



HELMUT SCHMIDT
UNIVERSITÄT

Universität der Bundeswehr Hamburg

Aufwandsbewertung im Engineering modularer Prozessanlagen

Von der Fakultät für Maschinenbau

der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

DISSERTATION
vorgelegt von

Dipl.-Ing. Thomas Holm

aus Eberswalde

Hamburg, 2016.

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Leon Urbas

Tag der mündlichen Prüfung: 22. Juli 2016

Geleitwort der Herausgeber

Die Automatisierungstechnik ist ein komplexes und vielfältiges wissenschaftliches Gebiet. Am Institut für Automatisierungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg wird zum einen die Entwicklung neuer automatisierungstechnischer Methoden vorangetrieben, zum anderen wird die Automatisierung komplexer Produktionsprozesse bearbeitet. Die reale Umsetzung im Rahmen technischer Prozesse, insbesondere industrieller Produktionsprozesse, ist das Ziel des ingenieurwissenschaftlichen Wirkens und zugleich Gradmesser für seinen Erfolg.

Die Zeit zwischen der Entscheidung für den Neubau einer Anlage und dem Beginn der Produktion beträgt typischerweise mehrere Jahre. Auf dem „Tutting-Symposium“ wurde 2009 das Ziel einer Verkürzung dieser Zeit um 50% formuliert und die Modularisierung verfahrenstechnischer Anlagen vorgeschlagen, um Anlagen schneller planen und bauen zu können. Seitdem sind verschiedene verfahrenstechnische Modularisierungskonzepte verfolgt worden, und im Projekt DIMA wurde gemeinsam von der Firma WAGO mit der Technischen Universität Dresden und der Helmut-Schmidt-Universität Hamburg ein Konzept zur automatisierungstechnischen Beschreibung und Integration von Modulen in eine modular aufgebaute Anlage entwickelt und prototypisch realisiert. Damit ist auch der Umbau einer verfahrenstechnischen Anlage durch Tausch von Modulen inkl. der Leit- und Steuerungstechnik innerhalb weniger Minuten möglich.

Herr Dr. Holm hat an dieser positiven Entwicklung durch seine Mitarbeit am Projekt DIMA großen Anteil. In seiner Dissertation hat er untersucht, in welchem Umfang sich durch das Konzept der modularen Anlage Aufwände für das Engineering der Automatisierungstechnik in den Zeitraum vor der Entscheidung für den Neubau einer Anlage verlagern lassen und sich so der Zeitraum bis zum Produktionsbeginn potentiell verkürzen lässt. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Vorverlagerung von 50% des Aufwands realistisch ist.

Die Herausgeber danken dem VDI-Verlag für die Möglichkeit einer breiten Veröffentlichung dieser Ergebnisse.

Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay

Prof. Dr.-Ing. Klaus Krüger

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Automatisierungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg von November 2011 bis August 2015.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Alexander Fay. Als Doktorvater hat er mich stets unterstützt, gefordert und gefördert. Mit zahlreichen fachlichen Gesprächen und Diskussionen hat er maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Professor Dr.-Ing. Leon Urbas danke ich zum einen für die Übernahmen des Zweitgutachtens und zum anderen für den zahlreichen fachlichen Austausch in den gemeinsamen Forschungsprojekten.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Markus Bause danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Des Weiteren möchte ich mich bei Michael Obst von der TU Dresden und Andreas Schadt von der Spiratec AG für die erfolgreiche Zusammenarbeit und fachlichen Austausch bedanken.

Selbstverständlich gilt meinen Mitarbeiterkolleginnen und Kollegen großer Dank für die gemeinsame Zeit am Institut. Besonderer Dank gilt Markus Göring, Frank Schumacher sowie Harald und Christiane Behrens, die mir beim Schreiben dieser Arbeit wertvolle Anmerkungen, Ratschläge und Korrekturhinweise gaben.

Besonderer Dank gilt meiner Familie und Freunden für die Zuversicht und die Unterstützung in den vergangenen Jahren.

Mein größter Dank gilt meiner Frau Martyna, die mich immer Unterstützt hat, die Höhen und Tiefen mit mir durchlebt hat und mir damit die nötige Kraft gab, alle Entbehrungen der letzten Jahre zu meistern.

Hamburg, im August 2016

Thomas Holm

Inhalt

I.	Abkürzungsverzeichnis.....	VIII
1.	Einleitung	1
1.1.	Motivation	1
1.2.	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit.....	2
2.	Aufbau und Engineering automatisierter Produktionsanlagen.....	3
2.1.	Aufbau automatisierter Produktionsanlagen.....	3
2.2.	Grundlagen industrieller Automatisierungssysteme.....	4
2.3.	Engineering automatisierter Produktionsanlagen	7
2.3.1.	Was ist Engineering?	7
2.3.2.	Engineering verfahrenstechnischer Produktionsanlagen	9
2.3.3.	Abgrenzung des Anlagen-Engineerings von der Produktentwicklung.....	12
2.4.	Ansätze zur Verbesserung des Engineerings	14
2.4.1.	Entwicklung von Modellen	15
2.4.2.	Analyse von Prozessen	17
2.4.3.	Entwicklung von Methoden	18
2.4.4.	Entwurf von Systemstrukturen	19
2.5.	Zwischenfazit	22
3.	Modulare Produktionsanlagen	23
3.1.	Die Auffassung von Modularität.....	24
3.2.	Der Weg zur modularen Produktionsanlage	26
3.3.	Modulare wandlungsfähige Produktionsanlagen	28
3.4.	Modulare Produktionsanlagen im Kontext von Industrie 4.0	33
3.5.	Anwendungsbereiche modularer verfahrenstechnischer Produktionsanlagen	36
3.6.	Zwischenfazit	39
4.	Stand der Forschung im Engineering modularer Produktionsanlagen.....	40
4.1.	Stand der Forschung modularer verfahrenstechnischer Produktionsanlagen	40
4.2.	Plug-and-Produce - Ansätze und Technologien zur Integration von Modulen	46
4.2.1.	Anforderungen der NE 148	47
4.2.2.	Herausforderung des Plug-and-Produce.....	48
4.2.3.	Vereinheitlichte Kommunikationsprotokolle und -architekturen	49
4.2.4.	Beschreibungsmittelbasierte Middlewares und alternative Systemarchitekturen	49

4.2.5. Zusammenfassung und Auswirkungen auf das Engineering.....	53
4.2.6. Vertiefende Betrachtung des DIMA-Ansatzes.....	61
4.3. Der Aufwand und dessen Bestimmung	63
4.3.1. Die Auffassung von Aufwand	63
4.3.2. Bestimmung von Aufwand	65
4.3.3. Aufwand im Engineering modularer Produktionsanlagen	67
4.3.4. Fazit der Bestimmung von Aufwänden im Engineering	70
4.4. Handlungsbedarf und These.....	70
5. Systematische Aufwandsbewertung von Engineering-Aktivitäten.....	72
5.1. Einfluss des Modul-Automatisierungssystems.....	73
5.2. Einfluss des Standardisierungsgrades	74
5.3. Systematisches Vorgehen zur Bewertung von Einzelaktivitäten der NA35	75
5.4. Bewertung der Einzelaktivitäten der NA 35	79
5.4.1. Grundlagenermittlung.....	79
5.4.2. Vorplanung	81
5.4.3. Basisplanung.....	83
5.4.4. Ausführungsplanung	87
5.4.5. Errichtung	94
5.4.6. Inbetriebsetzung.....	101
5.4.7. Projektabschluss.....	104
5.5. Zwischenfazit	105
6. Entstehende Engineering-Prozesse	106
6.1. Vertiefende Betrachtung des Modul-Engineerings.....	107
6.2. Vertiefende Betrachtung des Anlagen-Engineerings	111
6.2.1. Anlagen-Engineering bei erstmaliger Erstellung der Gesamtanlage	111
6.2.2. Anlagen-Engineering bei Umbau der Gesamtanlage	114
6.3. Quantitative Bewertung des Modul- und Anlagen-Engineerings	115
6.4. Fazit und Überprüfung der Thesen.....	118
7. Exemplarische Aufwandsbetrachtung im Engineering einer modularen Demonstrationsanlage	120
7.1. Vorstellung des Produktionsprozesses und der modularen Anlage	120
7.2. Engineering-Aktivitäten bei erstmaliger Erstellung des Filtermoduls.....	122
7.3. Engineering-Aktivitäten bei Erstellung der Beispielanlage	126

7.3.1. Engineering-Aktivitäten bei erstmaliger Erstellung der Beispielanlage	126
7.3.2. Engineering-Aktivitäten beim Modulwechsel	131
7.4. Verlagerbarer Engineering-Aufwand.....	133
8. Zusammenfassung, kritische Betrachtung und Ausblick.....	133
8.1. Zusammenfassung.....	133
8.2. Kritische Betrachtung	136
8.3. Ausblick.....	137
Anhang A: Bewertung der NA35 Einzelaktivitäten	139
Literaturverzeichnis.....	141
Normen- und Richtlinienverzeichnis	153
Verzeichnis der Veröffentlichungen des Verfassers.....	154
Verzeichnis der betreuten studentischen Arbeiten des Verfassers.....	157

I. Abkürzungsverzeichnis

AML	Automation Markup Language
AT	Automatisierungstechnik
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CPPS	Cyber Physical Production System
CPS	Cyber Physical System
EA	Einzelaktivität
EO	Engineering-Organisation
EPC	Engineering-Procurement-Constructor
ERP	Enterprise Ressource Planning
FAT	Factory Acceptance Test
HMI	Human Machine Interface
i.S.v.	im Sinne von
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologien
IPC	Industrie PC
MES	Manufacturing Execution System
PLS	Prozessleitsystem
PNK	Prozessnahe Komponente
R I/O	Remote I/O
R&I-Fließbild	Rohrleitungs- und Instrumentierungsfließbild
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition-System
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
u.v.m	und vieles mehr
z.Zt.	zur Zeit

1. Einleitung

1.1. Motivation

Deutschlands Wirtschaftsleistung ist wie in keinem anderen westlichen Industrieland auf die industrielle Produktion ausgerichtet¹. Von den rund 40 Mio. Beschäftigten in Deutschland sind ca. 15 Mio. in der Produktion bzw. produktionsnahen Tätigkeiten aktiv [Sch11]. Das macht deutlich, dass der gesellschaftliche Wohlstand eng mit der Frage der Zukunftsfähigkeit des Industriestandorts Deutschland verbunden ist. Wie jeder andere Produktionsstandort, muss sich auch Deutschland zukünftig im Umfeld verändernder gesellschaftlicher und ökonomischer Rahmenbedingungen behaupten: Der internationale Wettbewerb steigt immer weiter, auch durch den Ausbau von Infrastrukturen und Bildungssystemen in den Schwellenländern [AbRe11].

Als Hochlohnland sollte Deutschland auf diese Herausforderungen durch Produkt- und Prozessinnovationen reagieren [BuRe06]. Um die Innovationen im internationalen Marktumfeld platzieren zu können, müssen neue Produkte allerdings schnell Marktreife erlangen, um somit zügig bestehende Marktsegmente besetzen oder neue schaffen zu können. Dabei ist zu erwarten, dass durch zunehmende Spezialisierung der Produkte, die anvisierten Marktsegmente immer kleiner werden. Schlussendlich werden einzelne Individuen mit spezifischen Individualprodukten angesprochen. Abbildung 1-1 stellt die Einflüsse, die aktuell auf produzierende Unternehmen wirken, graphisch dar.

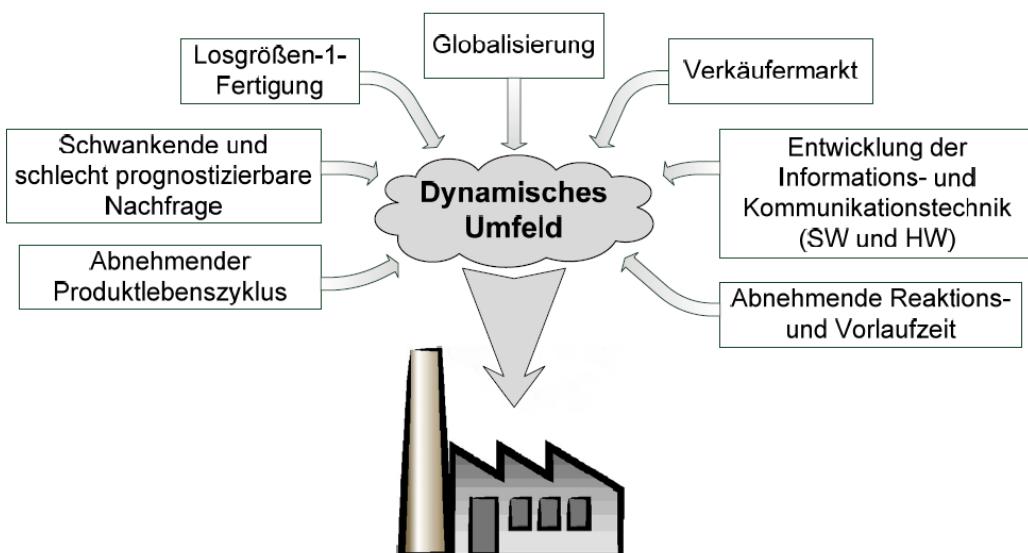


Abbildung 1-1: Einflüsse auf Produktionsunternehmen. [SJF11]

¹ Der Anteil des verarbeitenden Gewerbes an der Bruttonwertschöpfung aller Wirtschaftsbereiche in Deutschland lag im Jahr 2014 bei 22,3% (Frankreich: 11,4%, Großbritannien: 9,4%, EU-gesamt: 15,3%) [StBu15]

Die entscheidende Begrenzung in dem dynamischen Zusammenspiel zwischen Produktinnovation und Absatzmarkt ist das Produktionssystem, welches zur Herstellung des Produktes genutzt wird. Aufgrund der hohen Dynamik der Kundenbedürfnisse muss ein solches Produktionssystem möglichst schnell verfügbar sein und das Produkt schnell produzieren können. Diese Fähigkeit wird zum wesentlichen wirtschaftlichen Erfolgskriterium [PAA09]. Zusätzlich sollte die Kapazität des Produktionssystems so veränderbar sein, dass es die unterschiedlichen Bedarfe in den Phasen des Produktlebenszyklus: Einführung, Wachstum, Reife / Sättigung und Degeneration erfüllen kann. Spätestens in der Reipphase des Produktes sollte die Produktion räumlich nahe am Hauptabsatzmarkt liegen um beispielsweise die Logistikkosten niedrig zu halten. Wird das neue Produkt am Markt nicht angenommen, sollten die in die Produktionsanlage getätigten Investitionen nicht verfallen. Das Produktionssystem oder Teile davon sollten in anderen Strukturen wiederverwendbar sein [HOF14].

Als vielversprechende Lösung dieser Herausforderung wird z.Zt. die Modularisierung von verfahrenstechnischen Produktionsanlagen diskutiert. Anlagen sollen durch Kombination unterschiedlicher Module flexibel aufgebaut werden. Einzelne Module realisieren dabei jeweils standardisierte Produktionsschritte und lassen sich entsprechend des herzustellenden Produkts kombinieren. Änderungen des Produktionsprozesses werden durch den Tausch von Modulen umgesetzt. Die Produktionsmenge kann durch Hinzufügen gleichartiger Module erhöht werden. [UBJ12]

1.2. Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Eine breite Akzeptanz und Umsetzung modularer verfahrenstechnischer Produktionsanlagen ist im aktuellen industriellen Umfeld allerdings noch nicht zu erkennen. Wie bei anderen Innovationen auch, sind die Bedenken vor Fehlinvestitionen in noch nicht ausgereifte technische und technologische Umsetzungen mit fehlenden industriellen Standards hoch [DKE15]. Auch konkrete Aussagen zur Vorteilhaftigkeit sind nicht vorhanden. Zwar stellte der VDMA als Ergebnis einer Umfrage² vor, dass bei konsequenter Modularisierung, allein beim Engineering Einsparungen von 15% erreicht werden könnten [VDMA14], allerdings ist der dieser Umfrage zugrunde liegende Modulbegriff sehr abstrakt. Eine Überführung in eine konkrete Anwendung ist damit nur sehr schwer realisierbar, und die Zahlen sind schwer zu verifizieren. Den großen Investitionssummen bei Neu- oder Umbauten von Produktionsanlagen kann somit keine quantifizierbare Kosteneinsparung durch Modularisierung gegenübergestellt werden. Dadurch entsteht ein Kreislauf aus abwartender Haltung bei möglichen Anwendern modularer Anlagen auf der einen Seite und noch nicht vorhandenen Geschäftsfeldern für Hersteller auf der anderen Seite.

² 153 Teilnehmer von 123 Unternehmen des deutschen und europäischen Industrieanlagenbaus mit 33% Rücklaufquote bei den angefragten Unternehmen.

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist es darum, quantifizierbare Aussagen zur Vorteilhaftigkeit modularer verfahrenstechnischer Produktionsanlagen zu erarbeiten.

Die Vorteilhaftigkeit modularer Produktionsanlagen ergibt sich aus der Möglichkeit eines schnellen Aufbaus bzw. Umbaus des Produktionssystems. Da sich die dazu erforderlichen Vorgänge typischerweise innerhalb des Engineering-Prozesses befinden, liegt der Fokus dieser Arbeit auf dem Engineering modularer Produktionsanlagen. Die Fragestellung zur Vorteilhaftigkeit modularer Produktionsanlagen ergibt sich somit zu: Wie hoch ist der Anteil des Engineerings automatisierter Produktionsanlagen, der durch die Einführung modularer und wandlungsfähiger Produktionsanlagen verringert werden kann?

Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen somit dazu beitragen, den zuvor beschriebenen Kreislauf zu durchbrechen.

Um die Fragestellung dieser Arbeit geeignet beantworten und Abhängigkeiten zu Anlageneigenschaften identifizieren und herzustellen zu können, ist die vorliegende Arbeit wie folgt aufgebaut:

Im Anschluss an dieses einleitende Kapitel werden automatisierte Produktionssysteme im Allgemeinen und das Engineering des Automatisierungssystems von Produktionsanlagen im Speziellen näher beschrieben. Das Ergebnis des Kapitels 2 leitet eine vertiefende Betrachtung der Systemstruktur von Produktionsanlagen hin zu modularen Strukturen ein.

Die Definition von Modularität und deren Anwendung in Produktionssystemen ist Inhalt des 3. Kapitels. Es endet mit einer Analyse des Anwendungsbereichs modularer Produktionsanlagen in der chemisch-pharmazeutischen Industrie.

In Kapitel 4 werden die schon heute im Bereich der Forschung diskutierten und entwickelten technischen Lösungen modularer Produktionsanlagen betrachtet und analysiert. Daraus wird eine geeignete technische Lösung ausgewählt, auf deren Basis die systematische Aufwandsbewertung der Engineering-Aktivitäten in Kapitel 5 durchgeführt wird.

Die Ergebnisse dieser Bewertung werden in den Kapiteln 6 und 7 aufbereitet und anhand eines Anlagenbeispiels validiert. Die Arbeit schließt mit einer kritischen Betrachtung und stellt mögliche Folgeaktivitäten dieser Arbeit vor.

2. Aufbau und Engineering automatisierter Produktionsanlagen

2.1. Aufbau automatisierter Produktionsanlagen

Automatisierte technische Systeme kommen überall dort zum Einsatz, wo Prozesse automatisiert, also autonom und ohne Mitwirkung von menschlichen Eingriffen ablaufen [Sch99]. Prozesse werden dabei durch Automatisierungseinrichtungen überwacht und gesteuert, sodass sie ihre intendierte Funktion erfüllen und geltenden

Sicherheitsanforderungen genügen [Lun03]. Abhängig vom Einsatzbereich und Charakter des technischen Systems lassen sich mehrere Anwendungsdomänen ausmachen.

Werden technische Systeme zur Herstellung von Produkten eingesetzt, spricht man von automatisierten Produktionssystemen. Hier können mindestens zwei Typen von Produktionsanlagen identifiziert werden:

- Produktionsanlagen der Fertigungsindustrie und
- Produktionsanlagen der Prozessindustrie.

In der Fertigungsindustrie werden zumeist Stückgüter in physikalisch-mechanischen Verfahren von Werkzeugmaschinen und Robotern bearbeitet [KeKe01]. Die Werkzeugmaschinen sind in einer Produktionslinie angeordnet, durch die das zu bearbeitende Produkt transportiert wird. Der Transport der Produkte erfolgt oft mit Hilfe von Förderbändern.

In der Prozessindustrie stehen Stoffänderungen und/oder Stoffumwandlungen von zumeist formlosen, fluiden, gasförmigen und granularen Produkten mit Hilfe physikalischer, chemischer und/oder biologischer Wirkungsabläufe im Vordergrund [Bla97]. Die Erzeugnisse, wie beispielsweise Chemikalien, Kunststoffe, Arzneimittel, Aromen, Energieträger, Kosmetika u.v.m. sollen möglichst wirtschaftlich, umweltfreundlich und sicher produziert werden [SaKa00]. Die verfahrenstechnische Produktionsanlage besteht dazu aus einer Hauptanlage, in der der verfahrenstechnische Prozess abläuft, und einer Reihe von Nebenanlagen zur Steuerung, Regelung, Entsorgung und Versorgung der Hauptanlage mit Stoffen und Energie, sowie Lagerung und Transport. Die Gesamtheit der verfahrenstechnischen Anlage und des verfahrenstechnischen Prozesses bildet das verfahrenstechnische System [Web14].

Die nachfolgenden Abschnitte führen in die Thematik dieser Arbeit ein, indem sie die Struktur und Funktion industrieller Automatisierungssysteme beschreiben, um darauffolgend das heutige Engineering, also die Planung, Realisierung und Inbetriebnahme [Fay09] verfahrenstechnischer Anlagen näher zu beleuchten. Im Anschluss daran werden Ansätze zur Verbesserung des Engineerings vorgestellt, die die Variation der Systemstruktur verfahrenstechnischer Anlagen hin zu wandlungsfähigen, modularen Anlagen einleiten.

2.2. Grundlagen industrieller Automatisierungssysteme

Die zum automatischen Betrieb einer industriellen Produktionsanlage notwendigen Automatisierungseinrichtungen werden meist unter dem Begriff Automatisierungssystem zusammengefasst. Heutige Automatisierungssysteme in der Produktion verstehen sich als zentralistische und hierarchisch strukturierte Systeme, bezogen sowohl auf die Organisation als auch auf die informationstechnische Vernetzung der Systeme [BaDi08].

Je nach Zeithorizont der zu treffenden Entscheidung, der zu verwendenden Information sowie deren Zielstellung [Lunze03] kann das Automatisierungssystem in mehrere Hierarchieebenen eingeteilt werden. Eine anschauliche Darstellung bietet dafür die Automatisierungspyramide. Sie weist je nach Genauigkeitsgrad drei bis sechs Ebenen auf. Abbildung 2-1 zeigt eine oft verwendete Darstellung der Ebeneneinteilung (links) und jeweilig genutzter Komponenten (rechts).

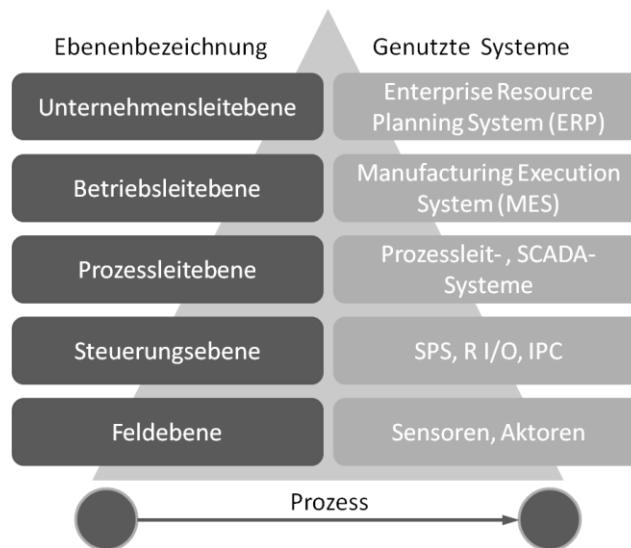


Abbildung 2-1: Darstellung der Automatisierungspyramide (nach [Lun03])

Auf der untersten Ebene befindet sich die Schnittstelle zwischen dem zu automatisierenden Produktionsprozess und dem Automatisierungssystem. Die Schnittstelle entsteht mit Hilfe von Sensoren und Aktoren der sogenannten Feldebene. Die Sensoren nehmen die Information über die Zustände des Prozesses (Prozesszustand) auf und leiten sie als Eingangssignal an die Steuerungsebene weiter. Gleichzeitig werden die dort erzeugten Ausgangssignale mit Hilfe von Aktoren der Feldebene in Stelleingriffe umgesetzt, um einen oder mehrere Prozesszustände zielgerichtet zu verändern.

Auf der Steuerungsebene kommen Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) und Industrie PCs (IPC) zum Einsatz. SPS und IPC besitzen einen Programmspeicher, auf dem ein durch ein Engineering-Werkzeug erstelltes Programm ablaufen kann. Dieses Programm wird in den Programmiersprachen der IEC61131-3 [IEC61131-3] erstellt, im Werkzeug übersetzt und anschließend in den Programmspeicher der SPS geladen. Dort wird der Programmcode zyklisch abgearbeitet. Der Aufbau einer SPS und der Ablauf eines SPS-Zyklus ist in Abbildung 2-2 systematisch dargestellt.

Ergänzend zu den folgenden Abbildungen verfügen moderne SPS und IPC darüber hinaus über Serverfunktionalitäten, wie z.B. OPC-DA oder OPC-UA³.

³ <https://opcfoundation.org/>

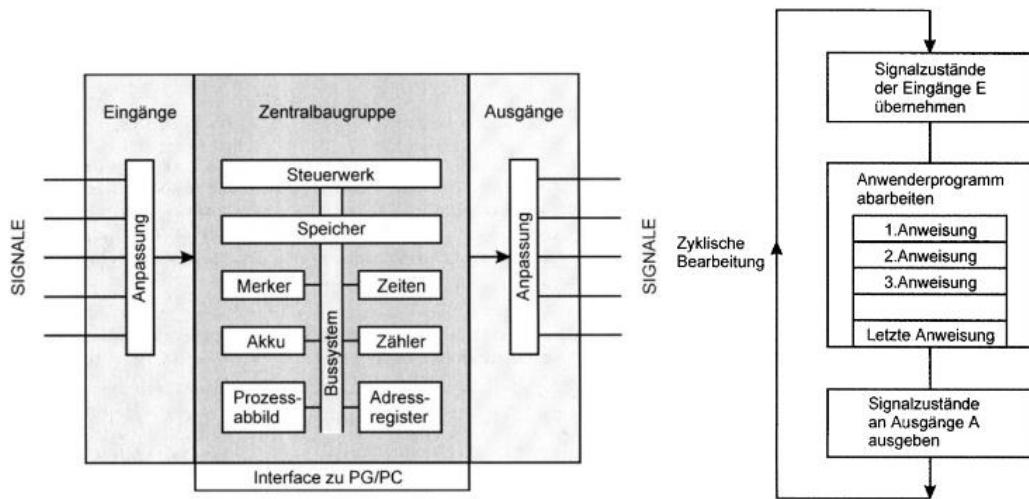


Abbildung 2-2: Systemfunktionen (links) und Funktionsmodell (rechts) einer SPS [WeZa05]

Zum Signaltransport in der Feld- und Steuerungsebene werden funktionsbezogene Übertragungstechnologien, zum Beispiel Feldbusse, genutzt, denen verschiedene physikalische und nachrichtentechnische Kommunikationsprotokolle zu Grunde liegen. Zur Umsetzung von Signalen der Feldgeräte in entsprechende Kommunikationsprotokolle der Steuerungsebene kommen Remote I/O's (R I/O) zum Einsatz. Sie besitzen, anders als SPS, keinen für den Nutzer frei beschreibbaren Programmspeicher. Die Komponenten der Feld- und Steuerungsebene sind an die Rahmenbedingungen des industriellen Umfeldes angepasst und unterscheiden sich speziell in den Echtzeitanforderungen von den übrigen Automatisierungsebenen. Sie werden auch als prozessnahe Komponenten (PNK) bezeichnet [ASS97].

Die Systeme der Prozessleitebene befinden sich oberhalb der Steuerungsebene. Sie setzen Produktionsaufträge mit Anforderungen an das Produkt, die Menge und Herstellungstermine in verfahrenstechnische Realisierungsprozesse um [Polke94]. Die Prozessleitebene beinhaltet darüber hinaus die Schnittstelle zum Bedienpersonal (Operator) einer Produktionsanlage. Die Prozessinformationen werden durch Human Machine Interfaces-Systeme (HMI) bzw. Supervisory Control and Data Acquisition-Systeme (SCADA) aufbereitet und in Bedienbildern dargestellt. Die in dieser Ebene hauptsächlich genutzten Funktionalitäten werden meist unter dem Begriff Prozessleitsystem (PLS) zusammengefasst.

Die kurzfristige Produktionsplanung und -feinplanung erfolgt mit Hilfe der Systeme der Betriebsleitebene. In Manufacturing Execution Systemen (MES) werden die Aktivitäten zur Bearbeitung eines kundenspezifischen Produktionsauftrags bearbeitet. Dazu werden zum Beispiel Indikatoren über Auslastung von Ressourcen, Einhaltung von Lieferterminen und Entwicklung der Durchlaufzeiten ermittelt und daraus gezielte Einflussnahmen auf den Produktionsprozess abgeleitet [VDI15600].

Systeme, die noch weiter vom Produktionsprozess entfernt sind, werden der Unternehmensleitebene zugewiesen. Hier werden speziell Produktions-, Zuliefer- und Versandpläne bearbeitet [DIN62265]. Die Werkzeuge der Unternehmensleitebene werden unter dem Akronym ERP (Enterprise Ressource Planing) beschrieben und kommunizieren in der Regel mit Ethernet-basierten IT-Standardprotokollen.

Aufgrund der verschiedenen Anforderungen hinsichtlich der Entscheidungsdimension, des Zeitverhaltens und der Verfügbarkeit und Sicherheit des Systems, werden auf den Ebenen der AT-Pyramide unterschiedliche Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) eingesetzt. Dies spiegelt sich auch in den verwendeten Modellierungs- und Programmiersprachen wider. So werden auf der Unternehmens- und Betriebsleitebene vielfältige Hochsprachen und datenbankbasierte Systeme genutzt, wohingegen auf der Feld- und Steuerungsebene in den eher prozessornahen Programmiersprachen der [IEC61131-3] programmiert wird. Der Abstraktionsgrad steigt somit mit der Höhe der Ebene.

Es ist allerdings zu beobachten, dass die zunehmende Verbreitung von Ethernet-basierten Protokollen auch auf den unteren Ebenen der AT-Pyramide ein deutlicher Trend ist [Che15]. Dieser Wunsch nach vertikaler Integration verbunden mit den Konvergenzstrategien der Systemanbieter führt somit zu einer stetigen Auflösung der Hierarchiegrenzen innerhalb der Automatisierungspyramide.

Die Aufgaben eines Automatisierungssystems können zusätzlich in Basisautomatisierung, Prozedursteuerung und Koordinierungssteuerung unterteilt werden. Die Basisautomatisierung ist die unterste Ebene. Sie umfasst Verriegelungen, Regler und die Steuerung von Ausnahmesituationen. Die Prozedursteuerung bestimmt, dass Abläufe innerhalb einer Anlage in geordneter Folge stattfinden, sodass die prozessorientierte Aufgabe der Anlage ausgeführt wird. Die Koordinierungssteuerung leitet, löst aus oder ändert die Ausführung der Prozedursteuerung und deren Nutzung von PNK. [DIN61512]

2.3. Engineering automatisierter Produktionsanlagen

2.3.1. Was ist Engineering?

Die Bestimmung des Begriffs Engineering kann nicht eindeutig und somit für alle Anwendungsdomänen einheitlich vollzogen werden. Häufig werden die Begriffe Engineering, Planung und Projektierung synonym verwendet. Eggersmann subsummiert unter Engineering Aktivitäten der Entscheidungsfindung, Modellerstellung, Lösungsmodellierung und deren Wechselwirkungen, die sich auf mehreren Abstraktionsstufen wiederfinden lassen [Egg05]. Vergleicht man, wie unterschiedlich der Engineering-Begriff in verschiedenen Anwendungsfällen genutzt wird, ist zu erkennen, dass man zwischen einem engeren und einem weiteren Verständnis von Engineering differenzieren muss.

Ein engeres Verständnis von Engineering findet sich oftmals bei verfahrenstechnisch geprägten Tätigkeitsbeschreibungen. So versteht Weber unter Engineering die ganzheitliche technische Planung einer Anlage, also das Erarbeiten von technologischen sowie organisatorisch-administrativen Unterlagen [Web14]. Er grenzt damit die Phasen der Beschaffung, des Baus, der Inbetriebnahme und den Betrieb der Anlage vom Engineering aus.

Ein engeres Verständnis ist auch in der DIN 28000 zu finden. Sie nutzt den Begriff Engineering lediglich als englische Übersetzung von Planung: Die Phasen zwischen Grundlagenermittlung und Gefahrenübergang wird dort als Projektphase (vgl. dazu Abbildung 2-3) bezeichnet. Derart betrachtet ist Engineering nur ein Teil der Projektphase.

Ein Verständnis im weiteren Sinn kann oft in der Automatisierungstechnik gefunden werden. Nach Fay umfasst das Engineering die Planung, Realisierung und Inbetriebnahme einer Anlage sowie spätere Ingenieurtätigkeiten während des Betriebs wie die Überprüfung, Optimierung, Erweiterung und Modernisierung der Anlage [Fay09]. Dabei charakterisiert Fay das Engineering als eine phasenunabhängige Tätigkeit, die die systematische Anwendung von Kenntnissen über physikalische Gesetzmäßigkeiten [Fay09] umfasst. Bei Hahn wird zusätzlich eine gedankliche Antizipation zukünftiger Vorgänge, dem Engineering nachfolgender Aktivitäten zum Beispiel im Betrieb der Anlage, beschrieben [Hah96]. Auch Brendelberger und Scherwietes subsummieren unter Engineering alle Vorgänge und Schritte, die erforderlich sind, um von einer ersten Prozessidee zu einer fertigen Prozessanlage zu gelangen [BrSc15].

Ein sehr weites Verständnis für Engineering wird in den Anforderungsbeschreibungen, die im Umfeld des Zukunftsprojekts Industrie 4.0 formuliert werden, definiert. Dort werden unter durchgängigem Engineering alle Phasen im gesamten Lebenszyklus einer Anlage, also auch Phasen, die die Außerbetriebnahme und Entsorgung der Anlage enthalten, verstanden [DKE13].

Im Folgenden soll Engineering die Aktivitäten und Vorgänge umfassen, die zwischen der Produktidee und dem Abschluss der Inbetriebnahme der fertigen Produktionsanlage auftreten. Diese Definition schließt Tätigkeiten zur Bestellung und Montage mit ein und grenzt die Aktivitäten der Phase Betrieb aus.

2.3.2.Engineering verfahrenstechnischer Produktionsanlagen

Das Engineering von automatisierten verfahrenstechnischen Produktionsanlagen ist eine komplexe Aufgabe. Aufgrund der Zahl der zu betrachtenden Entitäten, der beteiligten Personen und Organisationen und deren Verknüpfung und Interaktion untereinander, sowie der Restriktionen des Umfelds, in dem das Engineering stattfindet [DiFa13], übersteigt die Aufgabe die kognitiven Fähigkeiten einer einzelnen Person bei weitem [Goe09]. Aus diesem Grund werden die erforderlichen Aktivitäten zwischen Anforderungsdefinition und Inbetriebnahme der Anlage, Gewerken zugeordnet, wie beispielsweise der Verfahrenstechnik, dem Rohrleitungsbau, der Bautechnik, der Automatisierungstechnik und weiteren. Die in den Gewerken tätigen Akteure sind Spezialisten. Sie besitzen spezifisches Fachwissen und nutzen im Rahmen des Engineerings spezielle, auf ihre Aufgabe angepasste Beschreibungsmittel, Methoden und Werkzeuge.

Neben der fachlichen Einteilung der Gesamtplanungsaufgabe in Gewerke besteht auch eine zeitliche Aufteilung des Arbeitsprozesses. Zu diesem Zweck wird die Gesamtplanungsaufgabe, dargestellt durch Vorgehensmodelle, in einen Phasenprozess unterteilt (Abbildung 2-3). Der Beginn und das Ende einer Phase werden durch das Vorliegen von Entscheidungen oder Erreichen von Meilensteinen festgelegt [DIN28000]. Durch die Charakteristik des technischen Prozesses der Anlage wird das führende Gewerk definiert. Bei verfahrenstechnischen Anlagen ist dies die Verfahrenstechnik. Alle weiteren Gewerke (zum Beispiel Rohrleitungsplanung, Elektrotechnik, Gebäudeplanung und Automatisierungstechnik) sind dem führenden Gewerk nachgeordnet und arbeiten, wenn möglich, zeitlich parallel [Fay09].

Die Gewerke arbeiten in Aktivitäten und dokumentieren ihre erarbeiteten Ergebnisse in Engineering-Dokumenten. Die entstehende Dokumentation bildet zum einen eine Entscheidungsgrundlage zur Fortsetzung des Projektes und dient zum anderen zur Informationsweitergabe an nachgelagerte Gewerke zur Durchführung weiterer Planungsaktivitäten.

Abbildung 2-3 stellt die Projektphasen des Engineerings einer chemischen Prozessanlage dar. Der Gesamtzeitbedarf zwischen Beginn der Phase „Grundlagenermittlung“ und des Meilensteins „Gefahrenübergang“ liegt typischerweise zwischen zwei und fünf Jahren [Str02,SaKa00]. Die Kosten, die für die Planung der Anlage entstehen, belaufen sich auf ca. 15 bis 30 Prozent der Gesamtinvestitionskosten der Anlage [Web14].

Der erste Meilenstein des Phasenprozesses in Abbildung 2-3 umfasst die Investitionsentscheidung zum Bau der Anlage. Ihm gehen monetäre Bewertungen und darauf aufbauende Entscheidungen zu den Produkten, deren Mengen und den genutzten Verfahren und Technologien voraus. Zusätzlich müssen Standort- und Logistikentscheidungen getroffen werden. Die Dokumentation der Projektphasen bis zur

Investitionsentscheidung umfasst Lagepläne, Aufstellungskonzepte, Grobkostenschätzungen, Terminpläne, Genehmigungsanträge und grobe Verfahrensbeschreibungen [DIN28000].

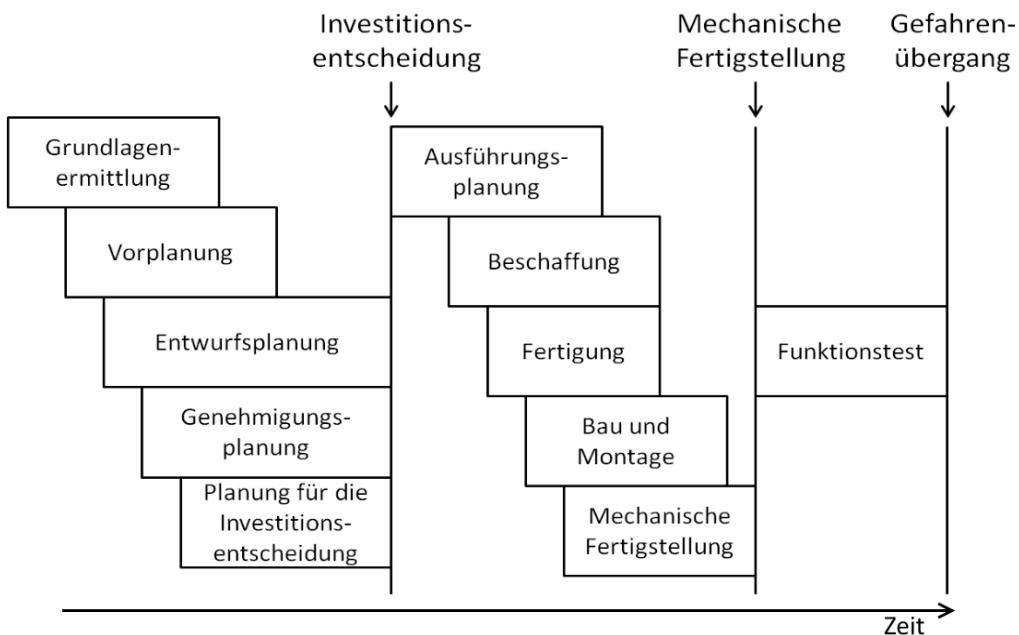


Abbildung 2-3: Projektphasen nach [DIN28000]⁴

Zentrales Dokument verfahrenstechnischer Produktionsanlagen ist das Rohrleitungs- und Instrumentierungsfließbild (R&I-FB). Es wird von den Ingenieuren der Verfahrenstechnik, gegebenenfalls unter Beteiligung des Gewerks Automatisierungstechnik, erstellt und enthält die grafische Darstellung des Aufbaus und der Funktionen einer verfahrenstechnischen Anlage oder von Teilen davon [DIN10628]. Die Anforderungen an die Prozessleittechnik sind im R&I-FB in Form von PLT-Stellen bzw. PCE-Request⁵ abgebildet. Das R&I-FB wird in der Phase der Ausführungsplanung erstellt und basiert auf früheren Verfahrensbeschreibungen des Grundfließbildes und des Verfahrensfließbildes. Alle nachgeordneten Gewerke verwenden das R&I-FB als Grundlage, um auf dieser Basis die gewerkspezifischen Planungsaktivitäten durchzuführen.

Die der Verfahrenstechnik nachgelagerten Gewerke nutzen wiederum eigene, in Phasen und Aktivitäten unterteilte Vorgehensmodelle. Für die Planungsaufgabe der Automatisierungstechnik kann zum Beispiel die Vorgehensbeschreibung des Namur Arbeitsblattes 35 (NA35) genutzt werden (Abbildung 2-4).

Dieses Arbeitsblatt "verdeutlicht den Ablauf und die Methodik der Planung eines leittechnischen Projekts" [NA35] und beschreibt damit einen effektiven Planungsablauf. Jede Einzelaktivität ist aufgeschlüsselt in die zur Bearbeitung erforderliche Information und Dokumente, die durchführende Person oder Gruppe und die dabei erstellten oder angereicherten Engineering-Dokumente.

⁴ Die Länge der Balken enthält keine Aussagen zur Dauer der Phase.

⁵ Im Folgenden sollen PLT-Stelle, PCE-Aufgabe und PCE-Request als Synonym verwendet werden.

1. Grundlagenermittlung	2. Vorplanung	3. Basisplanung	4. Ausführungsplanung	5. Errichtung	6. Inbetriebsetzung	7. Projektabschluss
1.1 Projektziele festlegen 1.2 Grobkosten schätzen	2.1 Anlagenkonzept festlegen 2.2 Kosten schätzen 2.3 Kosten kalkulieren wie 3.4	3.1 PLT-Funktionen festlegen 3.2 Verfahrenstechnische Daten beschaffen 3.3 Technische Realisierung festlegen 3.4 Kosten kalkulieren	4.1 Geräte festlegen 4.2 Zentrale Einrichtungen festlegen 4.3 Leitsystem spezifizieren 4.4 Stellenpläne erzeugen 4.5 Stellenfunktionspläne erzeugen 4.6 Montageunterlagen erstellen	5.1 Bestellung veranlassen 5.2 Lieferung bestätigen 5.3 Software konfigurieren 5.4 Montage vorbereiten 5.5 Montage überwachen 5.6 Funktion prüfen	6.1 Personal ausbilden 6.2 Inbetriebsetzung unterstützen 6.3 Dokumentation revidieren 6.4 Dokumentation übergeben	7.1 Abschlussbericht erstellen 7.2 Projektabrechnung erstellen

Abbildung 2-4: Standardstrukturprojektplan nach NA35 [NA35]

Den Einzelaktivitäten sind prozentuale Aufwände des leittechnischen Engineering-Projektes zugewiesen, die Aussagen zum Arbeitsaufkommen der jeweiligen Person oder Gruppe enthalten. Diese Aufteilung des Gesamtaufwandes ist in Abbildung 2-5 dargestellt.

1. Grundlagenermittlung	1.1 Projektziele festlegen 1.2 Grobkosten schätzen	1 % <hr/> 1 %	5. Errichtung	5.1 Bestellung veranlassen 5.2 Lieferung bestätigen 5.3 Software konfigurieren 5.4 Montage vorbereiten 5.5 Montage überwachen 5.6 Funktion prüfen	2 % <hr/> 1 % 10 % 1 % 4 % 6 %
2. Vorplanung	2.1 Anlagenkonzept festlegen 2.2 Kosten schätzen	6 % <hr/> 6 %	6. Inbetriebsetzung	6.1 Personal ausbilden 6.2 Inbetriebsetzung unterstützen 6.3 Dokumentation revidieren 6.4 Dokumentation übergeben	1 % 1 % 2 % - <hr/> 4 %
3. Basisplanung	3.1 PLT-Funktionen festlegen 3.2 Verfahrenstechnische Daten beschaffen 3.3 Technische Realisierung festlegen 3.4 Kosten kalkulieren	10 % 5 % 3 % <hr/> 19 %	7. Projektabschluss	7.1 Abschlussbericht erstellen 7.2 Projektabrechnung erstellen	- <hr/> 1 %
4. Ausführungsplanung	4.1 Geräte festlegen 4.2 Zentrale Einrichtungen festlegen 4.3 Leitsystem spezifizieren 4.4 Stellenpläne erzeugen 4.5 Stellenfunktionspläne erzeugen 4.6 Montageunterlagen erstellen	5 % 8 % 5 % 8 % 10 % <hr/> 45 %			

Abbildung 2-5: Aufwände für die Projektierung der Phasen [NA35]

Auf Grund des zeitlichen Drucks während der Projektierung einer Anlage arbeiten die Gewerke parallel, um die Projektdauer zu verringern. Wo jedoch inhaltlich auf den Ergebnissen Anderer aufgebaut wird, werden die Arbeiten sequentiell durchgeführt [Fay09]. Erhöht man den zeitlichen Druck weiter, werden selbst die sequentiell geplanten Phasen parallelisiert, was zur Folge hat, dass die Planungsaktivitäten der Ingenieure auf Annahmen sowie vorläufigen und teilweise lückenhaften Ergebnissen aufbauen. Nach Eintreffen ergänzender oder korrigierender Information sind die Ingenieure gezwungen, ihre

Annahmen und die darauf aufgebauten eigenen Planungsergebnisse iterativ zu überarbeiten [KAB02]. Der dadurch zusätzlich entstehende Aufwand ist zunächst kleiner als die durch die Überlappung eingesparte Zeit, kann jedoch im Verhältnis stärker ansteigen. Ab einer gewissen Grenze kann die Parallelisierung eine gegenteilige Wirkung haben und die Projektlaufzeit sogar verlängern [HSJ13].

2.3.3. Abgrenzung des Anlagen-Engineerings von der Produktentwicklung

Die Verbesserung vorhandener und Erarbeitung neuer Produkte wird unter der Produktentwicklung subsummiert [PBF06]. Legt man diese makroskopische Definition zu Grunde, besteht kein Unterschied zwischen einem Auto und einer automatisierten Produktionsanlage. So macht Göpfert bei der Beschreibung der Produktarchitektur keine Unterschiede und stellt Produkt und Produktionsanlage gleich [Goe09]. Auch Weilkins summiert unter dem Systembegriff und den davon abgeleiteten Planungs- und Erstellungsprozessen sowohl ein Auto als auch große reale Systeme, wie zum Beispiel Luftverkehrssysteme [Wei08].



Abbildung 2-6: Gründe für die Entwicklung von Produkten [Eng06]

Doch bei genauerer Betrachtung fallen Unterschiede auf. Eine automatisierte Produktionsanlage ist gekennzeichnet durch ihre Einmaligkeit. So wird beim Anlagen-Engineering die Anlage im Auftrag eines bekannten Kunden (Auftraggeber) in Form eines Projektes von einem Auftragnehmer geplant und realisiert [Fay09]. Der Auftraggeber ist

somit fest in das Engineering eingebunden [KFJ96]. Die Notwendigkeit zur Entwicklung eines Produktes entsteht hingegen durch Veränderungen, die im Unternehmen und/oder am Markt identifiziert werden. Darüber hinaus erfasst Engeln Veränderungen, die durch neue Anforderungen oder neue Technologien verursacht werden [Eng06]. Ehrlenspiel fasst die dafür erforderlichen Aktivitäten in einer Markt- und Mitbewerberanalyse zusammen [EhMe13] (vgl. Abbildung 2-6). Pahl und Beitz sehen diese Aufgabe bei einer besonderen Gruppe der Unternehmensleitung und unterscheiden zwischen den Treibern: Produkt und Markt [PBF06].

Es besteht somit bei der Produktentwicklung meist kein klares Auftragsverhältnis zwischen einem Auftragnehmer und einem Auftraggeber, der die Anforderungen an das Produkt formuliert [KFJ96]. Vielmehr müssen bei der Produktentwicklung die Anforderungen an das Produkt während des Entwicklungsprozesses selbst durch Findung und Analyse potentieller zukünftiger Nutzer des Produktes identifiziert werden. Dieses Finden ist darum fester Bestandteil der Aktivitäten während der Produktentwicklung, bei der eine Vielzahl von Kreativtechniken angewandt wird [Eng06]. Durch die geplante Anzahl herzustellender Entitäten können die im Rahmen der Entwicklung angefallenen Kosten entsprechend umgelegt werden. Dies rechtfertigt umfangreiche qualitätssichernde Maßnahmen, wie Simulationen und Bau von Prototypen, welche typischerweise im Anlagen-Engineering aus Kosten- und Aufwandsgründen nicht möglich sind.

Die folgende Tabelle fasst die Unterschiede zwischen Produktentwicklung und Anlagen-Engineering zusammen.

Tabelle 2-1: Gegenüberstellung von Produktentwicklung und Anlagen-Engineering

Aspekt	Produktentwicklung	Anlagen-Engineering
Anzahl der hergestellten Entitäten	>100 (typisch)	1
Preis pro Entität	Niedrig bis Mittel	Hoch
Fertigungscharakter	Serienfertigung möglich	Einzelfertigung
Kunde	Kundenorientiert	Kundenintegriert
Anforderungsdefinition	Unbekannte Nutzer - Anforderungsdefinition durch Kreativtechniken	Ein bekannter Auftraggeber - per Ausschreibung / Lasten- / Pflichtenheft
Absatz	Ungewiss	Gewiss
Anteil der Kosten für Planung vom Endpreis	Klein durch Umlage der Kosten auf die antizierte Verkaufsmenge	Hoch, bis zu 50% [DiFa13]
Erstellung	Durch den entwickelten Produktionsprozess fortlaufend	Während des Engineering-Prozesses

Aspekt	Produktentwicklung	Anlagen-Engineering
Lebenszyklus	Einführung - Wachstum - Reife - Sättigung - Degeneration	Planung - Errichtung - Inbetriebnahme - Betrieb - Außerbetriebnahme - Demontage

Die dargestellten Unterschiede zwischen Produktentwicklung und Anlagen-Engineering werden bei der Beschreibung der Aktivitäten im Modul-Engineering genutzt.

2.4. Ansätze zur Verbesserung des Engineerings

Bei der Realisierung heutiger industrieller automatisierter Produktionsanlagen ist die funktionsbezogene Arbeitsteilung mit vielen Menschen über einen längeren Zeitraum die Regel [Sch99]. Dem Austausch von Informationen zwischen den beteiligten Akteuren und den von ihnen genutzten Werkzeugen kommt dabei eine große Bedeutung zu. Engineering stellt somit eine Wertschöpfungskette mit vielen verwobenen Aktivitäten dar. In diesem Prozess verfügen die beteiligten Akteure über unterschiedliche Ausbildungen und Denkmuster. [DMS14]

Da die Akteure während des Engineerings unter einem starken Kosten- und Zeitdruck arbeiten, setzen Verbesserungen oftmals bei der Durchführungseffizienz des Engineerings an [DMS14]. Betrachtet man jedes Gewerk für sich, besteht ein erster Ansatz darin, die gewerkspezifisch durchgeführten Aktivitäten effizienter zu gestalten. Dies hat eine Verkürzung der gewerkspezifischen Phasen zur Folge.

Andere Verbesserungsansätze fokussieren auf die Schnittstellen zwischen den Gewerken. Hier kommt es oft zu Zeit- und Informationsverlusten [FBW13] bei der Weitergabe und Aufbereitung.

Schnieder hat zur Verbesserung des Engineerings das sogenannte BMW-Prinzip formuliert [Sch99]. Ziel dieses Prinzips ist es, das Engineering, also die systematische Vorgehensweise der Systementwicklung, durch die Verwendung von Beschreibungsmitteln, Methoden und Werkzeugen zu unterstützen. Werkzeuge, zum Beispiel Computer Aided Engineering-Werkzeuge (CAE), beziehen sich auf bestimmte Beschreibungsmittel, zum Beispiel Dateiformate, und verkörpern die technische Umsetzung von Methoden [Sch99]. Für die effiziente und effektive Nutzung von Beschreibungsmitteln, Methoden und Werkzeugen bedarf es allerdings:

- der Entwicklung von Modellen zur Abbildung von Informationen über Produkte, Prozesse und Ressourcen,
- der Analyse von Prozessen während des Engineerings und im Betrieb von Produktionsanlagen,

- der Entwicklung von Methoden zur Planung und Realisierung von Produktionsanlagen und
- des Entwurfs von Systemstrukturen mit wiederverwendbaren Einheiten zur Verringerung des projektbezogenen Engineering-Aufwands. [Fay13]

Die VDI 3695 ergänzt diese Aufzählung noch um die Aufbauorganisation (personelle und administrative Themenfelder) und die Ökonomie. [VDI3695]

Im Folgenden soll auf die vier erforderlichen Aspekte zur Verbesserung des Engineerings eingegangen werden: Entwicklung von Modellen (→2.4.1), Analyse von Prozessen (→2.4.2), Entwicklung von Methoden (→2.4.3) und Entwurf von Systemstrukturen (→2.4.4).

2.4.1. Entwicklung von Modellen

Modelle bilden die Basis zur Darstellung von Informationen über einen Betrachtungsgegenstand. Unabhängig davon, ob es sich beim Betrachtungsgegenstand um ein vorhandenes Original (deskriptives Modell) oder ein geplantes Objekt (präskriptives Modell) handelt, bilden Modelle die Realität immer in vereinfachter und abstrakter Form ab [LaGo99].

Bei der Modellbildung werden gezielt Informationen des realen Betrachtungsgegenstandes vernachlässigt. Dadurch wird die Komplexität bewusst reduziert. Gleichzeitig sind die eigentlichen Tätigkeiten, die während der Modellbildung durchzuführen sind, auch ein Mittel zur Schaffung einer gewissen gedanklichen Ordnung und Strukturierung des Betrachtungsgegenstandes [ASS97]. Ein möglicher Betrachtungsgegenstand ist zum Beispiel der Arbeitsablauf einer oder auch mehrerer Personen. Das dabei entstehende Modell wird Vorgehensmodell bezeichnet und dient u.a. dazu, die beteiligten Personen und deren Tätigkeiten zu koordinieren. Zu diesem Zweck wird das betrachtete Vorgehen in einzelne, logisch abgrenzbare Abschnitte unterteilt [Lin09].

Im Engineering kommen Modelle u.a. im Bereich der Daten-, Verhaltens- Struktur- und Vorgehensmodelle zum Einsatz. Datenmodelle werden in diesem Zusammenhang genutzt, um Daten und Informationen in einer von Computern les- und auswertbaren Struktur zugängig zu machen. Datenmodelle können somit Struktur-, Vorgehens- und Verhaltensmodelle computerlesbar zur Verfügung stellen. Da die Menge der heutzutage anfallenden Daten immer mehr zunimmt, ist der Einsatz von CAD- und CAE-Software in heutigen Engineering-Prozessen nicht mehr wegzudenken [BaMa03].

Ein entscheidender Punkt beim Einsatz von Datenmodellen zum Austausch von Daten und Informationen zwischen verschiedenen CAD- und CAE-Softwarewerkzeugen ist das Vorliegen entsprechender Schnittstellen. Da die Information in Datenmodellen durch Nutzung von Syntax (Struktur) und Semantik (Bedeutung) abgelegt ist, muss die Schnittstelle einer CAE-Software zum Generieren oder Einlesen eines Datenmodells eben diese Syntax und Semantik

auswerten können – die Schnittstelle dieser Software muss auf dieses Datenformat vorbereitet sein. Somit besteht immer eine direkte Beziehung zwischen Datenmodell und Schnittstelle.

Ein bekanntes Datenmodell im Engineering automatisierter Anlagen ist beispielsweise das PlantXML-Format, welches von Degussa zur Harmonisierung der eingesetzten CAE-Landschaft entwickelt wurde. Ein weiteres Datenmodell für das Engineering automatisierter Anlagen wird in der ISO-Norm 15926 definiert [ISO15926]. Es handelt sich dabei um eine Weiterentwicklung des STEP-Formates [ISO10303]. Die ISO15926 wird aktuell prototypisch von mehreren CAE-Werkzeugen der Verfahrenstechnik (AVEVAs Plant, Intergraphs SmartPlant oder Bentleys OpenPlant) unterstützt.

Ein Beispiel für den dateibasierten Datenaustausch zwischen CAE-Werkzeugen für das Gewerk Automatisierungstechnik stellt die auf CAEX (Computer Aided Engineering Exchange) basierende Automation Markup Language (AML) [DIN62714] dar. AML kann in XML modelliert werden und stellt mit den Bestandteilen CAEX, PLCoopenXML und Collada ein neutrales Datenmodell dar. Somit können z.B. R&I-Fließbilder in CAEX modelliert werden [Ulr09]. Elemente des Fließbildes können durch Verhaltensinformation, modelliert in z.B. PLCoopenXML, ergänzt werden.

Vorgehensmodelle legen einen standardisierten organisatorischen Rahmen für den idealen Ablauf eines Entwicklungsprojektes in Form einer Beschreibung der zu erstellenden Produkte, der durchzuführenden Aktivitäten und der zu besetzenden Rollen fest [Gna05]. Ein Vorgehensmodell ist damit ein Modell beziehungsweise eine Abstraktion einer möglichen Vorgehensweise eines konkreten Projekts. Dadurch kann zum einen ein Handlungsmuster als durchzuführende Aktivität eines Prozesses abgebildet werden und zum anderen kann ein Anwender eines Vorgehensmodells prüfen, an welcher Stelle er sich in einem Prozess befindet und welche Aktivitäten als nächstes durchzuführen sind [PoLi08].

Bekannte Vorgehensmodelle sind zum Beispiel das in der [VDI2206] beschriebene V-Modell als Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, das Wasserfallmodell, mit dem stark sequentielle Prozesse abgebildet werden können und domänen spezifische Modelle, wie das der NA35 [NA35], welches das Vorgehen bei der Durchführung von PLT-Projekten darstellt. Ein weiterer Typus eines Vorgehensmodells, welches speziell in den aktuellen Entwicklungsprozessen der Softwarebranche eingesetzt wird, lässt sich unter dem Oberbegriff des agilen Verfahrens zusammenfassen. Dort ist das SCRUM-Verfahren mit User-Stories eines der Bekannteren.

Strukturmodelle sind Hilfsmittel um Ordnungs- und Funktionsprinzipien in Systemen zu erkennen und zu beschreiben [Dan03]. Strukturmodelle können zusätzlich in formale und reale Modelle unterteilt werden. Ein reales Strukturmodell beschreibt schon vorhandene, u.U. noch geplante aber aus bekannten Entitäten bestehende, Systeme. Beispiele für ein

reales Strukturmodell ist das Entity-Relation-Model. Sind die Strukturen eines Systems noch nicht bekannt, können zur Erlangung dieser, oder zur Schaffung neuer Systeme, formale Strukturmodelle genutzt werden [Dan03]. Dabei wird von der Vorstellung eines bestimmten Ordnungsgefüges ausgegangen und darauf ein entsprechendes formales Strukturmodell angewandt. Anschließend erfolgt eine Überprüfung, ob dadurch eine zweckmäßige Untergliederung des Systems vorgenommen werden kann. Formale Strukturmodelle sind zum Beispiel Stern-, Kreis-, Ketten-, und Baumstrukturen. Die Abbildung dieser Strukturmodelle erfolgt meist mit Hilfe von Graphen [Dan03].

Verhaltensmodelle modellieren das zeitliche und dynamische Verhalten eines Systems um damit einzelne Ereignisse und Zustandsänderungen lokalisieren zu können [Dan03]. Beispiele für Verhaltensmodelle sind Zustandsautomaten und Petri-Netze. Ein Verhaltensmodell, welches während des Engineerings automatisierter Produktionsanlagen genutzt wird, ist die formalisierte Prozessbeschreibung [VDI3682].

2.4.2. Analyse von Prozessen

Um den Verlauf eines Prozesses optimieren zu können, muss der zu Grunde liegende Prozess zunächst verstanden werden. Dazu müssen zunächst die existierenden Wirkbeziehungen zwischen Vorgängen, Tätigkeiten, Akteuren und/oder Objekten, die bei der Durchführung des Prozesses beteiligt sind, erkannt, abgegrenzt und bewertet werden. Wird daraufhin ein Mangel oder Verbesserungspotential erkannt, können entsprechende Methoden und Modelle erarbeitet bzw. angepasst werden, um den analysierten Prozess zu optimieren.

Hady unterscheidet einen Prozess in technische und operative Geschäftsprozesse [Had13]. Eine Darstellung des technischen Geschäftsprozesses, der die Phasen während des Engineerings einer Produktionsanlage umfasst, und des operativen Geschäftsprozesses (Businessprozess) zur Auftragsabwicklung des produzierten Gutes ist in Abbildung 2-7 dargestellt.

Libuda unterteilt ebenfalls in diese Kategorien und benennt darüber hinaus Eigenschaften in denen sich ein Engineering-Prozess vom operativen Businessprozess unterscheidet [LGH11]. Demnach ist ein Engineering-Prozess im Vergleich zu einem Geschäftsprozess gekennzeichnet durch:

- die höhere Datenzentriertheit,
- den Start von Aktivitäten auch mit unvollständigen Daten,
- die große Anzahl von Aktivitäten,
- das Auftreten ungeplanter Iterationen,
- das Vorhandensein paralleler Zugriffe auf Daten und Informationen und
- die Verknüpfung mit einer Vielzahl von externen Werkzeugen. [LGH11]

Gutermuth ergänzt die obigen Punkte um die Eigenschaft, dass beim operativen Businessprozess eher Ja/Nein-Entscheidungen im Vordergrund stehen, während bei Engineering-Prozessen in der Regel zwischen mehreren, alternativen Projektpfaden unterschieden werden muss [GCB15].

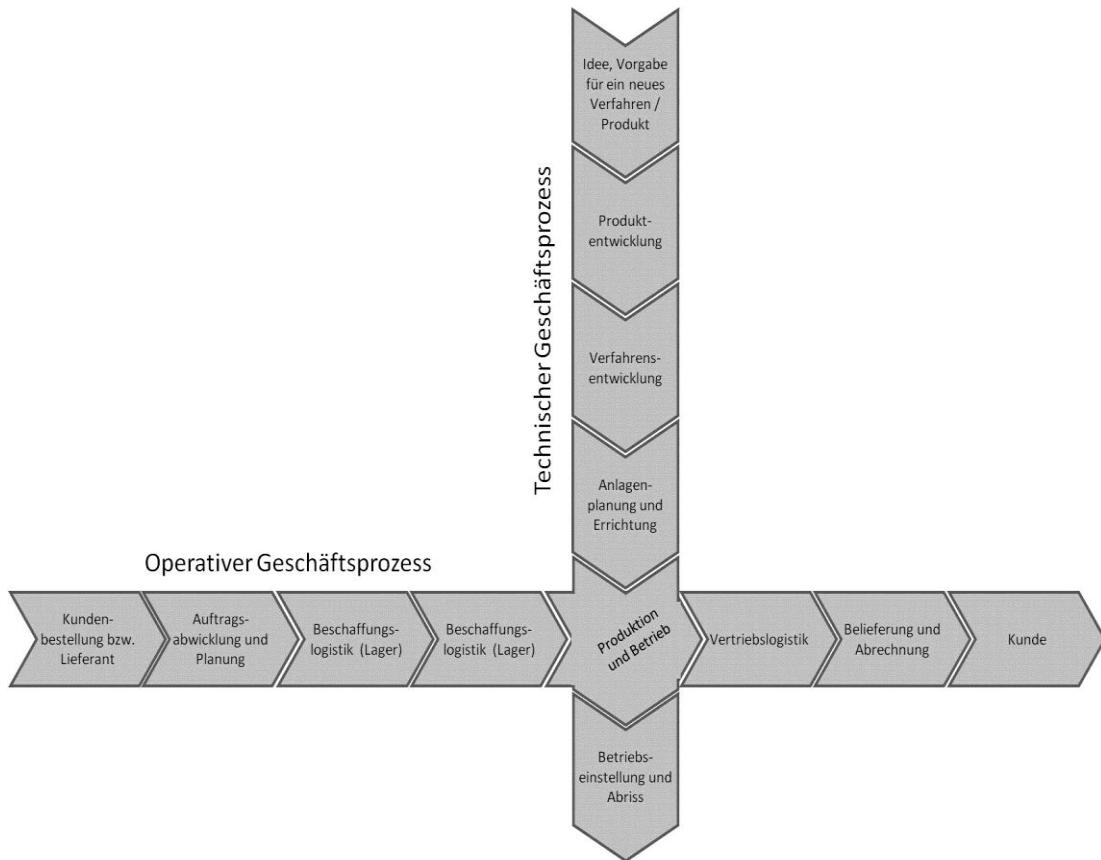


Abbildung 2-7: Technischer (vertikal) und operativer (horizontal) Geschäftsprozess in Unternehmen der Prozessindustrie [Had13]

Der in der Anlage ablaufende technische Prozess wird im Allgemeinen Produktionsprozess genannt. Unter dem Produktionsprozess wird die Folge von chemischen, physikalischen oder biologischen Aktivitäten für die Umwandlung, den Transport oder die Speicherung von Stoff oder Energie verstanden [DIN61512]. Eine weitere, zusätzliche Einordnung des Produktionsprozesses hängt von der Art des Stoffausstoßes ab. Sollte der Stoffausstoß zeitlich unabhängig sein, so handelt es sich um einen kontinuierlichen Prozess. Lässt sich eine endliche Anzahl einzelner Stücke beobachten, wird von Stückfertigung gesprochen. Wenn der Stoffausstoß zeit- und mengenabhängig erfolgt, liegt ein Chargenprozess vor. [DIN61512]

2.4.3. Entwicklung von Methoden

Ein weiterer Ansatzpunkt für die Verbesserung des Engineerings ist die systematische Nutzung von Methoden. Unter dem Begriff Methode wird ein planmäßiges Vorgehen mit konkreten Handlungsanweisungen zur Erlangung von Erkenntnissen oder praktischen Ergebnissen verstanden [PBF06]. Hervorzuheben ist dabei das Vorhandensein eines Planes,

also eines definierten heuristisch-empirischen Regelsystems [Sch99]. Hat man also während der Analyse des Prozesses mit den verwendeten Modellen einen Mangel oder ein Verbesserungspotential festgestellt, können daraufhin eine oder mehrere Methoden entwickelt oder bekannte Methoden angewandt werden, die den Mangel beseitigen oder das Verbesserungspotential heben. Eine Methode kann somit die Anwendung von Modellen einbeziehen, wie beispielsweise die systematische Nutzung eines Vorgehensmodells. Weitere Methoden sind zum Beispiel die automatische Abarbeitung von zuvor manuellen Tätigkeiten durch automatisierte Codegenerierung unter Zuhilfenahme von Struktur- und Verhaltensmodellen oder die Verwendung von wissens- oder fallbasierten Systemen als Expertensysteme mit Werkzeugunterstützung.

2.4.4. Entwurf von Systemstrukturen

Der Entwurf von Systemstrukturen mit einem hohen Maß an Wiederverwendung ist ebenfalls ein Ansatz zur Verbesserung des Engineerings. Dazu wird das Engineering in einen projektabhängigen und einen projektunabhängigen Engineering-Anteil aufgeteilt [VDI3695]. Der Bezug zwischen projektunabhängigen und projektbezogenen Tätigkeiten ist in Abbildung 2-8 dargestellt. Das obere Vorgehensmodell der projektunabhängigen Tätigkeiten beschreibt im Wesentlichen die Spezifikation von wiederverwendbaren Artefakten und Spezifikationen, welche durch Anforderungen sowohl aus schon durchgeführten Projekten als auch durch strategische Rahmenbedingungen beeinflusst werden.

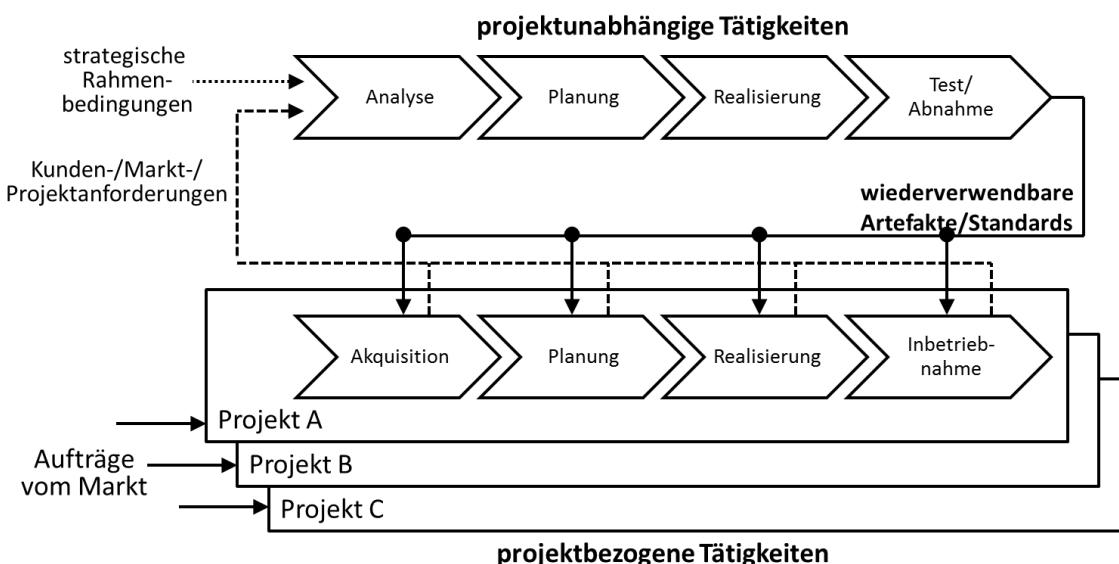


Abbildung 2-8: Wechselwirkung zwischen projektunabhängigen und projektbezogenen Tätigkeiten [VDI3695]

Um das Engineering eines Systems aufzuteilen, muss die Systemstruktur des betrachteten Produktionssystems dies ermöglichen und unterstützen. Unter Systemstruktur wird hier die Wirkstruktur verstanden, die die zur Realisierung der funktionalen Anforderungen an das System gewählten Wirkprinzipien und Lösungselemente enthält [PBF06].

Die automatisierte Produktionsanlage soll demnach so entworfen werden, dass die Tätigkeiten und Vorgänge, die während des projektabhängigen Engineerings durchzuführen sind, durch Nutzung von wiederverwendbaren Lösungen verkürzt bzw. gänzlich entfallen können. Zweck dieser Strukturierung ist es, die entsprechenden, im Rahmen des Engineerings anfallenden Tätigkeiten bereits vor der Auftragserteilung auszuführen, um nach Auftragserteilung eine schnellere Projektabwicklung zu ermöglichen.

Die Wiederverwendung von Lösungen wird je nach Motivation, Anwendungsgebiet und Durchführung unterschiedlich vollzogen. Maymir-Durcharme [May97] unterscheidet fünf Arten der Wiederverwendung, die auch bei Maga [Maga12] leicht verändert wiederzufinden sind:

Ad-hoc-Wiederverwendung: unsystematische Wiederverwendung unter Verwendung von früheren Arbeitsergebnissen aus abgeschlossenen Projekten einzelner Entwickler.

Opportunistische Wiederverwendung: unsystematische Wiederverwendung innerhalb einzelner Projekte unter Verwendung selektierter wiederverwendbarer Artefakte aus Bibliotheken.

Systematische Wiederverwendung: von Beginn an auf Betrachtung mehrerer Projekte ausgerichtet. Variabilitäten und Ähnlichkeiten zwischen Projekten werden systematisch erfasst und benutzt, wiederverwendbare Artefakte werden identifiziert oder neu entwickelt.

Produktlinien-basierte Wiederverwendung: systematische Wiederverwendung, jedoch unter Berücksichtigung zusätzlicher, auch strategischer Geschäftsentscheidungen und Marktanalysen, um passende Artefakte zu erstellen.

Hybride Wiederverwendung: Mischformen der oben genannten Ansätze.

Griss [Gri03] beschreibt darüber hinaus vier Fälle, wie Wiederverwendung in Unternehmen gestaltet werden kann:

Ad hoc Reuse, bei dem die Entwickler selbst eigene Lösungen suchen und sich ggf. mit Kollegen austauschen;

Facilitated Reuse, bei der die Organisation zur Wiederverwendung ermutigt und diese in begrenztem Maße auch unterstützt;

Managed Reuse, bei dem die Organisation Wiederverwendung durch Richtlinien, Reviews und Metriken fördert;

Designed Reuse, bei dem die Organisation in die Erstellung von wiederverwendbaren Lösungen vorab investiert.

Die Wiederverwendung von bereits existierenden und projektunabhängigen Engineering-Ergebnissen stellt in der Prozessindustrie eine gängige Praxis dar. Dabei werden Ergebnisse aus erfolgreich abgeschlossenen Projekten genutzt und so durch Adaptierung in neuen Anwendungsfällen wiederverwendet. Die Wiederverwendung ist allerdings sehr stark von der Erfahrung sowie den persönlichen Fähigkeiten der einzelnen Ingenieure abhängig [Had13]. Klar ist, dass aus dieser eher unsystematischen Herangehensweise eine Vielzahl von negativen Auswirkungen für die Effektivität des Engineerings resultieren kann [Fay09]. Ein

systematischer Ansatz zur Durchführung der Wiederverwendung kann Schröck [SZF14] entnommen werden. Schröck stellt darin ein Konzept einer gewerkübergreifenden Wiederverwendung auf Basis der zu bearbeitenden technischen Funktion vor.

Eine Wiederverwendung auf physikalischer Ebene stellt die Nutzung von Package Units (PU) in der chemisch-pharmazeutischen Industrie dar. PU sind Anlagenteile, die für sich funktionsfähig sind und Lieferungen und Leistungen verschiedener Gewerke aus einer Hand einbeziehen [NA63]. Sie werden zumeist in Standardgrößen und vorkonfektionierten Ausführungen angeboten [NA63]. In Produktionsanlagen oft eingesetzte PU sind beispielsweise Stickstoffkompressoren, Dampferzeuger und Zentrifugen [NA63]. Eine Übersicht über typische Hersteller und deren PU-Lösungen kann zum Beispiel [Ste15] entnommen werden. Da die PU bei verschiedenen Kunden zum Einsatz kommt, kann der PU-Hersteller auf umfangreiche Betriebs- und Stördaten zurückgreifen. Er hat damit die Möglichkeit die von ihm angebotene PU iterativ weiter zu verbessern. So entstehen Lösungen mit erprobter Technik.

Der PU-Hersteller kann darüber hinaus seine PU im Verhältnis zur projektabhängigen Lösung meist günstiger anbieten. Den niedrigeren Preis erreicht er durch Umlage der Kosten für Forschung und Entwicklung auf eine größere verkaufte Stückzahl. Bei PU wurde somit der Schritt vom Anlagen-Engineering zur Produktentwicklung (→ 2.3.3) vollzogen.

Nach NA63 sollen die baulichen und funktionalen Grenzen einer PU so klar wie möglich sein [NA63], um eine möglichst einfache Integration der PU in die Produktionsanlage des Kunden zu ermöglichen. Für eine reibungslose Integration der PU soll diese mit einfachen und übersichtlichen Schnittstellen ausgestattet sein. Die Schnittstellen einer PU sind in Abbildung 2-9 dargestellt. Sie können durch die gewählte Abgrenzung, den Aufstellungsort und die Anforderungen des Betreibers beeinflusst werden. Schnittstelle 1 stellt die Verbindung zu PNK außerhalb der PU dar. Wenn die PU nicht im stand-alone-Betrieb gefahren wird, werden die Zustände und Prozesswerte der PU an eine zentrale Anzeige- und Bedienfunktion übermittelt (Schnittstelle 2), zusätzlich kann auf die Automatisierungseinrichtung der PU über die Schnittstelle 3 zugegriffen werden. Die Schnittstellen 4 und 5 bzw. 6 und 7 dienen zur Ansteuerung bzw. Versorgung von PU-eigenen Aktoren mit erforderlicher Hilfsenergie.

Die Zusammenstellung von Teilanlagen oder ganzen Anlagen aus mehreren PU wurde innerhalb der NA63 nicht betrachtet. Hier ergibt sich ein möglicher Anwendungsfall für die Wiederverwendung im Kontext modularer Anlagen. Der Übergang von einer PU zu einem Modul ist allerdings fließend und kann nicht an einem spezifischen Merkmal ausgemacht werden. Dies wird an den oben abgebildeten Schnittstellen deutlich. Sie unterscheiden sich von denen, die auch bei Modulen gefordert werden, nur in der technischen Umsetzung [NE148].

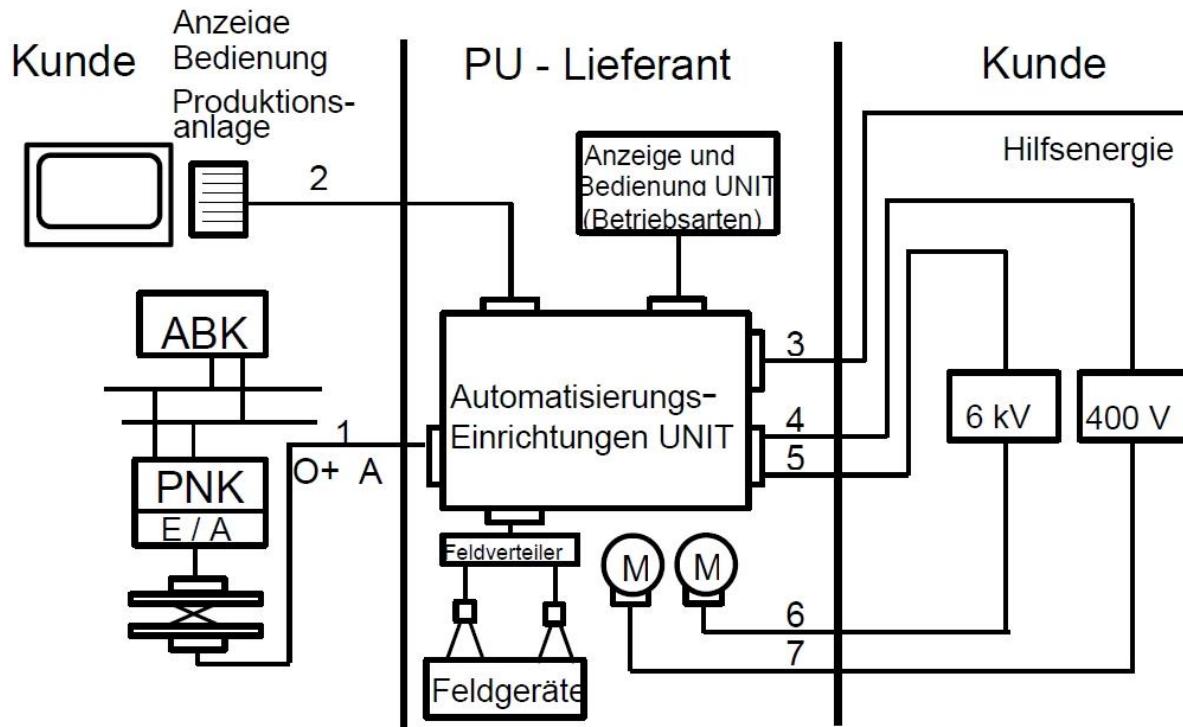


Abbildung 2-9: Abgrenzung einer Package Unit im PLT-Verbindungsschema [NA63]

Auf eine vertiefende Betrachtung modularer Anlagen soll an dieser Stelle der Arbeit verzichtet werden, da dies Schwerpunkt des Kapitels 3 ist.

2.5. Zwischenfazit

Das Engineering von automatisierten Produktionsanlagen ist eine komplexe Aufgabe, da die Zahl der zu betrachtenden Entitäten, beteiligten Personen und Organisationen und deren Verknüpfung und Interaktion untereinander groß ist. Zur Verbesserung des Engineering wurden vier Aspekte vertiefend betrachtet.

Die Analyse von Prozessen und die darauf aufbauende Entwicklung von Methoden und Modellen setzen beim Engineering-Prozess an. Dabei werden die Phasen, Aktivitäten und Gewerke und deren "Verquickung" untereinander [Sch99], sowohl in einer zeitlichen als auch inhaltlichen Beziehung zu einander, fokussiert. Eine Optimierung unter Zuhilfenahme der Entwicklung von Methoden und Modellen hat somit eine inhaltliche Glättung und eine damit verbundene Anpassung der Schnittstellen zwischen den Gewerken zum Ziel und untersucht und optimiert darüber hinaus die gewerkspezifischen Aktivitäten. Dies führt im Idealfall zu einer vollständigen Parallelisierung der gewerkspezifischen Tätigkeiten, um damit das Engineering maximal effizient und effektiv zu gestalten. Das Ziel ist somit, ein Simultaneous-Engineering (SE) bzw. Concurrent-Engineering (CE) zu erreichen, wodurch die sequentielle und gewerkbezogene Phasenstruktur aufgelöst [EhMe13] [DDK03] und die

Parallelisierung der Arbeitsaktivitäten (SE) sowie die Integration dieser parallelen Aktivitäten in Bearbeitungsteams (CE) in den Vordergrund gestellt werden [Kla03].

Die obigen Ansätze, die sich auf die Phasen und Tätigkeiten beteiligter Akteure des Engineerings fokussieren, beinhalten eine Systemstruktur der automatisierten Produktionsanlage. Damit ist eine Effizienzsteigerung durch die Nutzung von zum Beispiel Skaleneffekten, wie sie bei der Produktentwicklung zu finden sind, nicht möglich. Kosten und Aufwand für qualitätssichernde Maßnahmen, wie zum Beispiel für die Erstellung eines Prototyps, sind bei der reinen Betrachtung des zeitlichen Ablaufs und der inhaltlichen Ausgestaltung der Engineering-Tätigkeiten ebenfalls nur schwer realisierbar.

Erweitert man hingegen den "Werkzeugkasten" um die Betrachtung der Systemstruktur, ermöglicht man die ganzheitliche Betrachtung des zu entwickelnden Systems. Das Ziel besteht dann darin, die Struktur des Systems so zu verändern, dass projektbezogene Aufgaben beispielsweise durch Methoden der Wiederverwendung verringert werden. Dazu ist es notwendig, einige Engineering-Aufgaben in einen projektunabhängigen Anteil auszugliedern. Für diese Überführung wiederum ist die Entwicklung und Anwendung geeigneter Beschreibungsmittel, Methoden und Werkzeuge notwendig, um sie zum Beispiel durch Nutzung von Wiederverwendungsansätzen, Methoden und Konzepten der Produktentwicklung (vgl. Tabelle 2-1) auch im Anlagen-Engineering anzuwenden. Einen solchen Ansatz stellt die Anwendung modularer Anlagenstrukturen dar.

Die Verwendung von Modulen ermöglicht einen erhöhten Standardisierungsgrad. Module als Anlageteile vollziehen somit die Transformation von einer (Teil)-Anlage zu einem Produkt und machen somit Entwicklungsmethoden, wie sie aus der Produktentwicklung bekannt sind, zum Beispiel die der VDI 2221 [VDI2221], möglich. Denkbar sind auch die Methoden des Baukastenprinzips oder der Produktlinienentwicklung, bei der durch Kombination vorgefertigter, projektunabhängiger Lösungen in einem wenig aufwändigen Prozess eine hohe Anzahl von Produktvarianten erstellt werden. [Sch97]. Die für die Schaffung der projektunabhängigen Lösungen anfallenden Kosten können - für den Anlagenbau ursprünglich untypisch [HSJ13] - erstmalig auf mehrere Entitäten umgelegt werden.

Das Verständnis von modularen Anlagen und eine Eingrenzung des Anwendungsfeldes modularer Anlagen in der chemisch-pharmazeutischen Industrie ist Inhalt des folgenden Kapitels.

3. Modulare Produktionsanlagen

Bevor auf die Herausforderungen für das Engineering eingegangen wird, die sich aus modularen verfahrenstechnischen Produktionsanlagen ergeben, soll im Folgenden der Begriff der Modularität zunächst näher erläutert werden. Daraus werden anschließend die Vorteile der Nutzung modularer Strukturen im Bereich automatisierter Produktionsanlagen abgeleitet.

3.1. Die Auffassung von Modularität

Die Modularisierung eines Systems ist sowohl im akademischen als auch industriellen Umfeld eine weitverbreitete Methode um verschiedene Ziele zu erreichen. Speziell bei Entwicklungen in der Computer- und Softwareindustrie hat Modularisierung den Erfolgsweg entscheidend gegeben, wie am Beispiel der objektorientierten Programmierung deutlich wird [Kay93]. Trotz dieser und anderer Erfolgsgeschichten ist eine einheitliche und konsistente Definition von Modularisierung nicht zu finden [Mil01].

Die Nutzung der Begriffe Modul, modular und Modularisierung unterscheiden sich in der technischen Literatur und der Entwicklungspraxis. Verschiedene Anwendungsdomänen haben dabei oft ihr eigenes Verständnis von Modularisierung entwickelt [Mil01]. So wird in der Architektur Modularität im Zusammenhang mit standardisierten Komponenten genutzt, mit denen ein Bauwerk konstruiert und gebaut werden kann, wie beispielsweise Containerbauten. In der Produktfertigung verweist Modularität hingegen auf die Austauschbarkeit von Teilen, um verschiedene Produktvarianten erzeugen zu können [UITu91].

Darüber hinaus unterteilt sich der Grundbegriff des Moduls selbst. Eversheim und Ulrich, jeweils Vertreter der Fertigungsindustrie, verstehen unter einem Modul ein physikalisches Gebilde ähnlich einer Baugruppe [ESG96][UITu91]. Dabei steht das Gleichsetzen der funktionalen Gestaltung des Moduls mit dem zur Verfügung stehenden Bauraum im Vordergrund. In der Softwareentwicklung oder in der Modellierung von Geschäftsprozessen wird ein weitaus abstrakterer Modulbegriff verwendet. Hier steht die logische Kapselung im Fokus, mit der es möglich ist, Informationen zu verbergen und durch Wiederverwendung und Austauschbarkeit einen Zweckverbund von Modulen als Instanzen zu ermöglichen [ADS11]. Baldwin und Clark [BaCl98] sehen in diesem Zusammenhang Modularisierung als Konzept an, mit dem mehrere Ziele erreicht werden können:

- Verringerung der Komplexität,
- Erhöhung der Innovationsgeschwindigkeit durch Spezialisierung,
- Erhöhung der Innovationsgeschwindigkeit durch verstärkte Konkurrenzsituation und
- Unterstützung eines Variantenmanagements.

Die Verringerung der Komplexität lässt sich prinzipiell erreichen, indem die Anzahl der Systemelemente sowie die Anzahl und Intensität der Beziehungen zwischen diesen Elementen verringert werden [GoSt00]. Modular aufgebaute Systeme ermöglichen dies, indem das Gesamtsystem aus einer überschaubaren Anzahl von Einheiten besteht, die gerade so definiert sind, dass die Beziehungen zwischen ihnen nur relativ schwach ausgeprägt sind. Baldwin und Clark definieren das Kernprinzip der Modularität so:

A module is a unit whose structural elements are powerfully connected among themselves and relatively weakly connected to elements in other units. [BaCl00]

Dadurch wird die gesamte Gestaltungsaufgabe in "Inseln geringerer Komplexität" zerlegt, die wiederum getrennt voneinander bearbeitet werden können [Goe09].

Durch die Zerlegung eines Gesamtsystems in Module können diese räumlich, zeitlich und organisatorisch unabhängig bearbeitet werden. Damit ist es möglich, die Planung, Erstellung und Lieferung von Bestandteilen des Gesamtsystems durch Zulieferer übernehmen zu lassen bzw. besser zwischen den Supply-Chain-Partnern zu koordinieren [KHM09]. Es ist verständlich, dass dabei nur diejenigen Zulieferer erfolgreich sein werden, die das Modul am effektivsten und effizientesten herstellen und liefern können. Die Zulieferer treten somit untereinander in eine Konkurrenzsituation, die ihre Innovationsnotwendigkeit verstärkt [BaCl98]. Durch die Fokussierung auf das zugelieferte Modul steigt bei jedem Zulieferer auch die Spezialisierung auf zum Beispiel genutzte Technologien und Fertigungsverfahren und das damit verbundene Know-how. Diese Spezialisierung fördert wiederum Innovationen. Modularisierung ist somit Innovationstreiber.

Neben innovationsfördernden Aspekten optimiert Modularisierung auch das Management von Varianten einer Produktfamilie. Durch Kombination unterschiedlicher Module in einem Gesamtsystem lässt sich das vom Markt geforderte Maß an externer Variantenvielfalt bei gleichzeitig geringerer interner Vielfalt einlösen [Fra02]. Diese durch ein geschicktes Variantenmanagement erreichbare kundenindividuelle Massenfertigung enthält zahlreiche Vorteile, wie zum Beispiel die Minimierung von Missverständnissen bei den Auftragsinhalten, geringere Kosten und eine höhere Produktqualität, was nicht zuletzt zu einer festen Kundenbindung mit Folgeaktivitäten führt [KrCa05]. Des Weiteren kann durch die relative Unabhängigkeit der Module zueinander schneller auf modularer Ebene getestet werden [KHM09].

Da ein Modul immer als Teil eines größeren Gebildes (zum Beispiel Gebäude, Produkt oder Produktionsanlage) gesehen wird und die Modularisierung zielgetrieben ist, können Module einer gleichen Anwendungsdomäne unterschiedliche Umfänge, i.S.v. Teil eines größeren Gebildes, haben. Für die Architektur kann ein Modul zum Beispiel sowohl als eine einzelne Wand als auch als ein ganzer Raum definiert sein. Je nach Bewertungskriterium können die dabei entstandenen Module besser oder schlechter geeignet sein ein gestecktes Ziel zu erreichen. Der gewählte Funktionsumfang eines Moduls soll im Folgenden als Modulschnitt bezeichnet werden.

Modularität im Sinne der Komplexitätsreduzierung ist auch Grundlage für weitere Theorien. So baut zum Beispiel die Theorie der normalisierten Systeme [MVV10] darauf auf. Sie

wendet die Modularität auf softwarebasierte Systeme an und leitet daraus vier Theoreme ab:

1. Trennung von Bereichen (Separation of concerns),
2. Nachverfolgung der Version der Daten (Data version transparency),
3. Nachverfolgung der Handlungen (Action version transparency),
4. Trennung der Zustände (Separation of states).⁶

3.2. Der Weg zur modularen Produktionsanlage

Die Modularisierung von Produktionssystemen ist seit mehr als zwei Dekaden Gegenstand der Entwicklung und Forschung [Lie13]. Speziell in der Fertigungstechnik, die häufig Umformprozesse und die Zusammenführung von Werkstücken zu funktionsfähigen Produkten umfasst, steht die Segmentierung von Fertigungsprozessen im Mittelpunkt entsprechender Aktivitäten. Die Entwicklung zu modularen Produktionsanlagen in der Fertigungstechnik ist speziell von drei Fabrikkonzepten geprägt, welche im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Funktionale Fabrik

Bei diesem Fabriktyp steht die Forderung zur Schaffung einer funktionalen Organisationsform im Vordergrund. Damit soll die enorm zu steigernde Produktivität der Produktionsprozesse des industriellen Zeitalters bewältigt werden [Nag09]. Dieses Organisationsprinzip, aufbauend auf den Ideen von Weber und Taylor [Nag09], beruht auf einer funktionalen Spezialisierung. Dabei werden gleichartige Funktionen sowohl für die Personalstellenbildung (zum Beispiel ein Dreher) als auch für die Strukturierung der Abteilungen (zum Beispiel Drehmaschine) zusammengefasst [Nag09]. Somit steht die Funktion des Werkzeugs im Mittelpunkt. Fabriken, die nach diesem Konzept strukturiert wurden, spiegelten dies auch in ihrer räumlichen Ausgestaltung wider.

Als nachteilig an diesem Organisationsprinzip erwiesen sich jedoch die starren und hierarchischen Strukturen, die meist lange und aufwändige Informationsflüsse und Transportwege benötigen und somit reaktionsschnelle Anpassungen an veränderte Anforderungen und Bedürfnisse verhindern [Lie13]. Das Organisationsprinzip der funktionalen Fabrik ist heute in der Werkstattfertigung vorzufinden, wo die Einzel- und Kleinserienfertigung mit entsprechender Anpassung an Kundenwünsche im Vordergrund stehen. Hier lassen sich die Nachteile der langen Informationsflüsse und Transportwege durch kleinere Betriebe vermeiden.

⁶ Original im Englischen. Die Übersetzung erfolgt sinngemäß.

Fokussierte Fabrik

Durch die gestiegene Komplexität der Produkte, Produktionsverfahren und Werkzeugmaschinen [Nag09] etablierte sich in den 1980er Jahren ein anderer Fabriktyp. Bei der fokussierten Fabrik stand nicht mehr die Funktion des Werkzeugs, sondern das zu produzierende Produkt im Mittelpunkt [Sch88]. Die spezifische Kunden- und Marktsituation sollte in diesen Fabriken zum Leitbild der Geschäftsorganisation gemacht werden [Nag09]. Dies bedeutete die Betonung eines engen Spektrums von Produkten, Technologien, Mengen und Märkten [Ski74]. Mit schmalen Produktsortimenten sollten Marktsegmenten besser bedient werden können [ZaDi94]. Schonberger beschreibt dieses Produktionskonzept mit dem Bild der Fabrik in der Fabrik, bei der Minifabriken in physikalisch und organisatorisch getrennten Gebäudestrukturen mit kleinen Maschinen ausgestattet sind, so dass sich vielfältige Linien und Zellen bilden lassen [Sch88]. Das Organisationsprinzip der fokussierten Fabrik stellt den Übergang zur Fabriksegmentierung dar [Lie13][ZaDi94]. Das Organisationsprinzip der fokussierten Fabrik wird heute in der Fließ- bzw. Linienfertigung und der Gruppenfertigung genutzt. Dabei sind die Betriebsmittel so angeordnet, dass sie dem Fertigungsablauf des Produktes entsprechen [GGR92].

Fabriksegmentierung

Mit der Fabriksegmentierung etablierte sich in den 1990er Jahren ein Konzept, welches durch die Schaffung kleiner Einheiten eine noch weitere Ausrichtung der Produktion auf die Anforderungen der Kunden ermöglicht. Dabei werden die bestimmenden, produktorientierten Fertigungsschritte voneinander abgegrenzt und bilden jeweils eine organisatorische Einheit [Wil06]. Nicht mehr Mengenwachstum, sondern die Orientierung auf kundenindividuelle Produkte und Systemangebote waren das Ziel [Wil98]. Im Unterschied zur funktionalen und fokussierten Fabrik wird bei der Konzeption der Fabriksegmentierung die gesamte Wertschöpfung des produzierenden Unternehmens betrachtet. Nach Wildemann umfassen die erzeugten Fertigungssegmente immer mehrere Stufen der logistischen Kette zwischen Wareneingang und Versand des Produktes an den Kunden [Wil06]. Da diese Fertigungssegmente somit auch die Funktionen der Qualitätssicherung, Disposition, Produktionsplanung und -steuerung sowie Instandhaltung enthalten müssen, sind sie weithin autark, was die Anzahl der Schnittstellen zu anderen Fertigungssegmenten auf ein Minimum reduziert [Wil06].

3.3. Modulare wandlungsfähige Produktionsanlagen

Bei den zuvor beschriebenen Fabriktypen steht die einmalige und zumindest für einen längeren Zeitraum unveränderbare Anlagenstruktur im Vordergrund. Auch bei der schon als modular zu bezeichnenden Struktur der Fabriksegmentierung wurden die Segmente einmalig geplant, strukturiert und gebaut. Sie eignet sich allerdings nur für relativ stabile Umwelten und Zustände. [ZaDi94].

Heutige Produktionsumgebungen weisen diese stabilen Umwelten hingegen nicht mehr im erforderlichen Rahmen auf. Vielmehr befinden sie sich in einem rasch wandelnden Umfeld [NHR08][Wie02] und müssen sich schnell an Veränderungen anpassen können. Eine unter diesen Randbedingungen vorteilhafte Fabrikorganisationsform muss daher mehr als nur segmentiert und modular sein, sie muss weitere Kriterien erfüllen. Aus diesem Grund werden seit mehr als zehn Jahren Konzepte zur Umsetzung von wandlungsfähigen Fabrikstrukturen diskutiert, deren Basis segmentierte, modulare Analgenstrukturen sind [Lie13].

Zur Beschreibung der erforderlichen Eigenschaften wird in der Literatur eine Vielzahl von Begriffen genutzt [KINy05]. In dieses Begriffsumfeld fällt zum Beispiel die Forderung nach Flexibilität, Rekonfigurierbarkeit, Wandlungsfähigkeit und Agilität. Dabei sind die Begriffsbestimmungen meist nicht trennscharf formuliert und die Begriffe selbst werden oft synonym verwendet. Im Folgenden sollen die Begriffe daher geordnet und in einen Zusammenhang gebracht werden.

Sethi befasst sich mit dem Begriff der Flexibilität. Er stellt fest, dass Flexibilität ein komplexes und multidimensionales Konzept ist, für das, allein bei der Diskussion innerhalb der Fertigungsindustrie, mehr als 50 verschiedene Typen in der Literatur zu finden sind [SeSe90].

Nähert man sich der Begriffswelt, die bei wandlungsfähigen Produktionssystemen anzufinden ist, ist festzustellen, dass die dort formulierten Anforderungen sowohl proaktive als auch reaktive Aspekte enthalten.

Wiendahl beschreibt den proaktiven Aspekt mit der Fähigkeit der Vorhersehbarkeit von Veränderungen innerhalb des industriellen Umfeldes. Dieser Aspekt fasst also insbesondere vorausschauende, initiative und evolutionäre Fähigkeiten zusammen [Lie13]. Indizien für die Notwendigkeit dieser Fähigkeit sind die Verkürzung der Lebenszyklen eines Produktes mit gleichzeitig zunehmender Variantenvielfalt sowie dem raschen Vordringen neuer technologischer Entwicklungen [Wie02].

Den reaktiven Aspekt innerhalb der Wandlungsfähigkeit bewertet Wiendahl durch die Zeit, mit der Unternehmen auf Veränderungen des Umfelds reagieren können [Wie02]. Diese Sichtweise hat Ähnlichkeit zum allgemeinen Verständnis der Reaktionsfähigkeit.

Dagegen nutz Reinhardt die Begriffe Wandlungsfähigkeit und Reaktionsfähigkeit synonym. Für den proaktiven Anteil nutzt Reinhardt, wie auch Wiendahl, den Begriff der Flexibilität und beschreibt damit die Fähigkeit, Veränderungen in einem zuvor geplanten Bereich zu beherrschen [Rei00].

Wandlungsfähigkeit entspricht damit der Fähigkeit, Flexibilitätskorridore verschieben zu können (siehe Abbildung 3-1). Dieser Definition folgt auch Barata [Bar06]. Er verwendet allerdings für die Wandlungsfähigkeit den englischen Begriff der Agility und grenzt diesen von der Flexibilität (Flexibility), und zusätzlich vom Lean-Gedanken als Maßnahme zur Verbesserung des Produktionsbetriebes, ab [Bar06]. Dadurch assoziiert Barata mit Agility nicht nur die Fähigkeit des Wandelns als Erreichen eines Zustandes mit verändertem Funktionsspektrum einer Produktionsanlage, wie es zum Beispiel Wiendahl formuliert, sondern ergänzt den gedanklichen Raum direkt um eine entsprechende Fähigkeit der Produktionsanlage während des Betriebs.

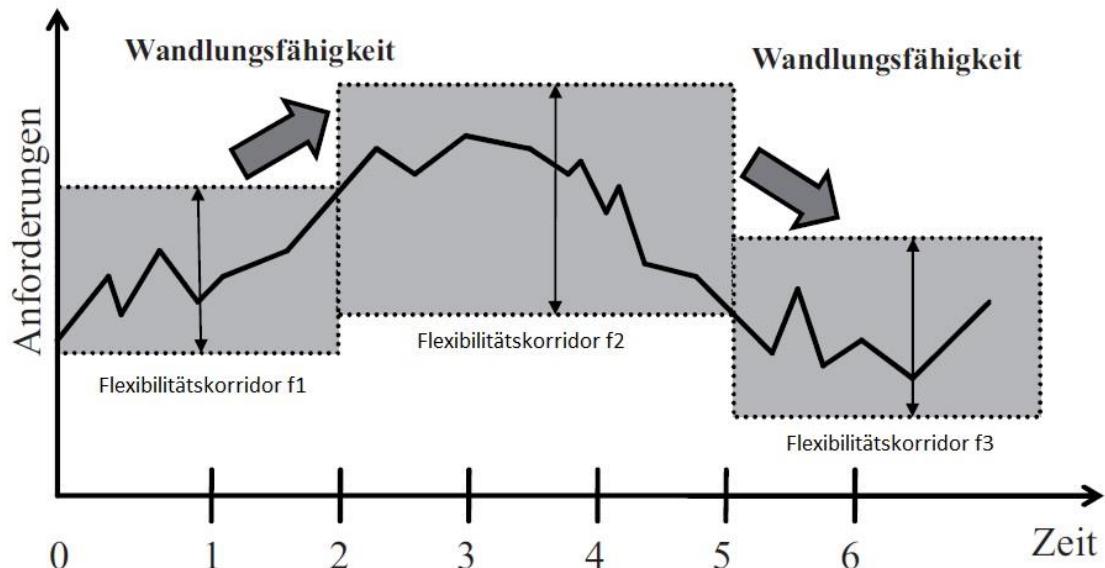


Abbildung 3-1: Wandlungsfähigkeit durch Verschieben von Flexibilitätskorridoren (nach [Wie02])

Arnold et al. ergänzen die Einteilung in proaktiv und reaktiv um eine Einordnung der Begriffe Agilität, Wandlungsfähigkeit, Flexibilität, Rekonfigurierbarkeit und Umrüstbarkeit in die Ebenen einer Fabrik. Zusätzlich charakterisieren sie den Geltungsbereich und Umfang einer Anpassung auf die Produktebenen [AIK08]. Abbildung 3-2 stellt diesen Zusammenhang dar.

Auf der höchsten Ebene befinden sich das Produktionsnetzwerk, in das die Fabrik eingebettet ist, sowie das gesamte Produktpotfolio des Netzwerks. Die Fähigkeit, in diesem Netzwerk proaktiv neue, noch unbekannte Märkte zu finden, und für diese geeignete Produkte zu fertigen, sowie diese Produkte an die dortigen Gegebenheiten anpassbar zu gestalten, bezeichnet Arnold als Agilität [AIK08].

Können Bereiche einer Fabrik reaktiv mit wenig Aufwand auf neue, aber ähnliche Produkte durch Veränderung des Produktions- oder Logistikprozesses umgestellt werden, so wird diese Fähigkeit als Flexibilität betrachtet [AIK08]. Arnold quantifiziert hierbei erstmalig einen erforderlichen Aufwand. Wiendahl et.al. sprechen jeweils nur über eine Fähigkeit, ohne einen Aufwands- oder Zeitbezug herzustellen.

Rekonfigurierbarkeit bildet Arnold auf Produktions- oder Montagebereiche ab. Diese Fähigkeit wird erreicht, wenn durch Hinzufügen oder Weglassen von funktionalen Elementen, zum Beispiel Achsen oder Arbeitswerkzeuge, wie Bohrer, auf einen Produktionsprozess für bestimmte, abweichende Bauteile oder -gruppen umgestellt werden kann.

Begriff	Zeit	Produktebenen	Ebenen der Fabrik
Agilität	proaktiv	Produktporfolio des Produktionsnetzwerks	Fabrik im logistischen Produktionsnetzwerk
Wandlungsfähigkeit	reaktiv & proaktiv	Umstellung auf neue oder veränderte Produkte	Fabrik mit Fähigkeiten
Flexibilität	reakтив	Umstellung auf neue aber ähnliche Produkte	Bereich innerhalb der Fabrik mit Fähigkeiten
Rekonfigurierbarkeit	reaktiv	Umstellung auf bestimmte Bauteile oder Baugruppen	Produktions- oder Montagebereich
Umrüstbarkeit	reaktiv	Umstellung auf bestimmte Produktions- oder Montageschritte	Arbeitsstation

Abbildung 3-2: Fähigkeiten nach Ebenen der Fabrik und des Produkts (nach [AIK08])

Auf der untersten Ebene der Fabrik wird Umrüstbarkeit durchgeführt. Umrüstbarkeit gelingt, wenn eine Arbeitsstation an einem Teil verschiedene Operationen ohne größeren Aufwand ausführen kann [AIK08]. Dieser Fähigkeit kann z.B. durch einen Werkzeugwechsel entsprochen werden.

Arnold definiert die Wandlungsfähigkeit als ein Zielfeld der Fabrik. Wandlungsfähigkeit wird erreicht, wenn innerhalb einer Fabrik die Umstellung auf neue oder veränderte Produkte ermöglicht wird. Auch für Arnold hat die Wandlungsfähigkeit somit pro- und reaktive Aspekte. Durch die Verbindung der Wandlungsfähigkeit mit der Ebene der Fabrik wird Wandlungsfähigkeit als ein so hochwertiges Ziel charakterisiert, dass sie mit anderen Zielen wie zum Beispiel der Produktqualität und Mitarbeiterorientierung, die ebenfalls auf Ebene der Fabrik verortet sind, gleichgesetzt wird [AIK08].

Ohne einen direkten Bezug zu den Ebenen einer Fabrikhierarchie setzt Lier die verschiedenen Begriffe in Zusammenhang [Lie13]. Er folgt einer Definition von Wiendahl und Hernández, die Wandlungsfähigkeit im Bezug zu Wandlungsobjekten auf allen Fabrikstrukturebenen bestimmen [WiHe02]. Lier nutzt die u.a. von Nyhuis und Wiendahl definierten primären Wandlungsbefähiger:

- Universalität,
- Mobilität,
- Skalierbarkeit,
- Modularität und
- Kompatibilität. [NHR08]

Neben der Bezeichnung der Wandlungsbefähiger werden diese und weitere Eigenschaften u.a. als Effekte oder Potentiale bezeichnet [Goe09].

Des Weiteren werden bei Lier die Begriffe ebenfalls in proaktive und reaktive Klassen eingeteilt. Flexibilität und Reaktionsfähigkeit werden als reaktive Fähigkeiten zum Oberbegriff der Anpassungsfähigkeit zusammengefasst. Die proaktiven Fähigkeiten, wie Vitalität und Agilität, werden unter der Entwicklungsfähigkeit subsumiert. [Lie13] Damit führt Lier die Definitionen von Wiendahl und Arnold zu einem gemeinsamen Verständnis zusammen.

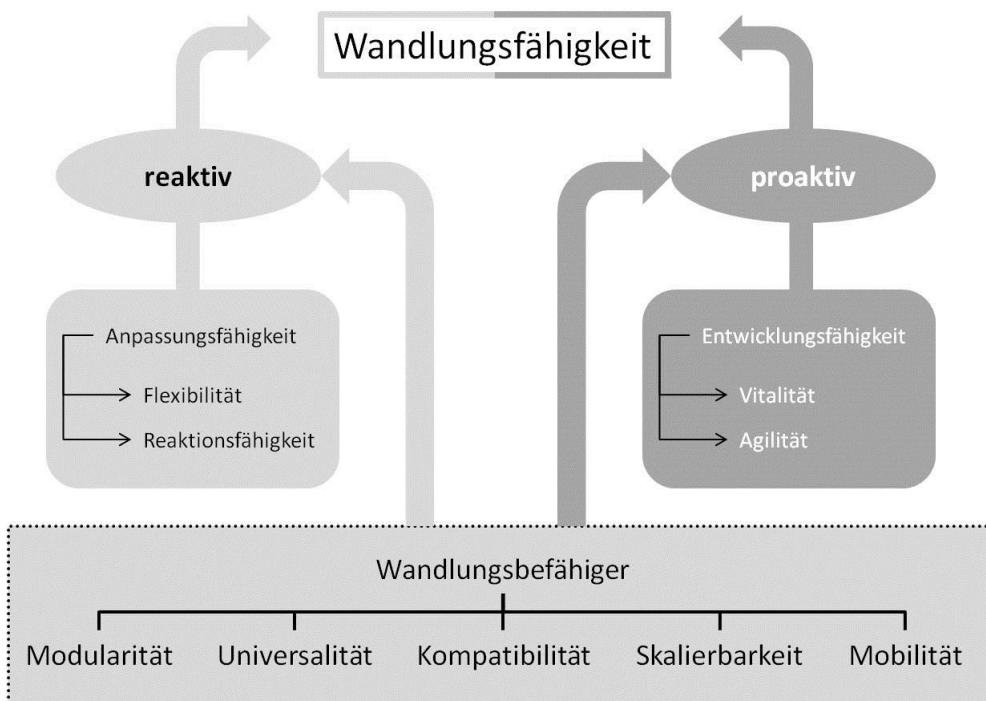


Abbildung 3-3: Einordnung der Wandlungsbefähiger (nach [Lie13])

Vitalität beschreibt bei Lier die Fähigkeit, durch kontinuierliche und dynamische Anpassungen, permanenten Fortschritt und Verbesserung zu generieren. Agilität wiederum

wird als Fähigkeit zur Eigendynamik einer Organisation oder Fabrik verstanden, um die erforderlichen Prozesse selbst anstoßen und umsetzen zu können. [Lie13]

Den Wandlungsbefähigern werden bei Lier weder proaktive noch reaktive Eigenschaften zugewiesen. Sie sind damit unabhängig vom Zeitbezug. Die Abbildung 3-3 stellt die Begriffswelt nach Lier dar.

Die von Nyhuis und Wiendahl definierten und von Lier genutzten Wandlungsbefähiger werden als individuelle und abrufbare Eigenschaften eines Objektes verstanden. Durch ihre Existenz und Ausprägung beeinflussen und / oder ermöglichen sie maßgeblich die Eigenschaft der Wandlungsfähigkeit eines Objekts [Lie13].

Durch Aktivierung eines oder mehrerer Wandlungsbefähiger können die gewünschten reaktiven und/oder proaktiven Fähigkeiten erzeugt werden, die je nach Sicht des Akteurs eines Unternehmens (Management, Betriebswirtschaft, technische Realisierung, Arbeitswissenschaft) unterschiedliche praktische Umsetzungen bedeuten [Wie02]. Das Ergebnis bei Aktivierung eines Wandlungsbefähigers ist damit abhängig vom Objekt, auf das er angewandt wird, und von der Sicht auf dieses Objekt.

Durch die Bewertung einzelner Wandlungsbefähiger bezogen auf ein bestimmtes Objekt ist auch eine gesamte Bewertung hinsichtlich der Wandlungsfähigkeit des betrachteten Objektes möglich. Eine solche Bewertung kann zum Beispiel durch Abhängigkeiten unter den Wandlungsbefähigern oder durch Bezug auf externe quantifizierbare Dimensionen, wie zum Beispiel Kosten, Zeit oder Qualität, [KHM09] erreicht werden.

Da das Verständnis der Wandlungsbefähiger im weiteren Verlauf dieser Arbeit genutzt werden soll, werden sie im Folgenden näher beschrieben.

Modularität nimmt unter den Wandlungsbefähigern eine herausgehobene Stellung ein, da diese als elementare Voraussetzung für Wandlungsfähigkeit angesehen wird. Modularität kann andere Wandlungsbefähiger verstärken und positiv beeinflussen [Wie02]. Wird Modularität nicht genutzt, können Produktionsanlagen zwar zum Beispiel mobil, aber in Gänze nicht die Eigenschaft der Wandlungsfähigkeit erreichen.

Universalität befähigt zur anforderungsbezogenen Dimensionierung und Gestaltung hinsichtlich eines Produktes oder einer Technologie [NHR08]. Fabrikelemente erhalten damit die Eigenschaft, für verschiedene Aufgaben, Anforderungen und Funktionen nutzbar zu sein. Universalität wird oft durch eine angemessene Überdimensionierung des Fabrikelementes realisiert [Wie05].

Kompatibilität bezeichnet die Fähigkeit, Fabrikmodule bezüglich Materialien, Medien und Energien zu vernetzen [Wie05]. Um eine Kompatibilitätssteigerung zu erreichen, sind speziell die Schnittstellen der Betriebsmittel zu betrachten, da über sie in den meisten Fällen die

Vernetzung hergestellt wird. Die Schnittstellen sollen, neben einer hohen Fehlertoleranz, einen hohen Standardisierungsgrad aufweisen [Wie05].

Skalierbarkeit bewertet die technische, räumliche, organisatorische und personelle Erweiterbarkeit und Reduzierbarkeit von Fabrikelementen. Die technische Skalierbarkeit, auch als kapazitive Atmungsfähigkeit bezeichnet, entspricht dabei einer gesteigerten Mengenleistung, die zum Beispiel durch verkürzte Bearbeitungszeiten oder auch eine Parallelisierung der Bearbeitungsoperationen realisiert werden kann. [NHR08]

Mobilität beschreibt die örtlich uneingeschränkte Bewegbarkeit von Objekten [NHR08]. Eine Erhöhung der Mobilität von Betriebsmitteln ist nicht nur von den Charakteristika des Betriebsmittels (Abmessungen, Gewicht, Form) abhängig, sondern auch von der Umgebung, in dem sich das Betriebsmittel befindet. Wird die Umgebung mitberücksichtigt, müssen auch Transportwege einschließlich Türdurchgängen sowie die zur Verfügung stehenden Transportmittel, wie zum Beispiel Krananlagen, betrachtet werden. Mobilität wird begünstigt, wenn die Objekte und Betriebsmittel genügend klein, leicht und transportabel im Verhältnis zu ihrer Umwelt sind. [Wie05]

Um konkrete wandlungsfördernde Eigenschaften einer Produktionsanlage ableiten zu können, müssen die gefundenen Fabrikmodule (Modulschnitt) an den einzelnen Wandlungsbefähigern gespiegelt werden [Wie05]. Der Modulschnitt kann dann für den jeweiligen Wandlungsbefähiger bewertet werden. Es entsteht somit eine (nx5)-Matrix aus der Menge aller möglichen Modulschnitte.

Ein optimaler Modulschnitt ist dann gefunden, wenn das Modul allen Wandlungsbefähigern gerecht wird. Nur so ist das Ziel erreichbar, Produktionsanlagen zu befähigen, mit den schnelllebigen Produktlebenszyklen Schritt halten zu können [Wie05], sowohl in einer proaktiven als auch reaktiven Dimension.

Die Wahl des geeigneten Modulschnitts ist nicht Inhalt dieser Arbeit. Vielmehr soll die Vorstellung der Wandlungsbefähiger aufzeigen, dass eine modulare Gestaltung der Systemstruktur allein nicht ausreichend ist, um Wandlungsfähigkeit zu erzeugen. Wie zuvor ausgeführt, ist Modularität dafür allerdings eine grundsätzliche Voraussetzung.

3.4. Modulare Produktionsanlagen im Kontext von Industrie 4.0

Unter Industrie 4.0 wird allgemein die vierte industrielle Revolution verstanden [BITK14]. Die erste startete um 1750 mit der Entwicklung der Dampfmaschine. Arbeitsvorgänge konnten mit den durch Dampf angetriebenen Arbeitsmaschinen wesentlich produktiver durchgeführt werden. Die erzeugten Produkte wurden mit der Eisenbahn und Dampfschifffahrt transportiert. Somit war man in der Lage, die Produkte einem größeren, globaleren Konsumentenkreis anzubieten. Die dadurch möglichen Skaleneffekte und Spezialisierungen

führten wiederum zu einer weiteren Effizienzsteigerung der Produktion, der heute sogenannten Massenproduktion [BHV14].

Eine erneute einschneidende Veränderung der Produktionsstrukturen vollzog sich durch die Elektrifizierung. Die Arbeitsmaschinen mussten nicht mehr zentral an einer mit Dampf betriebenen Kraftmaschine gekoppelt werden, sondern wurden gemäß der organisatorischen und produktionstechnischen Arbeitsabfolge angeordnet. Die neue Anordnung führte zu einer Dezentralisierung der Fabrikorganisation [BHV14]. Das Ergebnis wurde unter der zweiten industriellen Revolution bekannt, die weithin mit der von Henry Ford eingeführten Fließbandproduktion in Verbindung gebracht wird [DrKo15].

Die zunehmende Elektrifizierung und die Informations- und Kommunikationstechnologie leiteten in den 1960er Jahren über in die dritte industrielle Revolution. Die Abfolgen des Produktionsprozesses in Fertigungsprozeduren wurden automatisiert und zum Beispiel durch den Einsatz von Speicherprogrammierbaren Steuerungen gelenkt und überwacht. [DrKo15]

Die Produkte der nahen Vergangenheit waren meist in Produktfamilien gruppiert. Man erzielte damit Synergien bei der Forschung, Entwicklung, Produktion und Logistik der Produkte, die sich positiv auf die Wertschöpfung der Firmen auswirkten. Heutige Herausforderungen liegen zunehmend in der Personalisierung und Regionalisierung von Produkten [BHV14]. Dadurch nimmt die Produktvielfalt stark zu und die Stückzahlen, die pro Produktmodell und Variante gefertigt werden, gehen stark zurück. Die für ein spezifisches Produkt genutzten Prognosemodelle verlieren ihre Aussagekraft.

Produzierende Firmen müssen dadurch auf der einen Seite weiterhin die eigene Wertschöpfung verbessern und auf der anderen Seite auf die Anforderung aus der Personalisierung, Globalisierung und Regionalisierung reagieren. Bauernhansel beschreibt dieses neue Produktionsparadigma als Schwelle von der Kompliziertheit zur Komplexität. "Wir werden es nicht mehr schaffen, alle Produkte und Prozesse exakt zu beschreiben." [BHV14].

Dieser erneuten Komplexitätssteigerung soll mit der vierten industriellen Revolution begegnet werden. Produkte, wie beispielsweise Geräte, Apparate und ganze Produktionssysteme werden zukünftig zu Cyber-Physischen-Systemen (CPS) bzw. Industrie 4.0-Komponenten⁷. Sie erhalten durch eingebettete Systeme eine zusätzliche Verarbeitungskomplexität. CPS repräsentieren sich mit Hilfe einer Verwaltungsschale [VDI15] im Internet der Dinge und bilden dort ihre fachliche Funktionalität virtuell ab (vgl. Abbildung 3-4).

⁷ Im Folgenden werden die Begriffe CPS und Industrie 4.0-Komponente synonym genutzt.

Es entsteht im Internet der Dinge ein virtueller Markt, bei dem sich Angebot und Nachfrage nach verschiedenen Wertschöpfungen finden können. Fehlt eine Funktionalität zur Realisierung einer Wertschöpfung, so kann diese dort mit Hilfe der Verwaltungsschalen gesucht und gefunden werden. Da die Verwaltungsschale auch die Ressourcen der eigenen Gegenstände koordiniert, besteht zwischen Verwaltungsschale und Gegenstand eine ständige Kommunikationsverbindung. [VDI15]

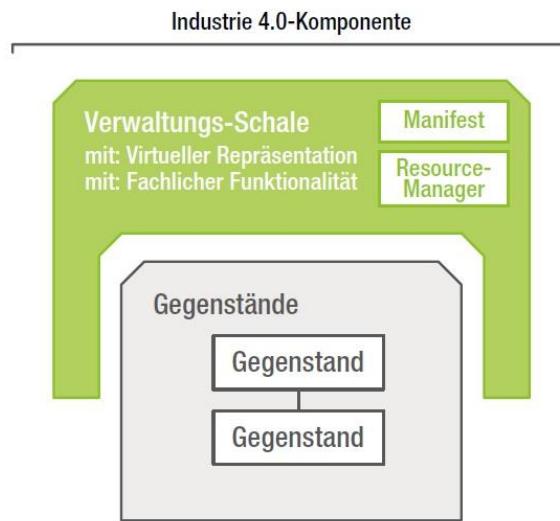


Abbildung 3-4: Logische Darstellung einer Industrie 4.0 Komponente [VDI15]

Die CPS können sich damit selbstständig und dezentral untereinander organisieren, sich zu einem Ad-hoc- Produktionssystem verbinden, sich optimieren und die an sie gestellten Aufgaben gemeinsam im Verbund erfüllen.

Wenn CPS im Produktionsumfeld eingesetzt werden, entsteht die Smarte Fabrik. CPS werden dann zu Cyber Physical Production Systems (CPPS), die den heutigen Arbeitsmaschinen entsprechen. Die an die CPPS gestellten Aufgaben entsprechen den heutigen Produktionsaufträgen.

Die Konzepte der Smart-Factory werden heute oft auf den Bereich der Stückfertigung angewendet. In der Umsetzungsempfehlung Industrie 4.0 der ACATECH⁸ werden 13 Anwendungsbeispiele aus dem Bereich der Fertigungstechnik formuliert. Dabei kommt dem zu bearbeitenden Produkt eine besondere Rolle zu [Aca13]. Das Produkt ist ebenfalls ein intelligentes CPS und kennt seinen aktuellen Bearbeitungsstand und den gewünschten Zielzustand. Da es ebenfalls über eine Verwaltungsschale verfügt, ist es im Internet der Dinge vertreten und kann mit den Verwaltungsschalen der Arbeitsmaschinen die eigene Bearbeitung planen und koordinieren.

⁸ Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

Um Produkte dem Anforderungsprofil entsprechend zu bearbeiten, besteht die Notwendigkeit, die Struktur der Fertigungsanlagen wandlungsfähig zu gestalten [Aca13]. Hier sind deutliche Parallelen zwischen den in einer Smart Factory verwendeten CPS bzw. CPPS und modularen Produktionssystemen zu erkennen. Sollen CPPS eine Aufgabe bearbeiten, werden die Fertigungsschritte der Gesamtaufgabe auf die dabei benötigten CPPS verteilt. Jedes CPPS muss somit mindestens eine technische Funktion anbieten und durchführen können. Wenn diese Funktion einer verfahrenstechnischen Grundfunktion entspricht, sind die Konzepte der CPPS auch auf die Verfahrenstechnik überführbar. Ein CPPS entspricht dann einem Modul, die Smart-Factory einer modularen verfahrenstechnischen Produktionsanlage.

Modulare Anlagen, wie sie in dieser Arbeit verstanden und diskutiert werden, sind somit ein erster bedeutsamer Schritt in Richtung Industrie 4.0 in der Verfahrenstechnik.

3.5. Anwendungsbereiche modularer verfahrenstechnischer Produktionsanlagen

Die soeben vorgestellte Begriffswelt modularer Anlagen ist stark von der Montage- und Fertigungstechnik geprägt. Im Folgenden soll daher behandelt werden, in welchen Bereichen verfahrenstechnischer Produktionsanlagen die Wandlungsfähigkeit modularer Ansätze benötigt wird. Dazu wird die Charakteristik verfahrenstechnischer Produkte und Produktionsanlagen beleuchtet und deren Aufteilung in der chemisch-pharmazeutischen Industrie betrachtet. Im Speziellen soll ermittelt werden, für welche Produkte und Produktionssysteme modulare Produktionsanlagen einen lohnenswerten Ansatz darstellen.

Als das Einsatzgebiet verfahrenstechnischer Produktionsanlagen wird in dieser Arbeit insbesondere die chemisch-pharmazeutische Industrie definiert. Dieser Branche sind in Deutschland etwa 1860 Betriebe zuzuordnen⁹ [DSV11], die in 2014 einen Gesamtumsatz von ca. 190,83 Mrd. Euro erwirtschafteten [VCI15]. Die chemisch-pharmazeutische Industrie unterteilt sich hinsichtlich charakterisierender Merkmale der erzeugten Produkte und deren Anwendungsbereiche in:

- Chemische Industrie
- Anorganische Grundchemie
- Petrochemikalien und Derivate
- Polymere
- Fein- und Spezialchemikalien
- Wasch- und Körperpflegemittel
- Pharmazeutische Industrie

⁹ Stand 2010

Die einzelnen Anwendungsgebiete sind allerdings nicht voneinander unabhängig. Vielmehr dienen die von einigen Anwendungsgebieten erzeugten Produkte anderen Anwendungsgebieten als Ausgangsprodukt, die in weiteren Produktionsprozessen veredelt werden [Bru01]. So werden zum Beispiel die Erzeugnisse der Petrochemie in Basischemikalien der chemischen Industrie umgewandelt. Diese bilden dann wiederum den Ausgangsstoff für weitere Veredelungen zu pharmazeutischen Produkten, die als Konsumprodukt dem Endanwender zur Verfügung stehen. Die Prozessindustrie erzeugt und verarbeitet somit sowohl Vorprodukte zur Weiterverarbeitung in folgenden Produktionsprozessen, auch außerhalb der chemisch-pharmazeutischen Industrie, als auch Konsumartikel für Endverbraucher.

Grundsätzlich ist erkennbar: Erhöhen sich Qualitätsansprüche der Kunden einer Anwendungsdomäne (zum Beispiel Elektronik- oder Automobilindustrie), betreffen die Anpassungen u.U. die Entwicklung von der Spezialchemie bis hin zur allgemeinen chemischen Produktion [KKS12].

Eine gängige Einteilung der Produkte der chemisch-pharmazeutischen Industrie ist die Charakterisierung hinsichtlich ihrer Menge und ihres Differenzierungsgrades. Die Produktdifferenzierung gibt dabei an, ob es sich um ein chemisches Standardprodukt, welches zu einem frühen Zeitpunkt der Wertschöpfungskette anfällt, oder um ein differenziertes Produkt mit mehreren Veredelungsschritten handelt [Loo97]. Dieser Zusammenhang lässt sich in der Produktgruppenmatrix nach Kline darstellen (Abbildung 3-5).

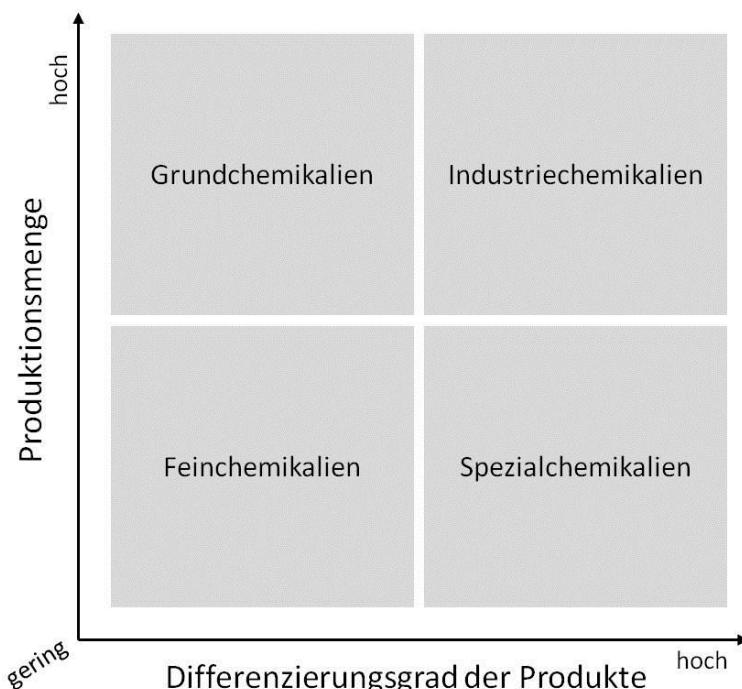


Abbildung 3-5: Produktdifferenzierungsmatrix nach [Kli76]

Im Folgenden werden die Gruppen der Produktgruppenmatrix näher beschrieben.

Grundchemikalien sind undifferenzierte Produkte wie beispielsweise Ammoniak, Chlor oder Natronlauge, die in substanzial gleicher Form und nach allgemein akzeptierter und gleichbleibender Spezifikation hergestellt werden [Rau01]. Grundchemikalien werden meist von mehreren Herstellern in großen Mengen produziert und sind Ausgangsstoffe für eine Vielzahl höherwertiger Produkte [Mur05]. Der Kostenanteil der Edukte, die für den Herstellungsprozess benötigt werden, ist sehr hoch, was die betriebliche Wertschöpfung dieser Produkte niedrig ausfallen lässt [Rau01].

Industriechemikalien entsprechen herkömmlichen Kunststoffen, wie Polyethylen oder Polypropylen, und ähneln den Grundchemikalien hinsichtlich Produktionsmenge, Basis der Edukte, Wertschöpfung und des Verkaufspreises. Sie lassen sich von den Grundchemikalien über die Produktdifferenzierung abgrenzen. Industrieprodukte werden für einen speziellen, meist kundenbezogenen Anwendungszweck optimiert und, auf einem einheitlichen Grundstoff basierend, in verschiedenen Modifikationen bzw. Varianten angeboten. [Rau01]

Feinchemikalien werden in kleinen Mengen hergestellt. Zwar weisen sie einen geringen Differenzierungsgrad auf, das zugrundeliegende Herstellungsverfahren ist jedoch sehr aufwändig. Diese Eigenschaft führt zu hohen Marktpreisen und damit zu einer hohen betrieblichen Wertschöpfung [Rau01]. Beispiele für Feinchemikalien sind pharmazeutische Wirkstoffe, Kosmetika und Lebensmittelzusatzstoffe.

Spezialchemikalien sind differenzierte Produkte, die in kleinen Mengen hergestellt werden. Der Preis ist relativ hoch, die betriebliche Wertschöpfung dementsprechend groß. Typische Spezialprodukte sind Katalysatoren und Spezialkunststoffe [Rau01]. Spezialchemikalien werden in der Regel dort produziert, wo auch eine Abnahme stattfindet [Mur05]. Wettbewerbsvorteile zwischen Produkten der Spezialchemie basieren stark auf dem Know-how in der chemischen Zusammensetzung der Produkte und dominieren nicht selten die Produktgestaltungs- und Herstellungskosten. Produkte mit derart auf den Kunden ausgerichteten Leistungsprofilen müssen vor allem einzigartig und innovativ sein, um entsprechende Abnehmer zu finden [Mur05].

Bei Produkten, die in hoher Ausbringungsmenge produziert werden (Grundchemikalien und Industriechemikalien), haben sich großtechnische Anlagen durchgesetzt. Technischer Fortschritt in diesen Anlagen bildet sich meist durch eine Erhöhung der Effizienz ab. Dabei spielt sowohl das Verhältnis zwischen den Ausbringungsmengen aller Koppelprodukte eine Rolle als auch das Verhältnis zwischen der monetären Verwertung aller Produkte zu den eingesetzten Betriebsmitteln. Da sich die Produkte dieser Produktklassen nicht über ihre Zusammensetzung und Eigenschaften differenzieren lassen, um so eine Kaufentscheidung erzeugen zu können, müssen die Anbieter dieser Produkte die Alleinstellung über den Preis, die Qualität oder Lieferzeiten erzeugen.

Da Produkte dieser Produktgruppe kontinuierlich nachgefragt werden und von Trends auf dem Markt unbeeinflusst bleiben, lassen sich Absatzmengen und Anlagenauslastung präzise im Voraus kalkulieren. Die Produktionsanlagen werden aus diesem Grund in kontinuierlicher Fahrweise betrieben. Prozessspezifische Anpassungen, zum Beispiel durch zusätzliche Rückführungen von nicht umgesetzten Edukten in die entsprechenden Prozesse, werden zur Effizienzsteigerung eingesetzt [HLW01]. Die Anlagen sind durch diese Maßnahmen auf ganz bestimmte Produktionsmengen pro Zeiteinheit optimiert, die möglichst über Jahre nicht verändert werden. Muss vom eingestellten Arbeitspunkt aus externen Gründen abgewichen werden, wird die Produktion sehr schnell ineffizient und damit unrentabel.

Produktklassen mit hoher Differenzierung (Spezial- und Industriechemikalien) werden für spezifische technische Anwendungsfälle entwickelt. Die Zusammensetzung und Eigenschaften der Spezialchemikalien beruhen auf individuellen Kundenanforderungen, die aufgrund ihres Innovationspotenzials und ihrer Individualität oft durch Patente geschützt werden. Produkte der Spezialchemie werden zurzeit überwiegend in nichtkontinuierlichen Produktionsprozessen hergestellt. Da ein großer Bezug zum Abnehmer besteht, werden die Produktionsanlagen lokal dort gebaut, wo sich der Absatzmarkt befindet. [Rau01]

Betrachtet man die Umsetzung eines modularen Ansatzes in der Prozessindustrie, so kommen insbesondere solche Produktionsanlagen in Frage, deren Produkte die nachfolgend aufgeführten Eigenschaften aufweisen:

- Hoher Differenzierungsgrad
- Kleine bis mittlere Produktionsmengen

In Bezug auf die in Abbildung 3-5 veranschaulichte Kategorisierung von Produkten der Prozessindustrie treffen diese Produkteigenschaften auf Spezialchemikalien zu.

3.6. Zwischenfazit

Modulare Ansätze für die Strukturierung von Produktionsanlagen sind dazu geeignet Komplexität beherrschbar zu machen. Die Kapselung einzelner Funktionseinheiten sowie die Nutzung vereinheitlichter Schnittstellen zwischen den Modulen können dazu beitragen, den Aufwand für einzelne Engineering-Tätigkeiten zu reduzieren und in der Folge einen effizienteren Planungs- und Entwicklungsprozess zu ermöglichen.

Der Weg zum heutigen Verständnis wandlungsfähiger Produktionsanlagen führte über mehrere betriebliche Organisationsstrukturen, die an die jeweilige wirtschaftliche Herausforderung angepasst wurden.

Eine aktuelle Interpretation von modularen Produktionsanlagen gelingt, wenn die Funktionen und Eigenschaften des Systems mit Hilfe von Wandlungsbefähigern beschrieben werden. Dadurch wird die Modularität Mittel zur Erhöhung der Wandlungsfähigkeit eines

Systems. Dass Modularität als einzelne Eigenschaft nicht mit Wandlungsfähigkeit gleichzusetzen ist, zeigen nicht zuletzt aktuell am Markt zu findende Module. Diese unterstützen zwar die Mobilität und Modularität, sind aber nicht universell einsetzbar, skalierbar oder kompatibel zu anderen unabhängigen Modulen anderer Hersteller.

Die Notwendigkeit einer wandlungsfähigen Produktion besteht auch in der chemisch-pharmazeutischen Industrie. Hier sind es vor allem die Produkte der Spezialchemie, bei denen die höchsten Anforderungen an Universalität, Mobilität, Skalierbarkeit, Modularität und Kompatibilität bestehen, um den wirtschaftlichen Herausforderungen bestmöglich entsprechen zu können. Es besteht somit in dieser Industrie das höchste Potential für wandlungsfähige Produktionsanlagen.

Bei der Produktion von Grundchemikalien werden auch zukünftig monolithische Produktionsanlagen zum Einsatz kommen, bei denen der Schwerpunkt auf Ressourcen und Energieeffizienz liegt.

4. Stand der Forschung im Engineering modularer Produktionsanlagen

4.1. Stand der Forschung modularer verfahrenstechnischer Produktionsanlagen

Betrachtet man die Anforderungen an die technische Umsetzung modularer verfahrenstechnischer Produktionsanlagen, so ist festzustellen, dass sich diese schon aus der Intention des Anlagentyps selbst ergeben. Diese Intention ist mit den in Kapitel 3.2 geschilderten Wandlungsbefähigern beschrieben. Eine wandlungsfähige Anlage entsteht demnach durch die Umsetzung der Wandlungsbefähiger: Universalität, Mobilität, Skalierbarkeit, Modularität und Kompatibilität.

Die alleinige Interpretation dieser fünf Befähiger lässt allerdings eine Vielzahl von technischen Umsetzungen zu, die nicht grundsätzlich und in allen Fällen zu einer vorteilhaften Lösung für den Bau einer modularen Anlage führen. Eine ausreichend spezifische Anforderungsdefinition erhält man erst, wenn man die Befähiger im Kontext einer Anwendungsdomäne betrachtet, wie beispielsweise der chemisch-pharmazeutischen Industrie. Die dort vorzufindenden Prozesseigenschaften und Produktklassen sowie die geltenden gesetzlichen Vorschriften und unternehmenseigenen Regelungen grenzen den Interpretationsspielraum für eine Lösung ausreichend ein, um eine technische Umsetzung zu ermöglichen.

Die Intention der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen der chemisch-pharmazeutischen Industrie spiegelt sich u.a. in der Formulierung der 50%-Idee wider. Die

auch unter dem Begriff der "Tutting Thesen" bekannt gewordenen Forderungen umfassen insgesamt sieben Thesen [PAA09]:

1. Sei schnell, denn der Markt wartet nicht.
2. Denke und plane in Modulen und Standardlösungen.
3. Nutze wiederverwendbare Modelle für Prozesse, Informationen und Arbeitsabläufe.
4. Kenne Deinen Einfluss auf Wirtschaftlichkeit und Risiko des Projektes.
5. Vermeide Perfektionismus, denn eine Punktlandung kostet Zeit und Geld.
6. Vertraue Deinem Kunden / Lieferanten.
7. Bringe Kontinuität ins Projekt, von der Entwicklung bis zur Inbetriebnahme.

Hier sind es speziell die Thesen 2 und 3, die sich auf die Systemstruktur der Produktionsanlage beziehen. Sie enthalten die Forderung, den Planungsprozess modular zu organisieren. Module sollen als Standardlösungen den Planungs- und Produktionsprozess wiederverwendbar gestalten.

Es sind allerdings die Thesen 1 und 5, die die Wandlungsfähigkeit und ihre zu beschreibenden Wandlungsbefähiger zusätzlich spezifizieren. Hier wird die Zeit explizit als Gütekriterium mit einbezogen. Die Eigenschaft der Wandlungsfähigkeit erweitert sich damit um das Kriterium, eine Anlage nicht nur an geänderte Umstände und Anforderungen anpassen zu können, sondern dies auch in einer begrenzten Zeitspanne zu realisieren. Mehr noch, denn die eingesparte Zeit während des wandelnden Eingriffs in das Produktionssystem korreliert klar mit der Wahrscheinlichkeit des wirtschaftlichen Erfolgs:

"Je früher der Markteintritt umso wahrscheinlicher wird der wirtschaftliche Erfolg. Schnell gebaute, kleinere Einheiten reduzieren das Risiko, erniedrigen die Schwelle für den Markteintritt und lassen dezentrale, flexible Produktionskonzepte zu." [PAA09].

Damit ist neben der eigentlichen Möglichkeit zur Realisierung der Wandlungsfähigkeit die Zeit entscheidend, die zu deren Umsetzung benötigt wird. In den Ausführungen zur 50%-Idee wird gefordert, die Zeit zwischen Produktidee und erstem Produktoutput aus einer Anlage um 50% zu verringern [PAA09].

Eine weitere Interpretation sowohl der Wandlungsbefähiger als auch der 50%-Idee findet in Abhängigkeit vom betrachteten Gewerk und den dortigen Aktivitäten statt. So beschäftigt sich die Verfahrenstechnik mit der Umsetzung der von den Chemikern vorgegebenen Erkenntnisse durch Auswahl und Auslegung der zum bestimmungsgemäßen Betrieb benötigten Apparate, Bauteile und Materialien [Chr10]. Eine entsprechende Interpretation des modularen Grundgedankens und eines Moduls erfolgt somit vornehmlich über Planungsartefakte, da in diesem Gewerk noch nicht die physikalische Realisierung der Produktionsanlage angegangen wird.

Betrachtet man den Begriff des Moduls auf Planungsartefakte, kann man feststellen, dass kein klares Verständnis des Modulbegriffs innerhalb der Verfahrenstechnik vorliegt. Dies führt laut Hady zu einer erheblichen Akzeptanzhemmung, die einer breiten Einführung modularen Anlagendenkens entgegensteht [Had13].

Die in der Verfahrenstechnik anzutreffenden Definitionen des Modulbegriffs sollen im Folgenden kurz beleuchtet werden.

Zeppenfeld und Kussi [ZeKu09] nähern sich einem Modulbegriff, indem sie drei Bereiche aufspannen, denen jeweils existierende Bedeutungen bzw. Interpretationen zugeordnet sind:

1. Größenordnung:

- Labormodul
- Miniplant-Modul
- Technikums-Modul
- Produktionsmodul
- Großtechnisches Modul

2. Konkretisierungsgrad:

- Planungsmodul
- Konstruktionsmodul
- Montagemodul
- Transportmodul

3. Funktionsumfang:

- Rohrleitungsbaugruppe
- Equipmentbaugruppe
- Prozessbaugruppe
- Funktionsmodul

Die Funktionsmodule beziehen sich inhaltlich auf autonome Prozesseinheiten, die eine Weiterentwicklung der in Kapitel 2.4.4 vorgestellten Package Units darstellen. Die obige Aufteilung macht allerdings auch bewusst, dass auch in den Bereichen Größenklasse (Größenordnung) und Zeitpunkt im Engineering-Prozess (Konkretisierungsgrad) eine Festlegung stattfinden muss.

Hady unterteilt dazu nach:

- Labormodulen der Entwicklungsphase,
- Planungsmodulen als Beschreibung der Funktionalität der Module und
- Konstruktionsmodule als 3D-Module [HaWo12].

Dadurch können zum Beispiel die Planung der Rohrleitungen auf R&I-Ebene als wissensbasiertes System realisiert werden [UzSe12], biotechnische Prozesse simuliert und evaluiert werden [Kho07] oder eine Kostenschätzung für die Angebotserstellung in frühen Engineering Phasen unterstützt werden [Lue13],[HaWo12].

Maßnahmen zur Beschleunigung des Engineerings unter Wiederverwendung bewährter Lösungen erfüllen in den oben vorgestellten Ansätzen und Lösungen der Verfahrenstechnik das Verständnis eines modularen Planens [BrSc12]. Dabei werden der Prozess, die Apparate und Bauteile, die benötigt werden, um das Produkt in gewünschter Menge und Qualität zu produzieren, in Planungsartefakte zerlegt. Diese entsprechen dann Modulen bzw. Teilen von zusammengesetzten Modulen. Durch Kombination dieser Module werden wiederum im weiteren Planungsprozess größere Module erzeugt, die in weiteren Schritten das Modell einer Anlage oder eines Prozesses ergeben.

Uzuner ist damit in der Lage, die R&I-Fließbilder einer Produktionsanlage durch Nutzung von wiederverwendbaren Planungsartefakten, wie Behälter, Pumpen, Wärmetauschern und deren stofftechnischen Verbindungen, zu erzeugen (vgl. Abbildung 4-1) [UzSe12]. Wozny und Schembecker wenden dieses Vorgehen auch im 3D-Raum an und können damit ein entsprechendes 3D-Modell eines Prozesscontainers erstellen (vgl. Abbildung 4-2) [WoSc10].

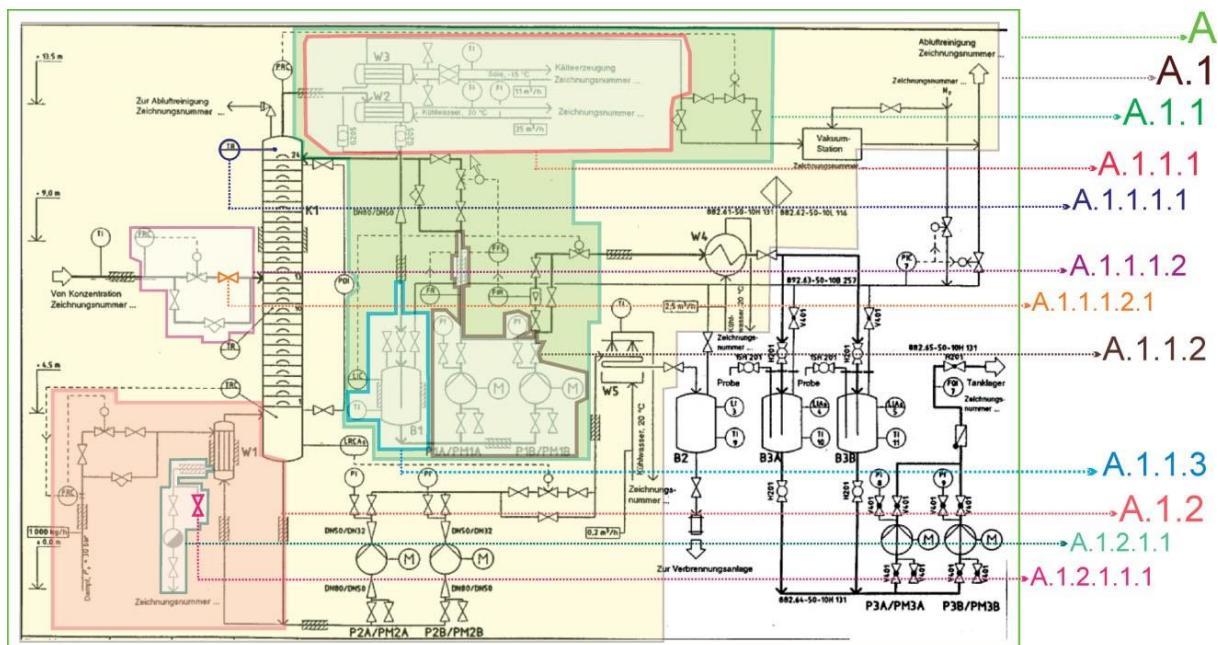


Abbildung 4-1: R&I Fließbildes bei Nutzung modularer Planungsartefakte [UzSe12]

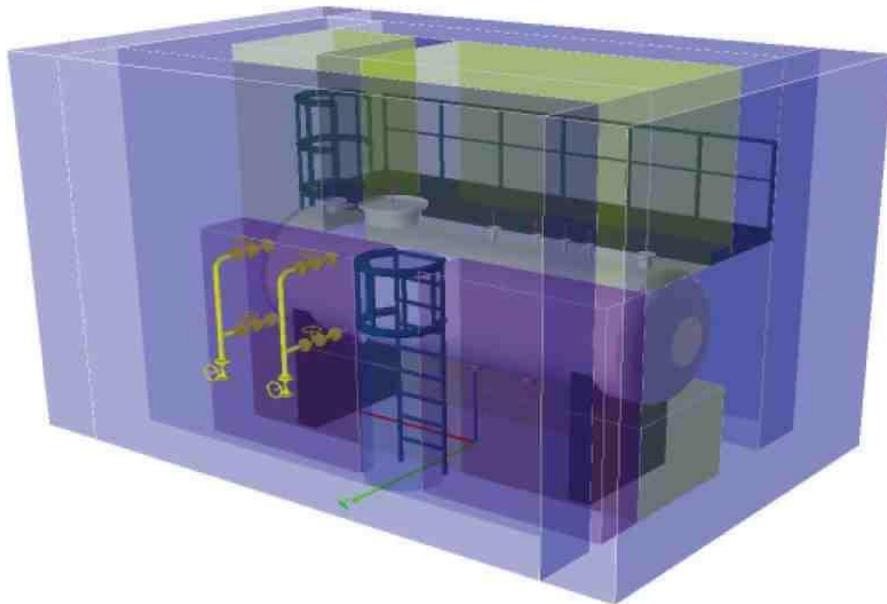


Abbildung 4-2: 3D Prozesscontainer bei Verwendung modularer Planungsartefakte [WoSc10]

Für eine weitere Verkürzung der Durchlaufzeiten in der Produkt- und Verfahrensentwicklung werden neben den modularen Planungsartefakten skalierbare Apparatekonzepte genutzt. Ziel ist es dabei, die Aufwände zum Aufbau einer Technikumsanlage einzusparen [BGKL12]. Dadurch soll eine direkte Übertragung der im Labor entwickelten Rezepturen, ohne die Durchführung aufwändiger Skalierungsberechnungen und Anpassungen, in die Produktion ermöglicht werden.

Dieses Vorgehen entspricht einer integrierten Produkt- und Prozessentwicklung. Abbildung 4-3 stellt die sich daraus ergebenden, grundsätzlich möglichen Zeiteinsparungen graphisch dar.

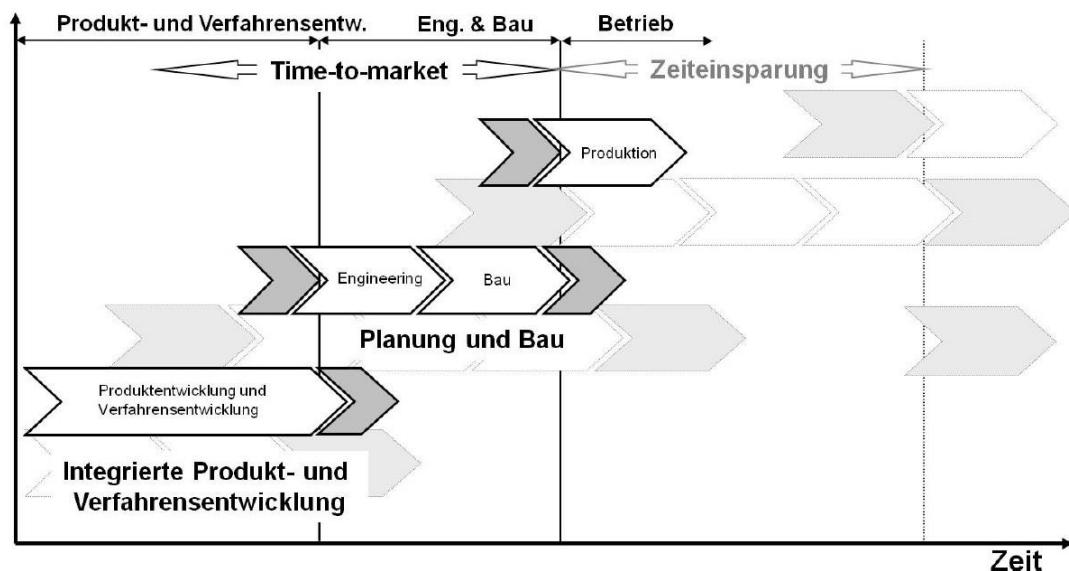


Abbildung 4-3: Time-to-market bei integrierter Produkt- und Verfahrensentwicklung [BGKL12]

Zu erkennen ist die frühzeitige und gleichzeitig zur Produktentwicklung im Labor stattfindende Entwicklung des Produktionsverfahrens. Dem schließen sich die Planung und der Bau der Produktionsanlage sowie die Produktion an.

Weitere Aktivitäten zur Umsetzung der 50%-Idee innerhalb der Verfahrenstechnik zeigen sich im Bestreben, die heute oft genutzten diskontinuierlichen Batch-Prozesse in kontinuierlich ablaufende Prozesse umzuwandeln [BGKL12]. Vorteile des kontinuierlichen Betriebs sind laut Maier:

- gleichbleibende Produktqualität,
- Verarbeitung kleinerer Volumen,
- Erreichen höherer Energiedichten,
- kürzere Einwirkzeiten,
- geringerer Raumbedarf durch erhöhte Packungsdichte und
- weniger Reinigungsaufwände. [Mai02]

Die Anwendung kontinuierlicher Produktionsverfahren erfolgt dazu unter Nutzung von Reaktortechnik mit höherer Wärmeaustauschfläche pro Volumeneinheit. Während dieser Quotient bei klassischen Rührkesselreaktoren bei $1\text{-}10 \text{ m}^2/\text{m}^3$ liegt, werden bei sogenannten Milli-Reaktoren $500\text{-}1000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ erreicht. [Mai02]

Neben dem modularen Planen innerhalb der Verfahrenstechnik gibt es auch Bestrebungen, die gesamte physikalische Produktionsanlage wandlungsfähig und damit modular zu gestalten. Eine exemplarische Umsetzung modularer Produktionsanlagen für die chemisch-pharmazeutische zeigen beispielsweise Forschungsprojekte wie F³-Factory (Fast, Flexible Future Production Processes) [Buc12a] oder COPIRIDE (Combining Process Intensification-driven Manufacture of Microstructured Reactors and Process Design regarding to Industrial Dimensions and Environment) [Loe13] sowie der dabei entwickelte EVOTRAINER der Firma Evonik [Koc13].

Bei der F³-Factory und dem COPIRIDE-Forschungsprojekt lag der Schwerpunkt allerdings auf der Modularisierung der verfahrenstechnischen Geräte und Apparate sowie auf deren Planungsartefakten. Die Betrachtung und Realisierung des Automatisierungssystems der Produktionsanlage war nicht Gegenstand der Untersuchung. So sind diese Produktionsanlagen im aktuellen Ausbau zwar verfahrenstechnisch modular, nicht aber automatisierungstechnisch. Als Automatisierungssystem wird weiterhin ein zentralistisches, monolithisches System genutzt, welches nach Abschluss der verfahrenstechnischen Planung, mit bekannten und klassischen Methoden geplant und erstellt wird.

Der Forderung nach Verkürzung der Zeit zwischen Produktidee und erstem veräußerbaren Produkt konnte in diesen Forschungsprojekten somit nur mit Maßnahmen innerhalb des Engineerings der Verfahrenstechnik entsprochen werden. Da die benötigte Zeit für die

Produktentwicklung, Laborversuche und Prozessentwicklung, als Schwerpunktaktivitäten der Verfahrenstechnik, etwa 50% des Gesamt-Engineerings umfasst, würde die alleinige Betrachtung des Gewerks Verfahrenstechnik nicht der Erfüllung der 50%-Idee genügen. Zur Erfüllung der 50%-Idee müssen somit auch die Aktivitäten anderer nachfolgender Gewerke betrachtet werden.

4.2. Plug-and-Produce - Ansätze und Technologien zur Integration von Modulen

Die Intention des Plug-and-Produce oder Plug-and-Work greift die Anforderungen eines Zeitbezuges auf. Diesen von der Büro-IT Plug-and-Play abgeleiteten Mechanismen liegt der Wunsch zu Grunde, Produktionssysteme ohne Störung des Produktionsbetriebes zu verändern, also zusätzliche Produktionsressourcen zu integrieren, zu separieren oder zu substituieren. Dabei sollen zeitaufwändige manuelle Eingriffe minimiert und durch automatische Mechanismen und Algorithmen ersetzt werden. Das Plug-and-Produce¹⁰ kann als spezielle Ausprägung des Wandlungsbefähigers Kompatibilität aufgefasst werden [JHN15]. Neben der reinen Fähigkeit zur Wandlung des Produktionssystems wird beim Plug-and-Produce zusätzlich das Kriterium der Schnelligkeit, also der benötigten Aufwände zur Wandlung eines Systems, in den Vordergrund gestellt.

Dabei soll:

1. der Aufwand zur Wandlung und damit die minimal benötigte Zeit so gering wie möglich sein und
2. die Beeinflussung der restlichen, nicht von der Wandlung betroffenen Produktionsanlage, so klein wie möglich gehalten werden.

Die Forderung nach einer schnellen Wandlungsfähigkeit besteht schon seit Längerem. Dabei wurde ersichtlich, dass dieser Wunsch durch Anwendung und Weiterentwicklung der Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) erfüllt werden kann [VDFJ14][ROBA14]. Die IKT wird in automatisierten Produktionssystemen zu einem großen Teil durch das Automatisierungssystem repräsentiert. Zur Erreichung des Plug-and-Produce-Gedankens bestehen somit erhebliche Anforderungen an das Automatisierungssystem und dessen Engineering.

¹⁰ Im Folgenden Synonym auch zum "Plug and Work".

4.2.1. Anforderungen der NE 148

Die Namur Empfehlung (NE) 148 [NE148] beschreibt eine Vielzahl von Anforderungen, die an das Automatisierungssystem durch modulare verfahrenstechnische Produktionsanlagen zu stellen sind. Sie enthält Anforderungen:

- zum allgemeinen Aufbau einer modularen verfahrenstechnischen Anlage,
- zur Ausstattung und zu den Systemgrenzen des Automatisierungssystems des Moduls,
- zum Instrumentierungskonzept und zur Identifikation der verbauten Sensoren und Aktoren,
- zu den Verantwortungsbereichen der beteiligten Parteien und Organisationen und
- zu den Inhalten Human Machine Interface (HMI), Diagnose und Alarmmanagement.

Die in der NE 148 dargestellten Aspekte beziehen sich nur auf die Anforderungen, wie es bei Namur Empfehlungen typischerweise der Fall ist. Eine technische oder technologische Lösung wird nur dort beschrieben, wo andere explizit ausgeschlossen werden sollen.

Der in der NE 148 beschriebene allgemeine Aufbau einer modularen verfahrenstechnischen Anlage geht von der Verwendung von Modulen aus, die in eine Integrationsumgebung (Backbone) über eine Dockingstation gekoppelt werden (vgl. Abbildung 4-4). Die Module erfüllen jeweils eine prozesstechnisch sinnvolle Aufgabe. Das Funktionsspektrum der Gesamtanlage ergibt sich somit durch die Summe aller angekoppelten Module und deren prozesstechnischen Funktion. Veränderungen der Anlagenfunktion werden durch Entnahme, Austausch oder Ergänzung von Modulen realisiert. Die Kapazität der Gesamtanlage wird durch eine parallele Anordnung baugleicher Module verändert. Durch Hinzufügen bzw. Entnahme der baugleichen Module kann die Produktionsmenge erhöht bzw. verringert werden. Dieses sogenannte Numbering-up entspricht damit dem Prinzip einer Mehrstranganlage, wobei die Anzahl der Stränge veränderlich ist.

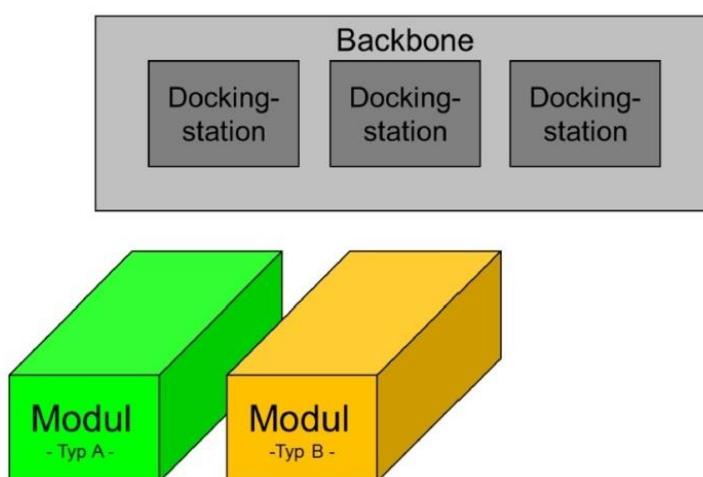


Abbildung 4-4: Allgemeiner Aufbau einer modularen Anlage nach [NE148]

Beim generellen Aufbau des Automatisierungssystems unterscheidet die NE148 ein System mit Remote I/O im Modul und ein System mit eigener Steuerung im Modul. Bei der Variante mit Einsatz einer Remote I/O im Modul befinden sich die Steuerungs- und Regelungsfunktionen, welche dem Modul zugehörig sind und dessen Funktionen steuern und überwachen, im übergeordneten Automatisierungssystem. Bei der Verwendung einer Steuerung im Modul können die Aufgaben der Basisautomatisierung und Koordinierungssteuerung innerhalb des Moduls ausgeführt werden.

Abbildung 4-5 der NE148 stellt links die Varianten mit Remote I/O und rechts die Variante mit eigener Steuerung dar.

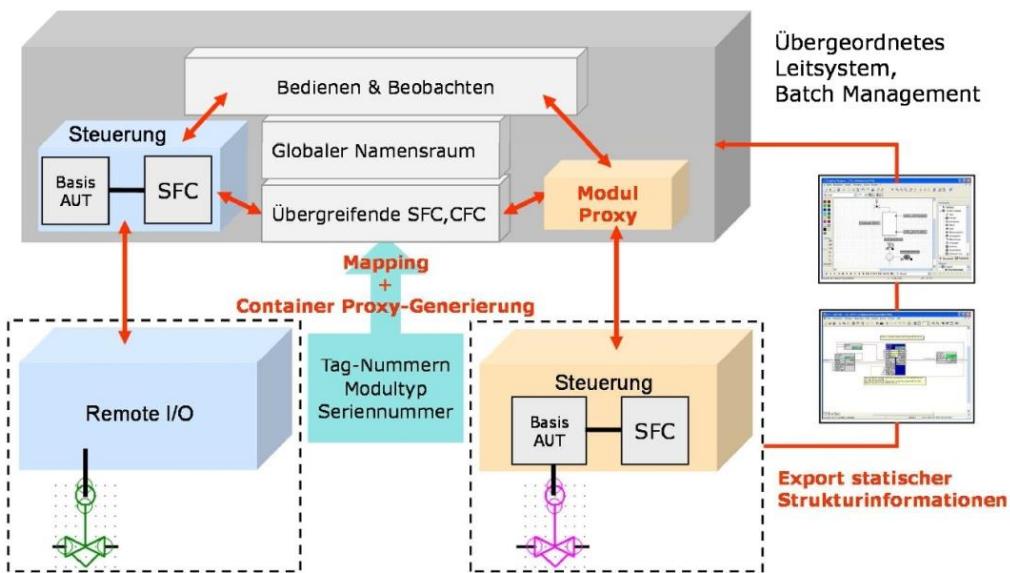


Abbildung 4-5: Mögliche Automatisierungsstrukturen gem. NE148

4.2.2. Herausforderung des Plug-and-Produce

Die Herausforderung, modular gekapselte Funktionalität in ein Gesamtsystem mit möglichst geringem Aufwand einzubinden und mit dieser Funktionalität vereinheitlicht zu kommunizieren, besteht nicht nur im Kontext modularer verfahrenstechnischer Anlagen. Auch in der Fertigungstechnik und Robotik haben Schnelllebigkeit der Produktion und die entsprechende Forderung nach Wandelbarkeit Einzug gehalten. In den Interessengemeinschaften, den Forschungs- und Entwicklungsabteilungen der betroffenen Industrieunternehmen sowie im akademischen Umfeld wurden aus diesem Grund schon zahlreiche Lösungsansätze erarbeitet, die ein Plug-and-Produce ermöglichen sollen. Alle haben zum Ziel, gekapselte Funktionalität mit möglichst geringem projektbezogenen Aufwand in ein System zu integrieren, wobei in vielen Ansätzen meist noch ein Plug-Configure-Check-Produce zu erkennen ist [OHU14], was zeigt, dass das völlige Fehlen von manuellen Eingriffen noch nicht erreicht wurde. In Plank et.al. wird diesem Umstand durch

Unterteilung in drei Stufen entsprochen: vollständig, halbautomatisch und konfigurierbar [PRG06].

Im Folgenden soll kurz beschrieben werden, was für eine erfolgreiche technische Lösung zu beachten ist.

Durch die Notwendigkeit, alle am Engineering und Produktionsprozess und damit auch während eines Plug-and-Produce-Vorganges beteiligten Artefakte elektronisch beschreiben zu können, hat sich die Dreiteilung in Produkt-, Prozess- und Ressource - Daten etabliert [DYM07]. Die Ressource stellt dabei das Mittel, mit dem die geforderte Funktion ausgeführt werden soll, die im Prozess beschrieben ist. Eine oder mehrere Ressourcen führen einen Prozess aus, um das gewünschte Produkt zu erzeugen oder in seinen Eigenschaften zu verändern [DYM07].

Das bedeutet, dass ein ganzheitlicher Ansatz zur technischen Realisierung eines Plug-and-Produce- Vorganges alle Aspekte einer Produktionsanlage beinhalten und die Daten und Informationen der Produkte, Prozesse und Ressourcen [VDI4499] betrachten muss.

Um eine Akzeptanz bei möglichen Anwendern zu finden, sollte eine geeignete Lösung darüber hinaus möglichst konform zu bestehenden Standards sein. Dadurch können getätigte Investitionen geschützt und die Schwelle zur industriellen Einführung der technischen Lösung herabgesetzt werden. Die Nutzung von Standards kann zum Beispiel durch die Verwendung bestehender industrieller Strukturen und Werkzeuge geschehen.

Die Kapselung einer Funktion in einer physikalischen Entität entspricht einer modularen Systemstruktur. Wie schon zuvor in Abschnitt 2.4 ausgeführt, kann dies nicht losgelöst von der Nutzung geeigneter Modelle, Prozesse und Methoden geschehen. Die im Folgenden vorgestellten Lösungskonzepte und Technologien enthalten daher Anteile von Modellen, Prozessen und Methoden. Zum besseren Verständnis werden sie in zwei unterschiedliche Aspekte eingruppiert¹¹:

Kommunikationsarchitekturen und -protokolle sowie

Beschreibungsmittelbasierte Middleware und alternative Systemarchitekturen.

Die Reihenfolge der technischen Lösungen, Technologien und Ansätze enthält keine Aussage zur technischen Reife oder Anwendbarkeit.

4.2.3. Vereinheitlichte Kommunikationsprotokolle und -architekturen

Vereinheitlichte Kommunikation ist ein Schlüssel zur Realisierung von Wandlungsprozessen durch Plug-and-Produce-Vorgänge und wird im Umfeld zukünftiger Industrie 4.0

¹¹ Die Ansätze berücksichtigen meist nicht nur einen Aspekt. Auf die Nennung und Ausführung in einem anderen Aspekt wurde aus Gründen der Übersicht verzichtet.

Anwendungen entscheidend [WDGF14]. In diesem Abschnitt werden verschiedene Ansätze unterschiedlicher Anwendungsdomänen dargestellt und dahingehend überprüft, ob sie geeignet sind, im Kontext modularer verfahrenstechnischer Produktionsanlagen genutzt zu werden.

ORiN (Open Ressource for the Network) ist ein Ansatz, der von der japanischen Robot Association erarbeitet wurde. ORiN umfasst die Kommunikation zwischen den Steuerungen der Produktionsressourcen und den Systemen der Prozessleitebene. Ziel dieses Ansatzes ist es, eine hersteller- und systemunabhängige Schnittstelle zu etablieren, was durch die Definition vereinheitlichter Kommunikationsfunktionen geschieht. Diese umfassen typische, zur Kommunikation eines Roboters notwendige Aktivitäten, Trajektorienübermittlung und Teaching-Mechanismen. Mit Hilfe dieses Ansatzes wurden Roboter verschiedener Hersteller und Spezifikationen miteinander verbunden und koordiniert [MKI01]. In einer Weiterentwicklung ist es auch möglich, Bewegungstrajektorien mit Hilfe von cutter-location-Positionen (CLData) zu übermitteln [NOW14].

ORiN betrachtet nur die technische Ressource im Produktionsumfeld. Prozess und Produkt werden nicht betrachtet. Zudem ist dieser Plug-and-Produce-Ansatz sehr vom Anwendungsfall der Robotik geprägt. Dieser Anwendungsfall unterscheidet sich stark von der Prozessindustrie. Ein Übertragen der Mechanismen auf die modularen Produktionsanlagen der Prozessindustrie ist somit nur sehr beschränkt möglich.

Der Weihenstephaner Standard umfasst ein Kommunikationsprotokoll zur Effizienzanalyse, zum Erfassen und Verfolgen von Chargen, Transporteinheiten und Aufträgen und zur Überwachung der Produktqualität und Produktionsprozesse. Er wurde von der Technischen Universität München in Zusammenarbeit mit der Firma Weihenstephan vornehmlich für die Lebensmittel- und Verpackungsindustrie entwickelt. Der Datenaustausch setzt sich aus verschiedenen vereinheitlichten Statuswörtern mit Befehlen (read, write, ...), ergänzt um Datenpunkte (Chargen, Zustände, ...), zusammen und basiert auf dem Ethernet-TCP/IP Protokoll.

Die Intention des Weihenstephaner Standards ist die Schaffung einer standardisierten Betriebsdatenerfassung. Die Informationen werden damit vom Produktionssystem hin zum Betriebsdatenerfassungssystem übertragen. Zur Etablierung einer Prozessführungskomponente oder von Mechanismen, die eine Maschine in ein Gesamtsystem integrieren sollen, muss dieser Ansatz erweitert werden. Er eignet sich somit nicht als alleiniger Ansatz für die Umsetzung eines Plug-and-Produce.

SOA (Serviceorientierte Architektur) stellt ein Paradigma zur Realisierung verteilter Softwaresysteme mit Fokus auf die Informationstechnologie und Geschäftsprozesse dar [OAS12]. Der Grundgedanke einer SOA ist die Kapselung von Softwarefunktionen in sogenannten Services. Die Leistung, welche sich hinter einem Service befindet, wird über

standardisierte Schnittstellen aufgerufen, so dass das aufrufende System keine tiefergehende Information über die konkrete Implementierung des Service hat.

Die drei Parteien, die an einer SOA beteiligt sind, bestehen aus Serviceanbieter, Servicenutzer und Serviceverzeichnis. Der Serviceanbieter veröffentlicht seinen Service im Serviceverzeichnis. Ein potentieller Servicenutzer durchsucht das Serviceverzeichnis nach entsprechender Funktionalität und erhält bei Übereinstimmung der Anforderungen des Servicenutzers mit der Servicebeschreibung des Serviceanbieters die Referenz auf den Serviceanbieter. Der Servicenutzer kann nun direkt mit dem Serviceanbieter kommunizieren (Binding), den Service abrufen und nutzen.

Die für das Auffinden und Vergleichen der Funktionen erforderliche Semantik wird mit Hilfe von Beschreibungssprachen ermöglicht. SOAP (Simple Object Access Protocol) oder WSDL (Web Services Description Language) sind in dem Zusammenhang weit verbreitet. Mit ihnen lassen sich die Funktionen innerhalb der Services beschreiben, austauschen und das dynamische Verbinden (Binding) realisieren. SOA als Architekturparadigma eignet sich alleine noch nicht für die Umsetzung von Plug-and-Produce, hat allerdings geeignete Voraussetzungen, muss aber durch entsprechende Anwendungskonzepte, wie folgend geschildert, erweitert werden.

Im Projekt SOCRADES (Service-Oriented Cross-Layer Infrastructure for Smart Embedded Devices) [CGT09], [BDC08] sollen mit Hilfe von Device Profiles for Web Services (DPWS) innerhalb einer SOA [OAS12] intelligente Feldgeräte integriert, parametriert und die Wertekommunikation ermöglicht werden. Ziel des Projektes ist es, Synergien aus der drahtgebundenen und drahtlosen IT-Kommunikation zu erzielen. Das Projekt fokussiert damit auf die technische und technologische Umsetzung der Kommunikation zwischen Feldgeräten und Anwendungen.

Kuntz [Kun13] nutzt Services, um in Wireless-Sensor-Aktor-Netzwerken die Adressierung und Zustellung entsprechender Datenpakete zu realisieren. Er berücksichtigt dabei auch die Unzuverlässigkeit sehr großer drahtloser Netzwerke.

Sowohl im Projekt SOCRADES als auch bei Kuntz wird der Plug-and-Produce-Gedanke auf der Ebene der Feldgeräte betrachtet. Für eine komplette Umsetzung von modularen und wandlungsfähigen Produktionssystemen, bei denen Komplexität in Modulen gekapselt werden soll, ist die reine Betrachtung von Feldgeräten allerdings nicht ausreichend.

Yu wendet in [YQD10] die Grundsätze der SOA auf die Prozessanlagen an. Dabei definiert er eine Servicehierarchie, bei der Single Control Units (SCU) für einen Aktor, Group Control Units (GCU) für Gruppen von SCU's und Action Control Units (ACU) für eine prozessspezifische Ablaufsequenz definiert werden. Auf Seiten der Sensorik werden read-only-Services genutzt.

Mersch stellt in [MSE10] eine Klassifizierung von Services im Kontext der Automatisierungstechnik vor. Hier werden Services in domänenabhängige (zum Beispiel für die Darstellung, Diagnose und Regelung) und domänenunabhängige Basis-Services (zum Beispiel für Anfragen oder Authentifizierung) unterteilt. Diese domänenunabhängigen Services, im Sinne eines Klassenansatzes, sollen von typischen Geräten und bei typischen Funktionsausführungen genutzt, also instanziert werden.

Yu und Mersch wenden SOA auf einem sehr abstrakten Level an, ohne konkreten Bezug zu Herausforderungen im Umfeld von modularen Produktionsanlagen zu nehmen. Für ein vereinheitlichtes Plug-and-Produce- Szenario in wandlungsfähigen Produktionsanlagen sind sie somit nur mit Erweiterungen und Spezifizierungen der technischen Umsetzung der Werkzeuglandschaft zu nutzen.

OPC-UA (Object linking and embedding for Process Control - Unified Architecture) ist ein herstellerunabhängiges Maschinen- zu- Maschinen- Kommunikationsprotokoll. Das Fundament von OPC-UA setzt sich aus der Informationsmodellierung und einem Übertragungsprotokoll zusammen. Die Bedeutung der auszutauschenden Informationen ist im Informationsmodell enthalten. Durch den Ort eines Datums (Node) innerhalb der Struktur des Informationsmodells und durch verschiedene Referenzen lässt sich die Semantik modellieren. Verschiedene Kommunikationsteilnehmer können ihre Informationsmodelle nach Strukturen durchsuchen und damit Informationen über den Aufbau und die Funktion der beteiligten Partner erhalten. Zum Austausch der Werte eines Nodes stehen zwei Varianten zur Verfügung: Mit dem binary TCP protocol können hohe Geschwindigkeitsanforderungen realisiert werden. Mit der zweiten Variante kann Information über xml-basierte Nachrichten ausgetauscht werden.

OPC-UA wird vermehrt in aktuellen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben genutzt. Nicht zuletzt weil diese Technologie die Möglichkeit aufweist, Kommunikationsvariablen mit deren Bedeutung zu verbinden. So können statisch beschreibende Modelle, die zum erstmaligen Aufbau einer Kommunikation benötigt werden, u.U. entfallen, da sie direkt und dynamisch im OPC-UA- Informationsmodell abgebildet werden können. Genauso wie SOA als Paradigma ist OPC-UA als Kommunikationstechnologie alleine nicht dazu geeignet, Plug-and-Produce von wandlungsfähigen Produktionssystemen umzusetzen. Dazu muss es durch geeignete Anwendungskonzepte erweitert werden.

Linden [LMK11] nutzt OPC-UA, um das Theorem der normalisierten Systeme (\rightarrow 3.1) auf Automatisierungssysteme im Produktionsumfeld anzuwenden. Dabei werden die Schnittstellen von ISA88-konformen Control-Modulen [ISA88] im OPC-UA-Informationsmodell abgebildet und hinsichtlich der Veränderbarkeit und Kombinierbarkeit mit anderen Control-Modulen untersucht. Allerdings unterliegt auch OPC-UA semantischen Grenzen. So stellt Linden fest, dass zum Beispiel das Phase-Logic-Interface, also die vereinheitlichte Ablaufmethodik zum Austausch der Control-Modul-Status, nicht ohne

weiteres im OPC-UA-Informationsmodell abgebildet werden kann. Dies muss zunächst vereinheitlicht werden.

Linden betrachtet im Schwerpunkt die Ressource eines Produktionssystems. Ein Produkt und eine Prozessansicht werden nicht berücksichtigt, was eine alleinige Anwendung als Plug-and-Produce-Lösung ausschließt.

4.2.4. Beschreibungsmittelbasierte Middlewares und alternative Systemarchitekturen

Ein weiterer Aspekt zur Realisierung von Plug-and-Produce ist die Nutzung von Beschreibungsmitteln und Modellen in Middleware und alternativen Systemarchitekturen zum Austausch von Daten und Information zu Produkt, Prozess und Ressource.

Feldgeräteintegration und -parametrierung mit Hilfe FDT/DTM, FDI

Bei der Feldgeräteintegration geht es vornehmlich um die Integration des Datenhaushaltes eines Feldgerätes in den des Prozesseleitsystems bzw. denen der MES/ERP-Ebenen. Diedrich und Hadlich beschreiben die Feldgeräteintegration durch Aufstellen einer Integrationslandschaft und unterteilen sie in zehn aufeinanderfolgende Arbeitsschritte [DiHa13].

Der erste Schritt ist die Planungs- und Beschaffungsintegration, als merkmalbasierte Beschreibung der Gerätetypen und -eigenschaften. Darauf folgt die Integration in die Kommunikationssysteme durch Konfiguration einer passenden Kommunikationsschnittstelle. Dieser Schritt soll möglichst herstellerunabhängig, einfach und robust geschehen [Sch10]. Konnten einfache Feldgeräte noch mit dem Beschreibungsformat GSD (General Station Description) integriert werden, besteht bei intelligenten Feldgeräten auch erhöhter Parametrierungs-, Konfigurations- und Diagnoseaufwand [DiHa13]. Die Spanne von Werkzeug und Beschreibungskomponenten zur Unterstützung dieses Schritts reicht von textbasierten Sprachen, zum Beispiel der Electronic Device Description Language (EDDL), über programmmbasierte Ansätze, welche in einer Rahmenapplikation lauffähig sind (zum Beispiel Device Type Manager (DTM) in Field Device Tool (FDT)), bis hin zu Mischformen, wie der Field Device Integration (FDI).

Die unterschiedlichen technischen Ansätze können auch ineinander überführt werden. Shan et.al. beschreiben ein Projekt, in dem ein EDDL-Interpreter und ein User-Interface-Generator in einen DTM programmiert wurde [SWH10]. Dies ermöglicht die Integration von Feldgeräten mit EDD- oder FDI- Beschreibungsformaten unter Zuhilfenahme der FDT/DTM-Technologie. Damit lässt sich auch die zurzeit eingeschränkte Unterstützung von Kommunikationstechnologien durch FDI (lediglich Hart, Profibus und Foundation Fieldbus) überbrücken.

Die Autoren in [ORW13] und [OHU14] untersuchen mehrere Beschreibungsmittel u.a. zur Feldgeräteintegration. Ihre Intention ist es, die Verhaltens-, HMI-, Alarm- und Archivierungsaspekte einer Package Unit mit Hilfe der Beschreibungssprache EDDL abzubilden und somit die heute noch sehr umständliche und fehleranfällige Integration von Package Units in Prozessleitsysteme zu vereinfachen und zu beschleunigen. Die Autoren kommen allerdings zu dem Schluss, dass der Sprachumfang von EDDL erweitert werden muss, um semantische Verweise auf Merkmalsysteme wie eCl@ss oder die in der Reihe IEC 60050 [IEC60050] veröffentlichten Internationalen Elektrotechnischen Wörterbücher setzen zu können. Auch John und Danzer fordern eine solche Erweiterung der Anwendung für selbstbeschreibende Feldgeräte [JDR13].

Das Forschungsprojekt EmsA (Erstellung eines Entwicklungssystems für modulare, selbstkonfigurierende Visualisierungen zur Anlagenüberwachung) [BHJ09] hat die automatische Integration von Anlagenkomponenten und deren Visualisierung zum Ziel. Die Schnittstellenbeschreibung des Gerätes erfolgt über die Field Device Configuration Markup Language (FDCML). Für den Transport und die Beschreibung der Bedienbilder werden in einem Prototyp skalierbare Vektorgraphiken genutzt. Die Darstellung der Bedienbilder erfolgt durch Nutzung der Mozilla-Webtechnologie. Das Forschungsprojekt EmsA sieht die Integration von Feldgeräten nur zu Parametrierungs-, Diagnose- und Konfigurationszwecken vor. Die Übertragbarkeit des Forschungsansatzes auf das Engineering der Automatisierungstechnik von Prozessanlagen ist allerdings nicht unmittelbar möglich. So ist für die dynamische Anzeige von Messwerten während des Betriebs der Anlage die alleinige Verwendung von Web-Technologien nicht ausreichend. Zudem ist der ausschließliche Aspekt der Visualisierung einer Anlage nur ein Bestandteil eines Plug-and-Produce- Szenarios. EmsA müsste somit um weitere Aspekte zum Beispiel der Prozessführung und des Alarmmanagements erweitert werden, um den Anforderungen des Engineerings von Prozessanlagen zu genügen.

Im Forschungsprojekt Plug-And-Play Antriebs- und Steuerungskonzepte für die Produktion von morgen (PAPAS) [PRG06] wurden ein neues Kommunikationsmodell und ein entsprechendes Kommunikationsprotokoll entwickelt, welche die Integration von Antrieben im Kontext von Industrierobotern beschleunigen sollen. Das Master-Slave-Verfahren (Master entspricht einer Anwendung; Slave einem Gerät) teilt den physikalischen Datentransfer (EtherCat und Powerlink) in logische Anteile auf, sogenannte Pipes. Ein Pipe entspricht dabei einer etablierten Kommunikationsverbindung. Die entwickelte Kernsoftware unterteilt sich in mehrere funktionale Schichten. Die Hub-Client- Software koordiniert die Konfigurationsaktivitäten, die nach Erkennen eines neuen Gerätes ausgeführt werden müssen. In PAPAS wurde auf folgende Funktionen fokussiert:

- Erkennen von hinzugefügten Geräten
- Durchführen von Standard-Kontroll-Aktivitäten (Endpunktsetzung)

- Datenaustausch zwischen Master und Geräten
- Erstellen von Statistiken über Zustand und Aktivität
- und Überwachung der Kommunikation

PAPAS betrachtet somit die Ressource und überwacht den Prozess über die entwickelte Schnittstelle. Informationen zum Prozess werden in Abhängigkeit der vom Benutzer gewählten Betriebsart über sogenannte Systemvariablen ausgetauscht. Da PAPAS die technische Lösung ausschließlich für den Bereich der Motoren im Umfeld von Industrierobotern betrachtet, ist eine Anwendung bei modularen verfahrenstechnischen Anlagen ohne weitere Ergänzungen nicht möglich.

AutomationML ist ein neutrales Datenmodell zum Austausch von Anlagen- und Anlagenplanungsdaten. Der in der IEC 62714 [IEC62714] genormte Standard basiert auf dem Datenaustauschformat Computer Aided Engineering Exchange (CAEX). CAEX enthält ein Hierarchiemodell, welches durch eine Rollenbibliothek und zwei Klassenbibliotheken semantisch ergänzt wird. Neben CAEX werden graphische und geometrische Informationen mit Hilfe von Collada und Quelltext von SPS mit Hilfe von PLCopenXml modelliert. Alle drei Datenmodelle können in xml modelliert werden.

AutomationML ist als statisches Datenmodell dafür geeignet, Daten zu modellieren und diese Struktur für einen Computer lesbar zur Verfügung zu stellen. Für die Umsetzung innerhalb eines Plug-and-Produce-Szenarios muss dieses Datenmodell allerdings in geeignete Lösungskonzepte, wie sie zum Beispiel folgend beschrieben werden, eingebunden werden.

Im Forschungsprojekt Produflexil (Flexible Anbindung von Produktionsanlagenmodulen durch Adaptivität und Selbstkonfiguration) [SWB09] wird eine Systemstruktur vorgestellt, mit der die Schnittstellen zwischen intelligenten Modulen und einem übergeordneten Bedien- und Beobachtungssystem koordiniert werden können. Dabei wird das Plug-and-Produce mit Hilfe der Anpassung des Steuerungscodes innerhalb des Produktionsmoduls realisiert. Das System und die darauf wirkenden Änderungen werden zunächst simuliert und beurteilt. Anschließend können die aus der Simulation ermittelten Erkenntnisse auch in der physischen Welt umgesetzt werden. Beide Welten sind in einen Change Manager und ein übergeordnetes Kontrollsysteum unterteilt. Die Change Manager koordinieren bei Änderungen der Anlage sowohl die Kommunikation zu den neu hinzugekommenen bzw. veränderten Modulen als auch deren Darstellung im übergeordneten Kontrollsysteum.

Das Produflexil-Projekt zielt sehr stark auf Anwendungen im Intralogistik-Bereich. Als Anlagendemonstrator wurden Förderbänder und Drehtische zum Rangieren von Bauteilen genutzt. Die dazu benötigten Mechanismen zur Änderung des Steuerungscodes sind allerdings nur begrenzt geeignet, um in die Verfahrenstechnik mit den dort vorzufindenden Anforderungen überführt zu werden. Zudem werden die Mechanismen für den Abgleich

zwischen realer und virtueller Welt im Projekt nicht bearbeitet [SWB09]. Diese sind aus der aktuellen Sicht und dem Grundverständnis dieses Ansatzes allerdings als entscheidend einzustufen.

Das Forschungsprojekt Plug & Control for flexible transport equipment based on AutomationML (PCFF), bearbeitet durch Schleipen et.al. [SHW14], nutzt Teile des Projektes Produflexil und stellt dar, wie Transportmodule automatisch in einem übergeordneten Automatisierungssystem abgebildet werden können. Auf Basis der physikalischen Anordnung werden die Transportmodule untereinander konfiguriert und koordiniert. Das Bedien- und Beobachtungssystem der Anlage wird mit AutomationML gespeist, wobei CAEX den strukturellen Aufbau eines Moduls enthält und der Collada-Anteil die graphischen Beschreibungen zur Darstellung eines Transportmoduls umfasst. Die Collada-Darstellung wird von einer 3- auf 2-dimensionale Darstellung reduziert und dann als Grafik auf einem Bedienbild abgebildet.

Dieser Ansatz zeigt auf, wie eine Bedien- und Beobachtungsfunktion für Module mit begrenzter Funktion (hier nur Transportieren) realisiert werden kann. Die genutzten Beschreibungsmittel sind in ihrer Struktur allerdings nicht vereinheitlicht und es ist darüber hinaus notwendig, eine separate Schnittstelle für jedes zu bedienende Zielsystem vorzuhalten. Auch die Vorgabe eines Transportziels oder eines Transportpfades des zu transportierenden Objekts muss bei dieser Lösung über eine proprietäre Zusatzsoftware erfolgen. Als Plug-and-Produce-Szenario in Produktionsanlagen der chemisch-pharmazeutischen Industrie lassen sich die Lösungen des obigen Ansatzes nur schwer überführen.

SIARAS (Skill-based Inspection and Assembly of Reconfigurable Automation Systems) [Eig08] ist ein wissensbasierter Ansatz zur automatischen Rekonfiguration von automatisierten Systemen der Stückfertigung. Dazu werden die Fähigkeiten und Merkmale der verbauten Geräte und Apparate, zum Beispiel Förderbänder und Roboter, sowie die damit realisierte Prozessfunktion und deren Anschlussbedingungen in einer Ontologie modelliert. Mit Hilfe dieser Wissensbasis können nun Anfragen ausgewertet und eine passende Lösung gesucht werden. Aufbauend auf einem Prozesstemplate mit geforderten Prozessfunktionen werden sie um spezielle Anforderungen sowie Toleranzen ergänzt. Wird eine entsprechende Lösung gefunden, können Prozessparameter der ausgewählten Geräte angepasst werden. Abschließend wird eine Konfigurationsdatei erzeugt, die in das Gerät geladen wird. Aufbauend auf der Wissensbasis werden weitergehende Funktionen vorgestellt, wie beispielsweise Simulationen zur Kollisionserkennung oder zum Optimieren von Prozessparametern. Die Ansätze sind zunächst allgemein gehalten, um sie dann im Bereich der Roboterfertigung anzuwenden.

Eine Überführung des Ansatzes in andere automatisierte Produktionssysteme wird jedoch nicht diskutiert. Er ähnelt sehr dem Ansatz von Schleipen (PCFF). So wird zunächst ein

Problem virtuell bearbeitet, um anschließend eine Lösung in die reale Welt zu überführen. Damit sind auch die Einschränkungen identisch.

Pöschmann & Krogel beschreiben in [PoKr00] ein Autoconfiguration Management Framework für Feldbusse (ACFG), bei dem speziell Bezug auf die Kommunikationstechnologie PROFIBUS-DP genommen wird. Die in diesem Ansatz bearbeiteten Anforderungen sind die automatische Geräteaddress- und Variablenadressvergabe, das automatische Auslesen der Gerätestammdaten über die gsd-Datei und der systematische Austausch eines defekten PROFIBUS-DB Gerätes.

Dazu wurde das Autoconfiguration Management Framework (ACFG) entwickelt, welches verschiedene Anlaufstrategien der Geräte verfolgen kann, um somit den Inbetriebnahmeprozess zu steuern. Die ausschließliche Betrachtung von Feldgeräten im Kontext eines Plug-and-Produce- Vorganges macht deutlich, dass die Ressource im Vordergrund steht. Die Anteile des Prozesses oder des Produktes werden bei diesem Ansatz nicht betrachtet.

Die SmartFactory^{KL} DFKI ist ein Forschungs- und Förderverbund aus verschiedenen Herstellern, Anwendern und Forschungsinstituten. An einer Modellfabrik, bestehend aus mehreren Modulen unterschiedlicher Hersteller, können die entwickelten Ansätze implementiert werden. [Los13] stellt einen Ansatz vor, mit dem sich Funktionen von Feldgeräten koordinieren lassen. Dabei wird das zu bearbeitende Produkt auf einen intelligenten Werkstückträger aufgelegt. Im Inneren des zu bearbeitenden Produktes ist ein RFID-Chip enthalten, auf dem die fertigungsrelevanten Daten und eine abstrakte Prozessbeschreibung gespeichert sind. Der Werkstückträger liest diese Information aus und sendet diese durch drahtlose Kommunikation an ein Orchestrierungswerkzeug. Dieses Orchestrierungswerkzeug enthält die Information der zur Verfügung stehenden Bearbeitungsgeräte und kann die abstrakte Prozessbeschreibung des Produktes in einen konkreten und produktspezifischen Prozess umwandeln.

Der Ansatz der SmartFactory DFKI fokussiert klar auf die Anwendungsdomäne der Fertigungsautomatisierung. Grundannahme ist hier immer, dass das Produkt mit einem Gedächtnis, hier durch RFID-Technologie umgesetzt, ausgestattet ist. Das Produkt wird durch Transportsysteme von Fertigungs- zu Fertigungsstation verbracht, wodurch diese zeitlich und funktional entkoppelt werden. Durch die zentrale Nutzung eines Speicherchips im Produkt fällt eine Übertragung in verfahrenstechnische Produktionsanlagen allerdings schwer, da dort das Produkt meist formlose, fluide, gasförmige und granulare Eigenschaften aufweist. Des Weiteren basieren die Vorgänge innerhalb der SmartFactory DFKI auf Lösungen, die nicht durch industrielle Standards abgedeckt sind. Eine Anwendung der Mechanismen außerhalb der SmartFactory DFKI ist somit nur eingeschränkt und nicht ohne umfangreiche Investitionen möglich.

Der Ansatz Dezentrale Intelligenz für modulare Anlagen (DIMA) [HOF14] ist ein Konzept, mit dem prozesstechnische Module in ein übergeordnetes Automatisierungssystem eingebunden werden können. Dabei wird zugrunde gelegt, dass die Module über eine eigene SPS verfügen. Das DIMA-Konzept sieht vor, dass die Module von einem Modulhersteller geplant, erbaut, programmiert und im Rahmen eines Factory Acceptance Tests in Betrieb genommen werden. Zu einem späteren Zeitpunkt erfolgt die Auswahl des Moduls durch einen Anlagenbetreiber. Dieser hat Kenntnisse über das zu produzierende Produkt und den dafür notwendigen Prozess und wählt dazu passende Module über spezifische Merkmale aus.

DIMA geht davon aus, dass das Modul-Engineering vor der Integration des Moduls in die Anlage geschieht. Für die Integration eines Moduls in ein Produktionssystem wird die benötigte Information über das Modul in einem Modul Type Package (MTP) gespeichert. Das MTP enthält nur Informationen zur Ressource und über die mit dem Modul ausführbaren Prozessaktivitäten und Darstellungsformen.

Während der Integration werden zum Beispiel die Bedienbilder im Bedien- und Beobachtungswerkzeug erzeugt und die Kommunikationsverbindung zum Modul angelegt und parametriert. Ist das Modul in das Automatisierungssystem der Gesamtanlage eingebunden, so kommen Informationen zum Produkt und Prozess vom Anlagenbetreiber hinzu. Die Kommunikation zwischen übergeordnetem AT-System und Modul erfolgt dienstbasiert in Form einer SOA. Das Modul stellt die ausführbaren Prozessaktivitäten als Dienstleistung zur Verfügung, die vom Anlagenbetreiber zur gewünschten Zeit und Folge parametriert abgerufen werden können.

4.2.5.Zusammenfassung und Auswirkungen auf das Engineering

Modularität als Befähiger für wandlungsfähige Produktionsanlagen ist auch im industriellen Umfeld als Denkansatz akzeptiert. So haben sowohl die NAMUR, als Interessenverbund der Anwender, als auch der ZVEI, als Vereinigung der Anbieter von Automatisierungstechnik, Arbeitskreise etabliert, die sich mit der Umsetzung von modularen Produktionsanlagen beschäftigen. Dass ihre industrielle Anwendung noch ein langer Weg ist, zeigen die zahlreichen, konkurrierenden akademischen Ansätze modularer Systemstrukturen. Im Umfeld der Forschung und Entwicklung im Bereich der Verfahrenstechnik kann man zum einen die Aktivitäten für die modulare Planung ausmachen, welche zur Verringerung der Komplexität des Engineerings angedacht ist, und zum anderen die physikalische Realisierung von modularen Produktionsanlagen unter gleichzeitiger Umsetzung von Prozessintensivierungsmaßnahmen und der Überführung von diskontinuierlichen in kontinuierliche Prozesse.

Mit der 50%-Idee ist im Kontext der wandlungsfähigen Produktionsanlagen die Zeit als Faktor eingeführt worden. Der minimale Aufwand für die Durchführung eines

Wandlungsvorganges soll so gering wie möglich ausfallen und wird zum entscheidenden Erfolgskriterium. Eine Betrachtung von Wandlungsprozessen modularer Produktionssysteme unter der Eigenschaft der dafür benötigten Zeit führt zum Plug-and-Produce- Gedanken, bei dem zeitaufwändige manuelle Eingriffe minimiert oder durch automatische Mechanismen und Algorithmen ersetzt werden sollen. Dadurch wird die Automatisierungstechnik der zentrale Hebel zur Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsanlagen. Aus diesem Grund wurden verschiedene automatisierungstechnische Ansätze untersucht und auf Anwendbarkeit von Plug-and-Produce- Szenarien im Bereich modularer verfahrenstechnischer Produktionsanlagen untersucht.

Tabelle 4-1: Übersicht über untersuchte Plug-and-Produce- Ansätze

	Produkt / Prozess / Ressource	Anwendungsdomäne	Betrachtungsgegenstand	Beachtung der NE 148	Bemerkungen
ORIN	Nur Ressource	Robotik	Achsantriebe	Nein	Keine Betrachtung modularer Strukturen
Weihenstephan	Alle	Lebensmittel und Verpackung	Produktionssystem	Teilweise	Keine Prozessführung sondern Betriebsdatenerfassung
SOCRADES	Nur Ressource	Prozess-automatisierung	Intelligente Feldgeräte	Nein	Fokussierung auf die Kommunikation zwischen Feldgerät und Software
Kuntz [Kun13]	Nur Ressource	Prozess-automatisierung	Feldgeräte	Nein	Fokussierung auf die kabellose Kommunikation zwischen Feldgerät und Software
Yu [YQD10]	Nur Ressource	Produktion allg.	Produktionssystem	Nein	Sehr abstrakt. Kein direkter Bezug auf modulare Produktionssysteme
Mersch [MSE10]	Keine Aussage	Produktion allg.	Keine Aussage	Nein	Sehr abstrakt. Kein direkter Bezug auf modulare Produktionssysteme

Linden [LMK11]	Nur Ressource	Produktion allg.	Produktions-system	Nein	Ausschließlich Schnittstellenbetrachtung eines ISA S88 Controlmodules
EmsA [BHJ09]	Alle	Produktion allg.	Produktions-system	Nein	Nur der Aspekt der Visualisierung wurde betrachtet. Keine Prozessführung
PAPAS [PRG06]	Ressource und Prozess	Robotik	Achsantriebe	Nein	Sehr umfangreicher Ansatz im Bereich Robotik
Produflexil [SWB09]	Ressource und Prozess	Transport	Laufbänder verschiedener Größen	Teilweise	Nur der Aspekt der Visualisierung wurde betrachtet. Prozessführung erfolgt über proprietäre Schnittstelle
PCFF [SHW14]	Ressource und Prozess	Transport	Laufbänder verschiedener Größen	Teilweise	Nur der Aspekt der Visualisierung wurde betrachtet. Prozessführung erfolgt über proprietäre Schnittstelle
SIARAS [Eig08]	Alle	Fertigungs-automatisierung	Förderbänder und Roboter	Nein	Wissensbasierter Ansatz zur Roboter Inbetriebnahme
Pöschmann [PoKr00]	Nur Ressource	Produktion allg.	Profibus-DP Teilnehmer	Nein	Schwerpunkt der automatischen Adressvergabe in Profibus-DP Kommunikation
DIMA [HOF14]	Alle	Prozess-automatisierung.	Produktions-system	Ja	Trennung des Engineerings in zwei Prozesse. Betrachtung der Prozessführung und Visualisierung
Smart Factory DFKI [Los13]	Alle	Fertigungs-automatisierung	Produktions-system	Teilweise	Nutzung eines intelligenten Werkstückträgers schließt die Verwendung in der Verfahrenstechnik aus

Die Untersuchung bestehender Ansätze zur vollautomatischen Integration von Geräten und Modulen in übergeordnete AT-Systeme zeigt, dass zum jetzigen Zeitpunkt keine ganzheitliche und vereinheitlichte Lösung existiert.

In der Robotik besteht die Herausforderung, die Antriebsmotoren und Encoder zu integrieren und in Betrieb zu nehmen. Ein Prozess im Kontext einer roboterbasierten Produktion ist naturgemäß durch die Pfad- und Trajektorienberechnung geprägt. Eine Überführung dieser Ansätze in die Verfahrenstechnik ist nur schwer denkbar. Ansätze der Fertigungsautomatisierung basieren meist auf der Intelligenz im zu bearbeitenden Werkstück. Diese Voraussetzung ist in verfahrenstechnischen Anlagen nicht gegeben.

Tabelle 4-1 gibt einen Überblick über die Untersuchungsergebnisse. Grüne Felder signalisieren, dass das Ergebnis der entsprechenden Spalte als erfüllt angesehen wird. Bei einem orangen Hintergrund wird die Anforderung nicht voll erfüllt.

Für die Verwendung im Bereich wandlungsfähiger verfahrenstechnischer Produktionsanlagen ist der DIMA-Ansatz somit am besten geeignet. Er betrachtet sowohl Prozess, Produkt, Ressource als auch die Anforderungen der NE148. Zudem steht er nicht im Widerspruch zu bereits existierenden Ansätzen aus der Verfahrenstechnik, wie zum Beispiel zu den Projektergebnissen aus der F3-Factory oder COPIRIDE. Der DIMA-Ansatz soll somit in den weiteren Betrachtungen und Diskussionen innerhalb dieser Arbeit als Basis dienen. Im Folgenden soll der DIMA-Ansatz vertiefend betrachtet werden.

4.2.6. Vertiefende Betrachtung des DIMA-Ansatzes

Einen plötzlichen und unmittelbaren Übergang hin zu wandlungsfähigen Produktionsanlagen wird es in der Prozessindustrie nicht geben. Vielmehr werden erste Realisierungen modularer Anlagen Mischformen von klassischen und modularen Anlagenstrukturen aufweisen. DIMA ermöglicht diesen Übergang, da die schon heute in Anwendung befindlichen Werkzeuge und deren Strukturprinzipien beachtet, genutzt und erweitert werden. Dies umfasst die Beachtung bestehender Normen wie zum Beispiel der IEC61512, bestehende Werkzeuge zum Bedienen und Beobachten oder zur Prozessführung und etablierte Kommunikationsprotokolle wie zum Beispiel OPC.

Das DIMA-Konzept unterscheidet zwischen zwei getrennten Engineering-Prozessen:

- dem Modul-Engineering in Verantwortung des Modulherstellers und
- dem Gesamtanlagen-Engineering in Verantwortung des Anlagenbetreibers

Der Zusammenhang zwischen Modul-Engineering und Gesamtanlagen-Engineering, mit dem Integrationsprozess der Module, ist in Abbildung 4-6 dargestellt. Informationen über das Modul, welche während der Integration in den Backbone benötigt werden, sind im MTP gespeichert. Der MTP wird während des Modul-Engineerings erzeugt und während des

Integrationsprozesses in ein Prozessleitsystem eingelesen. Er verbindet somit die beiden Engineering-Prozesse.

Das Konzept sieht vor, dass die Module von einem Modulhersteller geplant, erbaut, programmiert und im Rahmen eines Factory Acceptance Tests (FAT) in Betrieb genommen werden. Des Weiteren wird eine eigene Modulsteuerung im Modul vorgesehen. Jedes Modul verfügt damit über eine eigene Verarbeitungsintelligenz. Dadurch kann das Modul im Produktionsbetrieb zu jeder Zeit seinen inneren Zustand erkennen, bewerten und nach außen kommunizieren. Für die Prozessführung kann die Kommunikation durch Nutzung des in der IEC61512-1 definierten Zustandsübergangsmodels und dessen Zuständen erfolgen.

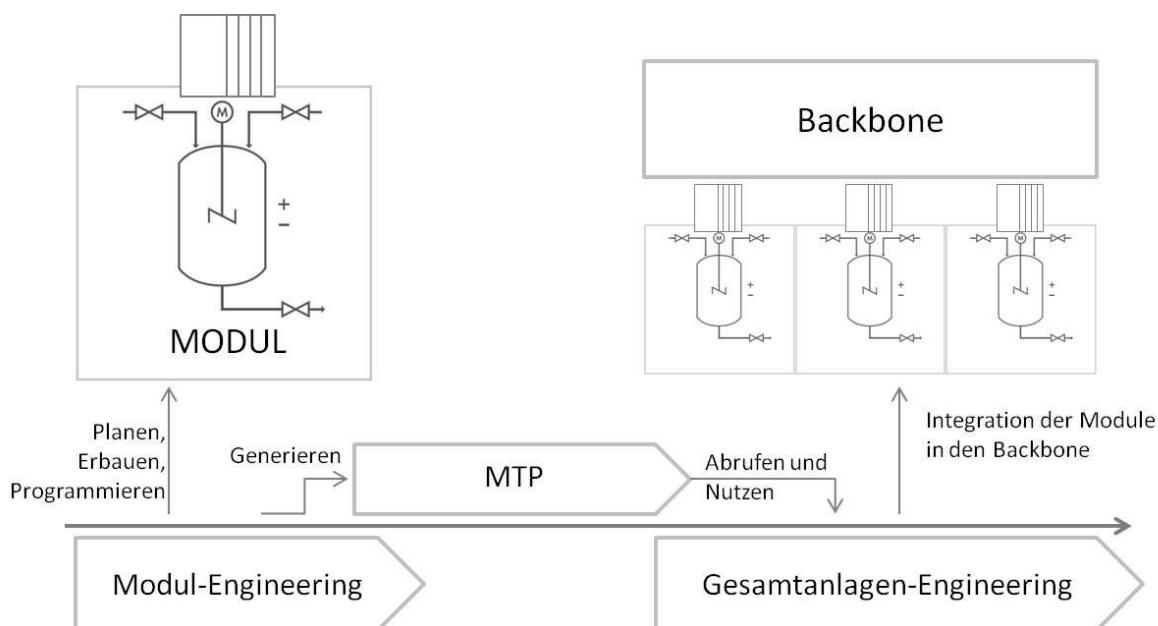


Abbildung 4-6: Aktivitäten im DIMA-Konzept

Die Prozessfunktionen des Moduls werden als Dienste vom Modulhersteller vorgesehen und im MTP abgelegt. Diese können vom übergeordneten AT-System abgerufen werden. Die Darstellung dieser Dienste kann zum Beispiel in einem Batch-Werkzeug erfolgen. Dort kann das Modul als Unit und die Dienste als Grundfunktionen modelliert werden. Durch die Funktionalitäten eines Batch-Werkzeugs können die Dienste / Grundfunktionen parametriert und durch die Verwendung in einem Rezept in die gewünschte Folge gebracht und ausgeführt werden.

Um eine einheitliche Darstellung unterschiedlicher Module im übergeordneten Bedien- und Beobachtungssystem zu realisieren, wird in DIMA ein Bibliotheksansatz genutzt. Das Bedienbild eines Moduls, welches durch den Modulhersteller angefertigt wird, wird dabei in die Lage, Größe und Bedeutung der im Bedienbild enthaltenen Elemente aufgeschlüsselt und im MTP abgelegt.

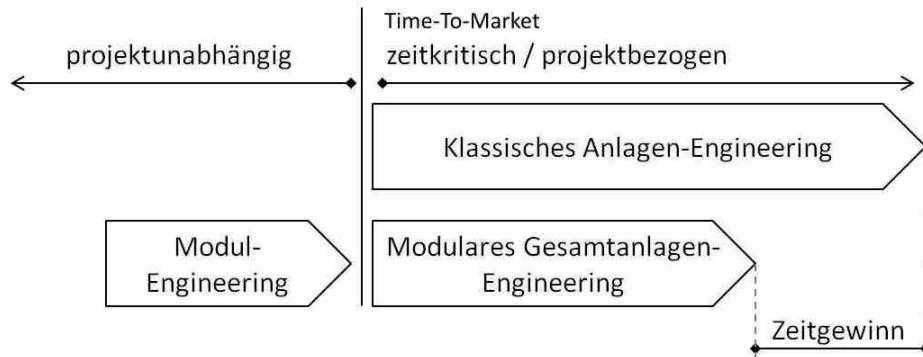


Abbildung 4-7: Darstellung der Engineering-Prozesse von klassischen und modularen Anlagen

Mit der Grundannahme eines getrennten Engineering-Prozesses erfüllt DIMA auch die Forderung der VDI 3695 [VDI3695] hinsichtlich der Schaffung eines projektunabhängigen Engineering-Prozesses (→2.4.4). Durch die Verlagerung von Engineering-Tätigkeiten aus dem ehemaligen klassischen Anlagen-Engineering in das zeitlich vorgelagerte und projektunabhängige Modul-Engineering entsteht ein Zeitgewinn. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 4-7 dargestellt.

Legt man die 50%-Idee zu Grunde, soll dieser Zeitgewinn, bei gleicher prozesstechnischen Fähigkeit und Größenordnung der Produktionsanlage, 50% des klassischen Anlagen-Engineerings betragen. Das bedingt, dass entsprechende Engineering-Aktivitäten des klassischen Anlagen-Engineerings entfallen bzw. zu einem anderen Zeitpunkt, außerhalb des zeitkritischen Prozesses, stattfinden müssen.

Um diese Aktivitäten zu identifizieren und die Auswirkungen durch ein Entfallen bzw. eine Verlagerung der Aktivitäten auf den zeitkritischen Prozess beurteilen zu können, muss zunächst untersucht werden, wie die Aktivitäten quantitativ bewertet werden können. Dazu wird in den folgenden Abschnitten der Begriff des Aufwands genutzt und untersucht, wie dieser im Kontext des Engineerings automatisierter Produktionsanlagen angewandt wird.

4.3. Der Aufwand und dessen Bestimmung

4.3.1. Die Auffassung von Aufwand

Der Aufwand ist allgemein der Einsatz oder die Leistung, um einen bestimmten Nutzen zu erbringen. In der DIN 69901-5 ist der Aufwand gleichgesetzt mit der zur Bewertung von Kosten und Zeit eingesetzten Ressource. Als Ressource gelten abgrenzbare Einheiten von Personal, Finanz- und Sachmitteln, Information und sonstige Hilfs- und Unterstützungsmöglichkeiten. [DIN69901] Aufwand hat also per se keine Einheit, in der er gemessen, verglichen oder bewertet werden kann. In englischsprachlichen Richtlinien gibt es keinen, diesem deutschen "Aufwand" entsprechenden Begriff. Unter dem Begriff "effort"

wird hier meist der Arbeitsaufwand verstanden. Im rechtlichen Kontext ist Aufwand, im Sinne einer Aufwandsentschädigung von Aufwendungen, immer als monetär bewertete Größe betrachtet [CWG99].

Im Engineering erbringt ein Auftragnehmer eine Leistung im Auftrag eines Auftraggebers (→ 2.3.3). Die Leistung, welche in Form von Projekten erbracht wird, wird durch den Auftragnehmer monetär bewertet und durch finanzielle Mittel entlohnt. Beim Auftragnehmer fällt der Aufwand somit zum einen durch Sachkosten und zum anderen durch Personalkosten an. Die Personalkosten werden durch eine projektbezogene Arbeitszeiterfassung ermittelt und mit entsprechenden Stundensätzen bewertet. Aufwand erzeugt somit Kosten. Wie sich diese Kosten zusammensetzen dürfen, ist unter anderen in der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) geregelt [HOAI].

Die zentrale Fragestellung dieser Arbeit betrachtet den Aufwand im Engineering von modularen und wandlungsfähigen Produktionsanlagen. Auch wenn die erhöhten Sachkosten aufgrund der zu erwartenden Überinstrumentierung der Module einen wichtigen Diskussionspunkt darstellen, werden sie aufgrund der Frage nach Dauer und Zeitpunkt des Stattfindens der Engineering-Tätigkeiten in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Als entscheidend für diese Fragestellung wird auf den durch Personaleinsatz und den Zeitpunkt des Einsatzes entstehenden Aufwand Bezug genommen.

Personal kann zeitlich eingesetzt werden, um eine Arbeitsleistung zu erbringen und damit eine Aufgabe zu erfüllen. Es bestehen allerdings zwei Zusammenhänge zwischen Arbeit, Zeit und Aufgabe:

1. Zum einen die Arbeitsleistung während der Aufgabenbearbeitung, die eine Person aufbringen muss, um die Aufgabe zu erfüllen
2. und zum anderen die Menge der Arbeit, die in der gestellten Aufgabe enthalten ist.

Augenfällig ist, dass die durchschnittliche Arbeitsleistung, die eine Person zur Abarbeitung einer Aufgabe benötigt, nicht nur von der Aufgabe selbst, sondern auch von äußeren Umständen abhängig ist. So spielen z.B. die Qualifikation der Person und das Arbeitsumfeld eine entscheidende Rolle. Die Arbeitsleistung mit der eine Person eine Aufgabe bearbeitet korreliert wiederum typischerweise mit dem individuellen Stundensatz, mit dem die Arbeitsleistung monetär bewertet wird.

Eine Aufgabe, die bearbeitet wird, bedarf, wie zuvor beschrieben, einer spezifischen Menge an Arbeit, um sie fertigzustellen. Der Idealfall tritt ein, wenn die Menge an Arbeit genau der Arbeitsleistung des eingesetzten Personals entspricht und sich darüber hinaus die Aufgabe so in Teilaufgaben zerlegen lässt, dass sie durch die Personen in parallelen Aktivitäten abgearbeitet werden kann. Diese Konstellation ermöglicht, dass eine Aufgabe mit 300 Arbeitsstunden durch 300 Personen innerhalb einer Stunde fertiggestellt werden könnte.

In der Realität ist dies allerdings oft nicht der Fall. So enthält die zu bearbeitende Aufgabe in sich zusätzliche Abhängigkeiten. Diese Abhängigkeiten ergeben sich durch erzwungene oder erwünschte sequentielle oder iterative Vorgänge und sind zusätzlich durch die Tatsachen begründet, dass aus administrativen Gründen oft nur eine bestimmte Personenanzahl gleichzeitig ein Engineering-Artefakt bearbeiten kann.

Sequentielle Abhängigkeiten entstehen zum Beispiel dadurch, dass eine Aktivität nicht angefangen werden kann, bevor das Ergebnis einer anderen Aktivität vorliegt. Unerwünschte Iterationen können entstehen, wenn das Ergebnis zuvor formulierten Anforderungen nicht entspricht, oder zu anderen Ergebnissen in einem inhaltlichen Konflikt steht. Iteriert werden muss auch, wenn Ergebnisse, auf dem die aktuelle Aktivität aufbaut, geändert wurden. Diese Ursachen ziehen eine erneute Durchführung von Teilen der Aktivität nach sich. Iterationen können allerdings auch erwünscht sein. Dies ist der Fall, wenn zum Zwecke der Qualitätssicherung ein Ergebnis über mehrere Aktivitäten iterativ angepasst werden soll.

Eine Bearbeitung einer Aufgabe kann auch unterbrochen werden, zum Beispiel durch verlängerte Lieferzeiten, das Warten auf Entscheidungen, Informationen und Beschlüsse oder den Ausfall von Personal durch Krankheit. Der dadurch entstehende Zeitverzug ist allerdings nur indirekt einer Aufgabe zugeordnet. Bei diesem Umstand bleibt die Menge der Arbeit einer Aufgabe (1.) konstant; die reale Zeit die benötigt wird, diese Aufgabe abzuschließen (2.), erhöht sich. Die Effizienz als das Ergebnis von Nutzen pro Aufwand verschlechtert sich.

In der Betrachtung und Bewertung der 50%-Idee ist die Zeitspanne zur Bearbeitung des projektabhängigen Anlagen-Engineerings ausschlaggebend. Um Aufwand sinnvoll auf einer Zeitskala bewerten zu können, soll im Folgenden angenommen werden, dass während der Betrachtung eines Engineering-Projektes die Anzahl und Qualifikation der bearbeitenden Personen sowie die Qualität der Ergebnisse konstant sind. Des Weiteren soll davon ausgegangen werden, dass es während des Engineerings nicht zu unerwartetem Zeitverzug kommt. Damit kann der Aufwand einer Aufgabe auf die Betrachtung der dafür benötigten Zeit reduziert werden. Steigt der Aufwand, steigt die dafür benötigte Zeit im gleichen Verhältnis. Die 50%-Idee ist unter dieser Prämisse erfüllt, wenn der projektbezogene Engineering-Aufwand auf mindestens 50% des Ausgangswertes verringert werden kann.

4.3.2. Bestimmung von Aufwand

Messung ist das Ausführen von geplanten Tätigkeiten zum quantitativen Vergleich einer Messgröße mit einem Vergleichs- bzw. Referenzwert. Dabei wird mit einem oder mehreren Messprinzipien die Messgröße eines Messobjektes ermittelt. [DIN1319]

Für die Messung von Aufwand gemäß der aufgestellten Prämissen aus Abschnitt 4.3.1 kann die Messgröße die Dauer und der Aufwand sein, der für die Fertigstellung einer Aufgabe

benötigt wird. Das Messobjekt, welches sich im Zentrum der Betrachtung befindet, ist die Aufgabe bzw. die innerhalb dieser Aufgabe auszuführenden Aktivitäten.

Für die Bestimmung des Aufwands von Vorgängen haben sich im Bereich des Projektmanagements verschiedene Verfahren bewährt [Hum11][WiMe11]:

- Bestimmung durch Vergleich,
- Bestimmung durch Zerlegung,
- Bestimmung unter Nutzung von Korrekturfaktoren,
- Expertenbefragung und
- Bestimmung unter Nutzung von Stellvertretergrößen.

Diese Verfahren sind unabhängig vom Anwendungsbereich, in dem das Projekt durchgeführt wird.

Die einzelnen Verfahren sollen im Folgenden kurz beleuchtet und anschließend im Abschnitt 4.3.3 im Kontext des Engineering modularer Produktionsanlagen betrachtet und auf ihre Anwendbarkeit hin bewertet werden.

Die Aufwandsbestimmung durch Vergleich ist ein sehr schnelles Verfahren, bei dem aus dem eigenen Erfahrungsschatz ein Beispiel gewählt wird, welches hohe Ähnlichkeit mit dem Objekt aufweist, dessen Aufwand ermittelt werden soll. Schwierigkeit dabei ist, dass das Ähnlichkeitsmaß oft unklar ist. Dieses Verfahren kann erweitert werden, indem mehrere ähnliche Objekte zur Aufwandsermittlung gewählt werden [Hum11].

Bei der Aufwandsbestimmung durch Zerlegung lassen sich zwei Varianten ausmachen. Bei der Anforderungszerlegung wird Aufwand für jede Anforderung einzeln ermittelt und anschließend zu einem Gesamtaufwand summiert. Die Entwurfszerlegung, als zweite Variante, kann angewandt werden, wenn die Architektur des Systems bereits erkennbar ist. Dabei wird der Aufwand jedes Subsystems bestimmt und addiert [Hum11]. Die Anforderungserhebung kann demnach auch bei unbekanntem physikalischem System angewandt werden.

Die Aufwandsbestimmung durch Korrekturfaktoren ist eine Erweiterung der Aufwandsbestimmung durch Vergleich. Dabei werden die gefundenen Beispiele zusätzlich mit einem zuvor bestimmten Faktor angepasst [Hum11]. Dieses Vorgehen ermöglicht eine Anwendung auch dann, wenn das Ähnlichkeitsmaß zwischen zwei Systemen klein ist.

Stehen erfahrene Experten zur Verfügung, so ist deren Befragung oder die Zuhilfenahme von Expertenaussagen eine weitverbreitete Methode zur Bestimmung von Aufwänden. So beruht u.a. die Delphi-Methode auf Expertenbefragungen. Sie sieht vor, dass verschiedene Experten unabhängig voneinander eine Aufwandsbestimmung durchführen und diese anschließend gemeinsam diskutieren um das Ergebnis weiter zu verbessern. Die Nutzung

von Experten bezieht sehr viele Faktoren in die Aufwandsbestimmung mit ein. Dieses Verfahren wird somit als sehr genau beurteilt [Hum11].

Bei der Aufwandsbestimmung unter Nutzung von Stellvertretergrößen werden charakteristische Größen des Objektes definiert. Dabei handelt es sich um oft und in ähnlicher Struktur mehrmals durchzuführende oder zu bearbeitende Aufgaben, die zum Beispiel an Funktionen eines Systems gebunden sind [WiMe11].

4.3.3. Aufwand im Engineering modularer Produktionsanlagen

Das Engineering von automatisierten Produktionsanlagen wird in Form von Projekten abgewickelt (vgl. Abschnitt 2.3.3). Insofern lassen sich Verfahren zur Aufwandsbestimmung aus dem Projektmanagement auch auf die dort üblichen Gegebenheiten anwenden. Nachfolgend sollen die Verfahren aus Abschnitt 4.3.2 auf das Engineering modularer Produktionsanlagen bezogen werden.

Bei der Aufwandsbestimmung durch Vergleich werden ähnliche Produktionsanlagen mit ähnlichem Automatisierungsgrad verglichen. Abgeschlossene Projekte können so herangezogen werden, um noch zu bearbeitende Projekte oder solche, für die ein Angebot erstellt werden soll, zu bewerten. Auch kann hier durch Korrekturfaktoren auf Besonderheiten des Projektes Bezug genommen werden. Aufgrund der geforderten Ähnlichkeit mehrerer Entitäten ist diese Methode nicht geeignet, den zeitbezogenen Aufwand zwischen dem Engineering einer klassischen Anlage und einer modularen wandlungsfähigen Anlage zu bestimmen, da hier ja gerade eine Differenz zu erwarten ist.

Sind nur Teilanlagen bekannt oder kann man, bezogen auf spezifische Anforderungen, mit der Nutzung von wiederverwendbaren Lösungen reagieren, sind Aufwandsbestimmungen durch Zerlegung möglich. Würde man die Nutzung wiederverwendbarer Lösungen als Modul interpretieren, müssten, bei der Anwendung dieser Methode für die Bestimmung des zeitbezogenen Aufwands zwischen dem Engineering einer klassischen Anlage und einer modularen wandlungsfähigen Anlage, die Aufwände der Anlage in klassischer Struktur und modularer Struktur vorliegen. Dabei ist zu beachten, dass sowohl die Anlage mit klassischer Struktur und die mit modularer Struktur identische Funktionen und Größen haben, um einen Vergleich zu ermöglichen. Da eine solche Konstellation weder in der Literatur noch von Industriepartnern vorliegt, kann diese Methode nicht genutzt werden.

Die Nutzung von Experten stellt auch im Engineering automatisierter Produktionsanlagen eine sehr gute Möglichkeit dar, Aufwände zu bestimmen. Expertenwissen wird zum einen innerbetrieblich genutzt, um Lösungen zu erstellen, und geht zum anderen in den Entwurf und die Erstellung von Normen und industriellen Empfehlungen ein. In der Reihe der Normen und Empfehlungen gibt es solche, die qualitative und auch quantitative Aussagen zum Engineering von automatisierten Produktionsanlagen formulieren.

Eine Norm mit qualitativen Aussagen ist zum Beispiel die PAS 1059 [PAS1059] (Abbildung 4-8 und Abbildung 4-9). Hier werden sehr ausführlich die einzelnen Vorgänge und Teilvergänge beschrieben, die zur Bearbeitung des Projektes „Planung einer verfahrenstechnischen Anlage“ gehören. Es werden Aussagen über die Reihenfolge von Vorgängen getätigt, als auch aufgezeigt, wo parallele Pfade entstehen. Keine Aussagen lassen sich allerdings zu absoluten oder relativen Aufwänden zwischen den Vorgängen oder im Verhältnis zum Gesamtprojekt finden.

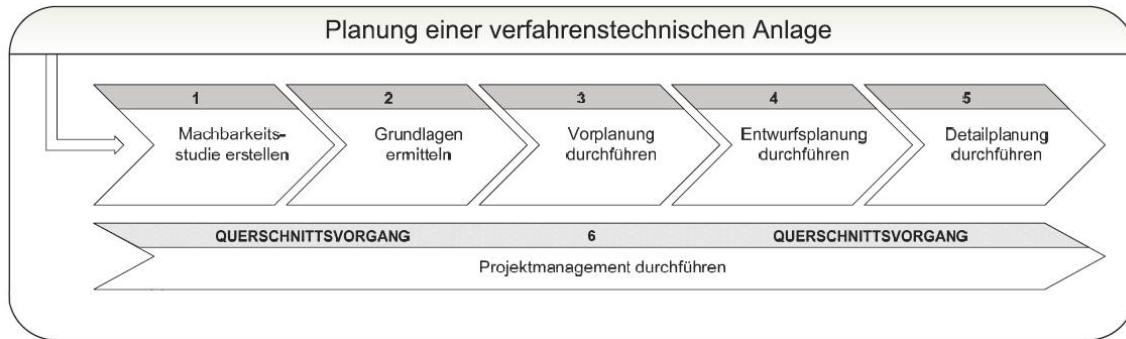


Abbildung 4-8: Hauptvorgänge der Planung einer verfahrenstechnischen Anlage gem. [PAS1059]

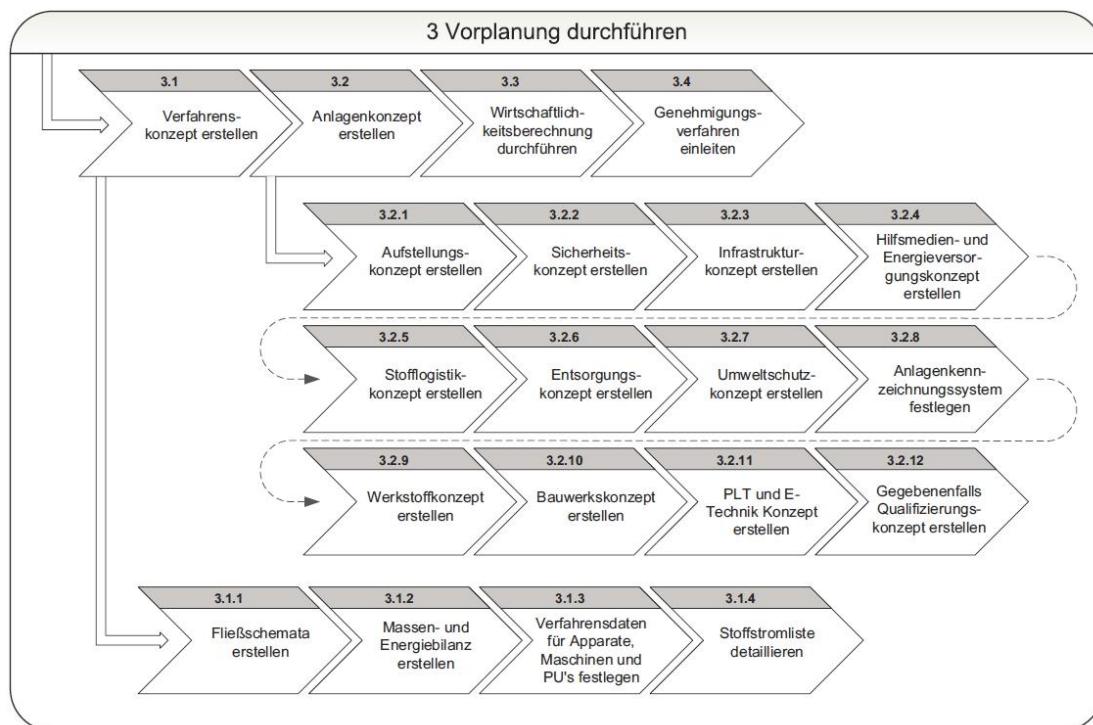


Abbildung 4-9: Vorgänge der Vorplanung gem. [PAS1059]

Das Namur Arbeitsblatt 35 "Abwicklung von PLT-Projekten" [NA35] bildet ebenfalls das Wissen von Experten ab. So haben Experten der Firmen BASF, Henkel und Bayer an den Inhalten der NA35 mitgearbeitet. Die NA35 "verdeutlicht den Ablauf und die Methodik der Planung eines leittechnischen Projekts" [NA35] und beschreibt einen effektiven Planungsablauf.

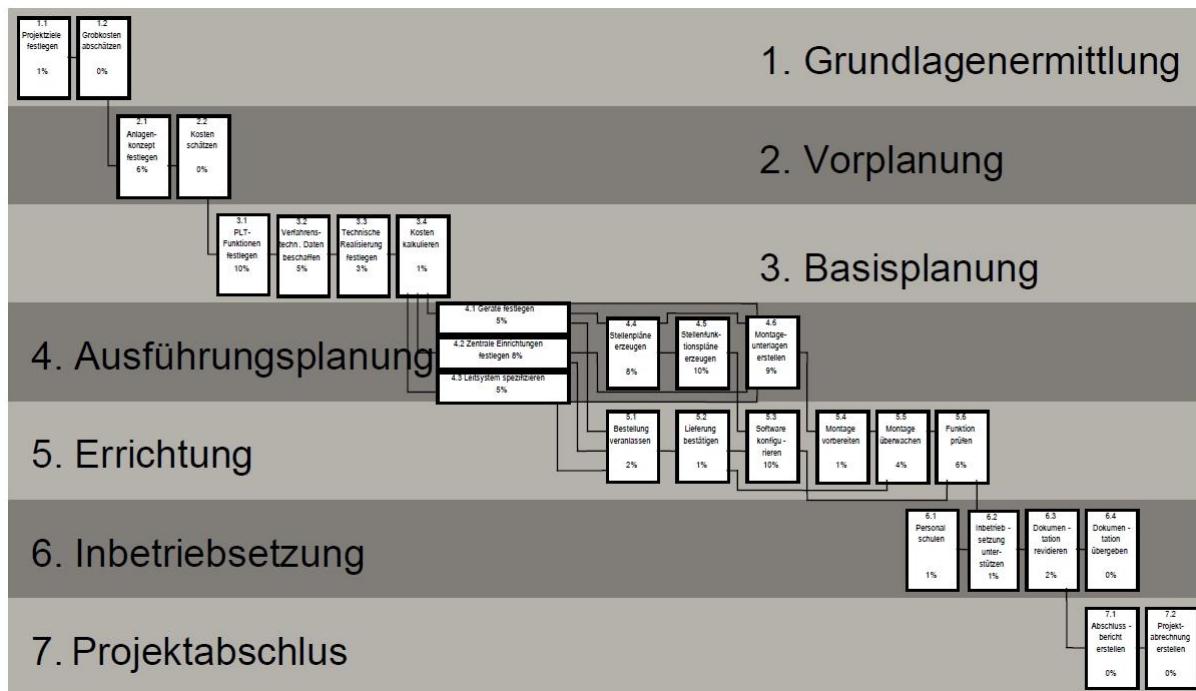


Abbildung 4-10: Phasenablaufplan [NA35]

Die in der NA35 aufgeführten Phasen und Einzelaktivitäten können als vollständig und vollzählig bezüglich der Planung der Prozessleittechnik betrachtet werden. Jede Einzelaktivität ist aufgeschlüsselt in die dafür notwendige Information, die durchführende Person oder Gruppe und die dabei erstellten oder angereicherten Engineering-Dokumente. Abbildung 2-4 stellt die sieben Phasen mit den enthaltenen 26 Einzelaktivitäten dar. Die NA35 enthält, wie auch PAS1059, Aussagen über die Reihenfolge von Einzelaktivitäten. Zudem wird aufgezeigt, wo parallele Pfade entstehen. Eine idealisierte Reihenfolge der Aktivitäten zur Abwicklung eines PLT-Projektes ist in Abbildung 4-10 dargestellt.

Ein entscheidender Unterschied zwischen den Phasen und Aktivitätsbeschreibungen gängiger Normen zu denen der NA35 ist, dass den Einzelaktivitäten (EA) der NA35 prozentuale Aufwände der Planungsleistung des Gesamtprojekts zugewiesen sind. Die Aufwände können der Abbildung 2-5 entnommen werden.

Die abschließend betrachtete Methode zur Bestimmung von Aufwänden ist die unter Nutzung von Stellvertretergrößen. Ziel dieser Methode ist es, unabhängig von der Projektgröße ein Maß zu finden, mit dem Aufwand bestimmt und verglichen werden kann. Im Engineering des Automatisierungssystems einer Produktionsanlage wird oft die Anzahl der Signale als normalisierender Bezugspunkt genutzt [DMS14], um den Aufwand zu bestimmen [Gut12]. Laut Drath können auch andere typische Formen von Engineering-Artefakten genutzt werden [DMS14]. Dazu gehört beispielsweise die Anzahl von PLT-Stellen. Sie enthalten Aufgaben für die Prozessleittechnik [DIN62424]. Eine solche Aufgabe ist zum Beispiel das Anzeigen einer Temperatur in der Leitwarte. Die technische Darstellung einer PLT-Stelle ist in Abbildung 4-11 enthalten. Ein durchschnittliches industrielles PLT-Projekt einer nichtmodularen Anlage umfasst ca. 8000 solcher PLT-Stellen [Gut12].

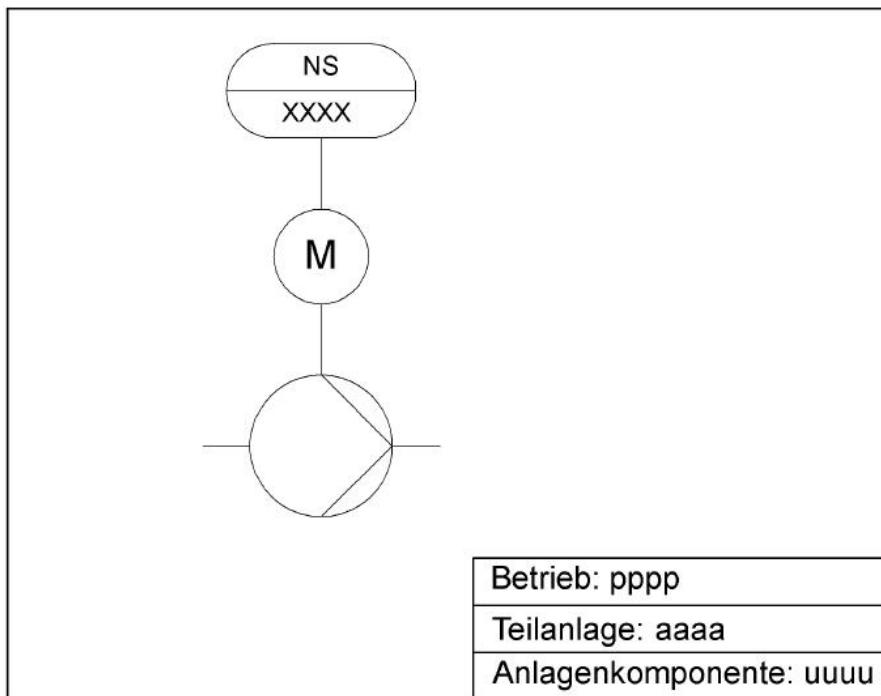


Abbildung 4-11: PLT-Stelle mit binärer Motor-Steuer- oder Schaltfunktion [DIN62424]

Durch die Anzahl von PLT-Stellen lassen sich somit die Aufwände unterschiedlicher Anlagen und Teilanlagen miteinander vergleichen. Drath führt dennoch an, dass die Komplexität einer PLT-Stelle unterschiedlich ausfällt: "Beispielsweise benötigt ein Safety-Signal deutlich mehr Engineering-Aufwand als ein normales binäres Signal." [DMS14]. Betrachtet man allerdings Anlagen mit ähnlicher Funktion und Größe, ist auch die Komplexität der PLT-Stellen ähnlich, und Unterschiede relativieren sich in einer vergleichenden Betrachtung.

4.3.4. Fazit der Bestimmung von Aufwänden im Engineering

Das Engineering von automatisierten Produktionsanlagen wird typischerweise in Form von Projekten bearbeitet. Aus diesem Grund lassen sich zur Bestimmung und zum Vergleich von Aufwänden im Engineering Methoden des Projektmanagements nutzen. Dazu wurden in diesem Abschnitt die bekanntesten Methoden benannt und kurz beleuchtet. Darauffolgend wurden sie im Kontext des Engineerings modularer Produktionsanlagen bewertet. Das Ergebnis zeigt, dass speziell das in der NA35 beschriebene Expertenwissen und die Nutzung von PLT-Stellen als Stellvertretergröße geeignet sind, Aufwand zu bestimmen und zu vergleichen.

4.4. Handlungsbedarf und These

Modularität erhöht die Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen. Betrachtet man dies im Kontext der 50%-Idee, sollen darüber hinaus die während der Wandlung vollzogenen Vorgänge möglichst schnell vollzogen werden. Die Ausführungen der VDI3695 und die Inhalte des DIMA-Konzepts definieren zur Realisierung dieser Anforderung zwei voneinander zeitlich unabhängige Engineering-Prozesse: (vgl. Abbildung 4-7)

- das projektunabhängige Modul-Engineering in Verantwortung des Modulherstellers
- und das projektbezogene Gesamtanlagen-Engineering mit Integrationsvorgängen der Module

Der Aufwand des projektbezogenen und zeitkritischen Gesamtanlagen-Engineerings soll folglich so gering wie möglich ausfallen. Die zentrale Fragestellung dabei ist: Wie groß ist der Umfang, um den das Engineering einer klassischen Anlage bei Nutzung modularer Anlagenstrukturen verringert werden kann?

Als quantitative Basis dieser Fragestellung wurden in Abschnitt 4.3 die Inhalte der NA35 vorgestellt. Mit den Prämissen aus Abschnitt 4.3.1 lassen sich die Aussagen der NA35 auf einer zeitlichen Ebene betrachten. Damit wird die Möglichkeit geschaffen, das Erreichen der 50%-Idee zu bewerten.

Für ein Engineering einer modularen Anlage müssen die in der NA35 formulierten Einzelaktivitäten (EA) durchgeführt werden. Da sich der Engineering-Prozess nun auf zwei Anteile aufteilt, müssen die EA also entweder im Modul-Engineering oder im Gesamtanlagen-Engineering enthalten sein. Eine Verringerung des Gesamtanlagen-Engineerings entsteht, wenn Aufwände ins Modul-Engineering verschoben werden können und somit nicht mehr im projektbezogenen und zeitkritischen Engineering-Prozess liegen.

Doch welche Aktivitäten sind geeignet, um in das projektunabhängige Engineering des Moduls verlagert zu werden? Wie groß ist der Anteil, um den sich das Gesamtanlagen-Engineering verringern lässt? Diese Fragen führen zur Formulierung folgender Thesen:

1. **Der Aufwand für den zeitkritischen Engineering-Prozess der Gesamtanlage kann auf 50% verringert werden.**
2. **Die Verringerung des Aufwands für den zeitkritischen Engineering-Prozess der Gesamtanlage nimmt mit zusätzlicher Verarbeitungslogik im Modul zu.**
3. **Je höher der Standardisierungsgrad der Module umso geringer ist der Aufwand im zeitkritischen Engineering-Prozess der Gesamtanlage.**
4. **Der Gesamtaufwand für beide Engineering-Prozesse bei modularen Anlagen fällt möglicherweise größer aus als der Engineering-Prozess bei nichtmodularen Anlagen.**

Um diese Thesen zu untersuchen, wird im Folgenden ein Vorgehen zur systematischen Bewertung der Engineering-Aufwände vorgestellt und anhand eines Beispiels validiert.

5. Systematische Aufwandsbewertung von Engineering-Aktivitäten

Für die Abwicklung von PLT-Projekten klassischer nicht-modularer Anlagen kann das NA 35 genutzt werden. Die Inhalte verdeutlichen „den Ablauf und die Methodik der Planung eines leittechnischen Projekts“ [NA35] und beschreiben dessen Planungsablauf. Die darin aufgeführten Phasen und Einzelaktivitäten können somit als vollständig und vollzählig betrachtet werden. Für ein effektives Engineering einer modularen Anlage müssen die in der NA35 formulierten Einzelaktivitäten also entweder im Modul-Engineering oder im Gesamtanlagen-Engineering berücksichtigt werden.

Es ist somit zu untersuchen, welche Aufwandsverringerung im Gesamtanlagen-Engineering durch Nutzung modularer Anlagenstrukturen zu erreichen ist. Abhängig von der Verteilung muss unter Umständen davon ausgegangen werden, dass auch zusätzlicher Aufwand im Gesamtanlagen-Engineering oder im Modul-Engineering notwendig werden kann. Es besteht somit folgendes Minimierungsproblem:

$$\min_A [A_{modular}^{Gesamtanlage} + ZA_{modular}^{Gesamtanlage}],$$

mit der Nebenbedingung:

$$A_{modular}^{Gesamtanlage} + ZA_{modular}^{Gesamtanlage} < A_{klassisch}.$$

wobei A dem Aufwand entspricht. Die Unterscheidung der Anlagenarchitektur ist durch den Index klassisch und modular gekennzeichnet. Der hochgestellte Index Gesamtanlage stellt den Bezug zum Engineering-Prozess der Gesamtanlage bei Nutzung einer modularen Anlagenarchitektur dar. ZA enthält die u.U. zusätzlich anfallenden Aufwände. Zu beachten ist, dass unter dem Modul-Engineering alle Engineering-Aktivitäten verstanden werden, die für die benötigten Module aufgewandt werden müssen.

Beachtet man die Forderung nach Minimierung der Aufwände des Gesamtanlagen-Engineerings unter Verlagerung der Aufwände in das Modul-Engineering, liegt es zunächst nahe, sämtliche Einzelaktivitäten der NA35 ins Modul-Engineering zu verlagern. Dies ist allerdings grundsätzlich u.a. aus folgenden Gründen nicht möglich:

- Das Automatisierungssystem des Backbones kann erst nach Beschluss zum Bau der Anlage projektiert werden. Diese Aufwände liegen somit zwangsläufig im Gesamtanlagen-Engineering.
- Durch die Kombination von Teilsystemen (Modulen) entstehen höhere Funktionen. Diese müssen im Automatisierungssystem des Backbones koordiniert und damit während des Gesamtanlagen-Engineerings betrachtet werden.
- Die Produkt- und Teile der Prozessinformationen liegen während des Modul-Engineerings nicht vor. Das Modul-Engineering betrachtet nur die eigene Ressource

und entsprechende Anteile des Prozesses. Die Anpassung an die Produktanforderung kann somit frühestens im Gesamtanlagen-Engineering durchgeführt werden.

- Es werden Module unterschiedlicher Hersteller genutzt, die wiederum Automatisierungssysteme unterschiedlicher Hersteller in ihren Modulen verwenden. Dies bedingt unter Umständen zusätzliche Aufwände während der Integration der Module.
- Gesetzliche Nachweispflichten und Dokumentationen der Gesamtanlage können teilweise erst nach Zusammenstellung der Gesamtanlage angefertigt werden.

5.1. Einfluss des Modul-Automatisierungssystems

Neben den obigen qualitativen Aussagen sind die Bewertung und Verteilung der Aufwände auch von der Ausgestaltung des AT-Systems der Module abhängig. Dazu werden durch die NE148 zwei Fälle definiert [NE148]:

1. Module mit eigener Steuerung
2. Module ohne eigene Steuerung, mit Remote I/O

Anwendungsfall Modul mit eigener Steuerung

Charakteristisch für diesen Anwendungsfall ist das Vorhandensein einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS), mit der die Basisautomatisierung und Koordinierungssteuerung im Modul verarbeitet werden können [NE148]. Die Prozessfunktionen eines Moduls mit eigener SPS werden als Dienst einer SOA implementiert. Dem Black-Box-Prinzip folgend, sind nur die äußeren Schnittstellen dieser Dienste bekannt, nicht aber die interne Programmlogik. Dies ermöglicht dem Modulhersteller die Vorgänge der kompletten Planung, des Baus und der Inbetriebnahme des AT-Systems des Moduls abzuschließen, sobald die verfahrenstechnische Funktion des Moduls festgelegt ist. Die Tätigkeiten zur Integration des Moduls in das AT-Systems des Backbones umfassen in diesem Fall die Bekanntgabe der Schnittstellen, mit deren Hilfe die geschlossenen Dienstleistungen des Moduls abgerufen und überwacht werden können. Durch die Verarbeitungskomplexität innerhalb des Moduls können auch Funktionen, wie Bedienen und Beobachten, Archivieren und Überwachen im Modul verarbeitet werden. Der Abruf dieser Information erfolgt ebenfalls über bekanntzugebende Schnittstellen.

Anwendungsfall Modul mit Remote I/O

Remote I/O's besitzen keinen für den Nutzer beschreibbaren Programmspeicher. Sie werden genutzt um Daten von einem Kommunikationsprotokoll in ein anderes zu übersetzen. Aus diesem Grund verfügen diese Module nicht über die Möglichkeit, die eigene Basisautomatisierung und Koordinierungssteuerung zu übernehmen. Diese Funktionen müssen durch eine zentrale Steuerung des Backbones übernommen werden. Hierfür müssen die Artefakte, welche die Basisautomatisierung und Koordinierungssteuerung beschreiben,

in geeigneter Weise modelliert und in die entsprechende Datenstruktur der Steuerung des Leitsystems übersetzt, geladen und ausgeführt werden. Obwohl der DIMA-Ansatz auf Modulen mit SPS beruht, soll dieser als Basis für die Aufwandsbetrachtung im Anwendungsfall Module mit Remote I/O genutzt werden.

Sowohl der Anwendungsfall SPS als auch der Anwendungsfall Remote I/O sind bei der Betrachtung der Verlagerung von Aufwänden zwischen Modul- und Gesamtanlagen-Engineering zu beachten.

5.2. Einfluss des Standardisierungsgrades

Um einen zeitlichen Nutzen bei der erstmaligen Realisierung oder Änderung einer modularen Produktionsanlage zu haben, reicht es nicht aus, die Anlage modular zu strukturieren. Die in der Anlage verbauten Module müssen darüber hinaus schon möglichst weit vorgeplant, entwickelt und erbaut sein. Dies wird durch einen hohen Standardisierungsgrad der Module unterstützt, da ein großer Anteil der erforderlichen Auslegungs- und Auswahlentscheidungen schon festgelegt ist. Die Standardisierung gilt insbesondere für die physikalischen Schnittstellen zum Stoffaustausch und die Kommunikationsschnittstellen [NE148] als auch für die intendierte Funktion eines Moduls. Letztere wird qualitativ durch eine verfahrenstechnische Funktion (Grundoperation) beschrieben [NE148]. Module, die oft zum Einsatz kommen, werden naturgemäß einen erhöhten Standardisierungsgrad aufweisen. Module, die nur selten zum Einsatz kommen, einen entsprechend geringeren.

Bei der Untersuchung des Aufwands während des Engineerings modularer verfahrenstechnischer Produktionsanlagen ist folglich eine Modulbetrachtung unter einem einheitlichen Standardisierungsgrad nicht zielführend. Im Folgenden soll aus diesem Grund zwischen:

1. Standardmodulen mit hohem Standardisierungsgrad (Standardmodulen) und
2. Spezialmodulen mit geringem Standardisierungsgrad (Spezialmodulen)

unterschieden werden.

Bei der Betrachtung von Standardmodulen steht somit eine Vielzahl von Informationen schon vor Planungsbeginn der Gesamtanlage fest. Man kann somit davon ausgehen, dass das betreffende Modul während des Modul-Engineerings vollständig geplant und errichtet werden kann. In Abhängigkeit von der Ausgestaltung des AT-Systems mit SPS oder Remote I/O kann das Modul entweder im Modul-Engineering programmiert bzw. dessen Programmlogik beschrieben werden.

Bei der Nutzung von Spezialmodulen kann man davon ausgehen, dass auf Grund der notwendigen Spezialisierung die Informationen zur vollständigen Planung und Errichtung

noch nicht vor dem Beginn des Gesamtanlagen-Engineering vorliegen. Vielmehr wird es für diese Art von Modulen nur möglich sein, während des Modul-Engineerings einen Modulrumpf zu planen und anzubieten. Da die erforderliche Information zur Fertigstellung eines Spezialmoduls erst während des Gesamtanlagen-Engineerings zur Verfügung steht, können die entsprechenden Aktivitäten erst zu diesem Zeitpunkt starten. Die hierfür erforderlichen Aktivitäten können aus diesem Grund nicht aus dem Gesamtanlagen-Engineering entnommen werden. Die Bearbeitung erfolgt somit durch den Modulhersteller, allerdings erst nach dem Treffen der Investitionsentscheidung zum Bau der Produktionsanlage. Aufgrund der geforderten und zu erwarteten Standardisierung von Schnittstellen [VDMA14] ist allerdings speziell bei den Aktivitäten des Engineerings der Spezialmodule mit Effizienzsteigerungen durch Vorgehen nach Simultaneous-Engineering-Prinzipien auszugehen.

Die Bereitstellung von Standardmodulen entspricht einem "Make-to-Stock" (MTS)- Modell, bei dem das fertige Produkt zuvor gebaut, dann in den Lagerbestand übergeht und aus diesem sofort veräußert und ausgeliefert werden kann.

Das Engineering von Spezialmodulen entspricht dem "Make-to-Order" (MTO)- Modell. Diese Produkte werden auf eine Bestellung eines Kunden hin gefertigt und dann ausgeliefert. Durch den spezifischen Kundenbezug können dessen Anforderungen noch in das Produkt eingehen [Lee96][ZRG08].

5.3. Systematisches Vorgehen zur Bewertung von Einzelaktivitäten der NA35

Es ergeben sich durch die beiden Anwendungsfälle zur Ausgestaltung des Modul-AT-Systems und die Unterscheidung in Standard- und Spezialmodule vier Kombinationen, die betrachtet werden müssen:

- Standardmodule mit SPS und mit Remote I/O, sowie
- Spezialmodule mit SPS und mit Remote I/O.

Für jede dieser Kombinationen muss nun pro Einzelaktivität der NA35 entschieden werden, ob die EA schon im Modul-Engineering stattfinden kann oder im Gesamtanlagen-Engineering verbleiben muss. Dazu muss die EA in ihrer zeitlichen und inhaltlichen Einbettung im Engineering-Prozess betrachtet werden. Die Aktivitäten innerhalb der EA können nur durchgeführt werden, wenn die Voraussetzungen dazu erfüllt sind. Diese setzen erreichte Planungsstände, getroffene Entscheidungen und deren Formalisierung in Dokumenten voraus. Die EA erzeugt wiederum neue Planungsergebnisse und Engineering-Dokumente.

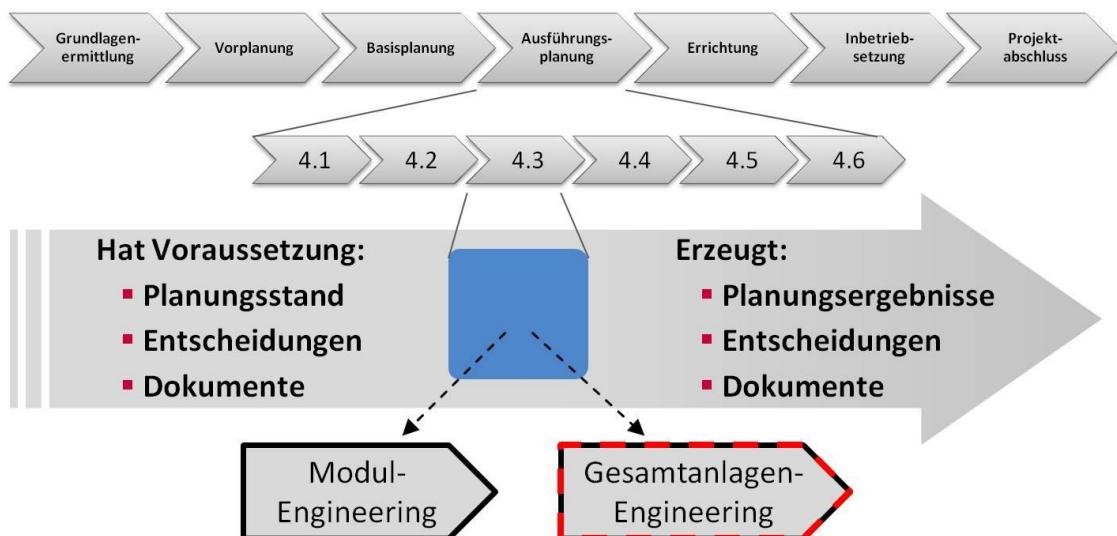


Abbildung 5-1: Beispielhafte Darstellung einer Entscheidung zur Verlagerung einer EA

Die folgende Bewertung der vier Kombinationen (Standard - Spezial; SPS - Remote I/O) ist eine disjunkte Betrachtung. Das heißt, eine modulare Anlage kann jeweils nur aus einem der vier Typen bestehen. Natürlich sind Zusammensetzungen modularer Anlagen aus verschiedenen Typen in einer praktischen Realisierung denkbar, für diese theoretische Betrachtung allerdings ausgeschlossen.

Um die Entscheidung zur Verlagerung von Aufwänden systematisch und damit über alle Einzelaktivitäten einheitlich treffen zu können, wurde ein Vorgehensmodell erarbeitet. Dazu werden in einem Top-Down-Vorgehen mehrere Aspekte betrachtet und darauf aufbauende Fragen formuliert. Die Ergebnisse der Entscheidungsfragen einer EA werden in einem einheitlichen Template (Tabelle 5-1) für jede EA dargestellt.

Abbildung 5-1 stellt dar, dass die betrachtete EA entweder geschlossen in das Modul- oder in das Gesamtanlagen-Engineering verschoben wird. Diese Annahme ist allerdings nur theoretischer Natur. Da sich modulare Anlagen aus dem Backbone und den angekoppelten Modulen zusammensetzen und das Engineering des Backbones integraler Bestandteil des Gesamtanlagen-Engineerings ist, wird sich eine EA meist nicht geschlossen verlagern lassen. Dies führt zu der Notwendigkeit, die Aufwände innerhalb einer EA zu splitten. Die Aussagen über die Aufwandgrößen der NA35 können dazu nicht genutzt werden, da sie sich immer auf die geschlossene EA beziehen. In den Ausführungen in Abschnitt 4.3.3 dieser Arbeit wurde für diesen Fall die Aufwandsbestimmung unter Verwendung einer Stellvertretergröße eingeführt. Um die Aufwände innerhalb einer EA zu zerlegen, bietet sich demnach die PLT-Stellenverteilung an. Der Aufwand kann damit im gleichen Verhältnis aufgeteilt werden, in dem auch die PLT-Stellen zwischen Backbone und den Modulen verteilt sind. Für eine erste Ermittlung der Aufwände wird ein Verhältnis von 80:20 angenommen, das allerdings später, in der Auswertung, variiert wird. 80:20 bedeutet in diesem Fall, dass sich 80% der PLT-Stellen in den Modulen und 20% der PLT-Stellen im Backbone befinden.

Tabelle 5-1: Template zur Darstellung der EA-Bewertung

Bezeichnung	1. Benennung der Phase			
	2. Benennung der EA			
Beschreibung	3. Freie Beschreibung			
Betrachtung der EA im modularen Kontext	4. Freie Beschreibung			
Abhängigkeit vom Standardisierungsgrad des Moduls?	5. Ja / Nein			
Abhängigkeit von der Ausstattung mit RI/O oder SPS?	6. Ja / Nein			
Zuordnung zum:	7. Modul-Engineering / Gesamtanlagen-Engineering			
	Entstehende Aufwände für:			
%-Modul-Engineering bei Standardmodul	SPS	8. Freie Beschreibung	a)	b)
	RI/O		a)	b)
%-Modul-Engineering bei Spezialmodul	SPS	9. Freie Beschreibung	a)	b)
	RI/O		a)	b)
Erzeugung von zusätzlichem Aufwand durch Zuordnung zum projekt-unabhängigen Modul-Engineering?	10. Freie Beschreibung			

Die Bewertung einer EA beginnt mit der Bezeichnung der Phase (1.) und EA (2.) und einer kurzen Beschreibung der EA-Aufgaben (3.). Im Anschluss erfolgt eine Betrachtung der EA-Aufgaben im modularen Kontext (4.). Dazu wird untersucht, ob Aufwände in das Modul-Engineering verlagert werden können und ob diese abhängig vom Standardisierungsgrad der Module sind (5.). Abhängig von der Beantwortung dieser Frage müssen die Standard- und Spezialmodule u.U. gesondert betrachtet werden.

¹² MA = Aufwand, der aus dem klassischen Anlagen-Engineering in das Modul-Engineering verlagert wird.

¹³ ZA = Zusätzlich entstehender Aufwand

¹⁴ GA = Aufwand, der im Gesamtanlagen-Engineering verbleibt, addiert mit dem Zusatzaufwand (ZA).

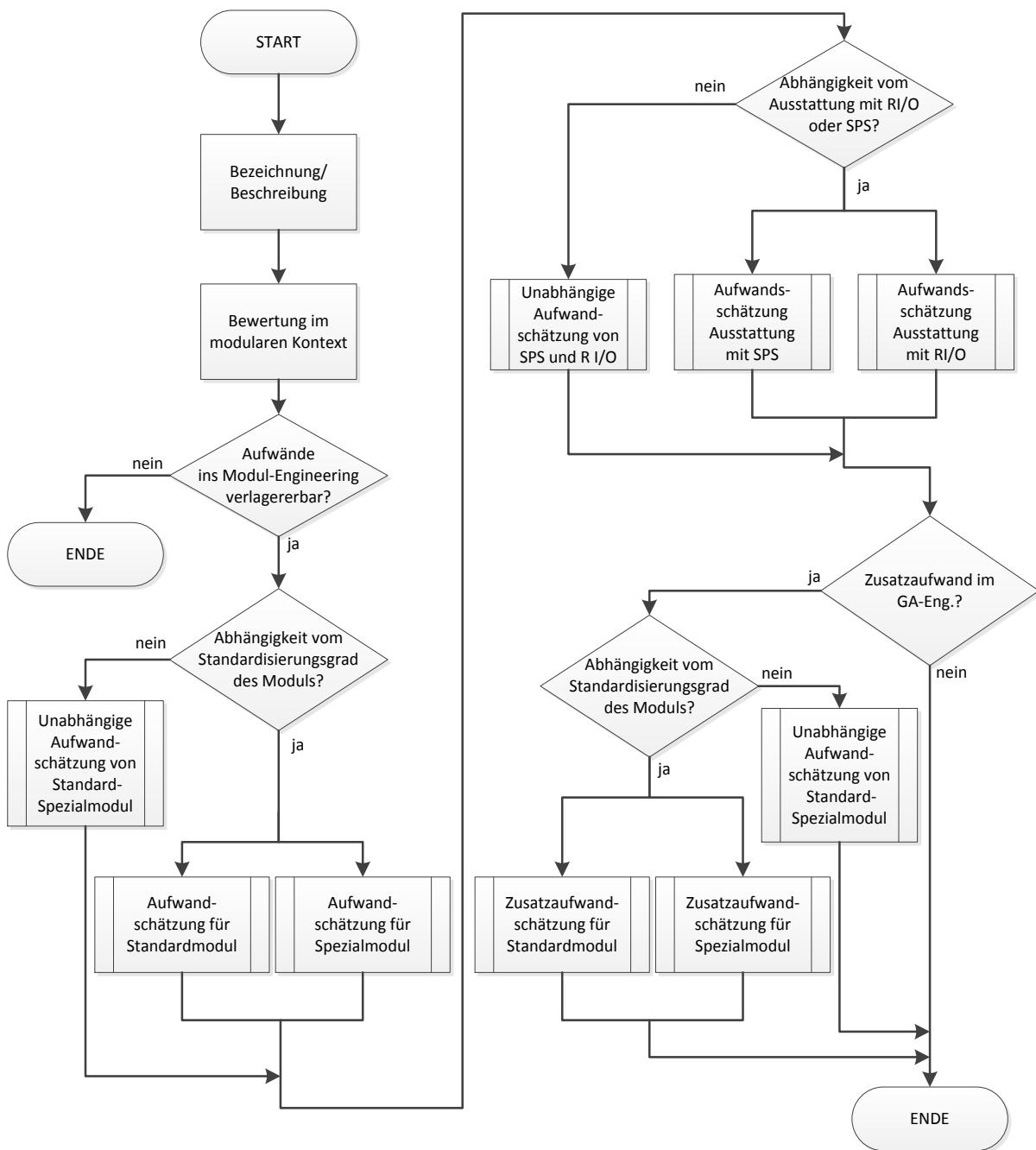


Abbildung 5-2: Abfolge der Bewertung der NA35 Einzelaktivitäten

Die anschließende Betrachtung zielt auf die automatisierungstechnische Ausstattung der Module ab. Sollten die in das Modul-Engineering verlagerbaren Aufwände von der Nutzung einer SPS oder Remote I/O im Modul abhängig sein (6.), ist die Bewertung (8./9.) getrennt durchzuführen. Im letzten Schritt ist zu beurteilen, ob durch die Verschiebung der Aufwände in das Modul-Engineering zusätzlicher Aufwand im Gesamtanlagen-Engineering entsteht (10.). Aufwände dieser Art werden allein durch die Nutzung von Modulen generiert. Aufwände der ursprünglichen EA können im Modul-Engineering verarbeitet werden, im Gesamtanlagen-Engineering entsteht zusätzlicher Aufwand durch die Handhabung der Module. Die quantitativen Ergebnisse sind den Feldern a), b) und c) aus Tabelle 5-1 zu

entnehmen. Spalte "MA" bzw. Feld a) enthält den prozentualen Wert, bezogen auf den gesamten Aufwand der EA, der in das Modul-Engineering überführt werden kann, jeweils für Standard- und Spezialmodul als auch für die beiden Anwendungsfälle SPS und Remote I/O. "ZA" ist der prozentuale Wert für den Aufwand, der durch Überführung von Aufwänden zusätzlich im Gesamtanlagen-Engineering entsteht, jeweils wieder für Standard- / Spezialmodul sowie AT-Systeme innerhalb des Moduls. Der prozentuale Wert, der in der Spalte "GA" enthalten ist, stellt den im Gesamtanlagen-Engineering verbleibenden und zusätzlich entstehenden Aufwand. Er ergibt sich also zu: $GA = 1 - MA + ZA$.

Eine Darstellung der Abfolge der Entscheidungsfragen kann Abbildung 5-2 entnommen werden.

5.4. Bewertung der Einzelaktivitäten der NA 35

Im Folgenden wird das Vorgehen, welches in Abbildung 5-2 dargestellt ist, auf jede der 26 EA der NA35 angewendet. Die Ergebnisse sind in einem Template abgebildet, welches im vorherigen Abschnitt herausgearbeitet wurde. Die qualitativen und quantitativen Entscheidungen zum Verlagern von Aktivitäten und Aufwänden wurden zur Absicherung mit mehreren Experten aus der PLT-Planung diskutiert.

5.4.1. Grundlagenermittlung

Bezeichnung	1. Grundlagenermittlung
	1.1 Projektziel festlegen
Beschreibung	<p>In dieser Phase werden die grundlegenden Eigenschaften der Anlage festgelegt. Der zu Grunde liegende Vertrag enthält u.a. die geplante Anlagenkapazität und eine grobe Verfahrensbeschreibung. Darauf aufbauend wird in dieser Einzelaktivität zum Beispiel der Einsatz von erforderlichen Werkstoffen und Analysetechnik festgelegt. Aus Verfahren und Anlagenkapazität können Nenndrücke und Nennweiten einzusetzender Rohrleitungen und verfahrenstechnischer Apparate und Behälter näherungsweise berechnet werden.</p> <p>Das in der Phase Grundlagenermittlung zu erstellende Dokument wird als Groblastenheft bezeichnet, da aus Sicht der PLT viele Aufgabenstellungen nur grob beschrieben werden können.</p>
Betrachtung der EA im modularen Kontext	Bei modularen Anlagen wird die Auftragsbeschreibung zum Bau der Anlage ebenfalls in einem Vertrag formuliert. Da in dieser EA die Verfahrensbeschreibung einer modularen Anlage spezifiziert wird, die in Form eines groben Verfahrensfließbildes dargestellt ist, beziehen sich die Inhalte auf eine konkrete Instanz einer Anlage. Aus diesem Grund kann der Aufwand dieser EA nicht in die projektunabhängigen Tätigkeiten des Modul-Engineerings verschoben werden.
Abhängigkeit vom Standardisierungsgrad des Moduls?	Nein
Abhängigkeit von der Ausstattung mit RI/O oder SPS?	Nein

Zuordnung zum:	Gesamtanlagen-Engineering				
	Entstehende Aufwände für:		MA	ZA	GA
% - Modul- Engineering bei Standardmodul	SPS	Eine Vorverlagerung von Aufwänden dieser Einzelaktivität ist nicht möglich.	0%	0%	100%
	RI/O		0%	0%	100%
% - Modul- Engineering bei Spezialmodul	SPS	Eine Vorverlagerung von Aufwänden dieser Einzelaktivität ist nicht möglich.	0%	0%	100%
	RI/O		0%	0%	100%
Erzeugung von zusätzlichem Aufwand durch Zuordnung zum projekt- unabhängigen Modul-Engineering?	Nein				

Bezeichnung	1. Grundlagenermittlung				
	1.2 Grobkosten schätzen				
Beschreibung	Aus den Berechnungen und Festlegungen der vorherigen Einzelaktivitäten lassen sich die Grobkosten schätzen. Diese geforderte Genauigkeit der Kostenschätzung soll bei $\pm 30\%$ liegen.				
Betrachtung der EA im modularen Kontext	Da sich die Kostenschätzung auf die Festlegungen und Berechnungen der Einzelaktivität "Projektziel festlegen" bezieht, sind diese nur für die Instanz der Anlagen relevant. Aus diesem Grund kann der Aufwand dieser EA nicht in die projektunabhängigen Tätigkeiten des Modul-Engineerings verschoben werden.				
Abhängigkeit vom Standardisierungsgrad des Moduls?	Nein				
Abhängigkeit von der Ausstattung mit RI/O oder SPS?	Nein				
Zuordnung zum:	Gesamtanlagen-Engineering				
	Entstehende Aufwände für:		MA	ZA	GA
% - Modul- Engineering bei Standardmodul	SPS	Eine Vorverlagerung von Aufwänden dieser Einzelaktivität ist nicht möglich.	0%	0%	100%
	RI/O		0%	0%	100%
% - Modul- Engineering bei Spezialmodul	SPS	Eine Vorverlagerung von Aufwänden dieser Einzelaktivität ist nicht möglich.	0%	0%	100%
	RI/O		0%	0%	100%
Erzeugung von zusätzlichem Aufwand durch Zuordnung zum projekt- unabhängigen Modul-Engineering?	Nein				

5.4.2. Vorplanung

Bezeichnung	2. Vorplanung							
	2.1 Anlagenkonzept festlegen							
Beschreibung	In dieser Einzelaktivität wird, aufbauend auf der Verfahrensbeschreibung und dem Projektziel, das Anlagenkonzept verfeinert und fixiert. Das zentrale Dokument dieser Einzelaktivität ist das R&I-Fließbild. Es wird in dieser Einzelaktivität erstmalig erstellt. Zusammen mit den im Verfahrensfließbild abgebildeten Hauptgeräten lassen sich Anforderungen an Regelungen, Steuerungen, Verriegelungen und BuB-Maßnahmen formulieren. Für jede PLT-Stelle wird initial ein Stellenblatt angelegt, welches die schon bekannten prozessspezifischen Kenngrößen (Druck, Temperatur, Konzentration, ...) enthält. Das R&I-Fließbild und die ergänzenden PLT-Stellenblätter bilden die Grundlage der Erstellung des Lasten- und Pflichtenheftes für die PLT. Dieses wird in den Folgeaktivitäten weiter angereichert.							
Betrachtung der EA im modularen Kontext	Auch bei modularen Anlagen wird das R&I-Fließbild zentralen Charakter besitzen, da es die Information, wie PLT-Stellen zentralistisch darstellt. Die PLT-Stellen befinden sich zum größeren Teil in den Modulen. Ausnahme bilden die PLT-Stellen, mit deren Hilfe die Funktionsfähigkeit des Backbones ermöglicht wird. Die Automatisierung und die damit verbundene Auswahl von Messprinzipien, Gerätetypen und deren Auslegung liegen im Verantwortungsbereich des Modulherstellers [NE148]. Das Instrumentierungskonzept des Moduls muss allerdings den Anforderungen des Anlagenbetreibers entsprechen [NE148]. In der Einzelaktivität "Anlagenkonzept festlegen" werden die Anforderungen an die PLT erstmals abgeleitet und im Lastenheft formuliert. Dies wird im Fall einer modularen Anlagenarchitektur dazu dienen, den Gesamtprozess in Module zu schneiden und schon passende Standardmodule infrage kommender Modulhersteller zu ermitteln. Das Ergebnis dieser Einzelaktivität im modularen Kontext umfasst somit die Anzahl aller zu nutzenden Module und eine Auswahl infrage kommender Standardmodule und entspricht dem Modulschnitt.							
Abhängigkeit vom Standardisierungsgrad des Moduls?	Ja							
Abhängigkeit von der Ausstattung mit RI/O oder SPS?	Nein							
Zuordnung zum:	Gesamtanlagen-Engineering							
		Entstehende Aufwände für:			MA	ZA	GA	
%-Modul-Engineering Standardmodul	bei	SPS	Das Anlegen des R&I-Fließbildes und der erstmaligen Erstellung der PLT-Stellenblätter zielt auf die technische Lösung des Moduls ab.			80%	30%	50%
		RI/O	Diese obliegt dem Modulhersteller [NE148]. Der Aufwand dieser Einzelaktivität korreliert mit der Verteilung der PLT-Stellen zwischen Backbone und Modul.			80%	30%	50%
%-Modul-Engineering Spezialmodul	bei	SPS	Im Fall eines Spezialmoduls kann aus den Anforderungen kein passendes Modul ermittelt werden. Es ist allerdings davon auszugehen, dass Teile des Modulrumpfes			10%	0%	90%
		RI/O				10%	0%	90%

	projektunabhängig erstellt werden können. Dafür werden unabhängig von der PLT-Stellenverteilung 10% angenommen.			
Erzeugung von zusätzlichem Aufwand durch Zuordnung zum projekt-unabhängigen Modul-Engineering?	Der Aufwand zur Ermittlung der Anzahl aller zu nutzenden Module und infrage kommender Standardmodule entsteht zusätzlich. Die Höhe des zusätzlichen Aufwands hängt stark vom Einsatz unterstützender Werkzeuge ab und wird zunächst auf 30% festgelegt. Dieser Aufwand ist unabhängig vom AT-System der Module und tritt nicht bei der Nutzung von Spezialmodulen auf.			

Bezeichnung	2. Vorplanung				
	2.2 Kosten schätzen / 2.3 Kostenkalkulieren				
Beschreibung	Diese Kostenschätzung ist funktions-, system- und/oder stellenorientiert. Durch die Gesamtbetrachtung kann eine Genauigkeit von ± 10-20% erreicht werden.				
Betrachtung der EA im modularen Kontext	Bei einer modularen Anlage wird sich ein Teil der Kosten aus den Anschaffungskosten der Module ergeben. Zum Zeitpunkt dieser Einzelaktivität sind passende Standardmodule ausgewählt. Deren Kosten stehen somit fest. Für Spezialmodule steht der endgültige Preis noch nicht fest, da diese noch nicht in allen Eigenschaften spezifiziert sind. Da der Aufwand dieser EA allerdings auf die konkrete Anlage bezogen ist, kann deren Aufwand nicht in das projektunabhängige Modul-Engineering verlagert werden.				
Abhängigkeit vom Standardisierungsgrad des Moduls?	Nein				
Abhängigkeit von der Ausstattung mit RI/O oder SPS?	Nein				
Zuordnung zum:	Gesamtanlagen-Engineering				
		Entstehende Aufwände für:	MA	ZA	GA
%-Modul-Engineering bei Standardmodul	SPS	Eine Vorverlagerung von Aufwänden dieser Einzelaktivität ist nicht möglich.	0%	0%	100%
	RI/O		0%	0%	100%
% -Modul-Engineering bei Spezialmodul	SPS	Eine Vorverlagerung von Aufwänden dieser Einzelaktivität ist nicht möglich.	0%	0%	100%
	RI/O		0%	0%	100%
Erzeugung von zusätzlichem Aufwand durch Zuordnung zum projekt-unabhängigen Modul-Engineering?	Nein				

5.4.3. Basisplanung

Bezeichnung	3. Basisplanung				
	3.1 PLT-Funktionen festlegen				
Beschreibung	In dieser Einzelaktivität werden die PLT-relevanten Angaben in die R&I Fließbilder eingearbeitet bzw. diese weiter angereichert. Informationen zu den PLT-Stellen werden in PLT-Stellenblättern festgehalten. Die Informationen aus R&I-Fließbild und PLT-Stellenblätter ergeben das Lasten- und Pflichtenheft für Regelung, Steuerung, Verriegelung, Bedienung der Prozessleittechnik und problemorientierte Funktionspläne.				
Betrachtung der EA im modularen Kontext	PLT-Stellen befinden sich zum größeren Teil in den Modulen. Ausnahme bilden die PLT-Stellen, mit deren Hilfe die Funktionsfähigkeit des Backbones ermöglicht wird. Das Festlegen der PLT-Funktionen und die Erzeugung bzw. das Ergänzen von R&I-Fließbildern bis zur PLT relevanten Vollständigkeit stellen die Basis der Modulautomatisierung dar. Da sich diese im Verantwortungsbereich des Modulherstellers befindet, kann diese Einzelaktivität für Standardmodule komplett ins projektunabhängige Modul-Engineering verlagert werden. Für Spezialmodule geschieht die Festlegung der PLT-Funktionen für das Modul in Zusammenarbeit von Anlagenbetreiber und Modulhersteller.				
Abhängigkeit vom Standardisierungsgrad des Moduls?	Ja				
Abhängigkeit von der Ausstattung mit RI/O oder SPS?	Nein				
Zuordnung zum:	Projektunabhängiges Modul-Engineering und Gesamtanlagen-Engineering				
	Entstehende Aufwände für:				MA
% -Modul-Engineering bei Standardmodul	SPS	Der Aufwand dieser Einzelaktivität korreliert mit der Anzahl der zu betrachtenden PLT-Stellen. Wird das Verhältnis zwischen Backbone und Modul auf 20:80 bestimmt, können 80% des Aufwands für die PLT Stellen eines Standardmoduls in das projektunabhängige Modul-Engineering vorverlagert werden.	80%	0%	20%
	RI/O		80%	0%	20%
% -Modul-Engineering bei Spezialmodul	SPS	Im Fall eines Spezialmoduls kann aus den Anforderungen kein passendes fertiges Modul ermittelt werden. Abhängig vom zusätzlichen Anpassungs- und Konfigurationsaufwand kann nur ein geringer Teil der Aufwände in das projektunabhängige Modul-Engineering vorverlagert werden. Dieser Aufwand bezieht sich lediglich auf den Rumpf des Moduls, der schon vor dem Beginn der Konfiguration des Spezialmoduls feststand. Er wird auf ca. 10% bestimmt.	10%	0%	90%
	RI/O		10%	0%	90%
Erzeugung von zusätzlichem Aufwand durch	Für Spezialmodule entstehen zusätzliche Iterationen zwischen Modulhersteller und Anlagenbetreiber. Diese sind allerdings nicht als zusätzlicher Aufwand zu werten, da diese auch im klassischen				

Zuordnung zum projekt-unabhängigen Modul-Engineering?	Engineering zwischen Anlagenplaner und der PLT durchzuführen sind. Im Fall der Spezialmodule wird die Aufgabe der PLT durch die Modulhersteller übernommen.
---	---

Bezeichnung	3. Basisplanung						
	3.2 Verfahrenstechnische Daten beschaffen						
Beschreibung	Verfahrenstechnische Daten können dem Verfahrensfließbild entnommen werden. Ergänzend werden Verfahrenstechniker befragt. Die ermittelte und bewertete Information wird anschließend in die PLT-Stellenblätter eingebbracht.						
Betrachtung der EA im modularen Kontext	Bei modularen Anlagen ist die Zuordnung dieser Einzelaktivität stark vom Standardisierungsgrad des Moduls abhängig. Standardisierte Module basieren qualitativ auf einer verfahrenstechnischen Grundoperation und sind zusätzlich quantitativ durch verschiedene Größenklassen charakterisierender Prozessgrößen gruppiert. Verfahrenstechnische Daten, die Einfluss auf den Aufbau und die Dimensionierung eines Standardmoduls haben, werden somit als für die Modulklasse unveränderlich angenommen. Beim Engineering von Spezialmodulen ist dies nicht möglich, da sich die erforderlichen Größen erst durch die Anforderungsdefinition des Anlagenbetreibers ergeben. Das Spezialmodul kann durch Nutzung der Rumpfstruktur eines Moduls geplant und errichtet werden.						
Abhängigkeit vom Standardisierungsgrad des Moduls?	Ja						
Abhängigkeit von der Ausstattung mit RI/O oder SPS?	Nein						
Zuordnung zum:	Projektunabhängiges Modul-Engineering und Gesamtanlagen-Engineering						
Entstehende Aufwände für:					MA	ZA	GA
%-Modul-Engineering bei Standardmodul	SPS	Bei Standardmodulen werden für verschiedene verfahrenstechnische Grundoperationen Klassen charakteristischer Prozessgrößen festgelegt. Eine Klasse umfasst	80%	10%	30%		
	RI/O	einen größeren Wertebereich der entsprechenden Prozessgröße. Die zur Auslegung des Moduls erforderlichen verfahrenstechnischen Daten werden somit durch die Klasse festgelegt. Das Erstellen einer Klasse wird durch das Gewerk Verfahrenstechnik durchgeführt und richtet sich nach den Erfordernissen des zu bedienenden Marktes. Verfahrenstechnische Daten für den Backbone müssen projektspezifisch ermittelt werden.	80%	10%	30%		
% -Modul-Engineering bei Spezialmodul	SPS	Verfahrenstechnische Daten für das	10%	0%	90%		
	RI/O	Engineering eines Spezialmoduls müssen aus den Anforderungen des Anlagenbetreibers ermittelt werden. Aufwand dazu lässt sich	10%	0%	90%		

	somit nicht in ein projektunabhängiges Modul-Engineering verlagern. Lediglich die verfahrenstechnischen Daten des Modulrumpfes können projektunabhängig ermittelt werden (10%).		
Erzeugung von zusätzlichem Aufwand durch Zuordnung zum projekt-unabhängigen Modul-Engineering?	Wenn die verfahrenstechnischen Daten eines Standardmoduls im projektunabhängigen Modul-Engineering durch quantifizierende Klassen festgelegt werden, besteht im Gesamtanlagen-Engineering die Notwendigkeit eines Anforderungsvergleichs mit den Funktionen des Moduls. Dafür entsteht ein zusätzlicher Aufwand. Dieser ist stark abhängig vom Einsatz unterstützender Werkzeuge, unabhängig vom AT-System des Moduls und wird auf 10% festgelegt.		

Bezeichnung	3. Basisplanung				
	3.3 Technische Realisierung festlegen				
Beschreibung	Bei der Festlegung der technischen Realisierung wird für jede PLT-Stelle eine individuelle Lösung erarbeitet. Dazu werden die erforderlichen Geräte festgelegt. Die Ergebnisse werden sowohl für PLT-Stellen im PLT-Stellenblatt oder übergreifend in verschiedenen Listen zusammengefasst. Es werden u.a. die elektrische Verbraucherliste, verschiedene Mengengerüste für Geräte und des PLS erstellt. Dadurch werden u.a. die Anforderungen an die benötigte Infrastruktur ermittelt.				
Betrachtung der EA im modularen Kontext	Die Einzelaktivität der Festlegung der technischen Lösung umfasst zwei Aspekte. Zum einen wird für jede PLT-Stelle eine technische Lösung erarbeitet und zum anderen wird, aufbauend auf der technischen Lösung, die erforderliche Raumaufteilung und Infrastruktur ermittelt. Für Standardmodule ist die technische Lösung durch den Modulhersteller erarbeitet und festgelegt. Bei Spezialmodulen muss die technische Lösung durch den Modulhersteller auf die anlagenbezogenen Anforderungen angepasst werden. Für den Aspekt der Raumaufteilung und Infrastruktur gilt: Die Flexibilitätsanforderung von Modulen setzt eine Mobilität voraus, die wiederum die räumliche Ausprägung eines Moduls determiniert. Insofern ist durch die Tatsache einer modularen Anlagenarchitektur ein Großteil der Raumgestaltung und Infrastrukturanforderung festgelegt bzw. kann durch die geringere Anzahl der zu betrachtenden Entitäten leichter ermittelt werden. Im Gesamtanlagen-Engineering erbringen die Module die technische Realisierung. Diese Einzelaktivität beinhaltet somit auch die Anforderungsformulierung an die Module.				
Abhängigkeit vom Standardisierungsgrad des Moduls?	Ja				
Abhängigkeit von der Ausstattung mit RI/O oder SPS?	Nein				
Zuordnung zum:	Projektunabhängiges Modul-Engineering und Gesamtanlagen-Engineering				
	Entstehende Aufwände für:				
%-Modul-Engineering bei	SPS	Für Standardmodule wird die technische Lösung durch den Modulhersteller, basierend	80%	0%	20%

Standardmodul	RI/O	auf der Klassendefinition, erarbeitet und realisiert. Hierauf aufbauend können z.B. Verbraucherlisten ermittelt werden. Dies gilt nicht für den Anteil des Backbones.	80%	0%	20%
%-Modul-Engineering bei Spezialmodul	SPS	Für Spezialmodule muss die technische Lösung durch Auswertung der Anforderungen des Anlagenbetreibers erstellt werden. Lediglich die Raumaufteilung ist durch die modulare Anlagenarchitektur vorgegeben und kann somit unabhängig von der technischen Realisierung als gegeben angesehen werden.	10%	0%	90%
	RI/O		10%	0%	90%
Erzeugung von zusätzlichem Aufwand durch Zuordnung zum projekt-unabhängigen Modul-Engineering?	Nein				

Bezeichnung	3. Basisplanung				
	3.4 Kosten kalkulieren				
Beschreibung	Diese Kostenkalkulation bezieht sich direkt auf die festgelegte technische Realisierung und die dafür erforderlichen Apparate und Behälter einer PLT-Stelle. Durch diese Betrachtung wird eine Kostenschätzung auf $\pm 5\%$ ermöglicht.				
Betrachtung der EA im modularen Kontext	Auch bei modularen Anlagen ist die Kostenkalkulation erforderlich. Bei Standardmodulen wird die technische Realisierung projektunabhängig durch den Modulhersteller entwickelt. Die dafür angefallenen Kosten stehen somit projektunabhängig fest. Die technische Lösung eines Spezialmoduls wird im projektabhängigen Engineering-Prozess entwickelt. Aufwand für die Kostenkalkulation kann somit, bis auf den Aufwand der Kostenermittlung für den Modulrumpf, nicht verlagert werden.				
Abhängigkeit vom Standardisierungsgrad des Moduls?	Ja				
Abhängigkeit von der Ausstattung mit RI/O oder SPS?	Nein				
Zuordnung zum:	Projektunabhängiges Modul-Engineering und Gesamtanlagen-Engineering				
Entstehende Aufwände für:					MA
% - Modul-Engineering bei Standardmodul	SPS	Durch die projektunabhängige Entwicklung der technischen Lösung kann der dazu erforderliche Aufwand der Kostenkalkulation dem projektabhängigen Modul-Engineering zugewiesen werden. Die Kostenkalkulation für die technische Realisierung des Backbones ist hiervon ausgeschlossen.	80%	10%	30%
	RI/O		80%	10%	30%
%-Modul-	SPS	Im Falle des Einsatzes von Spezialmodulen	10%	0%	90%

Engineering bei Spezialmodul	RI/O	können nur geringe Aufwände für den Modulrumpf und somit deren Kostenkalkulation projektunabhängig erarbeitet werden.	10%	0%	90%
Erzeugung von zusätzlichem Aufwand durch Zuordnung zum projekt-unabhängigen Modul-Engineering?		Durch Vorverlagerung der Aufwände der Kostenermittlung für Standardmodule entsteht im Gesamtanlagen-Engineering der Aufwand, die Kosten für den Einsatz der Module zu ermitteln. Dieser zusätzliche Aufwand ist unabhängig vom AT-System des Moduls und wird auf 10% festgelegt.			

5.4.4. Ausführungsplanung

Bezeichnung	4. Ausführungsplanung				
	4.1 Geräte festlegen				
Beschreibung	In dieser Einzelaktivität werden für die zuvor festgelegte technische Realisierung Gerätetyp und Hersteller ausgewählt. Die Geräte werden bei den Geräteherstellern angefragt und Liefertermine ermittelt. Die ermittelten Ergebnisse werden u.a. im PLT-Stellenblatt und in Gerätelisten festgehalten.				
Betrachtung der EA im modularen Kontext	Für Standardmodule obliegt die Realisierung der technischen Lösung und die Auswahl dazu benötigter Geräte dem Modulhersteller. Die Einzelaktivität "Geräte festlegen" stellt die Ausgestaltung der technischen Lösung dar. Spezialmodule werden, bis auf einen Modulrumpf, während des projektabhängigen Anlagen-Engineerings geplant und gebaut.				
Abhängigkeit vom Standardisierungsgrad des Moduls?	Ja				
Abhängigkeit von der Ausstattung mit RI/O oder SPS?	Nein				
Zuordnung zum:	Projektunabhängiges Modul-Engineering und Gesamtanlagen-Engineering				
Entstehende Aufwände für:					MA
%-Modul-Engineering bei Standardmodul	SPS	Da die Ausführungsplanung eines Standardmoduls eine Spezifizierung der technischen Lösung ist, können die Aufwände hierfür im projektunabhängigen Modul-Engineering abgearbeitet werden. Dies gilt nicht für die Ausführungsplanung der Automatisierung des Backbones.	80%	30%	50%
	RI/O		80%	30%	50%
% -Modul-Engineering bei Spezialmodul	SPS	Im Falle des Einsatzes von Spezialmodulen können nur Aufwände für die Geräte des Modulrumpfes verlagert werden.	10%	0%	90%
	RI/O		10%	0%	90%
Erzeugung von zusätzlichem Aufwand durch Zuordnung zum projekt-	Das Auswählen von Modulen und der vergleichende Vorgang zwischen Anforderungen an das Modul und Funktionen des Moduls erfordern zusätzlichen Aufwand. Hierfür wurden zuvor etwaige Produktkataloge und Modulbeschreibungen der Modulhersteller ausgewertet. Die abschließende Festlegung der zu nutzenden Module verlangt				

unabhängigen Modul-Engineering?	zusätzlichen Aufwand, der abhängig von der Unterstützung durch Werkzeuge auf zunächst 30% festgelegt wird. Dieser Mehraufwand gilt nur für die Verwendung von Standardmodulen.
---------------------------------	--

Bezeichnung	4. Ausführungsplanung						
	4.2 Zentrale Einrichtungen festlegen						
Beschreibung	Aufbauend auf den Lage- und Aufstellungsplänen der Apparate und Behälter und der PLT-Stellenblätter werden während dieser Einzelaktivität die Funktionen der zentralen Einrichtungen der Leittechnik und elektrischen Energieversorgung zu- und angeordnet. Für die Apparate der zentralen Einrichtungen werden Leistungen potenzieller Lieferanten angefragt.						
Betrachtung der EA im modularen Kontext	Zentrale Funktionen und die dafür benötigten Einrichtungen sind im Fall einer modularen Anlagenarchitektur dem Backbone zuzuordnen. Dieser liegt im Verantwortungsbereich des Anlagenbetreibers [NE148]. Die Planung des Backbones ist projektabhängig, auch wenn einige Teile des Backbones schon vor der Entscheidung zum Bau der modularen Anlage vorhanden sein können. Zur Festlegung von prozesstechnischen Größen wie Druck und Durchflüssen müssen die Prozessgrößen der Module bekannt sein.						
Abhängigkeit vom Standardisierungsgrad des Moduls?	Nein						
Abhängigkeit von der Ausstattung mit RI/O oder SPS?	Nein						
Zuordnung zum:	Gesamtanlagen-Engineering						
		Entstehende Aufwände für:			MA	ZA	GA
% -Modul-Engineering bei Standardmodul	SPS	Die zentralen Einrichtungen sind abhängig von der prozesstechnischen Ausgestaltung der Module. Aus diesem Grund ist die Ausführungsplanung der zentralen Einrichtung in ihrer Ausprägung auch direkt von den verbauten Geräte in den Modulen abhängig,			0%	0%	100%
	RI/O	die Aufwände für die Ausführungsplanung der zentralen Einrichtung bleiben dennoch projektabhängig. Synergien können entstehen, wenn z.B. Ressourcen-verbräuche (Energie, usw.) nicht mehr von jedem Gerät einzeln in die zentralen Einrichtungen geleitet werden müssen, sondern von Modulen zur Verfügung gestellt werden.			0%	0%	100%
% -Modul-Engineering bei Spezialmodul	SPS	Die zentralen Einrichtungen sind nicht unabhängig von der inneren Ausgestaltung eines Moduls. Die Ausführungsplanung der zentralen Einrichtung ist in ihrer Ausprägung zwar direkt von den verbauten Geräten in den Modulen abhängig, die Aufwände für die Ausführungsplanung der zentralen Einrichtung bleiben dennoch projektabhängig.			0%	0%	100%
	RI/O				0%	0%	100%
Erzeugung von zusätzlichem	Nein						

Aufwand durch Zuordnung zum projekt-unabhängigen Modul-Engineering?	
---	--

Bezeichnung	4. Ausführungsplanung						
	4.3 Leitsystem spezifizieren						
Beschreibung	Aufbauend auf den PLT-Stellenblättern, dem Bedienkonzept und den problemorientierten Funktionsplänen wird in dieser Einzelaktivität das Pflichtenheft des Leitsystems und weitere Programmier- und Konfigurationsunterlagen erstellt. Die PLT-Funktionen werden auf die Anlagenstruktur angewandt und es werden ihnen Komponenten zugeordnet. Die benötigten Komponenten des Leitsystems werden in Mengengerüsten festgehalten und Lieferungen angefragt.						
Betrachtung der EA im modularen Kontext	<p>Das Leitsystem ist Teil des Backbones und befindet sich somit im Verantwortungsbereich des Anlagenbetreibers [NE148]. Die Ausgestaltung des Leitsystems ergibt sich durch die Anzahl und Art der geplanten Module und die Rahmenbedingungen des Produktionsstandortes.</p> <p>Ist ein Modul mit einer eigenen SPS ausgestattet, können die Anteile der Basisautomatisierung, Prozedursteuerung und Koordinierungssteuerung des Moduls in der Modul-SPS ausgeführt werden. Das Leitsystem der Gesamtanlage ist dann hinsichtlich des Kommunikationsbedarfes auszulegen.</p> <p>Ist ein Modul mit einer RI/O ausgestattet, muss die zugehörige Logik der Basisautomatisierung, Prozedur- und Koordinierungssteuerung des Moduls in einer SPS des übergeordneten Leitsystems verarbeitet werden. Zusätzlich zum Kommunikationsbedarf ist das Leitsystem in diesem Fall hinsichtlich der Anforderungen nach Speicherplatz und Verarbeitungsgeschwindigkeit auszulegen.</p>						
Abhängigkeit vom Standardisierungsgrad des Moduls?	Nein						
Abhängigkeit von der Ausstattung mit RI/O oder SPS?	Nein						
Zuordnung zum:	Gesamtanlagen-Engineering						
		Entstehende Aufwände für:			MA	ZA	GA
% -Modul-Engineering bei Standardmodul	SPS	Da der Backbone vom Anlagenbetreiber zu stellen ist und das Leitsystem zentraler Bestandteil des Backbones ist, ist die Spezifizierung des Leitsystems erst während des Gesamtanlagen-Engineerings möglich. Allerdings wird der Aufwand für die Zuordnung von Komponenten zu den PLT-Stellen während des Gesamtanlagen-Engineerings geringer. Die entsprechende Aufgabe muss allerdings für das AT-System eines Standardmoduls durchgeführt werden.			40%	0%	60%
	RI/O				40%	0%	60%

		Einzelaktivität einnimmt, wird der Einfluss der PLT-Stellenverteilung auf die Hälfte bestimmt. Somit kann bei einer PLT-Stellenverteilung von 80:20, 40% des Aufwands in das Modul-Engineering überführt werden. Die Zuordnung der Komponenten zu den PLT-Stellen ist dabei unabhängig vom Einsatz SPS oder RI/O der Module.			
%-Modul-Engineering bei Spezialmodul	SPS	Da der Backbone vom Anlagenbetreiber zu stellen ist und das Leitsystem zentraler Bestandteil des Backbones ist, ist die Spezifizierung des Leitsystems erst während des Gesamtanlagen-Engineerings möglich. Für Spezialmodule findet die Ausplanung der PLT-Stellen projektabhängig statt. Eine Aufwandsverschiebung in das Modul-Engineering ist somit nicht möglich.	0%	0%	100%
	RI/O		0%	0%	100%
Erzeugung von zusätzlichem Aufwand durch Zuordnung zum projekt-unabhängigen Modul-Engineering?	Nein				

Bezeichnung	4. Ausführungsplanung
	4.4 Stellenpläne erzeugen
Beschreibung	Diese Einzelaktivität enthält die Erzeugung der Stellenpläne. Ein Stellenplan stellt die geplanten PLT-Funktionen einer PLT-Stelle mit graphischen Symbolen dar. Er zeigt die topologische Anordnung aller Betriebsmittel mit allen Verbindungs- und Klemmenpunkten. Des Weiteren wird in dieser Einzelaktivität auch die Einbindung von Package-Units geplant.
Betrachtung der EA im modularen Kontext	PLT-Stellenpläne enthalten die funktionale Umsetzung einer PLT-Stelle. Für Standardmodule liegt dies im Verantwortungsbereich des Modulherstellers. Für Spezialmodule kann die funktionale Umsetzung erst während des Gesamtanlagen-Engineerings stattfinden, da erst zu diesem Zeitpunkt die entsprechenden Anforderungen bekannt sind. Die beiden Einsatzfälle SPS und RI/O unterscheiden sich im Inhalt der PLT-Stellenpläne. Ist ein Modul mit SPS ausgestattet, beziehen sich die Stellenpläne auf die Automatisierungsfunktionen innerhalb des Moduls. Die Schnittstellen des Moduls nach außen können ebenfalls dargestellt werden. Eine Anbindung dieser Schnittstellen an ein übergeordnetes Leitsystem ist nicht enthalten. Ist das Modul mit einer RI/O ausgestattet, wird die Logik der Software im übergeordneten Leitsystem verarbeitet. Die Stellenpläne eines Moduls mit RI/O müssen somit auch Teile des übergeordneten Leitsystems umfassen. Die explizite Integration von Package-Units kann vernachlässigt werden, da

	diese in diesem Kontext durch Module ersetzt werden.					
Abhängigkeit vom Standardisierungsgrad des Moduls?		Ja				
Abhängigkeit von der Ausstattung mit RI/O oder SPS?		Ja				
Zuordnung zum:	Projektunabhängiges Modul-Engineering und Gesamtanlagen-Engineering					
%-Modul-Engineering Standardmodul	bei	SPS	Für den Einsatzfall SPS im Modul können die Stellenpläne, für die PLT-Stellen, die sich im Modul befinden, in das projektunabhängige Engineering verlagert werden.	80%	0%	20%
		RI/O	Beim Einsatzfall RI/O können nur die Anteile der Stellenpläne erzeugt werden, die sich ausschließlich auf die im Modul befindlichen PLT-Stellen beziehen. PLT-Stellenpläne, die Anteile des Backbones enthalten, können erst während des Gesamtanlagen-Engineerings ergänzt werden. Der Prozentsatz, der PLT-Stellenpläne, die sich auf Teile des Backbones beziehen wird auf die Hälfte festgelegt.	40%	0%	60%
%-Modul-Engineering Spezialmodul	bei	SPS	Bei Spezialmodulen wird nur der Modulrumpf im projektunabhängigen Modul-Engineering bearbeitet. Dementsprechend können die PLT-Stellenpläne nur für diesen erzeugt werden. Der verlagerbare Aufwand wird auf 10% festgelegt.	10%	0%	90%
		RI/O		10%	0%	90%
Erzeugung von zusätzlichem Aufwand durch Zuordnung zum projekt-unabhängigen Modul-Engineering?	Nein					

Bezeichnung	4. Ausführungsplanung
	4.5 Stellenfunktionspläne erzeugen
Beschreibung	In dieser Einzelaktivität werden die Stellenfunktionspläne durch Analyse der R&I-Fließbilder und PLT-Stellenpläne erzeugt. Ein Stellenfunktionsplan stellt die Softwarelogik einer PLT-Aufgabe formalisiert dar. Dazu werden meist standardisierte Typicals miteinander verknüpft, umso die erforderliche Logik der PLT-Aufgabe abzubilden. Die Stellenfunktionspläne werden typischerweise in einer späteren Phase genutzt, um sie direkt in Quellcode der SPS umzusetzen. Dazu werden Continuous-Funktion-Charts (CFC) genutzt.

Betrachtung der EA im modularen Kontext	Stellenfunktionspläne stellen Softwarelogik formalisiert dar. Für Standardmodule wird die Softwarelogik durch den Modulhersteller festgelegt. Aufwände hierfür sind somit projektunabhängig. Für Spezialmodule werden die PLT-Stellen und damit auch die Stellenfunktionspläne erst während des Gesamtanlagen-Engineerings inhaltlich ausgeplant. Für die Einsatzfälle RI/O und SPS unterscheiden sich die Stellenfunktionspläne nur durch den Ort der Laufzeitumgebung, nicht aber im zeitlichen Auftreten der Aufwände. Beim Einsatzfall Module mit SPS können die Stellenfunktionspläne durch zielsystemspezifische Templates abgebildet werden, da das Engineering-Werkzeug bestimmt ist. Für den Einsatzfall RI/O beziehen sich die Inhalte der Stellenfunktionspläne auf eine erst während des Backbone-Engineerings festzulegende SPS.					
Abhängigkeit vom Standardisierungsgrad des Moduls?	Ja					
Abhängigkeit von der Ausstattung mit RI/O oder SPS?	Nein					
Zuordnung zum:	Projektunabhängiges Modul-Engineering und Gesamtanlagen-Engineering					
%-Modul-Engineering bei Standardmodul	SPS	Stellenfunktionspläne basieren auf Informationen der PLT-Stellenblätter und des R&I-Fließbildes. Die Erzeugung der Stellenfunktionspläne, die PLT-Stellen des Moduls enthalten, können für ein Standardmodul mit SPS, projektunabhängig erstellt werden.	80%	0%	20%	
	RI/O	Bei Verwendung von RI/O im Modul können nur die Anteile der Stellenfunktionspläne erzeugt werden, die sich ausschließlich generische Typicals verwenden. Stellenfunktionspläne, die leitsystemspezifische Typicals verwenden, können erst während des Gesamtanlagen-Engineerings ergänzt werden. Der entsprechende Prozentsatz wird auf die Hälfte festgelegt.	40%	0%	60%	
%-Modul-Engineering bei Spezialmodul	SPS	Bei Spezialmodulen wird nur der Modulrumpf im projektunabhängigen Modul-Engineering bearbeitet. Dementsprechend können die Stellenfunktionspläne nur für diesen erzeugt werden. Der verlagerbare Aufwand wird auf 10% festgelegt.	10%	0%	90%	
	RI/O		10%	0%	90%	
Erzeugung von zusätzlichem Aufwand durch Zuordnung zum projekt-unabhängigen Modul-Engineering?	Nein					

Bezeichnung	4. Ausführungsplanung				
	4.6 Montageunterlagen erstellen				
Beschreibung	Aufbauend auf den PLT-Stellenplänen und -blättern, den Gerätelisten und Aufstellungsplänen der Apparate und Behälter werden in dieser Einzelaktivität die Montageunterlagen erstellt. Dies bedeutet die Erstellung der Aufstellungs- und Anordnungspläne, Verdrahtungspläne, Einbauzeichnungen, Pläne für PLT-Räume und Leitstände und Anfragen bei entsprechenden Zulieferern für diese Montageleistungen.				
Betrachtung der EA im modularen Kontext	Modulare Anlagen setzen sich aus Modulen zusammen. Module determinieren dadurch einen Großteil des physikalischen Aufbaus der Gesamtanlage. Verdrahtungen und Rohrleitungen werden über schnelllösbare Kopplungen realisiert. Die dafür benötigten Montageunterlagen enthalten weniger Informationen. Für die Erstellung der Montageunterlagen der Gesamtanlage wird somit weniger Aufwand anfallen.				
Abhängigkeit vom Standardisierungsgrad des Moduls?	Ja				
Abhängigkeit von der Ausstattung mit RI/O oder SPS?	Nein				
Zuordnung zum:	Projektunabhängiges Modul-Engineering und Gesamtanlagen-Engineering				
Entstehende Aufwände für:					
%-Modul-Engineering bei Standardmodul	SPS	Der Aufbau eines Standardmoduls liegt im Verantwortungsbereich des Modulherstellers. Dieser erstellt während des projektunabhängigen Modul-Engineerings die Montageunterlagen. Montageunterlagen für die Verbindungen zwischen Backbone und Modulen sowie die Montageunterlagen des Backbones selbst können erst während des Gesamtanlagen-Engineerings angefertigt werden. Der Aufwand dieser Einzelaktivität korreliert mit der Anzahl der PLT-Stellen. Dieses Verhältnis soll zunächst zu 80:20 angenommen werden. Zu beachten sind Anteile, die für die Montageplanung von verteilten Modulbestandteilen anfallen. Dabei kann es sich um Leistungselektronik handeln, die aus Explosionsschutz räumlich ausgelagert sind. Diese Belange können, obwohl sie zum Modul gehören, erst im Gesamtanlagen-Engineering betrachtet werden. Dieser nicht verlagerbare Aufwand wird auf 10% festgelegt.	70%	0%	30%
	RI/O		70%	0%	30%
%-Modul-Engineering bei	SPS	Spezialmodule werden erst während des Modul-Engineerings parallel zum	10%	0%	90%

Spezialmodul	RI/O	Gesamtanlagen-Engineering geplant und erstellt. Bis auf einen Modulrumpf kann somit kein Aufwand zur Erstellung der Montageunterlagen verlagert werden.	10%	0%	90%
Erzeugung von zusätzlichem Aufwand durch Zuordnung zum projekt-unabhängigen Modul-Engineering?	Nein				

5.4.5. Errichtung

Bezeichnung	5. Errichtung				
	5.1 Bestellung veranlassen				
Beschreibung	Die in den PLT-Stellenblättern und Gerätelisten angegebenen Geräte, Apparate und Software werden während dieser Einzelaktivität bestellt. Dazu wird der Bedarf gebündelt und umsortiert, um so eine herstellerspezifische Bestellung durchführen zu können. Ergebnisse dieser Einzelaktivität sind Aufträge für Lieferungen und Leistungen, aus denen Bestellanforderungen oder Entnahmeaufträgen abgeleitet werden.				
Betrachtung der EA im modularen Kontext	Ein Modul wird durch einen Modulhersteller geplant und errichtet. Mit der Festlegung auf einen Modulhersteller ist somit eine Vielzahl von Geräten, Apparaten und Software determiniert, der Suchaufwand wird verringert. Module sind allerdings weitaus komplexer als einfache Geräte und Apparate. Der Abgleich zwischen Anforderungen eines Prozesses mit den Fähigkeiten eines Moduls wird entsprechend mehr Aufwand benötigen, da ein Modul über eine größere Anzahl an Parametern verfügt als ein einzelnes im Modul verbautes Gerät.				
Abhängigkeit vom Standardisierungsgrad des Moduls?	Ja				
Abhängigkeit von der Ausstattung mit RI/O oder SPS?	Nein				
Zuordnung zum:	Projektunabhängiges Modul-Engineering und Gesamtanlagen-Engineering				
		Entstehende Aufwände für:			MA ZA GA
%-Modul-Engineering bei Standardmodul	SPS	Die im Modul verbauten Geräte und Apparate werden durch den Modulhersteller festgelegt. Für ein Standardmodul kann dies schon projektunabhängig geschehen. Für den Gesamtaufwand muss hierbei der Anteil des Backbone-Engineerings abgezogen werden. Der Gesamtaufwand dieser Einzelaktivität korreliert mit der Anzahl der PLT-Stellen.			80% 20% 40%
	RI/O				80% 20% 40%
%-Modul-Engineering bei	SPS	Für Spezialmodule kann die Bestellung der Module und Geräte erst nach der Ermittlung			10% 0% 90%

Spezialmodul	RI/O	der verfahrenstechnischen Ausplanung und dem Festlegen der PLT-Stellen geschehen. Bis auf die Geräte, die im Modulrumpf verbaut sind, kann kein Aufwand projektunabhängig verarbeitet werden. Für den Modulrumpf werden 10% festgelegt.	10%	0%	90%
Erzeugung von zusätzlichem Aufwand durch Zuordnung zum projekt-unabhängigen Modul-Engineering?		Durch die Nutzung von Modulen entsteht eine zusätzliche Distributionsebene. Der Modulhersteller bestellt Geräte und Apparate, um sie im Modul zu verbauen. Für diese Tätigkeit wurde Aufwand ins projektunabhängige Modul-Engineering verschoben. Ein Anlagenbetreiber muss wiederum eine Bestellung eines Moduls veranlassen. Der Mehraufwand für die Bestellung eines Moduls entsteht zusätzlich und wird auf 20% festgelegt. Dieser Zusatzaufwand besteht nur bei Nutzung von Standardmodulen.			

Bezeichnung	5. Errichtung				
	5.2 Lieferung bestätigen				
Beschreibung	Nach dem Geräte und Apparate bestellt wurden, wird die Lieferung der Teile in dieser Einzelaktivität bestätigt. Dazu werden der externe und interne Wareneingang geprüft und die gelieferten Teile ausgegeben.				
Betrachtung der EA im modularen Kontext	Auch für die Errichtung einer modularen Anlage werden Geräte, Apparate und Software benötigt. Für Standardmodule werden diese vom Modulhersteller festgelegt und vor dem Beginn des Gesamtanlagen-Engineerings verbaut. Der Anlagenbetreiber bestellt, nach Auswahl, die erforderlichen Module und bestätigt deren Lieferung. Die Bestellung und Lieferung von Modulen betreffen damit einen Großteil der Geräte, Apparate. Da Spezialmodule erst während des Gesamtanlagen-Engineerings projektiert werden, werden die erforderlichen Geräte, Apparate und Software erst während des Gesamtanlagen-Engineerings geliefert.				
Abhängigkeit vom Standardisierungsgrad des Moduls?	Ja				
Abhängigkeit von der Ausstattung mit RI/O oder SPS?	Nein				
Zuordnung zum:	Projektunabhängiges Modul-Engineering und Gesamtanlagen-Engineering				
Entstehende Aufwände für:					MA
% -Modul-Engineering bei Standardmodul	SPS	Die im Modul verbauten Geräte und Apparate werden durch den Modulhersteller festgelegt. Für ein Standardmodul kann dies schon projektunabhängig geschehen. Für den	80%	10%	30%
	RI/O	Gesamtaufwand müssen hierbei der Anteil des Backbone-Engineerings abgezogen werden. Der Gesamtaufwand dieser Einzelaktivität korreliert mit der Anzahl der PLT-Stellen, die zunächst mit 80:20 festgelegt werden.	80%	10%	30%
% -Modul-Engineering bei	SPS	Für Spezialmodule kann die Lieferung der Module und Geräte erst nach der Ermittlung	10%	10%	100%

Spezialmodul	RI/O	der verfahrenstechnischen Ausplanung und dem Festlegen der PLT-Stellen geschehen. Bis auf die Geräte, die im Modulrumpf verbaut sind, kann kein Aufwand projektunabhängig verarbeitet werden.	10%	10%	100%
Erzeugung von zusätzlichem Aufwand durch Zuordnung zum projekt-unabhängigen Modul-Engineering?		Durch Anlieferung der zuvor bestellten Module müssen die Lieferungen und deren Erhalt bestätigt werden. Da die Summe der angelieferten Gegenstände (Module) wesentlich geringer ausfällt, entsteht hierbei lediglich ein zusätzlicher Aufwand von 10%. Da man sowohl die Lieferung von Standard- als auch den Rümpfen der Spezialmodule bestätigen muss, gilt dieser Mehraufwand unabhängig vom Standardisierungsgrad der Module.			

Bezeichnung	5. Errichtung				
	5.3 Software konfigurieren				
Beschreibung	In dieser Einzelaktivität wird der systemspezifische Softwarecode erstellt. Dabei werden die Programmier- und Konfigurationsunterlagen aus der Leitsystemspezifikation, das Leitsystem Pflichtenheft sowie die PLT-Stellenfunktionspläne ausgewertet und lauffähiger Code erstellt. Dieser umfasst die prozessnahen Funktionen, Anzeige und Bedienfunktionen und Rezeptfunktionen. Im Softwarecode wird eine systemspezifische Dokumentation erstellt. Zusätzlich werden zum Bedienen, allgemeinen Verständnis und späterer Wartung, Bedienungshandbücher erstellt. Der Softwarecode einer PLT-Stelle wird typischerweise innerhalb eines CFC abgebildet. Um die in den CFC berechneten Aktorsignale der PLT-Stellen in einer sinnvollen Reihenfolge in Verbindung zu bringen, werden sie typischerweise in einer Ablaufsprache (AS) bzw. Sequential-Funktion-Chart (SFC) abgerufen.				
Betrachtung der EA im modularen Kontext	Die gesamte Software einer modularen Anlage verteilt sich auf die Verarbeitungslogik der Module und des übergeordneten Leitsystems. Bei Modulen, die über eine SPS verfügen, wird der Softwarecode, der die Funktion des Moduls realisiert, im Modul ausgeführt. Für ein Modul, welches mit RI/O ausgestattet ist, werden diese Funktionen in einer SPS des übergeordneten Leitsystems ausgeführt. Hierfür muss der Softwarecode über eine Schnittstelle ins Leitsystem eingebracht werden.				
Abhängigkeit vom Standardisierungsgrad des Moduls?	Ja				
Abhängigkeit von der Ausstattung mit RI/O oder SPS?	Ja				
Zuordnung zum:	Projektunabhängiges Modul-Engineering und Gesamtanlagen-Engineering				
	Entstehende Aufwände für:				
%-Modul-Engineering bei Standardmodul	SPS	Bei Ausstattung des Standardmoduls mit einer SPS kann der Softwarecode in der SPS des Moduls lauffähig eingeschrieben und dort ausgeführt werden. Bei Standardmodulen mit RI/O ist die Hardware des Moduls fertiggestellt. Die Logik des Softwarecodes, der	80%	40%	60%
	RI/O		80%	40%	60%

		<p>zur Realisierung der verfahrenstechnischen Funktion des Moduls notwendig ist, liegt in Form von Stellenfunktionsplänen vor. Da während der projektunabhängigen Phase keine Kenntnis über den Hersteller und die Ausführung des übergeordneten Leitsystems vorliegt, kann der Softwarecode nur systemunspezifisch angefertigt werden. Das heißt, dieser muss als geschlossenes Modell über eine vereinheitlichte Schnittstelle in das übergeordnete Leitsystem eingebracht werden. Unabhängig von der AT-Ausstattung des Moduls müssen weitere Softwareartefakte in das übergeordnete Leitsystem eingebracht werden. Dabei handelt es sich um Anzeige und Bedienfunktionalität und Softwarecode, der den Befehl und erforderliche Parameter zum Ausführen der Modulfunktion verarbeiten und an das Modul übermitteln kann. Diese können für Standardmodule aus dem oben beschriebenen Grund nur systemunspezifisch beschrieben werden, um sie während des Gesamtanlagen-Engineerings zu importieren. Der Aufwand, der auf Basis eines klassischen Engineerings projektunabhängig realisiert werden kann korreliert mit der Verteilung der PLT-Stellen in der Gesamtanlage.</p>		
%-Modul-Engineering bei Spezialmodul	SPS	Spezialmodule werden, bis auf einen Modulrumpf, erst während des Gesamtanlagen-Engineerings geplant und errichtet. Da dieser Prozess auch die Spezifikation des Leitsystems enthält, kann der	0%	0% 100%
	RI/O	Softwarecode sowohl für den Einsatzfall SPS als auch RI/O erst systemspezifisch erstellt werden. Die Aktivität kann somit nicht projektunabhängig verarbeitet werden. Der Softwarecode des Modulrumpfes kann vernachlässigt werden, da die Überprüfung mit der logischen Kompatibilität zwischen den Codebestandteilen größer wäre als die Einsparung durch Verlagerung des Aufwands.	0%	0% 100%
Erzeugung von zusätzlichem Aufwand durch Zuordnung zum projekt-unabhängigen Modul-Engineering?		Das Importieren der systemunabhängigen Softwareartefakte in das übergeordnete Leitsystem und die Umwandlung der Softwareartefakte in das systemspezifische Datenformat erzeugt zusätzlichen Aufwand während des Gesamtanlagen-Engineerings. Dieser ist stark abhängig von der Ausgestaltung der Importschnittstelle(n) des entsprechenden Leitsystems. Er kann aus diesem Grund nicht genau bestimmt werden, sollte allerdings maximal den Aufwand der Einzelaktivität einer		

	klassischen Anlage nicht übersteigen. Er gilt nur für Standardmodule und wird zunächst auf 40% festgelegt.
--	--

Bezeichnung	5. Errichtung					
	5.4 Montage vorbereiten					
Beschreibung	In dieser Einzelaktivität wird, auf Basis der Mengengerüste und Montageunterlagen, die erforderliche Montageleistung ermittelt. Die Montageorganisation richtet die Baustelle ein und ergänzt das Projekt-Leistungsverzeichnis.					
Betrachtung der EA im modularen Kontext	Modularität bestimmt zu einem großen Teil den physikalischen Aspekt. Insofern wird durch das modulare Architekturprinzip einer Anlage auch die Montage beeinflusst. Die Geräte und Apparate werden in Modulen verbaut und diese untereinander und mit dem Backbone verbunden. Durch die Nutzung von standardisierten physikalischen Verbindungen ist der Aufwand der Montage einer modularen Anlage geringer als der einer klassischen Anlage.					
Abhängigkeit vom Standardisierungsgrad des Moduls?	Ja					
Abhängigkeit von der Ausstattung mit RI/O oder SPS?	Nein					
Zuordnung zum:	Projektunabhängiges Modul-Engineering und Gesamtanlagen-Engineering					
	Entstehende Aufwände für:					MA
% -Modul-Engineering bei Standardmodul	SPS	Die Montage eines Standardmoduls kann projektunabhängig geschehen, da das Mengengerüst und die Montageunterlagen vorliegen. Der Aufwand hierfür korreliert mit der Verteilung der PLT-Stellen der Gesamtanlage, welche auf ein Verhältnis von 80:20 festgelegt wird.	80%	10%	30%	
	RI/O		80%	10%	30%	
% -Modul-Engineering bei Spezialmodul	SPS	Spezialmodule werden im Gesamtanlagen-Engineering geplant und errichtet. Dies umfasst auch die Vorbereitung der Montage. Aufwand kann somit nicht projektunabhängig abgearbeitet werden.	0%	0%	100%	
	RI/O		0%	0%	100%	
Erzeugung von zusätzlichem Aufwand durch Zuordnung zum projekt-unabhängigen Modul-Engineering?	Durch die Vorgabe des modularen Architekturprinzips müssen während des Gesamtanlagen-Engineerings nun Module miteinander montiert werden. Diese Montage muss vorbereitet werden. Dies umfasst z.B. die Anordnung der Module und die prozesstechnische Verbindung der Module untereinander. Dafür entsteht bei Nutzung von Standardmodulen ein zusätzlicher Aufwand, der abhängig von unterstützenden Werkzeugen auf 10% des ursprünglichen EA-Aufwandes festgelegt wird.					

Bezeichnung	5. Errichtung					
	5.5 Montage überwachen					

Beschreibung	Die Überwachung der Montage beinhaltet die Abstimmung mit anderen Gewerken, die Aufsicht über die Lieferung und Ausführung der Montageleistungen und Durchführung von Baustellenbesprechungen. Die Aktualisierung der Montageunterlagen bei Änderungen wird im Rotexemplar festgehalten. Nach der Errichtung wird eine Errichtungsbescheinigung ausgestellt.				
Betrachtung der EA im modularen Kontext	Modularität bestimmt zu einem großen Teil den physikalischen Aspekt. Insofern wird durch das modulare Architekturprinzip einer Anlage auch die Montage beeinflusst. Die Geräte und Apparate werden in Modulen verbaut und diese untereinander und mit dem Backbone verbunden. Durch die Nutzung von standardisierten physikalischen Verbindungen ist der Aufwand der Montage einer modularen Anlage geringer als der einer klassischen Anlage.				
Abhängigkeit vom Standardisierungsgrad des Moduls?	Ja				
Abhängigkeit von der Ausstattung mit RI/O oder SPS?	Nein				
Zuordnung zum:	Projektunabhängiges Modul-Engineering und Gesamtanlagen-Engineering				
Entstehende Aufwände für:					
%-Modul-Engineering bei Standardmodul	SPS	Die Montage eines Standardmoduls kann projektunabhängig geschehen, da das Mengengerüst und die Montageunterlagen vorliegen. Der Aufwand hierfür korreliert mit der Verteilung der PLT-Stellen der Gesamtanlage, welche auf ein Verhältnis von 80:20 festgelegt wird.	80%	5%	25%
	RI/O		80%	5%	25%
%-Modul-Engineering bei Spezialmodul	SPS	Spezialmodule werden im Gesamtanlagen-Engineering geplant und errichtet. Dies umfasst auch die Überwachung der Montage. Aufwand kann somit nicht projektunabhängig abgearbeitet werden.	0%	0%	100%
	RI/O		0%	0%	100%
Erzeugung von zusätzlichem Aufwand durch Zuordnung zum projekt-unabhängigen Modul-Engineering?	Durch die Vorgabe des modularen Architekturprinzips müssen während des Gesamtanlagen-Engineerings nun Module miteinander montiert werden. Die Montage muss überwacht werden. Man kann davon ausgehen, dass für die prozesstechnische Verbindung standardisierte Schnellkopplungen eingesetzt werden. Es entsteht zusätzlicher Aufwand, der auf 5% des ursprünglichen EA-Aufwandes festgelegt wird. Dieser Aufwand ist unabhängig vom eingesetzten AT-System der Module und gilt nur für Standardmodule.				

Bezeichnung	5. Errichtung
	5.6 Funktion prüfen
Beschreibung	Nach der Montage muss die Funktion der Gesamtanlage überprüft werden. Dazu gehört sowohl die Überprüfung der PLT-Funktionen, also die Software- und Hardwarebestandteile, welche die Funktion realisieren, als auch die Beseitigung festgestellter Fehler. Die Ergebnisse der Prüfung werden dokumentiert, Veränderungen werden in Rotexemplaren festgehalten.

Betrachtung der EA im modularen Kontext	Die Funktionsprüfung einer modularen Anlage muss den gleichen Anforderungen einer nicht-modularen Anlage genügen. Hierbei wird davon ausgegangen, dass ein Modul nicht als Gerät abgenommen wird. Funktionsprüfungen beim Modulhersteller sind möglich und im Rahmen einer frühzeitigen Validierung zu präferieren.				
Abhängigkeit vom Standardisierungsgrad des Moduls?	Ja				
Abhängigkeit von der Ausstattung mit RI/O oder SPS?	Ja				
Zuordnung zum:	Projektunabhängiges Modul-Engineering und Gesamtanlagen-Engineering				
Entstehende Aufwände für:					MA
%-Modul-Engineering bei Standardmodul	SPS	Standardmodule sind schon vor Integration in die Gesamtanlage fertig geplant und errichtet. Eine Funktionsprüfung ist somit in allen Umfängen des Moduls möglich. Die Aufwände der Funktionsprüfung korrelieren mit dem Verhältnis der PLT-Stellen in der Gesamtanlage, variiert allerdings mit der automatisierungstechnischen Ausstattung des Moduls. Bei Modulen mit eigener SPS kann die gesamte Funktion überprüft werden. Bei Modulen mit RI/O ist dazu noch die SPS des Backbones nötig, die erst bei der Integration des Moduls zugängig ist. Der Funktionstest umfasst bei RI/O somit lediglich die Hardware. Die Funktion des Softwarecodes kann nur durch theoretische Methoden überprüft werden. Der Anteil dieser Überprüfung wird mit 20% festgelegt, sodass nur 60% der Aufwände vorverlagert werden können.	80%	30%	50%
% -Modul-Engineering bei Spezialmodul	RI/O	Spezialmodule werden erst während des Gesamtanlagen-Engineerings fertiggestellt. Die Funktionsüberprüfung ist somit nicht projektunabhängig möglich.	60%	30%	70%
	SPS		0%	0%	100%
Erzeugung von zusätzlichem Aufwand durch Zuordnung zum projekt-unabhängigen Modul-Engineering?	Durch Kombination mehrerer Module entstehen zusätzliche Funktionen (Emergenz). Diese Funktionen müssen ebenso überprüft werden. Der dadurch entstehende Aufwand kann keinem der Module zugerechnet werden. Er entsteht nur für Standardmodule, ist unabhängig von deren AT-System und wird auf 30% festgelegt.				

5.4.6. Inbetriebsetzung

Bezeichnung	6. Inbetriebsetzung				
	6.1 Personal ausbilden				
Beschreibung	Um die Anlage sicher in Betrieb nehmen und halten zu können, müssen die Anlagenfahrer und das Betreuungspersonal ausgebildet werden. Dies bedeutet die Vermittlung des Anlagenüberblicks und der Zielsetzung der Anlage. Die Ausbildung umfasst Schulungen am Zielsystem durch Simulation unterschiedlicher Prozesszustände.				
Betrachtung der EA im modularen Kontext	Der sichere Betrieb ist auch bei modularen Anlagen notwendig. Somit müssen die Anlagenfahrer und das Betreuungspersonal auch auf modularen Anlagen ausgebildet werden. Die Ausbildung an Modulen kann dabei beim Modulhersteller erfolgen. Eine projektunabhängige Ausbildung des Personals ist allerdings nicht möglich. Durch die Nutzung vorgefertigter Lösungen wird die tiefe Kenntnis der Anlage u.U. nicht mehr vorhanden sein bzw. nicht benötigt. Die Ausbildung des Personals muss aus diesem Grund teilweise durch den Modulhersteller übernommen werden. Eine Verschiebung der Aufwände in ein projektunabhängiges Engineering ist nicht möglich.				
Abhängigkeit vom Standardisierungsgrad des Moduls?	Nein				
Abhängigkeit von der Ausstattung mit RI/O oder SPS?	Nein				
Zuordnung zum:	Gesamtanlagen-Engineering				
Entstehende Aufwände für:					
%-Modul-Engineering bei Standardmodul	SPS	Da Standardmodule schon vor der Integration in die Gesamtanlage fertig geplant und erbaut sind, kann die Schulung des Bedienpersonals schon frühzeitig geschehen. Eine Vorverlagerung in das Modul-Engineering ist allerdings nicht möglich.	0%	0%	100%
	RI/O		0%	0%	100%
%-Modul-Engineering bei Spezialmodul	SPS	Spezialmodule werden erst während des Gesamtanlagen-Engineerings geplant und erbaut. Eine Ausbildung des Bedienpersonals ist somit nicht projektunabhängig möglich.	0%	0%	100%
	RI/O		0%	0%	100%
Erzeugung von zusätzlichem Aufwand durch Zuordnung zum projekt-unabhängigen Modul-Engineering?	Nein				

Bezeichnung	6. Inbetriebsetzung	
	6.2 Inbetriebsetzung unterstützen	
Beschreibung	Einige Anlagen- und Prozesszustände sind erst während des Betriebs erfassbar. Diese zu bewerten und zu optimieren ist Inhalt dieser Einzelaktivität. Dabei werden die Funktionen der Anlage durch geeignete	

	Parameterwahl optimiert.					
Betrachtung der EA im modularen Kontext	Ein optimaler Betrieb ist auch bei modularen Anlagen erwünscht. Abhängig von der Eingriffstiefe in das Automatisierungssystem des Moduls können dazu geeignete Werte für die zugängigen Parameter gewählt werden. Da die Inbetriebnahme erst im Gesamtanlagen-Engineering durchgeführt werden kann, ist die Verlagerung von Aufwänden in das projektunabhängige Modul-Engineering nicht möglich.					
Abhängigkeit vom Standardisierungsgrad des Moduls?	Nein					
Abhängigkeit von der Ausstattung mit RI/O oder SPS?	Nein					
Zuordnung zum:	Gesamtanlagen-Engineering					
			Entstehende Aufwände für:	MA	ZA	GA
%-Modul-Engineering Standardmodul	bei Standardmodul	SPS	Da die Inbetriebnahme erst im Gesamtanlagen-Engineering durchgeführt werden kann, ist die Verlagerung von Aufwänden in das Modul-Engineering nicht möglich.	0%	0%	100%
		RI/O	Da die Inbetriebnahme erst im Gesamtanlagen-Engineering durchgeführt werden kann, ist die Verlagerung von Aufwänden in das Modul-Engineering nicht möglich.	0%	0%	100%
% -Modul-Engineering Spezialmodul	bei Spezialmodul	SPS	Da die Inbetriebnahme erst im Gesamtanlagen-Engineering durchgeführt werden kann, ist die Verlagerung von Aufwänden in das Modul-Engineering nicht möglich.	0%	0%	100%
		RI/O	Da die Inbetriebnahme erst im Gesamtanlagen-Engineering durchgeführt werden kann, ist die Verlagerung von Aufwänden in das Modul-Engineering nicht möglich.	0%	0%	100%
Erzeugung von zusätzlichem Aufwand durch Zuordnung zum projekt-unabhängigen Modul-Engineering?	Nein					

Bezeichnung	6. Inbetriebsetzung
	6.3 Dokumentation revidieren
Beschreibung	Sollten während des Baus und der Inbetriebnahme notwendige Änderungen aufgetreten sein, so müssen diese, wenn sie von den ursprünglichen Planungsdokumenten abweichen, mit Roteinträgen zusätzlich gekennzeichnet werden. Die Dokumentation der Gesamtanlage muss um Planungsergebnisse, die noch nicht dokumentiert sind, ergänzt und revidiert werden.
Betrachtung der EA im modularen Kontext	Änderungen in den Planungsdokumenten modularer Anlagen müssen ebenfalls in Rotexemplaren festgehalten werden. Unterschiede zum konventionellen Vorgehen werden sich in der Behandlung vorgefertigter Module ergeben, da diese durch den Anlagenbetreiber nur sehr eingeschränkt veränderlich sind. Bei Spezialmodulen wird die Dokumentation in Rotexemplaren uneingeschränkt möglich und notwendig sein. In beiden Fällen wird eine Vorverlagerung von Aufwänden dieser Einzelaktivität nicht möglich sein, da die die Änderung erzeugenden

	Ereignisse erst während des Gesamtanlagen-Engineerings geschehen.																															
Abhängigkeit vom Standardisierungsgrad des Moduls?	Nein																															
Abhängigkeit von der Ausstattung mit RI/O oder SPS?	Nein																															
Zuordnung zum:	Gesamtanlagen-Engineering																															
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center; width: 15%;">Entstehende Aufwände für:</th> <th style="text-align: center; width: 15%;">MA</th> <th style="text-align: center; width: 15%;">ZA</th> <th style="text-align: center; width: 15%;">GA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: left;">% -Modul- Engineering bei Standardmodul</td> <td style="text-align: center;">SPS</td> <td colspan="2" rowspan="2">Eine Vorverlagerung von Aufwänden dieser Einzelaktivität ist nicht möglich.</td> <td style="text-align: center;">0%</td> <td style="text-align: center;">0%</td> <td style="text-align: center;">100%</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">RI/O</td> <td style="text-align: center;">0%</td> <td style="text-align: center;">0%</td> <td style="text-align: center;">100%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;">% -Modul- Engineering bei Spezialmodul</td> <td style="text-align: center;">SPS</td> <td colspan="2" rowspan="2">Eine Vorverlagerung von Aufwänden dieser Einzelaktivität ist nicht möglich.</td> <td style="text-align: center;">0%</td> <td style="text-align: center;">0%</td> <td style="text-align: center;">100%</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">RI/O</td> <td style="text-align: center;">0%</td> <td style="text-align: center;">0%</td> <td style="text-align: center;">100%</td> </tr> </tbody> </table>				Entstehende Aufwände für:	MA	ZA	GA	% -Modul- Engineering bei Standardmodul	SPS	Eine Vorverlagerung von Aufwänden dieser Einzelaktivität ist nicht möglich.		0%	0%	100%		RI/O	0%	0%	100%	% -Modul- Engineering bei Spezialmodul	SPS	Eine Vorverlagerung von Aufwänden dieser Einzelaktivität ist nicht möglich.		0%	0%	100%		RI/O	0%	0%	100%
Entstehende Aufwände für:	MA	ZA	GA																													
% -Modul- Engineering bei Standardmodul	SPS	Eine Vorverlagerung von Aufwänden dieser Einzelaktivität ist nicht möglich.		0%	0%	100%																										
	RI/O			0%	0%	100%																										
% -Modul- Engineering bei Spezialmodul	SPS	Eine Vorverlagerung von Aufwänden dieser Einzelaktivität ist nicht möglich.		0%	0%	100%																										
	RI/O			0%	0%	100%																										
Erzeugung von zusätzlichem Aufwand durch Zuordnung zum projekt- unabhängigen Modul-Engineering?	Nein																															

Bezeichnung	6. Inbetriebsetzung																															
	6.4 Dokumentation übergeben																															
Beschreibung	Nach Revidieren der Dokumente werden diese an den Anlagenbetreiber übergeben.																															
Betrachtung der EA im modularen Kontext	Auch bei modularen Anlagen erfolgt die Übergabe der Dokumentation. Die Übergabe unterscheidet sich nicht von der bei konventionellen Anlagen. Bei der Übergabe ist zu beachten, dass ein Großteil der modulbezogenen Dokumentation vom Modulhersteller erstellt wird und in die Dokumentation der Gesamtanlage eingebunden werden muss.																															
Abhängigkeit vom Standardisierungsgrad des Moduls?	Nein																															
Abhängigkeit von der Ausstattung mit RI/O oder SPS?	Nein																															
Zuordnung zum:	Gesamtanlagen-Engineering																															
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center; width: 15%;">Entstehende Aufwände für:</th> <th style="text-align: center; width: 15%;">MA</th> <th style="text-align: center; width: 15%;">ZA</th> <th style="text-align: center; width: 15%;">GA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: left;">% -Modul- Engineering bei Standardmodul</td> <td style="text-align: center;">SPS</td> <td colspan="2" rowspan="2">Eine Vorverlagerung von Aufwänden dieser Einzelaktivität ist nicht möglich.</td> <td style="text-align: center;">0%</td> <td style="text-align: center;">10%</td> <td style="text-align: center;">110%</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">RI/O</td> <td style="text-align: center;">0%</td> <td style="text-align: center;">10%</td> <td style="text-align: center;">110%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;">% -Modul- Engineering bei Spezialmodul</td> <td style="text-align: center;">SPS</td> <td colspan="2" rowspan="2">Eine Vorverlagerung von Aufwänden dieser Einzelaktivität ist nicht möglich.</td> <td style="text-align: center;">0%</td> <td style="text-align: center;">0%</td> <td style="text-align: center;">100%</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">RI/O</td> <td style="text-align: center;">0%</td> <td style="text-align: center;">0%</td> <td style="text-align: center;">100%</td> </tr> </tbody> </table>				Entstehende Aufwände für:	MA	ZA	GA	% -Modul- Engineering bei Standardmodul	SPS	Eine Vorverlagerung von Aufwänden dieser Einzelaktivität ist nicht möglich.		0%	10%	110%		RI/O	0%	10%	110%	% -Modul- Engineering bei Spezialmodul	SPS	Eine Vorverlagerung von Aufwänden dieser Einzelaktivität ist nicht möglich.		0%	0%	100%		RI/O	0%	0%	100%
Entstehende Aufwände für:	MA	ZA	GA																													
% -Modul- Engineering bei Standardmodul	SPS	Eine Vorverlagerung von Aufwänden dieser Einzelaktivität ist nicht möglich.		0%	10%	110%																										
	RI/O			0%	10%	110%																										
% -Modul- Engineering bei Spezialmodul	SPS	Eine Vorverlagerung von Aufwänden dieser Einzelaktivität ist nicht möglich.		0%	0%	100%																										
	RI/O			0%	0%	100%																										
Erzeugung von zusätzlichem Aufwand durch Zuordnung zum	Um die modulbezogene Dokumentation konsistent in eine Anlagendokumentation einzubinden, ist zusätzlicher Aufwand notwendig. Hierfür entsteht ein zusätzlicher Aufwand von 10%.																															

projekt-unabhängigen Modul-Engineering?	
---	--

5.4.7. Projektabschluss

Bezeichnung	7. Projektabschluss						
	7.1 Abschlussbericht erstellen						
Beschreibung	Aufbauend auf dem Pflichtenheft werden die Projektbesonderheiten im Abschlussbericht festgehalten. Dies umfasst Abweichungen vom Soll-Zustand und Vorschläge für zukünftige Verbesserungen.						
Betrachtung der EA im modularen Kontext	Abschlussberichte der Projektierungen modularer Anlagen werden lediglich Anteile aus Planungs- und Erbauungsaktivitäten des Gesamtanlagen-Engineerings umfassen. Aktivitäten des projektunabhängigen Modul-Engineerings werden im Abschlussbericht nicht enthalten sein. Der Abschlussbericht bezieht sich somit ausschließlich auf das Gesamtanlagen-Engineering.						
Abhängigkeit vom Standardisierungsgrad des Moduls?	Nein						
Abhängigkeit von der Ausstattung mit RI/O oder SPS?	Nein						
Zuordnung zum:	Gesamtanlagen-Engineering						
		Entstehende Aufwände für:			MA	ZA	GA
%-Modul-Engineering bei Standardmodul	SPS	Eine Vorverlagerung von Aufwänden dieser Einzelaktivität ist nicht möglich.			0%	0%	100%
	RI/O				0%	0%	100%
% -Modul-Engineering bei Spezialmodul	SPS	Eine Vorverlagerung von Aufwänden dieser Einzelaktivität ist nicht möglich.			0%	0%	100%
	RI/O				0%	0%	100%
Erzeugung von zusätzlichem Aufwand durch Zuordnung zum projekt-unabhängigen Modul-Engineering?	Nein						

Bezeichnung	7. Projektabschluss		
	7.2 Projektabrechnung erstellen		
Beschreibung	Die Summierung aller Projektkosten ergibt die Projektabrechnung. Abweichungen von der PLT-Kostenkalkulation müssen begründet werden.		
Betrachtung der EA im modularen Kontext	Die Kosten für modulare Anlagen müssen ebenfalls projektbezogen abgerechnet werden. Die Projektabrechnung unterscheidet sich nicht von der bei konventionellen Anlagen.		
Abhängigkeit vom Standardisierungsgrad des Moduls?	Nein		

Abhängigkeit von der Ausstattung mit RI/O oder SPS?			Nein		
Zuordnung zum:	Gesamtanlagen-Engineering				
% -Modul- Engineering bei Standardmodul	SPS	Entstehende Aufwände für:			MA
	RI/O	Eine Vorverlagerung von Aufwänden dieser Einzelaktivität ist nicht möglich.			ZA GA
% -Modul- Engineering bei Spezialmodul	SPS	Eine Vorverlagerung von Aufwänden dieser Einzelaktivität ist nicht möglich.			0% 0% 100%
	RI/O				0% 0% 100%
Erzeugung von zusätzlichem Aufwand durch Zuordnung zum projekt- unabhängigen Modul-Engineering?	Nein				

5.5. Zwischenfazit

Nachdem alle 26 EA der NA35 bewertet wurden, ergibt sich folgendes Zwischenfazit.

Bei der Verwendung von Standardmodulen kann aus 15 der 26 Einzelaktivitäten Aufwand in das Modul-Engineering verlagert werden, allerdings kann dies bei keiner EA geschlossen geschehen. Die EA müssen somit zusätzlich zerlegt beurteilt werden. Für die Zerlegung einer EA wird die PLT-Stellenverteilung als Stellvertretergröße genutzt (vgl. 4.3.3). Das Gesamtergebnis, also die Höhe des entstandenen Gesamtaufwands, ist somit stark von der PLT-Stellenverteilung zwischen Backbone und Modulen abhängig. Darüber hinaus kann festgestellt werden, dass bei elf der untersuchten EA zusätzlicher Aufwand durch Verlagerung von Teilen des Aufwands in das Modul-Engineering entsteht.

Bei Nutzung von Spezialmodulen kann festgestellt werden, dass Aufwand von elf Einzelaktivitäten projektunabhängig bearbeitet werden kann. Die verlagerbaren Aufwände sind allerdings wesentlich geringer als die der Standardmodule. Die Variation der automatisierungstechnischen Ausstattung eines Moduls erzeugte nur Änderungen in der Höhe des verlagerbaren Aufwands.

Durch die Verlagerung von Anteilen einer EA in das Modul-Engineering oder das Gesamtanlagen-Engineering entstehen die dort durchzuführenden Einzelaktivitäten. Beide Prozesse können allerdings noch logische Lücken aufweisen. Das logisch schlüssige Befüllen dieser Lücken kann unter Umständen zusätzlichen Aufwand erzeugen. Eine vertiefende Betrachtung dieser Lücken wird im folgenden Abschnitt durchgeführt.

Folgende Tabelle fasst die Ergebnisse übersichtlich zusammen. Ein Kreuzeintrag bedeutet, dass für diese Einzelaktivität Aufwände in das Modul-Engineering verlagert werden können.

Tabelle 5-2: Überblick über die verlagerbaren Einzelaktivitäten in das Modul-Engineering

	Standardmodul		Spezialmodul	
	R I/O	SPS	R I/O	SPS
1.1 Projektziele festlegen				
1.2 Grobkosten schätzen				
2.1 Anlagenkonzept festlegen	X	X	X	X
2.2 Kosten schätzen				
3.1 PLT-Funktionen festlegen	X	X	X	X
3.2 Verfahrenstechnische Daten beschaffen	X	X	X	X
3.3 Technische Realisierung festlegen	X	X	X	X
3.4 Kosten kalkulieren	X	X	X	X
4.1 Geräte festlegen	X	X	X	X
4.2 Zentrale Einrichtungen festlegen				
4.3 Leitsystem spezifizieren				
4.4 Stellenpläne erzeugen	X	X	X	X
4.5 Stellenfunktionspläne erzeugen	X	X	X	X
4.6 Montageunterlagen erstellen	X	X	X	X
5.1 Bestellung veranlassen	X	X	X	X
5.2 Lieferung bestätigen	X	X	X	X
5.3 Software konfigurieren	X	X		
5.4 Montage vorbereiten	X	X		
5.5 Montage überwachen	X	X		
5.6 Funktion prüfen	X	X		
6.1 Personal ausbilden				
6.2 Inbetriebsetzung unterstützen				
6.3 Dokumentation revidieren				
6.4 Dokumentation übergeben				
7.1 Abschlussbericht erstellen				
7.2 Projektabrechnung erstellen				

6. Entstehende Engineering-Prozesse

Im Abschnitt 5 wurde ein Vorgehen vorgestellt, mit dem die Einzelaktivitäten der NA35 systematisch auf Verlagerung in ein projektunabhängiges Modul-Engineering geprüft werden. 11 (15) der Einzelaktivitäten für Standardmodule (Spezialmodule) sind inhaltlich

nicht geeignet, in das Modul-Engineering verlagert zu werden. Diese Aktivitäten setzen Artefakte voraus, die erstmalig im Gesamtanlagen-Engineering verfügbar sind, bzw. deren inhaltliche Bearbeitung erst während des Gesamtanlagen-Engineerings möglich und sinnvoll ist. Der Aufwand dieser nicht verlagerbaren Aktivitäten verbleibt im zeitkritischen Gesamtanlagen-Engineering. Dagegen konnten bei Nutzung von Standardmodulen (Spezialmodulen) 15 (11) EA identifiziert werden, deren Arbeiten zumindest teilweise schon frühzeitig und projektunabhängig durchgeführt werden können.

Durch die Vorverlagerung der Aktivitäten entstehen die Inhalte und die Abfolge des Modul-Engineerings. Das Gesamtanlagen-Engineering wird durch die verbliebenen Inhalte des klassischen Engineerings gebildet. Beide neuen Engineering-Prozesse können allerdings logische Lücken aufweisen. Logische Lücken können durch fehlende, durch die Verlagerung entnommene Aktivitäten entstehen. Diese Lücken zu identifizieren und geeignet zu schließen, ist Inhalt dieses Kapitels. Beide Prozesse (Modul- und Gesamtanlagen-Engineering) können dazu unabhängig voneinander betrachtet und nach den Grundsätzen der Abwicklung von prozessleittechnischen Projekten beurteilt werden. Strukturell gilt somit, dass beide Prozesse wiederum auf die Phasen und Einzelaktivitäten der NA 35 überprüft werden müssen.

Die Schlussbetrachtung dieses Kapitels enthält die Aufbereitung der Ergebnisse und überprüft, ob die in Abschnitt 4.4 formulierten Thesen bestätigt werden können.

6.1. Vertiefende Betrachtung des Modul-Engineerings

Das Modul-Engineering verläuft in Verantwortung des Modulherstellers. Die von ihm durchgeführten Aktivitäten sind nicht zeitkritisch im Sinne dieser Arbeit und richten sich nach allgemeinen wirtschaftlichen Anforderungen, wie sie auch in der Produktentwicklung zu finden sind. Das Planen, Entwickeln und Bauen der Module wird aus diesem Grund eher einer Produktentwicklung als einem Anlagen-Engineering ähneln.

Der im Folgenden dargelegte Engineering-Prozess entsteht allerdings rein aus der Bewertung der in der NA35 enthaltenen Einzelaktivitäten. Es kann an dieser Stelle der Betrachtung allerdings schon davon ausgegangen werden, dass bei weiterer Anwendung des Prozesses Anpassungen durch den Modulhersteller durchzuführen sind. Aus diesem Grund sollen in dieser Arbeit markante Anpassungen, wie zum Beispiel Skaleneffekte, angedacht werden. Diese äußern sich speziell bei der Nutzung von Standardmodulen, da sie nach Fertigstellung nur noch sehr geringe Anpassungen notwendig machen und somit einmalig geplant und anschließend als wiederverwendbare Lösung genutzt werden sollen. Davon abweichend sind die Spezialmodule zu betrachten. Hier erfolgt lediglich die Erstellung des Modulrumpfes im Modul-Engineering. Projektbezogene Anpassungen müssen zeitlich parallel zum Gesamtanlagen-Engineering durchgeführt werden.

Die erste Aktivität, die im Modul-Engineering durch Verlagerung entstanden ist, ist die Festlegung des Anlagenkonzeptes (EA 2.1). Diese EA enthält die Erstellung des R&I-Fließbildes sowie der PLT-Stellenblätter. Zur Bearbeitung dieses Schrittes müssen allerdings zunächst das Projektziel (EA 1.1) festgelegt und die dafür geschätzten Kosten (EA 1.2) ermittelt werden. Das Projektziel wird im Falle eines Moduls qualitativ durch seine prozesstechnische Funktion festgelegt. Diese zusätzliche Aktivität ist in Abbildung 6-1 rot gekennzeichnet. Zusätzlich zur Festlegung der Funktion können verschiedene Modulgrößen pro Funktion definiert werden. Um dies in einem Wiederverwendungskonzept einzubetten, bietet sich die Entwicklung von großenbezogenen Produktklassen an. Diese Aktivität kommt der Beschaffung der verfahrenstechnischen Daten gleich (EA 3.2), da diese dadurch festgelegt werden.

Die Festlegung der Modulfunktion stellt für den Modulhersteller den Entschluss zur Schaffung eines Produktes dar. Der dafür zusätzlich entstehende Aufwand kann allerdings keiner Modulinstanz zugeschrieben werden und ist aus diesem Grund für die Aufwandsberechnung des Modul-Engineering nicht relevant.

Für jede Kombination aus Funktion und Größenklasse erfolgt im Anschluss eine Kostenschätzung. Für diese Aktivitäten entsteht zusätzlicher Aufwand im Modul-Engineering, da die ursprüngliche Aktivität im Gesamtanlagen-Engineering verblieben ist. Entsprechender Aufwand hierfür fällt allerdings nur einmal pro Funktion und Größenklasse an. Verteilt man diesen auf alle Module (Standardmodule & Modulrumpfe von Spezialmodulen) der entstehenden Produktfamilien, kann für eine Instanz eines Moduls kein Aufwand berechnet werden.

Die Aktivitäten der PLT-Funktionsfestlegung (EA 3.1), der Festlegung der technischen Realisierung (EA 3.3) und der Festlegung auf Gerätetypen und Hersteller (EA 4.1) konnten verlagert werden und sind ohne weitere Anpassungen im Modul-Engineering eines Standardmoduls anwendbar. Auch die Kostenkalkulation (EA 3.4), die sich auf die technische Realisierung des Moduls bezieht, ist ohne Anpassung ausführbar. Für Spezialmodule zählen die obigen Beschreibungen nur für den Modulrumpf.

Die Aufwände für die Bestimmung der zentralen Einrichtungen (EA 4.2) haben keine Relevanz bei der Betrachtung von Modulen. Das Fehlen dieser EA im Modul-Engineering erzeugt auch keine logische Lücke, da durch den mobilen Aspekt der Module keine zentralen Einrichtungen vorgesehen werden müssen.

Die Spezifizierung des Leitsystems (EA 4.3) konnte nicht in das projektunabhängige Modul-Engineering verschoben werden. Da Module allerdings mit AT-Systemen ausgestattet sind und diese, bei Ausstattung mit eigenen Steuerungen, Funktionen des Leitsystems übernehmen können, muss eine adäquate Aktivität im Modul-Engineering vorhanden sein. Die Spezifizierung des AT-Systems erzeugt somit zusätzlichen Aufwand. Da die Planung des

AT-System eines Moduls im Verhältnis der Planung des Leitsystems einer Anlage entspricht, sind auch die Aufwände vergleichbar. Für die Durchführung der Leitsystemspezifizierung wird laut NA35 5% des Gesamtaufwandes aufgewandt. Da sich das AT-System der Gesamtanlage aus den AT-Systemen der Module und dem des Backbones zusammensetzt, korreliert der Aufwand dieser Aktivität wiederum mit der Verteilung der PLT-Stellen zwischen Modulen und Backbone. Der durch diesen logischen Bruch entstehende zusätzliche Aufwand für Standardmodule mit eigener Steuerung ergibt sich somit aus dem Produkt von PLT-Stellenverhältnis und dem in der NA35 vorgesehenen Aufwand von 5%. Beim Einsatz einer Remote I/O im Modul kann nicht von der Übernahme von PLS-Aufgaben durch das Modul gesprochen werden. Dennoch soll die Auslegung des AT-Systems im Standardmodul mit Remote I/O aufgrund fehlender Alternativen mit dem gleichen Berechnungsschlüssel wie bei Standardmodulen mit SPS durchgeführt werden. Aufgrund der Besonderheit ist diese zusätzliche Aktivität in Abbildung 6-1 rot gekennzeichnet.

Da die Spezifizierung des AT-Systems von Spezialmodulen erst während des Gesamtanlagen-Engineerings stattfinden kann, entsteht dieser zusätzliche Aufwand für Spezialmodule nicht.

Die Aktivitäten für die Erzeugung der Stellenpläne (EA 4.4), Stellenfunktionspläne (EA 4.5) und Montageunterlagen (EA 4.6) sowie für die Veranlassung (EA 5.1) und Bestätigung (EA 5.2) von Bestellungen können sowohl für Standardmodule als auch für Spezialmodule verlagert werden. Für den Anwendungsfall eines Spezialmoduls wurden sie verringert, da sie lediglich für den Modulrumpf gelten. Auch für den Anwendungsfall R I/O wurde nur ein verringelter Anteil verlagert, da die Logik- und Verdrahtungsanteile in diesem Fall noch nicht geplant werden können.

Die Konfiguration der Software (EA 5.3), die Vorbereitung (EA 5.4) und Überwachung (EA 5.5) der Montage und die Funktionsprüfung (EA 5.6) können nicht in das projektunabhängige Engineering eines Spezialmoduls verlagert werden. Das Fehlen dieser EA stellt allerdings keinen logischen Bruch dar, da keine der Folgeaktivitäten auf Ergebnisse dieser Aktivitäten aufbauen.

Im Fall des Engineerings eines Standardmoduls können diese Aktivitäten (EA 5.3, 5.4, 5.5, 5.6) projektunabhängig bearbeitet werden. Der zusätzliche Aufwand, welcher für die Erstellung des systemunabhängigen Beschreibungsmittels (MTP) entsteht, ist schon als Zusatzaufwand eingerechnet und stellt keinen logischen Bruch dar. Die Funktionsprüfung (EA 5.6) muss für den Anwendungsfall R I/O etwas vermindert werden, da der Softwareanteil, welcher für die Abarbeitung im Leitsystem entwickelt wird, nicht im Testumfang enthalten sein kann.

Für den Anlagenbetreiber stellt der Idealfall die Verwendung eines einsatzbereiten, geprüften und abgenommenen Moduls dar. Ein solches Modul entspricht im Rahmen dieser Arbeit dem Standardmodul. Die Aktivitäten für die Erstellung und Prüfung des

Standardmoduls können, wie oben beschrieben, schon im Modul-Engineering stattfinden. Die darauffolgenden Aktivitäten sind davon allerdings ausgeschlossen. So muss die Schulung des Bedienpersonals (EA 6.1) im Gesamtanlagen-Engineering stattfinden. Zur Durchführung dieser Aktivität müssen Schulungsunterlagen oder Schulungssimulatoren im Modul-Engineering vorbereitet bzw. zur Verfügung gestellt werden. Diese sind insbesondere notwendig um Besonderheiten modularer Gesamtanlagen, wie zum Beispiel An- und Abkoppelvorgänge, zu beschreiben und zu schulen. Der dafür entstehende Aufwand fällt im Modul-Engineering an und kann anschließend auf alle Instanzen einer Produktfamilie umgelegt werden. Der Anteil für eine Instanz eines Standardmoduls kann somit vernachlässigt werden.

Die Inbetriebsetzung der Gesamtanlage (EA 6.2) erfolgt ohne Zutun des Modulherstellers. Dieser Vorgang ist vergleichbar mit der Inbetriebnahme heutiger PU. Diese werden geprüft geliefert und anschließend integriert. Nur beim Eintritt von Fehlern oder unvorhersehbaren Zuständen werden die Hersteller hinzugerufen.

Ebenfalls nur einmalig fallen Aufwände für die Erstellung der Dokumentation (EA 6.3), des Abschlussberichtes (EA 7.1) und der Projektabrechnung (EA 7.2) an. Diese Aktivitäten werden zwar formal durchgeführt, erzeugen allerdings keinen zurechenbaren Aufwand für die Modulinstantz einer entsprechenden Gesamtanlage.

Das Fazit der vertiefenden Betrachtung des Modul-Engineerings ist, dass innerhalb der Einzelaktivität 4.3, signifikanter Zusatzaufwand entsteht, welcher nicht durch die Verlagerung der EA begründet wird.

Eine Darstellung der neu entstandenen Engineering-Prozesse für Standard- und Spezialmodul ist in den folgenden Abbildungen enthalten.



Abbildung 6-1: Aktivitäten während des Standardmodul-Engineerings



Abbildung 6-2: Aktivitäten während des Spezialmodul-Engineerings

6.2. Vertiefende Betrachtung des Anlagen-Engineerings

Die 50%-Idee umfasst das Ziel, die Zeit für die Planung und Bau einer Anlage von der Produktidee bis zum Produktionsstart um 50% zu verringern. Dies soll u.a. durch Nutzung von Modulen als wiederverwendbare Lösungen gelingen (vgl. Abschnitt 4.1). Zur Erreichung der 50%-Idee muss das Gesamtanlagen-Engineering, als der zeitkritische Prozess, überprüft werden.

Folgende Ausführungen stellen die in Abschnitt 5.4 bewerteten Einzelaktivitäten als zusammenhängenden Prozess dar. Des Weiteren wird im darauf folgenden Abschnitt erläutert, wie sich dieser Prozess bei Veränderung der bestehenden Gesamtanlage darstellt.

6.2.1. Anlagen-Engineering bei erstmaliger Erstellung der Gesamtanlage

Das Gesamtanlagen-Engineering beinhaltet die Einzelaktivitäten des Planungsprozesses gemäß NA35, welche nicht in ein projektunabhängiges Modul-Engineering verlagert werden können. Folgender Abschnitt fasst die Einzelergebnisse aus Abschnitt 5.4 zusammen. Das Resultat ist die Abfolge von Aktivitäten, wie sie durch einen Anlagenbauer bzw. einen Engineering-Procurement-Constructer (EPC) durchzuführen sind.

Das Festlegen des Projektziels (EA 1.1) und die erste grobe Bestimmung der Kosten (EA 1.2) stellen die ersten Aktivitäten im Gesamtanlagen-Engineering dar. Dem folgt die Festlegung des Modulschnitts, also die Entscheidung, die bestimmt, welche verfahrenstechnischen Grundoperationen durch welche Module übernommen werden sollen. Diese Aufgabe wurde aus der Festlegung des Anlagenkonzeptes (EA 2.1) abgeleitet. Die Aufteilung des Anlagenprozess auf entsprechende Module macht eine unmittelbar folgende Abschätzung

der Prozessgrößen erforderlich. Diese Aufgabe, die aus der Ermittlung der verfahrenstechnischen Daten (EA 3.2) abgeleitet wird, legt die charakteristischen Betriebsbedingungen, wie Durchfluss, Druck und Temperatur, fest. Damit lässt sich die erforderliche Größe der benötigten Module abschätzen. Aufgrund der inhaltlichen Veränderung dieser Aktivitäten sind sie in Abbildung 6-3 rot gekennzeichnet. Ist der Modulschnitt festgelegt, können die erforderlichen Kosten erneut geschätzt werden (EA 2.2, EA 3.4).

Die in Abbildung 6-3 orange gekennzeichneten EA (EA 3.1, EA 3.3, EA 4.4, EA 4.5, EA 4.6) können bei Nutzung von Standardmodulen zu einem großen Teil in das Modul-Engineering verschoben werden. Sollte der Backbone erstmalig geplant und errichtet werden, beziehen sich die in diesen Aktivitäten enthaltenen Aufwände somit ausschließlich auf den Backbone. Bei Verwendung von Spezialmodulen in der Anlagenstruktur sind in diesen EA auch die nicht verlagerbaren Aufwände des Modul-Engineering enthalten, die zur Fertigstellung der Spezialmodule benötigt werden. Dieser Sachverhalt äußert sich allerdings nur im Ergebnis der quantitativen Aufwandsbetrachtung, nicht aber in der qualitativen Betrachtung.

Ergab die Kostenkalkulation (EA 3.4) die Entscheidung zum Weiterführen des Projektes, können Module von verschiedenen Modulherstellern ausgewählt werden. Dieser vergleichende Vorgang zwischen Anforderungen durch den Prozess und Fähigkeiten des Moduls wird für Standardmodule durch zusätzlichen Aufwand der EA 4.1 abgedeckt. Diese EA ist aufgrund der stark abweichenden Inhalte in Abbildung 6-3 rot gekennzeichnet. Die ausgewählten Module können im Anschluss bestellt (EA 5.1) und deren Lieferung bestätigt werden (EA 5.2). Dabei kann davon ausgegangen werden, dass sich die Anzahl der Einzelobjekte, für die eine Bestellung ausgelöst und deren Lieferung und Buchung administriert werden muss, bei modularen Anlagen wesentlich geringer ausfallen wird.

Die Aktivitäten zum Festlegen zentraler Einrichtungen (EA 4.2) und Auswählen und Spezifizieren des Leitsystems (EA 4.3) sind inhaltlich sehr ähnlich zu entsprechenden Aktivitäten im Rahmen einer klassischen Anlage. Die Wahl des Leitsystems bei modularen Anlagen wird allerdings von der Art des Automatisierungssystems der Module abhängig sein, da diese, je nach enthaltener Intelligenz, Funktionen des Leitsystems übernehmen werden. Bei Nutzung von Spezialmodulen entspricht EA 4.3 auch der Spezifizierung des AT-Systems der Module.

Wurden die ausgewählten Module geliefert, kann die Montage vorbereitet (EA 5.4), überwacht (EA 5.5) und die Gesamtanlage erstmalig in Betrieb gesetzt (EA 6.2) werden. Die Montage für Spezialmodule fällt dabei wesentlich umfangreicher aus als die von Standardmodulen, da diese für Standardmodule im Modul-Engineering geschah. Zudem ist aufgrund von der zu erwartenden hohen Standardisierung der Schnittstellen zwischen Modulen und Backbone von einer Verringerung der für diese EA ursprünglich vorgesehen Aufwände auszugehen.

Die informationstechnische Einbindung der Module erfolgt sinnvollerweise, wie im DIMA-Ansatz vorgestellt, durch die Nutzung eines herstellerunabhängigen Beschreibungsmittels, dem Modul-Type-Package (MTP). Der Aufwand für das Einlesen des MTP wird als Zusatzaufwand verbucht (vgl. Abschnitt 5.4.5). Da diese Aktivität inhaltlich sehr von ihrer ursprünglichen (EA 5.3 – Software konfigurieren) abweicht, ist sie in Abbildung 6-3 rot gekennzeichnet.

Zur korrekten Bedienung der Anlage muss das Personal ausgebildet (EA 6.1) werden. Da ein Großteil der technischen Realisierung innerhalb modularer Anlagen von Modulherstellern stammen wird, werden diese auch die erforderlichen Personalschulungen unterstützen müssen. Dies kann zum Beispiel durch die Gestellung von Schulungsmaterialien oder Simulatoren geschehen. Die dafür nötigen Aufwände des Modulherstellers wurden im Abschnitt 6.1 diskutiert.

Die Anfertigung, Revidierung (EA 6.3) und Übergabe (EA 6.4) der Anlagendokumentation kann abschließend erst im Gesamtanlagen-Engineering geschehen. Vorbereitende Arbeiten, speziell solche, die die technischen Realisierung der Module betreffen, können schon durch die Modulhersteller vorbereitet werden. Die dafür nötigen Aufwände des Modulherstellers wurden auch für diesen Sachverhalt im Abschnitt 6.1 diskutiert.

Die Erstellung des Anschlussberichtes (EA 7.1) sowie der Projektschlussrechnung erfolgt ohne Zutun des Modulherstellers. In Abhängigkeit von der Nutzung von Standardmodulen kann allerdings ein Großteil der Projektabrechnung schon nach Lieferung der Module gestellt und beglichen werden.

Die oben beschriebenen Aktivitäten sind in folgender Abbildung nochmals dargestellt.



Abbildung 6-3: Aktivitäten des Gesamtanlagen-Engineerings

Für das Engineering bei erstmaliger Erstellung einer Gesamtanlage müssen die oben dargestellten 26 Einzelaktivitäten durchgeführt werden. Sechs der dargestellten EA (orange)

entfallen allerdings, sollte der Backbone schon vor Beginn des Engineerings der Gesamtanlage bestehen. Neben den nicht verlagerbaren EA (blau) entstehen vier zusätzliche EA (rot), welche durch die Teilung des klassischen Engineerings erforderlich werden.

6.2.2. Anlagen-Engineering bei Umbau der Gesamtanlage

Die Wandlungsbefähiger Universalität und Skalierbarkeit beschreiben die Fähigkeit einer Produktionsanlage in ihren Funktionen und Fähigkeiten zu variieren. Umsetzung findet dies in der DIMA-Methode, realisiert in der Beispielanlage durch den Tausch bzw. die Ergänzung eines oder mehrerer Module. Im letzten Abschnitt wurde beschrieben, welche Aktivitäten erforderlich sind, um eine Gesamtanlage erstmalig zu projektieren. Im folgenden Abschnitt geht es abweichend darum, wie die Aktivitäten zum Wechsel eines Moduls anhand der Beispielanlage realisiert werden müssen.

Ausgangspunkt ist der Zustand der Gesamtanlage, in dem das gewünschte Produkt erzeugt werden kann. Für die Bestimmung der neuen Anforderungen muss, wie in Abbildung 6-3 dargestellt, erneut das Projektziel analysiert und festgelegt werden. Ergibt diese Analyse, dass die geforderte Funktionalität mit der aktuellen Modulkonstellation nicht realisierbar ist, umfasst das Ergebnis auch die nun zu schließende funktionale Lücke. Diese wird während der folgenden Aktivität monetär bewertet, was der Abschätzung der Kosten für die veränderte Funktionalität entspricht. Kann der neu geforderten Funktionalität durch ein oder mehrere Module entsprochen werden, kommt dies dem Modulschnitt gleich. Ist eine Aufteilung der neuen Funktionalität auf ein oder mehrere Module nicht möglich, so muss auch der vorhandene Modulbestand infrage gestellt werden.

Die nun erforderlichen Aktivitäten entsprechen denen in Abbildung 6-3. Die Abarbeitung der Aktivitäten bezieht sich allerdings nicht auf die gesamte Anlage, sondern jeweilig nur auf die identifizierte funktionale Lücke des Backbones bzw. der Module.

Müssen Module entfernt werden, erfordert dies sowohl physikalische als auch informationstechnische Aktivitäten. So müssen alte Module im Rahmen der Montage abgekoppelt und neue angekoppelt werden. Diese Vorgänge lassen sich durch Nutzung von Schnellkoppelsystemen unterstützen.

Die informationstechnische Entfernung eines Moduls erfolgt durch Entnahme des MTP aus dem Leitsystem im Rahmen der EA 5.3. Eine konsistente Entnahme bedingt allerdings, dass während des Einlesens eines MTP alle daraus erstellten Softwareartefakte gespeichert werden, um so dauerhaft einen direkten Bezug zum entsprechenden MTP herstellen zu können. Gleichzeitig muss nach Entfernen eines MTP der zurückbleibende Softwarebestand im Leitsystem auf Konsistenz überprüft werden und das Ergebnis dem Ingenieur in geeigneter Weise mittgeteilt werden. Die soeben beschriebenen Fähigkeiten des Prozessleitsystems setzen neben der reinen MTP-Schnittstelle somit auch ein MTP-Handling-

System voraus. Dieses muss dem Nutzer zu jedem Zeitpunkt die eingelesenen MTP anzeigen und vor Einlesen oder Entfernen eines MTP entsprechende Konsequenzen darstellen.

6.3. Quantitative Bewertung des Modul- und Anlagen-Engineerings

In Abschnitt 5.4 wurden die Einzelaktivitäten der NA35 auf Verlagerung in ein projektunabhängiges Modul-Engineering geprüft. Kann Aufwand aus dem Gesamtanlagen-Engineering entnommen werden, verringert sich die für diesen Prozess benötigte Minimalzeit. Die zentrale Fragestellung ist, wie umfänglich diese Verringerung ist und von welchen Kriterien sie beeinflusst wird.

Wie die Ergebnisse der Einzelprüfung aus Abschnitt 5.4 zeigen, sind die verlagerbaren Aufwände für Standardmodule stark abhängig von der Verteilung der PLT-Stellen zwischen Modulen und Backbone. Je höher die Anzahl der PLT-Stellen der Module im Verhältnis zu der im Backbone ist, desto mehr Aufwand kann projektunabhängig verarbeitet werden. Dieser Zusammenhang gilt nur für Standardmodule. Für Spezialmodule hingegen konnte diese Abhängigkeit nicht festgestellt werden. Grund hierfür ist das Fehlen der Voraussetzung für die abschließende Planung der PLT-Stellen im Engineering der Spezialmodule. Der Planungsprozess im Modul-Engineering der Spezialmodule kann nicht bis zu dieser Aktivität durchgeführt werden, da zum Beispiel die Prozessfunktionen und Betriebsgrößen noch nicht festgelegt ist.

Bei der Variation der automatisierungstechnischen Ausstattung zeigt sich, dass bei Nutzung von Modulen mit eigener Steuerung die verlagerbaren Aufwände höher sind, als bei Modulen mit Remote I/O. Dieser Sachverhalt ist allerdings nur bei Standardmodulen festzustellen. Der entsprechende Modulhersteller kann den Softwarecode der Steuerung vollständig erstellen und testen.

Bei Nutzung von Standardmodulen mit R I/O ist der Test des Steuerungscodes im Modul so nicht möglich, aufgrund des Ablaufens des Programmcodes im Leitsystem. Zu groß sind die Anforderungen heutiger Leitsysteme an den eigenen Quellcode¹⁵, der mit Hilfe von proprietären Kompilier- und Ladevorgänge in die Steuerung geladen werden, als dass der Modulhersteller den Programmcodes für Standardmodule mit Remote I/O vollständig testen und Garantien für eine fehlerfreie Abarbeitung geben könnte.

Abbildung 6-4 vergleicht die Verwendung von SPS und Remote I/O bei Standardmodulen, wobei sich in dieser Abbildung 80% der PLT-Stellen in den Modulen befinden. Differenzen

¹⁵ Der Steuerungscode zwischen Leitsystemen unterscheidet sich inhaltlich deutlich. Dies zeigt sich in der Gestaltung von Typicals und Templates, sowie von Funktionsbausteinen mit besonderen Funktionen (Reglerbausteine) und objektbezogenen Funktionsbausteinen (Ventilbaustein).

entstehen bei der Erstellung der PLT-Stellenpläne (EA 4.4), der Stellenfunktionspläne (EA 4.5), sowie bei der Prüfung der Modulfunktionen (EA 6.6).

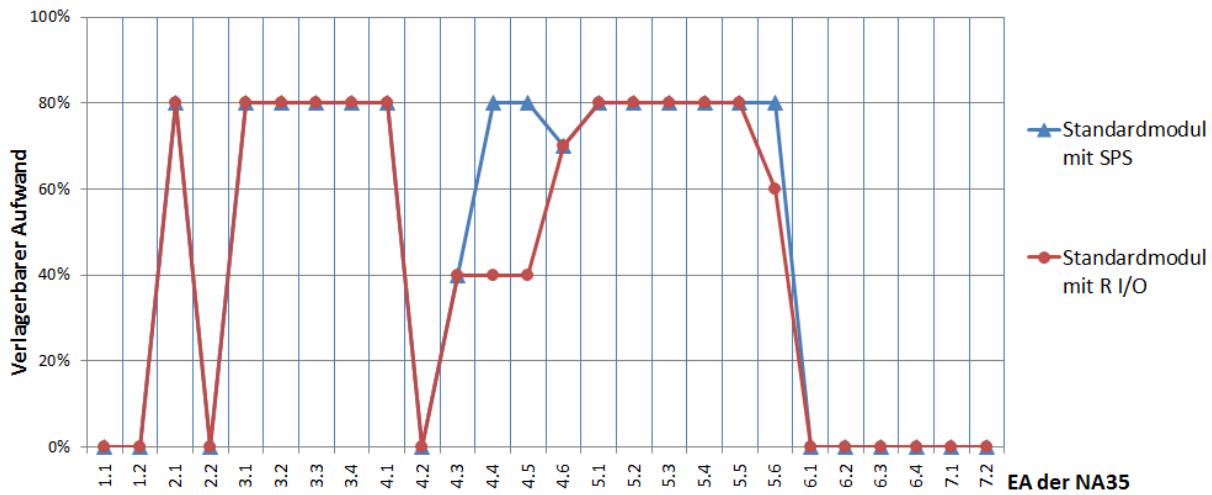


Abbildung 6-4: Vergleich der verlagerbaren Aufwände von Modulen mit SPS und R I/O bei einer PLT-Stellenverteilung von 80:20

Bei Spezialmodulen besteht die Abhängigkeit zwischen verlagerbaren Aufwänden und automatisierungstechnischer Ausstattung der Module nicht, da das AT-System der Module aufgrund noch nicht abgeschlossener verfahrenstechnischer Planung nicht im Modul-Engineering bestimmt werden kann.

Für die folgenden Betrachtungen des Modul- und Gesamtanlagen-Engineerings wurden PLT-Stellenverteilungen von 70% - 90% dargestellt. Dieser Bereich erscheint sinnvoll, da bestehende Versuchsanlagen, wie zum Beispiel die im F3-Projekt erstellten Container [Buc12b] über ein Verhältnis von etwa 80:20 verfügen.

Die Abhängigkeit der Aufwände des projektunabhängigen Modul-Engineerings von der Verteilung der PLT-Stellen zwischen Modul und Backbone ist in folgender Grafik dargestellt. Befinden sich 80% der PLT-Stellen in den Standardmodulen mit eigener Steuerung (siehe Hilfslinie A), können ca. 66% der ursprünglichen Aufwände in das projektunabhängige Modul-Engineering überführt werden. Mit den zusätzlichen Aufwänden von 4%, welche durch logisch sinnvolles Auffüllen des Engineering-Prozesses erzeugt werden (\rightarrow 6.1, in EA 4.3), entsteht ein Aufwand im Modul-Engineering von ca. 70%¹⁶. Für die Nutzung von Standardmodulen mit Remote I/O können 57,5% der in der NA35 beschriebenen Aufwände in das projektunabhängige Modul-Engineering verschoben werden.

Da bei der Verwendung von Spezialmodulen kann lediglich der Modulrumpf projektunabhängig bearbeitet werden. Da die damit verlagerbaren Aufwände von der PLT-

¹⁶ Der zusätzlich entstehende Aufwand von 4% bezieht sich auf die ursprünglichen Aufwände von 100%.

Stellenverteilung unabhängig sind, ist die entsprechende Gerade horizontal zur X-Achse. Die projektunabhängigen Tätigkeiten belaufen sich gemäß der Tabelle im Anhang A auf 6%.

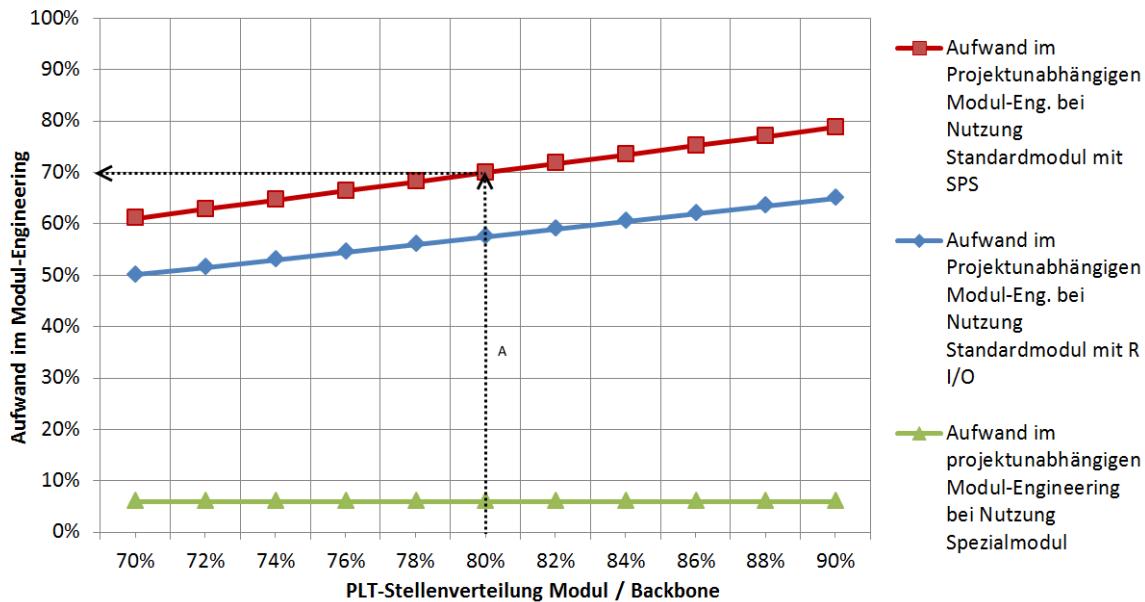


Abbildung 6-5: Aufwand im Modul-Engineering¹⁷ in Abhängigkeit von der Lage der PLT-Stellen

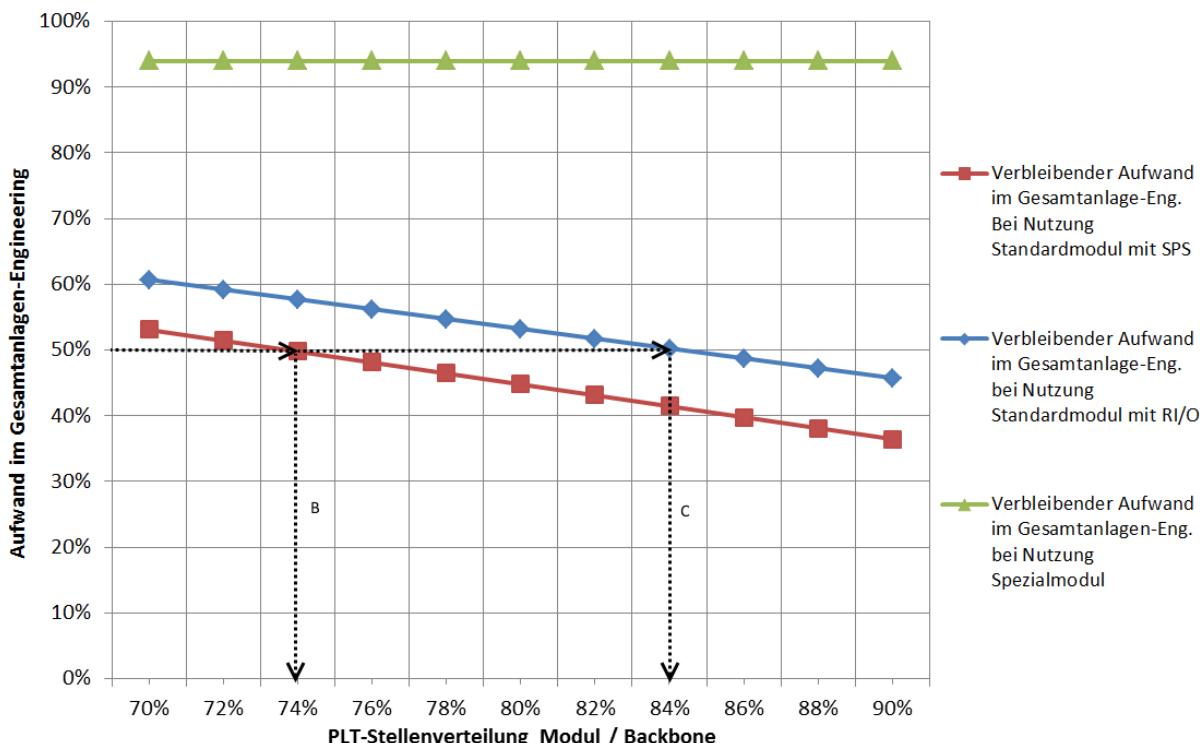


Abbildung 6-6: Aufwand im Gesamtanlagen-Eng. in Abhängigkeit von der Lage der PLT-Stellen¹⁸

¹⁷ Die Abbildung enthält auch den durch die Verlagerung entstehenden Zusatzaufwand im Modul-Engineering.

Im Gesamtanlagen-Engineering sind die Aktivitäten verblieben, die nicht verlagert werden können. Die Anstiege der dargestellten Geraden in Abbildung 6-6 weisen somit erwartungsgemäß ein entgegengesetztes Vorzeichen auf.

Werden ausschließlich Spezialmodule verwendet, ist ersichtlich, dass für diese konstant 94% der Engineering-Tätigkeiten während des Gesamtanlagen-Engineerings durchzuführen sind.

Die größte Aufwandverringerung im Gesamtanlagen-Engineering kann durch Verwendung von Standardmodulen verzeichnet werden. Bei Standardmodulen mit eigener SPS fällt der Aufwand im Gesamtanlagen-Engineering am umfanggeringsten aus.

Die zentrale Frage nach einem Aufwand von 50% während des Gesamtanlage-Engineerings ist abhängig von der PLT-Stellenverteilung. Für Standardmodule mit Remote I/O sind diese 50% bei einem PLT-Stellenverhältnis von 84:16 erreicht (vgl. Hilfslinie C in Abbildung 6-6). Sind die Module jeweils mit einer eigenen Steuerung ausgestattet, kann die Marke von 50% Aufwand im Gesamtanlagen-Engineering schon bei einem PLT-Stellenverhältnis etwa 74:26 erreicht werden (vgl. Hilfslinie B in Abbildung 6-6/Abbildung 6-4).

Die Untersuchung zeigt, dass bei Verwendung von Standardmodulen bei elf der verlagerten EA zusätzlicher Aufwand im Gesamtanlagen-Engineering entsteht. So wurde für das Importieren der Modulbeschreibungen (EA 5.3) bzw. Softwareartefakte, ein zusätzlicher Aufwand von 40%¹⁹ angenommen. Der Gesamtaufwand für diese EA (M+ZA+GA) beläuft sich demnach auf 140%. Dieser Aufwand ist stark abhängig von der eingesetzten Werkzeugunterstützung. Würde er bei Einsatz einer effizienten Werkzeugunterstützung komplett entfallen, so würde sich der Gesamtaufwand des Projektes um 4% verringern.

6.4. Fazit und Überprüfung der Thesen

Durch eine systematische Bewertung eines klassischen Engineering-Prozesses und Unterteilung der darin enthaltenen Aktivitäten in projektabhängig und –unabhängig kann ein Engineering-Prozess für die Gesamtanlage und ein projektunabhängiges Modul-Engineering entworfen werden. Der Aufwand für das Gesamtanlagen-Engineering sollte dabei so gering wie möglich ausfallen.

Das Ergebnis zeigt, dass mit Hilfe von modularen Anlagenkonzepten das zeitkritische Gesamtanlagen-Engineering verringert werden kann. Die Höhe ist sowohl abhängig vom AT-System der Module, als auch von deren Standardisierungsgrad. Für Module, die eine hohe Standardisierung (Standardmodule) aufweisen, ist der verlagerbare Aufwand in ein

¹⁸ Die Abbildung enthält auch den durch die Verlagerung entstehenden Zusatzaufwand innerhalb des Gesamtanlagen-Engineerings.

¹⁹ Dieser Wert bezieht sich auf den ursprünglichen Wert der EA. Wenn dieser, wie in der NA35 beschrieben, 5% des Gesamtprojektes umfasst, entsprechen 40% 2% Zusatzaufwand bezogen auf das Gesamtprojekt.

projektunabhängiges Modul-Engineering höher als bei Modulen mit geringer Standardisierung (Spezialmodulen). Des Weiteren können die Einzelaktivitäten im Gesamtanlagen-Engineering durch höhere Intelligenz im Modul verringert werden. Werden Module mit eigener Steuerung verwendet, fällt der verlagerbare Aufwand höher aus als bei Verwendung von Modulen mit Remote I/O.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass der Gesamtaufwand über beide entstehenden Engineering-Prozesse (Modul- und Gesamtanlagen-Engineering) bei Verwendung von Standardmodulen zunimmt. Diese Zunahme entsteht durch das Auftreten von Zusatzaufwänden, sowohl im Modul-Engineering²⁰ als auch im Gesamtanlagen-Engineering. Zusatzaufwand entsteht durch die Verwendung von Modulen und der damit verbundenen Aufwandsverlagerung. Wird zum Beispiel die Aktivität für die Festlegung der im Modul verbauten Geräte in das Modul-Engineering verschoben, wird im Gesamtanlagen-Engineering eine adäquate Aktivität für das Festlegen der Module benötigt. Dafür ist originär kein Aufwand vorgesehen, er muss zusätzlich erbracht werden.

Da die Aktivitäten auf beide Engineering-Prozesse aufgeteilt wurden, müssen diese auf logische Konsistenz überprüft werden. Fehlen Aktivitäten, müssen diese ergänzt werden. Hierfür fällt ebenfalls zusätzlicher Aufwand an. Der gesamte Zusatzaufwand ist wiederum abhängig von der PLT-Stellenverteilung zwischen Modulen und Backbone. Der Gesamtaufwand aus Modul- und Gesamtanlagen-Engineering samt Zusatzaufwand liegt bei Verwendung von Standardmodulen mit SPS und bei angenommenem PLT-Stellenverhältnis von 80:20 bei ca. 115%. Werden in den Standardmodulen Remote I/O eingesetzt, liegt der Gesamtaufwand bei gleichem PLT-Stellenverhältnis bei 111%.

Da nun die Ergebnisse der Untersuchung aufbereitet wurden, können die zuvor in Abschnitt 4.4 formulierten Thesen überprüft werden. Die Thesen lauten:

- 1. Der Aufwand für den zeitkritischen Engineering-Prozess der Gesamtanlage kann auf 50% verringert werden.**
- 2. Die Verringerung des Aufwands für den zeitkritischen Engineering-Prozess der Gesamtanlage nimmt mit zusätzlicher Verarbeitungslogik im Modul zu.**
- 3. Je höher der Standardisierungsgrad der Module umso geringer ist der Aufwand im zeitkritischen Engineering-Prozess der Gesamtanlage.**
- 4. Der Gesamtaufwand für beide Engineering-Prozesse bei modularen Anlagen fällt möglicherweise größer aus als der Engineering-Prozess bei nichtmodularen Anlagen.**

These 1 kann für die Nutzung von Standardmodulen bestätigt werden. In Abhängigkeit von der PLT-Stellenverteilung kann der Aufwand im zeitkritischen Gesamtanlagen-Engineering

²⁰ Zusatzaufwand im Modul-Engineering entsteht nur bei Nutzung von Standardmodulen.

auf 50% verringert werden. Diese Verringerung ist abhängig vom eingesetzten Automatisierungssystem in den Modulen, womit auch These 2 bestätigt wird. Der Aufwand im Gesamtanlagen-Engineering fällt bei Standardmodulen mit eigener SPS geringer aus als bei Einsatz von Remote I/O. Da die verlagerbaren Aufwände für Standardmodule signifikant größer sind als die bei Spezialmodulen, ist auch These 3 korrekt. Mit 115% fällt der Gesamtaufwand des Engineering-Prozess (Modul- & Gesamtanlagen-Engineering) von Standardmodulen mit SPS um 15% höher aus als ein vergleichbarer Engineering-Prozess einer nichtmodularen Anlage. These 4 ist somit ebenfalls korrekt.

7. Exemplarische Aufwandsbetrachtung im Engineering einer modularen Demonstrationsanlage

In den folgenden Abschnitten sollen die bereits vorgestellten Überlegungen und Ergebnisse auf ein reales Anlagenbeispiel angewendet werden. Die dazu genutzten Module und der Backbone wurden in den Laboreinrichtungen der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg - Institut für Automatisierungstechnik, geplant, gebaut und zu einer Gesamtanlage verbunden.

In diesem Kapitel wird zunächst der verfahrenstechnische Prozess dieser Anlage vorgestellt. Dem schließt sich eine vertiefende Betrachtung des automatisierungstechnischen Aufbaus der Module und des Backbones an.

Zur Validierung der in den Abschnitten 6.1 und 6.2 erarbeiteten Engineering-Prozesse werden am Beispiel dieser Gesamtanlage, sowie vertiefend am Beispiel eines Moduls dieser Anlage, erläutert, welche Ergebnisse in den jeweiligen Aktivitäten entstehen und wie diese zusammenhängen. Der Abschnitt schließt mit einem Fazit, bei dem speziell die PLT-Stellenverteilung betrachtet wird.

7.1. Vorstellung des Produktionsprozesses und der modularen Anlage

Bei dem durch die Anlage auszuführenden verfahrenstechnischen Prozess handelt es sich um einen vierstufigen Prozess, wie in Abbildung 7-1 schematisch dargestellt. Zunächst werden drei Edukte miteinander vermischt (Mischen). Anschließend wird das Gemisch mit Hilfe einer Destillationsapparatur (Destillieren) getrennt. Das dabei entstehende Destillat wird gefiltert (Filtern) und abschließend abgefüllt (Abfüllen).

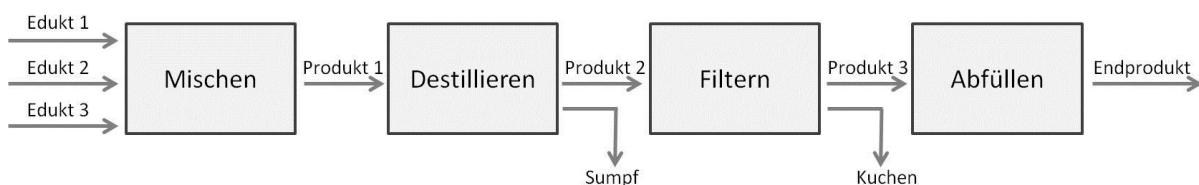


Abbildung 7-1: Schematische Darstellung des Beispielprozesses

Der Produktionsprozess der Beispielanlage wird mit vier Modulen und einem Backbone realisiert. Jede verfahrenstechnische Grundoperation aus obiger Abbildung wird durch ein Modul erfüllt. Die verwendeten Module sind demnach: Misch-, Destillier-, Filter- und Abfüllmodul. Die verfahrenstechnische Ausstattungen der Module wurden von den Firmen QVF und Festo übernommen. Das Automatisierungssystem der Module stammt von der Firma WAGO-Kontakttechnik. Alle Module sind mit einer eigenen Steuerung ausgestattet. Die Module verfügen somit über eigene Intelligenz nach der Definition des DIMA-Ansatzes. Zusätzlich zur Sensorik und Aktorik für die Prozessführung des verfahrenstechnischen Prozesses sind Produkteingänge und -ausgänge der Module überwacht und verschließbar. Die Überwachung und Zugriffe hierauf erfolgen aus der Modulsteuerung. Jedes Modul kann damit die Führungshoheit des eigenen Prozesses gewährleisten und besitzt damit die Eigenschaften, die in der NE148 und durch den DIMA-Ansatz gefordert sind. Als Prozessleitsystem der Gesamtanlage wird das System zenon der Firma COPA-DATA verwendet. Das Leitsystem wurde für die speziellen Einsatzszenarien innerhalb modularer Anlagen von COPA-DATA um zusätzliche Softwarebestandteile ergänzt, wie zum Beispiel ein MTP-Handling-System.



Abbildung 7-2: Modulare Demonstrationsanlage (Vier Module, ein Backbone (Mitte))

Für den Produktionsbetrieb werden die Module sternförmig an einen Backbone angekoppelt. Die Module sind darüber hinaus mit flexiblen Rohrleitungen miteinander verbunden. Der Produktaustausch erfolgt somit auf direktem Wege zwischen den Modulen.

Der dabei nötige Informationsaustausch erfolgt allerdings ausschließlich über den Backbone. Der Backbone versorgt die Module zudem mit den Utilities:

- Elektrische Energie und
- Druckluft.

Er ist ebenfalls als Modul gestaltet. Die gesamte modulare Anlage ist somit mobil. Sie ist universell, da keine prozesstechnischen Einschränkungen für die anzuschließenden Module festgelegt sind. Kompatibilität wird durch die Nutzung handelsüblicher Bauformen für die Anschlussstechnik zwischen Modulen und Backbone erreicht. Da weder die Anzahl noch die Größe der Module einer grundsätzlichen Einschränkung unterliegen, ist sie skalierbar. Die Gesamtanlage ist somit wandlungsfähig.

7.2. Engineering-Aktivitäten bei erstmaliger Erstellung des Filtermoduls

Das Modul-Engineering soll anhand des Filtermoduls beschrieben werden. Da Filtern eine oft genutzte Grundfunktion ist und die Prozesscharakteristik leicht und schnell durch Austausch des Filtermediums variiert werden kann, wird das Filtermodul als Standardmodul mit eigener Steuerung konzipiert.

Der im Folgenden geschilderte Prozess stellt die durchzuführenden Aktivitäten für die Planung und Erstellung des Filtermoduls dar.

Die erste Aktivität des Modulherstellers besteht in der Entscheidung die Prozessfunktion Filtern in kontinuierlicher Verfahrensweise anzubieten. Die Filterleistung des Moduls, die Vorgaben zur Betriebsumgebung und die Festlegung der erforderlichen Utilities und Schnittstellen sind ebenfalls Bestandteil dieser Entscheidung. Grundlage dieser Entscheidung werden Mechanismen der Produktentwicklung sein, wie sie zum Beispiel in Abschnitt 2.3.3 dieser Arbeit geschildert sind.

Der PLT-Planer der Firma des Modulherstellers erstellt daraufhin initial das R&I-Fließbild des Moduls und legt die für den Prozess erforderlichen PLT-Stellen fest. Diese trägt er in das ebenfalls angelegte PLT-Stellenverzeichnis des Moduls. Für jede PLT-Stelle erzeugt er ein PLT-Stellenblatt. Das Anfertigen und Vorhalten dieser Planungsartefakte ist auch für die modulspezifische Dokumentation wichtig.

In einem nächsten Schritt werden die verfahrenstechnischen Daten ermittelt. Dazu werden die Daten bei den verantwortlichen Ingenieuren der Verfahrenstechnik erfragt.

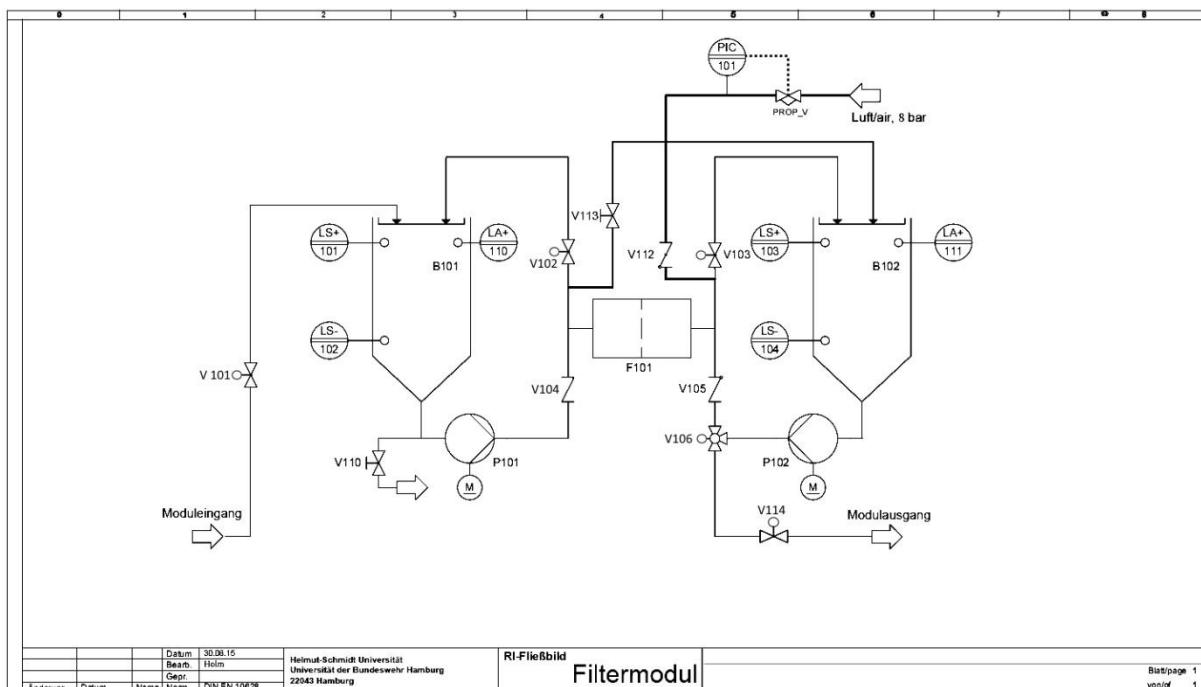


Abbildung 7-3: R&I Fließbild des Filtermoduls als Ergebnis aus EA 3.3

Durch die Auswahl und Auslegung der Mess- oder Wirkprinzipien für jede zuvor angelegte PLT-Stelle wird die technische Realisierung festgelegt. Dies schließt auch die räumliche Planung des Moduls ein. Durch die aus diesen Entscheidungen entstehenden Informationen wird das R&I-Fließbild weiter angereichert. Das dabei erstellte Ergebnis ist in Abbildung 7-3 enthalten.

Zur vereinfachten Prozessführung wird vor und nach dem Kartuschenfilter jeweils ein Behälter vorgesehen. Diese dienen als Puffer und ermöglichen einen kontinuierlichen Filterungsprozess auch bei diskontinuierlicher Zuführung von Medien. Der Filter selbst erhält eine Spülvorrichtung, bei dem eine Spülflüssigkeit mit Druckluft durch den Filter gepumpt wird. Diese Vorrichtung wird vom Modulhersteller für diese Art von Filtermodulen immer eingesetzt und ist ein Beispiel für das Spezialwissen des Modulherstellers.

Entsprechen die Ergebnisse der anschließenden Kostenkalkulation den Erwartungen, können die Geräte und Apparate des Moduls festgelegt werden. Dabei wird der Modulhersteller auf Betriebsbewährtheit achten, da davon der Erfolg seines Produktes "Filtermodul" abhängt.

Da das Modul mit einer eigenen Steuerung ausgestattet ist, muss diese durch den Modulhersteller ausgewählt und programmiert werden. Dazu nutzt er ein Programmierwerkzeug, welches seinen Anforderungen in Bezug auf organisatorische Abläufe, Wiederverwendung, Kosten und Qualität am besten entspricht. Für die in der modularen Demonstrationsanlage eingesetzten Steuerungen erfolgte die Programmierung mit WAGOs e!Cockpit, welches in der Version R1 mit einer Softwareergänzung MTPs erstellen kann.

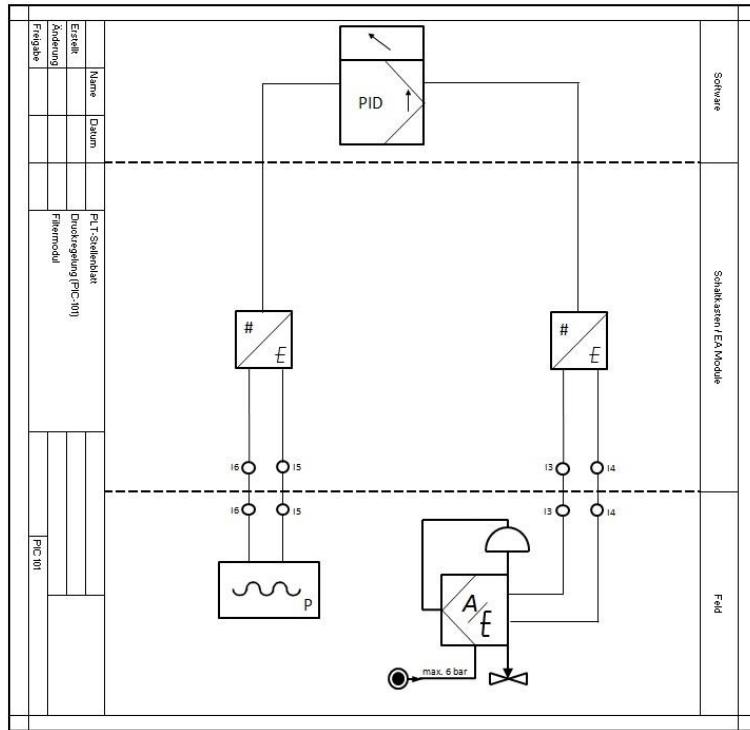


Abbildung 7-4: PLT-Stellenplan der Druckregelung für die Spülung des Filters

Durch Rückmeldungen von Nutzern seines Filtermoduls kann er den Aufbau, den Prozess und den entsprechenden Programmcode sukzessive verbessern. Dies zeigt sich zum Beispiel durch die Anpassung der Spülvorgänge des Filters, die vom Modulhersteller prozessabhängig vorgesehen werden. Zur Vorbereitung der Programmieraktivitäten werden die Stellenpläne und Stellenfunktionspläne erzeugt. Der PLT-Stellenplan für den Regelkreis der Drucküberwachung innerhalb der Filterspülvorrichtung kann Abbildung 7-4 entnommen werden.

Ein Drucksensor nimmt den aktuell anliegenden Prozesswert auf. Dieser wird mit Hilfe eines entsprechenden Standardsignals als Regelgröße an einen in der Modul-SPS befindlichen PID-Regler-Baustein übermittelt. Der PID-Regler berechnet unter Nutzung des Sollwertes eine neue Stellgröße, die wiederum auf das Druckregelventil wirkt und so den Prozesswert Druck beeinflusst.

Parallel zu diesen Vorgängen können die Montageunterlagen erstellt sowie die erforderlichen Geräte und Apparate bestellt und geliefert werden. Wurden die Apparate und das AT-System im Modul montiert, kann der Quellcode in die Steuerung geladen werden. Dazu werden aus den Stellenplänen die zugehörigen Stellenfunktionspläne entwickelt und auf Continuous-Funktion-Charts (CFC) und Sequential-Funktion-Charts (SFC) abgebildet.

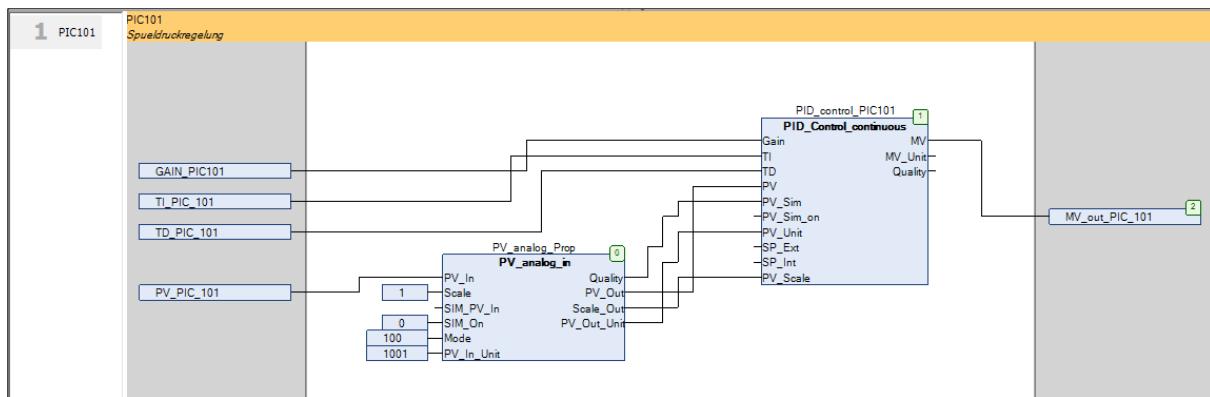


Abbildung 7-5: CFC der Spüldruckregelung

Um die für die Integration notwendige Information einem späteren Anlagenbetreiber zugängig zu machen, wird das Modul Type Package erstellt. Bei Nutzung der Software e!Cockpit wird dazu der Quellcode der Modulsteuerung nach Codebestandteilen von Services und Bedienbildern durchsucht. Die gefundenen Artefakte werden dem Modulhersteller in einem gesonderten Dialogfenster angezeigt. Der Modulhersteller kann darin durch An- und Abwahl festlegen, welche Dienste, Variablen und Bedienbilder einem bestimmten Kunden veröffentlicht werden. Abbildung 7-6 zeigt das Dialogfenster mit der Auswahlfunktion der angewählten und damit im MTP zu veröffentlichten Dienste.

Mit der Funktionsprüfung des Moduls ist das Modul-Engineering abgeschlossen.

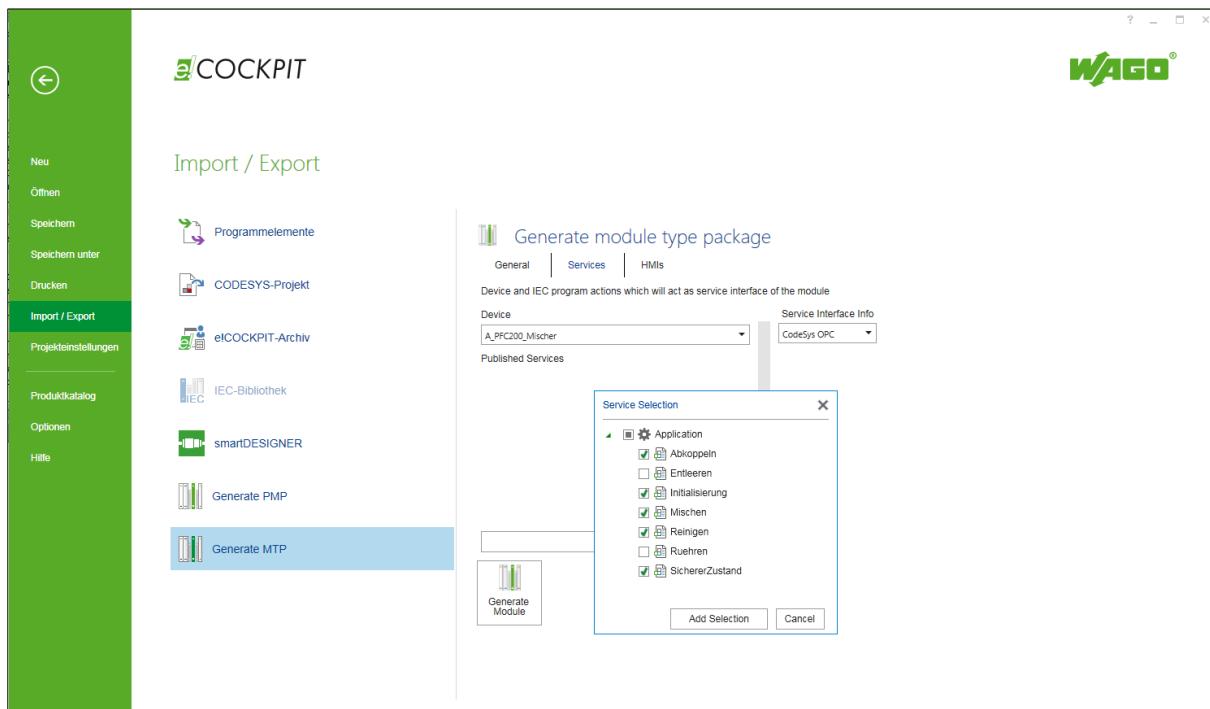


Abbildung 7-6: MTP-Generierung im Engineering-Werkzeug des Modulherstellers

7.3. Engineering-Aktivitäten bei Erstellung der Beispielanlage

Wie schon zuvor beschrieben, ist der Engineering-Prozess der Gesamtanlage für ein produzierendes Unternehmen zeitkritisch. Er unterliegt der Bewertung durch die 50%-Idee. In den folgenden Ausführungen soll dargestellt werden, wie die oben beschriebenen Engineering-Aktivitäten für den Anwendungsfall der Beispielanlage ablaufen. Damit soll der Nachweis erbracht werden, dass das oben beschriebene Gesamtanlagen-Engineering durchführbar ist und somit die in Abschnitt 6.2.1 (erstmaliges Gesamtanlagen-Engineering) und 6.2.2 (Umbau der Gesamtanlage) vorgestellten quantitativen Betrachtungen anwendbar sind.

7.3.1. Engineering-Aktivitäten bei erstmaliger Erstellung der Beispielanlage

Die Festlegung des Projektziels und die erste Grobkostenschätzung finden unverändert am Beginn des Engineering statt. Dabei werden insbesondere die Vorschriften und Vereinbarungen für den Bau und Betrieb von modularen Anlagen zusammengestellt und ausgewertet. Aufbauend auf der Auswertung des Prozesses, der durch die Verfahrenstechnik erstellt wurde, können die erforderlichen Module identifiziert werden. Dies umfasst zu diesem Zeitpunkt des Engineering-Prozesses lediglich die Festlegung der Prozessfunktion und erfolgt unter Nutzung von Branchenwissen. Mit der Festlegung der Prozessfunktion wird gleichzeitig auch die Anzahl der benötigten Module fixiert. Für den vierstufigen Beispielprozess (vgl. Abbildung 7-1) wird ein Bedarf von vier unterschiedlichen Modulen ermittelt. Mit dem Wissen um die Anzahl der Module kann die Kostenschätzung weiter verfeinert werden. Da mit diesem Schritt zumindest planerisch der Produktionsprozess auf die Module aufgeteilt ist, ist bekannt, mit welchen Utilities diese versorgt werden müssen, bzw. wie viele Anschlüsse für das jeweilige Utility vorgehalten werden müssen. Im Fall der Beispielanlage werden die Utilities Druckluft und Energieversorgung benötigt. Der Backbone muss somit für jede der Utilities mindestens vier Anschlüsse bieten. Die PLT-Stellen des Backbones können damit ebenfalls ermittelt und entsprechende PLT-Stellenblätter angefertigt werden. Ein R&I-Fließbild des Backbones kann ebenfalls ausgearbeitet werden. Das R&I-Fließbild des in der Anlage genutzten Backbone ist in Abbildung 7-7 dargestellt.

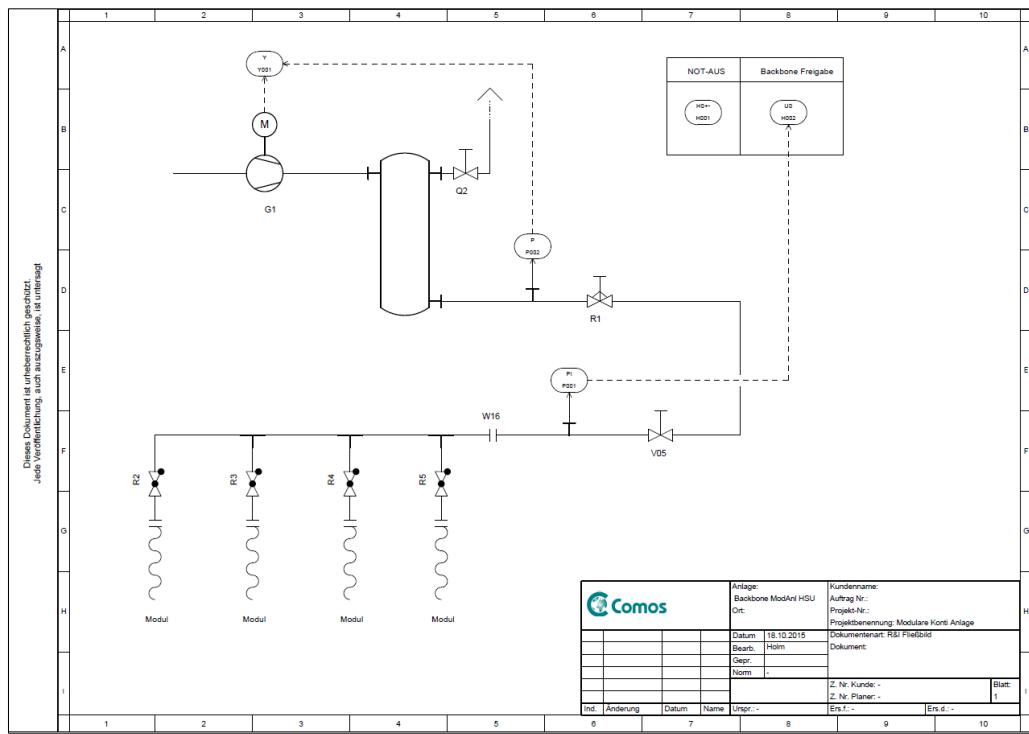


Abbildung 7-7: R&I-Fließbild der Druckluftversorgung des Backbones

Die Auswertung ergänzender verfahrenstechnischer Information ergibt die Festlegung der prozesstechnischen Größenklassen der erforderlichen Module. Dazu muss der geforderte Output der Gesamtanlage mit den Outputs der einzelnen Module abgestimmt werden. Alle Module sollten im gleichen prozesstechnischen Bereich arbeiten können. Die Abstimmung umfasst das Festlegen der Rohrquerschnitte, Förderdrücke und Durchflüsse der Module. Des Weiteren müssen die stoffführenden Oberflächen bestimmt werden.

Auf die Beispielanlage bezogen, bedeutet dies, dass beispielsweise durch einen nachfolgenden, nicht dargestellten, logistischen Prozess alle 5 Sekunden ein 4cl Gefäß befüllt wird. Für die Förderleistung und Querschnitte der in den Modulen verbauten Apparate bedeutet dies, dass mindestens eine Dauerförderleitung der Pumpen von 28,8 Liter pro Stunde erreicht werden muss. Durch die im Prozess vorgesehenen Trennvorgänge (Destillation und Filter), bei denen jeweils ein bestimmter Volumenanteil abgetrennt wird, müssen die Förderleistungen der vorgelagerten Module entsprechend erhöht werden. Des Weiteren müssen die eingesetzten stoffführenden Materialien durch die Verwendung der Destille eine Temperaturbeständigkeit von mindestens 90 °C aufweisen. Weitere Anforderungen an die Oberflächenbeständigkeit ergeben sich aus dem Produktionsprozess nicht.

Die bis zu diesem Zeitpunkt ermittelten Informationen ermöglichen eine erneute und genauere Kostenschätzung. Sollte diese wiederum positiv ausfallen, können die Module festgelegt werden. Dies umfasst die Formulierung der Anforderungen an die verfahrens- und automatisierungstechnische Ausführung und enthält die Festlegung auf die Modulhersteller.

Die Anforderungen der Verfahrenstechnik werden bei Modulen allerdings nicht auf Basis der PLT-Stellen formuliert, wie dies typischerweise im Engineering einer klassischen Anlage der Fall wäre, sondern auf prozessgrößenspezifischen Anforderungen, wie Behältergröße, minimaler und maximaler Leitungsdruck, Filterleistung, usw.. Diese werden zwar durch die Verfahrenstechnik im Verfahrensfließbild festgelegt, stellen beim Engineering-Prozess klassischer Anlagen aber nur ein Zwischenergebnis der Verfahrenstechnik dar. Dies macht deutlich, dass die Nutzung modularer Produktionsanlagen Auswirkungen auf den Engineering-Prozess und die Schnittstellen zwischen den Gewerken hat.

Angewandt auf das Filtermodul kann eine Anforderung folgenden Sachverhalt umfassen: Bei der zu erfüllenden verfahrenstechnischen Funktion sind Filtrationsparameter einer kuchenbildenden Oberflächenfiltration gefordert, bei der eine Teilchengröße von 1 µm bis 1 mm zu filtern ist. Der Modulhersteller kann nun prüfen, ob das von ihm angebotene Filtermodul diese Eigenschaft erfüllen kann.

Die Anforderung der Automatisierungstechnik beinhaltet zum Beispiel den Einsatz von betriebsbewährten Geräten, eine entsprechende Controllerperformance und das Bedienen von geforderten Kommunikationsschnittstellen.

Die Spezifizierung des Leitsystems der Gesamtanlage erfolgt weitestgehend nach klassischen Anforderungen. Zusätzlich muss beim Einsatz des Leitsystems für eine modulare Anlage eine MTP-Schnittstelle sowie ein MTP-Managementsystem vorhanden sein. Dieses Managementsystem muss die eingelesenen MTP verwalten sowie die daraus im Leitsystem erzeugten Artefakte konsistent nachhalten. Wird ein MTP aus dem Leitsystem gelöscht, müssen die zugehörigen Artefakte ebenfalls entfernt werden und anschließend die Ablauffähigkeit des verbliebenen Anteils überprüft und Inkonsistenzen kenntlich gemacht werden.

Die Erzeugung der PLT-Stellenpläne und der PLT-Stellenfunktionspläne des Backbones bzw. der Spezialmodule stellt den nächsten Schritt im Gesamtanlagen-Engineering dar. Dabei werden mehrere Geräte zu einer Funktion verschaltet und deren Logik mit Hilfe von Standardbausteinen in Stellenfunktionsplänen und anschließend im Programmcode mit CFCs abgebildet.

Im Fall der Beispielanlage entfällt die Anfertigung der CFC des Backbones, da für diesen keine Programmlogik im Leitsystem vorgesehen ist. Die Prozessfunktion des Backbones wird in der Beispielanlage ausschließlich über mechanische und elektronische Bauteile, wie beispielsweise Druckminderer und Schaltrelais, realisiert. Die Nutzung von Spezialmodulen ist nicht vorgesehen.

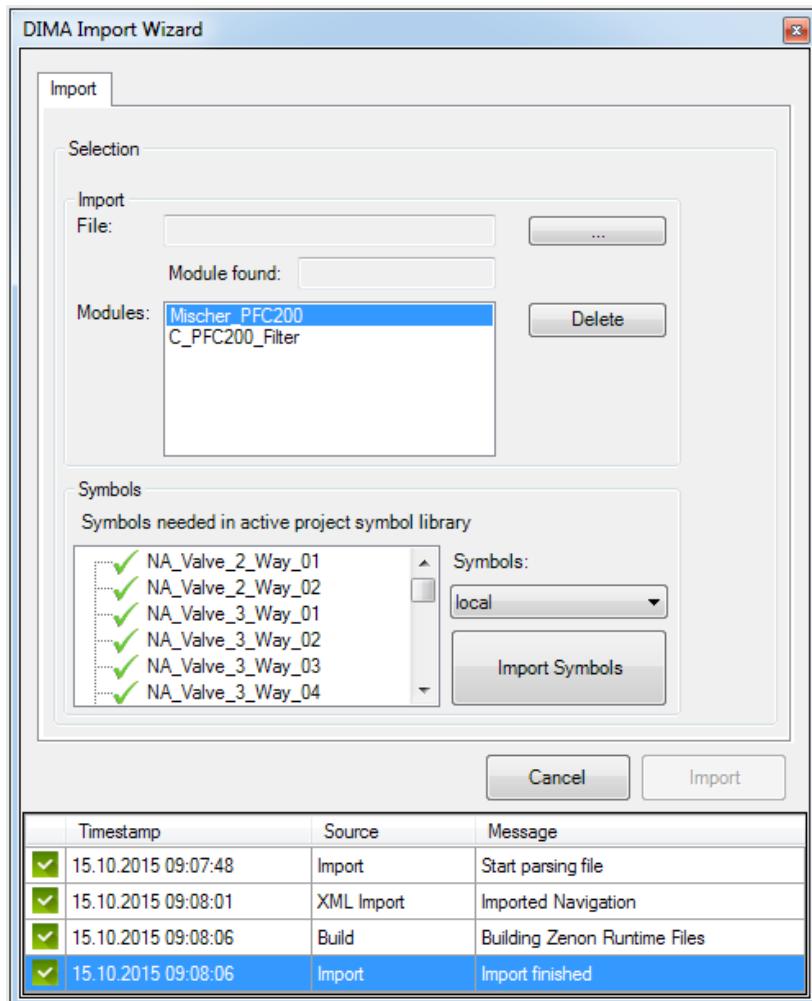


Abbildung 7-8: Darstellung der MTP-Schnittstelle als Managementsystem im PLS zenon²¹

Die Bestellung und Lieferung dieser Geräte und Apparate erfolgt analog zu klassischen Anlagen. Sie entsprechen den Vorgängen, die auch für die Bestellung und Lieferung der benötigten Module durchgeführt werden müssen. Wurden die Module bestellt, kann der Modulhersteller schon vor Lieferung der Module die entsprechenden MTP übermitteln. So kann die Abhängigkeit von Lieferzeiten minimiert werden.

Im Falle der Beispielanlage werden in das Prozessleitsystem vier MTP für vier unterschiedliche Module eingelesen. Das MTP-Management-System (Abbildung 7-8) registriert das Einlesen eines MTP und teilt dem Integrationsingenieur mit, wie viele Variablen, Bedienbilder, Units und Grundfunktionen im Prozessleitsystem durch Einlesen dieses MTP angelegt werden. Im Anschluss kann der Bediener die automatische Generierung der Bedienbilder (Abbildung 7-9) und Batch Grundfunktionen einleiten (Abbildung 7-10).

²¹ Zum Zeitpunkt der Darstellung war diese Funktionalität nicht als Produkt der COPA-DATA erhältlich, sondern nur als Funktionsmuster.

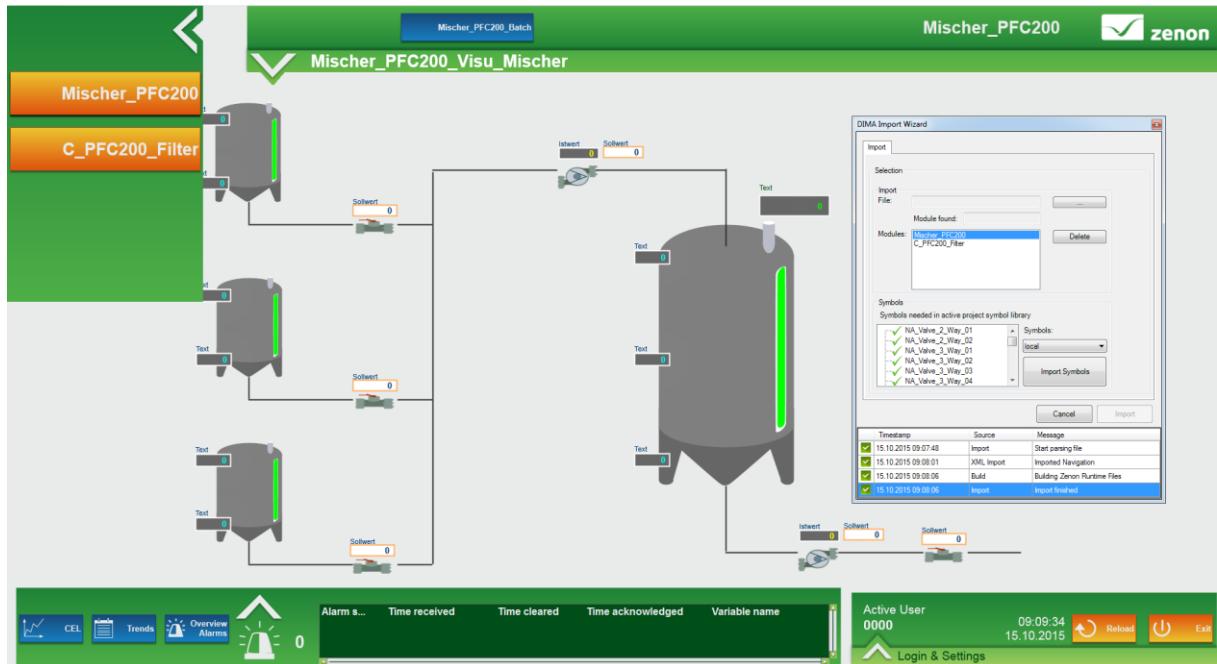


Abbildung 7-9: Automatisch erzeugtes Bedienbild (Mitte) mit MTP-Managementsystem (rechts)

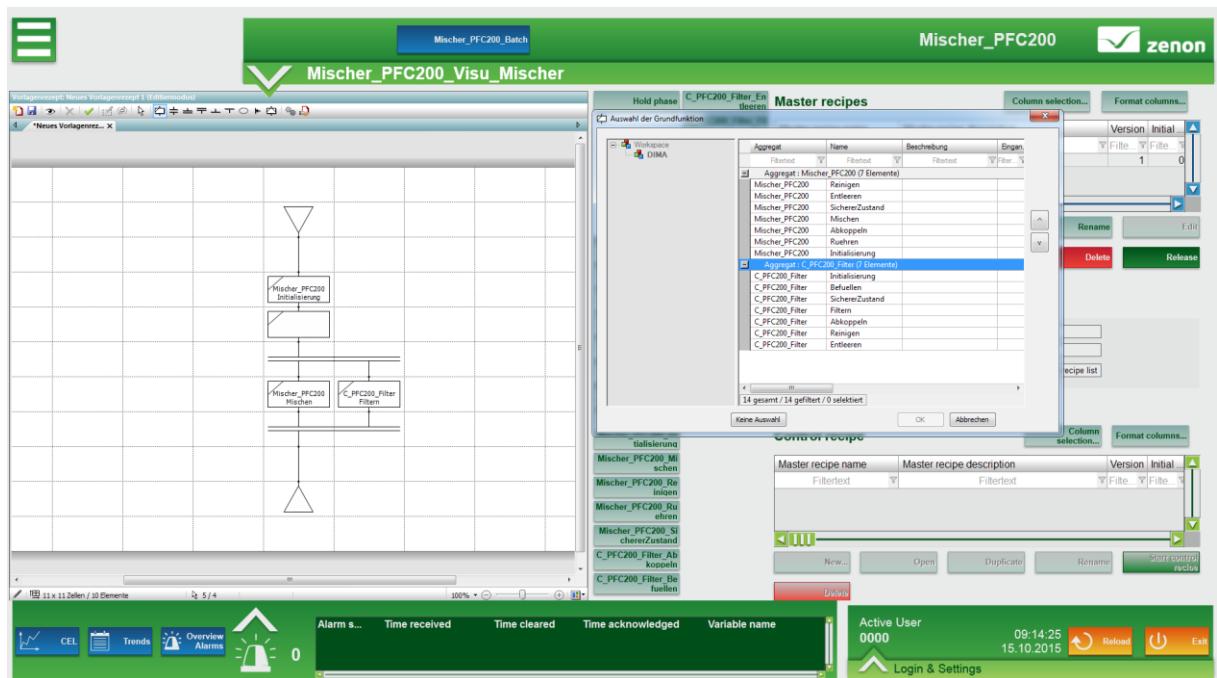


Abbildung 7-10: Modellierung der Moduldienste in einem Batch-Werkzeug

Wurden die Module geliefert, können sie an den Backbone angeschlossen werden und untereinander verbunden werden. Dazu werden in der Beispielanlage mehrere Schnellkoppelsysteme genutzt. Abbildung 7-11 stellt eine Kopplung zwischen den Modulen dar, deren Einsatz ein schnelles Verbinden und Trennen der flexiblen Rohrleitungen ermöglicht.



Abbildung 7-11: Kopplungen zur schnellen Verschlauchung der Module

Die Funktion der Anlage kann nun überprüft und entsprechendes Personal in die Bedienung der Anlage eingewiesen werden. Sofern dem keine gesetzlichen Belange entgegenstehen, kann die Personalausbildung entsprechend verkürzt werden, da durch einen höheren Automatisierungsgrad der Module und einen verkürzten Lebenszyklus der Anlage in der aktuellen Modulzusammensetzung ein auf klassische Anlagen abgestimmter Ausbildungsumfang nicht vertretbar erscheint.

Die Anlagendokumentation für die Automatisierungstechnik wird komplett vom Modulhersteller angefertigt. Die Übergabe erfolgt vom Modulhersteller ggf. über den eingesetzten EPC an den Anlagenbetreiber. Bei dieser Aktivität besteht die Herausforderung, die Dokumentation der Module zu einer geschlossenen Anlagendokumentation zusammenzuführen. Dabei ist darauf zu achten, dass die entstehende Anlagendokumentation modular strukturiert ist, da die zu einem Modul gehörende Dokumentation beim Entfernen des Moduls aus der Anlage auch aus der Anlagendokumentation entnommen werden muss. Hier bietet sich die Nutzung digitaler Dokumente und eine entsprechende Werkzeugunterstützung an, die in dieser Form bisher noch nicht existiert.

7.3.2. Engineering-Aktivitäten beim Modulwechsel

Wandlungsfähigkeit einer Produktionsanlage entsteht, wenn der funktionale Lösungsraum der Anlage auch nach erstmaliger Planung verändert werden kann (→ 3.3). Diese Veränderung wird in Fall modularer Produktionsanlagen durch die Entnahme, Ergänzung oder den Tausch eines Moduls ermöglicht. Im Folgenden soll daher auf den Modulwechsel eingegangen werden. Dazu werden die Engineering-Aktivitäten zur Entnahme des Filtermoduls der Beispielanlage und Hinzufügen eines neuen Moduls dargestellt.

Ausgangspunkt der Betrachtung ist der Zustand der Gesamtanlage, in dem das gewünschte Produkt durch Misch-, Destillations-, Filter- und Abfüllmodul produziert wird. Im Folgenden wird angenommen, dass das Filtermodul entfernt wird, da dessen Verwendung durch einen erhöhten Lösungsmittelleinsatz im Mischmodul nicht mehr erforderlich ist. Wichtig ist, dass im Vorfeld des Modulwechsels der nach Entnahme des Moduls verbleibende Modulbestand der Anlage auf Konsistenz überprüft wird. Da das Filtermodul eine Stofftrennung beinhaltet, bei der ein bestimmter Volumenanteil des Produktstroms abgetrennt wird, müssen die

verbleibenden Module überprüft und angepasst werden. So müsste entweder der Volumenstrom des Destillationsmoduls gesenkt oder die Abfüllgeschwindigkeit des Abfüllers gesteigert werden. Alternativ könnte eine modulübergreifende Verriegelung die Produktion des Destillationsmoduls unterbrechen, um somit ein Überlaufen des Eingangsbehälters des Abfüllmoduls zu verhindern.

Da von einer weiteren zukünftigen Verwendung des Filtermoduls ausgegangen werden soll, muss das Modul vor der Entnahme in einen entnahmefähigen Zustand gebracht werden. Dazu wird der Kartuschenfilter gereinigt und das Modul anschließend entleert. Die erforderlichen Dienste wurden vom Modulhersteller vorgesehen und sind durch den MTP dem Leitsystem zugängig gemacht. Zur Ausführung dieser Dienste werden die entsprechenden Grundfunktionen im Batch-Werkzeug zur Ausführung gebracht und der Abschluss zusätzlich am Bedienpanel des Moduls quittiert. Die Vorbereitungen zur Entnahme des Moduls sind damit abgeschlossen.

Für die physikalische Entfernung des Filtermoduls müssen die Schnellkopplungen zwischen Destille und Filter, sowie zwischen Filter und Abfüller getrennt werden. Des Weiteren sind die Druckluftversorgung und die elektrischen Leitungen zu trennen. Nachdem das Modul aus der Produktionsanlage entnommen wurde, wird die Kopplung am Ausgang des Destillationsmoduls mit der Kopplung am Eingang des Abfüllmoduls verbunden.

Die informationstechnische Entfernung eines Moduls erfolgt durch Entnahme des MTP aus dem Prozessleitsystem. Dazu hält das MTP-Managementsystem im zenon (Abbildung 7-8) die schon eingelesenen und verarbeiteten MTP vor. Während des Einlesens des Filtermodul-MTP wurden alle daraus erzeugten Artefakte (Variablen, Bedienbilder, Batch-Units, Grundfunktionen, ...) gespeichert. Wird das MTP des Filtermoduls nun entfernt, können auch die ihm zugehörigen Artefakte entfernt werden. Die Entfernung erfolgt somit rückstandsfrei.

Zum Starten der nun veränderten Produktionsanlage muss im Rezept des Batch-Werkzeuges (Abbildung 7-10) der nun leere Platzhalter des zuvor genutzten Filterdienstes entfernt, das Rezept erneut validiert und gestartet werden. Der Produktionsprozess erfolgt nun durch die drei verbliebenen Module.

Für das Hinzufügen eines neuen Moduls müssen alle vorgestellten Tätigkeiten des Gesamtanlage-Engineerings durchgeführt (Abschnitt 7.3.1) werden. Die darin enthaltenen Auslegungsentscheidungen des Backbones (EA 4.4 und 4.5) entsprechen, im Fall des Modulwechsels, einer Überprüfung der zur Versorgung des Moduls durch den Backbone erforderlichen Fähigkeiten.

7.4. Verlagerbarer Engineering-Aufwand

In den vorherigen Abschnitten wurde am Beispiel einer automatisierten Anlage aufgezeigt, wie das Engineering der Gesamtanlage, bzw. eines Moduls dieser Anlage, unter Bezug der Ergebnisse aus den Abschnitten 6.1 und 6.2 (idealerweise) abläuft. Die zentrale Frage ist nun, wie hoch der verlagerbare Engineering-Aufwand bei Durchführung dieses Prozesses ist.

Zunächst werden das Automatisierungssystem und der Standardisierungsgrad der Module betrachtet. Alle Module verfügen über eine eigene Steuerung. Sowohl die prozesstechnischen Funktionen (Mischen, Destillieren, Filtern und Abfüllen) als auch Module der in der Beispielanlage eingesetzten Größenklasse sind weit verbreitet. Es ist demnach davon auszugehen, dass die Module als Standardmodule konzipiert und als solche angeboten werden.

Zur Ermittlung des verlagerbaren Engineering-Aufwands muss, bei Standardmodulen mit Basisautomatisierung in einer eigenen Steuerung, die PLT-Stellenverteilung zwischen den Modulen und dem Backbone betrachtet werden. Der Backbone verfügt über eine zentrale Energie- und Druckluftversorgung. Für diese sind im genutzten Backbone fünf PLT-Stellen vorgesehen. Die angeschlossenen Module (Mischer, Destille, Filter und Abfüller) realisieren ihre Funktion mit insgesamt 51 PLT-Stellen. Es besteht somit ein Verhältnis von ca. 1:9. Aus Abbildung 6-6 ergibt sich, dass in diesem Fall ca. 37%²² der in einem klassischen Anlagen-Engineering, einer Anlage mit identischem prozesstechnischen Funktionsumfang, anfallenden Aufwände im zeitkritischen Gesamtanlagen-Engineering bearbeitet werden müssen. Dies entspricht einer Verringerung des zeitkritischen Umfangs des Engineering-Prozesses im Gewerk Automatisierungstechnik um ca. 66%.

8. Zusammenfassung, kritische Betrachtung und Ausblick

8.1. Zusammenfassung

Das Engineering einer automatisierten Produktionsanlage ist ein zeitintensiver und kostspieliger Prozess. Er ist zwar zeitlich und im Verhältnis zum übrigen Lebenszyklus der Anlage relativ kurz, verursacht allerdings einen erheblichen Teil der Gesamterstellungskosten einer Anlage [Fay09]. Eine relativ geringe Steigerung der Engineering-Effizienz kann demnach große finanzielle Auswirkungen haben. Daher ist die Verbesserung des Engineerings Motivation für zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten.

²² Der X-Achse (PLT-Stellenverteilung Modul/Backbone) bis zum Wert 90% folgen. Der Aufwandwert ergibt sich durch das Lot auf die Linie „Verbleibender Aufwand im Gesamtanlage-Eng. bei Nutzung Standardmodul mit SPS“.

Zu der ständig anstehenden Forderung nach Effizienzsteigerung im Engineering gesellt sich neuerdings eine weitere Herausforderung: Verbraucher neigen zunehmend dazu, individualisierte Produkte zu konsumieren. Schon heute kann man sein Müsli, sein Parfüm oder seine Sportschuhe individuell gestalten und sogar Briefmarken mit eigenen Abbildungen erstellen lassen. Die daraus entstehenden Anforderungen an die produzierenden Betriebe werden auch im Umfeld der Initiative Industrie 4.0 formuliert. Als Konsequenz müssen Produktionsanlagen dem Individualisierungsdrang des Absatzmarktes mit erhöhter Anpassungsfähigkeit entsprechen.

Modular aufgebaute Anlagen könnten die geforderte Anpassungsfähigkeit erbringen. Der zugrunde liegende Kerngedanke ist, dass der Prozess einer Produktionsanlage durch einzelne, miteinander vernetzte Module realisiert werden kann, wobei jedes Modul eine spezifische, in sich abgegrenzte Teilaufgabe innerhalb des Prozesses ausführt. Dieser Gedanke ist nicht neu. So wurde beispielsweise auf dem 48. Tutzing-Symposium 2009 die 50%-Idee entwickelt. Eine der in diesem Rahmen formulierten Thesen fordert den Bau modularer Produktionsanlagen [PAA09]. Die NAMUR nahm sich des Themas mit der Gründung des NAMUR AK 1.12 an, aus dessen Gremium die NE148 erarbeitet wurde. Damit wurde dem Bedürfnis nach einer technischen Anforderungsbeschreibung nachgekommen. Aussagen zu einer konkreten wirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit sind darin allerdings nicht enthalten.

Um verlässliche und belastbare Zahlen zur Vorteilhaftigkeit der Nutzung modularer und wandlungsfähiger Produktionsanlagen erhalten zu können, müssen die folgenden Bedingungen erfüllt werden:

- Domänenbezug: Anwendung in einem spezifischen Industriezweig,
- Aufgabenbezug: Anwendung einer definierten, beispielsweise planerischen Tätigkeit
- und ggf. Technikbezug: Bezug zu einer spezifischen technischen Umsetzung,

Vor diesem Hintergrund betrachtet die vorliegende Arbeit Produktionsanlagen in der chemisch-pharmazeutischen Industrie. Spezifisch für das Gewerk Automatisierungstechnik wird untersucht, um wie viel der Engineering-Aufwand bei Nutzung modularer Produktionsanlagen im Vergleich zu klassischen Produktionsanlagen verringert werden kann. Im Speziellen wurde dazu das Engineering des Automatisierungssystems der Anlage betrachtet. Die Verringerung des Engineering-Aufwands wird bei modularen Anlagen nicht durch Wegfall von Engineering-Aktivitäten erwirkt, sondern durch eine Verlagerung einzelner Tätigkeiten in ein projektunabhängiges Modul-Engineering, welches sich zeitlich vor dem eigentlichen Anlagen-Engineering befindet. Dadurch verringert sich der Engineering-Aufwand für den Betreiber erheblich. Der Modullieferant wiederum erhält die Möglichkeit, während des Modul-Engineering einzelne Teilprozesse zu standardisieren und diese in ein Wiederverwendungskonzept einzubinden. Der vorliegenden Arbeit liegen als technische Basis die Ergebnisse des DIMA-Projektes zugrunde, welches durch die Helmut-

Schmidt-Universität und die Technische Universität Dresden in Kooperation mit der Firma WAGO-Kontakttechnik erarbeitet wurde [HOF14].

Auf dieser technischen Basis wurde jede Einzelaktivität des Namur Arbeitsblattes 35 [NA35] beurteilt und entschieden, ob sich diese in das projektunabhängige Modul-Engineering verschieben lässt oder im Anlagen-Engineering verbleiben muss.

Die Untersuchungsergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die Anzahl der verlagerbaren Engineering-Tätigkeiten abhängig von mehreren Aspekten ist. Verfügen die Module über eine eigene Verarbeitungsintelligenz (SPS), so ist die Anzahl potenzieller projektunabhängiger Tätigkeiten größer als ohne. Eine weitere Erkenntnis bezieht sich auf den Standardisierungsgrad der Module. Bei oft genutzten Modulen (Standardmodule) kann mehr Aufwand aus dem projektbezogenen Anlagen-Engineering in das projektunabhängige Modul-Engineering verlagert werden, als bei eher selten genutzten und damit schwer zu vereinheitlichenden Modulen (Spezialmodulen).

Ein weiteres Ergebnis der Untersuchung ist, dass der verlagerbare Aufwand deutlich von der Verteilung der PLT-Stellen abhängt. Befinden sich beispielsweise, bei ausschließlicher Nutzung von Standardmodulen mit eigener Intelligenz, ca. 74% aller PLT-Stellen der Gesamtanlage in den Modulen und 26% der PLT-Stellen im Backbone, kann eine Verringerung des Umfangs des Gesamtanlagen-Engineerings um ca. 50% im Verhältnis zum Engineering einer klassischen, nicht modularen Anlage mit identischem prozesstechnischen Funktionsumfang erreicht werden.

Diese Arbeit zeigt, dass modulare Produktionsanlagen in der chemisch-pharmazeutischen Industrie grundsätzlich vorteilhaft sind. Durch die Anwendung geeigneter Mechanismen in der Automatisierungstechnik kann der projektspezifische Aufwand des Gesamtanlagen-Engineerings deutlich verringert werden. Durch die Nutzung von standardisierten Modulen ist außerdem eine Basis für ein umfangreiches Wiederverwendungskonzept gegeben. Dies ist insofern für die Planung und Entwicklung von Modulen wichtig, da dieser Vorgang bei mehrmaliger Veräußerung von baugleichen Entitäten mehr einer Produktentwicklung als einem (Teil-) Anlagen-Engineering entsprechen wird.

Die Ergebnisse zeigen auch, dass sich die Auswahl- und Auslegungsprozesse ändern werden. Im Anlagen-Engineering werden weniger Geräte und Apparate, wie zum Beispiel Ventile und Pumpen, ausgewählt, sondern Module. Der Funktionsumfang von Modulen wird allerdings komplexer sein als der Funktionsumfang von Geräten. Folglich werden die zu betrachtenden Eigenschaften und Merkmale bei der Auswahl von Modulen umfangreicher sein als bei der Auswahl von Geräten. So entsteht in einigen Einzelaktivitäten ein zusätzlicher Aufwand für

den Auswahlprozess der Module, der sich im Gesamtanlagen-Engineering mit 1,5%²³ niederschlägt. Durch den Einsatz einer Werkzeugunterstützung könnte dieser Zusatzaufwand allerdings deutlich verringert werden. Die Untersuchungsergebnisse begründen somit auch die Entwicklung neuer, den Anwender unterstützender Werkzeuge, wie Sie zur Auswahl von Feldgeräten [RiFa14] schon heute angewendet werden.

8.2. Kritische Betrachtung

Um die oben beschriebenen Ergebnisse zu erhalten, mussten einige Annahmen getroffen werden. So werden die Ergebnisse jeweils nur für eine Art von Modul (Standard- oder Spezialmodul) ermittelt. Mischstrukturen zwischen Standard- und Spezialmodulen, sowie variierende AT-Systeme in den Modulen einer Anlage, wurden nicht berücksichtigt. Eine Ermittlung der Aufwandsverlagerung von Mischstrukturen würde zu einer solch großen Bandbreite führen, dass nur wenige hätten betrachtet werden können. Auch eine Aufwandsbetrachtung bei Anlagen, die sowohl klassische als auch modulare Strukturen aufweisen, wurde nicht vorgenommen. Gerade diese Konstellation wird allerdings einen typischen Anwendungsfall von modularen Anlagen darstellen, da man davon ausgehen kann, dass sich erste Umsetzungen dieser Architektur durch Umbauen bzw. Erweitern bestehender Anlagen ergeben werden.

Als eine Datenbasis wird in dieser Arbeit die NA35 genutzt. Sie stellt zwar eine gute und bekannte Quelle dar, bildet aber nur ein Querschnitt über verschiedene PLT-Projekte der chemischen Verfahrenstechnik und Energieversorgung ab [NA35]. Spezifische Anwendungsfälle können von den Inhalten der NA35 abweichen und somit den Aufwand des Gesamtanlagen-Engineerings nicht wie dargestellt reduzieren.

Ein reales Abwickeln von PLT-Projekten entspricht nur im optimalen Fall einem durchgängigen und unterbrechungsfreien Ablauf. Vielmehr werden von Engineering-Organisationen (EO) in der Regel mehrere Projekte gleichzeitig bearbeitet. Die Mitarbeiter der EO sind so auf die Projekte aufgeteilt, dass möglichst kein Mitarbeiter ohne Aufgabe oder mit zu vielen Aufgaben betraut ist. Es kann somit zu Konstellationen kommen, in denen vermehrt oder eben gar nicht an den Inhalten eines Projektes gearbeitet wird, da andere Projekte bevorzugt bearbeitet werden. Projekte können somit zwischenzeitlich ruhen und anschließend als Schwerpunkt bearbeitet werden. Eine Verringerung des Engineering-Aufwandes um 50% ist somit unter diesen Gesichtspunkten nicht gleichzusetzen mit einer realen Verkürzung der Zeit für die Abarbeitung dieser Aufgaben. Eine zeitliche Verkürzung des Engineerings ist darüber hinaus auch von Wartezeiten, Planungsiterationen oder der Qualifikation der Bearbeiter abhängig.

²³ Der Aufwand entsteht aus zusätzlichen 30% in der ursprünglichen EA 4.1 , welche 5% des Gesamtanlagen-Engineerings beanspruchen.

Grundsätzlich stellen die Ergebnisse eine Untersuchung der Aufwände im Engineering der Prozessleittechnik modularer verfahrenstechnischer Produktionsanlagen dar. Aussagen zum Engineering verfahrenstechnischer Produktionsanlagen im Rahmen einer Neuerrichtung einer Produktionsanlage sind damit nur bedingt möglich. Betrachtet man hingegen das Szenario des Modulwechsels, bei dem die Hauptaktivitäten Planungs- und Konfigurationsaktivitäten des Automatisierungssystems darstellen, kann durch die Befolgung des DIMA-Ansatzes eine deutliche Aufwands- und Zeitreduzierung erreicht werden.

Zukünftige Anpassungen des Modul-Engineerings hin zu Prozessen, wie sie heute in der Produktentwicklung (vgl. 2.3.3) zu finden sind, sind gleichermaßen nicht enthalten, wie notwendige Organisationsstrukturveränderungen zwischen Modulherstellern und Anlagenbetreibern. Letzteres umfasst zum Beispiel neue Geschäftsfelder für die Beschaffung, den Betrieb sowie für die Diagnose und Wartung der Module. Hier müssen zukünftige Modulhersteller hybride Leistungsbündel anbieten [MeUh12], um die entsprechende Akzeptanz beim Anwender zu erreichen.

8.3. Ausblick

Die Einführung modularer Anlagen stellt hohe Anforderungen an die Flexibilität des Automatisierungssystems der Produktionsanlage, die die Nutzung neuer und neuartiger Softwarewerkzeuge bedingt. Das ist auch potentiellen Anwendern bewusst [GeKe14]. Nur wenn die erforderlichen Prozesse und Algorithmen während eines Wandlungsprozesses im Leitsystem durch den Nutzer nachvollziehbar gestaltet werden und ein Konsistenzbeweis der Algorithmen eine hohe Anlagenverfügbarkeit garantiert, wird diese neuartige Anlagenstruktur Akzeptanz finden. Dies beinhaltet auch die Nutzung von vereinheitlichten und standardisierten Schnittstellen. Aktivitäten zur Standardisierung eines Modul Type Package, wie sie in NAMUR und ZVEI stattfinden, sind ein vielversprechender Ansatz. So könnte ein Grundstein gelegt werden modulare Anlagen in der Prozessindustrie durch einen industriellen Standard dauerhaft zu etablieren.

Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Arbeit könnte ein nächster Schritt die Entwicklung von Software-Werkzeugen darstellen, um den identifizierten Zusatzaufwand zu minimieren.

Grundsätzlich besteht ein bedeutender Anteil der Engineering-Aufwände des Gewerks Automatisierungstechnik in der Erstellung und Konfiguration von Software. Insofern sind alle Methoden der automatischen Softwaregenerierung, z.B. durch wissensbasierte Systeme auch bei der Verringerung der Aufwände förderlich.

Hinsichtlich der Aufwandsbewertung ist festzuhalten, dass für eine komplette Bestimmung der Vorteilhaftigkeit modularer Anlagen weitere Gewerke betrachtet werden und entsprechende Untersuchungen durchgeführt werden müssen. Erst quantifizierbare

Aussagen für den kompletten Engineering-Prozess einer modularen Anlage werden die Vorteilhaftigkeit vollends quantifizieren und die Entscheidungsträger überzeugen können.

Anhang A: Bewertung der NA35 Einzelaktivitäten

	1%	0%	6%	0%	10%	5%	3%	1%	5%	8%	5%	8%	10%
	1.1 Projektziele festlegen	1.2 Grobkosten schätzen	2.1 Anlagenkonzept festlegen	2.2 Kostenschätzen	3.1 PLT-Funktionen festlegen	3.2 Verfahrenstechnische Daten beschaffen	3.3 Technische Realisierung festlegen	3.4 Kosten kalkulieren	4.1 Geräte festlegen	4.2 Zentrale Einrichtungen festlegen	4.3 Leitsystem spezifizieren	4.4 Stellenpläne erzeugen	4.5 Stelleneinstellungspläne erzeugen
Zuordnung Gesamtanlagen-Engineering	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Zuordnung Modul-Engineering			X		X	X	X	X	X			X	X
Aufwand Modul-Eng. Standardmodul													
SPS	0%	0%	80%	0%	80%	80%	80%	80%	80%	0%	40%	80%	80%
Zusatzaufwand	0%	0%	30%	0%	0%	10%	0%	10%	30%	0%	0%	0%	0%
Remote I/O	0%	0%	80%	0%	80%	80%	80%	80%	80%	0%	40%	40%	40%
Zusatzaufwand	0%	0%	30%	0%	0%	10%	0%	10%	30%	0%	0%	0%	0%
Aufwand Modul-Eng. Spezialmodul													
SPS	0%	0%	10%	0%	10%	10%	10%	10%	10%	0%	0%	10%	10%
Zusatzaufwand	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Remote I/O	0%	0%	10%	0%	10%	10%	10%	10%	10%	0%	0%	10%	10%
Zusatzaufwand	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Betrachtung Standardmodul:

Aufwand im Gesamtanlage-Eng. bei Nutzung Standardmodul mit SPS	1,0%	0,0%	3,0%	0,0%	2,0%	1,5%	0,6%	0,3%	2,5%	8,0%	3,0%	1,6%	2,0%
Aufwand im Projektunabhängigen Modul-Eng. bei Nutzung Standardmodul mit SPS	0,0%	0,0%	4,8%	0,0%	8,0%	4,0%	2,4%	0,8%	4,0%	0,0%	2,0%	6,4%	8,0%
Aufwand im Gesamtanlage-Eng. bei Nutzung Standardmodul mit RI/O	1,0%	0,0%	3,0%	0,0%	2,0%	1,5%	0,6%	0,3%	2,5%	8,0%	3,0%	4,8%	6,0%
Aufwand im Projektunabhängigen Modul-Eng. bei Nutzung Standardmodul mit R I/O	0,0%	0,0%	4,8%	0,0%	8,0%	4,0%	2,4%	0,8%	4,0%	0,0%	2,0%	3,2%	4,0%

Betrachtung Spezialmodul:

Aufwand im Gesamtanlage-Eng. bei Nutzung Spezialmodul mit SPS	1,0%	0,0%	5,4%	0,0%	9,0%	4,5%	2,7%	0,9%	4,5%	8,0%	5,0%	7,2%	9,0%
Aufwand im Projektunabhängigen Modul-Eng. bei Nutzung Spezialmodul mit SPS	0,0%	0,0%	0,6%	0,0%	1,0%	0,5%	0,3%	0,1%	0,5%	0,0%	0,0%	0,8%	1,0%
Aufwand im Gesamtanlage-Eng. bei Nutzung Spezialmodul mit RI/O	1,0%	0,0%	5,4%	0,0%	9,0%	4,5%	2,7%	0,9%	4,5%	8,0%	5,0%	7,2%	9,0%
Aufwand im Projektunabhängigen Modul-Eng. bei Nutzung Spezialmodul mit R I/O	0,0%	0,0%	0,6%	0,0%	1,0%	0,5%	0,3%	0,1%	0,5%	0,0%	0,0%	0,8%	1,0%

Mehraufwand durch Brüche

Aufwand Modul-Eng. Standardmodul													
SPS	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,0%	0,0%	0,0%
Remote I/O	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,0%	0,0%	0,0%
Aufwand Modul-Eng. Spezialmodul													
SPS	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Remote I/O	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

	9%	2%	1%	10%	1%	4%	6%	1%	1%	2%	0%	0%	1%	100%	
	4.6 Montageunterlagen erstellen														
	5.1 Bestellung veranlassen	5.2 Lieferung bestätigen	5.3 Software konfigurieren	5.4 Montage vorbereiten	5.5 Montage überwachen	5.6 Funktion prüfen	6.1 Personal ausbilden	6.2 Inbetriebsetzung unterstützen	6.3 Dokumentation revidieren	6.4 Dokumentation übergeben	7.1 Abschlussbericht erstellen	7.2 Projektabrechnung erstellen	SUMME	Gesamtaufwand	
Zuordnung Gesamtanlagen-Engineering	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
Zuordnung Modul-Engineering	X	X	X	X	X	X	X								
Aufwand Modul-Eng. Standardmodul															
SPS	70%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	0%	0%	0%	0%	0%			
Zusatzaufwand	0%	20%	10%	40%	10%	5%	30%	0%	0%	10%	0%	0%			
Remote I/O	70%	80%	80%	80%	80%	80%	60%	0%	0%	0%	0%	0%			
Zusatzaufwand	0%	20%	10%	40%	10%	5%	30%	0%	0%	10%	0%	0%			
Aufwand Modul-Eng. Spezialmodul															
SPS	10%	10%	10%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%			
Zusatzaufwand	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%			
Remote I/O	10%	10%	10%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%			
Zusatzaufwand	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%			
Betrachtung Standardmodul:															
Aufwand im Gesamtanlage-Eng. bei Nutzung Standardmodul mit SPS	2,7%	0,8%	0,3%	6,0%	0,3%	1,0%	3,0%	1,0%	1,0%	2,2%	0,0%	0,0%	1,0%	44,8%	
Aufwand im Projektunabhängigen Modul-Eng. bei Nutzung Standardmodul mit SPS	6,3%	1,6%	0,8%	8,0%	0,8%	3,2%	4,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	69,9%	114,7%
Aufwand im Gesamtanlage-Eng. bei Nutzung Standardmodul mit RI/O	2,7%	0,8%	0,3%	6,0%	0,3%	1,0%	4,2%	1,0%	1,0%	2,2%	0,0%	0,0%	1,0%	53,2%	
Aufwand im Projektunabhängigen Modul-Eng. bei Nutzung Standardmodul mit RI/O	6,3%	1,6%	0,8%	8,0%	0,8%	3,2%	3,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	57,5%	110,7% ²⁴
Betrachtung Spezialmodul:															
Aufwand im Gesamtanlage-Eng. bei Nutzung Spezialmodul mit SPS	8,1%	1,8%	0,9%	10,0%	1,0%	4,0%	6,0%	1,0%	1,0%	2,0%	0,0%	0,0%	1,0%	94,0%	
Aufwand im Projektunabhängigen Modul-Eng. bei Nutzung Spezialmodul mit SPS	0,9%	0,2%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	6,0%	100%
Aufwand im Gesamtanlage-Eng. bei Nutzung Spezialmodul mit RI/O	8,1%	1,8%	0,9%	10,0%	1,0%	4,0%	6,0%	1,0%	1,0%	2,0%	0,0%	0,0%	1,0%	94,0%	
Aufwand im Projektunabhängigen Modul-Eng. bei Nutzung Spezialmodul mit RI/O	0,9%	0,2%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	6,0%	100%
Mehraufwand durch Brüche															
Aufwand Modul-Eng. Standardmodul															
SPS	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,0%	
Remote I/O	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,0%	
Aufwand Modul-Eng. Spezialmodul															
SPS	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0%	
Remote I/O	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0%	

²⁴ Der Gesamtaufwand berechnet sich aus Modul-Engineering, Gesamtanlagen-Engineering und den Zusatzaufwänden in Modul- und Gesamtanlagen-Engineering.

Literaturverzeichnis

- [AbRe11] E. Abele, G. Reinhard: Zukunft der Produktion - Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. Carl Hanser Verlag, München, 2011.
- [Aca13] Umsetzungsempfehlung für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0, Forschungsunion/acatech, April 2013, Verfügbar: https://www.bmbf.de/files/Umsetzungsempfehlungen_Industrie4_0.pdf, Zuletzt: 06.03.2016.
- [ADS11] H. Abdeen, S. Ducasse, H. Sahraoui: Modularization Metrics: Assessing Package Organization in Legacy Large Object-Oriented Software. In: Proceedings of WCRE Working Conference in Reverse Engineering. Limerick, Ireland, 17. – 20. Oct. 2011.
- [AIK08] D. Arnold, H. Isermann, A. Kuntz, H. Tempelmeier, k. Furmans: Handbuch Logistik. Springer-Verlag, Berlin, 2008.
- [ASS97] W. Ahrens, H.J. Scheurlen, G.U. Spohr: Informationsorientierte Leittechnik. Oldenbourg, München, 1997.
- [BaCl00] C.Y. Baldwin, K.B. Clark: Design rules - The Power of Modularity. MIT Press, Cambridge, 2000.
- [BaCl98] C.Y. Baldwin, K.B. Clark: Modularisierung: Ein Konzept wird universell. In: Harvard Business Manager, 1998, 2. S. 39-48
- [BaDi08] T. Bangemann, C. Diedrich, A. Colombo, S. Larnouskos: SOCRADES – Service Oriented Architecture in der Automatisierungstechnik. In: Kongress Automation 2015, Baden-Baden, 11.-12. Juni 2015.
- [BaMa03] B. Bayer, W. Marquardt: A Comparison of Data Models in Chemical Engineering. In: Concrrent Engineering: Research and Applications 11 (2003) Nr. 2, S. 129-138.
- [Bar06] J. Barata: The Cobasa Architecture as an Answer to Shop Floor Agility. In: V. Kordic: Manufacturing the future - Concepts, technologies & visions. Pro-Literatur-Verlag, Mammendorf, 2006.
- [BDC08] T. Bangemann, C. Diedrich, A.W. Colombo, S. Karnouskos: SOCRADES – Service Oriented Architecture in der Automatisierungstechnik. In: Tagungsband "Automatisierung 2008", Baden-Baden, 3.-4. Juni 2008.
- [BGKL12] A. Brodhagen, M. Grünewald, M. Kleiner, S. Lier: Erhöhung der Wirtschaftlichkeit durch beschleunigte Produkt- und Prozessentwicklung mit Hilfe modularer und skalierbarer Apparate. Chemie Ingenieur Technik, 84 (2012) Nr. 5, S. 624–632.
- [BHJ09] C. Brecher, W. Herfs, S. Jensen, D. Kolster, M. Pleßow: „Plug & Play“ – eine Vision rückt näher. In: A&D-Kompendium 2008/2009.

- [BHV14] T. Bauernhansel, M. Hompel, B. Vogel-Heuser: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik - Anwendung - Technologien - Migration. Springer-Vieweg, Wiesbaden, 2014.
- [BITK14] Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. - BITKOM: Industrie 4.0 – Volkswirtschaftliche Potentiale für Deutschland. BITKOM 2014. Verfügbar: <https://www.bitkom.org/Publikationen/2014/Studien/Studie-Industrie-4-0-Volkswirtschaftliches-Potenzial-fuer-Deutschland/Studie-Industrie-40.pdf>, Zuletzt: 24.01.2016.
- [Bla07] E. Blass: Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse - Methoden, Zielsuche, Lösungssuche, Lösungsauswahl. Springer-Verlag, Berlin, 1997.
- [BrSc12] C. Bramsiepe, G. Schembecker: Die 50 %-Idee: Modularisierung im Planungsprozess. Chemie Ingenieur Technik, 84 (2012) Nr. 5, S. 581–587.
- [BrSc15] M. Brendenberger, T. Scherwietes: Engineering. In: K.F. Früh, U. Maier, D. Schaudel (Hg.): Handbuch der Prozessautomatisierung, Deutscher Industrieverlag, München, 2014. S. 632–650.
- [Bru01] M. Brudermüller: Kuppelproduktion. In: G. Festel, A. Hassan, J. Leker, P. Bamelis (Hg.): Betriebswirtschaftslehre für Chemiker. Eine praxisorientierte Einführung. Springer-Verlag, Berlin, 2001.
- [Buc12a] S. Buchholz: F³ Factory: Eine flexible, modulare Produktionsplattform. In: chemanager-online.de, Verfügbar: <http://www.chemanager-online.com/themen/anlagenbau-komponenten/f3-factory-eine-flexible-modulare-produktionsplattform>, Zuletzt: 24.01.2016.
- [Buc12b] S. Buchholz: Demonstrating a new paradigm in sustainable manufacturing. Verfügbar: http://www.f3factory.com/scripts/pages/en/newsevents/F3_Factory_New_sletter_3.pdf, Zuletzt: 04.10.2015.
- [BuRe06] Die Bundesregierung: Neue Impulse für Innovation und Wachstum. 2006, Verfügbar: <https://www.bmbf.de/pub/6mrd-programm.pdf>, Zuletzt: 01.11.2015.
- [CGT09] A. Cannata, M. Gerosa, M. Taisch: SOCRADES: a Framework for Developing Intelligent Systems in Manufacturing, In: IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Piscataway, USA, 08.-12. Dezember 2008.
- [Che15] ChemieTechnik: APL-Gruppe einigt sich auf Lösungsvorschlag für Ethernet in the Field. Verfügbar: <http://www.chemietechnik.de/texte/anzeigen/123710/APL-Gruppe-einigt-sich-auf-Loesungsvorschlag-fuer-Ethernet-in-the-Field/Ethernet-in-the-Field-APL-APL-Gruppe>, Zuletzt: 27.09.2015.

- [Chr10] D.S. Christen: Praxiswissen der chemischen Verfahrenstechnik – Handbuch für Chemiker und Verfahrenstechniker. Springer-Verlag, Berlin, 2010.
- [Chr15] L. Christiansen: Wissensgestütztes Diagnosekonzept durch Kombination von Anlagenstruktur- und Prozessmodell. Dissertation, Helmut Schmidt Universität Hamburg, VDI Verlag, Düsseldorf, 2015.
- [CWG99] C. Creifelds, K. Weber, D. Guntz: Rechtswörterbuch. C.H. Beck-Verlag, München, 1999.
- [Dan03] W. Dangelmaier: Produktion und Information - System und Modell. Springer-Verlag, Berlin, 2003.
- [DDK03] R. Del Rosario, J.M. Davis, L.K. Keys: Concurrent and collaborative engineering implementation in an R&D organization. In: IEEE Engineering Management Soc Staff Jan. 2003 – 2003 IEEE International Engineering Management, Piscataway, Jan. 2003.
- [DiFa13] C. Diedrich, A. Fay: Engineering. In: at-Automatisierungstechnik, Heft 6/2013, S. 379-381.
- [DiHa13] C. Diedrich, T. Hadlich: Geräteintegration in AT-Systeme - Bestandsaufnahme und Ausblick. In: atp-Automatisierungstechnische Praxis 55 (2013) Nr. 10, S. 46-51.
- [DKE13] Deutsche Kommission Elektrotechnik: Die Deutsche Normungsroadmap Industrie 4.0. Verfügbar:
<https://www.dke.de/de/std/informationssicherheit/documents/nr%20industrie%204.0.pdf>, Zuletzt: 27.09.2015.
- [DKE15] Deutsche Kommission Elektrotechnik: Die Deutsche Normungsroadmap Industrie 4.0 - Version 2. Verfügbar:
<http://www.din.de/blob/95954/42935f7a165f16e341967b8a9f91c026/aktualisierte-roadmap-i40-data.pdf>, Zuletzt: 24.01.2016
- [DMS14] R. Drath, C. Messinger, B. Schröter, N. Li, G. Gutermuth: Engineering-Effizienz automatisch messen. In: atp-Automatisierungstechnische Praxis 56 (2014) Nr. 5, S. 32-40.
- [DrKo15] R. Drath, H. Koziolek: Industrie 4.0 – Im Spannungsfeld zwischn dem Machbaren und Sinnvollen. In: atp-Automatisierungstechnische Praxis 57 (2015) Nr.1-2, S.28-35.
- [DSV11] Deutscher Sparkassen Verband: Branchenreport Chemie, Pharma. Deutscher Sparkassen Verlag, Stuttgart, 2011.
- [DYM07] A. F. Cutting-Decelle, R. I. M. Young, J. J. Michel, R. Grangel, J. Le Cardinal, J. P. Bourey: ISO 15531 MANDATE: A Product-process-resource based Approach for Managing Modularity in Production Management. In: Concurrent Engineering, 15 (2007) Nr. 2, S. 217-235.

- [Egg05] M. Eggersmann: Analysis and Support of Work Processes Within Chemical Engineering Design Processes. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2005.
- [EhMe13] K. Ehrlenspiel, H. Meerkam: Integrierte Produktentwicklung. Hanser, München, 2013.
- [Eig08] H. Eigenbrod: Sirias - (Skill-based Inspection and Assembly for Reconfigurable Automation Systems). Abschlussbericht, Verfügbar: http://cordis.europa.eu/result/rcn/46960_en.html, Zuletzt: 04.10.2015.
- [Eng06] W. Engeln: Methoden der Produktentwicklung. Oldenbourg-Industrieverlag, München, 2006.
- [ESG96] W. Eversheim, J. Schernikau, D. Goeman: Module und Systeme - Die Kunst liegt in der Strukturierung. In: VDI-Zeitschrift, 138 (1996), 11/12, S. 44-48.
- [Fay09] A. Fay: Effizientes Engineering komplexer Automatisierungssysteme. In: E. Schnieder (Hg.): Wird der Verkehr automatisch sicherer. TU Braunschweig, Braunschweig, 2000.
- [Fay13] A. Fay: Engineering von Automatisierungssoftware für Maschinen und Anlagen. Vortrag im Rahmen des Institutsseminars Automatisierungstechnik. Helmut-Schmidt Universität Hamburg. 8. Mai 2013.
- [FBW13] A. Fay, S. Biffl, D. Winkler, R. Drath, M. Barth: A method to evaluate the openness of automation tools for increased interoperability. In: Tagungsband "IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society". Vienna, 10.-13. November 2013.
- [Fra02] H.J. Franke: Variantenmanagement in der Einzel- und Kleinserienfertigung. Hanser, München, 2002.
- [GCB15] G. Gutermuth, A. Cohen, M. Barth: Engineering-Workflow-Cockpit - Zentrum für das Engineering von Automatisierungssystemen. In: atp-Automatisierungstechnische Praxis 57 (2015) Nr. 3, S. 48-59.
- [GeKe14] A. Geipel-Kern: Was bremst die modulare Anlage? Process Nr.6 - 2014, S. 68-71.
- [GGR92] H. Glaser, W. Geiger, V. Rohde: PPS – Produktionsplanung und –steuerung – Grundlagen, Konzepte, Anwendungen. Gabler Verlage, Wiesbaden, 1992.
- [Gna05] M.A.J. Gnatz: Vom Vorgehensmodell zum Projektplan. Dissertation, Technische Universität München, VDM Verlag Dr. Müller, 2007.
- [Goe09] J. Göpfert: Modulare Produktentwicklung. Books on Demand, Norderstedt, 2009.
- [GoSt00] J. Göpfert, M. Steinbrecher: Modulare Produktentwicklung leistet mehr - Warum Produktarchitektur und Projektorganisation gemeinsam gestaltet werden müssen. In: Harvard Business Manager, 2000, 3. S. 1-17.

- [Gri03] M. Griss: Reuse Comes in Several Flavors. SDPC White paper, Flashline Inc., May 2003. Verfügbar: <http://martin.griss.com/pubs/WPGRIS02.pdf>. Zuletzt: 13.10.15.
- [Gut12] G. Gutermuth: Engineering Effizienz - eine wissenschaftliche Betrachtung. Veranstaltungen des GMA Arbeitskreis "Durchgängiges Engineering" Nürnberg 2012, Verfügbar: https://www.researchgate.net/publication/260417184_Engineering_bei_ABB_eine_wissenschaftliche_Betrachtung, Zuletzt: 04.10.2014.
- [Had13] Ł. Hady: Entwicklung einer online-basierten Modulbibliothek zur Steigerung der Planungsqualität, Know-how-Sicherung und Wiederverwendung des Engineering bei der modularen Anlagenplanung. Dissertation, Technische Universität Berlin, Logos Berlin, Berlin, 2013.
- [Hah96] D. Hahn: Strategische Fertigungsplanung. In: W. Kern, H. Schröder, J. Weber (Hg.): Handwörterbuch der Fertigungswirtschaft. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 1996.
- [HaWo12] Ł. Hady, G. Wozny: Multikriterielle Aspekte der Modularisierung bei der Planung verfahrenstechnischer Anlagen. Chemie Ingenieur Technik, 84 (2012), Nr. 5, S. 597–614.
- [HJSF15] S. Heymann, J. Jasperneite, S. Schröck, A. Fay: Beschreibung von Produktionsprozessen in modularisierten Produktionsanlagen für Industrie 4.0. In: Kongress Automation 2015, Baden-Baden, 11.-12. Juni 2015.
- [HLW01] A. Hasan, J. Leker, F. Wendel: Einführung. In: Betriebswirtschaftslehre für Chemiker. Eine praxisorientierte Einführung. In: G. Festel, A. Hassan, J. Leker und P. Bamelis (Hg.): Betriebswirtschaftslehre für Chemiker. Eine praxisorientierte Einführung. Springer-Verlag, Berlin, 2001.
- [Hum11] O. Hummel: Aufwandsschätzungen in der Software- und Systementwicklung. Spektrum-Verlag, Heidelberg, 2011.
- [JDR13] D. John, B. Danzer, M. Riedl, H. Zipper: Selbsterklärende Geräte - Abbildung semantischer Information auf Parameter mit EDD. In: atp-Automatisierungstechnische Praxis 55 (2013) Nr. 10, S. 57-61.
- [JHN15] J. Jasperneite, S. Hinrichsen, O. Niggemann: „Plug-and-Produce“ für Fertigungssysteme. Informatik Spektrum, 38 (2015), Nr. 3, S. 183-190.
- [KAB03] R.A. Klein, F. Anhäuser, M. Burmeister, J. Lamers: Planungswerkzeuge aus Sicht eines Inhouse-Planers. In: atp-Automatisierungstechnische Praxis 44 (2002) Nr. 1, S. 46-50.
- [Kay93] A. C. Kay: The Early History Of Smalltalk. In: The second ACM SIGPLAN conference on History of programming languages. ACM, New York. 1993.

- [KeKe01] W. Kersten; E. Kern: Produktionsmanagement-Grundlagen und Anwendung. In: G. Festel, A. Hassan, J. Leker und P. Bamelis (Hg.): Betriebswirtschaftslehre für Chemiker. Eine praxisorientierte Einführung. Springer-Verlag, Berlin, 2001.
- [KFJ96] M. Kleinaltenkamp, S. Fließ, F. Jacob: Customer-Integration - Von der Kundenorientierung zur Kundenintegration, Gabler, Wiesbaden, 1996.
- [KHM09] W. Kersten, J. Hülle, K. Möller, T. Lammers: Kostenorientierte Analyse der Modularisierung - Ein strukturiertes Vorgehen zur Entwicklung eines kennzahlenbasierten Bewertungsansatzes. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 2009, 12., S. 1136-1141.
- [Kho07] A.M. Kholid: Simulationsgestützte, systematische Entwicklung biotechnologischer Prozesse mit begleitender Evaluierung. Dissertation, Universität des Saarlandes, 2007.
- [KKS12] N. Kockmann, J. Kussi, G. Schembecker: Die 50%Idee: vom Produkt zur Produktionsanlage in der halben Zeit. Chemie Ingenieur Technik, 84 (2012) Nr. 5, S. 563
- [Kla93] S. Klabunde: Wissensmanagement in der integrierten Produkt- und Prozessgestaltung. Best-Practice-Modelle zum Management von Meta-Wissen. Dissertation, Universität des Saarlandes, Deutscher Univ. Verl., 2003.
- [Kli76] C. Kline: Maximizing profits in chemicals. In: Chemtech, 6.2 (1976), S. 110-117.
- [KINy05] T. Klemke, P. Nyhuis: Lean Changeability – Evaluation and Design of Lean and Transformable Factories. In: International Scholarly and Scientific Research & Innovation. 3 (2009) Nr. 5, S. 542-549.
- [Koc13] N. Kockmann: Modularisierung und Containerbauweise. In: chemanager-online.com, 2013, Verfügbar: <http://www.chemanager-online.com/themen/mess-automatisierungstechnik/modularisierung-und-containerbauweise>, Zuletzt: 24.01.2016.
- [KrCa05] M. Kratochvíl, C. Carson: Growing modular - Mass customization of complex products, services and software. Springer-Verlag, Berlin, 2005.
- [Kun13] A. L. Kuntz: Dienstbasierte Kommunikation über unzuverlässige drahtlose Verbindungen für selbstorganisierende Sensor-Aktor-Netze. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2011.
- [LaGo99] R. Lauber, P. Göhner: Prozessautomatisierung 2 - Softwarewerkzeuge für den Automatisierungsingenieur, Vorgehensweise in den Projektphasen bei der Realisierung von Echtzeitsystemen, Springer-Verlag, Berlin, 1999.
- [Lee96] L.H. Lee: Effective Inventory and Service Management through Product and Process Redesign. In: Operation Research, 44 (1996), Nr. 1, S. 151-159.

- [LGH11] L. Libuda, G. Gutermuth, S. Heiß: Arbeitsabläufe in der Anlagenplanung optimieren - IT-Unterstützung für Engineering Workflows. In: atp-Automatisierungstechnische Praxis 53 (2011) Nr. 9, S. 40-51.
- [Lie13] S. Lier: Entwicklung einer Bewertungsmethode für die Modularisierung von Produktionssystemen in der Chemieindustrie. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Shaker Verlag, Aachen, 2013.
- [Lin09] U. Lindemann: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Springer-Verlag, Berlin, 2009.
- [LMK11] D.v.d. Linden, H. Mannaert, W. Kastner, V. Vanderputten, H. Peremans, J. Verelst: An OPC UA Interface for an Evolvable ISA88 Control Module. In: 16th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Toulouse, France, 5.-9. September 2011.
- [Loe13] P. Löb: EU FP7 Project CoPIRIDE – towards new production and factory concepts for a sustainable and competitive European chemical industry. In: DE GRUYTER, 2013, S. 379 – 380.
- [Loo97] P. Loos: Produktionslogistik in der chemischen Industrie - Betriebstypologische Merkmale und Informationsstrukturen. Gabler Verlag, Wiesbaden, 1997.
- [Los13] M. Loskyll: Entwicklung einer Methodik zur dynamischen kontextbasierten Orchestrierung semantischer Feldgerätefunktionalitäten. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2013.
- [Lue13] C. Lühe: Modulare Kostenschätzung als Unterstützung der Anlagenplanung für die Angebots- und frühe Basic Engineering Phase. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2013.
- [Lun03] J. Lunze: Automatisierungstechnik - Methoden für die Überwachung und Steuerung kontinuierlicher und ereignisdiskreter Systeme. Oldenbourg, München, 2003.
- [Mag12] C. Maga: Adaptierbares Wiederverwendungskonzept für die Entwicklung von automatisierten Systemen: Dissertation, Universität Stuttgart, 2012.
- [Mai02] C. Maier: Konti oder Batch?. Chemie Technik, 31 (2002) Nr. 2, S. 38-41.
- [May97] F. Maymir-Durcharme: The Product Line Business Model. In: Proceedings of the Eighth Workshop on Institutionalizing Software Reuse, Ohio USA, 11. Jan. 1997
- [MeUh12] H. Meier, E. Uhlmann: Integrierte Industrielle Sach- und Dienstleistungen - Vermarktung, Entwicklung und Erbringung hybrider Leistungsbündel. Springer-Verlag, Berlin, 2012.
- [Mil14] D.T. Miller: Modular Engineering - An approach to structuring business with coherent, modular architectures of artifacts, activities, and knowledge. Dissertation, Technical University of Denmark, Lyngby, 2001.

- [MKI01] M. Mizukawa, T. Koyama, T. Inukai, A. Noda, N. Kanamaru, Y. Noguchi, N. Otera: Proposal of open-network-interface for industrial robots (ORiN) and its experimental evaluation. In: IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Como, Italy, 08-12. Jul 2001.
- [MSE10] H. Mersch, M. Schlüter, U. Epple: Classifying Services for the Automation Environment. In: 15th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Bilbao, Spain, 13.-16. September 2010.
- [Mur05] R. Murjahn: Kostenmanagement in der chemischen Produktentwicklung. Dissertation, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Deutscher Universitäts-Verlag, 2005.
- [MVV10] H. Mannaert, J. Verelst, K. Ven: "The transformation of requirements into software primitives: Studying evolvability based on systems theoretic stability. In: Science of Computer Programming, in press, 76 (12), 2010, S. 1210-1222.
- [Nag09] R. Nagel: Organisationsarchitekturen und ihre besonderen Führungsherausforderungen. In: R. Wimmer, J.O. Meissner, P. Wolf (Hg): Organisationsarchitekturen und ihre besonderen Führungsherausforderungen. Carl-Auer Verlag, 2009, S.80-100.
- [NHR08] P. Nyhuis,, T. Heinen, G. Reinhardt, C. Rimpau, E. Abele, A. Wörn: Wandlungsfähige Produktionssysteme. In: Werkstatttechnik WT-Online, 98 (2009) Nr. 1/2, S. 85-91.
- [NOW14] F. Nagatah, A. Otsuka, W. Keigo: Trajectory following control of an articulated robot VE026A incorporated with ORiN2 SDK. In: 14th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), Gyeonggi-do, South Korea, 22.-25 Oktober 2014.
- [OAS12] OASIS: Reference Architecture Foundation for Service Oriented Architecture Version 1.0. Verfügbar: <http://docs.oasis-open.org/soa-rm/soa-ra/v1.0/cs01/soa-ra-v1.0-cs01.pdf>, Zuletzt: 04.10.2015.
- [OHU14] M. Obst, A. Hahn, L. Urbas: Package Unit Integration for Process Industry – A New Description Approach. In: Tagungsband der 19. Tagung "IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation" (ETFA), Barcelona, Spain, 16.-19. September 2014.
- [ORW13] M. Obst, S. Runde, S. Wolf, L. Urbas: Integration requirements of package units - A description approach with FDI. In: 18th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Cagliari, Italy, 10.-13. September 2013.
- [PAA09] PAAT Team Tutzing, ProcessNet: Die 50% Idee: Vom Produkt zur Produktionsanlage in der halben Zeit - Thesen Tutzing. ProcessNet, 2009, Verfügbar: http://processnet.org/processnet_media/die+50prozent_idee-p-1159.pdf, Zuletzt: 04.10.2015.

- [PBF06] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, K.H. Grote: Konstruktionslehre - Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung. Springer-Verlag, Berlin, 2006.
- [PoKr00] A. Pöschmann, P. Krogel: Autoconfiguration Management für Feldbusse - PROFIBUS Plug & Play. In: e&i Elektrotechnik und Informationstechnik. 117 (2000) Nr. 5, S. 335-339.
- [PoLi08] J. Ponn, U. Lindemann: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Springer-Verlag, Berlin, 2008.
- [PRG06] G. Plank, D. Reintsema, G. Grunwals, M. Ottner et.al: Plug and Play Antriebs- und Steuerungskonzept für die Produktion von Morgen (PAPAS). Verfügbar: <http://www.dlr.de/Portaldatas/52/Resources/dokumente/papas/PAPAS-Abschlussbericht.pdf>, Zuletzt: 04.10.2015.
- [PVP14] T. Pötter, B. Vogel-Heuser, D. Pantförder: Industrie 4.0. In: K.F. Früh, U. Maier, D. Schaudel (Hg.): Handbuch der Prozessautomatisierung, Deutscher Industrieverlag, München, 2014. S. 44-56.
- [Rau01] R. Rauberger: Umweltleistungsbewertung in der chemischen Industrie - Die ökologische Wirksamkeit der EG-Öko-Audit-Verordnung. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden, 2001.
- [Rei00] G. Reinhart; Im Denken und Handeln wandeln. In: Münchener Kolloquium: ...nur der Wandel bleibt - Wege jenseits der Flexibilität. Herbert Utz Verlag, München, 16.-17.März 2000.
- [RiFa14] M. Riedel, A. Fay: Wissensbasierte Auswahl von Prinziplösungen - Geeignete Messverfahren automatisch finden. In: "atp - Automatisierungstechnische Praxis", 56 (2014) Nr.11, S. 52-63.
- [ROBA14] A. Rocha, N. Antzoulatos, G. Di Orio, E. Castro, D. Scrimieri, L. Ribeiro, J. Barata, S. Ratchev: An Agent Based Framework to Support Plug and Produce. In: IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Porto Alegro, 27.-30.07.2014
- [SaKa00] K. Sattler, W. Klaus: Verfahrenstechnische Anlagen - Planung, Bau und Betrieb. Wiley-VCH, Weinheim, 2000.
- [Sch10] S. Schmitz: Grafik- und Interaktionsmodell für die Vereinheitlichung grafischer Benutzungsschnittstellen der Prozessleittechnik. Dissertation, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Aachen, 2010.
- [Sch11] J. Schulz: Vorwort Dr. Joachim Schulz. In: E. Abele, G. Reinhard (Hg.): Zukunft der Produktion - Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. Carl Hanser Verlag, München, 2011
- [Sch88] R.J. Schonberger: Fabriken in der Fabrik. In: Harvard Manager, 10 (1998) Nr. 2 S. 25-30.

- [Sch97] A.W. Scheer: Wirtschaftsinformatik - Referenzmodelle für industrielle Geschäftsprozesse. Springer-Verlag, Berlin, 1997.
- [Sch99] E. Schnieder: Methoden der Automatisierung. Vieweg Verlagsgesellschaft, Braunschweig, 1999.
- [SeSe90] A. K. Sethi, S.P. Sethi: Flexibility in manufacturing: A survey. In: The International Journal of Flexible Manufacturing Systems. 1990, Nr. 2, S. 289-328.
- [SHW14] M. Schleipen, T. Hövelmeyer, G. Wolff, M. Jentsch, M. Okon, A. Wagner, H. Demir, K. Furmans, D. Asi: PCFF: Plug & Control for flexible transport equipment based on AutomationML. In: AutomationML User Conference 2014, Blomberg, 07.-08. Oktober 2014.
- [SJF11] S. Schreiber, S. Jerenz, A. Fay: Anforderungen an Steuerungskonzepte für moderne Fertigungsanlagen. In: Tagungsband "Automation 2011", 28-29. Juni 2011, Baden-Baden.
- [Ski74] W. Skinner: The Focused Factory. In: Harvard Manager, 1974, Nr. 5, S. 113-121.
- [StBu15] Statistisches Bundesamt: Anteil der Industrie am BIP seit 20 Jahren nahezu konstant. Pressemitteilung Nr. 124 vom 08.04.2015. Verfügbar: https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2015/04/PD15_124_811.html, Zuletzt: 06.03.2016.
- [Ste15] D. Stephan: Neues aus dem Anlagen-Baukasten. In: Process Anlagen-/Apparatebau 4-2015, S. 22-24.
- [Str02] G. Strohmann: Automatisierung verfahrenstechnischer Prozesse - Eine Einführung für Techniker und Ingenieure. Oldenbourg-Industrieverlag, München, 2002.
- [SWB09] S. Schneikert, M. Wessner, M. Baumann, M. Okon, M. Schleipen, M. Neukäufer, M. Feike, N. Popova: Abschlussbericht Flexible Anbindung von Produktionsanlagenmodulen durch Adaptivität und Selbstkonfiguration - ProduFlexil. Verfügbar: <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb09/606655727.pdf>, Zuletzt: 04.10.2015.
- [SWH10] Y. Shan, H. Wang, J. Li, W. Hu: Research on Fieldbus Device Integration Based on EDD and FDT. In: Second International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, Los Alamitos, California, 26.-28. August 2010.
- [SZF14] S. Schröck, F. Zimmer, A. Fay, T. Jäger: Konzept zur funktionsorientierten systematischen Wiederverwendung im Engineering automatisierter Anlagen der Prozessindustrie. In Tagungsband: "Entwurf komplexer Automatisierungssysteme EKA 2014 - 13. Fach-tagung", Magdeburg, 14.-15. Mai 2014.

- [UBJ12] L. Urbas, S. Bleuel, T. Jager, S. Schmitz, L. Evertz, T. Nekolla: Automatisierung von Prozessmodulen. Von Package-Unit-Integration zu modularen Anlagen. In: atp- Automatisierungstechnische Praxis, 54 (2012) Nr. 1-2, S. 44-53.
- [Ul09] A. Ulrich: Entwicklungsmethodik für die Planung verfahrenstechnischer Anlagen. Dissertation, Helmut Schmidt Universität Hamburg, VDI Verlag, Düsseldorf, 2009.
- [UTu91] K.T. Ulrich, K. Tung: Fundamentals of Product Modularity. Sloan School of Management MIT, Massachusetts USA, 1991
- [UzSe12] H. Uzuner, G. Schembecker: Wissensbasierte Erstellung von R&I-Fließbildern. Chemie Ingenieur Technik, 84 (2012), Nr. 5, S. 747–761.
- [VCI15] Verband der chemischen Industrie: Chemiewirtschaft in Zahlen 2015. Verfügbar: <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/chemiewirtschaft-in-zahlen-print.pdf>, Zuletzt: 04.10.2015.
- [VDFJ14] B. Vogel-Heuser, C. Diedrich, A. Fay, S. Jeschke, S. Kowalewski, M. Wollschlaeger, P. Göhner: Challenges for Software Engineering in Automation. Journal of Software Engineering and Applications. 7 (2014) Nr. 5, S. 440-451.
- [VDI15] VDI/VDE-GMA Statusreport - Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0). Verfügbar: https://www.vdi.de/fileadmin/user_upload/VDI-GMA_Statusreport_Refenzarchitekturmodell-Industrie40.pdf, Zuletzt: 27.09.15.
- [VDMA14] Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau: Modularisierung und Standardisierung - Ergebnisse einer Gemeinschaftsstudie von maexpartners und der VDMA Arbeitsgemeinschaft Großanlagenbau. Verfügbar: <http://www.vdma.org/article/-/articleview/4520776>, Zuletzt: 18.10.2015.
- [Web14] K. Weber: Engineering verfahrenstechnischer Anlagen. Springer-Verlag, Berlin 2014.
- [Wei08] T. Weilkins: Systems Engineering mit SysML/UML: Modellierung, Analyse, Design. d-Punkt Verlag, Heidelberg, 2008.
- [WeZa05] G. Wellenreuther, D. Zastrow: Automatisieren mit SPS - Theorie und Praxis. Vieweg und Teubner Verlag, Wiesbaden, 2005.
- [WGDF14] M. Weyrich, P. Göhner, C. Diedrich, A. Fay, M. Wollschlaeger, S. Kowalewski, B. Vogel-Heuser: Flexibles Management einer dezentralen Automatisierungsverbundanlage als Beispiel für Industrie 4.0. In: In Tagungsband: "Automation 2014", 1.-2. Juli 2014, Baden-Baden.
- [Wie02] H.P. Wiendahl: Wandlungsfähigkeit. In: Werkstatttechnik WT-Online, 92 (2002) Nr. 4, S. 122-127.

- [Wie05] H.P. Wiendahl: Die wandlungsfähige Fabrik: Konzept und Beispiel, in: K.H. Engel (Hg.): Praxishandbuch Betriebsleiter, Band 3, Weka Media, Kissing, 2005.
- [WiHe02] H.P. Wiendahl, R. Hernandez: Fabrikplanung im Blickpunkt - Herausforderung Wandlungsfähigkeit. In: Werkstatttechnik WT-Online, 92 (2002), Nr. 4, S. 133-138.
- [Wil06] H. Wildemann: Fertigungssegmentierung - Leitfaden zur fluß- und logistikgerechten Fabrikgestaltung. TCW Transfer-Centrum für Produktions-Logistik und Technologie-Management, München, 2006.
- [Wil98] H. Wildemann: Die modulare Fabrik. Kundennahe Produktion durch Fertigungssegmentierung. 5., überarb. und erg. Aufl. TCW-Transfer-Centrum, München, 1998.
- [WiMe11] H.W. Wieczorrel, P. Mertens: Management von IT-Projekten - Von der Planung zur Realisierung. Springer-Verlag, Berlin, 2011.
- [WoSc10] G. Wozny, G. Schembecker: Informationstechnische Unterstützung der Anlagenplanung für die Angebots- und frühe Basic Engineering Phase durch ein modulares Planungskonzept. Abschlussbericht, zum Förderprojekt. Verfügbar: <http://www.apt.bci.tu-dortmund.de/dissertationen/7-aif-bericht-qinformationstechnische-unterstuetzung-der-anlagenplanung-q.pdf>, Zuletzt: 04.10.2015
- [WRN14] H.P. Wiendahl, J. Reichardt, P. Nyhuis: Handbuch Fabrikplanung - Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. Hanser, München, 2014.
- [YQD10] L. Yu, G. Quirós, U. Epple: Service-Oriented Process Control for Complex Multifunctional Plants: Concept and Case Study. In: 15th. IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Bilbao, Spain, 13.-16. September 2010.
- [ZaDi94] E. Zahn, R. Dillerup: Fabrikstrategien und -strukturen im Wandel. In: G. Zülich: Vereinfachen und Verkleinern - Die neuen Strategien in der Produktion. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 1994.
- [ZeKu09] R. Zeppenfeld, J. Kussi: Einführungsvortrag. Workshop zur Modularisierung, Frankfurt/Main, 4. Dezember 2009.
- [ZRG08] N. Zaerpour, M. Rabbani, A. H. Gharehgozli, R. Tavakkoli-Moghaddam: A comprehensive decision making structure for partitioning of make-to-order, make-to-stock and hybrid products. Soft Comput, 13 (2009), Nr. 11, S. 1035-1054.

Normen- und Richtlinienverzeichnis

- [DIN1319] Deutsches Institut für Normenwesen: Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe. 1995.
- [DIN10628] Deutsches Institut für Normenwesen: Fließschema für verfahrenstechnische Anlagen. 2001.
- [DIN28000] Deutsches Institut für Normenwesen: Chemischer Apparatebau - Dokumentation im Lebensweg von Prozessanlagen - Teil 1: Erfassung der grundlegenden und ergänzenden Dokumentation. 2011.
- [DIN61512] Deutsches Institut für Normenwesen: Chargenorientierte Fahrweise - Teil 1: Modelle und Terminologie. 2000.
- [DIN62424] Deutsches Institut für Normenwesen: Darstellung von Aufgaben der Prozessleittechnik - Fließbilder und Datenaustausch zwischen EDV-Werkzeugen zur Fließbilderstellung und CAE-Systemen zwischen EDV-Werkzeugen zur Fließbilderstellung und CAE-Systemen. 2014.
- [DIN62714] Deutsches Institut für Normenwesen: Datenaustauschformat für Planungsdaten industrieller Automatisierungssysteme - Automation markup language - Teil 1: Architektur und allgemeine Festlegungen. 2015.
- [DIN69901] Deutsches Institut für Normenwesen: Projektmanagement – Projektmanagementsysteme – Teil 5: Begriffe. 2009.
- [HOAI] Bundesgesetzblatt: Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen (HOAI). vom 16. Juli 2013.
- [ISA88] The Instrumentation, Systems, and Automation Society: Batch Control Part 1: Models and Terminology. 1995.
- [IEC60050] International Electrotechnical Commission: Internationales Elektronisches Wörterbuch: Leittechnik. 2014.
- [IEC62714] International Electrotechnical Commission: Engineering data exchange format for use in industrial automation systems engineering - Automation markup language - Part 1: Architecture and general requirements. 2014.
- [ISO10303] International Organization for Standardization: Industrial automation systems and integration Product data representation and exchange - Part 1: Overview and fundamental principles, 1994.
- [ISO15926] International Organization for Standardization: Integration of lifecycle data for process plant including oil and gas production facilities: Part 2 – Data model. 2003.
- [NA35] Namur: Namur Arbeitsblatt 35: Abwicklung von PLT-Projekten. 2003.
- [NA63] Namur: Namur Arbeitsblatt 63: Package Units (PU). 2003.

- [NE148] Namur: Namur Empfehlung 148: Anforderungen an die Automatisierungstechnik durch die Modularisierung verfahrenstechnischer Anlagen. 2013.
- [PAS1059] Deutsches Institut für Normenwesen: Planung einer verfahrenstechnischen Anlage - Vorgehensmodell und Terminologie. 2006.
- [VDI2206] Verein Deutscher Ingenieure: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. 2004.
- [VDI2221] Verein Deutscher Ingenieure: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. 1993.
- [VDI3682] Verein Deutscher Ingenieure: Formalisierte Prozessbeschreibungen, 2005.
- [VDI3695] Verein Deutscher Ingenieure: Engineering von Anlagen; Evaluieren und optimieren des Engineerings; Grundlagen und Vorgehensweisen. 2010.
- [VDI4499] Verein Deutscher Ingenieure: Digitale Fabrik - Digitaler Fabrikbetrieb. 2009.

Verzeichnis der Veröffentlichungen des Verfassers²⁵

- [BHH16] J. Bernshausen, A. Haller, T. Holm, M. Hoernicke, M. Obst, J. Ladiges: Namur – Module Type Package – Definition In: atp-Automatisierungstechnische Praxis, 58 (2016) Nr. 1-2, S. 72-81.
- [FaSc05] A. Fay, T. Scherf: Wissensbasierte Unterstützung von HAZOP-Studien: Ein Beitrag zur "Automatisierung der Automatisierung". In: Schnieder, E. (Hg.): Entwurf komplexer Automatisierungssysteme - 9. Fachtagung EKA, Mai 2005.
- [FDT15a] A. Fay, C. Diedrich, M. Thron, A. Scholz, P. Puntel Schmidt, J. Ladiges, T. Holm: Wie bekommt Industrie 4.0 Bedeutung? In: atp-Automatisierungstechnische Praxis, 57 (2015) Nr.8, S. 30-43.
- [FDT15b] A. Fay, C. Diedrich, M. Thron, A. Scholz, P. Puntel Schmidt, J. Ladiges, T. Holm: Wie bekommt Industrie 4.0 Bedeutung? In: Kongress Automation 2015, Baden-Baden, 11.-12. Juni 2015.
- [FFS09] A. Fay, T. Schmidberger, T. Scherf: Knowledge-based support of HAZOP studies using a CAEX plant model. Inside Functional Safety, 2009, Nr. 2, S. 5-15.

²⁵ Vor 2011 unter T. Scherf

- [GCH12] M. Göring, L. Christiansen, T. Holm, T. Jäger, A. Fay: ISO 15926 vs. IEC 62424 - Gegenüberstellung zweier Standards zur Modellierung von Anlagenstrukturen. In: „Jahrestreffen der Fachgemeinschaft Prozess-, Apparate- und Anlagentechnik“, Dortmund 19.-20. November 2012.
- [HAK15] U. Hempen, T. Albers, S. Kreft, T. Holm, M. Obst, A. Fay, L. Urbas: Dezentrale Intelligenz für modulare Anlagen. In: Kongress Automation 2015, Baden-Baden, 11.-12. Juni 2015.
- [HCG12] T. Holm, L. Christiansen, M. Göring, T. Jäger, A. Fay: ISO 15926 vs. IEC 62424 – Comparison of Plant Structure Modeling Concepts. In: Tagungsband der 17. Tagung "IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation" (ETFA), Kraków, Poland, 17.-21. September 2012.
- [HFE13] T. Holm, A. Friedrich, B. Engelke, T. Jäger, A. Fay: Methodik zur Einordnung und Auswahl von disziplinübergreifenden Vorgehens- und Datenmodellen für das Engineering automatisierter Anlagen. In: „IDA 2013 - Integrierte Digitale Anlagenplanung und -föhrung“, Frankfurt, 21.-22. März 2013.
- [HOF14] T. Holm, M. Obst, A. Fay, L. Urbas, T. Albers, S. Kreft, U. Hempen: Dezentrale Intelligenz für modulare Automation - Lösungsansätze für die Realisierung modularer Anlagen. In: atp-Automatisierungstechnische Praxis, 56 (2014) Nr. 11, S. 34-43.
- [HOF15] T. Holm, M. Obst, A. Fay, L. Urbas, U. Hempen, T. Albers, S. Kreft: Engineering method for the integration of modules into fast evolving production systems in the process industry. In: Tagungsband der 11. Tagung "IEEE International Conference on Automation Science and Engineering" (CASE), Gothenburg, Sweden, August 2015.
- [HoFa14] T. Holm, A. Fay: Aufwandsbetrachtung im Engineering modularer Prozessanlagen; Prozess-, Apparate- und Anlagentechnik (PAAT), 17.-18.11.2014, Lüneburg.
- [HOL16] T. Holm, M. Obst, J. Ladiges, L. Urbas, A. Fay, T. Albers, U. Hempen: Namur Modul Type Package – Implementierung. In: atp-Automatisierungstechnische Praxis, 58 (2016) Nr. 1-2, S. 82-90.
- [Hol16] T. Holm: DIMA-Dezentrale Intelligenz modularer Anlagen – Befähiger für I4.0 Produktionssysteme. In: Tagungsband 4.VDI Fachtagung Industrie 4.0, Düsseldorf 28./29.01.2016
- [HSJ13] T. Holm, S. Schröck, T. Jäger, U. Löwen, A. Fay: Engineering von „Mechatronik und Software“ in automatisierten Anlagen - Anforderungen und Stand der Technik. In: "ENVISION2020 - Zukunft der Entwicklung softwareintensiver, eingebetteter Systeme". Im Rahmen der Konferenz "Software Engineering 2013 (SE 2013)", Seite 261-272. Aachen, 27. Februar - 01. März 2013.

- [OHB13] M. Obst, T. Holm, S. Bleuel, U. Claussnitzer, L. Evertz, T. Jäger, T. Nekolla, S. Pech, S. Schmitz, L. Urbas: Automatisierung im Life Cycle modularer Anlagen. In: Zeitschrift "atp- Automatisierungstechnische Praxis", Heft 1-2/2013, S. 24-31.
- [OHU15a] M. Obst, T. Holm, L. Urbas, A. Fay, S. Kreft, U. Hempen, T. Albers: Beschreibung von Prozessmodulen - Ein weiterer Schritt zur Umsetzung der NE 148. In: atp- Automatisierungstechnische Praxis, 57 (2015) Nr. 1-2, S. 48-59.
- [OHU15b] M. Obst, T. Holm, L. Urbas, A. Fay, S. Kreft, U. Hempen, T. Albers: Semantic description of process modules - Towards an open implementation for plug and produce in process plants. In: Tagungsband der 19. Tagung "IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation" (ETFA), Luxembourg, 8.-11. September 2015.
- [SJB13] S. Schmitz, T. Jäger, S. Bleuel, L. Evertz, T. Nekolla, L. Urbas, S. Pech, U. Claussnitzer, T. Holm, M. Obst: Anforderungen an die Automatisierungstechnik durch die Modularisierung verfahrenstechnischer Anlagen. In: „IDA 2013 - Integrierte Digitale Anlagenplanung und -föhrung“, Frankfurt, 21.-22. März 2013.
- [SKH12] M. Strube, I. Kühl, T. Holm, A. Fay, R. Mühlfeld, H. Figalist: Modellierung von Kommunikationsschnittstellen bestehender Automatisierungslösungen in Modernisierungsprojekten auf Basis von Signallisten. In: Tagungsband "Automation 2012", 13-14. Juni 2012, Baden-Baden.
- [SSF07] T. Scherf, T. Schmidberger, A. Fay: Unterstützung von HAZOP-Studien durch automatisierte Auswertung von CAEX-Modellen. Automatisierungstechnische Praxis, Heft 6/2007, S. 46-53
- [SSF10] T. Schmidberger, T. Scherf, A. Fay: Wissensbasierte Unterstützung von HAZOP-Studien auf der Grundlage eines CAEX-Anlagenmodells. In: Automatisierung für die Prozessindustrie. Oldenbourg-Verlag, München, 2010
- [SZH13] S. Schröck, F. Zimmer, T. Holm, A. Fay, T. Jäger: Principles, viewpoints and effect links in the engineering of automated plants. In: Tagungsband "IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society". Vienna, 10.-13. November 2013.

Verzeichnis der betreuten studentischen Arbeiten des Verfassers

Masterarbeiten

- [Bor12a] M. Bornemann: Untersuchung der Datenschnittstelle zwischen Prozessmodulen und Prozessleitsystem im Kontext modularer Anlagen. Masterarbeit, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr, Instituts für Automatisierungstechnik, Hamburg, 2012.
- [Eng12a] B. Engelke: Datenmodelle im Engineering automatisierter Anlagen. Masterarbeit, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr, Instituts für Automatisierungstechnik, Hamburg, 2012.
- [Fri12a] A. Friedrich: Bewertung fachdisziplinübergreifender Vorgehensweisen und Modellierungskonzepte im Engineering automatisierter Anlagen. Masterarbeit, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr, Instituts für Automatisierungstechnik, Hamburg, 2012.
- [Kau13a] P. Kauth: Unterstützung der Automatisierung modularer verfahrenstechnischer Produktionsanlagen durch Integrationstechnologien komplexer Feldgeräte. Masterarbeit, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr, Instituts für Automatisierungstechnik, Hamburg, 2013.
- [Sca12] C. Scalla: Modellierung einer mechatronischen Anlage mit Hilfe eines UML-basierten Datenformates. Masterarbeit, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr, Instituts für Automatisierungstechnik, Hamburg, 2012.

Studien- / Seminararbeiten

- [Bor12b] M. Bornemann: Untersuchung der Datenschnittstelle zwischen Prozessmodulen und Prozessleitsystem im Kontext modularer Anlagen. Seminararbeit, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr, Instituts für Automatisierungstechnik, Hamburg, 2012.
- [Eng12b] B. Engelke: Datenmodelle im Engineering automatisierter Anlagen. Studienarbeit, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr, Instituts für Automatisierungstechnik, Hamburg, 2012.
- [Fri12b] A. Friedrich: Bewertung fachdisziplinübergreifender Vorgehensweisen und Modellierungskonzepte im Engineering automatisierter Anlagen. Studienarbeit, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr, Instituts für Automatisierungstechnik, Hamburg, 2012.
- [Kau13b] P. Kauth: Unterstützung der Automatisierung modularer verfahrenstechnischer Produktionsanlagen durch Integrationstechnologien komplexer Feldgeräte. Seminararbeit, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr, Instituts für Automatisierungstechnik, Hamburg, 2013.

Lebenslauf

Persönliches

Name: Thomas Holm

Geburtsdaten: 03.07.1979 in Eberswalde

Studium

- 09/2002 – 09/2006 Studium Maschinenbau mit dem Schwerpunkt Automatisierungstechnik und Robotik an der Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg
Abschluss: Dipl.-Ing.
- 02/2006 – 09/2006 Diplomand – University College London / University of London
- 03/2007 – 10/2011 Studium Wirtschaftswissenschaften mit dem Schwerpunkt Finanzwirtschaft an der FernUniversität in Hagen
Abschluss: B.Sc.

Beruf

- 07/1999 – 08/2002 Offiziersausbildung im Truppendienst des Heeres
- 09/2006 – 03/2009 Instandsetzungsoffizier im Logistikbataillon 51
- 04/2009 – 06/2011 Sachgebietsleiter in der Logistischen Steuerstelle 1
- 11/2011 – 08/2015 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg – Professur für Automatisierungstechnik
- seit 09/2015 Market Management bei Wago Kontakttechnik GmbH & Co.KG, Minden