionen der einzelnen Schritte des PnP sind in den Funktionsbausteinen auf der linken Seite implementiert. Diese Bausteine werden durch die SSC-Schritte gestartet. Nach erfolgreicher Beendigung ihrer Aufgabe wechseln die Bausteine in einen definierten Zustand, welcher als Ausgang verfügbar ist. Aus diesem wird die Transitionsbedingung für das Fortschreiten der PnP-Prozedur generiert.

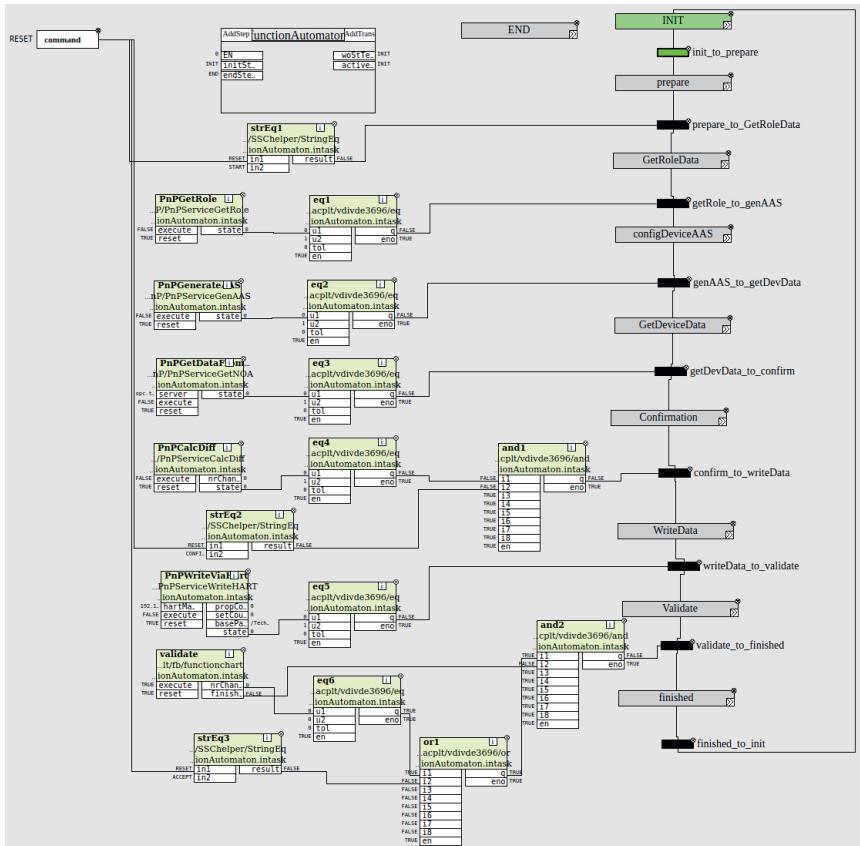


Abbildung 6.3: PnP-Manager für die Rolle *T12* im PnP-System

Der Automat beginnt im Schritt *INIT* und wechselt direkt in den *prepare*-Schritt. In diesem werden alle Bausteine zurückgesetzt, sodass die Prozedur in einem definierten Zustand startet. Anschließend wird auf das Startkommando gewartet, wenn ein neuer Konfigurationsauftrag eingeht. Tritt dies ein, werden zunächst die Anforderungen und alten Einstellungen aus der Rollenverwaltungsschale abgerufen. Anschließend wird die Geräteverwaltungsschale gesucht. Ist diese vorhanden, werden die Daten heruntergeladen. Ist noch keine Verwaltungsschale vorhanden, wird eine neue aus der Verwaltungsschale des Gerätetyps generiert. Die Gerätetypverwaltungsschale wird nicht in jedem Fall benötigt, da deren Daten in dieser Implementierung auch in der Verwaltungsschale des Geräts enthalten sind. Im nächsten Schritt wird die aktuelle Konfiguration aus der NOA-Schnittstelle abgerufen, da nur die nötigen Änderungen übertragen werden sollen.

Sind alle Daten vorhanden, wird die Differenz zwischen der Soll- und Ist-Konfiguration berechnet. Der PnP-Manager verharrt im *Confirmation*-Schritt, bis die Änderungen bestätigt werden. Dafür werden die geplanten Änderungen auf einer Bedienoberfläche (siehe Abb. A.1 im Anhang) dargestellt. Durch die Bestätigung auf dieser wird ein entsprechendes Kommando an den PnP-Manager übermittelt.

Danach wird mit dem Rückschreiben der Konfiguration begonnen. Dazu übermittelt der *PnPWriteViaHart*-Block die einzelnen HART-Kommandos an den HART-Zugang im Rollen-Manager der Steuerung. Die verfügbaren Kommandos sind dem Block bekannt. Einige Parameter können nur zusammen gesetzt werden, z. B. die Messwertgrenzen und die Einheit. Für diese werden alle Änderungen gleichzeitig übermittelt. Ist für einen Wert eines solchen Aufrufs keine Änderung vorhanden, muss der aktuelle Wert erneut übertragen werden. Die Durchführung der Konfigurationsaufrufe wird nicht überwacht. Nach Übertragung der Konfiguration wird im *Validate*-Schritt zuerst die Synchronisation der NOA-Schnittstelle angestoßen, gefolgt vom Lesen der aktuellen Konfiguration über OPC UA und abschließender Berechnung der verbleibenden Abweichungen.

Sind die Soll- und Ist-Konfiguration identisch, wechselt der PnP-Manager in den Schritt *finished*. Verbleiben Abweichungen, werden diese über dieselbe Oberfläche wie vorher einem Operator zur Begutachtung bereitgestellt. Dies kann auftreten, wenn Parameter nur in diskreten Schritten konfiguriert werden können und der geforderte Wert nur annähernd erreicht wird. Nach der Überprüfung kann der Operator die Abweichungen als akzeptabel befinden und dies über die Oberfläche mitteilen. Danach wechselt der PnP-Manager ebenfalls zum finalen Schritt. Wird der *finished*-Schritt erreicht, übermittelt der PnP-Manager dies an den Rollen-Manager, welcher den Messwert für die Prozessführung freigibt.

7 Diskussion und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war, ein allgemeines Konzept für Plug and Produce in der Prozessautomation zu entwickeln, welches den manuellen Aufwand für die Inbetriebnahme von Feldgeräten reduziert. Ein besonderer Fokus lag dabei auf der Umsetzungsmöglichkeit mit etablierten Technologien und Standards in Bestandsanlagen, sodass eine Nachrüstung mit einem einheitlichen Konzept breitflächig möglich ist.

In der Arbeit wurde das im Rahmen dieser Dissertation neu entwickelte PnP-Konzept vorgestellt. Zentraler Aspekt des Konzepts ist die Beschreibung von funktionalen Einheiten als Rollen, welche Anforderungen stellen, und der Abgleich der von Geräten bereitgestellten Fähigkeiten mit diesen Anforderungen. Für die Beschreibung der Anforderungen und Zusicherungen wurde auf das Eigenschaftsausprägungsaussagen-Modell zurückgegriffen. Das Konzept wurde zunächst abstrakt beschrieben. Es wurde spezifiziert, dass Modelle für Rollen, Gerätetypen, Feldgeräte und die Kommunikation benötigt werden und welche Informationen diese Modelle enthalten müssen. Anschließend wurde eine allgemeine Prozedur zur Durchführung des konzipierten PnP-Prozesses beschrieben. Die Prozedur unterteilt sich in fünf Blöcke. Der erste Block befasst sich mit der Außerbetriebnahme eines Vorgängergeräts und ist somit nur bei einem Gerätewechsel relevant. Im folgenden Block wird das neue Gerät erkannt und identifiziert, bevor im dritten Block das Gerät einer oder mehreren Rollen zugeordnet wird. Block vier führt die Überprüfung durch, ob der Gerätetyp (und damit auch das Gerät) für die zugewiesenen Rollen geeignet ist. Abschließend wird in Block fünf die Einbindung des Feldgeräts in das Automatisierungssystem durchgeführt. Dies umfasst das Konfigurieren des Feldgeräts und Einstellungen in der Steuerung zum Aufbau der Kommunikation mit dem Gerät.

Nach der abstrakten Beschreibung des PnP-Konzepts wurden mögliche technische Realisierungen des Konzepts untersucht. Zuerst wurde eine beispielhafte Spezifikation der Informationsmodelle vorgestellt, welche für die Durchführung des PnP genügt. Anschließend wurde die Umsetzung einzelner Funktionen des Konzepts mit bestehenden Technologien untersucht und ein Technologie-Mapping erstellt. Als erstes wurden Möglichkeiten zur Bereitstellung der Informationen untersucht. Im Konzept werden Funktionen vom Kommunikationssystem benötigt. Die Unterstützung dieser Funktionen wurde für einige gängige Feldkommunikationsprotokolle untersucht und von den Protokollen bereitgestellte Features wurden auf diese Funktionen gemappt.

Die praktische Umsetzung des entwickelten PnP-Konzepts wurde danach erfolgreich in drei Anwendungsfällen durchgespielt und detailliert beschrieben. Die ersten beiden Fälle befassten sich mit klassischen Feldgeräten, welche über unterschiedliche Kommunikationssysteme angeschlossen waren. Im dritten Szenario wurde eine Übertragung des Konzepts auf ein System mit MTP-Modulen diskutiert.

Abschließend wurde die prototypische Umsetzung des PnP-Konzepts anhand eines Demonstrators beschrieben. Diese Umsetzung folgte dem ersten Anwendungsfall und betrachtet den Wechsel eines Temperatursensors, der über klassische 4–20 mA-Verdrahtung mit HART angeschlossen ist.

7.1 Diskussion

In diesem Abschnitt sollen die erreichten Ergebnisse und aufgetretene Einschränkungen des Konzepts diskutiert werden.

Zunächst ist festzuhalten, dass das Konzept nur die leittechnische Einbindung im Kontext der Prozessführung betrachtet. Aspekte wie Gerätemanagement, Diagnose und Alarmmanagement liegen außerhalb des Umfangs dieser Arbeit. Die Beschreibung des Konzepts in Kapitel 4 ist abstrakt gehalten und stellt nur die nötigsten Anforderungen an die technologische Umsetzung, wie die digitale Anbindung des Feldgeräts oder die Möglichkeit, die Konfiguration über diese zu verändern. Vorteilhaft ist auch, dass durch die abstrakte Formulierung und die Betrachtung einzelner Eigenschaften die Rollen herstellerneutral abgebildet sind. Somit ist ein herstellerübergreifender Einsatz bzw. Wechsel von Feldgeräten generell möglich.

Die Untersuchung gängiger Technologien hat zudem gezeigt, dass (bis auf kleinere Einschränkungen) das PnP-Konzept mit diesen Technologien umgesetzt werden kann. Die Beschränkungen beziehen sich vor allem auf die Erkennung neuer Geräte im Netzwerk, da sich in Kommunikationsprotokollen, die nach dem Master-Slave-Muster agieren, neue Feldgeräte nicht melden können. Diese Einschränkung kann durch manuell oder zyklisch angestoßene Erkundungen behoben werden.

Die Zuordnung von Anforderungen und Zusicherungen erfolgt über semantische IDs. Im vorgestellten Konzept erfolgt eine Zuordnung nur bei exakter Übereinstimmung der IDs. Bei Verwendung mehrerer Merkmalbibliotheken muss eine Zuordnung auch mit äquivalenten IDs betrachtet werden. Dies kann vor allem bei Informationen aus verschiedenen Quellen der Fall sein.

Die Abbildung von Abhängigkeiten zwischen Eigenschaften und vor allem zwischen Parametern ist in diesem Konzept nicht berücksichtigt, da sich diese nicht über das PVS-Modell abbilden lassen. Solche Abhängigkeiten sind zum einen notwendig für die Geräteparameter, da gewisse Kombinationen von Werten von den Geräten abgewiesen werden. Daraus ergeben sich auch Vorgaben für die Reihenfolge, in denen die Parameter konfiguriert werden müssen. Zum anderen sind Anforderungen von Rollen betroffen. Da die Rollen allgemein, und somit unabhängig vom Kommunikationssystem, modelliert sind, kann eine Rolle prinzipiell von Geräten mit unterschiedlichen Kommunikationsschnittstellen eingenommen werden. Diese Schnittstellen bedingen jedoch teilweise spezielle Anforderungen an die Konfiguration des Geräts, z. B. Messwertgrenzen bei 4–20 mA-Geräten.

Das hier entwickelte Konzept sieht vor, dass die Feldgeräte direkt an ihrem Einsatzort eingebaut werden. Eine weitere Möglichkeit ist, Feldgeräte in einem Engineering-Aufbau mit demselben Konzept vorzukonfigurieren. So müssen beim Einbau am Einsatzort nur noch die Kommunikation zwischen Steuerung und Feldgerät aufgebaut und eventuelle Änderungen an den IO-Bausteinen der Steuerung vorgenommen werden. Besonderen Vorteil bietet dieses Vorgehen, wenn keine Anpassung der Steuerung benötigt wird.

7.2 Ausblick

Das erarbeitete PnP-Konzept ist ein erster Schritt für die Umsetzung einer automatischen Inbetriebnahme von Feldgeräten. Neben der leittechnischen Sicht muss ein neues Gerät auch in das Alarmmanagement und ein eventuelles Diagnosesystem eingegliedert werden.

Dies erfordert eine Erweiterung des Konzepts um entsprechende Schritte und die Modellierung der relevanten Aspekte auf Seite der Rolle und des Gerätetyps.

Des Weiteren wurde die Bereitstellung der Informationen zu Rollen, Gerätetypen und Feldgeräten in spezifischen Formaten vorausgesetzt. In weiteren Arbeiten könnte untersucht werden, wie diese Strukturen aus bestehenden Informationen generiert werden könnten. Dies würde eine Einführung des Konzepts deutlich erleichtern.

Die Einschränkung, semantische Zuordnungen nur bei exakter Übereinstimmung von IDs zu erhalten, wirft in der praktischen Umsetzung viele Probleme auf. Es müssen deshalb Mechanismen entwickelt werden, die Relation zweier Merkmal-IDs auf ein Spektrum abzubilden, auch über die Grenzen eines einzelnen Merkmalsystems hinweg. So könnten Zuordnungen häufiger erzielt werden. Zudem würde dies bei Zweifeln eine manuelle Überprüfung unterstützen.

Die Eigenschaftsausprägungsaussagen sind ein wichtiger Baustein des entwickelten PnP-Konzepts. Für eine durchgängige Anwendung bedarf es jedoch einiger Erweiterungen. Zunächst sollten die Aussagewerte um Listen und Mengen sowie die Aussagerelationen um diese Wertetypen betreffende Operatoren erweitert werden. Weiterhin wäre ein Konditionalkonstrukt hilfreich, mit dem Aussagen zu Eigenschaften an bestimmte Bedingungen geknüpft werden können. Außerdem wird die Möglichkeit benötigt, Eigenschaften mit anderen Eigenschaften in Beziehung zu setzen, sodass Abhängigkeiten zwischen zulässigen Parameterwerten abgebildet werden können.

Schließlich wurde in der Arbeit die Entscheidung getroffen, Fähigkeiten durch ein Typkonzept abzugleichen. Dies mag für einfache Fähigkeiten praktikabel sein, für komplexe Fähigkeiten, die sich aus Verschaltung einfacherer Fähigkeiten zusammensetzen, führt dies zu einer kombinatorischen Explosion von Typen und ist damit nicht realisierbar. Zum Abgleich solcher Fähigkeiten muss ein Konzept entwickelt werden, bei dem diese Struktur transparent beschrieben wird und auf die Verfügbarkeit der Basisfähigkeiten geprüft werden kann.

A Anhang

A.1 Rollendaten für Anwendungsfälle 1 und 2

T65

Name	Typ	Wert	semantische ID
Temperatur	Prozesswert	N/A	0112/:///61987#ABC650
Tag	Anforderung/P	T65	0112/:///61987#ABB271
obere Messwertgrenze	Anforderung/P	120	0112/:///61987#ABA359
untere Messwertgrenze	Anforderung/P	-10	0112/:///61987#ABA358
Einheit	Anforderung/P	°C	0112/:///61987#ABH950
Dämpfung	Anforderung/P	1 s	0112/:///61987#ABH526
max. Umgebungstemp.	Anforderung/G	> 40 °C	0112/:///61987#ABA623
max. Prozesstemp.	Anforderung/G	> 150 °C	0112/:///61987#ABA919

T85

Name	Typ	Wert	semantische ID
Temperatur	Prozesswert	N/A	0112/:///61987#ABC650
Tag	Anforderung/P	T85	0112/:///61987#ABB271
obere Messwertgrenze	Anforderung/P	150	0112/:///61987#ABA359
untere Messwertgrenze	Anforderung/P	10	0112/:///61987#ABA358
Einheit	Anforderung/P	°C	0112/:///61987#ABH950
Dämpfung	Anforderung/P	2 s	0112/:///61987#ABH526

P12

Name	Typ	Wert	semantische ID
Überdruck	Prozesswert	N/A	0112/:///61987#ABB182
Tag	Anforderung/P	P12	0112/:///61987#ABB271
obere Messwertgrenze	Anforderung/P	50	0112/:///61987#ABA357
untere Messwertgrenze	Anforderung/P	-1	0112/:///61987#ABA356
Einehit	Anforderung/P	kPa	0112/:///61987#ABH950
Dämpfung	Anforderung/P	0.5 s	0112/:///61987#ABH526
Anzeigesprache	alte Einstellung	de	0112/:///61987#ABB085

F37

Name	Typ	Wert	semantische ID
Massendurchfluss	Prozesswert	N/A	0112/:///61987#ABC337
Tag	Anforderung/P	F37	0112/:///61987#ABB271
obere Messwertgrenze	Anforderung/P	100	0112/:///61987#ABA347
untere Messwertgrenze	Anforderung/P	0	0112/:///61987#ABA345
Einheit	Anforderung/P	kg/s	0112/:///61987#ABH950
Dämpfung	Anforderung/P	1 s	0112/:///61987#ABH526

A.2 Zusätzliche Abbildungen zur prototypischen Implementierung

PnP Operator Tool

Role: T12
PNP Status: Confirmation

Required Changes:

Damping: 1.000000 -> 2.400000 (URI:http://noa.namur.org/he131/v10/property_type/damping)
LowerRangeValue: 0.000000 -> -10.000000 (ISO:0112/2///61987#ABA358)
UpperRangeValue: 100.000000 -> 50.000000 (ISO:0112/2///61987#ABA359)
Tag: T42 -> T12 (ISO:0112/2///61987#ABB271)

Abbildung A.1: Operatoransicht für die Begutachtung der geplanten Änderungen und deren Bestätigung

Literatur

1. BERNSHAUSEN, Jens; HALLER, Axel; HOLM, Thomas; HOERNICKE, Mario; OBST, Michael; LADIGES, Jan. Namur Modul Type Package – Definition. *atp edition*. 2016, Jg. 58, Nr. 01-02, S. 72–81. ISSN 2364-3137, ISSN 2190-4111. Abger. unter DOI: 10.17560/atp.v58i01-02.554.
2. BLUMENSTEIN, M.; STUTZ, A.; MAURMAIER, M. Rollenbasierte Entwurfsmethode für modulare Anlagen auf Basis von sogenannten Super-Services. In: *Automation 2019 : 20. Leitkongress der Mess- und Automatisierungstechnik : Autonomous Systems and 5G in Connected Industries*. VDI Verlag, 2019, S. 197–213.
3. BRENDLBERGER, Michael; SCHERWIETES, Thomas. Engineering. In: *Handbuch der Prozessautomatisierung*. 5. Auflage. Deutscher Industrieverlag, 2015, S. 632–650. ISBN 978-3-8356-3372-8.
4. BURGER, Andreas; PLATENIUS-MOHR, Marie; KOZIOLEK, Heiko. Automatisierte Inbetriebnahme von Industriellen IoT-Systemen in der Prozessautomatisierung: Eine Referenzarchitektur. *at - Automatisierungstechnik*. 2019, Jg. 67, Nr. 3, S. 172–182. Abger. unter DOI: 10.1515/auto-2018-0089.
5. DEPPE, Torben; NOTHDURFT, Lars; EPPLER, Ulrich. DIN SPEC 92000 als Enabler für Plug-and-Produce-Konzepte. *atp magazin*. 2020, Jg. 62, Nr. 4, S. 78–85. ISSN 2364-3137. Abger. unter DOI: 10.17560/atp.v62i4.2461.
6. *Details of the asset administration shell - Part 1 – The exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0*. 2020-11. Specification. Plattform Industrie 4.0.
7. DIEDRICH, C.; NEUMANN, P. Field device integration in DCS engineering using a device model. In: *IECON '98. Proceedings of the 24th annual conference of the IEEE industrial electronics society (cat. No.98CH36200)*. 1998, Bd. 1, 164–168 vol.1. Abger. unter DOI: 10.1109/IECON.1998.723966.
8. *DIN SPEC 40912: Kernmodelle - Beschreibung und Beispiele*. 2014. DIN SPEC, 40912. DIN.
9. *DIN SPEC 91345: Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0)*. 2016. DIN SPEC. DIN. Abger. unter DOI: 10.31030/2436156.
10. *DIN SPEC 92000: Datenaustausch auf der Grundlage von Eigenschaftsausprägungsaussagen*. 2019. DIN SPEC, 92000. DIN.
11. DOROFEEV, Kirill; CHENG, Chih-Hong; GUEDES, Magno; FERREIRA, Pedro; PROFANTER, Stefan; ZOITL, Alois. Device adapter concept towards enabling plug&produce production environments. In: *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. Limassol: IEEE, 2017, S. 1–8. ISBN 978-1-5090-6505-9. Abger. unter DOI: 10.1109/ETFA.2017.8247570.

12. DROMS, Ralph. *Dynamic host configuration protocol* [Internet Requests for Commands]. 1997-03. RFC, 2131. RFC Editor.
13. DÜRKOP, Lars; JASPERNEITE, Jürgen. „Plug & Produce“ als Anwendungsfall von Industrie 4.0. In: VOGEL-HEUSER, Birgit; BAUERNHANSL, Thomas; TEN HOMPEL, Michael (Hrsg.). *Handbuch Industrie 4.0 Bd.2: Automatisierung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, S. 59–71. ISBN 978-3-662-53248-5. Abger. unter DOI: 10.1007/978-3-662-53248-5_50.
14. EPPEL, Ulrich; MERTENS, Martin; PALM, Florian; AZARMIPOUR, Mahyar. Using Properties as a Semantic Base for Interoperability. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2017, Jg. 13, Nr. 6, S. 3411–3419. ISSN 1551-3203, ISSN 1941-0050. Abger. unter DOI: 10.1109/TII.2017.2741339.
15. FRIEDL, Sebastian; VON ARNIM, Christian; LECHLER, Armin; VERL, Alexander. Generation of OPC UA Companion Specification with Eclipse Modeling Framework. In: *2020 16th IEEE International Conference on Factory Communication Systems (WFCS)*. Porto, Portugal: IEEE, 2020, S. 1–7. ISBN 978-1-72815-297-4. Abger. unter DOI: 10.1109/WFCS47810.2020.9114448.
16. GROTHOFF, Julian Alexander; WAGNER, Constantin August; EPPEL, Ulrich. *Bas-Sys 4.0: Metamodell der Komponenten und Ihres Aufbaus; 1st ed.* 2018. Techn. Ber. RWTH Aachen University. Abger. unter DOI: 10.18154/RWTH-2018-225880.
17. HAMMERSTINGL, Veit; REINHART, Gunther. Unified Plug&Produce architecture for automatic integration of field devices in industrial environments. In: *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. Seville: IEEE, 2015, S. 1956–1963. ISBN 978-1-4799-7800-7. Abger. unter DOI: 10.1109/ICIT.2015.7125383.
18. IATROU, Chris Paul; GRAUBE, Markus; URBAS, Leon; HENRICH, Tim Peter; ERBEN, Stefan. NOA Verification of Request: Reintegrating insights of cloud based added value services. *atp magazin*. 2018, Jg. 60, Nr. 01-02, S. 60–69. ISSN 2364-3137, ISSN 2190-4111. Abger. unter DOI: 10.17560/atp.v60i01-02.2348.
19. *IEC 60802: TSN-Profil für die Industriearmatisierung*. 2019. IEC-Norm, 60802. IEC.
20. *IEC 61131-1: Speicherprogrammierbare Steuerungen - Teil 1: Allgemeine Informationen*. 2003. IEC-Norm, 61131-1. IEC.
21. *IEC 61131-10: Speicherprogrammierbare Steuerungen – Teil 10: XMLbasiertes Austauschformat für Programme nach IEC 61131*. 2019. IEC-Norm, 61131-10. IEC.
22. *IEC 61158-1: Industrielle Kommunikationsnetze - Feldbusse - Teil 1: Überblick und Leitfaden zu den Normen der Reihen IEC 61158 und IEC 61784*. 2019. IEC-Norm, 61158-1. IEC.
23. *IEC 61158-2: Industrielle Kommunikationsnetze - Feldbusse - Teil 2: Spezifikation und Dienstfestlegungen des Physical Layer (Bitübertragungsschicht)*. 2014. IEC-Norm, 61158-2. IEC.
24. *IEC 61158-3-20: Industrielle Kommunikationsnetze - Feldbusse - Teil 3-20: Dienstfestlegungen des Data Link Layer (Sicherungsschicht) -Typ 20-Elemente*. 2014. IEC-Norm, 61158-3-20. IEC.

25. IEC 61158-5-10: Industrielle Kommunikationsnetze - Feldbusse - Teil 5-10: Dienstfestlegungen des Application Layer (Anwendungsschicht) - Typ 10-Elemente. 2019. IEC-Norm, 61158-5-10. IEC.
26. IEC 61158-5-20: Industrielle Kommunikationsnetze - Feldbusse - Teil 5-20: Dienstfestlegungen des Application Layer (Anwendungsschicht) - Typ 20-Elemente. 2014. IEC-Norm, 61158-5-20. IEC.
27. IEC 61158-5-3: Industrielle Kommunikationsnetze - Feldbusse - Teil 5-3: Dienstfestlegungen des Application Layer (Anwendungsschicht) - Typ 3-Elemente. 2014. IEC-Norm, 61158-5-3. IEC.
28. IEC 61360-2: Genormte Datenelementtypen mit Klassifikationsschema für elektrische Bauteile - Teil 2: EXPRESS-Datenmodell. 2007. IEC-Norm, 61360-2. IEC.
29. IEC 61784-1: Industrielle Kommunikationsnetze - Profile - Teil 1: Feldbusprofile. 2019. IEC-Norm, 61784-1. IEC.
30. IEC 61784-1: Industrielle Kommunikationsnetze - Profile - Teil 2: Zusätzliche Feldbusprofile für Echtzeitnetzwerke basierend auf ISO/IEC 8802-3. 2019. IEC-Norm, 61784-2. IEC.
31. IEC 61804-2: Funktionsbausteine für die Prozessautomation und elektronische Gerätebeschreibungssprache - Teil 2: Festlegung des Funktionsbausteinkonzepts. 2018. IEC-Norm, 61804-2. IEC.
32. IEC 61804-3: Funktionsbausteine für die Prozessautomation und elektronische Gerätebeschreibungssprache - Teil 3: Syntax und Semantik der elektronischen Gerätebeschreibungssprache (EDDL). 2018. IEC-Norm, 61804-2. IEC.
33. IEC 61987: Industrielle Leittechnik - Datenstrukturen und -elemente in Katalogen der Prozessleittechnik. 2007. IEC-Norm, 61987. IEC.
34. IEC 62424: Darstellung von Aufgaben der Prozessleittechnik - Fließbilder und Datenaustausch zwischen EDV-Werkzeugen zur Fließbilderstellung und CAE-Systemen. 2016. IEC-Norm, 62424. IEC.
35. IEC 62453-1: Field Device Tool (FDT)-Schnittstellenspezifikation - Teil 1: Überblick und Leitfaden. 2016. IEC-Norm, 62453-1. IEC.
36. IEC 62541-100: OPC Unified Architecture - Teil 100: Geräteschnittstelle. 2015. IEC-Norm, 62541-100. IEC.
37. IEC 62541-12: OPC Unified Architecture - Teil 12: Erkundung. 2019. IEC-Norm, 62541-12. IEC.
38. IEC 62541-14: OPC Unified Architecture - Teil 14: Festlegungen zur Umsetzung des Publisher-Subscriber-Models. 2018. IEC-Norm, 62541-14. IEC.
39. IEC 62541-5: OPC Unified Architecture - Teil 5: Informationsmodell. 2018. IEC-Norm, 62541-5. IEC.
40. IEC 62714-1: Datenaustauschformat für Planungsdaten industrieller Automatisierungssysteme - Automation markup language - Teil 1: Architektur und allgemeine Festlegungen. 2018. IEC-Norm, 62714-1. IEC.
41. IEC 62769-1: Feldgeräteintegration (FDI) - Teil 1: Überblick. 2018. IEC-Norm, 62769-1. IEC.

42. IEC 62769-5: *Feldgeräteintegration (FDI) - Teil 5: FDI-Informationsmodell.* 2018. IEC-Norm, 62769-5. IEC.
43. IEC 62769-7: *Feldgeräteintegration (FDI) - Teil 7: FDI-Kommunikationsgeräte.* 2018. IEC-Norm, 62769-7. IEC.
44. IEC/TR 62541-1: *OPC Unified Architecture - Teil 1: Übersicht und Konzepte.* 2010. IEC-Norm, 62541-1. IEC.
45. IEEE 802.3: *IEEE Standard for Ethernet.* 2018. IEEE-Norm, 802.3. IEEE.
46. ISO 7498-1: *Informationstechnik - Kommunikation Offener Systeme - Teil 1: Basis-Referenzmodell: Basismodell.* 1994. ISO-Standard, 7498-1. ISO.
47. JASPERNEITE, Jürgen; HINRICHSEN, Sven; NIGGEMANN, Oliver. „Plug-and-Produce“ für Fertigungssysteme. *Informatik-Spektrum.* 2015, Jg. 38, Nr. 3, S. 183–190.
48. KAINZ, Gerd; KEDDIS, Nadine; PENSKY, Dirk; BUCKL, Christian; ZOITL, Alois; PITTSCHELLIS, Reinhard; KÄRCHER, Bernd; KAINZ, Gerd; KEDDIS, Nadine; PENSKY, Dirk. AutoPnP – Plug-and-produce in der Automation. *atp magazin.* 2013, Jg. 55, Nr. 04, S. 42–49. ISSN 2364-3137. Abger. unter DOI: 10.17560/atp.v55i04.247.
49. KAMPERT, David; EPPEL, Ulrich. Modeling asset information for interoperable software systems. In: *IEEE 10th international conference on industrial informatics.* 2012, S. 947–952. Abger. unter DOI: 10.1109/INDIN.2012.6301179.
50. KLETTNER, Christian; TAUCHNITZ, Thomas; EPPEL, Ulrich; NOTHDURFT, Lars; DIEDRICH, Christian; SCHRÖDER, Tizian; GOSSMANN, Daniel; BANNERJEE, Suprateek; KRAUSS, Michael; LATROU, Chris; URBAS, Leon. Namur Open Architecture: Die Namur-Pyramide wird geöffnet für Industrie 4.0. *atp edition.* 2017, Jg. 59, Nr. 01-02, S. 17. ISSN 2364-3137, ISSN 2190-4111. Abger. unter DOI: 10.17560/atp.v59i01-02.620.
51. KOZIOLEK, Heiko; BURGER, Andreas; DOPPELHAMER, Jens. Self-Commissioning Industrial IoT-Systems in Process Automation: A Reference Architecture. In: *2018 IEEE International Conference on Software Architecture (ICSA).* Seattle, WA: IEEE, 2018, S. 196–19609. ISBN 978-1-5386-6398-1. Abger. unter DOI: 10.1109/ICSA.2018.00029.
52. KOZIOLEK, Heiko; BURGER, Andreas; PLATENIUS-MOHR, Marie; RÜCKERT, Julius; STOMBERG, Gösta. OpenPnP: A Plug-and-produce Architecture for the Industrial Internet of Things. In: *Proceedings of the 41st International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Practice.* Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2019, S. 131–140. ICSE-SEIP '19. Abger. unter DOI: 10.1109/ICSE-SEIP.2019.00022.
53. KRITZINGER, Werner; KARNER, Matthias; TRAAR, Georg; HENJES, Jan; SIHN, Wilfried. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine.* 2018, Jg. 51, Nr. 11, S. 1016–1022. ISSN 2405-8963. Abger. unter DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
54. KRÜNING, Kai; EPPEL, Ulrich. Plug-and-Produce von Feldbuskomponenten. *atp magazin.* 2013, Jg. 55, Nr. 11, S. 50–56. ISSN 2364-3137.

55. LINDNER, Klaus-Peter. Feldbus. In: *Handbuch der Prozessautomatisierung*. 5. Auflage. Deutscher Industrieverlag, 2015, S. 257–275. ISBN 978-3-8356-3372-8.
56. LINDNER, Klaus-Peter. HART-Protokoll. In: *Handbuch der Prozessautomatisierung*. 5. Auflage. Deutscher Industrieverlag, 2015, S. 250–257. ISBN 978-3-8356-3372-8.
57. MIRANDA, F.; MARTINS, R.; DOROFEEV, K.; GENTILE, V.; FERREIRA, P.; GUEDES, M. Towards a Common Manufacturing Service Bus to Enable Flexible Plug-and-Produce Automation. In: *ISR 2018; 50th International Symposium on Robotics*. 2018, S. 1–8.
58. MOCKAPETRIS, P. *Domain names - concepts and facilities* [Internet Requests for Comments]. 1987-11. RFC, 1034. RFC Editor.
59. NE 100: *Nutzung von Merkmalleisten im PLT-Engineering-Workflow*. 2010-09. NAMUR Empfehlung, 100. Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie.
60. NE 131: *NAMUR-Standardgerät - Feldgeräte für Standardanwendungen*. 2017-10. NAMUR Empfehlung, 131. Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie.
61. NE 132: *Coriolis-Massemesser (CMM)*. 2009-05. NAMUR Empfehlung, 132. Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie.
62. NE 148: *Anforderungen an die Automatisierungstechnik durch die Modularisierung verfahrenstechnischer Anlagen*. 2013-10. NAMUR Empfehlung, 148. Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie.
63. NE 150: *Standardisierte NAMUR-Schnittstelle zum Austausch von Engineering-Daten zwischen CAE-System und PCS-Engineering-Werkzeugen*. 2014. NAMUR Empfehlung, 150. Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie.
64. NE 159: *Standardisierte NAMUR-Schnittstelle für den Datenaustausch zwischen CAE-Systemen der Verfahrensauslegung und der PLT-Hardware-Planung*. 2018. NAMUR Empfehlung, 159. Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie.
65. NE 175: *NAMUR Open Architecture - NOA Konzept*. 2020-07. NAMUR Empfehlung, 175. Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie.
66. NE 176: *NAMUR Open Architecture - NOA Information Model*. 2021-06. NAMUR Empfehlung, 176. Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie.
67. NE 177: *NAMUR Open Architecture - NOA Security Zonen und NOA Security Gateway*. 2021-04. NAMUR Empfehlung, 177. Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie.
68. NIGGEMANN, Oliver; HENNING, Steffen; SCHRIEGEL, Sebastian; OTTO, Jens; ANIS, Anas. Models for adaptable automation software: an overview of plug-and-produce in industrial automation. In: *11th MBEEs Workshop*. 2015, S. 73–82.

69. NOTHDURFT, Lars; EPPLE, Ulrich. Plug-and-Produce-Prozess mit NOA automatisieren: Erfolgreicher Einsatz in bestehenden Feldbusanwendungen. *atp magazin.* 2018, Jg. 60, Nr. 01-02, S. 44–46. ISSN 2364-3137, ISSN 2190-4111. Abger. unter DOI: 10.17560/atp.v60i01-02.2348.
70. NOTHDURFT, Lars; EPPLE, Ulrich. Plug&Produce für den Feldgerätetausch. In: *Automation 2019 : 20. Leitkongress der Mess- und Automatisierungstechnik : Autonomous Systems and {5G} in Connected Industries.* VDI Verlag, 2019, S. 361–374.
71. NOTHDURFT, Lars; SMISCHEK, Manfred. *Industrie-4.0-Testbeds - Umsetzung von Demonstratoren in realen Umgebungen und Evaluation mit Fokus auf Standardisierung : Abschlussbericht.* 2019. Techn. Ber. RWTH Aachen. Abger. unter DOI: 10.2314/kxp:1683814479.
72. *OPC UA for Process Automation Devices - PA-DIM.* 2020-04. OPC UA Companion Spec. OPC Foundation.
73. OTTO, Jens; NIGGEMANN, Oliver. Automatic parameterization of automation software for plug-and-produce. In: *Workshops at the Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence.* 2015.
74. OVERBECK, Sven. Montage. In: *Handbuch der Prozessautomatisierung.* 5. Auflage. Deutscher Industrieverlag, 2015, S. 675–702. ISBN 978-3-8356-3372-8.
75. PALM, Florian; EPPLE, Ulrich. openAAS – die offene entwicklung der verwaltungsschale. In: *Automation 2017: 18. Leitkongress der mess- und automatisierungstechnik.* Düsseldorf: VDI Verlag, 2017, S. 103–104. ISBN 978-3-18-092293-5.
76. PANDA, Santosh Kumar; SCHRODER, Tizian; WISNIEWSKI, Lukasz; DIEDRICH, Christian. Plug&Produce Integration of Components into OPC UA based data-space. In: *2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA).* IEEE, 2018. Abger. unter DOI: 10.1109/etfa.2018.8502663.
77. PERZYLO, Alexander; GROTHOFF, Julian; LUCIO, Levi; WESER, Michael; MALLAKUTI, Somayeh; VENET, Pierre; ARAVANTINOS, Vincent; DEPPE, Torben. Capability-based semantic interoperability of manufacturing resources: A BaSys 4.0 perspective. *IFAC-PapersOnLine.* 2019, Jg. 52, Nr. 13, S. 1590–1596. Abger. unter DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.11.427.
78. PFROMMER, Julius; SCHLEIPEN, Miriam; BEYERER, Jürgen. Fähigkeiten adaptiver Produktionsanlagen. *atp magazin.* 2013, Jg. 55, Nr. 11, S. 42–49.
79. PFROMMER, Julius; STOGL, Denis; ALEKSANDROV, Kiril; NAVARRO, Stefan Escaida; HEIN, Björn; BEYERER, Jürgen. Plug & produce by modelling skills and service-oriented orchestration of reconfigurable manufacturing systems. *at-Automatisierungstechnik.* 2015, Jg. 63, Nr. 10, S. 790–800.
80. POSTEL, Jon. *Internet protocol [Internet Requests for Comments].* 1981-09. RFC, 791. RFC Editor.
81. PROFANTER, S.; DOROFEEV, K.; ZOITL, A.; KNOLL, A. OPC UA for plug produce: Automatic device discovery using LDS-ME. In: *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA).* 2017, S. 1–8.
82. Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0). 2015-04. VDI-Statusreport.

83. SCHÜLLER, Andreas; BRENDLBERGER, Michael; LI, Fang; TEMMEN, Heiner; ZGORZELSKI, Peter. Durchgängiges PLT Engineering: Die Interaktion von Datenmodellen im PLT-Engineering. *atp magazin*. 2017, Jg. 59, Nr. 10, S. 16–33. ISSN 2364-3137, ISSN 2190-4111. Abger. unter DOI: 10.17560/atp.v59i10.1887.
84. T'JOENS, Y.; HUBLET, C.; SCHRIJVER, P. De. *DHCP reconfigure extension* [Internet Requests for Comments]. 2001-12. RFC, 3203. RFC Editor.
85. THOMSON, S.; NARTEN, T.; JINMEI, T. *IPv6 stateless address autoconfiguration* [Internet Requests for Comments]. 2007-09. RFC, 4862. RFC Editor.
86. *Umsetzungsstrategie industrie 4.0*. 2015-04. Ergebnisbericht der plattform industrie 4.0. BITKOM e.V. and VDMA e.V. and ZVEI e.V.
87. *VDI/VDE 3697 Blatt 1: Empfehlung zur technischen Umsetzung des Datenaustauschs zwischen den Engineering-Systemen für PLT und PCS - Datenaustausch von PLT-Stellen gemäß NE 150 mit AutomationML*. 2017. Richtlinie. VDI/VDE.
88. *VDI/VDE 3697 Blatt 2: Empfehlung zur technischen Umsetzung des Datenaustauschs zwischen Engineering-Systemen - Datenaustausch zwischen CAE-Systemen der Verfahrensauslegung und der PLT-Hardware-Planung gemäß NE 159 mit AutomationML*. 2018. Richtlinie. VDI/VDE.
89. *VDI/VDE/NAMUR 2658-1: Automatisierungstechnisches Engineering modularer Anlagen in der Prozessindustrie - Allgemeines Konzept und Schnittstellen*. 2019-10. Richtlinie. VDI/VDE/NAMUR.
90. *VDI/VDE/NAMUR 2658-4: Automatisierungstechnisches Engineering modularer Anlagen in der Prozessindustrie - Modellierung von Moduldiensten*. 2020-08. Richtlinie. VDI/VDE/NAMUR.
91. WAGNER, Constantin; KAMPERT, David; SCHÜLLER, Andreas; PALM, Florian; GRÜNER, Sten; EPPLER, Ulrich. Model based synthesis of automation functionality. *at - Automatisierungstechnik*. 2016, Jg. 64, Nr. 3. ISSN 0178-2312, ISSN 2196-677X. Abger. unter DOI: 10.1515/auto-2015-0094.
92. WALTER, Jörg; GRÜTTNER, Kim; NEBEL, Wolfgang. Using IEC 61499 and OPC-UA to implement a self-organising plug and produce system. In: *The 5th International Workshop on Model-driven Robot Software Engineering (MORSE 2018)*. 2018.
93. WHITE, J.E. *High-level framework for network-based resource sharing* [Internet Requests for Comments]. 1975-12. RFC, 707. RFC Editor.
94. YE, Xun; JIANG, Junhui; LEE, Changdae; KIM, Namhyeok; YU, Mengmeng; HONG, Seung Ho. Toward the Plug-and-Produce Capability for Industry 4.0: An Asset Administration Shell Approach. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2020, Jg. 14, Nr. 4, S. 146–157. Abger. unter DOI: 10.1109/mie.2020.3010492.

Alle 23 Reihen der „Fortschritt-Berichte VDI“
in der Übersicht – bequem recherchieren unter:
elibrary.vdi-verlag.de

Und direkt bestellen unter:
www.vdi-nachrichten.com/shop

- Reihe 01** Konstruktionstechnik/
Maschinenelemente
- Reihe 02** Fertigungstechnik
- Reihe 03** Verfahrenstechnik
- Reihe 04** Bauingenieurwesen
- Reihe 05** Grund- und Werkstoffe/Kunststoffe
- Reihe 06** Energietechnik
- Reihe 07** Strömungstechnik
- Reihe 08** Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
- Reihe 09** Elektronik/Mikro- und Nanotechnik
- Reihe 10** Informatik/Kommunikation
- Reihe 11** Schwingungstechnik
- Reihe 12** Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik
- Reihe 13** Fördertechnik/Logistik
- Reihe 14** Landtechnik/Lebensmitteltechnik
- Reihe 15** Umwelttechnik
- Reihe 16** Technik und Wirtschaft
- Reihe 17** Biotechnik/Medizintechnik
- Reihe 18** Mechanik/Bruchmechanik
- Reihe 19** Wärmetechnik/Kältetechnik
- Reihe 20** Rechnergestützte Verfahren
- Reihe 21** Elektrotechnik
- Reihe 22** Mensch-Maschine-Systeme
- Reihe 23** Technische Gebäudeausrüstung



**BEST
MATCH**
for
**BEST
TALENTS**

INGENIEUR.de

B E S T  M A T C H

powered by 

So findet Sie Ihr Traumjob!

Ingenieure aller Fachrichtungen, Absolventen und wechselwillige Professionals aufgepasst:

Sagen Sie uns, was Sie können, wollen und lieben – dann bieten Ihnen die besten Unternehmen den passenden Job für Ihr Talent. Schnell, unkompliziert, ohne Aufwand.

DAS SIND IHRE VORTEILE:

Einfache Profilerstellung | Persönliche Beratung | Passgenaue Job-Angebote |

Keine aufwändige Job-Suche | Unternehmen bewerben sich bei Ihnen | Kostenfreie Nutzung |

Transparenz: alle wichtigen Informationen zum Traumjob |

Sicher: Ihr Arbeitgeber hat keine Einsicht in Ihr Profil

**JETZT ALS TALENT REGISTRIEREN:
BESTMATCH.INGENIEUR.DE**

REIHE 08

MESS-,
STEUERUNGS-
UND REGELUNGS-
TECHNIK



NR. 1274

ISBN 978-3-18-527408-4

E-ISBN 978-3-18-627408-3

BAND
1|1

VOLUME
1|1