

Methode zum Engineering von Produktionsanlagen durch Wiederverwendung von Modulen

DISSERTATION

zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

Diplom Wirtschaftsingenieur Philipp Walter Klein

eingereicht bei der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität Siegen

Siegen 2014

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Michael Weyrich

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Oec. Ulrich Stache

Tag der mündlichen Prüfung: 31.7.2014

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter von Prof. Dr.-Ing. Michael Weyrich am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Montage an der Universität Siegen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Weyrich danke ich für die kontinuierliche Begleitung meiner Forschungstätigkeit, für die vielfältigen Anregungen, die mit zu dieser Arbeit beigetragen haben, sowie für die Übernahme des Gutachtens.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Oec. Ulrich Stache danke ich für die Unterstützung im Rahmen des Doktorandenkolloquiums sowie bei formalen Fragen, und natürlich für die Übernahme des Gutachtens.

Mein Dank gilt ebenso Herrn Prof. Engel für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission und Herrn Prof. Lohe für seine Beteiligung als Mitglied der Promotionskommission.

Ich danke allen Kollegen des Lehrstuhls und allen Studenten, die die Anfertigung dieser Arbeit im Rahmen einer Abschlussarbeit oder als Hilfskraft am Lehrstuhl begleitet haben für Ihr großes Engagement und die vielfältigen, konstruktiven Hinweise. In diesem Zusammenhang gilt sicherlich mein besonderer Dank Herrn Ralph Kipping und Herrn Matthias Hemeke.

Mein besonderer Dank gilt ebenso Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Kötting und Herrn Martin Klein für die kritische Durchsicht des Manuskripts.

Für die große Unterstützung während meiner gesamten Ausbildung möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken.

Bei meiner Frau Eva-Maria bedanke ich mich in besonderem Maße für den Rückhalt sowie für ihre Geduld und ihr Verständnis, mit dem Sie die Entstehung dieser Arbeit unterstützt hat.

Siegburg, im Oktober 2014

Philipp Klein

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	VIII
Zusammenfassung	XII
Abstract.....	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Ziel der Arbeit	2
1.2 Motivierendes Beispiel	4
1.3 Aufbau und Struktur der Arbeit	6
2 Wiederverwendung von Modulen im Engineering von prozessspezifischen Produktionsanlagen	7
2.1 Wiederverwendung im Engineering	9
2.2 Prozessspezifische Produktionsanlage	10
2.3 Standardisierte Module aus Baukästen zur Beherrschung der Komplexität	11
2.4 Konsequenzen für die Wiederverwendung von Modulen im Engineering	18
2.4.1 Einordnung der Methode in das Engineering von Produktionsanlagen	19
2.4.2 Definition wissenschaftlicher Schwerpunkte dieser Arbeit	21
3 Stand der Technik	22
3.1 Aufbau der Wissensbasis und Definition von Modulen	23
3.1.1 Modularisierungsansätze	24
3.1.1.1 Auswahl der Modularisierungsmethode.....	30
3.1.1.2 Ansätze zur Weiterentwicklung der Methode DSM	33
3.1.2 Systematisierung von Modulen	37
3.1.3 Fazit - Aufbau der Wissensbasis und Definition von Modulen	39
3.2 Engineering neuer Anlagen	40
3.2.1 Vorgehen beim Engineering	41
3.2.1.1 Bewertung von Modulkombinationen	43
3.2.1.2 Bewertung der Eigenschaften von Modulen	44
3.2.1.3 Abbildung des Systemverhalten bei Modulkombinationen	51
3.2.2 Werkzeug im Engineering	53
3.2.3 Fazit – Engineering neuer Anlagen	57
3.3 Fazit - Stand der Technik	58
4 Anforderungen an eine Methode zur Wiederverwendung von Modulen im Engineering ...	59
4.1 Anforderungen an die Definition wiederverwendbarer Module.....	61

4.2	Anforderungen an die Auswahl von Modulen im Engineering neuer Anlagen	64
5	Methode zum Engineering von Produktionsanlagen durch Wiederverwendung von Modulen	66
5.1	Übersicht über die Methode	67
5.2	Veränderung im Engineering-Prozess	71
5.3	Aufbau der Wissensbasis	72
5.3.1	Methode zur Definition wiederverwendbarer Module	72
5.3.2	Maßnahmen zur Erhöhung der Wiederverwendbarkeit	76
5.3.2.1	Sortierung und Definition von Modulgrenzen	77
5.3.2.2	Prüfung der Wiederverwendbarkeit	78
5.3.2.3	Variation der Modulanzahl	79
5.3.2.4	Anpassung der Ausschlussmatrix	80
5.3.2.5	Aufteilung der verknüpfenden Komponenten	81
5.3.2.6	Multiple Matrizen	83
5.3.3	Systematisierung von Modulen in der Wissensbasis	84
5.4	Engineering neuer Anlagen	87
5.4.1	Auswahl von Modulkombinationen durch Funktionen und Eigenschaften	87
5.4.2	Technisch-wirtschaftliche Bewertung der Modulkombinationen	89
5.4.2.1	Bewertung der Modulkombination auf Basis der Aggregation von Nutzwerten	91
5.4.2.2	Ergänzende Absicherung der Modulauswahl durch Simulation	93
5.5	Zusammenfassung Methode	95
6	Implementierung der Methode als Softwarewerkzeug	96
6.1	Softwarewerkzeug zum Aufbau der Wissensbasis	97
6.2	Softwarewerkzeug zum Engineering neuer Produktionsanlagen	101
6.3	Struktur der Wissensbasis	103
6.4	Implementierung	105
7	Anwendung der Methode	107
7.1	Aufbau der Wissensbasis	107
7.1.1	Komponentenliste einer bestehenden Anlage	107
7.1.2	Modularisierung	108
7.1.3	Systematisierung der resultierenden Module und Speicherung in einer Wissensbasis	112
7.2	Engineering neuer Anlagen	115
7.2.1	Beschreibung des Produktionsprozesses und der Eigenschaften und Auswahl der funktionserfüllenden Module	115
7.2.2	Technisch wirtschaftliche Bewertung der Modulkombinationen und Absicherung der Konzepte durch Simulation	116
7.2.3	Auswahl des Moduls und Ausgestaltung der Anlage	117

7.3	Modularisierung einer bestehenden Prüfanlage und der Vergleich mit bestehenden Modulen.....	120
7.4	Erfahrungen aus der Anwendung der Methode im industriellen Umfeld	121
7.4.1	Aufbau der Wissensbasis	122
7.4.2	Engineering neuer Produktionsanlagen.....	124
8	Fazit und Ausblick	126
8.1	Problem und Ergebnisse	126
8.2	Fazit	127
8.3	Ausblick.....	128
9	Quellenangaben	130
9.1	Literaturverzeichnis	130
9.2	Internetquellen	143
Anhang	A
	Anhang A – MATLAB – Modell des Reserve Cuthill McKee-Algorithmus.....	A
	Anhang B - CPLEX-Modell des P-Median Modells.....	B
	Anhang C – Modularisierung der Beispielanlage zur Lebensmittelverarbeitung.....	C
	Anhang D – Modularisierung der Beispielanlage zur Qualitätssicherung von Verbindungselementen	F
	Anhang E – Ausgangsgrößen für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit für die Funktion „Handling“	J

Abkürzungsverzeichnis

Automation ML	Automation Markup Language
CAD	Computer Aided Design (rechnergestütztes Konstruieren)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMM	Domain Mapping Matrix
DSM	Design Structure Matrix
EPK	Ereignisgesteuerte Prozesskette
MBpBM	Mixed-Boolean pseudo-Boolean Model
MDM	Multi Domain Matrix
MFD	Modular Function Deployment
MIM	Modular Indication Matrix
NC	Numerical Control
OPL	Open Programming Language
PHP	PHP: Hypertext Preprocessor
PMM	P-Median Modell nach Kusiak
QFD	Quality Function Deployment
s. / S.	siehe / Seite
SPS/PLC	Speicherprogrammierbare Steuerung / Programmable Logic Controller
SysML	Systems Modeling Language
u.a.	unter anderem
UML	Unified Modeling Language
VBA	Visual Basic for Applications
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	Vergleiche
XML	Extensible Markup Language

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht zu den Zielen des Engineering durch Wiederverwendung von Modulen	3
Abbildung 2: Struktur und Aufbau der Arbeit	6
Abbildung 3: Projektabhängige und -unabhängige Tätigkeiten im Engineering von Prozessspezifischen Produktionsanlagen nach [FSM (2009) - S.81]	9
Abbildung 4: Beispielhafte Produktionsanlagen aus der Fertigung von Industriesteckvorrichtungen (Bildquelle: MENNEKES Elektrotechnik GmbH & Co. KG)	11
Abbildung 5: Ebenenbetrachtung des möglichen Detaillierungsgrads mechatronischer Module Prozessmodulen nach [LFW+ (2010)]	12
Abbildung 6: Konfiguration einer Produktionsanlage aus standardisierten Prozessmodulen nach [Vo (2009) – S.111; teamtechnik Maschinen und Anlagen GmbH]	13
Abbildung 7: Baukastensystematik nach Pahl et al. Prozessmodulen nach [PBF (2007) – S.664]	15
Abbildung 8: Die Produktarchitektur wird durch die Zerlegung in Unterfunktionen, die Zuordnung der Komponenten und durch eine Zusammenfassung zu Modulen ermöglicht Prozessmodulen - nach [Gö (1998); Metus (2013)].	17
Abbildung 9: Einordnung der Methode zum Engineering von Produktionsanlagen durch Wiederverwendung von Modulen	20
Abbildung 10: Notwendige Diagramme der SysML zur Beschreibung wiederverwendbarer Module (grau hinterlegt) nach [KKJ+(2013)]	22
Abbildung 11: DSM-Matrix nach Pimpler und Eppinger Prozessmodulen nach [PiEp (1994)]	25
Abbildung 12: Vorgehen bei der Modularisierung durch MFD Prozessmodulen nach [ErEr (1999) – S.30]	27
Abbildung 13: Modulbildung aufgrund eines dominanten Materialflusses Prozessmodulen nach [Sto (1997) – S.48]	28
Abbildung 14: Kriterien zur Bewertung der Modularisierungsansätze	31
Abbildung 15: Vorgehen zum Methodischen Entwickeln Prozessmodulen nach [VDI 2222]	42
Abbildung 16: Engineeringprozess nach der Methode Axiomatic Design Prozess nach [Su (1990)]	42
Abbildung 17: Informationen über eine Produktionsanlage bei der Angebotserstellung nach [RiRe (2010) – S.517]	44
Abbildung 18: Einordnung der Eigenschaften einer Produktionsanlage nach [Eh (2009) – S.29]	45
Abbildung 19: Einordnung der Methoden zur Kostenkalkulation nach Zirkler nach [Zi (2010) – S.116]	46
Abbildung 20: Simulation des Energieverbrauches einer Produktionsanlage mit der Systems Dynamics Software Vensim	53
Abbildung 21: Wiederverwendung von standardisierten Modulen im Engineering von Produktionsanlagen wird durch EPLAN Engineering-Center unterstützt nach [We (2010) – S.7]	54

Abbildung 22: Aufbau eines Objektes in AutomationML nach [Dr (2011) – S.46]	55
Abbildung 23: Daten eines Moduls werden aus verschiedenen Datenquellen zusammengefügt nach [MMW (2012)]	56
Abbildung 24: Unterschiede zwischen Massenprodukten und prozessspezifischen Produktionsanlagen sowie bislang bekannte Konfigurationsansätze – nach [BMU (2011) - S.43]	60
Abbildung 25: Zielkonflikt bei der Modularisierung hinsichtlich der Komplexität der Module	62
Abbildung 26: Informationsstruktur mechatronischer Module nach [LFW+ (2010)]	64
Abbildung 27: Vorgehensbeschreibung zum Aufbau der Wissensbasis (a) aus wiederverwendbaren Modulen und zum Engineering neuer Produktionsanlagen (b)	66
Abbildung 28: Engineeringkonzept von Modulbasierten Produktionsanlagen	68
Abbildung 29: Komponenten werden zu funktionserfüllenden mechatronischen Modulen zusammengefasst	69
Abbildung 30: Instanzen einer Ontologie	70
Abbildung 31: Vorgehensmodell bei der Entwicklung mechatronischer Systeme (rechts) und Änderungen des Detailprozesses „Systementwurf“ durch die Wiederverwendung von Modulen nach [VDI 2206]	71
Abbildung 32: Grundaufbau der Matrix zur Analyse der Abhängigkeiten zwischen Komponenten	72
Abbildung 33: Binäre Bewertung der Abhängigkeiten zwischen Komponenten	72
Abbildung 34: Ausgangsmatrix für die Modularisierung	73
Abbildung 35: Matrix nach der Sortierung der Spalten und Zeilen	73
Abbildung 36: Kennzeichnung der Module der Produktionsanlage	74
Abbildung 37: Entscheidung für die Aufnahme einer neuen Komponente in das Modul	75
Abbildung 38: Verknüpfungen zwischen Modulen	75
Abbildung 39: Iteratives Vorgehen zur Optimierung der Wiederverwendbarkeit der Module	76
Abbildung 40: Beispiel einer Komponentenmatrix als Ausgangspunkt für die Sortierung	77
Abbildung 41: Ähnlichkeitsmatrix der Komponentenmatrix nach Kusiak	77
Abbildung 42: Sortierte Komponentenmatrix mit den Modulen	78
Abbildung 43: Variation der Anzahl der Module einer Matrix	79
Abbildung 44: Sortierung derselben Matrix vor (Matrix I - oben) und nach (Matrix II - unten) einer Änderung der Ausschlussmatrix	81
Abbildung 45: Aufteilung verknüpfender Komponenten führt zu dezentralen, autarken Modulen Bildquelle [WeKl (2012c)]	82
Abbildung 46: Sortierung derselben Matrix vor (Matrix I - oben) und nach (Matrix II - unten) der Aufteilung einer verknüpfenden Komponente	82

Abbildung 47: Identifikation von wiederkehrenden Modulen in mehreren Produktionsanlagen - Bildquelle [WeK1 (2012a), WeK1 (2012b), WeK1 (2012c)].....	83
Abbildung 48: Vorgehen beim Aufbau der Wissensbasis zur Einbindung der Wiederverwendung in das Engineering	84
Abbildung 49: Module werden einer oder mehreren Funktionen zugeordnet	85
Abbildung 50: Hierarchische Struktur der Funktionen	86
Abbildung 51: Module werden einer oder mehreren Eigenschaften zugeordnet	87
Abbildung 52: Vorgehen beim Engineering neuer Produktionsanlagen	88
Abbildung 53: Resultierende Modulkombinationen auf Basis der Funktionszuordnung	88
Abbildung 54: Resultierende Modulkombinationen nach der Eingrenzung durch Eigenschaften ..	89
Abbildung 55: Ergänzendes Vorgehen beim Aufbau der Wissensbasis und beim Engineering neuer Produktionsanlagen zur technisch-wirtschaftlichen Bewertung der Konzeptvarianten	90
Abbildung 56: Übersicht der eingesetzten Bewertungsmethoden	91
Abbildung 57: Aggregation zu einem Nutzwert für eine Funktion	93
Abbildung 58: Resultierende Modulkombinationen nach der technisch-wirtschaftlichen Bewertung.....	93
Abbildung 59: Mögliche Simulationswerkzeuge zur Absicherung der Bewertung	94
Abbildung 60: Ergänzung der wiederzuverwenden Daten um Simulationsmodelle etc.....	94
Abbildung 61: Integration des Softwarewerkzeuges in das Engineering-Konzept	96
Abbildung 62: Modularisierungstool des Anlagenkonfigurators	98
Abbildung 63: Modularisierte Komponentenmatrix.....	99
Abbildung 64: Eingabemaske zur Bearbeitung der Funktionen und Eigenschaften des Moduls ..	100
Abbildung 65: Modellierung eines Produktionsprozesses	101
Abbildung 66: Bewertung der Module und Auswahl der nötigen Eigenschaften	102
Abbildung 67: Ergebnisdarstellung der optimalen Module für den modellierten Prozess	103
Abbildung 68: Struktur der Datenbank des Anlagenkonfigurators	104
Abbildung 69: Client-Server Architektur nach [Hi (2005)]	105
Abbildung 70: Beispielhafte Produktionsanlagen aus der Lebensmittel verarbeitenden Industrie	108
Abbildung 71: Anwendung des Softwarewerkzeuges zur Modularisierung der Anlage	109
Abbildung 72: Bewertung des Modularisierungsergebnisses.....	110
Abbildung 73: Zuordnung der Module zu den Funktionen der Prozessbeschreibung.....	113
Abbildung 74: Zuordnung der Module zu den Eigenschaften der Produktionsanlage	113
Abbildung 75: Speicherung der Module in der Datenbank	114

Abbildung 76: Alternative Module für den Beispielprozess	115
Abbildung 77: Bewertung der Module für die Funktion Handling.....	116
Abbildung 78: Auswahl eines passenden Moduls zu Bearbeitung der Fehlstellen an der Beispielanlage	117
Abbildung 79: Prozessbeschreibung der Produktionsanlage	118
Abbildung 80: Auswahl der Module	119
Abbildung 81: Prototypischer Aufbau der Beispielanlage	120
Abbildung 82: Veränderungen durch die Methode zum Aufbau der Wissensbasis und zum Engineering neuer Produktionsanlagen	120
Abbildung 83: Beispielanlage zur Inspektion rotationssymmetrischer Bauteile	121
Abbildung 84: Komponentenmatrix der Modularisierung	123
Abbildung 85: Prozessmodellierung einer industriellen Beispielanlage	125
Abbildung 86: Vision des Engineering auf Knopfdruck.....	129

Zusammenfassung

Anlagenbauer und -betreiber unterliegen heute einem zunehmenden Wettbewerbsdruck, der zur Folge hat, dass die Effizienz in allen Unternehmensbereichen gesteigert werden soll. Die Wiederverwendung von Modulen und dem dazugehörigen Wissen ermöglicht die Steigerung der Effizienz und die Beherrschung der Komplexität im Engineering und auch in der Fertigung von komplexen und variantenreichen Produkten. Der Ansatz der Wiederverwendung ausdetaillierter Module aus Baukästen lässt sich bislang allerdings nur bedingt auf Produktionsanlagen wie Montagelinien übertragen, die spezifisch auf den Anforderungen und Prozesse des Anlagenbetreibers angepasst sind, da die notwendige Standardisierung beispielsweise für die Definition von Modulschnittstellen für diese Systeme sehr aufwändig ist. Die Herausforderung bei der Wiederverwendung von Modulen in solchen Produktionsanlagen liegt darin, Module zu identifizieren, die so klein sind, dass sie in verschiedenen Anlagen wiederverwandt werden können, und die so groß sind, dass sie dem Entwickler einen Mehrwert gegenüber der Wiederverwendung von Komponenten bieten.

Um dieser Herausforderung gerecht zu werden, wird im Rahmen dieser Arbeit eine Methode vorgestellt werden, die Entwickler bei der Identifikation von Modulen unterstützt und die die Wiederverwendung in den frühen Phasen des Engineering – also in der Konzeption einer Anlage – ermöglicht. Dazu wird ein methodisches Vorgehen entwickelt und in einer Software implementiert. Die Methode ermöglicht es dem Entwickler, wiederverwendbare Module in bestehenden Produktionsanlagen zu identifizieren. Dazu wird ein matrixbasierter Ansatz in Kombination mit Sortieralgorithmen und Bewertungskriterien genutzt. Zusätzlich werden diese Module durch Eigenschaften und Funktionen systematisiert und in einer Wissensbasis abgespeichert. Dadurch wird es ermöglicht, im Engineering neuer Produktionsanlagen Modulkombinationen durch eine Prozessbeschreibung mit Funktionen zu erstellen und durch die Vorgabe von Eigenschaften relevante Kombinationen einzugrenzen. In einem weiteren Schritt werden die Module bewertet und damit die Modulkombinationen priorisiert. Dazu wird ein aggregierter Nutzwert aus Kosten, Produktivität, Energieverbrauch und Auslastung für die Modulkombination gebildet. Durch statistische Verfahren oder Simulation ist es möglich, diese Bewertungen an die Anforderungen an eine neue Produktionsanlage anzupassen. Um den Entwickler bei der Anwendung der Methode zu unterstützen, wurde die Methode in einem Softwarewerkzeug abgebildet und in der industriellen Praxis erprobt.

Die vorgestellte Methode eignet sich insbesondere für Hersteller und Betreiber prozessspezifischer Produktionsanlagen, die das Wissen über diese Anlagen im Engineering neuer oder im Reengineering bestehender Anlagen wiederverwenden wollen. Die Methode unterstützt sie nicht nur bei der Modulidentifikation und bei der Systematisierung des Wissens, sondern auch in der Bereitstellung während der Konzeptionsphase. Im Engineering wird neben der Auswahl einer geeigneten Modulkombination auch eine Bewertung vorgenommen, die in weiterführenden Schritten wie der Angebotserstellung genutzt werden kann. Der Nutzen der Wiederverwendung von Wissen wird durch die Bereitstellung von Daten zu den Modulen erhöht.

Abstract

Industrial machine manufacturers and operating companies are subject to an increasing competition nowadays. This results in the pursuit of greater efficiency and effectiveness in all areas of the company. The reuse of modules and the related knowledge allows increasing the efficiency and managing the complexity in engineering and in the production of complex products with many variants. The approach of reusing modules from modular systems, which are described in all details, can be transmitted only partially on production systems such as assembly lines so far. These systems are specifically adapted to the requirements and processes of the operator of the production system. This is mainly due to the standardization effort for example for the definition of module interfaces for these systems. The challenge of reuse of modules in such a production system is to identify modules which are small enough that they can be reused in different systems, and which are large enough that they offer the developer an added value, compared to the reuse of components.

In this thesis, a method will be presented in order to meet this challenge. This method supports the engineer in the identification of modules, and it facilitates the reuse in the early stages of engineering or, more specifically, in the conception of a system. For this, a methodology is developed and implemented as software. The method allows the developer to identify reusable modules into existing production systems. For this purpose, a matrix-based approach is used in combination with sorting algorithms and evaluation criteria. In addition, these modules are systematized by features and functions and stored in a knowledge base. Thus, it is possible to create combinations of modules through a process description with functions in the engineering of new production and to limit the selection to relevant combinations by specifying properties. In a further step, the modules are assessed and thus the module combinations are prioritized. For this purpose, an aggregate utility value of cost, productivity, energy consumption and utilization is formed for the module combination. It is possible through statistical methods or simulation to adapt these assessments to the requirements of a new production system. The method is implemented in a software tool to assist the developer in the application of the method and tested in the industrial practice.

The method is particularly suitable for manufacturers and operators of process-specific production system, who want to reuse the knowledge of these systems in the engineering of new systems or the adaption of existing systems. The method supports the user not only in the identification of modules and in the systematization of knowledge, but also in the provision of knowledge during the conceptual design phase. In addition to choosing a suitable combination of modules an assessment is carried out in engineering, which can be used in further steps, such as the quotation. The benefits of reuse of knowledge are increased by the provision of data of the modules. Due to this this knowledge can be reused not only for the modules, the interfaces and the assessment, but also on first drafts, documentation, simulation models etc..

1 Einleitung

Genauso wie Produkte immer individualisierter auf die Bedürfnisse von Kunden angepasst werden, um im globalen Wettbewerb erfolgreich zu sein, müssen auch Produktionsanlagen einerseits flexibel, andererseits aber auch spezifisch an die Prozesse des Anlagenbetreibers angepasst werden. Daraus ergeben sich neue Herausforderungen beziehungsweise Anforderungen an die Entwicklungsprozesse von Produktionsanlagen, da die Zyklen, in denen Anlagen neu geplant oder angepasst werden, immer kürzer werden. Diesem Wandel wird auch durch die Verwendung des Begriffes *Engineering* Rechnung getragen, der in Abgrenzung vom Begriff *Entwicklung* nicht auf standardisierte Massenprodukte sondern auf prozessspezifische Systeme in kleinen Stückzahlen abzielt.

Ein Ansatz, die Komplexität bei der Entwicklung von individualisierten, variantenreichen Produkten zu beherrschen und die Effizienz des Entwicklungsprozesses zu steigern, ist die Wiederverwendung von Modulen, Komponenten oder Wissen durch die Methoden des Variantenmanagements. Heutzutage werden allerdings prozessspezifische Produktionsanlagen im Rahmen von Engineering-Projekten als unikale Anlage spezifisch entwickelt. Die Wiederverwendung von Wissen hängt stark von der Erfahrung des Entwicklers ab. Erfahrene Entwickler können auf vorhandene Lösungen aus vorherigen Projekten zurückgreifen und müssen diese lediglich anpassen. Da die Lösungen aus diesen Projekten meist nicht in der Form aufbereitet sind, dass sie für eine Wiederverwendung gedacht sind, können hier auch leicht fehlerhafte Komponenten oder Daten kopiert werden bzw. es können ungewollte Abhängigkeiten zwischen den Komponenten herrschen. Unerfahrene Entwickler arbeiten ggfs. Lösungen aus, die bereits eingesetzt wurden, oder sie nutzen Daten aus vorherigen Lösungen ohne Kenntnisse über die Rahmenbedingungen oder die Qualität der Lösung zu haben.

Ansätze des Variantenmanagements wie die Nutzung von Baureihen, Baukästen, Plattformen und Modularisierung finden sich daher bislang in der variantenreichen Serienproduktion. Ein prominentes Beispiel zur Produktdifferenzierung ist der modulare Querbaukasten des VW-Konzerns, der variantenreiche Produkte auf Basis von Plattformen ermöglicht. Martin Winterkorn, der Vorstandsvorsitzende des VW-Konzerns, sagt zur Bedeutung der Plattformstrategie für sein Unternehmen:

„Ohne solche Strategien sind Sie heute in der Automobilindustrie nicht mehr wettbewerbsfähig. Unsere modularen Baukästen reduzieren Kosten, Produktions- und Entwicklungszeit und ermöglichen uns eine noch größere Vielfalt bei Modellen und Technologien.“ [Automobilwoche (2011)]

Durch den Einsatz des modularen Querbaukasten sollen über vierzig Modelle der Marken des Konzerns auf Basis einer Plattform entwickelt und produziert werden. Dadurch ist es möglich, Module, Komponenten und Wissen über die Produkte zu übertragen und gleichzeitig die Produkte durch unterschiedliche Ausstattung und Optik zu differenzieren. Die „Übertragung des Baukastenprinzips auf die Produktion [...] [sieht Winterkorn als] den nächsten logischen Schritt“ [VW-Jahrespressekonferenz (2012)]. Im Gegensatz dazu beschreibt Verl die Situation im Maschinen- und Anlagenbau folgendermaßen:

„Die Chancen, die strategisches Variantenmanagement, Modularisierung und ausgefeilte Baukastensysteme bieten, werden nicht genutzt. Erfahrungen und Wissen aus einem Projekt werden nicht für die nächsten Aufgaben zur Verfügung gestellt.“ [Ve(2012) – S.16]

Gründe hierfür liegen in den in der Regel niedrigeren Stückzahlen, der höheren Komplexität und dem höheren Grad an Individualität der Produktionsanlage durch die Anpassung an einen spezifischen Produktionsprozess. Die Hauptursachen für diese Individualität bzw. die Vielfalt sind die Anforderungen der Kunden an das Produkt oder die Produktionsanlage [Hi (2011)]. Dieser externen Ursache kann mit standardisierten Modulen nur dadurch begegnet werden, dass der Kundenwunsch nur teilweise erfüllt wird und somit ggfs. kein Auftrag erteilt wird. Versteht sich ein Unternehmen als System- und Lösungslieferant, der sich durch kundenindividuelle Lösungen in Nischenmärkten differenziert, ist die Standardisierung von Modulen keine optimale Lösung, da der Standardisierungsaufwand (bspw. zur Definition von Schnittstellen) den Nutzen übersteigt. Interne Ursachen für die Vielfalt liegen in der schleichenden Variantengenerierung aufgrund mangelnder Systematisierung im Unternehmen, dem fehlenden Bewusstsein und fehlenden Methoden [Hi (2011)]. Diesen internen Ursachen kann durch geeignete Hilfsmittel und Methoden, die die Wiederverwendung von Modulen, Komponenten und Wissen im Engineering ermöglichen, begegnet werden.

Neben der Beherrschung der Komplexität, die sich aus der internen und externen Vielfalt der Produktionsanlagen ergibt, liegt ein wesentlicher weiterer Nutzen der Methoden der Modularisierung in der Steigerung der Effizienz des Engineering. Standardisierte Massenprodukte können durch Konfiguratoren, die das Wissen und die Erfahrung früherer Produkte in Form von Modulen bereits stellen, schnell geplant und durch produktionsbezogene Maßnahmen, wie die Verwendung von Gleichteilen, effizient hergestellt werden. Die Erfahrungen und das Wissen, das wiederverwandt wird, entsprechen nicht nur der Dokumentation von Modulen, sondern auch den Kombinationsmöglichkeiten und Effekten auf das Produkt. Zudem ermöglichen Konfiguratoren eine Bewertung der Kosten und der Leistung des Produktes früh im Entwicklungsprozess. Durch die Wiederverwendung werden sich wiederholende Tätigkeiten in der Entwicklung, aber auch in anderen Abteilungen wie dem Vertrieb, vermieden, so dass der Entwickler Kapazitäten für kreative Problemlösungen etc. hat. Für prozessspezifische Produktionsanlagen, für die keine Standardisierung möglich ist, existiert derzeit keine Methode bzw. kein Werkzeug, die Wissen und Erfahrung systematisch bereitstellt. Um Wissen durch die Wiederverwendung von Modulen zu integrieren, müssen geeignete Module identifiziert und systematisiert werden.

1.1 Ziel der Arbeit

Produktionsanlagen werden wie beschrieben aufgrund interner und externer Einflüsse immer wieder verändert. Solche Einflüsse können neue Technologien, neue Produkte oder Produktänderungen etc. sein. Die Beantwortung der Frage, ob neue Produktionsanlagen entwickelt werden müssen bzw. welche Veränderungen an bestehenden Anlagen aufgrund dieser Einflüsse notwendig sind, resultiert in neuen Anlagenkonzepten. Um diese neuen Anlagenkonzepte effizienter zu erstellen, können Module, die Funktionen im abzubildenden Produktionsprozess übernehmen, wiederverwandt werden. Bestehende Anlagen können durch

den Austausch einzelner Module an die aus den Einflüssen resultierenden Anforderungen angepasst werden. Für neue Produktionsanlagen werden Module aus einer Wissensbasis ausgewählt.

Aus der einleitend beschriebenen Ausgangssituation und dem Fehlen einer einheitlichen Methode zum Variantenmanagement von prozessspezifischen Produktionsanlagen lässt sich das Ziel der vorliegenden Arbeit ableiten:

die Entwicklung einer Methode, die die Wiederverwendung von Modulen im Engineering prozessspezifischer Produktionsanlagen ermöglicht.

Dieses Ziel lässt sich in zwei Teilaspekte aufteilen:

- I. Aufbau einer Wissensbasis
Die Entwickler müssen bei der Definition und Systematisierung von Modulen methodisch unterstützt werden, so dass die Module in neuen Produktionsanlagen wiederverwandt werden können.
- II. Engineering von Produktionsanlagen
Die Wiederverwendung von Modulen soll in bestehende Prozesse bei den Anwendern integriert werden. Der Anwender soll bei der Auswahl geeigneter Module unterstützt werden, um nicht nur eine funktionale, sondern eine mögliche optimale Modulkombination zu identifizieren.

Diese Teilaspekte sollen im Rahmen der vorliegenden Arbeit methodisch und auch in Form eines Softwarewerkzeuges umgesetzt werden.

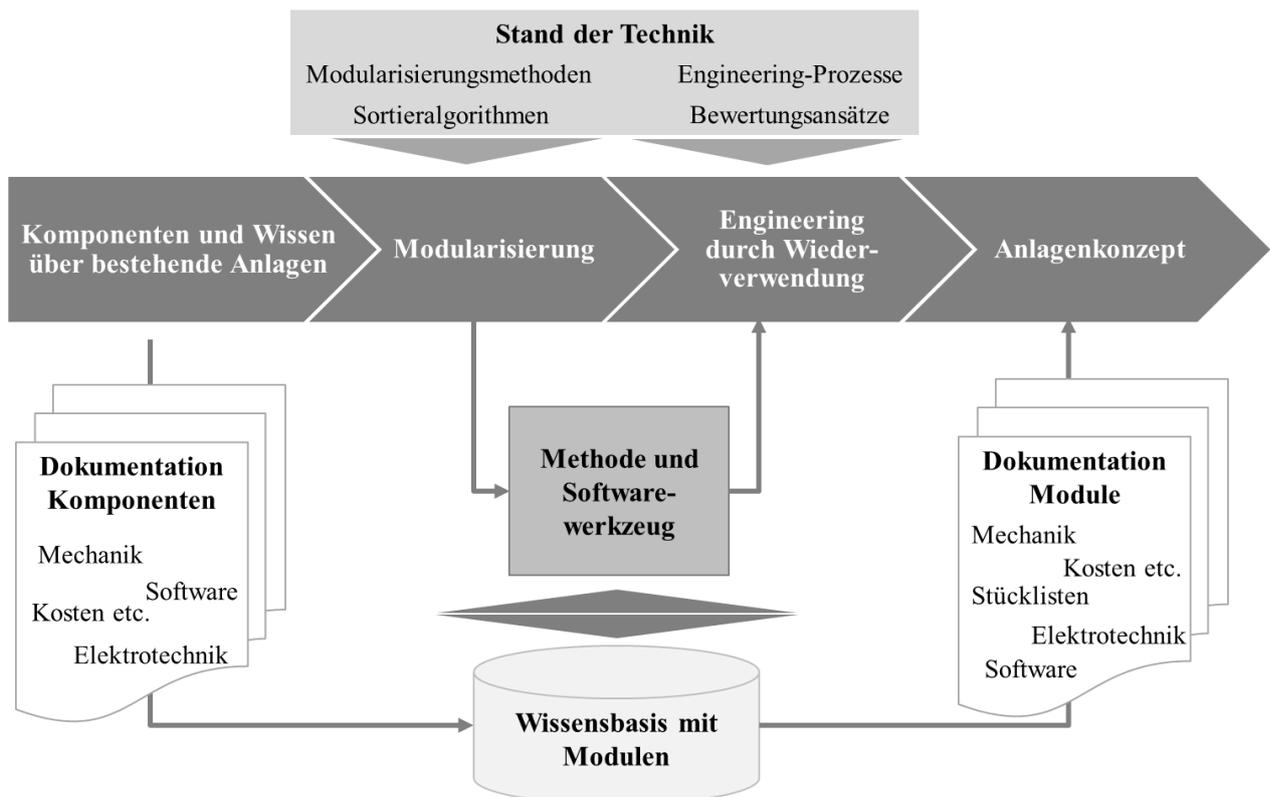


Abbildung 1: Übersicht zu den Zielen des Engineering durch Wiederverwendung von Modulen

Abbildung 1 zeigt eine Übersicht zu den Zielen des Engineering durch die Wiederverwendung von Modulen. Das Ziel ist es, das Wissen über Komponenten aus bestehenden Produktionsanlagen und die dazugehörigen Dokumentation in Form von Zeichnungen etc. im Engineering neuer Produktionsanlagen wiederzuverwenden. Das Wissen über die Komponenten und die Zusammenhänge der Komponenten untereinander sollen durch die Methode so strukturiert werden, dass eine Wiederverwendung der Informationen für die Entwicklung neuer Anlagen möglich ist. Dazu werden die Komponenten (z.B. Objekte der Stückliste) und Informationen zu funktionserfüllenden, mechatronischen Modulen zusammengefasst, die in einer Wissensbasis gespeichert und im Engineering aus ihr abgerufen werden können.

Im Gegensatz zu den Produktkonfiguratoren ist das Ziel des Engineering von Produktionsanlagen auf Basis der Wiederverwendung von Modulen nicht der finale Entwurf, der in der Fertigung umgesetzt werden muss, sondern die Erstellung eines Anlagenkonzeptes, das in nachfolgenden Engineering-Phasen ausgestaltet bzw. an die prozessspezifischen Anforderungen des Betreibers angepasst wird. Die Methode soll den Entwickler einerseits beim Aufbau einer Wissensbasis und andererseits bei der Auswahl passender Module aus einer Wissensbasis unterstützen. Dabei zielt die Methode auf eine Unterstützung der Planung beim Anlagenbauer aber auch auf entsprechende, planerische Tätigkeiten beim Betreiber ab. Die Anwender der Methode sollen – nachdem sie eine Anlage konzipiert und ausgestaltet haben – das Wissen strukturiert für weitere Engineeringprojekte bereitstellen können. Neben der gesteigerten Effizienz, dadurch dass Lösungen nicht mehrfach konzipiert werden, liegt ein weiterer Vorteil darin, dass aufgrund der Modularisierung bestehender Anlagen die Lösungen bereits in der Wissensbasis in der Praxis eingesetzt wurden. Daher ist davon auszugehen, dass diese zwar nicht fehlerfrei, zumindest aber weniger fehlerhaft sind, als der erste Entwurf eines Entwicklers.

1.2 Motivierendes Beispiel

Zielgruppen, der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methode, sind sowohl der Maschinen- und Anlagenbau als auch die produzierende Industrie, also die Anlagenbetreiber mit einer eigenen Produktionsprozessplanung. In Abgrenzung zu den bekannten Methoden der Optimierung der Produktarchitektur bzw. des Variantenmanagements fokussiert diese Arbeit nicht die Maschinenbauer bzw. -betreiber, die Standardmaschinen entwickeln oder betreiben, sondern diejenigen, die Maschinen nach Kundenspezifikation fertigen und benötigen. Laut einer Studie von Kleinaltenkamp und Plinke beträgt der Anteil der Firmen des Maschinenbaus, die Maschinen nach Kundenspezifikation entwickeln und fertigen bei 59,5% [KIPI (2000), Ba (2007)]. Ein Viertel der Unternehmen fertigt Maschinen in verschiedenen Varianten und die verbleibenden ca. 15 % verkaufen Standardmaschinen. Die Mehrheit des deutschen Maschinenbaus entwickelt also kundenspezifische Lösungen und verkauft keine Standardmaschine.

In einer aktuellen Marktstudie, die fachlich vom Arbeitskreis Steuerungstechnik des VDMA unterstützt wurde, gaben 52,6% der 359 befragten Maschinenbauer an, dass die Wiederverwendung von Engineering-Prozessen derzeit am wichtigsten für sie sei. Die Modularisierung ist für immerhin 41,8% der Unternehmen derzeit am wichtigsten [Marktstudie (2012) – Unternehmen konnte bis zu drei Antworten geben]. Wiederverwendung und Modularisierung sind somit bedeutende Themen für den Maschinen- und Anlagenbau. Gerade

für den Bereich der prozessspezifischen Anlagen fehlen in der Praxis aber bislang geeignete Methoden [Po (2010)].

Wollen diese Unternehmen Wissen über bereits entwickelte Anlagen wiederverwenden, können sie einerseits die Methoden des Variantenmanagements einsetzen. Durch Standardisierung ihrer Maschinen und durch die Definition von Schnittstellen zwischen Modulen schränken die Unternehmen das angebotene Lösungsspektrum ein. Ist dies am Markt durchzusetzen, kann das Unternehmen mit der Fertigung variantenreicher Maschinen effizient und erfolgreich sein. Gerade in Zeiten eines zunehmenden, globalen Wettbewerbs gibt es aber auch Unternehmen, die kundenspezifische Lösungen und Produktionsanlagen in all ihrer Komplexität anbieten müssen, um am Markt erfolgreich zu sein. Diese Anlagenbauer bzw. die Produktionsprozessplanung ihrer Kunden der Anlagenbetreiber stehen im Fokus dieser Arbeit.

Klassisches Beispiel für die variantenreiche Serienproduktion ist die Automobilindustrie. Kunden können hier zwischen verschiedenen Varianten (Ausstattung, Antrieb, etc.) wählen. Diese Varianten werden in verschiedenen Modulen abgebildet. Der Kunde kann die Variante oder das Modul „Automatikgetriebe“ wählen, solange es über eine definierte Schnittstelle mit dem restlichen Antriebstrang bzw. den Bedienelementen im Cockpit verbunden werden kann.

Im Gegensatz dazu sind die Variantenvielfalt, die Komplexität und damit der Aufwand der Standardisierung im Maschinenbau deutlich größer. Daher finden die Methoden des Variantenmanagements bislang kaum Einsatz. Spiegelberger, der in seiner Arbeit den Reifegrad von mechatronischen Entwicklungsprozessen untersucht, sieht die systematische Einbindung der Wiederverwendung bzw. das Management von Konfigurationen in die Entwicklungsprozesse mechatronischer Produkte als ein wichtiges Kriterium. Seiner Umfrage unter jeweils 5-10 Mitarbeitern in 50 kleinen und mittelständischen Unternehmen zufolge ist das Konfigurationsmanagement für Produkte bislang nur „teilweise beherrscht“ [Sp (2010) – S.78]. Dies lässt die Annahme zu, dass die Varianz mit steigender Komplexität von Produkten hin zu Produktionsanlagen schlechter beherrscht wird. Industrie und Wissenschaft sehen die Gründe dafür im Fehlen geeigneter Methoden und Werkzeuge, u.a. für die Definition von Modulen sowie für die Beschreibung zur Wiederverwendung der Module im Engineering Prozess [UDKO (2012), [Po(2010)].

Im Rahmen dieser Arbeit soll das Problem der Wiederverwendung von Modulen im Engineering an industriellen Beispielen von Anlagenbetreibern erläutert werden. Deren automatisierte Produktionsanlagen werden für die Serienproduktion von Bauteilen bspw. für die Automobilindustrie eingesetzt. Die Anlagenkonzepte müssen aufgrund neuer Produkte bzw. neuer Anforderungen an die Produkte immer wieder angepasst und verändert werden. Bei der Angebotserstellung für das Serienbauteil müssen bereits in einem sehr frühen Stadium des Engineering-Prozess Informationen über die Kosten, die Produktivität etc. der Produktionsanlage vorhanden sein. Diese Informationen basieren aktuell meist auf Erfahrungswerten und sind mit entsprechenden Unschärfen bzw. Sicherheiten versehen. Kann das Lösungskonzept bereits in kurzer Zeit auf Basis vorhandener Informationen zu bestehenden Anlagen konfiguriert werden, steigt nicht nur die Informationsgenauigkeit in der Angebotsphase sondern vor allem auch die Effizienz, da passende Informationen nicht gesucht werden müssen, sondern bereit gestellt werden.

1.3 Aufbau und Struktur der Arbeit

Die Struktur der Arbeit ist in Abbildung 2 visualisiert. Nachdem in der Einleitung (Kapitel 1) die Ausgangssituation, das Ziel und die Zielgruppe der Arbeit beschrieben wurden, wird in Kapitel 2 die Motivation für das Engineering auf Basis der Wiederverwendung von Modulen beschrieben. Dazu wird auf die Wiederverwendung im Engineering, die Besonderheiten prozessspezifischer Produktionsanlagen sowie standardisierte Module und Baukästen eingegangen. In Kapitel 3 folgt der Stand der Technik für das allgemeine Vorgehen und die Teilbereiche im Speziellen, wobei ein kurzes Fazit zu bestehenden Ansätzen und notwendige Weiterentwicklungen aus der Sicht dieser Arbeit dargestellt werden.



Abbildung 2: Struktur und Aufbau der Arbeit

In Kapitel 4 werden die Anforderungen an die Methode abgeleitet. Aufbauend auf diesen Anforderungen wird in Kapitel 5 eine Methode dargestellt, die das Vorgehen für die zwei Teilstufen

- Aufbau der Wissensbasis
- Engineering von Produktionsanlagen

beschreibt und ein übergeordnetes Vorgehen integriert. Diese Methode wird anschließend in eine Software überführt (Kapitel 6), die den Entwickler von Produktionsanlagen unterstützen soll. Im Anschluss wird in Kapitel 7 die Erfüllung der Anforderungen durch die Anwendung der Methode abgesichert. Abschließend wird in Kapitel 8 ein Fazit der Arbeit gezogen und ein Ausblick auf weiterführende Forschungsthemen gegeben.

2 Wiederverwendung von Modulen im Engineering von prozessspezifischen Produktionsanlagen

Das Engineering von Produktionsanlagen kann durch die Lösung bestehender Herausforderungen aus der Industrie und Wissenschaft optimiert werden. Den technologischen Entwicklungen beispielweise im Bereich der Mechatronik muss im Engineering ebenso Rechnung getragen werden wie dem gestiegenen Wettbewerb, aus dem sich der Druck nach zeitlicher und finanzieller Effizienz ableiten lässt. Aus der Vielzahl an Optimierungsmöglichkeiten formulierte der Berliner Kreis (heute: Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktentwicklung – WiGeP) 2007 verschiedene „Innovationspotenziale in der Produktentwicklung“ [KFG (2007)], von denen für die vorliegende Arbeit vor allem folgende von Bedeutung sind:

- a. Steigende Komplexität im Engineering beherrschen [KFG (2007) – S.3-33]
- b. In frühen Phasen des Engineering Aufgabenstellungen klären und aussichtsreiche Produktkonzepte erarbeiten [KFG (2007) – S.89-106]
- c. Vielfalt bei individualisierten Produkten durch entsprechende Prozesse im Engineering, Produktion etc. ermöglichen [KFG (2007) – S.107-115]

In allen drei Themen spielen laut Krause et al. Module und deren Wiederverwendung eine Rolle. Im Thema der Beherrschung der Komplexität (a.) sollen Module die Produktion in sinnvolle Teilschritte untergliedern. Eine wichtige Maßnahme ist es laut Krause et al. die „Prozesskette/-netz bereits während [der] Produktentwicklung detailliert [zu] planen, schrittweise [zu] erzeugen und am Prozessende [zu] vervollständigen“ [KFG (2007) – S.22]. Für die Klärung der Aufgabenstellung und für die Erarbeitung aussichtsreicher Produktkonzepte in den frühen Phasen des Engineering (b.) erwarten die Vertreter des Berliner Kreises die Nutzung von „Konzeptmodule[n]“ [KFG (2007) – S.104]. Bei der Verwendung von Modulen, um individualisierte Produkte zu realisieren (c.), sehen Krause et al. mit Verweis auf Piller [Pi(2006)] Probleme in der starken Standardisierung der Module:

„Individualisierte Produkte weisen gegenüber variantenreichen Serienprodukten eine Struktur auf, die neben standardisierten und konfigurierbaren Modulen auch vollständig individuelle Komponenten bzw. Bereiche enthält.“ [KFG (2007) – S.109]

Um die Komplexität durch eine Untergliederung der Produktion in Teilschritte zu beherrschen und bereits in den konzipierenden, frühen Phasen aussichtsreiche Konzepte auszuwählen, sollen also Module eingesetzt werden. Um individualisierte Produkte und prozessspezifische Produktionsanlagen zu ermöglichen, sollen diese allerdings nicht wie in der variantenreichen Serienproduktion stark standardisiert sein, sondern vielmehr Flexibilität zur individuellen Anpassung ermöglichen.

El Maraghy et al. sehen in ihrem Überblick über das Thema „Komplexitätsmanagement in Engineering und Fertigung“ ebenso den Nutzen der Komplexität als möglichen Wettbewerbsvorteil. Analog zur Realisierung individualisierter Produkte (c.) zielen sie daher nicht ausschließlich auf die Minderung der negativen Folgen der Komplexität durch Standardisierung, sondern auf eine Beherrschung ab [EETM (2012) – S.811]. Dieses Problem der Entscheidung zwischen individualisierten Produkten und standardisierten Produktionsprozessen beschreiben auch Schuh et al. [SBB+ (2011)]. Um flexibel auf

unterschiedliche Anforderungen an Produktionsanlagen reagieren zu können, sollten diese laut einer Umfrage von Merhabi et al. rekonfigurierbar sein [MUKH (2002)]. Als eine wichtige Technologie dafür wird der modulare Aufbau von Maschinen beschrieben. In weiteren Arbeiten wird die Rekonfiguration nicht nur für Produkte oder Produktionsanlagen, sondern auch für Betriebsmittel beschrieben [KRZ (2012)].

Beispiele für die Modularisierung von Produkten und Produktionsanlagen finden sich in unterschiedlichen Bereichen der Praxis: standardisierte Produkte wie etwa der Modulare Querbaukasten im Automobilbereich [Web (2012)], eine Plattform für Windkraftanlagen [It (2013)] oder auch modulare, standardisierte Produktionsanlagen zur Montage [Vo (2009), TEAMOS (2013)]. Der Nutzen solcher Standardisierungen bzw. die Auswirkungen einer zu hohen Variantenvielfalt sind im Rahmen des Variantenmanagements u.a. von Franke et al. hinreichend beschrieben [FHFF (2002)]. Hervorzuhebende Auswirkungen vor dem Hintergrund des Engineering von Produktionsanlagen durch Wiederverwendung von Modulen sind [FHFF (2002)]:

- Aufwand durch Neukonstruktion bzw. Änderungskonstruktion der Varianten
- Erhöhtes Fehlerrisiko in den Phasen des Engineering-Prozess (bspw. durch komplexe Preisgestaltung bei der Erstellung von Angeboten, sich wiederholende Tätigkeiten)
- Aufwand durch die Erstellung und Verwaltung technischer und wirtschaftlicher Unterlagen

Diesem Nutzen durch Standardisierung steht im Engineering individualisierter Produkte und prozessspezifischer Produktionsanlagen die Forderung nach der Beherrschung der Komplexität und der Ermöglichung der Vielfalt gegenüber [KFG (2007)]. In der Industrie werden die Anforderungen an das Engineering solcher prozessspezifischer Systemlösungen, welche nur ein geringes Maß an Standardisierung zulassen, häufig durch die Beschreibung Stückzahl „1“ charakterisiert. Um dieser Unterscheidung Rechnung zu tragen, wird im Rahmen dieser Arbeit auch vom Engineering (geringe Stückzahl, individuell bzw. prozessspezifisch) in Abgrenzung zur Produktentwicklung (hohes Stückzahl, standardisiert) gesprochen. Der Begriff der Entwicklung ist nach VDI Richtlinie 2221, wie folgt definiert:

„Zweckgerichtetes Auswerten und Anwenden von Forschungsergebnissen und Erfahrungen technischer, ökonomischer und sonstiger Art. Ziel des Entwickelns können sein: Stoffe, grundsätzliche Lösungen, technische Erzeugnisse, Programme und dergleichen.“ [VDI 2221 – S. 39-40]

In Abgrenzung dazu schreiben Draht et al. bezugnehmend auf Fay [Fa (2009)]:

„Im Gegensatz zu dem Begriff ‚Entwicklung‘, welcher in Verbindung mit später massenhaft hergestellten Produkten verwendet wird, hat sich für die Arbeitsabläufe der in diesem Beitrag betrachteten komplexen und unikal Anlagen der Überbegriff des ‚Engineering‘ etabliert.“ [DFB (2011) – S.451]

Dieser Definition folgend wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit der Begriff „Engineering“ verwandt. Der Begriff des Engineering findet vor allem auch in der Verfahrenstechnik und im Anlagenbau Verwendung. Abweichend zum „generellen Vorgehen[...] beim Entwickeln und Konstruieren“ [VDI 2221 – S.9] im Maschinenbau wird in der VDI-Richtlinie 2221 daher in der

Verfahrenstechnik auch vom „Basic Engineering“ [VDI 2221 – S.26] statt von der „Produktdokumentation“ [VDI 2221 – S.9] gesprochen.

Aus der Industrie kommt die Forderung, die Methoden des Variantenmanagements auf die Bedürfnisse des Engineerings prozessspezifischer Produktionsanlagen anzupassen, um die angeführten Potentiale des Variantenmanagements nutzbar zu machen [Po(2010), WKL+(2012)]. Diese Arbeit fokussiert daher das Engineering prozessspezifischer Produktionsanlagen und richtet sich in gleichem Maß sowohl an die Planer einer Anlage auf Seiten des Anlagenbetreibers als auch an Planer auf Seiten des Anlagenbauers. Basierend auf dieser Motivation sollen im nachfolgenden Kapitel der heutige Engineering-Prozess für prozessspezifische Produktionsanlagen analysiert und Konsequenzen für die Entwicklung einer Methode zum Engineering von Produktionsanlagen durch Wiederverwendung von Modulen abgeleitet werden.

2.1 Wiederverwendung im Engineering

Das Engineering von prozessspezifischen Produktionsanlagen wird in den Unternehmen der Anwender und Anlagenbauer aufgrund der Einmaligkeit der Zielvorgabe und aufgrund der äußeren Rahmenbedingungen (z.B. zeitlich, finanziell) als Projekt betrachtet [DIN 69901-1]. Abbildung 3 zeigt von Fay et al. vorgestelltes Vorgehensmodell, welches die Tätigkeiten eines Herstellers von Produktionsanlagen in projektabhängige und -unabhängige Tätigkeiten unterteilt [FSM (2009)]. Projektunabhängige Tätigkeiten sind beispielsweise strategische Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten sowie der Aufbau oder die Weiterentwicklung der Infrastruktur des Unternehmens in Bezug auf Engineering-Softwarewerkzeuge. Projektabhängige Tätigkeiten sind in Abgrenzung nicht strategisch sondern stehen im direkten Zusammenhang zu einem Auftrag – also dem Engineering einer Produktionsanlage.

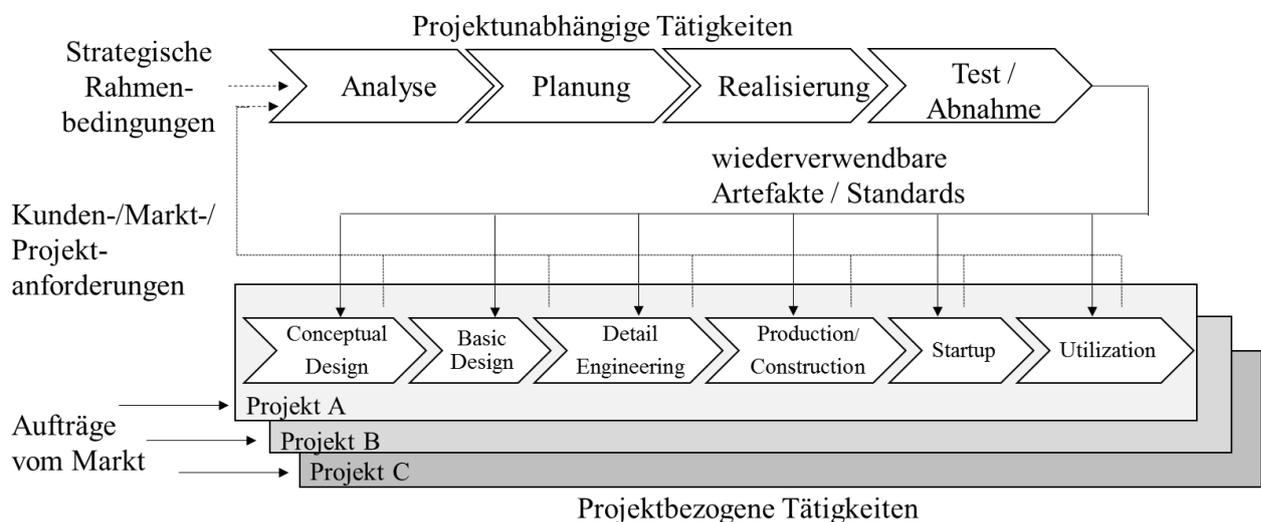


Abbildung 3: Projektabhängige und -unabhängige Tätigkeiten im Engineering von Prozessspezifischen Produktionsanlagen nach [FSM (2009) - S.81]

Das Vorgehensmodell zeigt auf, welche Zusammenhänge zwischen den Tätigkeiten in einem Kundenprojekt und den strategischen Tätigkeiten eines Unternehmens bestehen können. Einzelne Artefakte – also etwas das durch den Einfluss des Menschen entstanden ist – können im Engineering-Prozess wiederverwandt werden. Ein Beispiel für ein solches Artefakt wäre ein

Modul, das eine bestimmte Funktion in einem Produktionsprozess übernimmt. Im Rahmen der projektunabhängigen Tätigkeiten kann geprüft werden, ob ein Modul, das beispielsweise aus einem vorherigen Kundenprojekt stammt oder aufgrund strategischer Rahmenbedingungen entwickelt wurde, in einem neuen Kundenprojekt wiederverwendet werden kann.

Neben der kreativen Arbeit des Planers einer solchen Produktionsanlage bspw. bei der Integration eines neuen Fertigungsverfahrens besteht ein Großteil der Aufgaben aber auch in der Suche, Bewertung und Auswahl von Lieferanten für Teilsysteme – also in Aufgaben, die durch die Wiederverwendung von Wissen und Daten aus frühen Engineering-Projekten unterstützt werden können. Die Effizienz des Engineering kann demnach durch die Erhöhung des Wiederverwendungsgrades gesteigert werden [JMG+ (2010) – S.525]. Diesen Aspekt sehen auch Fay et al. als einen Aspekt der Verbesserung des Engineering [FSM(2009)]. Als Zielzustände für die Wiederverwendung von Modulen in Kundenprojekten werden:

- a. die individuelle Wiederverwendung
- b. die koordinierte Wiederverwendung
- c. die Wiederverwendung von Artefakten, die gezielt für die Wiederverwendung spezifiziert und entwickelt wurden,
- d. die Spezifikation von Referenzmodellen
- e. die Spezifikation wiederverwendbarer Artefakte auf Basis interner oder externer Standards

angeführt [FSM (2009) S.83-84]. Die Beschreibung als Zielzustände lässt den Schluss zu, dass auch die Wiederverwendung beispielsweise von Modulen durch einen einzelnen Mitarbeiter (a.) bzw. im Projektteam (b.) nicht in allen Unternehmen umgesetzt sind.

2.2 Prozessspezifische Produktionsanlage

Produktionsanlagen, die an die Anforderungen eines spezifischen Produktionsprozesses angepasst sind, zeichnen sich in der Regel durch höhere Produktivität aber geringere Flexibilität gegenüber universell einsetzbaren Produktionsmaschinen, wie beispielsweise Werkzeugmaschinen, aus. Ein Beispiel für eine solche Produktionsanlage ist in Abbildung 4 dargestellt. Mit den dargestellten Produktionsanlagen werden industrielle Steckvorrichtungen gefertigt. Neben dem Spritzguss werden hier verschiedene nachbearbeitende und montierende Prozessschritte, die individuell für jeden Steckertyp konfiguriert werden, miteinander verkettet, so dass von einer prozessspezifischen Produktionsanlage gesprochen werden kann.

Das Beispiel macht allerdings auch deutlich, dass nicht alle Teilsysteme einer Produktionsanlage für ein neues Serienprodukt neu entwickelt werden müssen. Viele komplexe Komponenten, wie beispielsweise die Spritzgussmaschine werden nicht neu entwickelt, sondern als eigenständiges Teilsystem zugekauft. Zudem zeigt das Beispiel, dass die Spritzgussmaschine ein zentraler Bestandteil in verschiedenen Produktionsprozessen des Unternehmens ist und somit Wissen über die Maschinen aus früheren Engineering-Projekten vorliegt. Wird eine Produktionsanlage bspw. für eine neue Steckverbindung geplant, kann das Wissen wiederverwandt werden.



Abbildung 4: Beispielhafte Produktionsanlagen aus der Fertigung von Industriesteckvorrichtungen
(Bildquelle: MENNEKES Elektrotechnik GmbH & Co. KG)

Produktionsanlagen sowie die zu fertigenden Produkte sind heute mechatronische Systeme, d.h. in der Produktionsanlage wirken die Disziplinen Mechanik, Elektronik und Informatik zusammen. Isermann beschreibt die Entwicklung von rein mechanischen Systemen hin zu mechatronischen Systemen und zeigt den Nutzen durch eine Verbesserung und Erweiterung der Funktionserfüllung auf [Is (2008a), Is (2008b)].

Eine Beispiel für mechatronische Systeme sind fühlende Robotersysteme, die Kräfte im Prozess oder bei der Kollision mit ihrer Umgebung messen und entsprechend durch ein selbstständiges Abschalten oder durch eine Verringerung der Verfahrgeschwindigkeit reagieren. Mechatronische Systeme entwickeln sich zunehmend zu intelligenten und autonomen Systemen mit wenigen Schnittstellen zu anderen Systemen [Is (2008a)].

2.3 Standardisierte Module aus Baukästen zur Beherrschung der Komplexität

Ein solches wiederverwendbares Artefakt kann eine einzelne Komponente, ein komplexes Teilsystem oder eine ganze Anlage sein. Thramboulidis sowie Lüder et al. beschreiben den Aufbau komplexer Systeme – wie Produktionsanlagen – durch kleinste, mechatronische Einheiten [Th (2008); LFW+ (2010)]. Diese mechatronischen Einheiten sollen in verschiedenen Systemen wiederverwendbar sein und dadurch die Entwicklungszeit reduzieren. Dazu werden die Subsysteme, wie in Abbildung 5 illustriert, in einer Wissensbasis gespeichert. Zudem zeigt Abbildung 5 verschiedene mögliche Detaillierungsgrade bzw. Granularitäten für wiederverwendbare Subsysteme.

Der hohen Wiederverwendbarkeit kleinster, mechatronischer Einheiten steht der Nutzen der Wiederverwendung komplexer Subsysteme gegenüber [WeKl (2012b), WeKl (2012c)]. Im Rahmen dieser Arbeit wird das wiederzuverwendende Subsystem als Modul bezeichnet. Friedli und Schuh definieren ein Modul bzw. die Modularität wie folgt:

„Unter Modularität versteht man die Bildung von in sich möglichst abgeschlossenen Funktionseinheiten. Größere Systeme werden durch den Zusammenbau solcher Module realisiert. Die Modularisierung dient dabei der Komplexitätsreduktion.“ [FrSc(2012) S. 172]

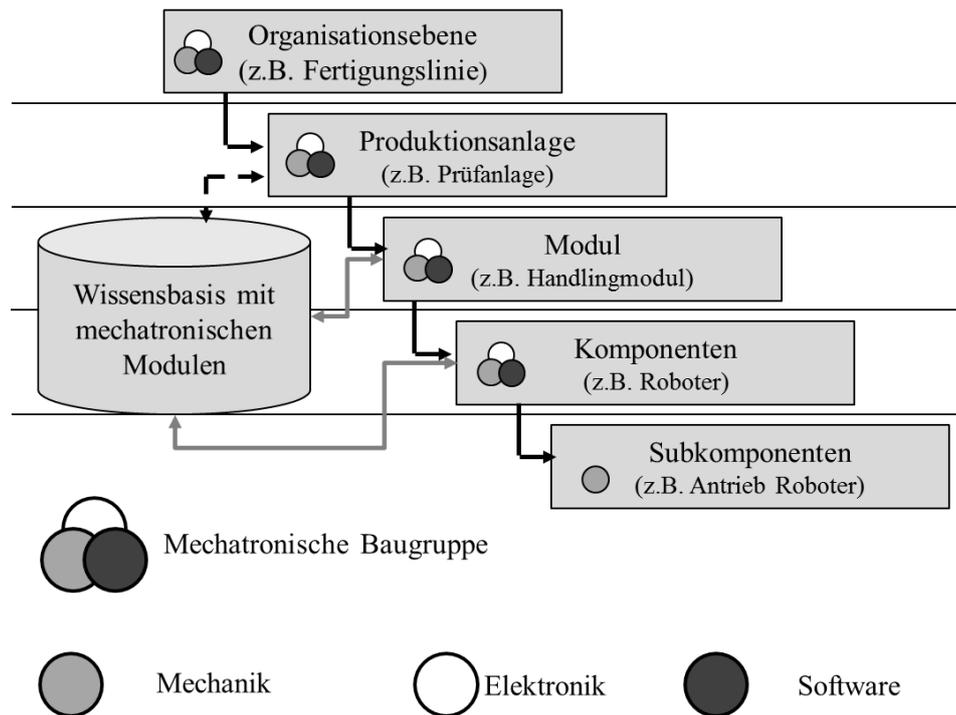


Abbildung 5: Ebenenbetrachtung des möglichen Detaillierungsgrads mechatronischer Module Prozessmodulen nach [LFW+ (2010)]

Demzufolge ist ein Modul eine Einheit, die eine Funktion im Produktionsprozess einer Anlage erfüllt und in der Regel aus mehreren Komponenten besteht. Dieses Verständnis entspricht auch der Definition von Hady und Wozny. Demnach ist das Ergebnis der Modularisierung die Aufteilung in überschaubare Einheiten.

„Diese überschaubaren Elemente eines Gesamtsystems stellen die Funktionseinheiten dar und werden als Module bezeichnet.“ [HaWo (2012) S.599]

In Abbildung 5 sind mögliche Detaillierungsgrade bzw. die Granularität der Subsysteme beispielhaft dargestellt. Produktionsanlagen können demzufolge aus kleinsten, mechatronischen Einheiten [LFW+ (2010)], Komponenten [Th (2008a)] und Modulen [FrSc(20012); HaWo (2012)] aufgebaut werden. Elger und Haußner stellen dazu fest:

„Die Festlegung der Granularität eines mechatronischen Moduls ist hierbei variabel möglich und hängt von der Aufgabenstellung und dem sinnvollen Grad der Wiederverwendung ab.“ [ElHa (2010) S.25]

Vor diesem Hintergrund zielt diese Arbeit darauf ab, heutige Planungsobjekte – also Komponenten – zu möglichst komplexen, aber auch wiederverwendbaren Modulen zusammenzufassen. Die Betrachtung von Subkomponenten kann sinnvoll sein, um Module abseits der durch kommerziell verfügbare Komponenten vorgegebenen Grenzen zu identifizieren.

Beschreibungen von Praxisbeispielen für die durchgängige Wiederverwendung von Modulen aus einem Baukasten im Engineering von Produktionsanlagen finden sich u.a. bei Vogel-Heuser [Vo (2009) – S.103-123; Bosch (2012)]. Der Fokus der Entwicklung von Modulen für die

durchgängige Nutzung liegt meist auf der Definition standardisierter Schnittstellen für die Stoff-, Energie- und Informationsflüsse. Zur Anpassung an verschiedene Anforderungen an die Produktionsanlage können diese Schnittstellen oder auch die Module parametrisiert oder in definierten Abstufungen vorgesehen werden. Dies ermöglicht beispielsweise, dieselben Module trotz unterschiedlicher Geometrie oder Stückzahl der zu produzierenden Bauteile zu verwenden.



Abbildung 6: Konfiguration einer Produktionsanlage aus standardisierten Prozessmodulen nach [Vo (2009) – S.111; teamtechnik Maschinen und Anlagen GmbH]

Das Beispiel in Abbildung 6 zeigt ein modulares Anlagenkonzept für Produktionsanlagen, die aus standardisierten Prozessmodulen und prozessneutralen Basismodulen als Träger des Prozessmoduls aufgebaut werden. Die Basismodule können in diversen Variationen kombiniert werden, um verschiedene Layouts zu ermöglichen. Durch die Prozessmodule kann eine begrenzte Zahl unterschiedlicher Produktionsprozesse abgebildet werden. Im Zuge der Kombination oder Anordnung von Modulen aus einem Baukasten wird häufig synonym auch von der Konfiguration gesprochen [Ke (2012) – S.22].

Wiederverwendbare Artefakte werden entweder gezielt spezifiziert und entwickelt, oder auf Basis der Modularisierung bekannter Produktionsanlagen identifiziert. [LBB+(2005); FSM (2009); WeKl (2012c)]. Die Modularisierung bekannter bzw. bestehender Anlagen reduziert das Risiko von Fehlern z.B. bei der Angebotserstellung, da bereits erfolgreich wiederverwandte Artefakte und Daten eingesetzt werden [RiRe (2010)]. Der Vorteil der gezielten Spezifikation und Entwicklung ist die Möglichkeit der Steuerung der Engineering-Projekte durch die Integration neuer Artefakte, die beispielsweise neue Fertigungsverfahren und Technologien beinhalten. Für die Anwendung in Kundenprojekten sind Mischformen aus Modularisierung und gezielter Spezifikation und Entwicklung für die Identifikation der Artefakte denkbar. In beiden Fällen ist die regelmäßige Prüfung auf Nutzbarkeit, Aktualität und Wiederverwendbarkeit der Artefakte notwendig.

Löwen et al. beschreiben die extremen Ausprägungen solcher Artefakte oder „Wiederverwendungsmodelle [als] Musterprojekt [oder] Komponente“ [LBB+(2005) S. 58]. Aus den Anforderungen im Engineering von Produktionsanlagen in Bezug auf die geringe zu produzierende Stückzahl, den geringen Grad an Standardisierung und die hohe Komplexität resultiert für die Wiederverwendung von Artefakten, dass diese im Detail-Engineering flexibel an den jeweiligen Prozess angepasst werden müssen [WeKI (2012c)]. Als Konsequenz daraus sollten die wiederverwendbaren Module in diesem Fall eher Komponenten denn komplexe Projekte sein, da diese, wie „die Erfahrung zeigt [...], eine höhere Flexibilität bieten“ [LBB+(2005) S. 58].

Für das Engineering von Produktionsanlagen lässt sich also ableiten, dass es vor allem einer Methode bzw. eines Systems zur Unterstützung bei der Komplexitätsbeherrschung im Basic-Engineering bedarf. Ziel dieser Methode ist einerseits die Identifikation flexibler, wiederverwendbarer Module. Andererseits müssen die Module so systematisiert werden, dass sie trotz der vorhandenen Komplexität einfach ausgewählt werden können. Eine aktuelle Studie zu Anwendungen und Trends wissensbasierter Engineeringmethoden und Werkzeuge in diversen Branchen zeigt auf, dass ein Entwicklungstrend die „Automatische Kombination von Komponenten“ [WKL+ (2012) S.41] zu Konzepten für Produktionsanlagen ist. Dieser Entwicklungstrend ist durch eine geringe Anwendungsnahe und ein hohes Entwicklungspotenzial gekennzeichnet [WKL+ (2012)], woraus geschlussfolgert werden kann, dass bislang keine zusammenhängende Methode bzw. kein Konfigurationssystem zur Unterstützung der Komplexitätsbeherrschung im Basic-Engineering bekannt ist.

Dieser Entwicklungsbedarf wird ebenfalls von Böhm et al. als Ergebnis einer Expertenumfrage zur Entwicklung mechatronischer Objekte bzw. Module beschrieben [BGK+ (2012)]. Dort werden die „Weiterentwicklung und -verbreitung existierender Methodiken zur Definition Mechatronischer Objekte [...und die...] intensive [...] Anwendung der Konzepte in der Praxis“ [BGK+ (2012) S.7] als Forschungsschwerpunkte definiert. Das Ergebnis soll „ein Umdenken aller Beteiligten sowie eine weitreichende Unterstützung im Bereich der Methodiken und Prozesse sowie Software-Werkzeug-Unterstützung zur Definition und Implementierung Mechatronischer Objekte“ [BGK+ (2012) S.7] sein. Zum Nutzen mechatronischer Objekte folgern Böhm et al.:

„Insbesondere die integrierte, disziplinenübergreifende Informationsstrukturierung als Grundidee der Mechatronischen Objekte wirkt sich sehr positiv auf die Beherrschung der Komplexität und die Optimierung im Engineering aus und ermöglicht Planungssicherheit und Kostensenkungen sowie eine verbesserte Flexibilität in Engineering und Betrieb einer Anlage“ [BGK+ (2012) S.6-7]

Urbas et al. ergänzen die Wiederverwendung von Modulen in Anlehnung an Pahl et al. [PBF (2007)] um den Aspekt, dass

„Module [...]Elemente eines Baukastens [sind]. Ein technisches System wird durch Kombination solcher Elemente erstellt. Dabei wird zwischen Muss- und Kann-Bausteinen, sowie Grund-, Hilfs-, Sonder- und Anpassungsbausteinen unterschieden.“ [UDKO (2012) S. 616]

Dabei gehen Urbas et al. beziehungsweise Pahl et al. auch auf so genannte „Mischsysteme“ ein, die prozessspezifische Einzelkonstruktionen als „Nichtbausteine“ berücksichtigen [UDKO (2012)]. Die zugrundeliegende Baukastensystematik nach Pahl et al. ist in Abbildung 7 dargestellt.

Diese Unterteilung zeigt auf, dass nicht alle Elemente eines Baukastens standardisierte Module sind, die direkt im Engineering neuer Produktionsanlagen eingesetzt werden können. Gerade für den im Rahmen dieser Arbeit näher betrachteten Fall prozessspezifischer Produktionsanlagen sind die Module größtenteils Anpassungsbausteine oder Nichtbausteine, d.h. die Bausteine müssen im Rahmen der Systemintegration an den Prozess angepasst und die Erfüllung der Eigenschaften abgesichert werden [VDI 2206].

Baukästen zeichnen sich laut Pahl et al. dadurch aus, dass die darin enthaltenen Produktionsanlagen und Produkte „als Bausteine mit oft unterschiedlichen Lösungen durch Kombination verschiedene Gesamtfunktionen erfüllen“ [PBF (2005) – S.662]. Entgegen dem von Pahl et al. beschriebenen, offenen Vorgehen zur Entwicklung von Baukästen werden in der praktischen Anwendung und in der Literatur die „Definition von Schnittstellen [...] dabei [als] Voraussetzung für die Bildung und den Austausch von Modulen“ [LRZ (2006) – S.43] beschrieben [OHB+ (2013)].

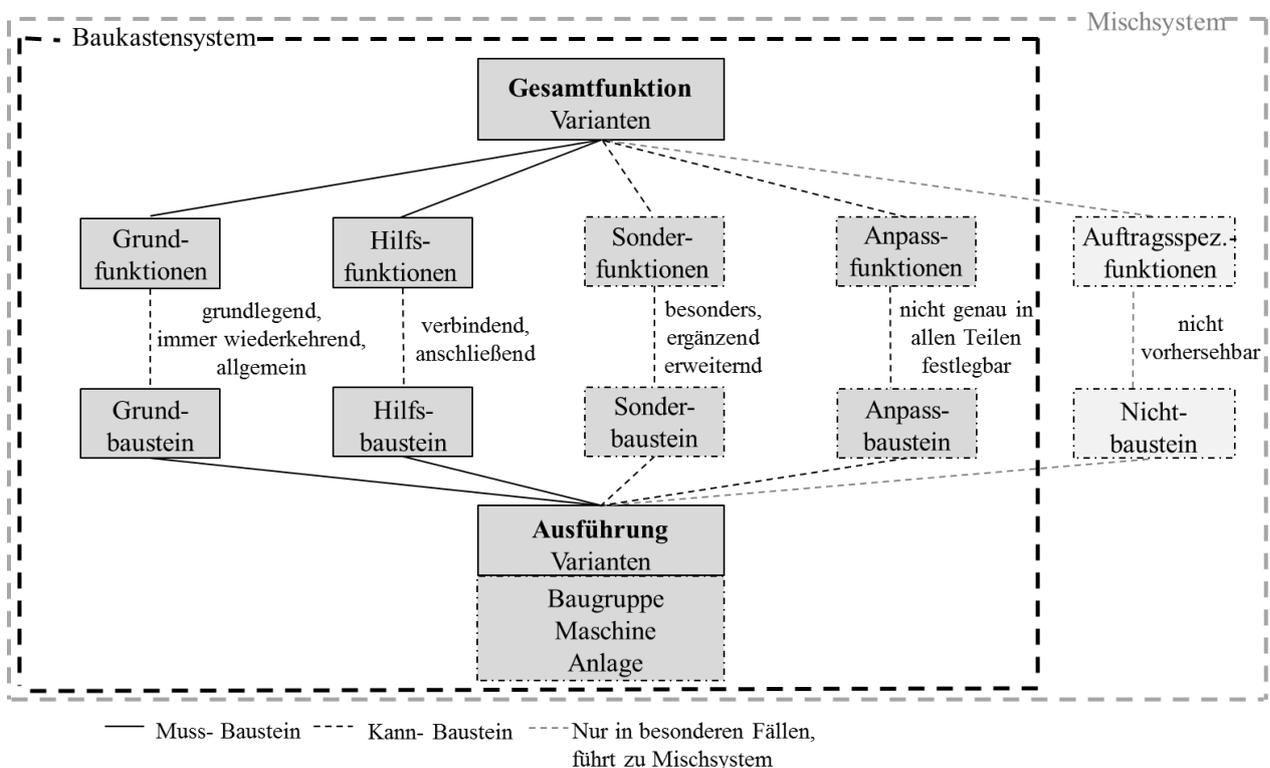


Abbildung 7: Baukastensystematik nach Pahl et al. Prozessmodulen nach [PBF (2007) – S.664]

Urbas et al. sehen die Effizienz des Engineering ebenfalls durch die Granularität des Baukastens, in dem die Module systematisiert sind, bestimmt:

„Ein weiterer zeitbestimmender Faktor für die modulare gewerke-integrierte Anlagenplanung ist die Granularität des Baukastens. Läge der Detaillierungsgrad auf der Ebene heutiger Planungsobjekte (Equipment, Instrumentation etc.) wäre nichts gewonnen. Ein Modulschnitt auf Teilanlagenebene wäre wiederum zu groß um den

Aspekt der Wiederverwendung zu adressieren. Aktuelle Denkansätze bewegen sich häufig entlang der in der Verfahrenstechnik etablierten Grundoperationen und Package Units.“ [UDKO (2012) S. 618]

Neben dem Detaillierungsgrad von Modulen empfehlen Friedli und Schuh sowie Hady und Wozny übereinstimmend Funktionen [FrSc (2012); HaWo 2012)]. Unter einer Funktion versteht man nach VDI – Richtlinie 2221 die

„lösungsneutral beschriebene Beziehungen zwischen Eingangs-, Ausgangs-, und Zustandsgrößen eines Systems“.[VDI 2221 – S.40]

Auch hier sind eine differenzierte Betrachtung des Umfangs einer Funktion sowie die Bildung von Hierarchien in Haupt-, Neben- und Unterfunktionen möglich. Im Gegensatz zu den Modulen existieren hinsichtlich der Funktionen jedoch Normen und Richtlinien wie die DIN 8580 für Funktionen der Fertigung und die VDI-Richtlinie 2860 für Montage- und Handhabungsfunktionen, die eine Einordnung des Umfangs und eine Hierarchie vorgeben [DIN 8580; VDI 2860]. Gerade in der Nutzung dieser Funktion, die durch Normen und Richtlinien klar definiert und lösungsneutral beschrieben sind, wird die Forderung nach Austauschbarkeit der Module von Lindemann et al. unterstützt:

„Modularisierung erfolgt durch Bildung von funktionalen und logischen Einheiten (Modulen), die als solche komplett austauschbar sind.“[LRZ (2006) – S.43]

Ulrich unterscheidet in Ergänzung zu den bislang beschriebenen funktionsorientierten Ansätzen die modulare von der integralen Produktarchitektur:

„A modular architecture includes a one-to-one mapping from functional elements in the function structure to the physical components of the product, and specifies de-coupled interfaces between components. An integral architecture includes a complex (non one-to-one) mapping from functional elements to physical components and/or coupled interfaces between components.“ [Ul (1995) – S.422]

Bei modularen Produktarchitekturen existiert ein direkter Zusammenhang zwischen Funktionen und Modulen, bei integralen Architekturen existiert ein komplexer Zusammenhang, da mehrere Funktionen von den Komponenten der Produktionsanlage übernommen werden können. Im Rahmen dieser Arbeit sollen demnach modulare Architekturen – also eine direkter Zusammenhang zwischen einer Funktion und den Komponenten – hergestellt werden, um die von Lindemann et al. geforderte Austauschbarkeit zu ermöglichen. Integrale Architekturen können mit Einschränkungen in der technisch-wirtschaftlichen Vergleichbarkeit und der Austauschbarkeit im Engineering von Produktionsanlagen wiederverwandt werden. Der Fokus dieser Arbeit liegt jedoch auf der Identifikation modularer Architekturen, um die Austauschbarkeit und die Vergleichbarkeit zu realisieren.

Standardisierte Module aus Baukästen werden durchgängig im Vertrieb und im gesamten Engineering-Prozess von der Konzeption über die Produktion bis hin zur Nutzung [BMU (2011), We (2010)] und disziplinenübergreifend verwandt [KSP (2004)]. Von besonderer Bedeutung für die industrielle Praxis sind Produktkonfiguratoren für den Vertrieb [Marktführer (2011), Ke (2012)]. Mit diesen Softwarewerkzeugen lassen sich komplexe Produkte und auch

Produktionsanlagen aus standardisierten Modulen konzipieren und aufbauen. Diese Module können durch die Konfiguratoren basierend auf bestimmten Regeln miteinander kombiniert werden [BMU (2011)]. Grundlage dafür sind standardisierte Modulschnittstellen in Bezug auf Stoff-, Energie- und Informationsfluss. Die Standardmodule können im vorab definierten Maß auch an die Rahmenbedingungen des Prozesses angepasst werden. Ein Beispiel dafür ist eine Anpassung der mechanischer Schnittstellen zwischen zwei Modulen durch parametrisierte CAD-Zeichnungen [u.a. KaVi (2006), SBB+ (2011)].

In Abgrenzung zu diesem „*Configure to order*“ spricht man bei Konfigurationsprozessen, bei denen Änderungen an den Modulen vorgenommen werden müssen und die in dieser Arbeit fokussiert werden, von „*Engineer to order*“ [BMU (2011), We (2010)]. Im Rahmen des Förderprojekts Förderal wurden dafür Fragenstellungen der Gestaltung von Baukästen und der Einbindung in den Engineering-Prozess behandelt. Förderal hatte zum Ziel, ein baukastenbasiertes, mechatronisches Engineering von Produktionsanlagen unter Berücksichtigung des Einsatzes verschiedener Engineering-Tools zu ermöglichen [Li (2004)]. Dies diente dazu, die Module durch die Engineering-Tools an die Rahmenbedingungen des Produktionsprozesses anzupassen.

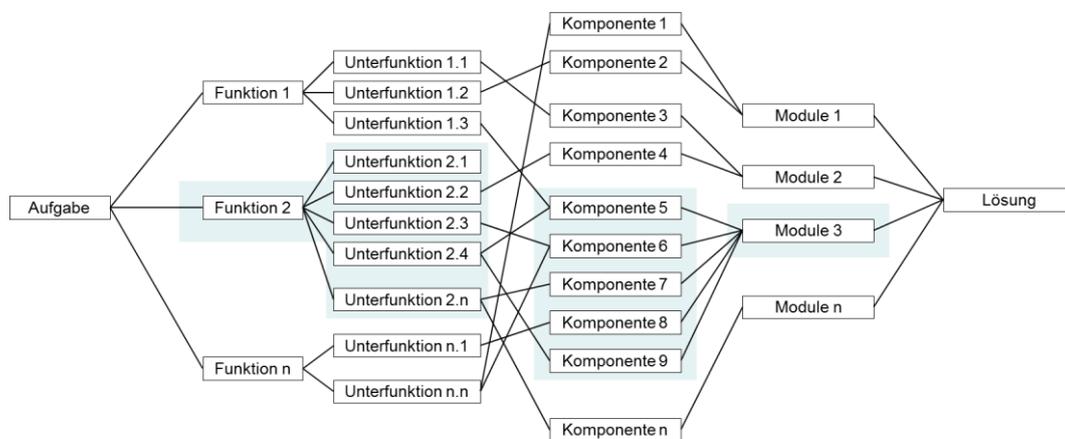


Abbildung 8: Die Produktarchitektur wird durch die Zerlegung in Unterfunktionen, die Zuordnung der Komponenten und durch eine Zusammenfassung zu Modulen ermöglicht Prozessmodulen - nach [Gö (1998); Metus (2013)].

Ein exemplarischer Ansatz zur Definition von Modulen ist in Abbildung 8 dargestellt [Gö (1998); Metus (2013)]. Dieser Ansatz basiert, ähnlich wie der in dieser Arbeit vorgestellte, auf der Zuordnung der Funktionen und Unterfunktionen eines Produktes zu Komponenten bzw. Modulen. Durch eine visuelle Zuordnung der Komponenten in Serien-, Varianten- und Optionsbauteile wird die manuelle Optimierung der Modulstruktur unterstützt. Zudem helfen statistische Funktionen und eine monetäre Bewertung der Module bei der Planung und Bewertung der Produktarchitektur. Im Engineering von Produktionsanlagen können solche Ansätze nur bedingt eingesetzt werden, da Produktionsanlagen nicht aus einer abgeschlossenen Anzahl an Komponenten bestehen und in geringen Stückzahlen gefertigt werden. Dies ermöglicht nur ein geringes Maß an Standardisierung, da die Anlagen an die Prozesse des Kunden angepasst werden müssen. Weitere Ansätze wie die „Methodik zur Entwicklung von Baukästen auf der Basis von konstituierenden Merkmalen“ (Ar (2010)) werden in Kapitel 3.1.1 näher betrachtet.

Durch die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode soll die Identifikation und Wiederverwendung prozessspezifischer Module im Engineering neuer Produktionsanlagen ermöglicht werden. Eine Nutzung der Bausteine ohne Anpassung sowie eine Kombination unterschiedlicher Bausteine über standardisierte Schnittstellen ist zwar wünschenswert, um den Aufwand in der Ausgestaltung zu reduzieren, der Fokus dieser Arbeit liegt jedoch auf der Wiederverwendung in der Konzeption der Produktionsanlage.

In der Literatur finden sich vor allem im Bereich der Softwareentwicklung darüber hinaus Ansätze der Objektorientierung [vgl. u.a. Oe (2012)]. Als Objekt definiert Vogel-Heuser eine Systemkomponente, die aus Daten und Operationen besteht [Vo (2009)]. Inhaltlich aber nicht begrifflich übereinstimmend definieren Gausemeier et al.:

„Objekte bestehen aus Attributen und Methoden. Die Attribute beschreiben den aktuellen Zustand eines Objektes. Die Methoden beschreiben das dynamische Verhalten der Objekte.“ [GBG (1998) – S.276]

Ein Subsystem kann also als Objekt betrachtet werden, wenn es eine Funktion (Methode/Operation) ausführt und aus Daten (Attributen) wie Programmcodes etc. besteht. Die Daten oder das Wissen, dass im Rahmen der hier vorgestellten Methode gespeichert und wiederverwandt werden soll, beziehen sich in erster Linie auf eine Wiederverwendung im Engineering. Daher könnte statt von Modulen auch von Engineering-Objekten gesprochen werden. Da grundlegende Prinzipien der objektorientierten Programmierung wie beispielsweise die Kapselung und der Schutz der Daten nur eine untergeordnete Rolle spielen, wird im Folgenden ausschließlich von Modulen gesprochen. Eine Übertragung der Methoden der Objektorientierung kann den Entwickler gerade in der Ausgestaltung der Produktionsanlage unterstützen. Bei dieser (teil-) automatisierten Ausgestaltung spielen standardisierte Schnittstellen zum Stoff-, Energie- und Informationsfluss eine bedeutende Rolle. Da in der vorliegenden Arbeit der Schwerpunkt auf der Identifikation und der Einbindung der Wiederverwendung in die frühen Phasen des Engineering liegt, werden diese Schnittstellen zur Ausgestaltung im Detail Engineering hier nicht weiter betrachtet.

2.4 Konsequenzen für die Wiederverwendung von Modulen im Engineering

Produktionsanlagen aufgebaut aus standardisierten Modulen sind technologisch möglich und bereits in der Praxis umgesetzt [Vo (2009)]. Die Produktionsanlagen können im Rahmen vorgedachter Optionen miteinander kombiniert und somit konfiguriert werden. Sind Anpassungen an den Anlagen aufgrund der Rahmenbedingungen des Produktionsprozesses nötig, müssen die Konstruktionsabteilungen diese manuell einpflegen.

Gerade im Maschinenbau, in dem ca. 60% der Erzeugnisse nach Kundenspezifikation gefertigt werden [KIPI (2000), Ba(2007)], kann die Frage gestellt werden, ob es effizient ist, Varianten und Optionen zu standardisieren, um sie anschließend konfigurieren zu können. Die Frage kommt vielmehr auf, ob es für diesen Anteil des Maschinenbaus nicht effektiver wäre, im Rahmen der frühen Engineering-Phasen, wie von Krause et al. vorgeschlagen, Konzeptmodule wieder zu verwenden [KFG (2007) – S.104].

In Ergänzung zu den klassischen Zielen des Variantenmanagements liegt das Ziel der Optimierung des Engineering in der Verkürzung der Engineering-Zeit bzw. der Steigerung der Effizienz sowie der Vermeidung von Fehlern und der Planung der Produktionsanlage mit zu großen Sicherheiten. Aus industrieller Sicht sind die Steigerung der Effizienz bzw. die Senkung der Kosten und der Zeit das zentrale Ziel der Wiederverwendung [Bosch 2012]. Dies gilt auch für das Engineering von Systemen als variantenreiche Serienprodukte. Durch die Integration von Wissen über die Module z.B. in Form von CAD-Zeichnungen, Schaltplänen und Steuerungsprogrammen kann die Effizienz des Engineerings bei der Wiederverwendung weiter gesteigert werden, da diese Information ebenfalls genutzt und nur noch an den neuen Prozess angepasst werden muss [WeKl (2012c)]. Dieses Wissen kann neben der Produktionsanlage auch die Anlagenperipherie umfassen [KRZ (2012)].

Neben der Effizienz im Engineering durch die Wiederverwendung von Modulen beschreiben Baldwin und Clark die Beherrschung der Komplexität und insbesondere die Parallelisierung des Engineering als Vorteil der Modularisierung [BaCl (2000), Bl(2011)]. Diese haben direkten Einfluss auf den Engineering-Prozess, da durch eindeutig beschriebene Schnittstellen zwischen den Objekten die Einbindung externer Entwicklungspartner oder Zulieferern ermöglicht wird. Insbesondere die Beherrschung der Komplexität der möglichen Module bei gleichzeitiger Flexibilität ist neben der Planungssicherheit für den Anwendungsfall Engineering von Produktionsanlagen von besonderer Bedeutung. Als einen weiteren Aspekt beschreiben u.a. Bramsiepe und Schembecker auch den wirtschaftlichen Nutzen eines verkürzten Engineering bzw. eines früheren Markteintritts [BrSc (2012); ProcessNet – 50% Idee (2013)].

2.4.1 Einordnung der Methode in das Engineering von Produktionsanlagen

Im Engineering von Produktionsanlagen werden Entscheidungen über das Konzept und damit die Kosten eines Produkts oder einer Produktionsanlagen sehr früh im Produktentstehungsprozess festgelegt [PBFG (2007)]. Aus der Diskrepanz zwischen Kostenfestlegung und der anschließenden Kostenverursachung im weiteren Engineering ergibt sich der Bedarf einer Absicherung der Konzepte in den frühen Phasen des Engineering [EKL (2007)]. Die Absicherung der Konzepte kann beispielsweise durch die Integration von Wissen über bestehende Produktionsanlagen erfolgen [WeKl (2012b), WeKl (2012c), (RiRe (2010))]. Diese Wissensintegration soll allerdings nicht in einer stärkeren Standardisierung der Module münden, um die Anforderung an die Flexibilität der Konzepte nicht einschränken [El (2006)].

Aus der Bedeutung der Konzeptionsphase für die Kostenfestlegung resultiert auch die Forderung, bereits in den frühen Phasen des Engineering aussichtsreiche Konzepte zu erarbeiten [KFG (2007)]. In Bezug auf das Potential der Wiederverwendung von Artefakten bzw. Modulen und dem dazugehörigen Wissen schreiben Schertl und Fay:

„Je früher Wiederverwendung im Projekt erfolgt, desto größer sind die Potentiale, die dadurch erschlossen werden können“ [SLF+(2008) S.8, FSM (2009) S.83].

Auch Huang und Kusiak sehen den Nutzen der Bildung und Nutzung von Modulen in den frühen Engineering-Phasen:

„Modules should be ideally formed early in the design process, e.g., at the conceptual design phase.“ [HuKu (1998) – S.77]

Diese Aussagen decken sich mit den Ergebnissen einer Umfrage von Böhm et al. aus dem Jahr 2012, in der der Nutzen der Wiederverwendung mechatronischer Objekte, zusätzlich zu den frühen Phasen des Engineering, in der Inbetriebnahme sowie dem Service gesehen wird [BGK+ (2012)]. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, das Wissen über bestehende Produktionsanlagen gezielt im Engineering neuer Produktionsanlagen wiederzuverwenden und dabei die Flexibilität der Lösung so wenig wie möglich einzuschränken. Dabei soll im Rahmen dieser Arbeit insbesondere auf eine Wiederverwendung in den frühen Phasen – also dem *Conceptual Design* und dem *Basic Engineering* – des Engineering einer prozessspezifischen Produktionsanlage eingegangen werden.

Neben der Absicherung der Konzeptentscheidung durch die Wissensintegration und der Beherrschung der Komplexität liegt das wichtigste Potential in der Zeitersparnis durch die Wiederverwendung von Modulen. Diesem Potential stehen der Aufwand der Definition wiederverwendbarer Module und der Aufwand der Integration der Wiederverwendung in bestehende Prozesse gegenüber. Dieses Potential der Wiederverwendung wird in Abbildung 9 durch den Vergleich zwischen dem Vorgehen gemäß der VDI-Richtlinie 2222 (A – Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien) und dem Engineering durch die Wiederverwendung von Modulen (B) verdeutlicht [VDI 2222]. Die VDI-Richtlinie ist laut Tomiyama et al. am weitesten in der Lehre und Wissenschaft verbreitet und wird daher hier als Referenzprozess verwendet [TGJ+ (2009) – S.557].

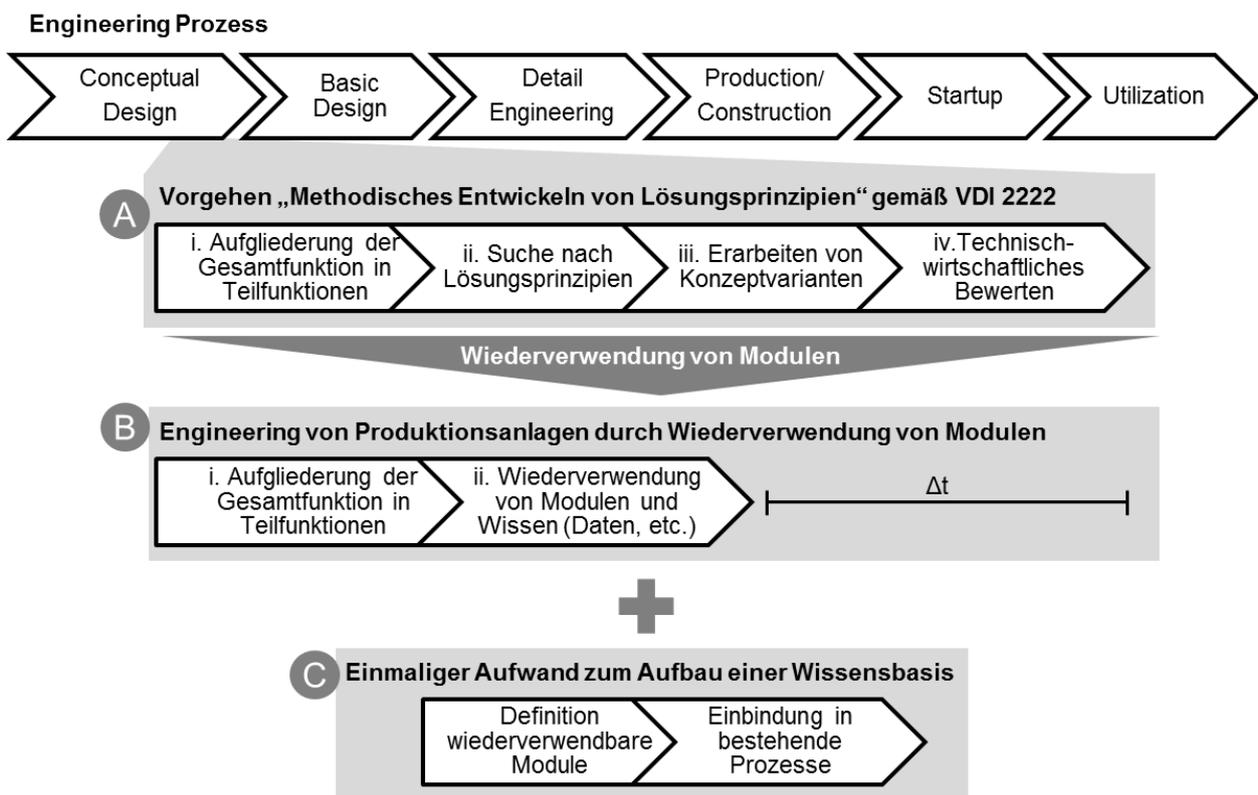


Abbildung 9: Einordnung der Methode zum Engineering von Produktionsanlagen durch Wiederverwendung von Modulen

Abbildung 9 ordnet beide in den Engineering-Prozess nach Fingerhut sowie Lühe (Fi(1990), Lü (2012)) ein. Im Fokus dieser Arbeit liegen – wie bereits zuvor erwähnt – die frühen Phasen des

Engineering, weshalb auf die Wiederverwendung der Module und dem dazugehörigen Wissen nicht weiter eingegangen wird. Dennoch soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die Module auch in den späteren Phasen der Ausgestaltung zu einer Effizienz-Steigerung beitragen. Der Nutzen der Wiederverwendung von Modulen kann durch die durchgängige Anwendung im gesamten Engineering deutlich erhöht werden [KRW (2006)].

In der VDI-Richtlinie wird die Konzeption (Prozess „A“) nach der Sammlung von Anforderungen in folgenden Teilschritten beschrieben:

- i. Abstraktion bzw. Aufgliederung der Gesamtfunktion in Teilfunktionen
- ii. Suche nach Lösungsprinzipien und -möglichkeiten
- iii. Erarbeiten von Konzeptvarianten
- iv. Technisch-wirtschaftliches Bewerten der Konzeptvarianten

Die Teilschritte ii.-iv. lassen sich wie in Prozess „B“ dargestellt durch die Wiederverwendung von Modulen und Wissen (z.B. Konstruktionsdaten, Kosten, Leistung) ersetzen. Dazu ist es notwendig, Wissen basierend auf den Modulen und dem wiederum zu diesen dazugehörigen Wissen aufzubauen (s. Prozess „C“). Die Wiederverwendung von Modulen entspricht dem „*Application Engineering*“, der Aufbau einer Wissensbasis dem „*Domain Engineering*“ gemäß Jazdi et al. [JMG (2010)]. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode soll den Entwickler bei diesen Tätigkeiten durch definierte Vorgehensbeschreibungen sowie Werkzeuge unterstützen.

2.4.2 Definition wissenschaftlicher Schwerpunkte dieser Arbeit

Entsprechend der zuvor dargestellten Rahmenbedingungen und Erkenntnisse zielt die vorliegende Arbeit darauf ab, zu untersuchen, ob in bestehenden kundenspezifischen Produktionsanlagen wiederverwendbare Module identifiziert werden können. Zudem soll die Konzeption neuer Produktionsanlagen basierend auf diesen Modulen untersucht werden. Die Module können dann nach einer Entscheidung über das Konzept der Produktionsanlage manuell, unterstützt durch geeignete Software [We (2010)] oder auf Basis von Beschreibungssprachen automatisiert [EFH+ (2011)] ausgestaltet werden. Aufgrund der bestehenden Lösungen und aufgrund laufender Forschungsprojekte wird die Forderung nach einer durchgängigen Nutzung der Module über den gesamten Engineering-Prozess nicht detailliert betrachtet, sondern nur die Konzeption der Anlage, das heißt die Auswahl der Module, betrachtet.

Das Ziel der in dieser Arbeit vorgestellten Methode ist es also

- wiederverwendbare Module für die Konzeption neuer, kundenspezifischer und damit individueller Produktionsanlagen zu identifizieren
- die Wiederverwendung dieser Module durch den Entwickler bei der Konzeption neuer, kundenspezifischer Produktionsanlagen basierend auf bestehenden Prozessen und Systemen zu ermöglichen und dabei die Auswahl der Module durch eine technisch-wirtschaftliche Bewertung der Modulkombination zu unterstützen.

Für das beschriebene Beispiel der Konfiguration einer Produktionsanlage aus standardisierten Prozessmodulen (s. Abbildung 6) sollen also nicht die Konfiguration ersetzt oder erweitert werden, sondern die Identifikation neuer Prozessmodule ermöglicht und basierend auf einer lösungsneutralen Prozessbeschreibung die Auswahl geeigneter Module unterstützt werden.

3 Stand der Technik

Im folgenden Kapitel sollen bestehende Konzepte zum Engineering durch Wiederverwendung von Modulen, zur Definition von Modulen, zur Einbindung in bestehende Prozesse und Systeme sowie zur technisch-wirtschaftlichen Bewertung von Konzeptvarianten beschrieben und analysiert werden. Diese Analyse soll aufzeigen, inwieweit bestehende Methoden und Ansätze auf prozessspezifische Produktionsanlagen übertragbar sind bzw. wo Lücken vorhanden sind.

An das Thema dieser Arbeit angrenzende Fragestellungen beschäftigen sich u.a. mit dem Erwerb und der Nutzung von Wissen in der Produktentwicklung. Aktuelle Herausforderungen des Wissensmanagements für das Engineering liegen vor allem in Fragen der Externalisierung impliziten Wissens und der Systematisierung [JWB (2011); Bö (2013), KRBG (2011)]. Zwar wird eine methodische Grundlage zur Überführung des impliziten Erfahrungswissens in ein explizites Modul sowie die Systematisierung und Nutzung dieser Module im Rahmen der vorliegenden Arbeit behandelt, eine detaillierte Betrachtung und Analyse der Phasen des Wissensmanagements [PRR (2003), VDI 5610] findet jedoch nicht statt.

Vielmehr liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Entwicklung einer Methode zur Wiederverwendung von Modulen in frühen Phasen des Engineering. Um Module in den weiteren Phasen des Engineering ausgestalten zu können, werden „Methoden, Beschreibungsmittel und Werkzeuge zur Unterstützung“ [Vo (2011) – S.54] bei der detaillierten Planung und Realisierung von Produktionsanlagen erarbeitet. Ergebnisse dieser Arbeit sind u.a. Möglichkeiten zu Verarbeitung nicht-funktionaler Eigenschaften [EFH+(2012)] sowie die Integration der Ausgestaltung in den Engineeringprozess [FEH+ (2013)].

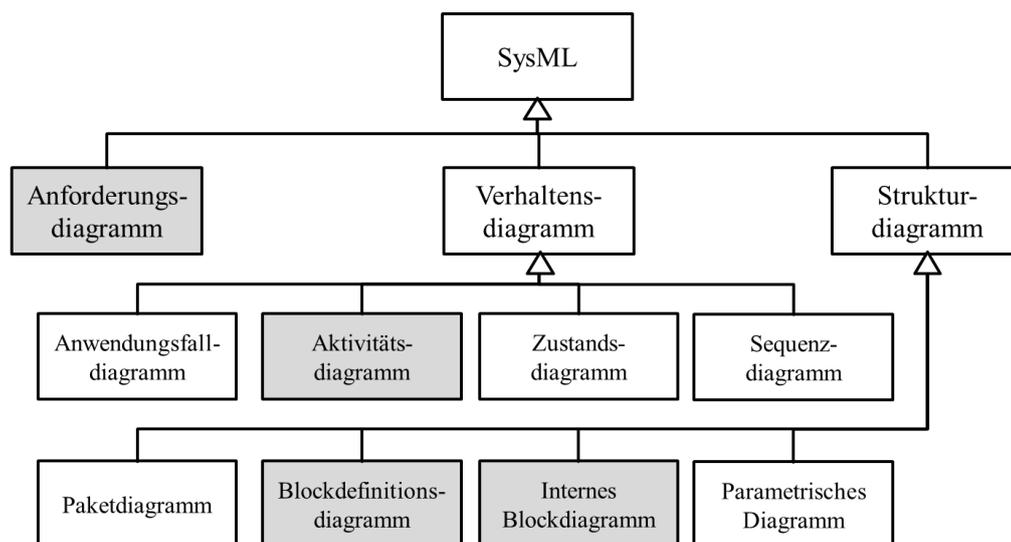


Abbildung 10: Notwendige Diagramme der SysML zur Beschreibung wiederverwendbarer Module (grau hinterlegt) nach [KKJ+(2013)]

Eine wichtige Voraussetzung für die Ausgestaltung der Module im Detail Engineering ist die Modellierung der Anforderungen, des Verhaltens und der Struktur des Bauteils, die von Kernschmidt et al. mit dem Beschreibungsmittel SysML beispielhaft aufgezeigt wurde [KKJ+(2013)]. Durch diese Beschreibung können die interne Struktur eines Moduls (Strukturdiagramm), die Funktion des Moduls (Aktivitätsdiagramm) und die Schnittstellen

(Anforderungsdiagramm) standardisiert beschrieben werden. Dadurch wird die Ausdetaillierung der Produktionsanlage unterstützt und kann ggfs. sogar teilautomatisiert durchgeführt werden [KKJ+ (2013)]. Abbildung 10 zeigt die Diagramme der SysML, wobei die Diagramme, die für die Wiederverwendung von Modulen relevant sind, grau hinterlegt sind. Da sich diese Arbeit auf die frühen Phasen des Engineering beschränkt, sind Fragestellungen des Detail Engineering vor allem auch in Bezug auf eine Ausgestaltung der Anlagendokumentation (z.B. 3D-Visualisierung der Anlage) nicht notwendig und werden daher nicht betrachtet.

3.1 Aufbau der Wissensbasis und Definition von Modulen

Für den beschriebenen Aspekt der Definition mechatronischer Module existieren eine Vielzahl an Methoden und wissenschaftlicher Arbeiten. Jansen stellt eine Methode zur Partionierung mechatronischer Systeme zur Nutzung unterschiedlicher Domänen bei der Realisierung vor [Ja (2006)]. Diese Methode beschreibt analog zu den von u.a. Lüder et al. beschriebenen mechatronischen Einheiten eine Möglichkeit zur Systematisierung kleinster Bausteine [LFW+ (2010); ChEm (2011)]. In Abgrenzung zu diesen Methoden soll in der vorliegenden Arbeit die Identifikation zusammenhängender Komponenten – also Module – vorgestellt werden. Analog zu den produktbezogenen Arbeiten von Göpfert sollen komplexere Module identifiziert werden, die den Nutzen und damit die Akzeptanz bei der Wiederverwendung erhöhen [Gö (1998), WeKI(2012c), WeKI (2012a)]. Andere Arbeiten im Bereich der Definition von Modulen behandeln die Optimierung von Produktbaukästen und -architekturen [Ar (2011), SAN (2007), KSP (2004)]. Diese Ansätze grenzen die Flexibilität durch Standardisierung ein und eignen sich daher nur mit Einschränkung für die Anforderungen des Engineering von Produktionsanlagen.

Ein weiterer Aspekt zum Aufbau der Wissensbasis ist die Systematik, in der Module gespeichert werden. Sie soll die Suche nach passenden Modulen zur Wiederverwendung ermöglichen und an bestehende Prozesse des Anwenders anknüpfen. Jansen diskutiert in diesem Zusammenhang räumliche und funktionale Aspekte der Module und kommt zu dem Schluss, dass sich für eine erste Auswahl Funktionen eignen [Ja (2006)]. Erst in der weiteren Ausgestaltung haben die räumlichen Aspekte (Lage einer Komponente, mechanische Schnittstellen etc.) des Moduls eine zunehmende Bedeutung. Aus der Einordnung der in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Methode ergibt sich daraus, dass Funktionen für die Systematisierung der Module für die Wiederverwendung geeignet sind [WKLW(2011b), He (2007)]. Der Anwendungsbezug wird auch durch die Verwendung von Funktionsmodulen in der Praxis deutlich [Bosch (2012)]. Ein weiteres Beispiel für die Nutzung der Funktionszuordnung für die Strukturierung eines Baukastens für Werkzeugmaschinen geben Korajda et al. [KSP (2004)]. Ergänzend zur Funktionsorientierung können auch Eigenschaften der Module durch die Verwendung von Ontologie genutzt werden, um passende Module zu identifizieren [WKL+(2012)].

Welche Komponenten als Modul definiert und wie diese systematisiert werden, hängt von dem Erfahrungswissen des Entwicklers und auch der Disziplin, aus deren Betrachtung heraus eine Produktionsanlage modularisiert wird, ab [FFV (2012a); FFV (2012b)]. Daher werden im Folgenden Methoden zur Definition wiederverwendbarer Module sowie deren Systematisierung vorgestellt, die den Entwickler beim Aufbau der Wissensbasis unterstützen. Dabei spielen neben den mechatronischen Schnittstellen vor allem auch die Granularität der Module eine entscheidende Rolle [MJG (2011)].

3.1.1 Modularisierungsansätze

Die Analyse und Optimierung von Produktarchitekturen zur Beherrschung der Komplexität durch Reduktion der Varianten oder durch Flexibilisierung des Produktentstehungsprozesses wird seit geraumer Zeit in der Wissenschaft diskutiert. Danilidis et al. sehen den Beginn der Modularisierung von Produktionsanlagen im Jahre 1984 bei Pahl und Beitz [PaBa (1984); DEEL (2011)].

Gerade die Modularisierung von Produkten stößt in der Wissenschaft und in der industriellen Anwendung auf ein breites Interesse [Sc (2003), BaCl (2000), BrSc (2012), DEEL (2011), Er (1998)]. Aufgrund der Vielzahl der in der Literatur beschriebenen Methoden bzw. Weiterentwicklungen sollen im Nachfolgenden die wichtigsten und vor allem auch die für die Arbeit grundlegenden Methoden erläutert werden. Weiterführende Entwicklungen dieser Methoden werden beschrieben, wenn sie einen Beitrag zur Weiterentwicklung vor allem im Sinne der vorliegenden Thematik – der Definition wiederverwendbarer Module in Produktionsanlagen – liefern. Ansätze dazu finden sich vor allem in den Arbeiten zur Gestaltung komplexer Produktprogramme.

Übersichtliche Beschreibungen von Modularisierungsansätzen finden sich in der aktuellen Literatur u.a. bei Blees, Kipp oder auch Straube und Ouyeder [Bl (2011); Ki (2012); StOu (2011)]. Eine weitere Übersicht zu Methoden zur Analyse und Optimierung der Produktstruktur findet sich bei Malmqvist [Ma (2002)]. Er empfiehlt eine matrixbasierte Methode, da diese den Entwickler bei der Visualisierung, Strukturierung und Analyse unterstützen. Zudem existiert für Matrizen eine Vielzahl an Algorithmen zur Anpassung der in der Matrix abgebildeten Produktstruktur. Daher liegt im Folgenden ein besonderer Fokus auf der Vorstellung und Analyse matrixbasierter Methoden.

Design Structure Matrix - DSM

Die *Design Structure Matrix* (DSM) geht auf Arbeiten von Steward im Jahre 1965 zurück und wurde 1981 von ihm erstmalig als DSM bezeichnet [St (1965), St(1981)]. In weiteren Arbeiten von Pimmler und Eppinger wurde die DSM am „*Massachusetts Institute of Technology (MIT)*“ weiterentwickelt [PiEp (1994)]. Die Methode dient der Analyse der Zerlegung von Produktentwürfen. Die Methode stellt die Zusammenhänge zwischen einzelnen Komponenten einer Produktionsanlage wie in Abbildung 11 dargestellt in den Zeilen und Spalten einer Matrix gegenüber.

In ihrer Methode werden die Zusammenhänge zwischen den Komponenten wie folgt typisiert [PiEp (1994) – S.4]:

1. Räumlich: Ein räumlicher Zusammenhang zwischen Komponenten besteht, wenn diese aneinander angrenzen und entsprechend ausgerichtet werden müssen.
2. Energiefluss: Dieser Zusammenhang besteht, wenn zwischen zwei Komponenten Energie fließen muss.
3. Informationsfluss: Dieser Zusammenhang besteht, wenn zwischen zwei Komponenten Informationen ausgetauscht werden muss.
4. Materialfluss: Dieser Zusammenhang besteht, wenn zwischen zwei Komponenten Material ausgetauscht werden muss.

Zur Analyse der Produktstruktur werden die Zusammenhänge separat betrachtet. Durch eine Sortierung der Zeilen und Spalten ist es möglich, Komponenten zu Modulen zu clustern. Aufgrund der vier Zusammenhänge entstehen also auch entsprechend Disziplinen-spezifische Cluster.

	Komponente 1	Komponente 2	Komponente 3	Komponente 4	Komponente 5
Komponente 1		1 0 0 2			1 0 0 0
Komponente 2	1 0 0 2		1 1 0 2	2 2 0 0	
Komponente 3		1 1 0 2			
Komponente 4		2 2 0 0			0 1 0 2
Komponente 5	1 0 0 0			0 1 0 2	

	Legende		Zusammenhang ist:
räumlich	R	Energie	Erforderlich: (+2)
Information	I	Material	Unerwünschte: (-1)
	E		Erwünscht: (+1)
	M		Schädliche: (-2)
			Indifferent: (0)

Abbildung 11: DSM-Matrix nach Pimmler und Eppinger Prozessmodulen nach [PiEp (1994)]

Die DSM wurde in verschiedene Richtungen weiterentwickelt und für unterschiedliche Anwendungsbereiche adaptiert [LDB+ (2007)]. Neben der Analyse von Produktstruktur wird sie vor allem auch zur Planung von Organisationen und Aktivitäten angewandt [Br (2002)]. Browning beschreibt für solche Anwendungen den Unterschied zwischen statischen und zeitabhängigen DSMs [Br (2001)].

Die DSM wird nicht nur zur Analyse und Beherrschung von Komplexität in Produkten und Prozessen angewandt. Als ein weiteres, mögliches Optimierungsziel beschreiben bspw. Shpitalni und Stiasnie die Optimierung von Service-Dienstleistungen [ShSt (2010); ShSt (2011)]. Dazu werden Komponenten als zusammenhängend bewertet, wenn sie gemeinsam Fehler im Produkt verursachen. Dies ermöglicht die schnellere Eingrenzung der Fehlerursache oder aber auch den Austausch ganzer Module, denen ein Fehler zugeordnet wird.

Baldwin und Clark zeigen am Beispiel der Produktstruktur eines PCs nicht nur die Modularisierung, sondern vor allem auch die Funktion sogenannter „modular operators“ [BaCl (2000) - S.123-148]. Diese Operatoren sollen das Konzept der Produktionsanlage durch Aufteilen, Ersetzen, Erweitern etc. von Modulen weiterentwickeln [BaCl (2000) – S.221-350]. Dadurch kann die Produktarchitektur der Produktionsanlage direkt beeinflusst und optimiert werden.

Weyrich und Klein beschreiben in Ergänzung dazu verschiedene Möglichkeiten, durch eine Veränderung (Aufteilen etc.) und unterschiedliche Ansätze der Clusterung der Komponenten die Modulstruktur hinsichtlich der Wiederverwendbarkeit der Module zu optimieren [WeKl (2012a)]. Dadurch können zentrale Bereiche der Produktionsanlage (z.B. Steuerung) oder auch

disziplinenübergreifende Schnittstellen auf verschiedene Module aufgeteilt werden. Diese sind somit leichter im Engineering neuer Produktionsanlagen zu verwenden [WeKl (2012c)].

Alternativ dazu kann dem Problem der disziplinenübergreifenden Schnittstellen auch mit Hilfe einer Multi-Domain-Matrix (MDM) begegnet werden. Diese ist eine Erweiterung der DSM bzw. der Domain Mapping Matrix (DMM), mit deren Hilfe zwei Domänen (bspw. Komponenten und Funktionen) in Bezug gesetzt werden können. Lindemann et al. und Kissel et al. beschreiben durch die MDM den Einsatz der DSM über mehrere Domänen: Mechanische Komponenten, Technical Funktionen, Variablen, Software-Funktionen und Steuerungskomponenten [LMB (2009); KEB+ (2010) – S.185]. Dadurch ist es möglich, Zusammenhänge auch zwischen den Domänen darzustellen und somit disziplinenübergreifende Cluster oder Module zu bilden. Alternative Zusammenhänge bspw. in Bezug auf das Produktprogramm eines Unternehmens sind bei Kesper beschrieben [Ke (2012)]. Ziel ist es, durch eine Darstellung in der MDM, Entscheidungen über Produktvarianten zu objektivieren.

Sedchaicharn verknüpft die Ansätze der DSM zur Analyse der Produktstruktur mit dem von Albers und Matthiesen entwickelten Modell zur Verknüpfung von Gestalt- und Funktionsinformationen [AlMa (2002); Se (2010)]. Dadurch wird die Prinziplösung schon früh im Engineering-Prozess visualisiert.

Zur Analyse der Produktarchitektur ermöglicht die matrixbasierte Darstellung der DSM eine quantitative Bewertung der Modularität. Karl et al. beschreiben DSM-basierte Strukturkennzahlen zur Messung der Modularität von Produktarchitekturen [KRZ (2012)].

Modular Function Deployment – MFD

Erixon beschreibt 1998 die Methode *Modular Function Deployment* (MFD), die Entwickler bei der Identifikation einer optimalen Modulstruktur im Engineering-Prozess unterstützen soll [Er (1998); ErEr (1999)]. Das MFD zeichnet sich besonders durch die Integration der unternehmens- und kundenspezifischen Anforderungen an die Modulstruktur aus. Diese werden in Form von Modultreibern, also den internen und externen Auslösern für eine Modulbildung, systematisch durch die sogenannte *Modular Indication Matrix* (MIM) berücksichtigt. Mögliche Modultreiber sind beispielsweise die Produktdifferenzierung bzw. die Anpassbarkeit der Leistung des Produkts an die Spezifikation des Kunden oder aber auch die separate Testbarkeit einzelner Funktionen [ErEr (1999) – S.21]. Das Vorgehen zur Anwendung der Methode wird in [Abbildung 12](#) visualisiert.

Die MFD basiert analog zu der aus dem Qualitätsmanagement bekannten Methode *Quality Function Deployment* (QFD) [Ak (1992)] auf einer Korrelation zwischen den Produkteigenschaften und den Kundenanforderungen. Nach einer Zuordnung technischer Lösungen zu den aus der Analyse der Kundenanforderungen abgeleiteten technischen Funktionen werden mit Hilfe der Modultreiber alternative Modulstrukturen erarbeitet. Diesen werden die technischen Lösungen zugeordnet. Nach einer Bewertung der Modulstruktur werden die einzelnen Module hinsichtlich ihrer Montier- oder Fertigbarkeit untersucht [ErEr (1999) – S.29-41].

Abele et al. sehen einen Schwachpunkt der MFD in der rein kundenbezogenen, funktionsorientierten Sicht. Daher erweitern sie die Modultreiber um mögliche situative Aspekte

im Unternehmen wie geplante Technologiewandel, Bündelung von Produktionstechnologien, Verfügbarkeit von Lieferanten, Logistikaufwand und standortbezogene Kostenstrukturen [ABH (2009) – S.601].

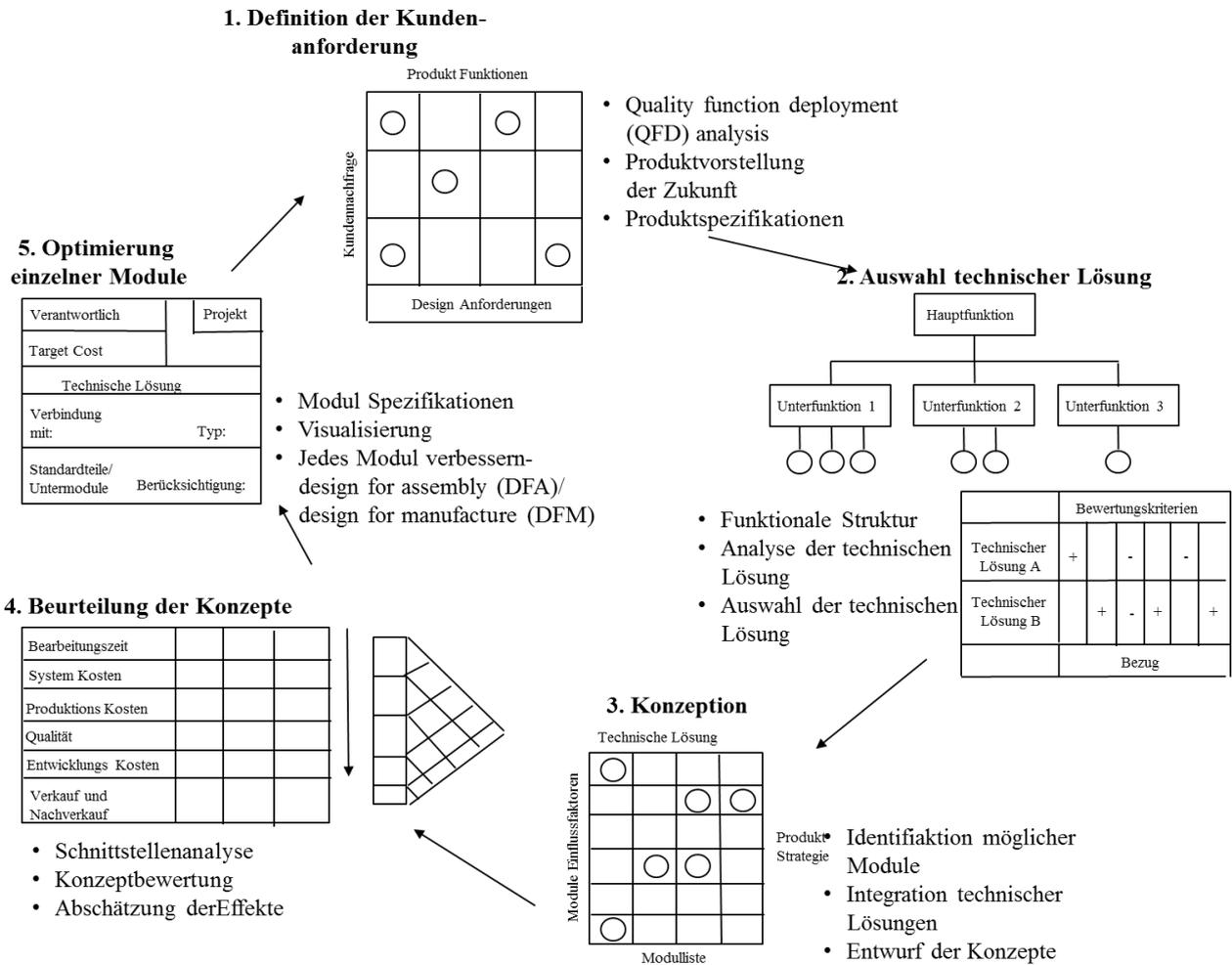


Abbildung 12: Vorgehen bei der Modularisierung durch MFD Prozessmodulen nach [ErEr (1999) – S.30]

Design for Variety - DfV

Die Methode *Design for Variety* (DfV), die von Martin und Ishii entwickelt wurde, zielt auf die Entwicklung einer gegenüber Veränderungen robusten Produktplattform ab [MaIs (2000)]. Die Methode baut wie die MFD auf einer Korrelation der Produkteigenschaften und (zukünftigen) Kundenanforderungen mittels einer modifizierten QFD auf [MaIs (2000) – S. 3-4). Basierend auf dieser Korrelation wird der *Generational variety index (GVI)* und der *Coupling Index (CI)* bestimmt. Zur Berechnung des GVI werden die Auswirkungen einer Veränderung auf eine Komponente bewertet und diese Bewertungen aufsummiert. Ein hoher Wert sagt aus, dass eine Komponente wahrscheinlicher und im größeren Maße von einer Änderung betroffen ist. Der CI ist das auf die interne Kopplung der Komponenten abzielende Gegenstück zum GVI. Ein hoher CI Wert sagt aus, dass eine Komponente wahrscheinlicher durch eine Veränderung an einer anderen Komponente verändert werden muss. Basierend auf dieser Analyse der internen und externen Abhängigkeiten der Komponenten einer Produktionsanlage werden verschiedene

Maßnahmen zur Bildung von Modulen innerhalb einer Produktplattform empfohlen [MaIs (2000) – S. 12-14; MaIs (2002)]:

- Neuordnung der Zuordnung von Funktionen zu Komponenten (z.B. Aufteilen von Funktionen, bei denen Änderungen zu erwarten sind)
- Festlegung der Spezifikation (z.B. einzelne Eigenschaften des Produktes als unveränderbar definieren)
- Reduktion interner Kopplungen (z.B. eindeutige Funktionszuordnung zu Komponenten)
- Erhöhung des Spielraums bei Veränderungen der Spezifikation (z.B. gezieltes Überdimensionieren änderungsanfälliger Funktionen)

Durch diese Maßnahmen sollen die Produktplattformen robust gegenüber den Veränderungen gestaltet werden. Dadurch soll der Aufwand der Veränderungen reduziert werden. Dem Problem der Datenbeschaffung bei der Analyse und Optimierung der Produktplattform begegnen Agard und Kusiak mit dem Einsatz von Data Mining Techniken [AgKu (2004)].

Modular Design Methodology - MDM

Die Methode von Stone basiert auf einer Analyse der Material-, Energie- und Informationsflüsse in der Produktionsanlage. Im Rahmen der *Modular Design Methodology* (MDM) werden demnach Sub-Funktionen einer Produktionsanlage zu Modulen zusammengefasst, wenn der Fluss zwischen ihnen folgenden Heuristiken entspricht [St (1997)] – S.46-67]:

- a. Dominanter Fluss
- b. Verzweigter Fluss
- c. Umwandlung oder Übertragung

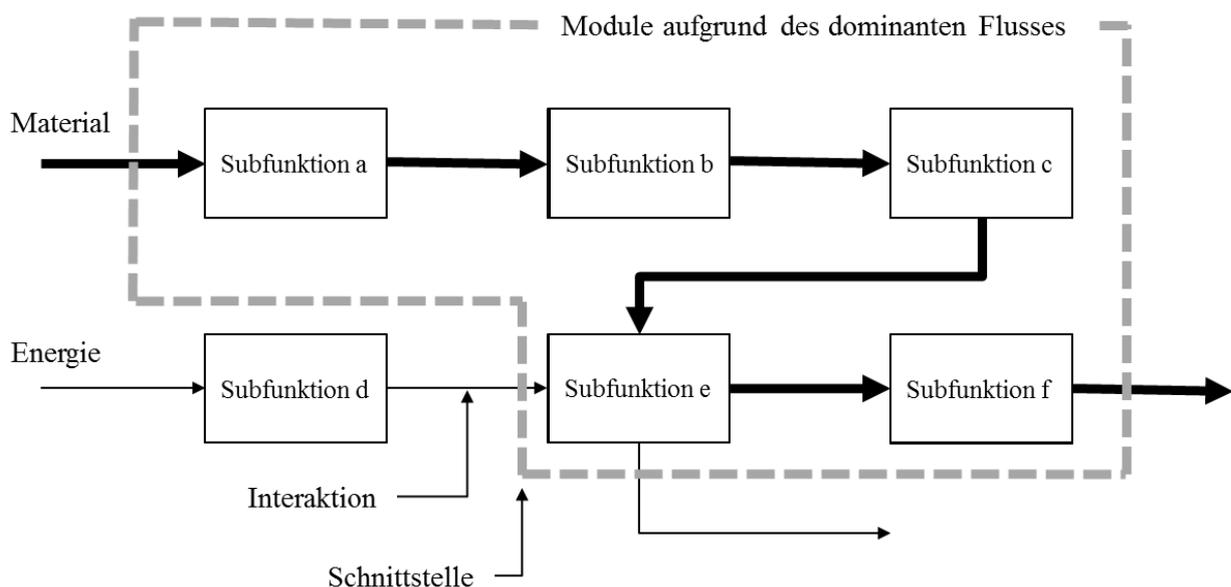


Abbildung 13: Modulbildung aufgrund eines dominanten Materialflusses Prozessmodulen nach [Sto (1997) – S.48]

Ein Modul ist nach der Heuristik a - Dominanter Fluss beispielsweise eine Reihenfolge an Sub-Funktionen einer Produktionsanlage, die durch einen unverzweigten Fluss miteinander verbunden sind (s. Abbildung 13). Verzweigen sich die Flüsse innerhalb eines Systems, werden

die Zweige gemäß der Heuristik b als Module angesehen. Die letzte Heuristik bezieht sich auf Sub-Funktionen, die einen Fluss umwandeln oder übertragen. Ob es sich dabei um eine einzelne umwandelnde Sub-Funktion oder eine Kombination aus einer umwandelnden und einer oder mehrerer übertragenden Sub-Funktionen handelt, ist für die Definition eines entsprechenden Moduls unerheblich. Zamirowski und Otto übertragen die MDM auf ganze Produktfamilien, indem sie nicht nur die Sub-Funktionen eines Produktes, sondern einer Produktfamilie analysieren [ZaOt (1999)].

Methodische Unterstützung der Systembildung - Metus

Die *Methodische Unterstützung der Systembildung* (METUS) wurde von Göpfert zur Modularisierung von Produkten, aber auch Organisationen, entwickelt [Gö (1998)]. Darin wird, wie in Abbildung 8, die Zuordnung von Funktionen zu Komponenten und von Komponenten zu Modulen übersichtlich dargestellt. Neben einer Allokation der Kosten und des Gewichtes auf die Module ermöglicht die METUS vor allem auch eine Einteilung der Komponenten gemäß ihrer Produktvarianz (Standard-, Varianten- oder Optionskomponenten). Entsprechende Komponenten können in Standardmodulen, also Modulen, die in jedem Produkt benötigt werden, oder optionalen Modulen zusammengefasst werden. Auf Basis dieser Entscheidung lässt sich nicht nur die Modulstruktur des Produktes, sondern auch die Struktur der Zulieferer optimieren bzw. ein „*Make or Buy*“-Konzept ableiten. In der Ableitung organisatorischer Fragenstellungen sowie in der Transparenz der METUS sehen industrielle Anwender die Vorteile der Methode [GöSt (2000), Eh (2011), Kr(2011)].

Methodik zur Entwicklung von Baukästen auf der Basis von konstituierenden Merkmalen

Arnoscht beschreibt eine Methodik zur Entwicklung von Baukästen auf der Basis von konstituierenden Merkmalen [Ar (2011), SAN (2007)]. Ziel seiner Methode ist es, die interne Variantenvielfalt eines Baukastens durch die Definition konstituierender oder einfacher gesagt grundlegender Merkmale im Produkt oder Fertigungsprozess zu reduzieren. Bei der Identifikation dieser Merkmale werden die externen Abhängigkeiten (z.B. Kundenanforderungen) sowie die internen Zusammenhänge der Merkmale (Beeinflussung von/durch andere(n) Merkmale(n)) berücksichtigt. Hat ein Merkmal geringe, externe Abhängigkeiten, eine hohe Beeinflussung von anderen Merkmalen und eine geringe Beeinflussung durch andere Merkmale, ist eine Einschränkung der Varianz durch die Definition konstituierender Merkmale möglich [SAA (2012) – S.324-325]. Die Identifikation der Merkmale ist ein Bestandteil des von Schuh et al. beschriebenen Produktarchitektur-Entwicklungsprozesses. In weiteren Schritten werden u.a. die Merkmale hierarchisiert und Modul-Varianten festgelegt [SAA (2012)].

Ergänzende Ansätze zur Optimierung der Produktarchitektur

Eine wichtige Voraussetzung für die Modularisierung von Produkten und Produktionsanlagen bspw. mittels QFD und DfV ist die Erfassung von Kundenanforderungen. Bender et al. stellen in ihrem Praxisbericht die Erfassung und systematische Abbildung kundenseitiger Anforderungen für komplexe Produkte vor [BLS (2009)]. Daneben spielt natürlich auch die Analyse der Situation in einem Unternehmen eine entscheidende Rolle. Lechner et al. beschreiben einen Ansatz zur Bewertung der Kosten und Auswirkungen durch Variantenvielfalt im Unternehmen auf Basis des *Variety-driven Activity-based Costing* [LKW (2011)]. Browning und Eppinger stellen ein Vorgehen zur Bestimmung des Einflusses der Produktarchitektur auf die Kosten und

das Risiko im Engineering vor [BrEp (2002)]. Als Konsequenz ihrer Untersuchung schließen sie u.a., dass gerade wiederholende und kaskadierte Überarbeitungstätigkeiten – bspw. durch einen Konzeptveränderung – einen großen Einfluss auf die Kosten und das Risiko im Engineering-Prozess haben [BrEp (2002) – S.440].

Der Nutzen der Modularisierung liegt, wie bereits beschrieben, in der Beherrschung der Komplexität durch eine Reduktion der Varianten bzw. der internen Ursachen für Varianten. Neben den bereits beschriebenen alternativen Vorteilen einer Modularisierung, wie zum Beispiel einer eindeutigen Zuordnung von Fehlerursachen zu Modulen für die Wartung und Instandhaltung [ShSt (2010); ShSt (2011)], beschreiben Fleischer et al. Modularisierung als eine Möglichkeit zur Analyse und Vergleichbarkeit komplexer Produkte und Produktionsanlagen [FWS+ (2007); FSBW (2007)]. Durch die Modularisierung von Produktionsanlagen kann deren Verfügbarkeit bzw. das Ausfallverhalten besser bestimmt und die Leistung der Module untereinander verglichen werden. Fleischer et al. haben dafür den Aufbau einer entsprechenden Datenbasis beschrieben [FSBW (2007)].

3.1.1.1 Auswahl der Modularisierungsmethode

Zum Vergleich von Modularisierungsmethoden entwickelten Daniilidis et al. einen Ansatz zur Klassifizierung [DEEL (2011)]. Darin werden die Methoden hinsichtlich ihrer Eignung für die Moduldefinition in unterschiedlichen Phasen des Produktlebenszyklus, für eine unterschiedliche Varianz der Produkte (z.B. Einzelprodukt oder Produktprogramm) und für den Einsatz je nach Entstehungsart (Überarbeitung/ Neuentwicklung) eingeordnet. Diese Kriterien sind Grundlage der nachfolgenden Auswahl der Modularisierungsmethode, wurden aber um die Faktoren Änderbarkeit durch den Anwender, den Vergleich mehrerer Anlagen und die Automatisierbarkeit der Modularisierung ergänzt. Diese Anforderungen an die Modularisierungsmethode werden in Kapitel 4.1 näher erläutert. Die für die Bewertung relevanten Kriterien sind in Abbildung 14 aufgeführt und erläutert.

Anwendung im Lebenszyklus	• Ansatz ist nur in einer bestimmten oder allen Phasen des Produktlebenszyklus einsetzbar
Überarbeitung / neue Anlage	• Ansatz kann nur bei der Überarbeitung oder auch bei dem Engineering neuer Produktionsanlagen eingesetzt werden
Varianz der modularisierten Produkte	• Ansatz erlaubt die Modularisierung von Anlagen aus unterschiedlichen Anwendungsfeldern
Änderbarkeit der Komplexität der Module	• Ansatz ermöglicht die Änderung der Komplexität der Module, um das optimale Maß mit Blick auf die Wiederverwendung und den Umfang der Module zu identifizieren
Vergleich zwischen Produktionsanlagen	• Ansatz ermöglicht es, mehrere Produktionsanlagen miteinander zu vergleichen
Automatisierbarkeit der Modularisierung	• Ansatz ermöglicht die Automatisierung der Modularisierung

Abbildung 14: Kriterien zur Bewertung der Modularisierungsansätze

Die vorgestellten Ansätze wurden in verschiedene Richtungen weiterentwickelt, so dass eine eindeutige Charakterisierung und Bewertung nur mit erheblichem Aufwand möglich ist. Daher wurden für die Bewertung die grundlegenden Ansätze betrachtet. Die Ergebnisse der Bewertung sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Bewertung basiert auf den Arbeiten von Kipp, Bless, Daniilidis et al. sowie der subjektiven Bewertung des Autors [Ki (2012), Bl (2011), DEEL (2011)].

Die *Design Structure Matrix – DSM* eignet sich hauptsächlich im Engineering und wird weniger im weiteren Lebenszyklus eingesetzt [DEEL (2011)]. Einige Erweiterungen zielen jedoch auch auf einen Einsatz im Service etc. ab [ShSt (2011)]. Die DSM dient der Analyse bestehender Produktstrukturen [DEEL (2011)] und kann bei Überarbeitungen von Produktionsanlagen aus unterschiedlichen Branchen eingesetzt werden. Die Komplexität der Module kann beispielsweise durch die Änderung der Modulanzahl angepasst werden und die Modularisierung durch Algorithmen unterstützt automatisiert durchgeführt werden. Durch eine Erweiterung der Matrix können mehrere Produktionsanlagen verglichen werden.

Die Methode *Modular Function Deployment – MFD* wird auch aufgrund der Einsetzbarkeit zur Qualitätsbewertung im gesamten Lebenszyklus der Anlage eingesetzt [DEEL (2011)]. Im Vordergrund stehen laut Blees die produktstrategischen und nicht die technisch-funktionalen Beziehungen der Produktionsanlage [Bl (2011)]. Die Methode wird hauptsächlich bei der Überarbeitung einzelner Produktionsanlagen eingesetzt [DEEL (2011)]. Aufgrund der komplexen Bewertungsabläufe sind die Automatisierung sowie ein direkter Vergleich der Anlagen schwierig. Durch die Modultreiber können die Module jedoch gut beeinflusst werden. Insbesondere durch die Arbeit von Bless kann die Methode *Design for Variety – DfV* im gesamten Lebenszyklus eingesetzt werden [Bl (2011)]. Die Schwächen der Methode liegen in der Automatisierbarkeit sowie in den mangelnden Einsatzmöglichkeiten im Engineering neuer Produktionsanlagen [DEEL (2011)].

Methode	DSM	MFD	DfV	MDM	Metus	Arnoscht
Anwendung im Lebenszyklus						
Überarbeitung / neue Anlage						
Einzel-Produkt/ Produktprogramm						
Änderbarkeit der Komplexität der Module						
Vergleich zwischen Produktionsanlagen						
Automatisierbarkeit der Modularisierung						
Gesamt						



kaum erfüllt

bedingt erfüllt

weitestgehend erfüllt

Kriterium erfüllt

Tabelle 1: Bewertung der Modularisierungsmethoden hinsichtlich der Erfüllung der Anforderungen

Die Methode *Modular Design Methodology* – *MDM* wird laut Kipp hauptsächlich im Engineering einzelner Anlagen zur Aufteilung von Engineeringprozessen angewendet [Ki(2012)]. Zudem sieht er Schwierigkeiten in der Verständlichkeit der Methode sowie der variantengerechten Gestaltung von Funktionsstruktur und Komponenten. Daraus lässt sich schließen, dass die Methode mit Blick auf die Automatisierbarkeit zur Identifikation des Maßes an Komplexität der Module, bei dem diese die Funktion des Produktionsprozess erfüllen, nur bedingt geeignet ist.

Die *Methodische Unterstützung der Systembildung* – *Metus* eignet sich sehr gut, um komplexe Produktstrukturen zu optimieren und zeichnet sich vor allem durch die gute visuelle Unterstützung und die Verständlichkeit der Modularisierung aus [Ki(2012); Bl (2011)]. Die Methode wird hauptsächlich bei der Überarbeitung bestehender Produktprogramme eingesetzt [Go (1998)]. Der Prozess der Modulidentifikation wird durch Bewertungen unterstützt, die einen Vergleich zwischen Anlagen ermöglichen. *Metus* eignet sich jedoch nur bedingt für eine automatische Modulidentifikation.

Die *Methodik zur Entwicklung von Baukästen auf der Basis von konstituierenden Merkmalen nach Arnoscht* eignet sich insbesondere zur Optimierung von Produktprogrammen. Die Identifikation konstituierender Merkmale lässt eine Vergleichbarkeit ähnlicher Produkte zu. Der

hier beschriebene Einsatz zielt jedoch auf ein weiteres Spektrum unähnlicher Produktionsanlagen ab. Daher wird die Definition von konstituierenden Merkmalen und damit die Vergleichbarkeit der Module für diesen Anwendungsfall kaum erfüllt. Zudem lässt sich das Vorgehen nur bedingt automatisieren.

Aus der Bewertung der Methoden und insbesondere den speziellen Anforderungen, die sich aus der Modularisierung von Produktionsanlagen ergeben, wurde der Schluss gezogen, dass eine Weiterentwicklung der Methode „*Design Structure Matrix*“ sinnvoll ist. Daher wird in den nachfolgenden Kapiteln die Adaption dieser Methode beschrieben. Abweichend von dem Ansatz von Pimpler und Eppinger, die vier unterschiedliche Arten von Zusammenhängen betrachtet haben, wird nachfolgend nicht zwischen räumlichem Zusammenhang, Energiefluss, Stofffluss und Materialfluss differenziert. Dies geschieht nicht nur aus Gründen der Übersichtlichkeit, sondern vor allem aus der Anforderung, mechatronische, d.h. disziplinenübergreifende, Module zu definieren.

3.1.1.2 Ansätze zur Weiterentwicklung der Methode DSM

Aufbauend auf der Bewertung der Modularisierungsansätze und der resultierenden Auswahl der *Design-Structure Matrix* wurden sowohl die mathematische Optimierung der Modularisierung durch Sortieralgorithmen, als auch die Bewertung des Modularisierungsergebnisses untersucht, um deren Anwendbarkeit für die Definition wiederverwendbarer Module im Engineering von Produktionsanlagen zu verbessern. Die Anwendung der Methode soll zeigen, ob die Weiterentwicklung den gewünschten Erfolg gebracht hat. Die Ergebnisse dieser Arbeiten sind nachfolgend zusammenfassend dargestellt.

Sortieralgorithmen

Module werden in der *Design-Structure Matrix* durch die Clusterung von Werten einer Matrize gebildet. Um in komplexen Matrizen Module definieren zu können, werden die Komponenten, die in Zeilen und Spalten dargestellt sind, so sortiert, dass abhängige Komponenten zusammengefasst werden können. Für die Sortierung der Matrix zur Analyse der Abhängigkeiten zwischen Komponenten eignen sich insbesondere folgende Algorithmen:

- Reserve Cuthill McKee Algorithmus
- Lösung des P-Median Problems nach Kusiak (PMM)

Der Reserve CuthillMcKee-Algorithmus zielt auf eine Reduktion der Bandbreite der Matrix ab. Das heißt, es werden so lange Permutationen der Matrix gebildet, bis die Differenz (θ_i) der Indizes der Spalten für das Element der Hauptdiagonalen der Zeile i und das erste Element, das nicht null ist, der gleichen Zeile über alle Zeilen hinweg minimiert ist. Das Optimierungsproblem [CuMc (1969)] lautet

$$\min \sum_{i=1}^N \theta_i \quad \text{für alle } i = 1, \dots, N \quad (1)$$

Unter Berücksichtigung folgender Definitionen:

- N Anzahl der Komponenten

- θ_i Differenz der Indizes der Spalten für das Element der Hauptdiagonale der Zeile i und das erste Element, das nicht null ist, derselben Zeile i

Das Matlab-Modell des Cuthill-McKee ist in Anhang A dargestellt [Ge (1981); GMS (1992)].

Das Modell PMM zielt auf eine Lösung des P-Median-Problems ab und kann als Teilproblem des Cellular Manufacturing – also der Zuordnung von Fertigungsaufträgen auf Produktionsanlagen betrachtet werden [WaRo (1994)]. Das P-Median-Problem soll die Entfernung zwischen Knoten unter Berücksichtigung einer Gewichtung minimieren. Das klassische Beispiel der Wahl von Standorten für Läger, um die Transportwege zu Lieferorten zu minimieren, kann für den Fall der Modularisierung übertragen und angepasst werden. Ziel ist es, alle Komponenten der Matrix so auf eine gewisse Anzahl von Funktionen zu verteilen, dass die Komponenten, die stark (g_j) voneinander abhängen, nah (d_{ij}) zusammen dargestellt werden. Ob eine Komponente zu einem Modul gehört, wird durch die binäre Entscheidungsvariable x_{ij} angegeben. Das Optimierungsproblem [OhNe (2012)] lautet somit:

$$\min z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} g_j d_{ij} x_{ij} \quad (2)$$

Unter Berücksichtigung folgender Definitionen:

- p Anzahl der ausgewählten Modul oder Mediane
- I Menge der möglichen Module, $I = \{1, \dots, l\}$
- J Menge der möglichen Komponenten, $J = \{1, \dots, m\}$
- M eine genügend große Zahl $> l \cdot m$
- d_{ij} Entfernung $d[i, j]$ vom Modul $i \in I$ zu Komponente $j \in J$
- g_j Gewichtung der Abhängigkeit $j \in J$
- x_{ij} binäre Entscheidungsvariable, die angibt, ob Komponente j in Modul i enthalten ist ($x_{ij} = 1$) oder nicht ($x_{ij} = 0$)
- y_i binäre Entscheidungsvariable, die angibt, ob Modul i gebildet wird ($y_i = 1$) oder nicht ($y_i = 0$)

Die Nebenbedingungen des Optimierungsproblems lauten:

$$\sum_{i \in I} x_{ij} > 1 \quad \text{für alle } j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} \leq M y_i \quad \text{für alle } i \in I \quad (4)$$

$$\sum_{j \in J} y_i = P \quad (5)$$

$$x_{ij}, y_i \in \{0; 1\} \quad \text{für alle } i \in I; j \in J \quad (6)$$

Gemäß Nebenbedingung (3) muss jede Komponente j genau mindestens einem Modul i zugeordnet werden. Die Nebenbedingung (4) prüft das Vorhandensein eines Moduls, wenn ihm

eine Komponente zugeordnet wird. Durch die dritte Nebenbedingung (5) wird die Anzahl der Module bzw. Mediane festgelegt.

Anders als in der formalen Beschreibung des P-Median-Problems werden bei Kusiak nicht Entfernungen zwischen Komponenten minimiert, sondern Abhängigkeiten zwischen den Komponenten maximiert. Der auf die Problemstellung angepasste Ansatz zur Lösung des PMM nach Kusiak [Ku(1987); He(2013)_MA] lautet daher:

$$\max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n s_{ij} x_{ij} \quad (7)$$

Unter Berücksichtigung folgender Definitionen:

- n Anzahl der Komponenten
- p Anzahl der Module
- s_{ij} Ähnlichkeit zwischen Komponente i und Komponente j ($s_{ij} \geq 0$ für alle $i, j=1, \dots, n$ und $s_{ij}=0$ für alle $i \neq j=1, \dots, n$)
- x_{ij} binäre Entscheidungsvariable, die angibt, ob Komponente i in Modul j enthalten ist ($x_{ij} = 1$) oder nicht ($x_{ij} = 0$)
- a_{ij} binäre Entscheidungsvariable der Matrix A , die angibt, ob Komponente i und Komponente j in demselben Modul enthalten sein dürfen ($a_{ij} = 0$) oder nicht ($x_{ij} = 1$)
- \max_n maximale Anzahl der Komponenten eines Moduls
- \min_m minimale Anzahl der Komponenten in einem Modul

Die Nebenbedingungen des Optimierungsproblems lauten:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \text{für alle } i=1, \dots, n \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{jj} = p \quad (9)$$

$$\min_n x_{jj} \leq \sum_{i=0}^n x_{ij} \leq \max_n x_{jj}, \quad \text{für alle } j=1, \dots, n \quad (10)$$

$$\sum_{k=0}^n ((x_{ji} a_{jk} + x_{ki} a_{ki}) \leq 1) \quad \text{für alle } i, j=1, \dots, n \quad (11)$$

$$x_{ij} = 0, 1 \quad \text{für alle } i, j=1, \dots, n \quad (12)$$

Die Nebenbedingung (8) stellt sicher, dass jede Komponente einem Modul zugeordnet wurde. Die notwendige Anzahl der Module wird in Nebenbedingung (9) spezifiziert. Durch die Nebenbedingung (10) wird sichergestellt, dass die Anzahl der Komponente i , die zu jedem Modul j zugeordnet werden, in den vorgegebenen Schranken liegt. Neben dieser Einführung von Schranken besteht eine weitere Erweiterung des Modells in der Möglichkeit des gegenseitigen

Ausschlusses der Zuordnung von Komponenten in einem gemeinsamen Modul, wenn dieses nicht gewünscht ist. Dazu wird eine neue Matrix A und die Nebenbedingung (11) eingeführt. Nebenbedingung (12) stellt die Vollständigkeit sicher. Das OPL-Modell des PMM ist in Anhang B in dargestellt. Bei einer Matrix, in der die Abhängigkeiten bereits gewichtet wurden, entspricht die Matrix der notwendigen Ähnlichkeitsmatrix, andernfalls muss diese erst erstellt werden. Den Ähnlichkeitskoeffizienten definiert Kusiak [Kusi87] wie folgt:

$$s_{ij} = \sum_{k=1}^n \delta(a_{ik}, a_{jk}) \quad i \neq j \quad (13)$$

Unter Berücksichtigung folgender Definitionen:

- $\delta(u,v) \begin{cases} 1, & \text{wenn } u = v \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$ ist ein Kroneckerprodukt
- a_{ij} Element der Komponentenmatrix S
- n Anzahl der Komponenten

Aufbauend auf dem Ähnlichkeitskoeffizient nach Kusiak erweitern Wei und Kern den Ähnlichkeitskoeffizienten dahingehend, dass eine Ähnlichkeit der Komponenten nicht in der Summation um „1“ sondern „n-1“ resultiert. Das heißt, ähnliche Komponenten werden stärker gewichtet [WaRo (1994)].

Ein alternativer Ansatz zur Lösung des P-Median-Problem ist der Mixed Boolean Pseudo-Boolean Model. Dieser basiert auf einer „Mixed Integer Linear Programming“-Formulierung. Praktische Anwendung findet Lösungsalgorithmen für diese Formulierung beispielsweise bei einer mittelfristigen Produktionsplanung, d.h. der Zuteilung der Kundenbedarfe zu vorhanden Produktionsressourcen für einen entsprechenden Planungszeitraum [GKS (2012), He (2013)_MA].

Ansätze zur Prüfung der Wiederverwendbarkeit

Eine Anforderung für die Definition wiederverwendbarer Module ist der Identifikation des optimalen Maßes der Komplexität. Um verschiedene Modularisierungsergebnisse der DSM zu vergleichen und mögliche Maßnahme zu Erhöhung der Wiederverwendbarkeit zu bewerten, sollten objektive Kriterien identifiziert werden, die auch die Analyse von Modularisierungen komplexer Anlagen ermöglichen.

Kriterium	Beschreibung	Optimierung
Machine Utilisation	Geschlossenheit der Module	Maximierung
Off Diagonal Voids	Dezentralität der Module	Maximierung
Proportion of Exceptional Elements	Schnittstellen zwischen den Modulen	Minimierung

Tabelle 2: Bewertungskriterien für die Prüfung der Wiederverwendbarkeit der Module

Das mathematische Optimum der Zielfunktion eignet sich nur bedingt für die Analyse, da das Maß keinen Bezug zu anwendungsbezogenen Rahmenbedingungen (dezentrale Module,

Modulanzahl) herstellt. Aufgrund der Berechnung der Ähnlichkeitskoeffizienten können die resultierenden Werte vom Anwender nicht interpretiert werden. Im Rahmen weiterführender Untersuchungen wurden die in Tabelle 2 aufgeführten Kriterien zur Bewertung der Modulstruktur identifiziert [LYL (2010); AkKr (1998); He(2013)_MA].

Das Kriterium *Machine Utilisation* (MU) beschreibt den Anteil der Komponenten eines Moduls, die voneinander abhängig sind, bezogen auf alle Komponenten innerhalb dieses Moduls. MU drückt also die Geschlossenheit der Module aus. Das Kriterium *Off Diagonal Voids* (ODV) beschreibt den Anteil aller unabhängigen Komponenten außerhalb der Module bezogen auf alle Abhängigkeiten außerhalb der Module. Damit kann ODV als Maß für die Dezentralität der Produktionsanlage nach der Modularisierung angesehen werden. Die *Proportion of Exceptional Elements* (PE) drückt den Anteil der Abhängigkeiten außerhalb der Module bezogen auf alle Abhängigkeiten aus und ist somit ein Maß für die Schnittstellen zwischen den Modulen. Die Kriterien sind wie folgt definiert [LYL (2010); AkKr (1998); He(2013)_MA]:

$$MU = \frac{N_1^{In}}{(N_1^{In} + N_0^{In})} \quad (14)$$

$$ODV = \frac{N_0^{Out}}{(N_1^{Out} + N_0^{Out})} \quad (15)$$

$$PE = \frac{N_1^{Out}}{(N_1^{In} + N_1^{Out})} \quad (16)$$

Unter Berücksichtigung folgender Definitionen:

- N_1^{In} Anzahl aller abhängigen Komponenten innerhalb eines Moduls
- N_0^{In} Anzahl aller unabhängigen Komponenten innerhalb eines Moduls
- N_1^{Out} Anzahl aller abhängigen Komponenten außerhalb eines Moduls
- N_0^{Out} Anzahl aller unabhängigen Komponenten außerhalb eines Moduls

Die Kriterien erlauben dem Anwender die Interpretation und den Vergleich zwischen verschiedenen Modularisierungen.

3.1.2 Systematisierung von Modulen

Um passende Module schnell im Engineering von Produktionsanlagen zu identifizieren, müssen die Module bspw. in einem Baukasten systematisiert werden. Baukastensysteme finden in der Industrie vor allem bei der Konfiguration von Produkten und damit auch stark standardisierten Produktionsanlagen Einsatz [u.a. Vo(2009), Teamtechnik (2013)]. Allgemein wird zwischen Funktions- und Fertigungsbausteinen unterschieden [PFBG (2007) – S 663]. Dabei sind Fertigungsbausteine aus Sicht der Produktion zusammengefasste Komponenten. Funktionsbausteine fassen Komponenten zusammen, die eine Funktion im Produktionsprozess erfüllen, und entsprechen daher der Sichtweise des Entwicklers und des Kunden.

Funktionen, wie sie zur Beschreibung eines Produktionsprozesses verwandt werden, eignen sich laut Weyrich et al. zur Systematisierung von Modulen [WeKl (2012b), WKLW (2011b)]. Wichtige Aspekte liegen in der intuitiven Nutzung und Verständlichkeit durch den Anwender, aber auch im Komplexitätsgrad. Kleinere funktionale Einheiten und damit auch kleinere Module

reduzieren den Nutzen durch die Wiederverwendung. Werden darüber hinaus lösungsneutrale, standardisierte Funktionskataloge genutzt, können die Module, die einer Funktion zugeordnet werden, untereinander ausgetauscht werden. Dies ermöglicht es, aus den Modulen aufgebaute Konzepte für Produktionsanlagen durch den Austausch einzelner Module zu optimieren. Als Basis für solche Kataloge schlagen Weyrich et al. die Montage- und Handhabungsfunktionen der VDI Richtlinie 2860 sowie die Fertigungsfunktionen der DIN 8580 vor [VDI 2860, DIN 8580]. Sind solche Kataloge nicht vorhanden, kann die Ähnlichkeit zwischen Funktionen auch auf Basis einer formalen Prozessbeschreibung berechnet werden. Dies unterstützt die Modularisierung komplexer Systeme und die Austauschbarkeit von Modulen im Engineering neuer Produktionsanlagen [PDW (2012)].

Der Aspekt, dass Engineering-Prozesse für komplexe, mechatronische Systeme durch eine Funktionszuordnung zerlegt und dadurch die Komplexität des Engineering beherrscht werden kann, wurde ebenso von van Beek et al. beschrieben [BET (2010)]. Verschiedene Ansätze, die dazu dienen, die weitere Ausgestaltung dieser weniger komplexen Module zu unterstützen, sind in der Literatur beschrieben. Herfeld nutzt Funktionen, um Komponenten so zu verknüpfen, dass sie in Konstruktion und der numerischen Simulation weiter ausgestaltet werden können [He (2007)]. Einen Ansatz zur Unterstützung der Zuordnung von Modulen zu Funktionen beschreiben Kreimeyer et al., indem sie eine Methode zur Prozessbeschreibung (Ereignisgesteuerte Prozesskette - EPK) mit einer matrixbasierten Modularisierungsmethode (DSM bzw. MDM) verbinden. Die boolesche Logik der EPK wird dazu in einer Domain der MDM abgebildet. Dadurch können Prozesse direkt in der Matrix abgebildet und die Module Funktionen zugeordnet werden [KBGL (2009)]. Auch in der objektorientierten Programmierung, die neben Anwendungen aus der Informatik auch im Rahmen der Programmierung von SPS eingesetzt wird, findet eine Funktionszuordnung statt [WPLL (2012)].

Dem Ansatz, möglichst komplexe funktionale Einheiten zu untersuchen, stehen die Möglichkeiten standardisierter, kleiner Module entgegen. Lüder et al. beschreiben den Ansatz der Wiederverwendung kleinster, mechatronischer Einheiten [LFW+ (2010)]. Jansens Methode basiert auf einer Zerlegung oder Partitionierung von mechatronischen Systemen in Teilfunktionen [Ja (2006)]. Durch eine weitreichende Zerlegung ist es möglich, zu entscheiden, ob eine Funktion mechanisch, elektrisch oder informationstechnisch umgesetzt wird und wie die funktionserfüllenden Module anzuordnen sind. Weiterführende Arbeiten zerlegen Prozessfunktionen in kleinste Funktionen, denen definierte Grundelemente und damit Gestaltinformationen zugeordnet sind. Durch diese ist es möglich, einen ersten Entwurf zur Gestalt aus den zerlegten Funktionen abzuleiten, [Se (2010)] bzw. sie entwickeln mechatronische Standardelemente, aus denen eine Automatisierungslösung aufgebaut werden kann [BöAm (2010)].

Im Rahmen der Förderprojekte Förderal und Aquimo wurden Fragenstellungen der Gestaltung von Baukästen und der Einbindung in den Engineering-Prozess ebenso behandelt. Förderal hatte zum Ziel, ein baukastenbasiertes, mechatronisches Engineering von Produktionsanlagen unter Berücksichtigung des Einsatzes verschiedener Engineering-Tools zu ermöglichen [Li (2004)]. Darauf aufbauend wird im Aquimo-Projekt (Adaptierbares Modellierungswerkzeug und Qualifizierungsprogramm für den Aufbau firmenspezifischer mechatronischer Engineering-prozesse) eine Methode und ein Werkzeug zum Entwurf gemeinsamer Lösung und in interdisziplinären Teams entwickelt [Li(2010)]. Dabei befasst sich das Aquimo-Projekt mit der

Integration von Simulation zur Optimierung der disziplinenübergreifenden Abstimmung im Engineering-Prozess [RMV (2010)].

Des Weiteren werden Funktionen zur Systematisierung von SPS-Programmen genutzt. In diesem Bereich bestehen auch Ansätze der Zerlegung von SPS Programmen in Funktionsblöcke durch die Nutzung von verknüpfenden Technologien durch Ontologien [RDK (2009)]. Ontologien dienen dazu, komplexes Wissen bspw. über Produktionsanlagen zu beschreiben und damit auswertbar zu machen [StSt (2009)]. Die formale Beschreibung des Wissens sowie die Interferenz- und Integritätsregeln erlauben es Schlussfolgerungen zu ziehen und die Konsistenz zu prüfen. Für das Beispiel des Engineering einer Produktionsanlage auf Basis der Wiederverwendung könnte geschlossen werden, dass zwei Module (Roboter und Vakuum-Sauggreifer) ein weiteres Modul (Drucklufterzeugung) bedingen. Andernfalls kann über die Integritätsregeln festgestellt werden, dass die Modulauswahl nicht konsistent ist. Gerade in komplexen Systemen können die so bereitgestellten Informationen helfen, geeignete Module auszuwählen [StSt (2009) – S.221 ff.] oder auch geeignete Parameter bei der Inbetriebnahme komplexer Anlagen einzustellen [Ko (2012)].

Bengel und Verl beschreiben einen Ansatz zur Rekonfiguration von Fertigungssystemen auf Basis von werkstückgebundenen Informationen [BeVe (2010)]. Fertigungsbezogene Eigenschaften werden in der Entwicklung von Einzel- und Kleinserien definiert. Auf Basis dieser Informationen werden geeignete Fertigungsschritte durch Ontologien ausgewählt und Fertigungsparameter vorgegeben. Dieser Ansatz führt dazu, dass Fertigungsprozesse in standardisierten Fertigungssystemen automatisiert geplant, durch Simulation abgesichert und durchgeführt werden können. Weitere ontologiebasierte Ansätze unterstützen bei der verteilten Entwicklung, ob Schnittstellen zwischen Modulen geändert werden müssen bzw. welche Module von einer Änderung in einem Modul betroffen sind [RaTh (2012)].

3.1.3 Fazit - Aufbau der Wissensbasis und Definition von Modulen

Eine Methode, die wiederverwendbare Module in bestehenden Produktionsanlagen definiert oder gezielt spezifiziert und die den Anforderungen des Engineering von Produktionsanlagen entspricht, so dass diese komplexe Funktionen in der Produktionsanlage erfüllen können, ist nicht bekannt. Die Modularisierung von Produktionsanlagen aus unterschiedlichen Gewerken in Verbindung mit Fragestellungen des Variantenmanagements ist derzeit noch nicht wissenschaftlich untersucht [FFV (2012b)].

Die beschriebenen Modularisierungsansätze zielen auf eine Reduktion der (internen) Ursachen für Variantenvielfalt und damit auf eine Beherrschung der Komplexität ab. Gerade vor dem im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Fokus auf Wiederverwendung von Modulen kann keine Methode aus dem Stand der Technik ausgewählt werden, die eindeutige Vorteile für die Definition wiederverwendbarer Module und die geeignete Granularität bietet. Dies entspricht auch der Sicht von Urbas et al., die für die Definition von wiederverwendbaren Modulen in der Prozessindustrie, folgendes feststellt:

„aus Sicht eines Baukastens [...] sind sowohl größere als auch kleinere Modulschnitte vorstellbar. Eine einheitliche Methodik fehlt; der Vergleich mit aktuellen Anstrengungen zur Definition einer methodischen Entwicklungsmethodik und Beschreibungs-

*systematik für mechatronische Module lässt erheblichen Forschungsbedarf vermuten.“
[UDKO (2012) S. 618]*

Auch Possel-Dölken beschreibt aus Sicht eines Zulieferers für den Sondermaschinenbaus das Fehlen eines Ansatzes zur Definition von Modulen analog zu den Gestaltungsmustern, die in der objektorientierten Programmierung eingesetzt werden [Po(2010)]. Diese Gestaltungsmuster oder Module sollen die Funktionen in Produktionsanlagen abbilden. Gerade in der Definition von Modulen in einer geeigneten Granularität, die die Wiederverwendung im Engineering von Produktionsanlagen ermöglicht und dem Anwender durch eine Erleichterung bei der Konzeption der Lösung nutzt, liegt eine besondere Schwierigkeit, da die Standardisierung für prozessspezifische Produktionsanlagen (bspw. im Sondermaschinenbau) mit erheblichem Aufwand und Einschränkungen in der Gestaltung neuer Anlagen verbunden ist [Po(2010)].

Dies zeigt, dass die bestehenden Ansätze für die Definition von im Engineering von Produktionsanlagen wiederverwendbaren Modulen weiterentwickelt werden müssen. Eine Auswahl, welche Methode sich für eine Weiterentwicklung eignet, ergab die Methode DSM, auf die sich im weiteren Verlauf der Arbeit fokussiert wird. Darüber hinaus wurden Ansätze zur Weiterentwicklung der Methode DSM vorgestellt. Deren Eignung soll Rahmen der Anwendung analysiert und verifiziert werden.

Ein Ansatz zur Systematisierung von Modulen auf Basis von Modulen wurde u.a. von Weyrich et al. beschrieben [WeKl (2012b), WKLW (2011b)]. Alternative Systematisierungsansätze befassen sich vor allem mit der Nutzung von Ontologien. Bislang existiert kein Vorgehensbeschreibung und kein Werkzeug für die Systematisierung von wiederverwendbaren Modulen für das Engineering von Produktionsanlagen. Zur Auswahl der Module existiert im Gegensatz dazu eine Vielzahl domänenspezifischer Produktkonfiguratoren [Marktführer(2011)]. Diese domänenspezifischen Lösungen eignen sich nicht oder nur bedingt für die Anforderungen im Engineering von kundenspezifischen Produktionsanlagen.

3.2 Engineering neuer Anlagen

Kundenspezifische Produktionsanlagen zeichnen sich wie bereits beschrieben durch eine hohe Komplexität aus. Die technologische Entwicklung sowie die zunehmende Bedeutung mechatronischer Lösungsprinzipien erweitert den Lösungsraum – gleichzeitig aber auch die Komplexität bei der Konzepterstellung [Zi (2010) S.7-15, Sc (2008) S.4-27]. Vor diesem Hintergrund wird es für viele Funktionen im zu realisierenden Produktionsprozess eine Auswahl möglicher Lösungen geben. Für komplexe Produktionsprozesse resultiert eine entsprechend große Zahl möglicher Modulkombinationen. Zur Eingrenzung der Lösungsalternativen bedarf es daher einer technisch-wirtschaftlichen Bewertung der Kombinationen [VDI 2222, WeKl (2012c)] oder der Absicherung durch Simulation [WeKl (2012b)]. Zur Aggregation der Bewertung der Modulkombination eignen sich beispielsweise Nutzwerte oder eine Gesamtkostenbewertung [Sc (2009), HaWo (2012)].

Die definierten, wiederverwendbaren Module sollten in bestehende Engineering-Prozesse und Systeme eingebunden werden, um die Anwendung durch die Entwickler zu erleichtern [StGa (2007), BGL+(2011)]. Im Nachfolgenden sollen bekannte Engineering-Werkzeuge im Sinne von

Softwarewerkzeugen und Prozesse insbesondere unter dem Aspekt ihrer Eignung für die Einbindung der Wiederverwendung von Modulen vorgestellt werden.

3.2.1 Vorgehen beim Engineering

Es existiert eine Vielzahl an Beschreibungen von Engineeringprozessen oder eben Entwicklungsprozessen für prozessspezifische Produktionsanlagen in der Literatur. Eine Auflistung der wichtigsten Beschreibungen findet sich bei Pahl et al. [PBF (2007) S.23-28]. Allgemeingültige Vorgehensbeschreibungen wurden im Rahmen der Entwicklungsmethodik beispielsweise vom VDI entwickelt [VDI 2221, VDI 2206]. Die nachfolgend beschriebenen Richtlinien und Methoden stehen hier nur stellvertretend für eine Vielzahl an Vorgehensbeschreibungen [vgl. u.a. Ja [2006] S.35-52, Is (2008b)]. Laut der Einordnung der Entwicklungsmethoden von Tomiyama et al. sind folgende Methoden relevant [TGJ+ (2009) – S.561-562]:

- „*Systematic Design*“ von Pahl und Beitz [PB (1984); PBF (2007)]
- „*Axiomatic Design*“ von Suh [Su (1990); Su (2001)]

Auf weitere Beschreibungen, wie das „Total Design“ von Pugh [Pu (1991)] oder den „Mechanical Design Process“ von Ullman [Ul (2001)] wird hier nicht eingegangen, da sich die gewonnenen Erkenntnisse sinngemäß übertragen lassen.

Die Methode nach Pahl und Beitz, deren Ansatz die VDI-Richtlinie 2221 und damit auch die ergänzende VDI 2222 geprägt hat, ist demnach in der Lehre und Wissenschaft am weitesten verbreitet [TGJ+ (2009) – S.557, PB (1984), PBF (2007)]. Gemäß der VDI-Richtlinie 2221 liegt der Fokus der vorliegenden Arbeit auf einer Unterstützung der Konzeption durch die Wiederverwendung von Modulen, also der Phase II des in Abbildung 15 dargestellten Vorgehens und den Arbeitsergebnissen beim Methodischen Entwickeln [VDI 2221]. Der Fokus der Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme [VDI 2206] liegt in einer Integration der Disziplinen im Engineering-Prozess. Da diese Methodik und das im V-Modell beschriebene Vorgehen als Ergänzung zur nachfolgend vorgestellten Methode verstanden werden, wird an dieser Stelle nicht gesondert darauf eingegangen.

Nach der Ableitung der Anforderungsliste aus der Aufgabenstellung in Phase I, erfolgt in Phase II die Aufgliederung der Gesamtfunktion in Teilfunktionen, die Suche nach Lösungsprinzipien sowie die Erarbeitung und Bewertung von Konzeptvarianten. Auf die Wiederverwendung der Module in dieser Konzeptionsphase zielt die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Methode ab. Das Vorgehen zum methodischen Konzipieren wird in der VDI Richtlinie 2222 detailliert erläutert und wurde bereits zur Einordnung der Methode in den Entstehungsprozess kurz erläutert¹. In Phase III – der Entwurfsphase – wird die ausgewählte Konzeptvariante in realisierbare Module untergliedert. Zudem werden Konstruktionszeichnungen, Schaltpläne und Softwarearchitekturen erstellt. Abschließend wird der Gesamtentwurf ausgestaltet, d.h. unter Berücksichtigung der folgenden Phasen des Produktlebenszyklus detailliert ausgestaltet. Das Vorgehen wird als iterativ beschrieben, so dass eine oder mehrere Aufgaben wiederholt werden sollen, wenn die Arbeitsergebnisse nicht den Anforderungen entsprechen.

¹ vgl. Kapitel 2.4.1

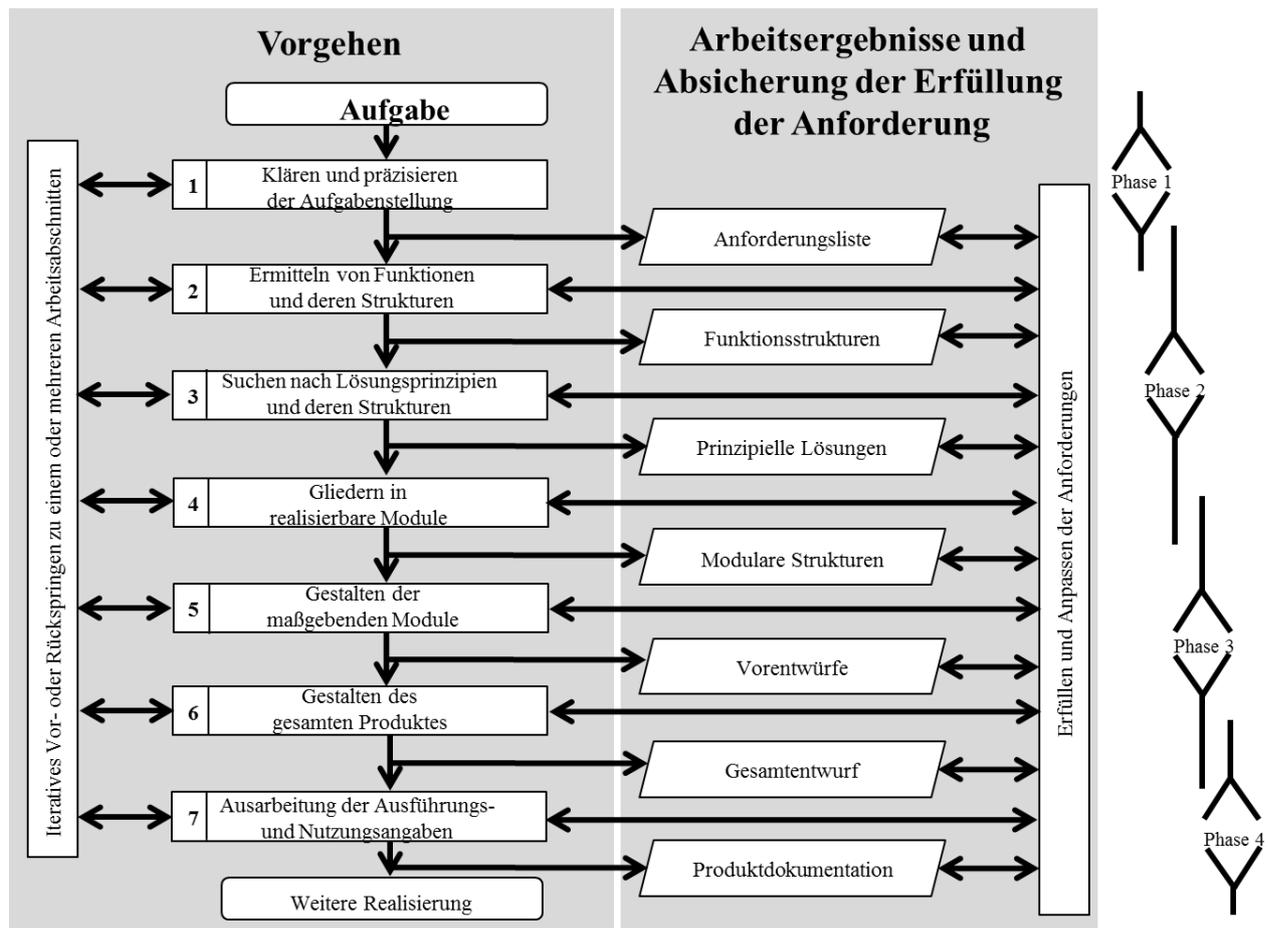


Abbildung 15: Vorgehen zum Methodischen Entwickeln Prozessmodulen nach [VDI 2222]

Der Engineering Prozess, wie er von Suh im Rahmen des *Axiomatic Design* beschrieben ist, besteht aus vier Domänen [Su (1990); Su (2001)]. Die Produktmerkmale aus den Kundenanforderungen werden durch einen Mapping- oder Abbildungsprozess in funktionale Anforderungen überführt. Diese Funktionen werden wiederum in Anforderungen an das Design abgebildet. Im Rahmen einer Ausgestaltung werden diese in Prozessvariablen überführt.

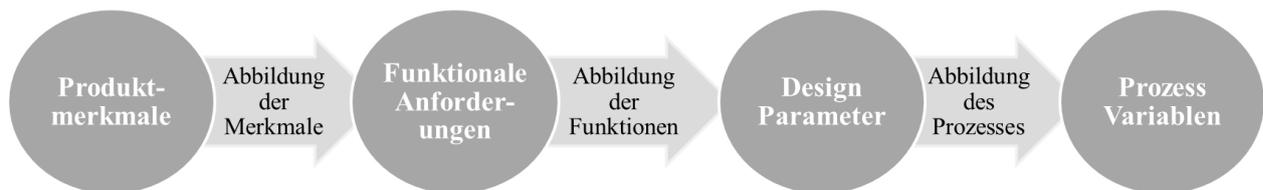


Abbildung 16: Engineeringprozess nach der Methode Axiomatic Design Prozess nach [Su (1990)]

Der Engineering-Prozess ist in Abbildung 16 dargestellt. Suh stellt für dieses Vorgehen im Rahmen des *Axiomatic Design* folgende Grundsätze auf [Su (1990), TGJ+ (2009)]:

1. Maximiere die Unabhängigkeit der Funktionselemente
2. Minimiere den Informationsgehalt des Entwurfs

Diese Axiome dienen dem Entwickler als Vorgabe bei den Entscheidungen im Engineering von Produkten und Anlagen. Ziel ist es, einzelne Funktionselemente möglichst unabhängig voneinander zu realisieren, um die Elemente anpassbar und kontrollierbar zu gestalten. Dadurch

sollen ungewünschte Wechselwirkungen vermieden werden [TGJ+ (2009) – S.549]. Sind die Elemente unabhängig voneinander, soll laut dem Informationsaxiom der Entwurf mit dem geringsten Informationsgehalt ausgewählt werden. Durch den Informationsgehalt beschreibt Suh die Komplexität des Entwurfs, d.h. es soll der einfachste Entwurf ausgewählt werden [Fi (2009) – S.75-76]. Um das Unabhängigkeitsaxiom zu prüfen bzw. die funktionalen Anforderungen auf Design Parameter abzubilden, nutzt Suh eine Design Matrix. Für diese Abbildung kann, wie von Guenov und Barker beschrieben, auch die *Design Structure Matrix*² genutzt werden [GuBa (2005)].

3.2.1.1 Bewertung von Modulkombinationen

Ausgehend von einer hinreichend großen Wissensbasis können verschiedene Konzeptvarianten aus den Modulen erstellt werden. Wie in der VDI-Richtlinie 2222 beschrieben, ist der nächste Schritt das technisch wirtschaftliche Bewerten dieser Konzeptvarianten. Dies ist notwendig, um geeignete Varianten auszuwählen, wenn mehr als ein Konzept erarbeitet wurde. Dabei stellt sich die Frage, welche Eigenschaften einer Produktionsanlage in den frühen Phasen des Engineering betrachtet werden sollten und ob ein statischer aggregierter Kennwert für eine Produktionsanlage ausreicht oder differenzierte Werte bspw. in Abhängigkeit zur Belastung des Systems berücksichtigt werden müssen. In frühen Phasen des Engineering spielt bei einer Bewertung von Konzeptvarianten auch das Thema Unvollständigkeit bzw. Unsicherheit der Daten eine wichtige Rolle. Daher sollen im Folgenden neben Methoden und Ansätzen zur Bewertung von Modulen auch der Umgang mit unvollständigen Daten behandelt werden.

Dabei können, wie aktuelle Ansätze aus dem Engineering von Förderanlagen auf Basis von Modulen zeigen, bestehende Daten aus der Dokumentation genutzt werden [HNFS (2011)]. Diese Daten können auch für die Angebotserstellung genutzt werden. Im Gegensatz zur heutigen, erfahrungsbasierten Bewertung von Konzeptvarianten sieht ten Hompel die Vorteile nicht nur in der Vergleichbarkeit von Konzeptvarianten, sondern vor allem auch in der Effizienz in frühen Phasen des Engineering bzw. Prozessen wie z.B. der Angebotserstellung. Ein weiteres Vorteil einer objektiven Bewertung von Konzeptvarianten liegt darin, dass traditionelle Lösungen, das heißt Lösungen, die der Entwickler kennt und deswegen präferiert, kritisch hinterfragt werden [Ro (2012)].

Rimpau und Reinhart beschreiben einen Ansatz zur Risikobewertung in der Phase der Angebotserstellung [RiRe (2010)]. Abbildung 17 visualisiert die Herausforderung, ein Angebot für eine Produktionsanlage zu erstellen, ohne dass die Informationen vollständig sind. Viele Details werden erst im laufenden Engineering-Prozess erstellt und können daher bei der Angebotserstellung noch nicht mit Sicherheit berücksichtigt werden. Um hier ein Angebot zur erstellen, das den Anforderung des Marktes, aber auch der Wirtschaftlichkeit des Unternehmens gerecht wird, schlagen sie verschiedene statistische Verfahren vor, die helfen sollen, die Unsicherheit und damit das Risiko zu berechnen. Alternativ dazu sollen im Folgenden Möglichkeiten vorgestellt werden, die diese und andere Entscheidungen im Engineering-Prozess durch zusätzliche Informationen absichern.

² Vgl. Kapitel 3.1.1

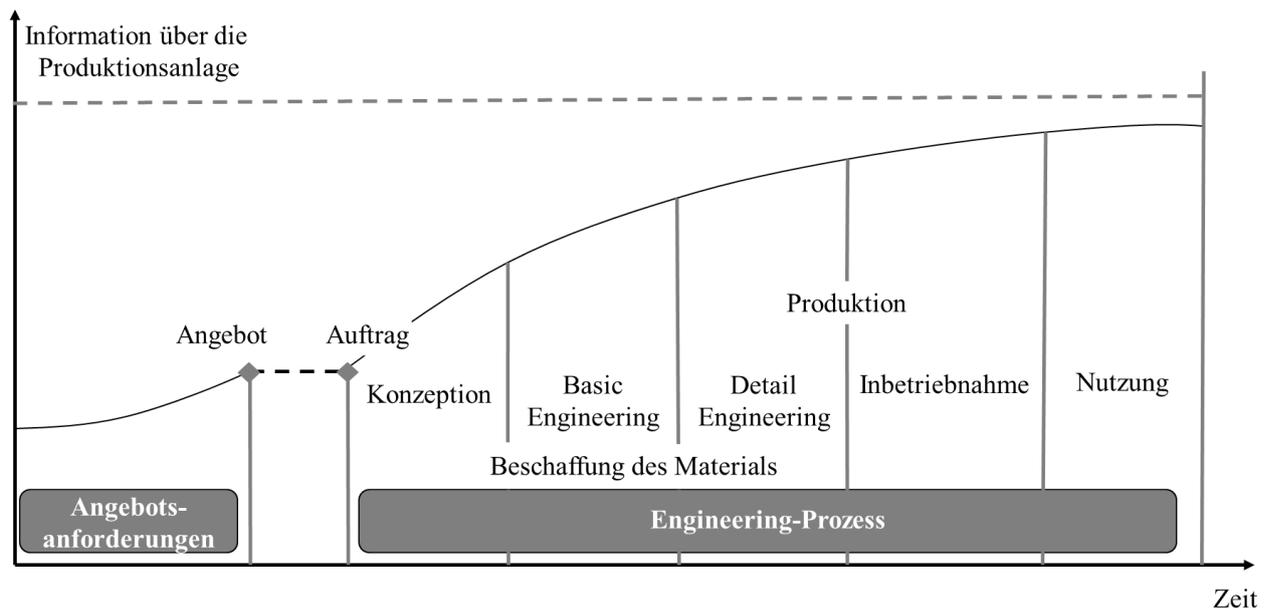


Abbildung 17: Informationen über eine Produktionsanlage bei der Angebotserstellung nach [RiRe (2010) – S.517]

Eine Methode zur Absicherung von Angeboten auf Basis der Wiederverwendung von Standardkomponenten aus einer Bibliothek wird von Neyrinck und Verl beschrieben [NeVe (2012)]. Anders als bei den bekannten Produktkonfiguratoren werden die Standardkomponenten hier auf Basis einer fähigkeitsbasierten Problembeschreibung ausgewählt. Die Fähigkeiten können Funktionen, aber auch Eigenschaften sein.

3.2.1.2 Bewertung der Eigenschaften von Modulen

Die Eigenschaften von Produkten können – wie in [Abbildung 18](#) dargestellt – in die Kategorien Beschaffenheit, Funktion und Relation eingeteilt werden [Eh (2009)]. Bei Massenprodukten wird die Beschaffenheit, also ihre äußere Form und die Werkstoffe, meist unmittelbar durch den Kunden oder aufgrund eines Designentwurfes festgelegt. Die Ausgestaltung der Funktion und der Relationen bzw. der Rahmenbedingungen eines Produktes kann im Gegensatz dazu im Produktentwicklungsprozess beeinflusst werden.

Im Engineering von Produktionsanlagen, die spezifisch an die Prozesse des Betreibers angepasst werden müssen, ist im Gegensatz dazu auch die Beschaffenheit mittelbar beeinflussbar. Auch wenn davon auszugehen ist, dass die optischen Eigenschaften einer Produktionsanlage eine untergeordnete Rolle spielen, ist auch die Beschaffenheit bei Produktionsanlagen bspw. in Form der Abmessungen von Relevanz.

Eine Übersicht zu Methoden der Leistungsbewertung von Produktionsanlagen findet sich bei Leung und Suri [LeSu (1990)]. Mögliche Methoden zur Bewertung der Leistung eines Systems sind u.a. neben dem (physikalischen) Experiment, Wahrscheinlichkeitsmodelle, Warteschlangen- oder Bedientheorie, Materialflussanalysen auf Basis einer Sensitivitätsanalyse und Petri-Netze. Diese Methoden eignen sich laut Leung und Suri vor allem für eine Verwendung in der Inbetriebnahme und dem Produktionsanlauf, da eine ausreichende Datenbasis vorhanden ist.

Fleischer et al. stellen gerade vor dem Aspekt der Betrachtung des gesamten Lebenszyklus einer Produktionsanlage einen Ansatz zur Bewertung von Leistung und Kosten hybrider Leistungsbündel – also einer Kombination aus Produkt- und Dienstleistung – vor. Dieser Ansatz basiert auf der Ermittlung empirischer Daten zur Produktivität und zur Verfügbarkeit einer Anlage, eines Produktes, eines Moduls oder einer Komponente. Basierend auf diesen Daten wird das zu erwartende Ausfallrisiko ermittelt und eine Bewertung des Leistungsbündels vorgenommen [FRNL (2007)].

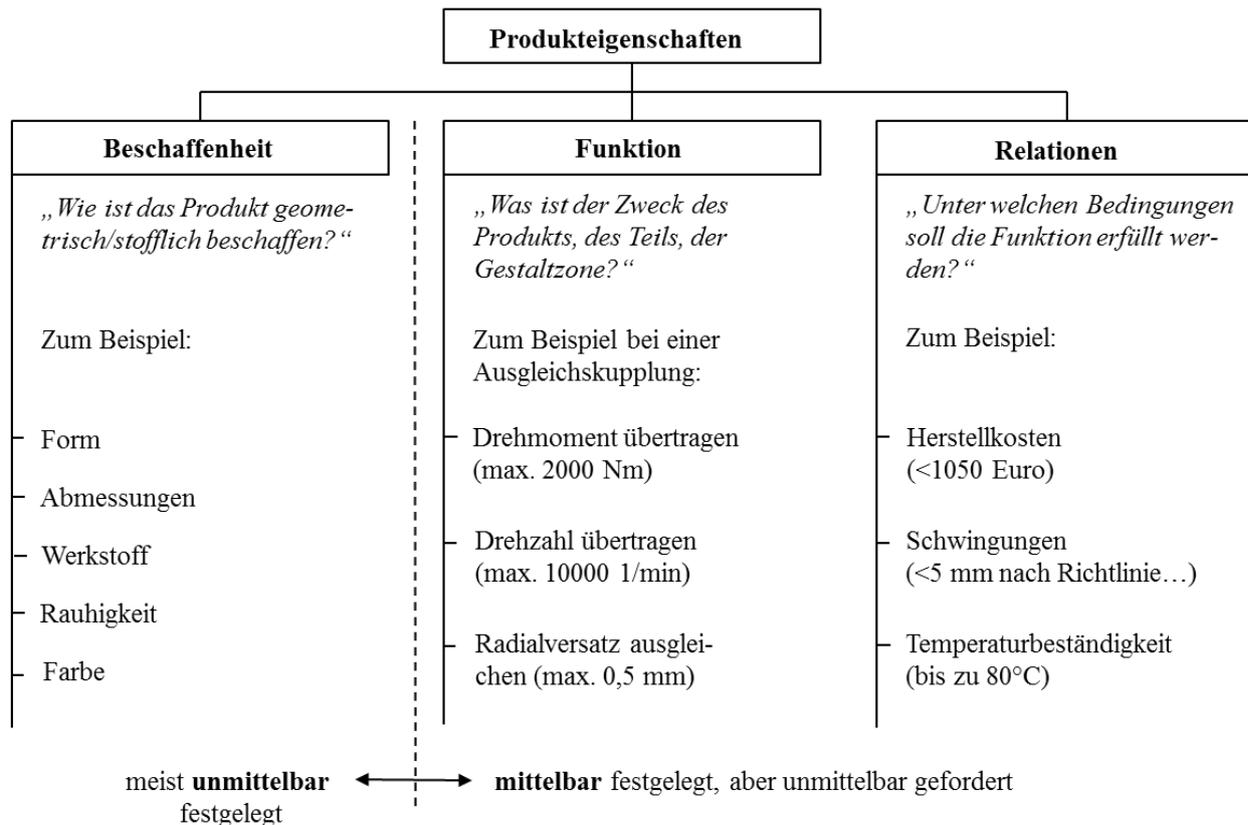


Abbildung 18: Einordnung der Eigenschaften einer Produktionsanlage nach [Eh (2009) – S.29]

Ein wichtiger Punkt, der sich aus der Betrachtung des gesamten Lebenszyklus ergibt, ist die frühzeitige Betrachtung des Energieverbrauchs von Produktionsanlagen. Nach der Wartung und Instandhaltung sowie der Kosten für Maschinenbeschaffung ist der Energieverbrauch mit 17% die drittgrößte Kostenart der Lebenszykluskosten einer Werkzeugmaschine [LWG (2010)]. Lang präsentiert einen Ansatz, mit dem er auf Basis künstlicher, neuronaler Netze den Energieverbrauch eines Produktionsprozesses prognostiziert. Dazu entwickelte er eine MatLAB-Simulationsanwendung, die eine kurz- bis mittelfristige Prognose im laufenden Betrieb der Anlage ermöglicht [La (2011)].

Götze et al. präsentieren ein Vorgehensmodell zur integrierten Betrachtung von technischen und wirtschaftlichen Aspekten der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen [GKK+ (2012)]. Dazu erfassen sie Messwerte an bestehenden Maschinen, die sie im Rahmen von einer Energieverbrauchsanalyse nutzen. Aus diesen Werten werden in einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unterschiedliche Maßnahmen hinsichtlich ihrer Effekte auf die Lebenszykluskosten der Maschine untersucht.

Dem Kostenaspekt kommt gerade aufgrund der Gemeinkostenproblematik in der Einzelfertigung von komplexen Produktionsanlagen eine hohe Bedeutung zu. Um die Gemeinkosten, also die Kosten der Verwaltung, des Engineering, der Logistik, etc. verursachungsgerecht zu verrechnen, empfehlen Michel et al. die Prozesskostenrechnung [MTJ (2004)]. Dabei wird in allen Unternehmensbereichen die Zeit, die für die Durchführung eines bestimmten Geschäftsprozesses benötigt wird, ermittelt. Die Gesamtkosten werden somit auf die Geschäftsprozesse verteilt [Seid (2008)].

Eine Übersicht über die verschiedenen Verfahren zur Kostenkalkulation nach Zirkler ist in Abbildung 19 dargestellt [Zi (2010)]. Die Verfahren der Kurzkalkulation können demnach in grundlegende Verfahren sowie die Kalkulation über eine oder mehrere Einflussgrößen unterteilt werden. Ausgewählte Verfahren fasst Zirkler in ihrer Arbeit in einem Referenzprozess zusammen, der es ermöglicht, Kosten bei der Neuentwicklung von komplexen Produkten abzuschätzen [2010].

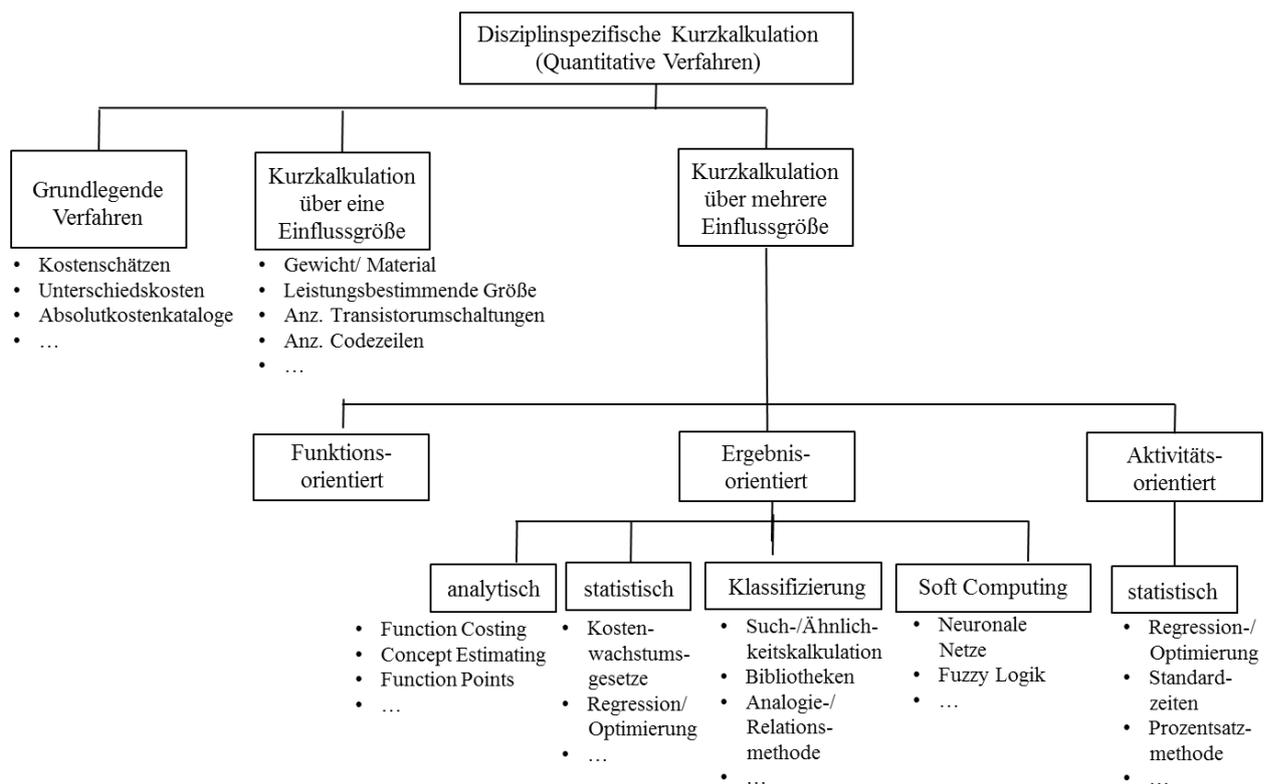


Abbildung 19: Einordnung der Methoden zur Kostenkalkulation nach Zirkler nach [Zi (2010) – S.116]

Grundlegende Verfahren sind das Kostenschätzen von mehreren Entwicklern und die Unterschiedskosten [EKL (2007) – S. 455ff., Zi (2010)]. Bei ähnlichen Produkten kann der Aufwand der Kostenkalkulation dahingehend reduziert werden, dass nur die Differenz der Teilbereiche, in denen Unterschiede bestehen, neu kalkuliert wird. Maßnahmen, um die Genauigkeit einer einfachen Kostenschätzung zu erhöhen, sind: das Schätzen kleiner Teilbereiche, die Berücksichtigung mehrerer Schätzungen oder der Vergleich mit Referenzmodulen.

Die Verfahren zur Kalkulation über eine Einflussgröße beziehen sich meist auf ein charakteristisches Merkmal des Produktes [EKL (2007) – S.459ff., Zi (2010)]. Typische

Beispiele für solche Merkmale sind das Gewicht, die Materialkosten, die Anzahl der Codezeilen oder auch die Fertigungszeit. Dabei wird das Verhältnis des Merkmals zwischen einem neuen und einem alten Produkt mit den Kosten des alten Produktes multipliziert. Daraus ergibt sich eine relative Steigerung der Kosten des neuen Produktes.

Bei der Kalkulation können verschiedene Kostenarten genutzt werden, um einen Vergleich zwischen dem alten und dem neuen Produkt zu ermöglichen [EKL (2007)]. Beispiele sind die Herstellungskosten, der Maschinenstundensatz oder auch die Prozesskosten. Die Herstellungskosten sind die Kosten zur Erstellung eines Produktes und setzen sich aus Einzelkosten und Gemeinkostenzuschlägen zusammen. Der Maschinenstundensatz ist eine Alternative zur Verrechnung der Gemeinkosten. Hier werden die Gemeinkosten nicht pro Produkt, sondern pro Maschinenstunde verrechnet. Die Prozesskosten beschreiben die Kosten eines Geschäftsprozesses auf Basis einer exakten zeitlichen Erfassung.

Zudem beschreibt Zirkler eine Vielzahl an Verfahren, die auf mehreren Einflussgrößen basieren. Interessante Verfahren hinsichtlich der Wiederverwendung von Modulen sind die Such- und Ähnlichkeitskalkulation, die Analogie- und Relationsmethode sowie die Nutzung von Bibliotheken [Zi (2010)]. Bei der Such- und Ähnlichkeitskalkulation werden die Produkte gemäß der Erfüllung mehrerer Merkmale in einem Koordinatensystem aufgetragen. Die Kosten des ähnlichsten Produktes werden übernommen oder aber die Kosten mehrerer Produkte werden interpoliert, um die Kosten des neuen Produktes zu bestimmen [Pi (1989), Zi (2010)]. Am Beispiel von Mikroprozessoren erläutern Bakshi und Gajski die Nutzung von Bibliotheken, in denen Kosten für Produkte nach Leistungsparametern kategorisiert werden. Die Ermittlung der Kosten des zu entwickelnden Produktes erfolgt ebenfalls über Interpolation oder durch die Übernahme der Kosten des ähnlichsten Produktes [BaGa (1997), Zi (2010)]. Die Analogiemethode rechnet die Merkmale in Indizes um und ermöglicht somit eine einfache Anpassung [ShSh (1997)].

Strauch und Lühe untersuchen Methoden zur Kostenschätzung für verfahrenstechnische Anlagen insbesondere in den frühen Engineering-Phasen [St (2008); Lü (2012)]. Für die frühen Projektphasen empfehlen sie Kapazitätmethoden, wie den *Six-Tenth-Factor* nach Williams [Wi (1947)]. Dieser Faktor beschreibt das Verhältnis zwischen den Kosten und den Kapazitäten der neuen und der alten Anlage. Durch den Degressionsexponenten³ wird erreicht, dass die Kosten nicht proportional zur Kapazität steigen. Im Weiteren beschreiben sie Methoden, die einen höheren Informationsgehalt voraussetzen und daher für die frühen Phasen eher ungeeignet sind. Für verfahrenstechnische Anlagen wurden die Methoden der Kostenschätzung durchgeführt und die Abweichung von den realen Kosten bestimmt. Im *Conceptual Design* betrug laut Hady und Wozny die Abweichung $\pm 30\%$, im *Basic Engineering* $\pm 10-15\%$ und im *Detail Engineering* $\pm 3-5\%$ [HaWo (2012) – S.610-612].

Ein weiteres Bewertungskriterium ist die Flexibilität der Produktionsanlage. De Lamotte et al. stellen einen Ansatz zur Bewertung der Rekonfigurierbarkeit von Fertigungssystemen vor. Ziel ist die Auswahl der Konfiguration eines Systems, das mit Blick auf Kosten und Zeit am schnellsten umrüstbar ist. Die Konfiguration soll tolerant gegenüber Veränderungen an der Produktionsanlage sein [LBP (2006)]. Weitere Arbeiten befassen sich mit der Bewertung der

³ Wert entspricht im Mittel 0,6 [Lü (2012)]

Zuverlässigkeit von Software auf Basis empirischer Daten in einem Komponenten Repository [We (2011)]. Aus diesen Daten der Komponenten (z.B. Katalogangaben, Erfahrungswissen) wird eine Formel entwickelt, die in den frühen Phasen des Engineering eine Bewertung der Zuverlässigkeit eines Systems (z.B. einer Produktionsanlage) zulässt.

Zur Bewertung von Moduleigenschaften können verschiedene technische und wirtschaftliche Kriterien verwandt werden [Pr (2008); Sc (2013)_BA]. Nachfolgende Beispiele zeigen mögliche Kriterien aus dem Maschinen- und Anlagenbau, die für eine Bewertung der Moduleigenschaften herangezogen werden können. Eine Ergänzung, eine Erweiterung und ein Austausch sind je nach Anwendungsfall möglich. Aggregierte Kennwerte wie die Gesamtanlageneffektivität eignen sich nur bedingt für den Vergleich, da diese Kennzahlen stark abhängig von äußeren Faktoren wie Wartung, Instandhaltung und Produktplanung im laufenden Betrieb einer Gesamtanlage sind. Eine differenzierte Bewertung einzelner Komponenten ist darüber hinaus mit einem erheblichen Aufwand bei der Datenerfassung verbunden.

Zur Bewertung der Kosten einer Produktionsanlage sollten nach Möglichkeit Prozesskosten genutzt werden, um der Gemeinkostenproblematik, also die verursachungsgerechte Verteilung der Kosten der Entwicklung, Logistik und Verwaltung, für die Einzelfertigung von Produktionsanlagen gerecht zu werden [MTJ (2004)]. Als Prozesskostenrechnung beschreibt man die zeitliche Erfassung von Prozessen und entsprechende Verrechnung der Kosten über geschäftsprozessspezifische Indikatoren (z.B. Anzahl Bestellungen, Anzahl Angebote). Da die Prozesskostenrechnung nur in 3,8% der Unternehmen im Maschinenbau [BHL (2008)] angewandt wird, wird als Alternative der Maschinenstundensatz als möglicher fertigungsbezogener Indikator vorgeschlagen. Dieser fokussiert sich zwar lediglich auf die verursachungsgerechte Zuordnung der Fertigungsgemeinkosten, ist aber deutlich einfacher zu ermitteln. Der Maschinenstundensatz wird wie folgt berechnet [Ka(2011), Sc(2013)_BA]:

$$M = \frac{K_A + K_Z + K_S + K_I + k_P * t_{Soll}}{t_{Soll}} \quad (17)$$

Unter Berücksichtigung folgender Definitionen:

- M Maschinenstundensatz
- K_A Kalkulatorische Abschreibungen
- K_Z Kalkulatorische Zinsen
- K_S Sonstige fixe Kosten
- K_I Instandhaltungskosten
- K_P Proportionale Kosten
- t_{Soll} Geplante jährliche Nutzungszeit

Der Maschinenstundensatz eignet sich als aggregiertes und vergleichbares Bewertungskriterium der Gemeinkosten eines Moduls. Die Einzelkosten (Material und Personaleinsatz) werden nicht erfasst, da sie bei der Wiederverwendung eines Moduls auch nur bedingt übertragbar sind. Ein Fräsmodule wird also nicht durch die unterschiedlichen Kosten des zu bearbeitenden Materials bewertet. Zudem findet er in der Kalkulation von Produktionsanlagen bereits breite Verwendung, was der Anforderung eines geringen Bewertungsaufwandes entgegenkommt. Mögliche Methoden zur Allokation der Kosten auf die Module wurden mit der Conjoint Analyse bereits

angesprochen. Die Kostenbewertung erfolgt auf Grundlage der in der Datenbasis vorhandenen Werte. Auf Möglichkeiten zur Kostenschätzung beim Aufbau dieser Datenbasis wurde bereits eingegangen.

Die Produktivität der Produktionsanlage bzw. der Module ist wie folgt definiert [BBSS(2008); Sc(2013)_BA]:

$$P = \frac{x_{Ist,Jahr}}{h_{Maschine}} \quad (18)$$

Unter Berücksichtigung folgender Definitionen:

- P Produktivität
- $X_{Ist, Jahr}$ realisierbare, jährliche Herstellungsmenge
- $h_{Maschine}$ Maschinenstunden

Viele Methoden der Leistungsbewertung basieren auf detaillierten Informationen und eignen sich daher eher für die späteren Phasen des Engineering [LeSu(1990)]. Neben der Produktivität der Produktionsanlage kann natürlich auch die Produktivität menschlicher Arbeit berücksichtigt werden, die im Rahmen des Produktionsprozesses anfällt. Im Rahmen des Vergleiches zwischen Konzeptvarianten für Produktionsanlagen wird hier allerdings lediglich die Produktivität der Anlage bzw. ihrer Module betrachtet.

Der Nutzungsgrad der Produktionsanlage bzw. der Module entspricht dem Verhältnis aus geplanter und maximal möglicher Herstellungsmenge [VDI 3423; Sc(2013)_BA]:

$$N = \frac{x_{Soll}}{x_{Ist}} * 100 \quad (19)$$

Unter Berücksichtigung folgender Definitionen:

- N Nutzungsgrad
- X_{Soll} Geplante Herstellungsmenge
- X_{Ist} Maximale Herstellungskapazität

Durch eine Berücksichtigung des Nutzungsgrades eines Modules in der technisch-wirtschaftlichen Bewertung soll eine Über- bzw. Unterdimensionierung der Module vermieden werden.

Die Energieverbrauchsquote der Produktionsanlage bzw. der Module ist wie folgt definiert [Pr(2008); Sc(2013)_BA]:

$$E = \frac{EV}{h_{Fertigung}} \quad (20)$$

Unter Berücksichtigung folgender Definitionen:

- E Energieverbrauchsquote
- EV Energieverbrauch
- $h_{Fertigung}$ Fertigungsstunden

Durch eine Berücksichtigung der Energieverbrauchsquote wird die gesonderte Berücksichtigung der Ressource Energie in der Produktion ausgedrückt. In der praktischen Umsetzung für ein Unternehmen sind hier auch andere materialspezifische Kennzahlen denkbar.

Der Nutzungsgrad wird zudem zur Skalierung der Kosten und des Energieverbrauches an unterschiedliche Kapazitäten angewandt. Für diese Anpassung wird der *Six-Tenth-Factor* nach Williams genutzt [Wi (1947)]:

$$K_{neu} = K_{alt} \left(\frac{x_{Soll}}{x_{Ist}} \right)^{0,6} \quad (21)$$

Unter Berücksichtigung folgender Definitionen:

- K_{alt} Kosten für das alte Modul / E_{alt} Energieverbrauch für das alte Modul
- K_{neu} Kosten für das neue Modul / E_{neu} Energieverbrauch für das neue Modul
- X_{Soll} Geplante Herstellungsmenge
- X_{Ist} Maximale Herstellungskapazität

Weicht die Kapazität eines geplanten Moduls stark von der eines vorhandenen Moduls ab, wird der Effekt, dass die Kosten und der Energieverbrauch nicht proportional zur Kapazität steigen oder fallen, über diese auf einem Degressionsexponenten basierende Methode berücksichtigt. Die Aussagekraft dieses Faktors wurde für die Kostenschätzung von Strauch und Lühe für die frühen Phasen des Engineering bestätigt [St (2008); Lü (2012)]. Die Untersuchung der Kapazitätsanpassung des Energieverbrauches untersuchten Taal et al. [TBKS (2003)].

Aus diesen Modulen soll im Rahmen der Methodenbeschreibung ein übergreifender Nutzwert gebildet werden. Zur Auswahl der besten Modulkombination müssen die Nutzwerte der Modulkombinationen aufsummiert werden. Alternativ kann der optimale Nutzwert einer Modulkombination durch Enumeration nach der dynamischen Optimierung bestimmt werden [HiLi (1998)]:

$$f_i^*(s) = \max_{x_i} f_n(s, x_i) \quad \text{für } i = 1, 2, \dots, n \quad (22)$$

Wobei:

$$f_i(s, x_i) = N_{s, x_i} + f_{i+1}^*(x_i) \quad \text{für } i = 1, 2, \dots, n \quad (23)$$

Unter Berücksichtigung folgender Definitionen:

- n Anzahl der Funktion
- s Modul, dass mit dem Modul der nächsten Stufe i kombiniert wird
- x_i Entscheidungsvariable
- N_{s, x_i} Nutzwert des Moduls

Die Bewertung der Eigenschaften kann in der Praxis nur mit einer hinreichenden Genauigkeit vorgenommen werden, da die Ausgestaltung einzelner Komponenten erst im Rahmen des Detail Engineering vorgenommen wird und dynamische Effekte wie Schwankungen in der Belastung

des Systems nur bedingt abgebildet werden können. Reicht die Genauigkeit nicht aus, kann die Bewertung, wie nachfolgend beschrieben, durch eine Simulation schon in den frühen Phasen des Engineering abgesichert werden.

3.2.1.3 Abbildung des Systemverhalten bei Modulkombinationen

Gerade bei komplexen mechatronischen Produktionsanlagen ist eine Absicherung der Eigenschaften während des gesamten Engineering-Prozesses sinnvoll [VDI 2206]. Dadurch sollen Fehler wie die Nichterfüllung von Anforderungen frühzeitig erkannt und das Konzept oder die Ausgestaltung einzelner Komponenten verändert werden. Hintergrund ist der hohe Anteil an festgelegten Kosten in den frühen Engineering-Phasen bzw. die hohen Kosten einer späten Änderung [EKL (2007) – S. 13ff., Re (2012)]. Simulation stellt eine Möglichkeit zur Absicherung des dynamischen Verhaltens mechatronischer Systeme in frühen Phasen des Engineering dar. Hinzu kommt, dass durch die Nutzung von Simulation die Entwicklungszeiten verkürzt werden, da keine physischen Modelle der Anlage bzw. die Steuerung aufgebaut werden müssen. Die Wiederverwendung von Komponenten bzw. Modulen und Simulationsmodellen steigert darüber hinaus die Effizienz des Engineering, da der Aufwand der Modellerstellung reduziert wird [ANO+(2002), WeSt (2012)]. Trotz der Möglichkeiten der Simulation wird das „Verhalten [...] im traditionellen mechanischen Entwicklungsprozess häufig erst gegen Ende und anhand physikalisch-gegenständlicher und nicht abstrakter funktions-/verhaltensorientierter Modelle betrachtet“ [VWB+(2009) – S.29, HöWe(2007), We(2005)].

Mögliche Simulationsverfahren, die die Funktion einer Produktionsanlage in frühen Engineering-Phasen bzw. in weiterführenden Phasen wie der Inbetriebnahme bewertbar machen, werden bspw. von Wünsch beschrieben [Wü (2005)]. Auf Basis von Funktionsmodellen, Steuerungsprogrammen, geometrischen Daten etc. wird das kinematische Verhalten von Produktionsanlagen simuliert. Durch die Simulationstools werden Fehler wie Kollisionen ermittelt sowie Ablaufzeiten ermittelt und optimiert.

Um unterschiedliche Belastungen in der Simulation und die Unsicherheit der frühen Engineering-Phase zu berücksichtigen, müssen verschiedene Parameter in der Simulation variiert werden. Dazu können statistische Verfahren mit Simulationsmethoden kombiniert werden [WaCh (2005)]. Einen möglichen Ansatz dazu bieten *System-Dynamics*-Simulationen. Das dynamische Verhalten von komplexen Systemen wie Produktionsanlagen kann durch diese Werkzeuge unter Berücksichtigung von Belastungsänderungen, Änderungen in den Rahmenbedingungen der Produktion und Ausfällen simuliert werden. Die Simulation wird bspw. zur Produktionsplanung [OUK (2006)] oder aber auch zur Planung von Material- und Energiefluss [ZZWB(2010)] eingesetzt.

Weitere Tools (z.B. *MathWorks®Simscape™*) unterstützen den Entwickler mechatronischer Produktionsanlagen bei der Simulation des physikalischen Verhaltens des Systems. Durch vordefinierte Bibliotheken und durch die Möglichkeit, eigene Objekte zu definieren, kann das Verhalten von Komponenten aus unterschiedlichen Domänen effizient modelliert und simuliert werden. Die Integration in den Engineering-Prozess basierend auf der Wiederverwendung von Modulen kann beispielsweise über die Beschreibung in SysML erfolgen [CLP (2011)]. Zudem existieren kommerzielle Systeme (z.B. Siemens – *Mechatronics Concept Designer*), die

multidisziplinäre Anlagenentwicklung durch die dreidimensionale Darstellung und Simulation des physikalischen Verhaltens unterstützen sollen [Mi (2012)]

Um die Effizienz verschiedener Produktionsanlagen untereinander zu vergleichen, können Kennwerte wie die Gesamtanlageneffektivität⁴ genutzt werden [BiGr (2011)]. Dieser prozentuale Wert setzt sich aus Verfügbarkeit, Leistung und Qualität zusammen. Stillstandzeiten durch Wartung, Ausfall, Umrüstung, etc. wirken sich negativ auf die zeitliche Verfügbarkeit der Anlage aus. Zudem wird die anteilige Zeit ermittelt, in der eine Produktionsanlage die geplanten Stückzahlen herstellt – also ihre volle Leistung erbringt. Die Qualität wird über den Anteil des Ausschusses bewertet. Die Gesamtanlageneffektivität wird eher als Prozess und nicht als reiner Kennwert verstanden. In der Literatur sind verschiedene Weiterentwicklungen der Gesamtanlageneffektivität beschrieben [BiGr (2011)]. Diese zeichnen sich einerseits dadurch aus, dass die Verluste differenzierter betrachtet werden, andererseits dadurch, dass Wechselwirkungen zwischen Anlagen betrachtet werden. Ein Beispiel ist die Gesamtanlageneffektivität einer Fertigungslinie [BFZ (2009)]. Hier wird berücksichtigt, ob die Verluste von der Anlage abhängig (z.B. Ausfall) oder unabhängig (z.B. fehlendes Material) sind.

Weitere Arbeiten auf dem Gebiet der Modellierung und Analyse des Verhaltens von Produktionsanlagen befassen sich beispielsweise mit der Zerlegung einer Anlage in Standardfunktionen, für die der Energieverbrauch simuliert wird [ASS (2012)]. Dieser Ansatz baut auf einem weitreichenden Informationsgrad der Produktionsanlagen auf und wird im Rahmen des Betriebs der Anlage zur Produktionsplanung eingesetzt. In gleicher Weise setzt ein Ansatz zur Kostenbewertung von Fertigungsprozessen für Serienprodukte in der Produktionsplanung an [RML (2007)]. Hier werden auf Basis von standardisierten Technologiemodulen die Kosten von verketteten Produktionsprozessen in der frühen Produktionsplanung bewertet.

Bei der Bewertung von Konzeptvarianten in den frühen Phasen der Entwicklung stellt die Unschärfe und Unsicherheit der Daten, also der Bewertungsgrundlage, ein großes Problem dar. Dem gegenüber steht im Engineering die Erfahrung des Entwicklers, die Ermittlung fehlender bzw. unvollständiger Daten oder Methoden im Umgang mit unscharfen Daten. Schneider stellt eine Methode zum Umgang mit unscharfen Daten bei der Bewertung von Produktvarianten vor [Sc (2009)]. Er begegnet dem Problem mit Hilfe nicht linearer Fuzzy-Funktionen. Dadurch ist es möglich, unscharfe Ausdrücke („Variante a erfüllt Anforderung b etwas/viel/sehr viel besser als Variante b“), die beispielsweise auf Erfahrungswissen beruhen, zu interpretieren und bei der Bewertung von Produktvarianten zu berücksichtigen. Die Eignung alternativer Ansätze zum Umgang mit unvollständigen Daten aus der Statistik, die insbesondere in den Sozialwissenschaften eingesetzt werden, müssen noch in der ingenieurwissenschaftlichen Praxis erprobt werden [Sa (2013)_SA].

Die Probleme der Vollständigkeit und Unsicherheit der Daten beziehen sich dabei nicht nur auf die frühen Engineering-Phasen. Auch im Betrieb der Anlage werden durch Umplanungen, Reengineering oder auch nur neue Produkte Informationen benötigt, die nicht in entsprechender Form vorliegen. Um diesem Problem zu begegnen, präsentieren Pech et al. Ansätze zur

⁴ engl. Overall Equipment Effectiveness (OEE)

Informationsgewinnung in Produktionsanlage zur Laufzeit auf Basis von Agenten [PeGö (2012), PMG+ (2008)]. Verändern sich die Rahmenbedingungen der Produktionsanlagen in der Nutzungs- oder Betriebsphase, wird der Anwender bei der Suche nach passenden Informationen durch die Agenten und durch Ontologien unterstützt.

Modellierung des Systemverhaltens durch Simulation

Die Bewertung von Konzeptvarianten durch den Einsatz von Simulation erhöht den Aufwand zur Bewertung, aber auch deren Genauigkeit. Um den Aufwand zur Modellierung zu reduzieren, können vorhandene Simulationsmodelle Teil der Informationsstruktur mechatronischer Module sein (vgl. Abbildung 26). Durch die Modellierung des Systemverhaltens mit Simulation sollen dynamische Effekte wie Lastschwankungen abgebildet und Bewertungen abgesichert werden.

Im Rahmen der technisch-wirtschaftlichen Bewertung von Konzeptvarianten können verschiedene Simulationsmethoden und -systeme eingesetzt werden. Kinematische Simulationen (z.B. Siemens *Tecnomatics Real NC*), SPS-Simulationen (z.B. *WinMod*) oder Ablaufsimulationen (*Plant Simulation*) können eingesetzt werden um die Produktivität einzelner Module oder auch eines Gesamtsystems zu bestimmen [(WeK1 2012b)]. Daneben können *System Dynamics* Simulationen (z.B. *Vensim*) genutzt werden, um das dynamische Verhalten komplexer Systeme abzubilden. Dadurch wird es möglich, den Energieverbrauch einer Konzeptvariante zu ermitteln (s. Abbildung 20).

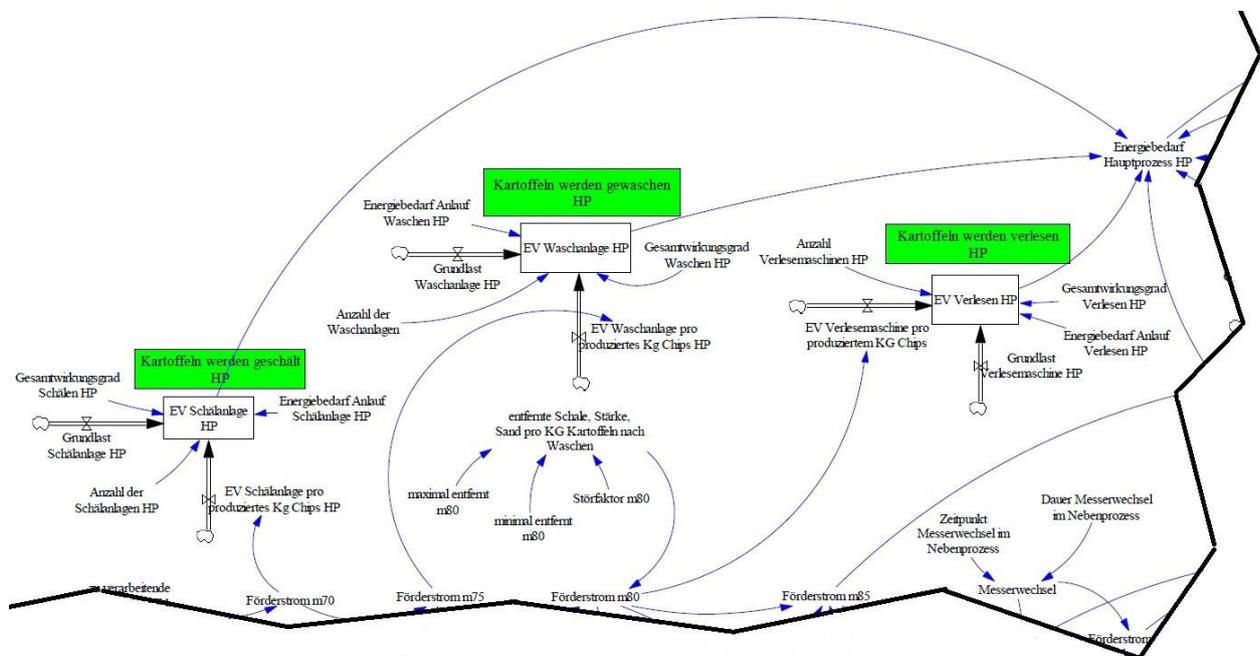


Abbildung 20: Simulation des Energieverbrauches einer Produktionsanlage mit der Systems Dynamics Software Vensim

3.2.2 Werkzeug im Engineering

Maurmeier et al. beschreiben einen Ansatz zur Bewertung und Klassifikation von Engineeringtools hinsichtlich ihrer Eignung zur Erfüllung der Anforderungen, die sich aus dem Lösungsgeschäft ergeben [MDS (2008), DeWa (2008)]. Beispiele aus dem Lösungsgeschäft sind komplexe, prozessspezifische Produktionsanlagen aus den Bereichen Verfahrenstechnik aber

auch Maschinenbau. Kriterien, die sich aus Sicht der Strukturierung solcher Produktionsanlagen ergeben, sind einerseits die Wiederverwendung (projektintern und -übergreifend) von Wissen und Teillösungen, aber auch die Zusammenarbeit der Disziplinen. Aus Sicht des Engineering-Prozesses sind die Bearbeitung großer Datenmengen, die Integration verschiedener Sichten, der Einsatz in verschiedenen Phasen und die effiziente Datenverwaltung weitere Herausforderungen an Engineering Tools [MDS (2008) – S.52-53]. Anforderungen an die Werkzeuge, die sich daraus ableiten, sind die Konfiguration von Produktionsanlagen durch parametrierbare Templates bzw. die Definition mechatronischer Informationsobjekte, die aus einer Bibliothek ausgewählt und aus denen durch Parametrierung, Veränderung, Erweiterung und Verknüpfung eine Produktionsanlage modelliert wird. Als einen weiteren Aspekt prüfen Hund et al. sowohl Austauschformate zwischen bestehenden Tools für einzelne Phasen oder Disziplinen als auch übergreifende Tools, die den gesamten Engineering-Prozess unterstützen [HLKG (2011)].

Ein System, das zudem den beschriebenen Aspekt der Durchgängigkeit zur systematischen Verbesserung des Engineering genügt, wird von Wegmann beschrieben [We (2010)]. Hier steht vor allem der Aspekt des mechatronischen Engineering und weniger die Beherrschung der Komplexität im *Basic Engineering* von Sondermaschinen im Vordergrund.

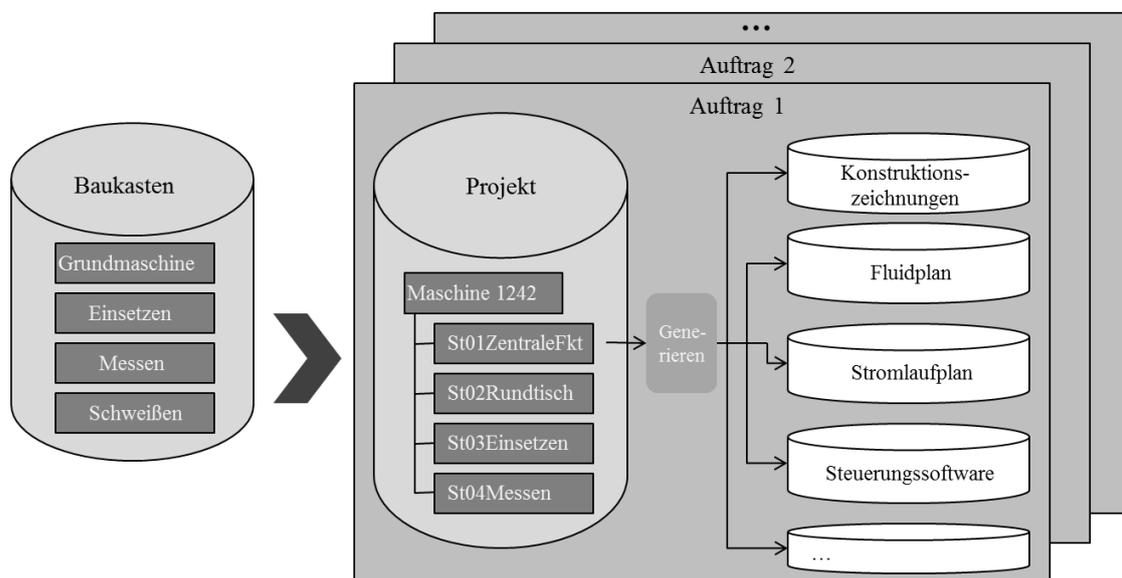


Abbildung 21: Wiederverwendung von standardisierten Modulen im Engineering von Produktionsanlagen wird durch EPLAN Engineering-Center unterstützt nach [We (2010) – S.7]

Das EPLAN Engineering-Center ist ein Tool zur Projektierung von Produktionsanlagen, das die Wiederverwendung von Modulen ermöglicht [We (2010)]. Abbildung 21 visualisiert den Ansatz des baukastenorientierten Engineering, das der Wiederverwendung von Modulen im Engineering Center zugrunde liegt. Durch die Verwendung von Standardmodulen, die in einem Baukasten systematisiert sind, werden projektspezifische Funktionen zu einer Maschine kombiniert. Daraus können die für das Engineering notwendigen Unterlagen für die verschiedenen Aufträge generiert werden.

Eine Alternative dazu sind neue Engineering-Systeme, die den Anwender bei der Konzeption und Lösungsfindung unterstützen [LZE (2012), MCD(2013)]. Der von Gausemeier et al. vorgestellte *Mechatronic Modeller* dient der Konkretisierung einer mechatronischen Prinzipkombination [GSDK(2009), GDK (2010), ADDG (2011)]. Dieses Tool unterstützt den

Entwickler bei der Ausgestaltung einer prinzipiellen Lösung, die aus den in Modulen abgebildeten Teilsystemen aufgebaut sind. Dazu werden das Verhalten der Module und die Verbindungen untereinander auf Basis der Informationen aus der Wissensbasis im Rahmen des Tools modelliert und ein zusammenhängendes Konzept konkretisiert.

Zusätzlich zu den übergreifenden mechatronischen Engineering-Systemen existieren in der praktischen Anwendung viele spezialisierte Systeme. Mögliche disziplinspezifische Tools sind CAD-Systeme, E-CAD-Systeme oder auch Entwicklungsumgebungen für Steuerungssoftware. Phasenspezifische Tools sind beispielweise auf die Inbetriebnahme, die Planung der Fertigung oder die Klärung der Aufgabenstellung spezialisiert. Um deren Nutzung in einem disziplinenübergreifenden Engineering-Prozess zu erleichtern, gibt es Formate bzw. Ansätze, die die Schnittstelle zwischen den bestehenden Engineering-Tools bilden. Diese Tools zielen nicht darauf ab, ein durchgängiges Engineeringssystem zu etablieren, sondern dem Problem der diversifizierten Systemlandschaft durch Bereitstellung eines Austauschformates – wie *AutomationML* (Automation Markup Language) – zu begegnen. Dadurch wird die durchgängige Verwendung einer Datenbasis für die Vielzahl der spezialisierten Engineering-Werkzeuge ermöglicht [Dr (2011), LHK (2010), DrBa(2011), MMW (2012)].

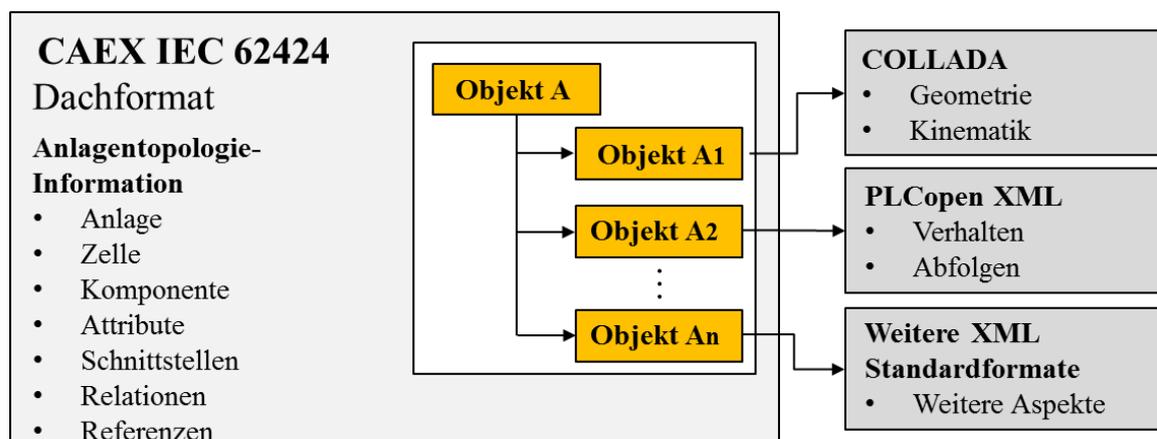


Abbildung 22: Aufbau eines Objektes in AutomationML nach [Dr (2011) – S.46]

Bei AutomationML handelt es sich um ein XML-basiertes Datenformat, mit dem Engineering-Daten zwischen unterschiedlichen Tools ausgetauscht werden können [DrBa (2011)]. Dabei stellt AutomationML eine Verlinkung zwischen verschiedenen, spezifischen Datenformaten her. Zur Speicherung der Struktur der Produktionsanlage wird in CAEX (Computer Aided Engineering Exchange), ein standardisiertes Datenformat, mit dem Informationen über die Hierarchie von Objekten gespeichert werden, verwendet, das u.a. von Epple für Anwendungen in der Verfahrenstechnik entwickelt wurde [Ep (2003)]. Das Format ist aber auf andere Domänen übertragbar, wie weiterführende Arbeiten zeigen [Ru (2011), RGF (2008)]. Zur Speicherung von geometrischen und kinematischen Informationen zu den Objekten wird das ebenfalls XML-basierte, offene Austauschformat COLLADA (*COLLABorative Design Activity*) eingesetzt [Dr (2011) – S.30-31]. Für Abläufe und Verhalten wird das offene Datenaustauschformat PLCopen XML verwandt. Dabei handelt es sich um ein offenes Austauschformat für die in der IEC Norm 61131-3 standardisierten SPS Programmiersprachen [Dr (2011) – S.31-33]. Der Aufbau eines Objektes in AutomationML ist in Abbildung 22 visualisiert. Es existieren Werkzeuge, die den Entwickler bei der Erstellung, Verwaltung und Visualisierung der Objekte unterstützen. In

weiterführenden Arbeiten wird zudem die Prozessbeschreibung mit AutomationML gezeigt, die es ermöglicht, Produktionsprozesse zwischen unterschiedlichen Engineering-Tools auszutauschen und mit diesen Tools an einem komplexen Prozess zu arbeiten [LHK (2010)].

Einen ähnlichen Ansatz beschreiben Moser et al. mit dem *Open Engineering Service Bus* [MMW(2012), WMZB (2010)]. Den Vorteil der darin verwendeten Engineering-Objekte sehen sie in der flexibleren Definition und Wiederverwendung aufgrund der ontologiebasierten Datenmodelle. Abbildung 23 zeigt beispielsweise die Kombination der Daten aus verschiedenen Datenquellen zu einem Engineering-Objekt. Bei der Wiederverwendung der Module werden also nur die entsprechenden Engineering-Objekte dem Anwender zur Verfügung gestellt. Basierend auf den darin enthaltenen Daten kann er die Anlage in verschiedenen Tools ausdetaillieren.

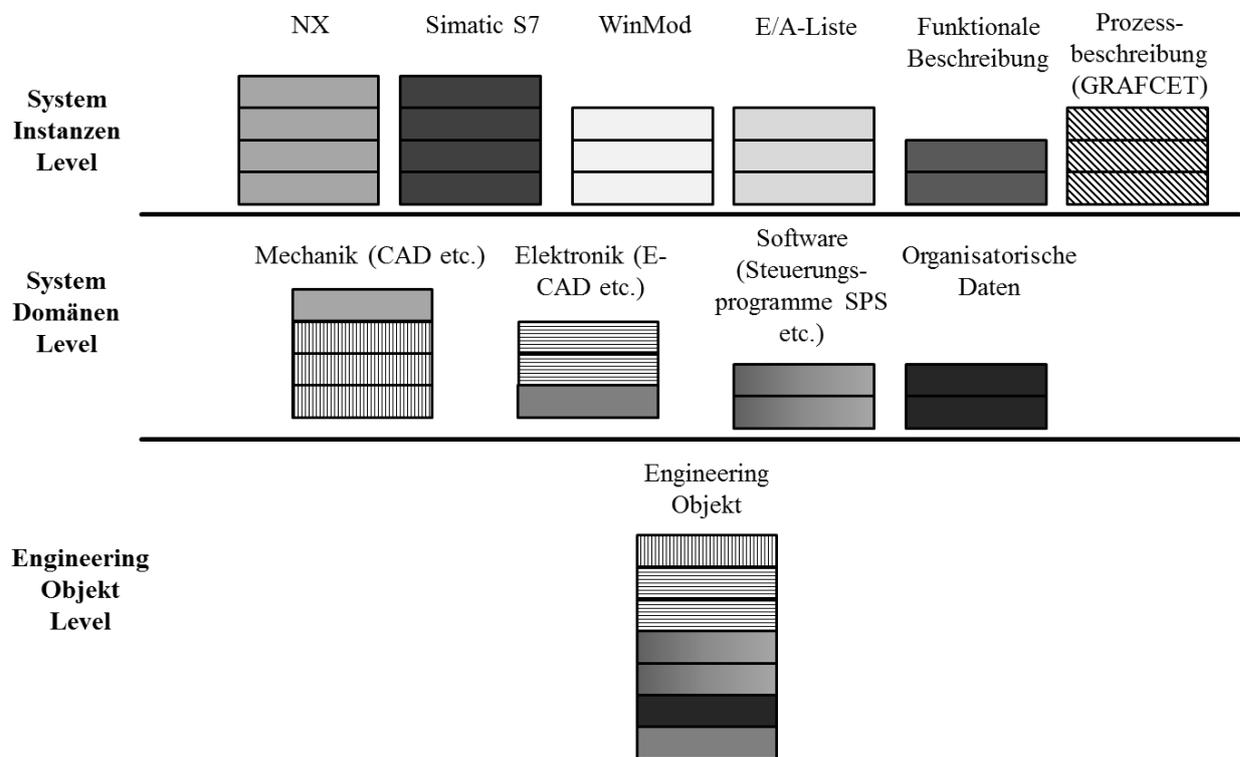


Abbildung 23: Daten eines Moduls werden aus verschiedenen Datenquellen zusammengefügt nach [MMW (2012)]

Darüber hinaus existieren weitere Datenmodelle und Formate insbesondere, um Eigenschaften eines Objektes in verschiedenen, meist disziplinspezifischen Tools (z.B. CAD), speichern und verwenden zu können [SyMa (2011)]. Neben diesen mechatronischen Ansätzen existieren auch Arbeiten, bei denen eine Disziplin im Vordergrund steht [BGS (2009), KoTo(2012)]. Diese Ansätze beschreiben die Zusammenhänge zwischen den disziplinspezifischen Daten meist anhand des mechanischen CAD-Modells.

Für die Modellierung von Modulen, Komponenten und Anlagen macht Reuter Vorgaben und definiert ein mechatronisches Informationsmodell [Re (2012)]. Dieses Modell zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass es herstellerunabhängig ist und in verschiedenen Branchen eingesetzt werden kann. Er definiert damit die Modelle, die Schnittstellen und die Abhängigkeiten zwischen Sensoren, Aktoren und Informationsverarbeitung. Das Verhalten mechatronischer Module kann in Modelle integriert werden, um die Ausgestaltung der

Produktionsanlage zu vereinfachen [ScVo (2011)]. Dafür wird das Verhalten des Moduls unter Berücksichtigung der Funktion, aber auch mit dem Ziel einer energieeffizienten Steuerung eines Moduls, mittels SysML modelliert. Dadurch wird es möglich, bspw. vordefinierte SPS-Programme zu nutzen und diese über definierte Schnittstellen mit anderen Modulen zu verbinden.

Neben dem disziplinenübergreifenden Austausch von Daten ist auch zu berücksichtigen, dass die Engineering-Tools in unterschiedlichen Phasen eingesetzt [BGL+(2011)] und auf unterschiedlichen Entscheidungsebenen im Unternehmen betrachtet werden [LZE (2012)]. Die Entscheidungen im Engineering können, wie von Weyrich et al. beschrieben, bspw. durch kinematische Simulation abgesichert werden [WeKl (2012b)]. Aufgrund der zunehmenden Forderung nach Flexibilität und Wandlungsfähigkeit wird die Effizienz einer Simulation ein immer bedeutenderer Faktor [VMH (2009), LKW (2007)]. Eine Möglichkeit, effizient zu einer Simulation und damit zu einer Bewertung eines Konzeptes für eine Produktionsanlage zu kommen, ist die Verwendung von Simulationsbaukästen mit standardisierten Modulen und definierten Schnittstellen [LKV (2008)]. In weiteren Arbeiten wird zudem auf die Identifikation solcher Module eingegangen, die sich für eine einfache Wiederverwendung in solchen Simulationstools eignen [WeSt (2013)].

3.2.3 Fazit – Engineering neuer Anlagen

Im Engineering von Produktionsanlagen soll die Wiederverwendung sowohl auf „materielle Artefakte, wie z.B. Motoren, Pumpen, Funktionsbausteine, angewandt werden, als auch auf immaterielle Artefakte, wie z. B. Pläne, Architekturen, Spezifikationen.“ (FMS (2009) S. 83) Für die technisch-wirtschaftliche Bewertung der Module sind vor allem die immateriellen Artefakte, also das Wissen über die Module, von Bedeutung. Es existiert keine Methode oder kein Werkzeug, das den Entwickler bei der Nutzung und Wiederverwendung dieses Wissens über die Module gezielt in frühen Phasen des Engineering neuer Produktionsanlagen unterstützt.

Im Bereich der Vorgehensbeschreibungen bzw. der Engineering-Prozesse existieren Ansätze im Bereich der Konstruktionsmethodik bzw. im *Axiomatic Design*. Hier werden bereits „modulare Strukturen“ bzw. deren funktionale Zuordnung von Design Parametern angesprochen. [VDI 2222, Su (1990), Su (2001)]. Diese dienen der Komplexitätsreduktion im Engineering durch eine Unterteilung der Gesamtaufgabe in logische Teillösungen. Eine Wiederverwendung dieser Teillösungen oder eben Module ist natürlich möglich – Fragen der Modularisierung bzw. der Auswahl von Modulen werden aber nicht angesprochen und sollen daher im Rahmen dieser Arbeit adressiert werden.

Viele der vorgestellten Methoden und Ansätze zur Bewertung und Beschreibung der Eigenschaften beziehen sich auf spätere Phasen im Engineering-Prozess. Ihre Übertragbarkeit müsste analysiert und durch praktische Anwendung verifiziert werden, um die Aussagegenauigkeit einer Bewertung in den frühen Phasen des Engineering zu erhöhen. Zudem basieren einige Prognoseverfahren bspw. von Lang sowie von Leung und Suri auf einer breiten und detaillierten Datenbasis. Demgegenüber steht das Problem, dass diese breite Datenbasis in den frühen Phasen nicht oder nur mit unzureichender Genauigkeit vorhanden ist. Es existiert aber auch eine Vielzahl an Kalkulationsmethoden, die die Kosten in den frühen Phasen des Engineering mit hinreichender Genauigkeit abschätzen. Desweiteren kann das Wissen von

erfahrenen Entwicklern externalisiert und für die Wiederverwendung in einer Datenbasis gespeichert werden.

Zum Vergleich von Anlagen können Simulationen oder auch aggregierte Werte wie die Gesamtanlageneffektivität genutzt werden. Simulationen bieten zwar eine hohe Aussagegenauigkeit, bedingen aber auch einen gewissen Modellierungsaufwand. Kennzahlen wie die Gesamtanlageneffektivität können schneller verglichen werden. Alternativ zu diesen Werten können auch bestehende Daten genutzt und über statistische Verfahren angepasst werden. Eine Möglichkeit hierfür ist der *Six Tenth Factor*. Statistische Verfahren bieten darüber hinaus einen Ansatz, um mit unvollständigen Daten umzugehen.

Sowohl im Bereich der Beschreibung und Bewertung von Eigenschaften sowie der Abbildung und dem Vergleich des Systemverhaltens sind Vorarbeiten vorhanden. Da diese bislang meist in späteren Phasen und mit vollständigen Daten Einsatz finden, gilt es im Rahmen dieser Arbeit, vielversprechende Ansätze zu kombinieren und auf die frühen Engineering Phasen zu übertragen.

Hinsichtlich der Engineering Werkzeuge sind vor allem in den späteren Engineering-Phasen der Ausgestaltung gute Voraussetzungen für die Wiederverwendung der Module vorhanden. Vom Ansatz der Wiederverwendung von Lösungsmustern grenzt sich die in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Methode dahingehend ab, dass sie auf die Unterstützung und Auswahl dieser Lösungsmuster abzielt [ADDG(2011)]. Durch die konsequente Umsetzung, Weiterentwicklung und Anwendung der beschriebenen Tools und Austauschformate können die Lücken im Stand der Technik, wie etwa das Fehlen einheitlicher Modelle [BGKE (2011)], geschlossen werden. Zuvor müssen diese Defizite im Stand der Technik jedoch genauer definiert werden, um dann anschließend auf die Anforderungen an eine Methode eingehen zu können, die auf der Wiederverwendung von Modulen im Engineering basiert und in den frühen Phasen des Engineering-Prozesses eingesetzt werden soll.

3.3 Fazit - Stand der Technik

Aus den beschriebenen Vorarbeiten ergeben sich für eine Wiederverwendung von Modulen im Engineering von Produktionsanlagen Lücken.

- Aufbau der Wissensbasis
 - Es existiert keine Modularisierungsmethode, die bestehende Produktionsanlagen in funktionale Module unterteilt und die den Anwender bei der Wahl einer geeigneten Granularität unterstützt.
 - Das Vorgehen zur Systematisierung von Modulen bspw. durch Funktionen wurde bislang nicht beschrieben.
- Engineering neuer Anlagen
 - Die Wiederverwendung und vor allem die Auswahl von Modulen auf Basis einer Bewertung wurden bislang nicht in den Vorgehensbeschreibungen zum Engineering berücksichtigt.
 - Die bestehenden Engineering Werkzeuge zielen meist auf spätere Phasen ab.

Diese Lücken sollen im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden. Dazu werden in einem nächsten Schritt Anforderungen an eine Methode angeführt.

4 Anforderungen an eine Methode zur Wiederverwendung von Modulen im Engineering

Aufbauend auf der Motivation für diese Arbeit sowie vor dem Hintergrund der aufgezeigten Lücken im Stand der Technik sollen nachfolgend die Anforderungen an eine neue Methode beschrieben werden. Im Engineering von Produktionsanlagen ergeben sich aus den unterschiedlichen Anforderungen der Kunden eine Vielzahl an Möglichkeiten, die Architektur der Produktionsanlage anzupassen und zu optimieren.

Produktionsanlagen zeichnen sich dabei insbesondere durch die niedrige zu fertigende Stückzahl und die individuelle Anpassung der Anlage an den Produktionsprozess des Kunden aus. In diesem Zusammenhang spielen der Grad der Standardisierung und die Komplexität der Anlagen eine entscheidende Rolle. Daraus resultieren auch unterschiedliche Ansätze für die Optimierung des Engineering-Prozess für Produktionsanlagen bzw. der Produktarchitektur durch die Wiederverwendung von Modulen. Beim Engineering von Produktionsanlagen sollen durch die Verwendung des Wissens über frühere Projekte die Effizienz erhöht und Fehler vermieden werden. Es geht dabei nicht darum, Varianz einzuschränken, sondern vielmehr zu ermöglichen, indem man als Grundlage für die spezifische Anpassung an den Produktionsprozess beim Kunden bestehendes Wissen nutzt.

Im Gegensatz dazu werden im klassischen Produktgeschäft stark standardisierte Produkte (z.B. Automobilindustrie, Werkzeugmaschinen) entwickelt und gefertigt. Die Optimierung der Produktarchitektur zielt hier vor allem auf die Beherrschung der Variantenvielfalt und auf die daraus resultierende Standardisierung von Baugruppen und Bauteilen ab, um diese in einer hohen Stückzahl wiederverwenden zu können [LRZ(2006)]. Die hier eingesetzten Methoden beschäftigen sich mit dem Variantenmanagement, dem Einsatz von Konfiguratoren und der Reduktion der Lagerhaltungskosten durch die Erhöhung des Anteils an Gleichteilen.

Zur eindeutigen Zuordnung wird in dieser Arbeit bei hoch standardisierten Architekturen für hohe Stückzahlen von Produkten gesprochen. In Abgrenzung dazu werden prozessspezifische Architekturen ‚Produktionsanlagen‘ oder ‚Fertigungssysteme‘ genannt. Aufgrund der Vielzahl möglicher Produktionsprozesse kann die Gesamtheit der Produktionsanlagen als komplexer betrachtet werden als die Gesamtheit der Produkte. Eine Maschine, die in großer Stückzahl und mit hoher Standardisierung entwickelt und gefertigt wird (z.B. standardisierte dreiaxige Werkzeugmaschine), kann dieser Einordnung folgend als Produkt betrachtet werden, obwohl sie zur Produktion eingesetzt wird [WeKl (2012c)].

Abbildung 24 stellt die Unterschiede zwischen standardisierten Produkten und unikalenen Projekten dar und ordnet charakteristische Konfigurationsansätze und Beispiele zu. Einfache Produkte wie beispielsweise eine Schraube werden in verschiedenen, standardisierten Varianten gefertigt (*Make to order*). Mit zunehmender Komplexität der konfigurierten Produkte sinkt im Allgemeinen das Maß an Standardisierung. Dies liegt zum einen am Aufwand bspw. um standardisierte Schnittstellen zu definieren, andererseits aber auch an den geringen Stückzahlen an zu erwartenden Wiederverwendungen. Werden vordefinierte Baugruppen montiert, spricht man vom ‚*Assemble to order*‘, werden diese noch über Parameter verändert vom ‚*Configure to order*‘. Beim ‚*Engineer to order*‘ werden Module über die vorgedachten Grenzen hinaus

angepasst. Höchste Komplexität und daher auch im Allgemeinen die geringste Standardisierung ist im Projektgeschäft vorhanden. Hier werden typischerweise keine Module eingesetzt. Das Engineering prozessspezifischer Produktionsanlagen lässt sich den Bereichen „*Engineer to order*“ oder Projekt zuordnen.

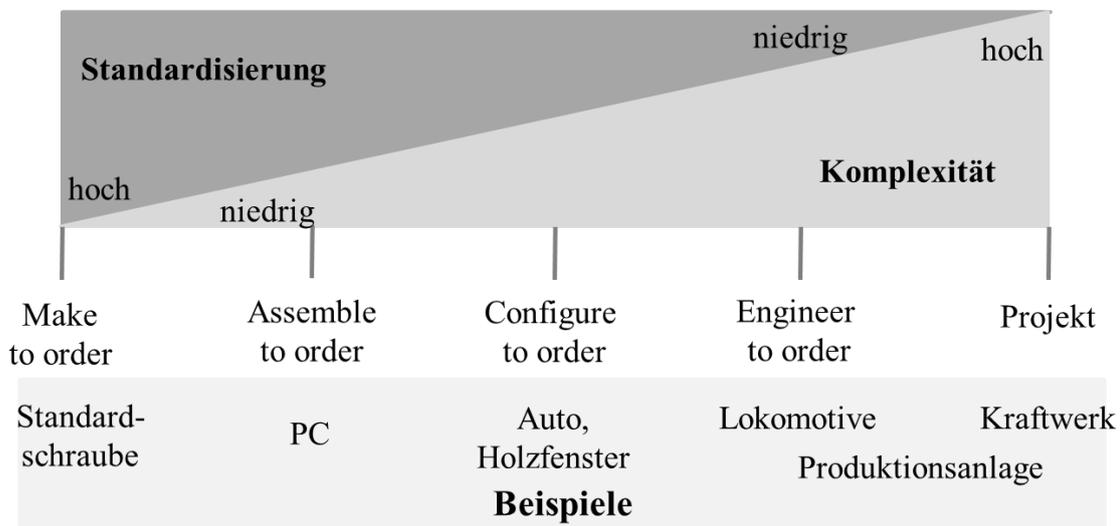


Abbildung 24: Unterschiede zwischen Massenprodukten und prozessspezifischen Produktionsanlagen sowie bislang bekannte Konfigurationsansätze – nach [BMU (2011) - S.43]

Das Variantenmanagement zielt in der Regel auf die Bereiche niedriger bis mittlerer Komplexität ab. Hier lassen sich durch Reduktion der Variantenvielfalt und durch die Standardisierung von Schnittstellen große Potentiale im Zusammenspiel zwischen Vertrieb, Entwicklung hin zu Produktion, Inbetriebnahme und Service genießen. Fragen der Modularisierung und der Modulauswahl sind für diese Bereiche weitreichend erforscht und in der praktischen Anwendung⁵.

Lücken auf Seiten der Methode und demzufolge auch der Werkzeuge sind dagegen beim Thema Wiederverwendung von Modulen für hohe Komplexität festzustellen [Po (2010)]. Dadurch ist eine breite Anwendung des „Modulgedankens“ im Bereich prozessspezifischer Produktionsanlagen bislang nicht möglich.

Um die Übertragbarkeit des Ansatzes in erster Linie auf unterschiedliche Produktionsanlagen, aber auch auf unterschiedliche Unternehmen und Branchen zu ermöglichen, sollten die Lösungen der hier vorgestellten Methode nicht domänenspezifisch sein. Dadurch soll in erster Linie ermöglicht werden, dass eine große Auswahl an bestehenden Anlagen modularisiert wird und somit eine breite Wissensbasis für die Konzeption neuer Produktionsanlagen erstellt werden kann. Wichtige Anforderungen sind daher die Erweiterbarkeit der Systematik der Module, um neuen Branchen und Anlagen berücksichtigen zu können, und die *Übertragbarkeit* der Methode zur Definition wiederverwendbarer Module und zur Bewertung der Module.

Eine breite Wissensbasis ist die Voraussetzung dafür, dass neue Lösungskonzepte abseits der bekannten Lösungen durch den Konfigurator generiert werden können. In diesem Fall dient die Methode nicht nur als Werkzeug zur systematischen Wiederverwendung von Wissen, sondern

⁵ vgl. Kapitel 2.3 und 3.1

vielmehr auch als eine Art Kreativitätstool, mit dem neue Lösungskonzepte abseits der bekannten Lösungen generiert werden können. Neue Module aus anderen Abteilungen, Unternehmen oder Industriezweigen könnten damit berücksichtigt werden. Mit der aus der Forderung an eine breite Wissensbasis resultierenden Offenheit der dreistufigen Methode steigt aber selbstverständlich auch die Bereitschaft der Unternehmen, Wissen und Daten über bestehenden Anlagen bereitzustellen. Aus theoretischer Sicht ist also die *Offenheit* der Methode eine Anforderung, um den Nutzen der kreativen Lösungskonzepte zu realisieren. In der praktischen Umsetzung zeigt sich jedoch, dass firmenspezifische Lösungen von der Industrie gewünscht werden. Bei der Umsetzung der Methode in eine Software sollte also darauf geachtet werden, dass sowohl eine offene als auch eine firmenspezifische Lösung möglich ist.

Die bereits angesprochene Zeitersparnis im Engineering ergibt sich vor allem auch aus der *Wissensintegration* in Form von Daten und Zusammenhängen zwischen den Modulen. Dieses Erfahrungswissen über bestehende Produktionsanlagen wird durch die Anforderungen des Aufbaus einer offenen oder unternehmensspezifischen Datenbasis externalisiert und kombiniert; d.h. erfahrene Entwickler können ihr Wissen und die Daten von bestehenden Anlagen zur Verfügung stellen und unerfahrenen Entwicklern wird dieses Wissen systematisch bereitgestellt.

Die Anforderung, die Wiederverwendung von Modulen in die *frühen Phasen des Engineering* zu ermöglichen, ergibt sich einerseits aus der bereits angesprochenen Diskrepanz aus Kostenfestlegung und Kostenverursachung⁶, andererseits aus der Anforderung der Wirtschaft, Konzepte für Produktionsanlagen bei der Angebotserstellung für die Serienproduktion von Produkten möglichst zeitnah nach der Anfrage absichern zu können. Wird die Entscheidung über das Konzept einer Produktionsanlage in frühen Phasen des Engineering durch die Wiederverwendung erprobter und wirtschaftlich bewerteter Module abgesichert, können die höheren Kosten einer späten Fehlerbeseitigung vermieden werden.

Aus den beschriebenen Anforderungen an die Methode lässt sich somit folgende Arbeitshypothese ableiten. Das Engineering kundenspezifischer Produktionsanlagen lässt sich effizienter gestalten, wenn

- Komponenten zu größeren funktionserfüllenden Modulen zusammengefasst werden können,
- die Auswahl geeigneter Modulkombinationen durch eine technisch-wirtschaftliche Bewertung unterstützt wird.

4.1 Anforderungen an die Definition wiederverwendbarer Module

Die zentrale Anforderung an die Definition von Modulen ist deren *Wiederverwendbarkeit*. Können nur sehr spezifische Module identifiziert werden, die nicht im Engineering einer anderen Produktionsanlage eingesetzt werden können, entsteht kein Nutzen durch die vorgestellte Methode, sondern nur zusätzlicher Aufwand durch die Modularisierung und den Aufbau der Wissensbasis. Die logische Konsequenz wäre der Aufbau einer Wissensbasis mit Komponenten, da diese in vielen Anlagen wiederverwendet werden können.

⁶ Vgl. Kapitel 2.4.1

Der Anforderung der Wiederverwendbarkeit steht die Anforderung nach *möglichst umfangreichen Modulen* gegenüber. Durch die Wiederverwendung umfangreicher Module steigt der Nutzen der Wiederverwendung in Form der Zeitersparnis des Engineerings, da der Anwender nur wenige Module auswählen muss. Zudem ermöglichen umfangreiche Module die Wiederverwendung komplexerer Daten, wie z.B. Zusammenbauzeichnungen, Montageanleitungen oder Bausteine des Steuerungsprogramms. Die Schlussfolgerung aus dieser Anforderung wäre also, möglichst komplexe Module für die Wiederverwendung zu identifizieren, um den Nutzen möglichst zu steigern.

Da beide Anforderungen im direkten Widerspruch zueinander stehen und bisherige Ansätze im Bereich der Modularisierung entweder auf die Identifikation kleinster Einheiten oder spezifischer, standardisierter Module abzielen, ist das Ziel dieser Stufe der Methode, wiederverwendbare und umfangreiche Module zu identifizieren – also das Maß der Komplexität der Module im Optimum aus Nutzen und Wiederverwendbarkeit zu bestimmen (s. Abbildung 25).

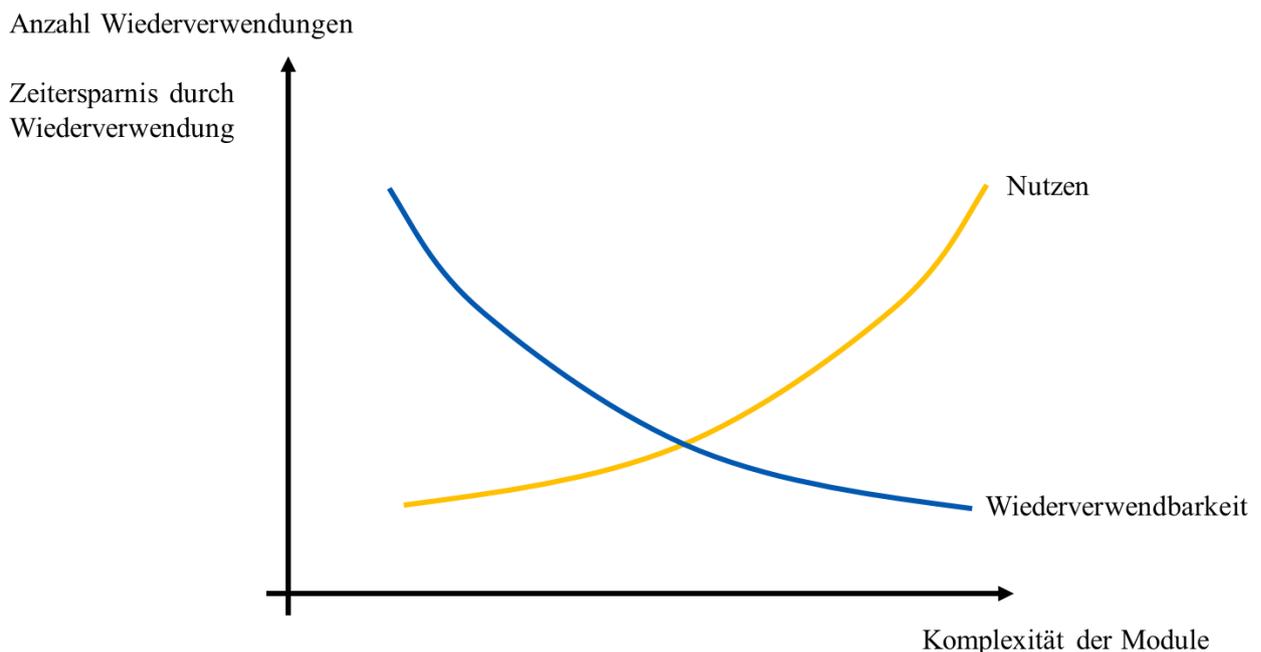


Abbildung 25: Zielkonflikt bei der Modularisierung hinsichtlich der Komplexität der Module

Der Umfang eines Moduls sollte dabei so gewählt werden, dass jedes Modul einer Funktion in der Prozessbeschreibung der Produktionsanlage entspricht. Diese *Funktionserfüllung* erleichtert die Systematisierung und den Vergleich der Module untereinander bei der Wiederverwendung. Prozessspezifische Komponenten eines Moduls sollten jedoch als eigenständiges Modul gespeichert werden, das das funktionserfüllende Modul in der Wissensbasis ergänzt, da ansonsten die Wiederverwendbarkeit der Module eingeschränkt würde. Dem Ansatz der Funktionserfüllung entsprechend sollten die Module möglichst abgeschlossen und dezentral sein. Im Gegensatz zu dieser Forderung können Schnittmengen allerdings auch genutzt werden, um Zusammenhänge zwischen den Modulen zu beschreiben. Da in der Praxis nicht alle Module dezentral und autark sein werden, soll die Methode neben Maßnahmen zur Erhöhung der Dezentralität auch die Möglichkeit zur Abbildung der Zusammenhänge bieten.

Eine Möglichkeit zur Sicherstellung der Wiederverwendbarkeit der identifizierten Module ist der *Vergleich zwischen verschiedenen Produktionsanlagen*. Daher soll die Methode den Vergleich zwischen verschiedenen Produktionsanlagen und damit die Absicherung der Module ermöglichen.

Zudem soll die Stufe der Methode die Identifikation von Modulen in *bestehenden Anlagen* ermöglichen, um die Akzeptanz durch den Anwender im Engineering neuer Produktionsanlagen zu erhöhen. Die Wiederverwendung von Modulen aus bestehenden Anlagen vermindert das Risiko fehlerhafter Module. Andererseits wird das Spektrum der möglichen Lösungen durch die Wiederverwendung von Modulen aus bestehenden Anlagen nicht erweitert. Daher sollten auch Module aus anderen Quellen genutzt oder neue Module entwickelt werden. Dies entspricht auch der Anforderung der Offenheit an die gesamte Methode, da durch die Verwendung von unterschiedlichen Modulen aus unterschiedlichen Branchen das Lösungsspektrum erweitert wird. Dies kann zu neuen innovativen Lösungen abseits der bekannten Standardlösungen führen.

Produktionsanlagen sind heute mechatronische Systeme, die damit auch disziplinenübergreifend engineered werden sollten. Um dieser Anforderung Rechnung zu tragen, sollten die Komponenten nicht als mechanisch abgeschlossene Einheiten betrachtet, sondern in disziplinspezifische Subkomponenten zerlegt werden. Dies ermöglicht eine Identifizierung von Modulen abseits der kommerziell verfügbaren und meist mechanisch geprägten Komponenten.

Um Produktionsanlagen modularisieren zu können, muss die *Granularität der Komponenten einheitlich* sein. Das heißt, die Komplexität der Komponenten und Subkomponenten, die die Basis für die Modularisierung darstellen, sollte vergleichbar sein. Spätestens beim Vergleich zwischen mehreren Produktionsanlagen sind anlagenübergreifende Module sonst schwierig zu identifizieren [KKJ+(2013)]. In der Wissensbasis sollen Informationen zu Komponenten und Modulen gespeichert werden. Produktionsanlagen werden lediglich durch die Prozessbeschreibung in der Wissensbasis berücksichtigt.

Das Vorgehen für die aus diesen Anforderungen abgeleitete Methode ist in Kapitel 5.1 beschrieben. Nachfolgend werden Voruntersuchungen zu einzelnen Aspekten der Methode kurz vorgestellt.

Die identifizierten Module sollen systematisch in der Wissensbasis gespeichert werden. Um die *Austauschbarkeit* und damit die Optimierung der Modulkombination zu ermöglichen, ist eine eindeutige Zuordnung der Module beispielsweise zu standardisierten Katalogen, Eigenschaften oder Funktionen sinnvoll. Dadurch werden Redundanzen vermieden und durch die Hierarchie des systematisierenden Merkmals eine Beschreibung des Produktionsprozesses oder seiner Eigenschaften auf unterschiedlichen Abstraktionsgraden möglich. Zur Orientierung eignen sich insbesondere Normen oder Richtlinien zu Fertigungsverfahren (z.B. DIN 8580) oder zur Montage- und Handhabungstechnik (z.B. VDI 2860), die einen systematisierten Katalog an Funktionen bereitstellen. Je nach Domäne der Produktionsanlage dienen diese standardisierten Kataloge aber nur als Grundlage für einen spezifischen Funktionskatalog. Diese Kataloge sollten Funktionen und Eigenschaften möglichst lösungsneutral beschreiben, um die Zuordnung verschiedener Module und damit die Austauschbarkeit bei der Optimierung der Modulkombination zu ermöglichen. Zudem müssen Module, die keine direkte Funktion im Produktionsprozess der Anlage erfüllen, sondern eine Querschnittsfunktion übernehmen, in der

Struktur der Wissensbasis abgebildet werden. Die Analyse der integrierten Betrachtung, also die Zuordnung von Funktion und die Modularisierung in einem Schritt durch die DSM Matrix, wurde untersucht und führte auch in der praktischen Erprobung nicht zu verwertbaren Ergebnissen. Andere Ansätze wie die *Domain-Mapping* Matrix oder die *Multi-Domain-Matrix* sind davon unberührt. Diese systematischen Verfahren können zur Zuordnung alternativ eingesetzt werden, erhöhen aber auch die Komplexität bei der Erstellung und Auswertung der Matrizen.

Die Einbindung der Wiederverwendung von Modulen in die Engineering-Prozesse und Systeme beim Anwender soll eine *intuitive Nutzung* und damit die Akzeptanz der Wiederverwendbarkeit erhöhen. Dazu sollen die Daten der bestehenden Informationsstruktur der mechatronischen Module genutzt werden, um eine zusätzliche Komplexität durch die Systematisierung zu vermeiden. Die Informationsstruktur ist in Abbildung 26 dargestellt. Alternative Informationsmodelle zur Speicherung von Moduldaten sind bspw. bei Reuter erläutert [Re (2012)]. Nachfolgend sollen Möglichkeiten der Einbindung in Beschreibungen von Engineering-Prozessen sowie die Integration in bestehende Systeme näher erläutert werden.

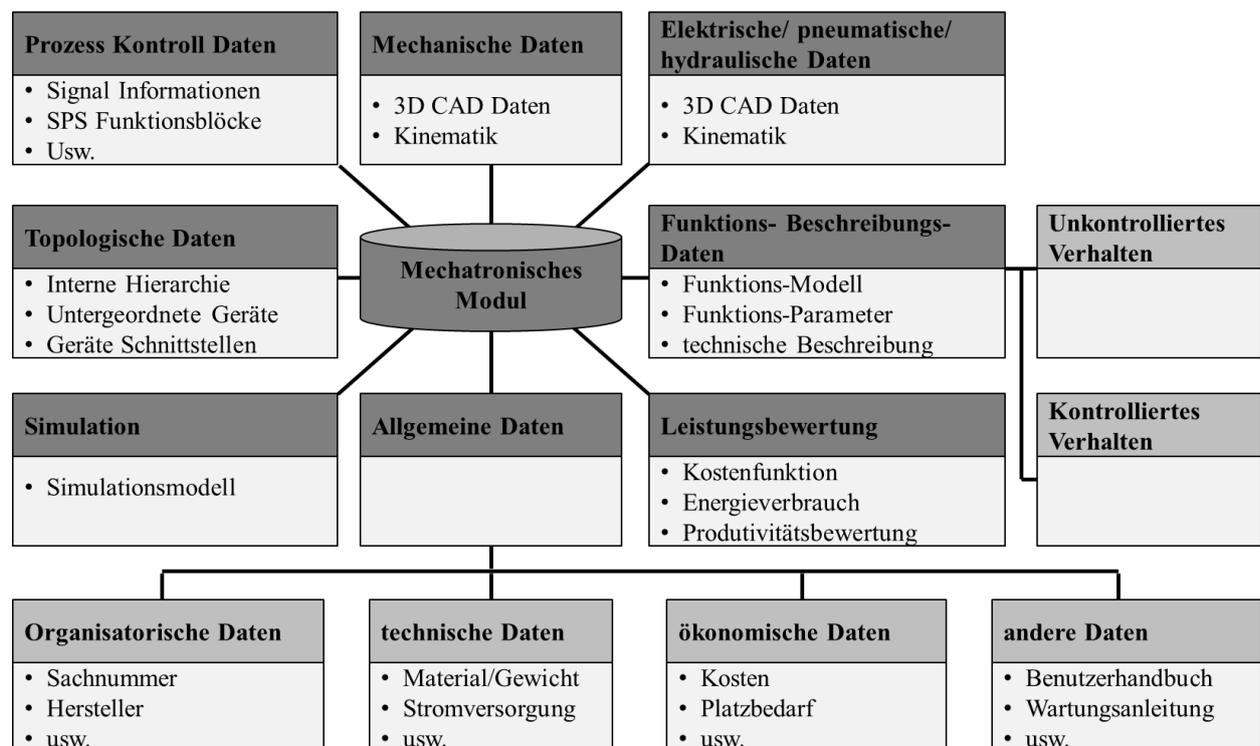


Abbildung 26: Informationsstruktur mechatronischer Module nach [LFW+ (2010)]

4.2 Anforderungen an die Auswahl von Modulen im Engineering neuer Anlagen

Gerade aus der Anforderung an die Methode, Module in frühen Phasen des Engineering wiederverwenden zu können, lässt sich ableiten, dass die Konzeptvarianten mit einer *hinreichenden Genauigkeit* bewertet werden müssen. Eine exakte Bewertung, wie sie im Rahmen der wirtschaftlichen Kalkulation oder im Detail Engineering durchgeführt wird, ist in der frühen Phase des Engineering nicht möglich. Die Bewertung dient vielmehr einem Vergleich zwischen den Konzeptalternativen, um offensichtlich bessere Alternativen auszuwählen oder

offensichtlich schlechtere Alternativen auszuschließen. Der Genauigkeit der Bewertung steht in dieser Phase des Engineerings vor allem der *Aufwand zur Bewertung* von Konzeptalternativen gegenüber. Ziel dieser Stufe der Methode ist es, Konzeptvarianten durch eine einfache und hinreichend genaue Bewertung zu vergleichen und somit den Lösungsraum in der Entwicklung einzugrenzen.

Eine wichtige Rahmenbedingung bei der Bewertung von Konzeptvarianten ist die *Leistung der Produktionsanlage*. Die Bewertung der Module sollte abhängig von der Produktionsmenge der Anlage sein. Zwar sind einige Module stufenlos skalierbar oder können unabhängig von der zu produzierenden Stückzahlen etc. in passenden Ausführungen beschafft werden, da dies jedoch nicht sichergestellt ist, sollten im Zweifelsfall mehrere Module für verschiedene Rahmenbedingungen in der Wissensbasis gespeichert werden. Ein Beispiel für ein Modul, das in diversen Ausführungen am Markt erhältlich ist, ist ein Industrieroboter, der die Funktion „*Handling*“ erfüllt. Industrieroboter sind z.B. in verschiedenen realisierbaren Genauigkeiten, Lastbereichen, Kosten, Schutzarten und Geschwindigkeiten verfügbar. Einen direkten Zusammenhang zwischen diesen Eigenschaften des Moduls herzustellen und dadurch die Skalierbarkeit des Moduls „Industrieroboter“ zu realisieren, würde einen erheblichen Aufwand bedeuten. Für den Hersteller ist es daher sinnvoller, in der Wissensbasis verschiedene Varianten eines Roboters zu speichern und je nach geforderter Eigenschaft den Passenden auszuwählen.

Sowohl beim Aufbau der Wissensbasis als auch beim Engineering sollte der *Umfang der bereitzustellenden Informationen* für den Anwender intuitiv sein, um die Akzeptanz des Systems zu erhöhen. Hilfestellung bei der Allokation der Kosten etc. auf die Module können Methoden aus dem Bereich der Conjoint Analyse⁷ geben. Sind die vorhandenen Informationen beim Aufbau der Wissensbasis unvollständig, können diese durch *Data Mining* vervollständigt oder durch verschiedene Ansätze aus der Statistik abgeschätzt werden [Sa (2013)_SA]. Sowohl die Allokation der Kosten als auch die Ansätze zur Vervollständigung der Daten werden im Folgenden allerdings nicht detailliert untersucht, da davon ausgegangen werden kann, dass eine Bewertung der Module basierend auf dem Erfahrungswissen des Anwenders möglich ist.

Die technischwirtschaftliche Bewertung von Konzeptvarianten soll verschiedene Kriterien berücksichtigen. Die Stufe der Methode soll daher die Aggregation verschiedener Bewertungskriterien zu einem Nutzwert ermöglichen. Mögliche Kriterien sind beispielsweise Kosten, Energieverbrauch, Nutzungsgrad und Produktivität der Produktionsanlage. Aus den Teilbewertungen der Module und den unterschiedlichen Modulkombinationen soll ein einheitlicher und damit vergleichbarer Wert ermittelt werden.

Die Bewertung der Konzeptvarianten und damit die Optimierung der Modulauswahl in den frühen Phasen des Engineering kann durch eine Bewertung der Module integriert in den Auswahlprozess oder durch eine Bewertung des Gesamtkonzepts nach der Auswahl, bspw. durch Simulation, stattfinden. Auf beide Möglichkeiten wird nachfolgend eingegangen.

⁷ Vgl. u.a. [BaBr (2009)]

5 Methode zum Engineering von Produktionsanlagen durch Wiederverwendung von Modulen

Im nachfolgenden Kapitel wird, aufbauend auf der Motivation, dem Stand der Technik und den Anforderungen an die Wiederverwendung von Modulen im Engineering von Produktionsanlagen, eine Methode vorgestellt, die den zuvor dargelegten Anforderungen entspricht. Diese zielt einerseits auf den Aufbau einer Wissensbasis aus wiederverwendbaren Modulen (a), andererseits auf das Engineering neuer Produktionsanlagen (b) ab. In Abbildung 27 ist das Vorgehen beider Prozesse visualisiert. Das detaillierte Vorgehen ist – wie am Beispiel *Prozessschritt aI* angedeutet – im folgenden Kapitel für die einzelnen Schritte detailliert erläutert.

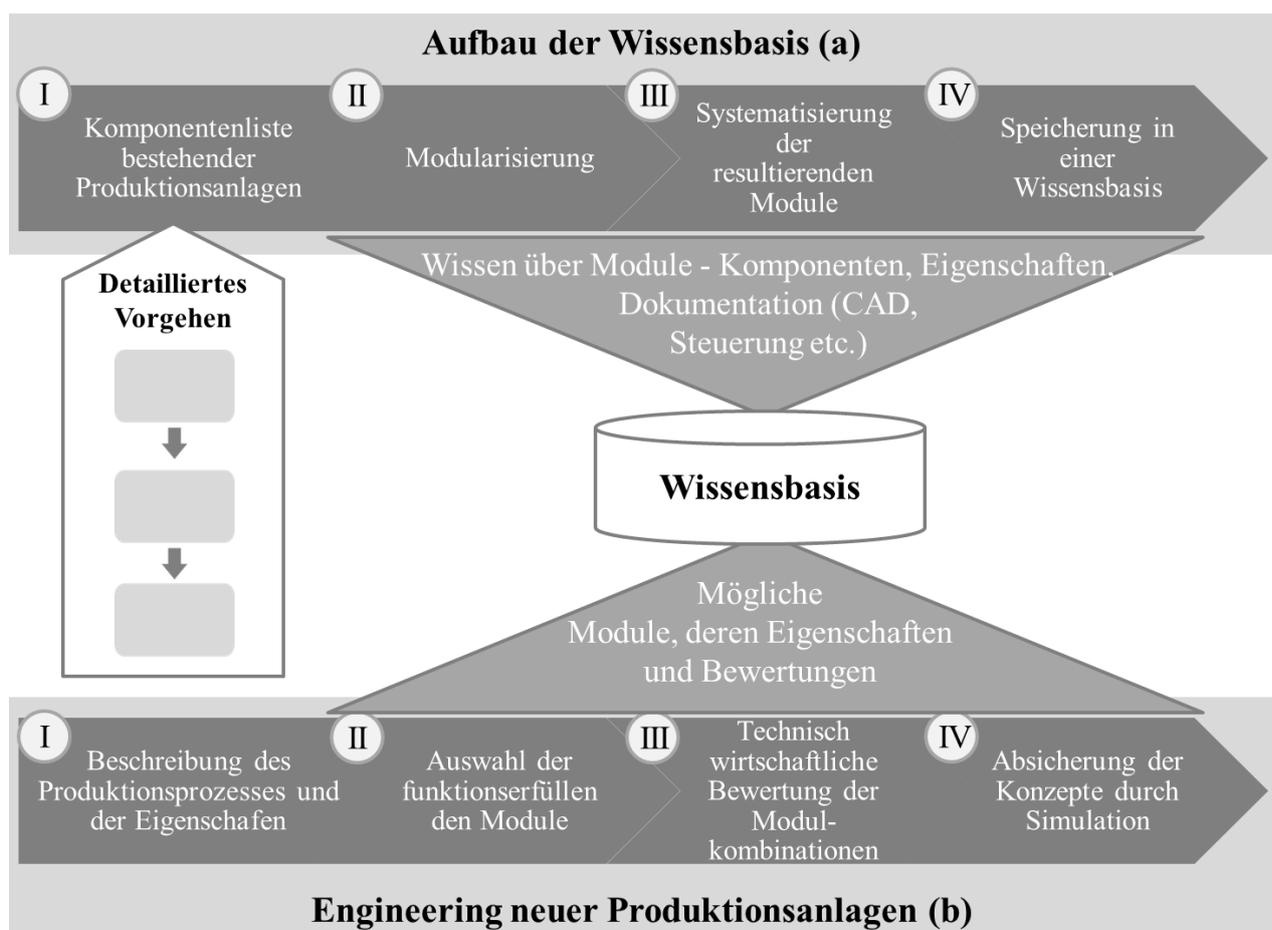


Abbildung 27: Vorgehensbeschreibung zum Aufbau der Wissensbasis (a) aus wiederverwendbaren Modulen und zum Engineering neuer Produktionsanlagen (b)

Die erste Stufe der Methode – die Definition wiederverwendbarer Module – dient dem Aufbau einer Wissensbasis und insbesondere dem *Prozessschritt a-II- Modularisierung*. Durch die Systematisierung und Einbindung in bestehende Prozesse und Systeme sollen einerseits die Module beim Aufbau der Wissensbasis systematisiert werden (*Prozessschritte a-III*). Andererseits ermöglicht diese Systematisierung die Auswahl der funktions- bzw. eigenschaftserfüllenden Module in *Prozessschritt b-II*. Durch die Bewertung sollen in *Prozessschritt b-III* die aussichtsreichen Modulkombinationen ausgewählt werden.

Die übrigen Prozessschritte dienen der Prozessanbindung oder der Weiterverarbeitung der Module und Modulkombinationen. In Kapitel 6 werden diese Prozessschritte bei der Umsetzung der Methode in einem Softwaretool berücksichtigt. Wissenschaftliche Fragestellungen – wie etwa der (formalisierten) Prozessbeschreibung und der Anbindung an eine Software zur Simulation oder Ausgestaltung – werden nicht detailliert beschrieben.

Im Folgenden wird bei der Definition wiederverwendbarer Module von der Modularisierung bestehender Produktionsanlagen gesprochen. Die vorgestellte Methode eignet sich aber ebenso für die gezielte Spezifikation und Entwicklung neuer, wiederverwendbarer Module. Für die gezielte Spezifikation und Entwicklung der Module kann aber nicht das Wissen praxiserprobter Produktionsanlagen wiederverwandt werden. Zudem sollen die Module in der Praxis angewandt werden, um Fehler in den Modulen oder den wiederverwandten Daten zu vermeiden. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei der Wiederverwendung von Modulen aus einer in der Praxis funktionierenden Produktionsanlage weniger Fehler vorhanden sind als bei neu entwickelten Modulen. Das Risiko, den Fehler auf verschiedene neue Produktionsanlagen zu übertragen, ist daher geringer. Die gezielte Spezifikation und Entwicklung wiederverwendbarer Module eignet sich vor allem für die Integration neuer Verfahren, die bislang nicht eingesetzt wurden.

Neben dem Einsatz im Engineering eignet sich die vorgestellte Methode auch für die Anpassung bestehender Maschinen beispielsweise aufgrund von Modernisierungen oder reparaturbedingtem Austausch von Komponenten. Durch die Modularisierung können die von einem Austausch betroffenen anderen Komponenten identifiziert und bei der Planung der Anpassung berücksichtigt werden. Der Austausch ganzer funktionserfüllender Module wird also durch die Auswahl entsprechender, neuer Module unterstützt.

5.1 Übersicht über die Methode

Die Methode soll den Entwickler im Engineering neuer Produktionsanlagen durch die teilautomatische Generierung von Lösungskonzepten und durch die Bereitstellung einer entsprechenden Bewertung unterstützen. Neben der Zeitersparnis des Entwicklers zielt diese Methode vor allem auf die Beherrschung der Komplexität und auf eine Absicherung der Konzeptentscheidung ab.

Zur Konzeption neuer Produktionsanlagen bzw. zur Anpassung bestehender Anlagen ist die in Abbildung 28 visualisierte Identifikation und Systematisierung wiederverwendbarer Module eine wichtige Voraussetzung. Die Erfahrungen und das Wissen aus bestehenden Anlagen können so in Form einer Moduldokumentation und -struktur in der Wissensbasis gespeichert werden. Zur Systematisierung können die Module bspw. Funktionen zugeordnet werden. Bei der Konzeption neuer Anlagen können Module auf Basis einer Prozessbeschreibung mit Funktionen ausgewählt werden. Der Austausch von Modulen derselben Funktion ist der Ausgangspunkt für eine Konzeptveränderung bestehender Anlagen.

Der wesentliche Nutzen des Engineering auf Basis von Modulen besteht in der Konzeption von Produktionsanlagen in frühen Phasen des Engineering und in der Wiederverwendung von Wissen. Anlagenentwickler und -betreiber sollen so schneller zu einer Bewertung des Konzeptes kommen. Diese Bewertung benötigt der Anlagenbetreiber bspw. bei der Angebotserstellung und bei der Kalkulation eines Massenproduktes, das auf der Anlage produziert werden soll. Hier

kann das Wissen aus bestehenden Projekten zur Vermeidung von sich wiederholenden Tätigkeiten, Fehleinschätzungen aber auch zu große Sicherheiten genutzt werden. Darüber hinaus führt die gesteigerte Effizienz im Engineering zu einer Verkürzung der *“Time-to-Market“*.

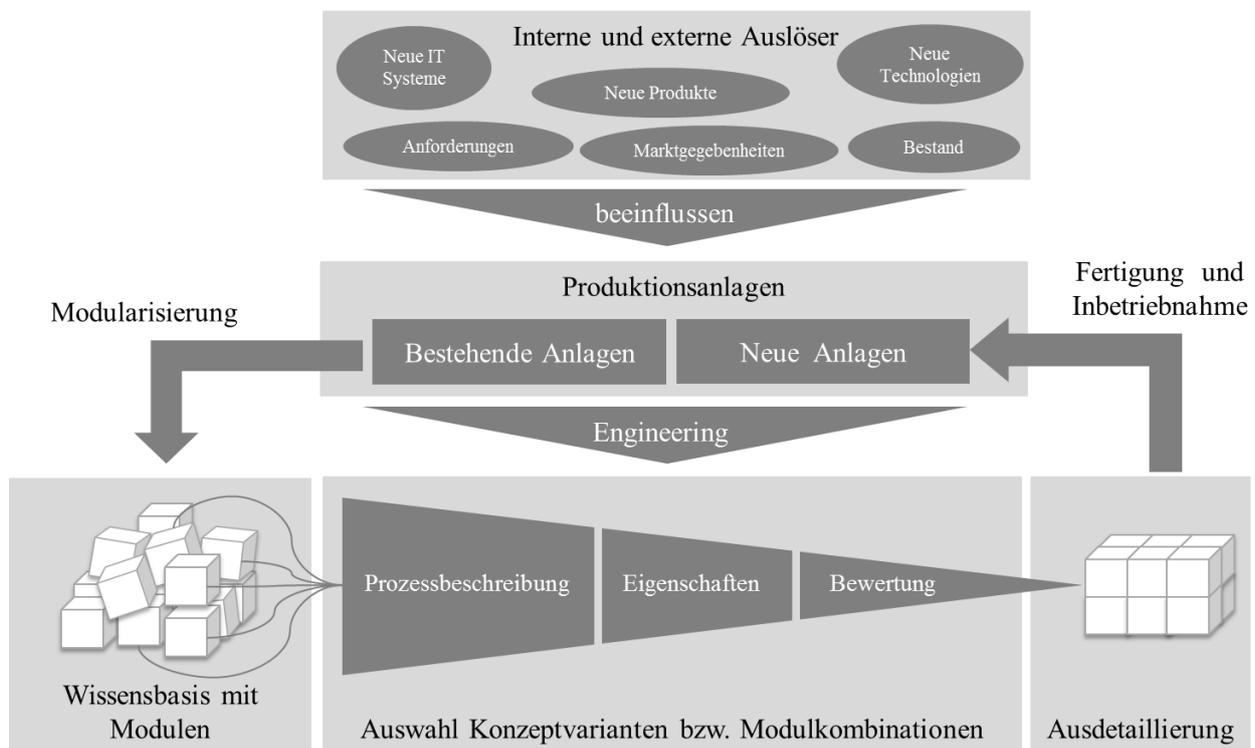


Abbildung 28: Engineeringkonzept von Modulbasierten Produktionsanlagen

Im heutigen Engineering von Produktionsanlagen wird das Wissen über die gefertigten Anlagen im Allgemeinen nicht systematisch für neue Anlagen wiederverwendet⁸

Im Gegensatz dazu soll in der in dieser Arbeit vorgestellten Methode die Wiederverwendung von Modulen schon bei der Modularisierung, also im Aufbau der Wissensbasis, berücksichtigt werden. Durch die Systematisierung der Module sollen Konzepte für neue Produktionsanlagen automatisch aus den Modulen in der Wissensbasis kombiniert werden. Dabei sollen die Module austauschbar sein, um Veränderungen an den Konzepten zu ermöglichen.

Ausgehend von einer bestehenden Produktionsanlage und den dazugehörigen Informationen in Form einer Stückliste sowie in Form von Prozessbeschreibungen und Zeichnungen etc. soll die Wiederverwendung der Module und damit des Wissens ermöglicht werden. Diese Informationen sollen durch das in der Stufe der Methode beschriebene Vorgehen so strukturiert werden, dass eine Wiederverwendung der Informationen für die Entwicklung neuer Anlagen möglich ist. Dazu werden die Komponenten (z.B. Objekte der Stückliste) und Informationen zu funktionserfüllenden, mechatronischen Modulen zusammengefasst, wie in Abbildung 29 dargestellt.

⁸ vgl. Kapitel 2.1

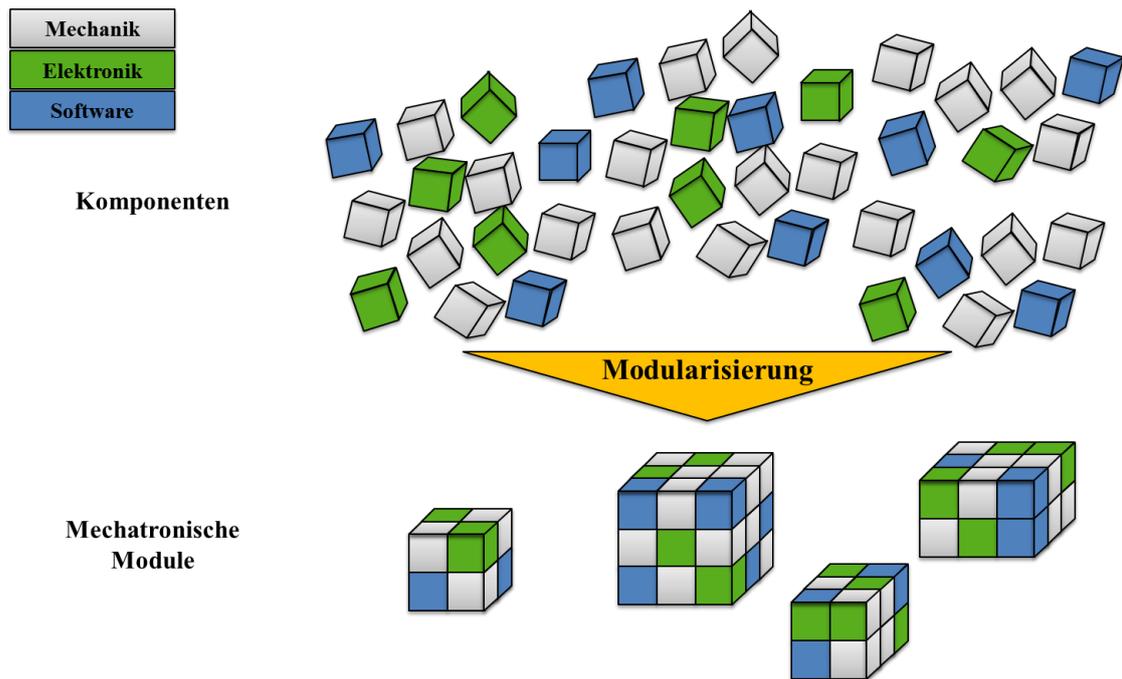


Abbildung 29: Komponenten werden zu funktionserfüllenden mechatronischen Modulen zusammengefasst

Um Modulgrenzen abseits der kommerziell verfügbaren oder zu fertigenden Objekte zu identifizieren, werden die Komponenten der Produktionsanlage (z.B. die Bauteile oder Objekte der Stückliste) vor der Modularisierung in ihre mechatronischen Subkomponenten zerlegt. So kann es beispielsweise sinnvoll sein, Hardware, Software und Elektronik eines Bildverarbeitungssystems getrennt voneinander zu betrachten. Die Hardware des Bildverarbeitungssystems (Lichtsensoren, Objektiv etc.) muss gesondert auf die Prüfaufgabe abgestimmt werden. Bei der Elektronik (Schnittstelle der industriellen Kommunikation etc.) sowie der Software (Bildanalysesoftware etc.) sind neben den Anforderungen aus dem Prozess vor allem auch die Kompatibilität zu entsprechenden Steuerungs- und Bussystemen relevant. Da viele Produkte in der Automatisierungstechnik wie Kameras bzw. Bildverarbeitungssysteme in zahlreichen Variations- und Kombinationsmöglichkeiten am Markt erhältlich sind, liegt das Problem im Engineering einer neuen Produktionsanlage in der Auswahl der geeigneten Kombination. Durch die Aufteilung der Komponente in disziplinspezifische Subkomponenten ist es möglich, die Module und Komponenten zu einem Modul zusammenzufassen, wenn sie beispielsweise kompatibel zu einem Bussystem oder einer Steuerung sein müssen. Im Nachfolgenden werden diese Subkomponenten unabhängig von der Disziplin weiter Komponenten genannt.

Der Fokus der hier vorgestellten Methode liegt auf dem Engineering von Produktionsanlagen, die immer wieder an neue Produktionsprozesse angepasst werden müssen. Im Gegensatz zu standardisierten Produktionsanlagen, die über einige, wenige Module an den Produktionsprozess angepasst werden können, zielt die Methode auf kundenspezifische Lösungen ab. Diese zeichnen sich durch sich immer verändernde Rahmenbedingungen und Prozessabläufe aus. Hersteller solcher Anlagen charakterisieren ihre Produktion mit der Beschreibung „Stückzahl 1“. Für die Wiederverwendung ergibt sich daraus die Forderung, dass eine Anpassung der Module an den Produktionsprozess notwendig ist. Daher dienen die wiederzuverwendenden Daten als Basis für eine Anpassung an den Produktionsprozess. Aufgrund der Vielzahl der im Engineering

eingesetzten Tools sollten Daten aus verschiedenen Bereichen in der Wissensbasis gespeichert und für die Wiederverwendung bereitgestellt werden. Diese Daten können Zeichnungen, Schaltpläne, Steuerungscode, Fotos der Anlage, Layouts, Montageanleitungen, Sicherheitshinweise oder auch wirtschaftliche Daten, wie Lieferant, Preis bei der letzten Verwendung etc. enthalten.

Zur Abbildung der Daten und Modulstruktur kann in einem ersten Schritt eine relationale Datenbank verwendet werden. Module können über die Relationen zu Funktionen, Eigenschaften und anderen Modulen abgefragt werden. Zudem bieten relationale Datenbanken den Vorteil, dass der Aufbau und die Pflege der Daten über weitverbreitete Tools erfolgt und breiten Einsatz in der Industrie finden.

In einem weiterführenden zweiten Schritt könnten zur Repräsentation des Wissens aus bestehenden Anlagen Ontologien genutzt werden. Diese erlauben es über Schlussfolgerungs- und Integritätsregeln die Modulauswahl einzuzugrenzen und abzusichern. Mittels *protégé*⁹ lassen sich die Relationen und Regeln der Ontologie modellieren. Abbildung 30 zeigt die Instanzen einer einfachen Ontologie. Aus der Suche nach Eigenschaften und Funktionen können bestimmte Module geschlossen werden. Relationale Datenbanken können über Ontobase¹⁰ in eine Ontologie überführt werden.

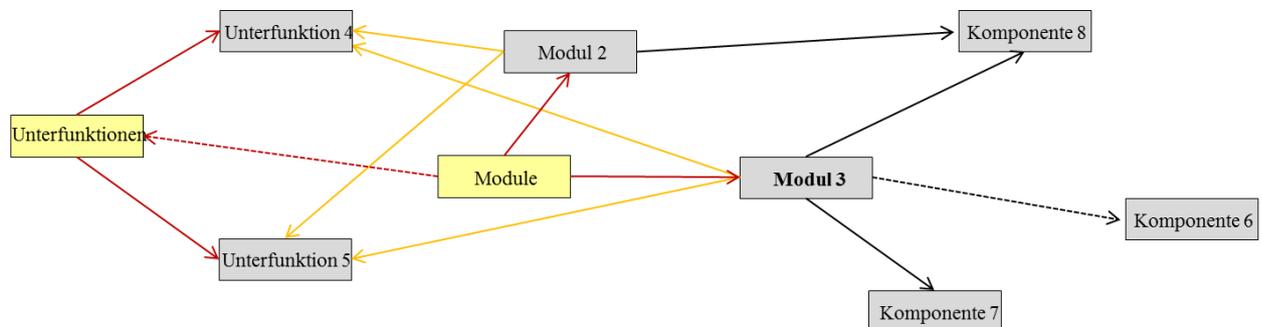


Abbildung 30: Instanzen einer Ontologie

Nach der Konzeptentscheidung – also nach einer technisch-wirtschaftlichen Bewertung der Konzeptalternativen – werden die nachgelagerten Engineering-Phasen wie gewohnt durchgeführt. Dem Entwickler werden aber Daten (CAD Entwürfe, Steuerungsprogramme, etc.) bereitgestellt, die die Grundlage für die Ausgestaltung sein können. Neben den technischen Prozessen des Engineering neuer Produktionsanlagen kann die Ausdetaillierung des Konzeptes der Produktionsanlage auch für wirtschaftliche Prozesse wie z.B. eine Angebotserstellung nützlich sein. Daher wird im nachfolgenden Kapitel 5.4 besonderes Augenmerk auf die technisch-wirtschaftliche Bewertung der Modulkombinationen gelegt.

Eine Erweiterung der Methode auf das Detail-Engineering ist zwar denkbar, wird aber nicht im Rahmen dieser Arbeit betrachtet. Die Daten der Module, die wiederverwandt werden sollen, müssen aufgrund der Vielzahl der im Engineering angewendeten Systeme in einem neutralen Datenaustauschformat bereitgestellt werden. Dies ermöglicht die Einbindung in Engineering-Prozesse und gleichzeitig die weitere Nutzung der spezialisierten Engineering-Tools. Ergänzend

⁹ <http://protege.stanford.edu/>

¹⁰ <http://code.google.com/p/ontobase/>

dazu können die Module auch in normierten Sprachen (z.B. SysML) beschrieben werden. Dies ermöglicht die weitere (teil-)automatisierte Ausdetaillierung der Produktionsanlage, indem Datenschnittstellen zwischen den Modulen eindeutig beschrieben und im Engineering interpretiert werden können.

Um die Anwendung der Methode des Engineering von Produktionsanlagen durch Module zu erleichtern, sollte der Anwender durch eine durchgängige, webbasierte Software unterstützt werden. Dadurch wird der Vergleich unterschiedlicher Modularisierungen ermöglicht, um so das optimale Maß an Komplexität der Module zu identifizieren. Zudem sollt der Anwender bei der Auswahl der Module und der Bewertung unterstützt werden. Basis für den Aufbau der Wissensbasis sollen dabei vorhandene Daten (z.B. Teileliste, Bewertungen) sein.

5.2 Veränderung im Engineering-Prozess

Eine wichtige Beschreibung des Engineering-Prozesses, die vor allem dem Aspekt der Mechatronik Rechnung trägt, ist das V-Vorgehensmodell der VDI-Richtlinie 2206 [VDI 2206]. Darin wird aus den Anforderungen ein Systementwurf abgeleitet. Dieser wird im Rahmen der Modellbildung und Analyse in einen domänenspezifischen Entwurf überführt, bevor in der Systemintegration die Eigenschaften abgesichert und das Produkt entwickelt werden. Das Vorgehen gemäß der Richtlinie ist in Abbildung 31 (rechts) dargestellt.

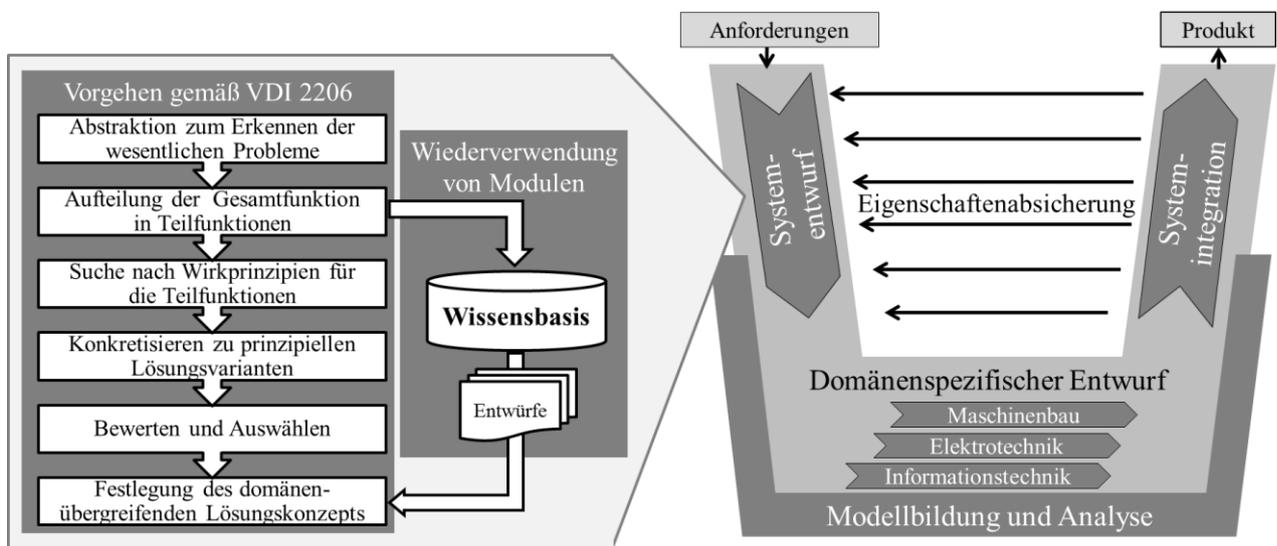


Abbildung 31: Vorgehensmodell bei der Entwicklung mechatronischer Systeme (rechts) und Änderungen des Detailprozesses „Systementwurf“ durch die Wiederverwendung von Modulen nach [VDI 2206]

Die Wiederverwendung von Modulen kann in dieses Vorgehensmodell in den Systementwurf integriert werden. Dieser Entwurf wird laut der Richtlinie durch die in Abbildung 31 dargestellten Teilschritte spezifiziert [VDI 2206]. In einem ersten Schritt werden die Anforderungen abstrahiert, um wesentliche Probleme zu erkennen. Anschließend wird die Gesamtfunktion der Produktionsanlage in Teilfunktionen aufgeteilt. In der Richtlinie werden nun auf Basis dieser Teilfunktionen Wirkprinzipien gesucht, Lösungsvarianten konkretisiert und bewertet. Durch die Wiederverwendung von Modulen können diese Teilschritte durch das Wissen aus vorangegangenen Projekten unterstützt oder sogar automatisiert werden. Für die Teilfunktionen werden passende Module in der Wissensbasis ausgewählt und eine Bewertung vorgenommen. Die Information über das ausgewählte Konzept kann samt der dazugehörigen

Informationen (Entwürfe, Dokumentatin, etc.) in den nächsten Schritten zur Verfügung gestellt werden.

5.3 Aufbau der Wissensbasis

Im Nachfolgenden wird das Vorgehen zum Aufbau der Wissensbasis detailliert beschrieben. Dabei wird insbesondere auf die Definition von Modulen und deren Modularisierung eingegangen.

5.3.1 Methode zur Definition wiederverwendbarer Module

Der erste Prozessschritt der Methode beschreibt das Vorgehen zur Definition bzw. Identifikation wiederverwendbarer Module für die Konzeption neuer, kundenspezifischer und damit individueller Produktionsanlagen.

Vorgehen bei der Modularisierung

Aus den Komponenten der bestehenden Produktionsanlage und ihren Abhängigkeiten untereinander wird eine Matrix gebildet (s. [Abbildung 32](#)). In dieser quadratischen Matrix werden analog zur *Design Structure Matrix* die Komponenten der Produktionsanlage auf der Hoch- und Querachse aufgetragen. In den Zeilen und Spalten der Matrix werden die Abhängigkeiten zwischen den Komponenten dargestellt.

	Komponente 1	Komponente 2	Komponente 3	...	Komponente n
Komponente 1	1	0	1	...	1
Komponente 2	0	1	0	...	0
Komponente 3	1	0	1	...	1
...
Komponente n	1	0	1	...	1

Abbildung 32: Grundaufbau der Matrix zur Analyse der Abhängigkeiten zwischen Komponenten

In dieser Matrize sind die Abhängigkeiten zwischen den Komponenten binär, das heißt, eine Abhängigkeit besteht oder sie besteht nicht (s. [Abbildung 33](#)). Eine Komponente ist von einer anderen Komponente abhängig, wenn sie benötigt wird, um die Funktion der Komponente in der Produktionsanlage zu erfüllen. Ein Roboter benötigt zum Beispiel einen Greifer, um ein Bauteil in eine Werkzeugmaschine einzulegen, er benötigt aber nicht unbedingt die Steuerung dieser Maschine. Differenzierte Gewichtungen, um stärkere und schwächere Abhängigkeiten darzustellen, sind möglich und werden in nachfolgenden Praxisbeispielen angewandt. Dadurch ist es möglich auszudrücken, ob eine Komponente für die Funktionserfüllung der anderen Komponenten notwendig oder nur optional (zum Beispiel zum sicheren Betrieb) ist.

Abhängig zwischen Komponenten	Gewichtung
besteht	1
besteht nicht	0

Abbildung 33: Binäre Bewertung der Abhängigkeiten zwischen Komponenten

Die dargestellten Matrizen sind quadratisch, nicht aber zwangsläufig symmetrisch zur Hauptdiagonale. Das heißt, es kann eine einseitige Abhängigkeit bestehen, wenn eine Komponente eine andere Komponente zur Funktionserfüllung benötigt, aber nicht umgekehrt.

Ein typisches Beispiel wäre eine Kamera, die eine Beleuchtung benötigt, die Beleuchtung benötigt allerdings die Kamera nicht. Dies bedeutet allerdings auch, dass die Matrix vor der Modularisierung nicht auf Konsistenz, Fehler o.ä. geprüft werden kann. Erst nach der Modularisierung können die neuen Module mit bestehenden Modulen aus der Wissensbasis verglichen werden und so Unterschiede und ggfs. Fehler identifiziert werden.

Um einen Vergleich und die Austauschbarkeit zwischen Modulen zu ermöglichen, ist eine einheitliche Granularität der Komponenten notwendig. Für den praktischen Einsatz der Methode eignet sich die Orientierung an bestehenden Datenquellen wie z.B. Stücklisten. Eine hohe Fertigungstiefe der Produktionsanlage bedarf einer feinen Granularität. Werden viele Zukaufteile eingesetzt, eignet sich ggfs. auch die Modularisierung zukaufbarer Teilsysteme. Eine unternehmensspezifische Datenbasis mit Komponenten kann den Entwickler bei der Wahl der richtigen Granularität unterstützen.

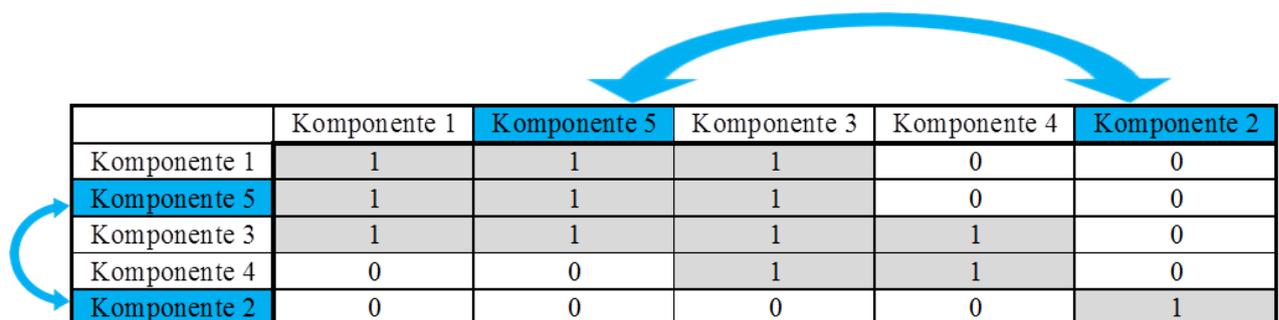
Manuelles Modularisieren

Im Nachfolgenden werden die Schritte der Identifikation erst manuell und im Anschluss unterstützt durch verschiedene Algorithmen dargestellt. Aufgrund der Vielzahl der Komponenten und der Komplexität der Abhängigkeiten ist eine Unterstützung des Entwicklers bei der Auswertung der Matrizen notwendig. Die in [Abbildung 34](#) dargestellte Matrix dient als Beispiel für Identifikation wiederverwendbarer Module.

	Komponente 1	Komponente 2	Komponente 3	Komponente 4	Komponente 5
Komponente 1	1	0	1	0	1
Komponente 2	0	1	0	0	0
Komponente 3	1	0	1	1	1
Komponente 4	0	0	1	1	0
Komponente 5	1	0	1	0	1

Abbildung 34: Ausgangsmatrix für die Modularisierung

Die Zeilen und Spalten der Matrix werden so sortiert, dass Komponenten, die voneinander abhängig sind, aufeinander folgen. Durch den Austausch der Zeilen und Spalten „Komponente 2“ und „Komponente 5“ wird dies für das Beispiel erreicht (s. [Abbildung 35](#)). „Komponente 1“, „Komponente 5“ und „Komponente 3“ sowie „Komponente 3“ und „Komponente 4“ können aufgrund ihrer Abhängigkeiten untereinander als „Modul a“ bzw. „Modul b“ angesehen werden.



	Komponente 1	Komponente 5	Komponente 3	Komponente 4	Komponente 2
Komponente 1	1	1	1	0	0
Komponente 5	1	1	1	0	0
Komponente 3	1	1	1	1	0
Komponente 4	0	0	1	1	0
Komponente 2	0	0	0	0	1

Abbildung 35: Matrix nach der Sortierung der Spalten und Zeilen

Definition von Modulgrenzen

Diese resultierenden Module sind in [Abbildung 36](#) durch rote Rahmen gekennzeichnet, was im Folgenden übernommen wird. Ist eine Komponente unabhängig von anderen Komponenten – wie „Komponente 2“ – stellt sie ebenfalls ein „Modul c“ dar. Gemäß der in Kapitel 4.1 aufgestellten Zielbeschreibung sollen Module zwar möglichst viele Komponenten umfassen, um den Nutzen ihrer Wiederverwendung zu erhöhen, allerdings müssen auch Komponenten, die eine wichtige Funktion an der Anlage übernehmen ohne von anderen Komponenten abhängig zu sein, abgebildet werden können. Eine Mindestgröße der Module ist daher nicht sinnvoll. Das andere Extrema: ein umfassendes Modul aller Komponenten einer Produktionsanlage macht nur dann Sinn, wenn die Anlage als Ganzes wiederverwendet werden kann und soll. Da die vorliegende Methode auf die Modularisierung und die Wiederverwendung von Modulen im Engineering von kundenspezifischen Produktionsanlagen abzielt, kann davon ausgegangen werden, dass die Wiederverwendbarkeit einer gesamten Anlage als Modul nicht gegeben ist. Eine Beschränkung der maximalen Komponenten der Module ist dennoch nicht vorgesehen, da gemäß der Zielbeschreibung möglichst komplexe Module wiederverwendet werden sollen.

	Komponente 1	Komponente 5	Komponente 3	Komponente 4	Komponente 2
Komponente 1	1	1	1	0	0
Komponente 5	1	1	1	0	0
Komponente 3	1	1	1	1	0
Komponente 4	0	0	1	1	0
Komponente 2	0	0	0	0	1

Abbildung 36 zeigt eine Matrix der Abhängigkeiten zwischen den Komponenten einer Produktionsanlage. Die Matrix ist in drei Module unterteilt: Modul a (Komponenten 1, 5, 3), Modul b (Komponenten 1, 5, 3, 4) und Modul c (Komponente 2). Die Matrix zeigt die Abhängigkeiten zwischen den Komponenten: Komponente 1 ist abhängig von 1, 5, 3, 4; Komponente 5 ist abhängig von 1, 5, 3; Komponente 3 ist abhängig von 1, 5, 3, 4; Komponente 4 ist abhängig von 3, 4; Komponente 2 ist unabhängig von allen anderen Komponenten.

Abbildung 36: Kennzeichnung der Module der Produktionsanlage

Module, in denen, wie bisher dargestellt, alle Komponenten Abhängigkeiten untereinander haben, sind keine Bedingung für die Zusammenfassung von Komponenten zu einem Modul. Die praktische Anwendung (vgl. Kapitel 7) zeigt vielmehr, dass solche Module die Ausnahme sind. Die Frage, wie viele unabhängige Komponenten in einem Modul vorhanden sein dürfen bzw. wann eine Komponente Bestandteil eines Moduls ist, hängt von der Anzahl der vorhandenen Abhängigkeiten zu den Komponenten des Moduls ab. [Abbildung 37](#) visualisiert diese Entscheidung beispielhaft. „Matrix I“ (oben) und „Matrix II“ (unten) unterscheiden sich durch eine zusätzliche Abhängigkeit zwischen „Komponente 2“ und „Komponente 4“ in „Matrix II“.

- In „Matrix I“ wird das Modul nicht um „Komponente 4“ erweitert, da die Komponente nur zu einem von drei Komponenten aus dem Modul eine Abhängigkeit hat.
- In „Matrix II“ wird das Modul um „Komponente 4“ erweitert, da die Komponente zu zwei von drei Komponenten aus dem Modul eine Abhängigkeit hat.

Diese Entscheidung basiert auf der Bedingung, dass eine Komponente nach der Sortierung mindestens zur Hälfte der Komponente des Moduls eine Abhängigkeit haben soll. Dadurch wird verhindert, dass die Module zu spezifisch werden. Im Zweifelsfall kann ein verknüpftes, optionales Modul gebildet werden.

Modul a

Matrix I	Komponente 1	Komponente 2	Komponente 3	Komponente 4	Komponente 5
Komponente 1	1	1	1	1	0
Komponente 2	1	1	1	0	0
Komponente 3	1	1	1	0	0
Komponente 4	1	0	0	1	0
Komponente 5	0	0	0	0	1

Matrix II	Komponente 1	Komponente 2	Komponente 3	Komponente 4	Komponente 5
Komponente 1	1	1	1	1	0
Komponente 2	1	1	1	1	0
Komponente 3	1	1	1	0	0
Komponente 4	1	1	0	1	0
Komponente 5	0	0	0	0	1

Neue Abhängigkeit

Abbildung 37: Entscheidung für die Aufnahme einer neuen Komponente in das Modul

Verknüpfungen zwischen Modulen

In Abbildung 38 ist ein Beispiel dargestellt, in dem „Komponente 3“ sowohl Bestandteil in „Modul a“ als auch in „Modul b“ ist. Diese Komponente wird als intersektionaler Link bzw. als Verknüpfung zwischen zwei Modulen definiert. Solche Komponenten können zum Beispiel ein Kodierer für mechanische Bewegungen (engl. *Encoder*) sein, der sowohl in einem Modul „Förderband“ die Geschwindigkeitsmessung und in einem Modul „Bildverarbeitungssystem“ der Trigger der Bildaufnahme sein kann. Komponenten, die zu keinem Modul eindeutig zugeordnet werden können, wie im betrachteten Beispiel „Komponente 6“, werden als verteilter Link oder Verknüpfung definiert. Diese Komponenten erfüllen meist übergeordnete Funktionen in der Produktionsanlage (z.B. zentrale Steuerung, Sicherheitseinrichtung, Bussystem). Diese Links oder Verknüpfungen stehen einer Anforderung an diese Stufe der Methode (vgl. Kapitel 4.1), der Abgeschlossenheit der Module, entgegen. Im weiteren Verlauf der Vorgehensbeschreibung wird also eine Möglichkeit aufgezeigt, diese Links zu vermeiden bzw. in abgeschlossene Module aufzuteilen.

	Modul a	Intersektionelle Verknüpfung			Modul b		
	Komponente 1	Komponente 2	Komponente 3	Komponente 4	Komponente 5	Komponente 6	Komponente 7
Komponente 1	1	1	1	0	0	1	0
Komponente 2	1	1	1	0	0	1	0
Komponente 3	1	1	1	1	0	1	0
Komponente 4	0	0	1	1	0	0	0
Komponente 5	0	0	0	0	1	1	1
Komponente 6	1	1	1	0	1	1	1
Komponente 7	0	0	0	0	1	1	1

Verteilte Verknüpfung Modul c

Abbildung 38: Verknüpfungen zwischen Modulen

5.3.2 Maßnahmen zur Erhöhung der Wiederverwendbarkeit

Inwieweit sich ein so definiertes Modul für die Wiederverwendung eignet, kann nicht mit Bestimmtheit gesagt werden. Es existieren jedoch einige Indikatoren, die den Anwender bei dieser Entscheidung unterstützen können. Ein solcher Indikator ist beispielsweise die Anzahl der Schnittstellen. Das Steuerungsprogramm eines Moduls, welches in einer zentral gesteuerten Anlage genutzt wird, lässt sich weniger häufig in anderen Anlagen einsetzen als das Programm einer dezentral gesteuerten Anlage. Dies liegt daran, dass beim Programm der dezentralen Anlagen weniger Verbindungen zu anderen Komponenten (Sensoren, Aktoren etc.) vorhanden sind. Daher kann es leichter für neue Aufgaben angepasst werden. Ein autarkes Modul, das keine Schnittstellen hat und trotzdem eine Funktion erfüllt, ließe sich immer für diese Funktion wiederverwenden.

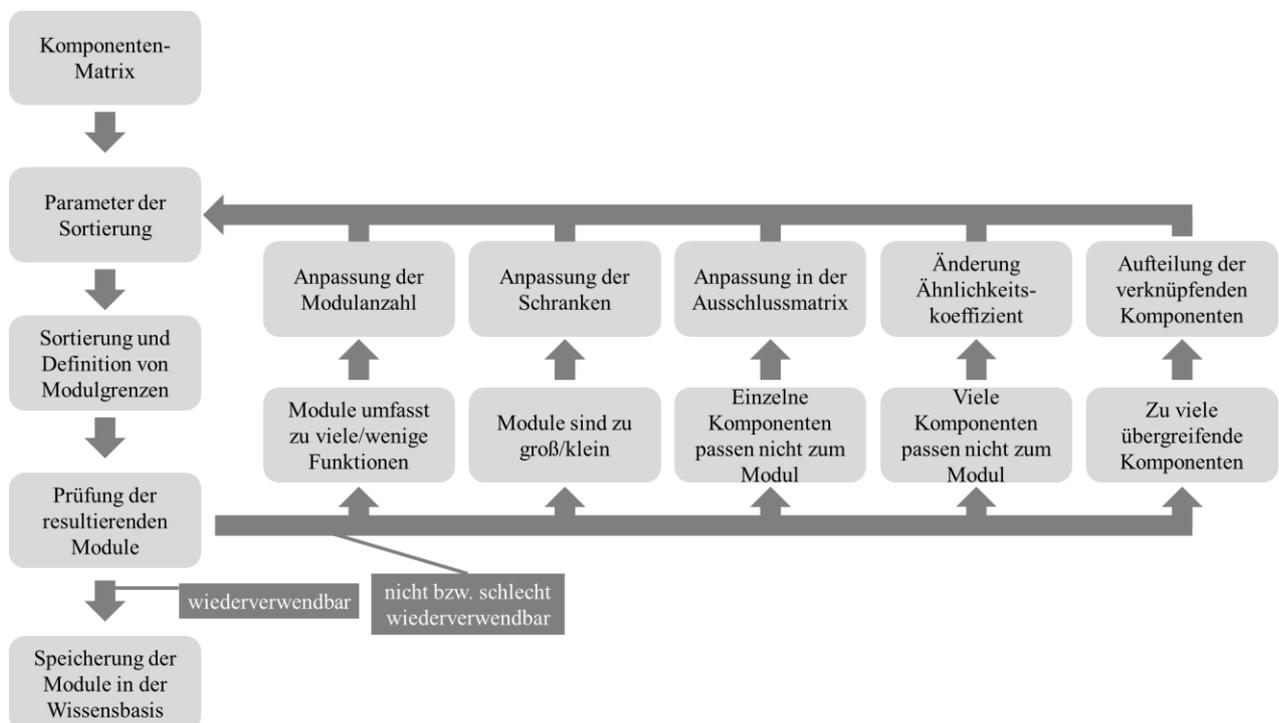


Abbildung 39: Iteratives Vorgehen zur Optimierung der Wiederverwendbarkeit der Module

Das Ziel dieses Prozessschrittes der Methode ist die Maximierung der Wiederverwendbarkeit möglichst umfassender Module (vgl. Kapitel 4.1). Nachdem die Komponenten zu Modulen zusammengefasst wurden, werden im nachfolgenden Kapitel verschiedene Maßnahmen zur Erhöhung der Wiederverwendbarkeit der Module vorgestellt. Diese Maßnahmen können kombiniert oder einzeln genutzt werden. Eine feste oder empfohlene Reihenfolge bei der Durchführung der Maßnahmen existiert nicht. In [Abbildung 39](#) sind die Maßnahmen zu einem iterativen Prozess zusammengefasst, der durchlaufen wird, bis die resultierenden Module wiederverwendbar sind.

Ausgehend von der in Kapitel 5.3.1 vorgestellten Komponentenmatrix soll eine Sortierung der Matrix vorgenommen werden, die eine Zusammenfassung der Komponenten zu Modulen ermöglicht. Das Funktionsprinzip der Sortierung und der Definition der Modulgrenzen unterscheidet sich zwar nicht von dem bereits vorgestellten, manuellen Verfahren, wird aber aufgrund der Komplexität der zu modularisierenden Produktionsanlagen – vor allem unter

Einhaltung der Nebenbedingungen – rechnergestützt durchgeführt. Ein entsprechendes Programm wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und wird in Kapitel 6 vorgestellt.

5.3.2.1 Sortierung und Definition von Modulgrenzen

In Kapitel 3.1.1.2 wurden verschiedene Algorithmen zur Sortierung von Matrizen vorgestellt und verglichen. Aufgrund der guten Resultate der Sortierung und Definitionsgrenzen sowie der Erweiterbarkeit des Ansatzes sollte das adaptierte P-Median Modell nach Kusiak angewendet werden.

	Komponente 1	Komponente 2	Komponente 3	Komponente 4	Komponente 5
Komponente 1	1	0	1	0	1
Komponente 2	0	1	0	0	0
Komponente 3	1	0	1	1	1
Komponente 4	0	0	1	1	0
Komponente 5	1	0	1	0	1

Abbildung 40: Beispiel einer Komponentenmatrix als Ausgangspunkt für die Sortierung

Die Sortierung der Komponentenmatrix soll an der in Abbildung 40 dargestellten Matrix gezeigt werden. Initiale Parameter für die Sortierung sind die Anzahl der zu bildenden Module, die Vorgabe von Schranken bei der Modulgröße und die Auswahl eines Ähnlichkeitskoeffizienten. Für die Anzahl der zu bildenden Module sollte nach Möglichkeit die Anzahl der Funktionen gewählt werden, die von der Produktionsanlage erfüllt werden. Ein geringerer Wert macht nur Sinn, wenn Funktionen zusammengefasst werden können; ein höherer Wert ist für die Wiederverwendung nur dann bedingt empfehlenswert, wenn für diesen Fall mehrere Module eine Funktion erfüllen. Dies ist zwar grundsätzlich möglich, entspricht aber nicht der Anforderung eines funktionserfüllenden Moduls. Schranken der Modulgröße sollten für die initiale Sortierung nicht gesetzt werden. Sie dienen als Parameter zur Erhöhung der Wiederverwendbarkeit. Als Ähnlichkeitskoeffizient sollte der Ansatz nach Kusiak gewählt werden, wenn keine gewichtete Matrix vorliegt. Für das Beispiel wurde als Modulanzahl „2“ und als Koeffizient „Kusiak“ gewählt. Zudem wurden keine Schranken gesetzt. Abbildung 41 zeigt die errechnete Ähnlichkeitsmatrix.

	Komponente 1	Komponente 2	Komponente 3	Komponente 4	Komponente 5
Komponente 1	0	1	4	2	5
Komponente 2	1	0	0	2	1
Komponente 3	4	0	0	3	4
Komponente 4	2	2	3	0	2
Komponente 5	5	1	4	2	0

Abbildung 41: Ähnlichkeitsmatrix der Komponentenmatrix nach Kusiak

Die resultierenden Module sind in Abbildung 42 dargestellt. „Modul a“ besteht aus „Komponente 1“, „Komponente 3“ und „Komponente 5“, was gemäß der aus den Abhängigkeiten errechneten Ähnlichkeitskoeffizienten in der Matrix resultiert. Aus der Nebenbedingung, dass jede Komponente in genau einem Modul vorhanden ist, ergibt sich, dass die „Komponente 3“ und die „Komponente 4“ nicht zu einem Modul zusammengefasst wurden, da die Ähnlichkeit von „Komponente 3“ zu „Komponente 1“ und „Komponente 5“ höher ist.

Aus derselben Nebenbedingung und der vorgegebenen Modulanzahl ergibt sich, dass die zwei verbleibenden Komponenten ebenfalls zu einem Modul zusammengefasst werden.

Modul a

	Komponente 1	Komponente 3	Komponente 5	Komponente 2	Komponente 4
Komponente 1	1	1	1	0	0
Komponente 3	1	1	1	0	1
Komponente 5	1	1	1	0	0
Komponente 2	0	0	0	1	0
Komponente 4	0	1	0	0	1

Modul b

Abbildung 42: Sortierte Komponentenmatrix mit den Modulen

5.3.2.2 Prüfung der Wiederverwendbarkeit

Im Anschluss an die Sortierung wird die Wiederverwendbarkeit der resultierenden Module geprüft. Wichtige Kriterien dabei sind:

- Module umfassen zu viele bzw. wenige Funktionen.
- Module sind zu groß bzw. zu klein.
- Einzelne Komponenten passen nicht zum Modul.
- Viele Komponenten passen nicht zum Modul.
- Module enthalten zu viele übergreifende Komponenten.

Diese Prüfung wird manuell auf Basis resultierender Module und der Kenntnis der Produktionsanlage durchgeführt. Ob eine Komponente zu einem Modul passt oder nicht, kann ein Entwickler bei entsprechender Kenntnis der Anlage schnell entscheiden. Aufgrund einer zentralen Steuerung ist es beispielsweise möglich, dass zwei Komponenten, die in keinerlei funktionalen Zusammenhang zueinander stehen, zu einem Modul zusammengefasst werden, nur weil sie von derselben Steuerung gestartet werden. Unterstützt wird der Entwickler bei der Prüfung zudem durch das mathematische Ergebnis der Funktion des PMM nach Kusiak (nachfolgend ‚Zielfunktion‘ genannt). Das mathematische optimale Ergebnis der Zielfunktion stellt dabei aber nicht zwangsläufig ein plausibles und damit für die Anwendung sinnvolles Ergebnis der Sortierung dar. Rahmenbedingungen, die sich aus der Funktion der Produktionsanlage ergeben, können von der mathematischen Zielfunktion nur unzureichend abgebildet werden. Zudem können die Ergebnisse auf Basis der Kenntnis der Produktionsanlage interpretiert werden. Zur Orientierung über das Ergebnis der Modularisierung können folgende im Rahmen der Voruntersuchungen identifizierten Bewertungskriterien dienen:

- Abhängigkeiten der Komponenten innerhalb der Module
- Dezentralität der Module
- Schnittstellen zwischen den Modulen

Dabei ist allerdings zu beachten, dass diese Kriterien keine absolute Aussage über die Qualität der Modularisierung erlauben, sondern nur die relativen Auswirkungen der nachfolgend dargestellten Maßnahmen aufzeigen.

Gerade Module, die zwei oder mehr Module miteinander verknüpfen, sind Gegenstand dieser Interpretation der Ergebnisse der Sortierung und Definition von Modulgrenzen. Der *Encoder*, der sowohl die Geschwindigkeitsmessung im Modul „Förderband“ übernehmen kann, kann gleichzeitig Bestandteil des Moduls „Bildverarbeitung“ als Trigger neuer Aufnahmen sein. Für den Algorithmus ist die Entscheidung nur möglich, wenn entsprechende Gewichtungen bei den Abhängigkeiten vorgenommen werden. Aufgrund der Interpretierbarkeit der resultierenden Module sollte die Wiederverwendbarkeit der Module durch die aufgeführten Kriterien geprüft werden. Sind mehrere Ergebnisse plausibel, kann der Zielfunktionswert die Entscheidung unterstützen. Auf die einzelnen Prüfkriterien und geeignete Maßnahmen, die in Abbildung 39 vorgestellt wurden, wird nachfolgend eingegangen.

5.3.2.3 Variation der Modulanzahl

Basierend auf der Prüfung, wie viele Funktionen ein Modul umfassen sollte, kann die Modulanzahl variiert werden. Zur Orientierung eignet sich die Anzahl der Funktionen in einer Prozessbeschreibung der zu modularisierenden Produktionsanlage. Dies entspricht der Forderung nach Modulen, die Funktionen im Produktionsprozess erfüllen. Ist die Zusammenfassung von Funktionen möglich und sinnvoll, kann die Modulanzahl reduziert werden. Ein Beispiel für eine solche Funktion, die von einer Kombination aus Modulen erfüllt werden kann, wäre das „Positionieren“ eines Bauteils. Diese Funktion kann beispielsweise durch die Module „Roboter“ und „Greifsystem“ erfüllt werden. In anderen Fällen kann ein Modul mehrere Funktionen erfüllen. In diesem Fall ist es daher sinnvoll, die Modulanzahl zu erhöhen. Ein Beispiel dafür wäre das Modul „Vibrationswendelförderer“, das Bauteile gleichzeitig „puffern“ und „ausrichten“ kann.

Matrix I	Komponente 2	Komponente 6	Komponente 7	Komponente 9	Komponente 10	Komponente 8	Komponente 1	KoKomponente 4	Komponente 5	Komponente 3
Komponente 2	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
Komponente 6	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0
Komponente 7	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0
Komponente 9	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0
Komponente 10	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0
Komponente 8	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0
Komponente 1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1
KoKomponente 4	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1
Komponente 5	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1
Komponente 3	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1

Matrix II	Komponente 2	Komponente 6	Komponente 7	Komponente 9	Komponente 10	Komponente 8	Komponente 1	KoKomponente 4	Komponente 5	Komponente 3
Komponente 2	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
Komponente 6	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0
Komponente 7	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0
Komponente 9	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0
Komponente 10	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0
Komponente 8	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0
Komponente 1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1
KoKomponente 4	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1
Komponente 5	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1
Komponente 3	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1

Abbildung 43: Variation der Anzahl der Module einer Matrix

Durch die Variation der Modulanzahl lässt sich das Ergebnis der Wiederverwendbarkeit der Module optimieren, sie muss allerdings im Zusammenhang mit der späteren Granularität der Funktionen bei der Funktionszuordnung gesehen werden. Daher sollten starke Abweichungen von einer vorgegeben Prozessbeschreibung nur in Kenntnis der Anlage und der Modulstruktur, die in der Wissensbasis bereits vorhanden ist, vorgenommen werden. Abbildung 43 zeigt das Beispiel einer Matrix A (oben) mit 2 Modulen und Matrix B (unten) mit fünf Modulen. In der unteren Matrix werden Module zu kleinen Funktionseinheiten (z.B. Greifen) zusammengefasst,

während in Matrix A komplexere Funktionen durch die Module erfüllt werden können (z.B. Positionieren eines Bauteils).

Variation der Modulgröße

Ergänzend zu der Maßnahme der Variation der Modulanzahl kann durch eine Beschränkung der maximalen oder minimalen Modulgröße die Wiederverwendbarkeit und die Komplexität der resultierenden Module weiter gesteuert werden. Damit wird der grundsätzlichen Anforderung an die Module, möglichst umfassende Sub-Module wiederzuverwenden, Rechnung getragen. Demgegenüber steht die Anforderung, die Module möglichst in verschiedenen Anlagen wiederverwenden zu können. Durch die Beschränkung der Modulgröße wird direkt Einfluss auf die Komplexität des Moduls genommen. Wie bereits beschrieben, ist eine rein mathematische und damit nicht zwangsläufig inhaltliche Schranke nur dann zielführend, wenn die Module deutlich zu klein sind. Das heißt, wenn grundsätzlich komplexe Module identifiziert werden sollen, die komplexe Funktionen erfüllen, kann eine Mindestgröße der Module im umgekehrten Falle eine maximale Beschränkung der Modulgröße sinnvoll sein.

5.3.2.4 Anpassung der Ausschlussmatrix

Eine Adaption des beschriebenen P-Median-Modells nach Kusiak für den vorliegenden Fall der Modularisierung von Produktionsanlagen ist die Einführung der Ausschlussmatrix A, in der analog zur Komponentenmatrix die Komponenten auf der Hoch- und Querachse aufgetragen sind. Zu Beginn der Modularisierung ist diese Ausschlussmatrix eine Nullmatrix, d.h. alle Elemente a_{ij} der quadratischen Matrix sind null.

Die Sortierung der Matrizen und die Definition der Modulgrenzen ergibt beispielsweise, dass Komponente i und Komponente j demselben Modul zugeordnet wurden. Diese sollen aufgrund der Rahmenbedingungen aus der Praxis nicht in einem Modul sein, obwohl sie voneinander Abhängig sind. Für diesen Fall kann der Anwender die Elemente a_{ij} und a_{ji} gleich „1“ setzen.

Dies bedeutet, dass diese Komponenten nicht demselben Modul zugeordnet werden sollen. Entsprechend der Abhängigkeiten der Komponenten ergibt sich somit eine neue Sortierung. Dieser Ausschluss ist in [Abbildung 44](#) an einem Beispiel visualisiert. Matrix I (oben) zeigt die sortierte Komponentenmatrix vor der Anpassung der Ausschlussmatrix – Matrix II (unten) zeigt dieselbe Matrix nachdem „Komponente 3“ und „Komponente 5“ gegenseitig ausgeschlossen wurden. Solche fehlerhaften Sortierungen können beispielsweise durch die Abhängigkeiten zu übergreifenden Komponenten (wie Steuerung, Maschinenrahmen, etc.) zu Stande kommen. Über diese übergreifenden Komponenten sind Module miteinander verbunden, die keine Abhängigkeiten haben.

Matrix I	Komponente 1	Komponente 3	Komponente 4	Komponente 5	Komponente 2
Komponente 1	1	1	0	0	0
Komponente 3	1	1	1	1	0
Komponente 4	0	1	1	0	0
Komponente 5	0	1	0	1	0
Komponente 2	0	0	0	0	1

Matrix II	Komponente 3	Komponente 1	Komponente 2	Komponente 4	Komponente 5
Komponente 3	1	1	0	1	1
Komponente 1	1	1	0	0	0
Komponente 2	0	0	1	0	0
Komponente 4	1	0	0	1	0
Komponente 5	1	0	0	0	1

Abbildung 44: Sortierung derselben Matrix vor (Matrix I - oben) und nach (Matrix II - unten) einer Änderung der Ausschlussmatrix

Variation der Ähnlichkeitskoeffizienten

Für die Sortierung der Matrix empfiehlt sich das PMM nach Kusiak, wobei die Ähnlichkeit basierend auf der Gewichtung der Abhängigkeiten oder, im Falle einer binären Komponentenmatrix, nach der Ähnlichkeitsmatrix berechnet wird. Eine Alternative stellt der Ähnlichkeitskoeffizient nach Wei und Kern da, der Abhängigkeiten zwischen Komponenten stärker gewichtet. Eine weitere Möglichkeit ist die Änderung des Sortieralgorithmus. Das *Mixed Boolean Pseudo-Boolean* Model führt ebenfalls zu guten Sortierergebnissen, bietet aber nicht die Möglichkeit, die Modulgröße zu beschränken. Daher eignet sich dieses Modell nur eingeschränkt.

5.3.2.5 Aufteilung der verknüpfenden Komponenten

Anders als die bisher vorgestellten Maßnahmen zielt die Aufteilung der verknüpfenden Komponenten nicht auf eine Anpassung der Sortierung oder der Definition der Modulgrenzen ab. Durch diese Maßnahme sollen Komponenten, die nicht eindeutig Modulen zugeordnet werden können, also übergreifende oder intersektionelle Verknüpfungen, auf die verschiedenen Module aufgeteilt werden. Das heißt, die Komponentenmatrix wird dahingehend angepasst werden, dass übergreifende Verknüpfungen auf die Module, zu denen sie Abhängigkeiten haben könnten, aufgeteilt werden. Die Steuerung und die Sicherheitssysteme einer Produktionsanlage sind Beispiele für solche übergreifenden Verknüpfungen.

Die Aufteilung dieser übergreifenden Komponenten bedeutet die Überführung einer Produktionsanlage von der zentralen in die dezentrale Automation. Durch die in [Abbildung 45](#) dargestellte Aufteilung verknüpfenden Komponenten können autarke, dezentrale Module gebildet werden. Übergreifende Schnittstelle zwischen den dezentralen Modulen ist die Kommunikation. Die dezentralen Module können ohne weitere verknüpfte Module im Engineering neuer Anlagen wiederverwendet werden.

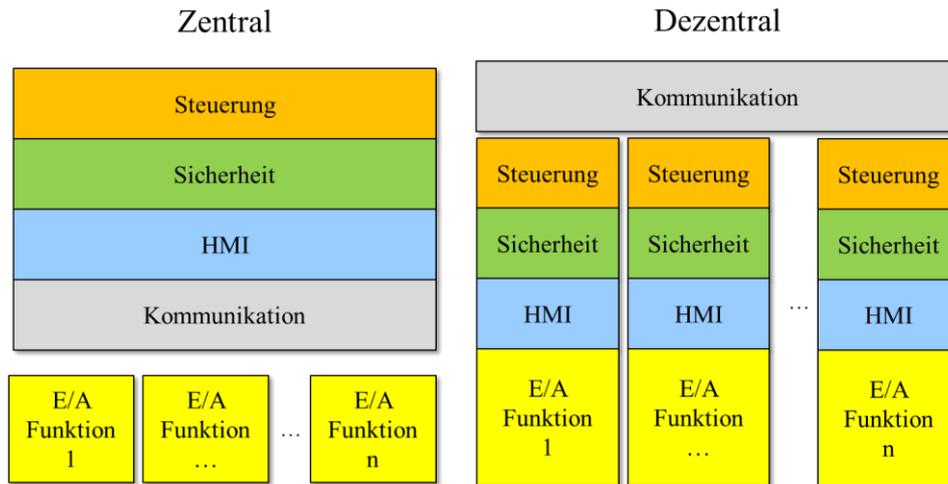


Abbildung 45: Aufteilung verknüpfender Komponenten führt zu dezentralen, autarken Modulen
Bildquelle [WeKI (2012c)]

Ein Beispiel für die Sortierung vor (Matrix I – oben) und nach (Matrix II – unten) der Aufteilung der verknüpfender Komponente A ist in Abbildung 46 dargestellt. In der Praxis könnte dies bedeuten, dass die zentrale Steuerung der gesamten Produktionsanlage aufgeteilt wird. Die bestehende Produktionsanlage soll selbstverständlich nicht geändert werden, sondern nur die für die Identifikation wiederverwendbarer Module genutzte Komponentenmatrix. Aus der Aufteilung der verknüpfenden Komponenten resultieren in sich geschlossene, mechatronische Module mit wenigen Schnittstellen (Kommunikation, Maschinenrahmen etc.).

Matrix I	Komponente 1	Komponente 3	Komponente 4	Komponente 5	Komponente 2
Komponente 1	1	1	0	0	0
Komponente 3	1	1	1	1	0
Komponente 4	0	1	1	0	0
Komponente 5	0	1	0	1	0
Komponente 2	0	0	0	0	1

Matrix II	Komponente 1	Komponente 2	Komponente 3a	Komponente 4	Komponente 5	Komponente 3b
Komponente 1	1	0	1	0	0	0
Komponente 2	0	1	0	0	0	0
Komponente 3a	1	0	1	0	0	0
Komponente 4	0	0	0	1	0	1
Komponente 5	0	0	0	0	1	1
Komponente 3b	0	0	0	1	1	1

Abbildung 46: Sortierung derselben Matrix vor (Matrix I - oben) und nach (Matrix II - unten) der Aufteilung einer verknüpfenden Komponente

Bei der Wiederverwendung können die aufgeteilten Lösungen durch kleinere technisch und kommerziell verfügbare Lösungen ersetzt werden oder wieder zu einer zentralen übergreifenden Komponente kombiniert werden. Für das Beispiel einer zentralen Steuerung einer Produktionsanlage durch eine SPS könnten kleinere am Markt erhältliche Systeme oder beispielsweise auch Microcontroller eingesetzt werden. Alternativ können aufgeteilte Steuerungsbausteine beim Engineering einer neuen Produktionsanlage auch wieder zu einer zentralen Steuerung kombiniert werden. Die Information und die Daten zu dem übergreifenden Modul sollten entsprechend der Aufteilung der Komponente ebenfalls aufgeteilt bzw. die für die jeweilige Teilkomponente irrelevanten Daten herausgefiltert werden. Da dies in der Praxis aber

mit einem Mehraufwand verbunden ist, ist es natürlich auch möglich, die kompletten Daten und Informationen der Komponenten jeder Teilkomponente zuzuordnen. Dadurch wird allerdings der Aufwand, geeignete Daten für die Teilkomponente zu identifizieren, in das Engineering neuer Produktionsanlagen verlagert.

5.3.2.6 Multiple Matrizen

Eine Erweiterung der bestehenden Maßnahme zur Sortierung und Definition der Modulgrenzen ist die Erhöhung der Wiederverwendbarkeit der Module durch eine Betrachtung über mehrere Produktionsanlagen hinweg. Lässt sich ein Modul in verschiedenen Produktionsanlagen bzw. in den entsprechenden Komponentenmatrizen identifizieren, kann davon ausgegangen werden, dass es auch im Engineering neuer Produktionsanlagen wiederverwandt werden kann. Demzufolge dient die Betrachtung mehrerer Matrizen einerseits der Verifikation der Wiederverwendbarkeit der Module. Andererseits können die vorgestellten Maßnahmen zur Erhöhung der Wiederverwendbarkeit mit Ausnahme der Änderung des Sortieralgorithmus auf die Betrachtung mehrerer Matrizen angewandt werden. Abbildung 47 stellt die Suche nach wiederkehrenden Modulen in mehreren Produktionsanlagen, also in multiplen Matrizen, dar. In dieser Kubusdarstellung wird die Historie der modularisierten Produktionsanlagen eines anwendenden Unternehmens durch die verschiedenen Ebenen dargestellt. Der Pfeil symbolisiert die Identifikation eines wiederkehrenden Moduls in verschiedenen Produktionsanlagen.

Um die Module, die aus der Modularisierung einer Maschine resultieren, bei der Entwicklung neuer Anlagen wiederverwenden zu können, sollten diese nicht prozessspezifische Komponenten enthalten. Durch den Vergleich mit anderen Produktionsanlagen in Form der multiplen Matrizen können solche prozessspezifischen Komponenten identifiziert werden. Dies wird durch kleinere Veränderungen an der Sortierung und der resultierenden Anzahl an Maschinen, in denen sich die Module wiederfinden lassen, geprüft. Wird zum Beispiel ein Greifer und ein Roboter nicht im selben Modul betrachtet, kann er in mehreren Anlagen wiederverwandt werden. Dem Ziel der Erhöhung der Wiederverwendbarkeit steht die Reduktion der Komplexität des Modul und damit des Nutzens einer Wiederverwendung entgegen. Somit sollte die Komplexität der Module nur dann reduziert werden, wenn sie in einer deutlichen Erhöhung der Wiederverwendbarkeit resultiert.

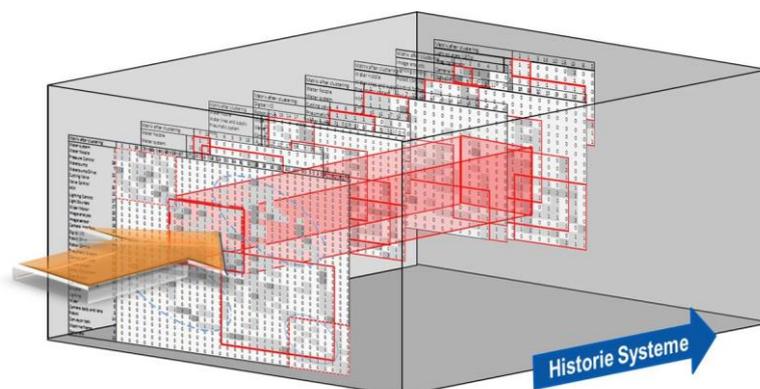


Abbildung 47: Identifikation von wiederkehrenden Modulen in mehreren Produktionsanlagen - Bildquelle [WeKl (2012a), WeKl (2012b), WeKl (2012c)]

5.3.3 Systematisierung von Modulen in der Wissensbasis

Im nachfolgenden Kapitel wird ein Vorgehen beschrieben, das es ermöglicht, die identifizierten Module so in einer Wissensbasis zu speichern, dass passende Module im Engineering einer neuen Produktionsanlage schnell ausgewählt werden können. Ausgehend von den resultierenden Modulen, einer Prozessbeschreibung der Produktionsanlage, den Eigenschaften der Module und den wiederzuverwendenden Daten soll durch diese Stufe der Methode eine Systematisierung der Module in der Wissensbasis ermöglicht werden. Diese Systematisierung stellt den Ausgangspunkt der Modulauswahl beim Engineering neuer Produktionsanlagen dar und ermöglicht eine Eingrenzung der resultierenden Modulkombinationen.

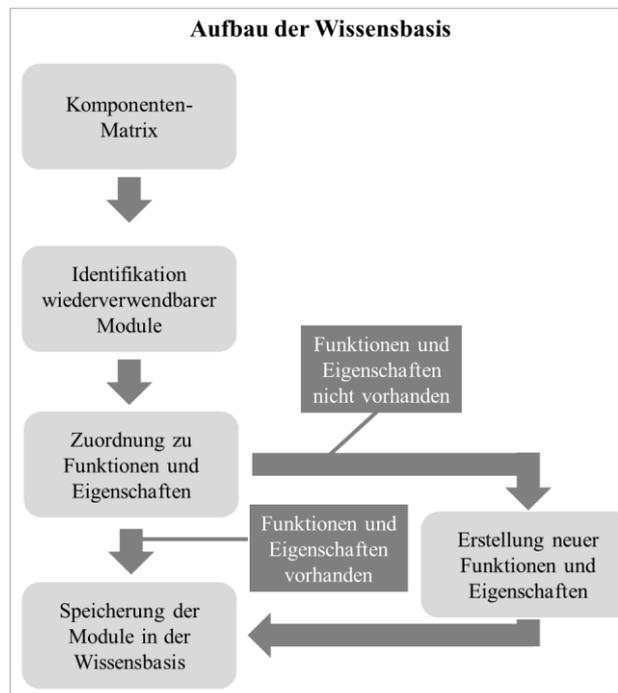


Abbildung 48: Vorgehen beim Aufbau der Wissensbasis zur Einbindung der Wiederverwendung in das Engineering

Dabei sollen die Module ohne zusätzliche Komplexität für den Anwender im Engineering neuer Produktionsanlagen systematisiert werden. Daraus resultiert die Forderung, dass nach Möglichkeit bestehende Informationen und Engineering-Systeme weitergenutzt werden können. Das nachfolgend beschriebene Vorgehen zeigt eine Möglichkeit dazu auf, wobei zuerst auf Möglichkeiten der Systematisierung durch Funktionen und Eigenschaften und anschließend auf die Anbindung an bestehende Engineering-Systeme eingegangen wird. Abbildung 48 zeigt das Vorgehen zur Einbindung der Module beim Aufbau der Wissensbasis. Dabei werden die identifizierten Module den Funktionen und Eigenschaften zugeordnet. Sind passende Funktionen und Eigenschaften nicht vorhanden, werden neue erstellt.

Zuordnung von Modulen zu Funktionen

Die Zuordnung von Modulen zu Funktionen ermöglicht die Systematisierung der Module in der Wissensbasis. Durch eine Prozessbeschreibung kann der Anwender beim Engineering neuer Produktionsanlagen passende Module auswählen, die die Funktionen aus der Prozessbeschreibung erfüllen.

Nach der Modularisierung der bestehenden Produktionsanlage werden die resultierenden Module nun einer oder mehreren Funktionen zugeordnet. Je nach Modulgröße kann es natürlich auch möglich sein, dass mehrere Module eine Funktion erfüllen und ihr zugeordnet werden. Für das beschriebene Ziel eines funktionserfüllenden Moduls bedeutet die Zuordnung aber im Regelfall, dass ein Modul eine Funktion erfüllt. In Abbildung 49 wird die Zuordnung der Module zu Funktionen visualisiert. „Modul b“ übernimmt im dargestellten Produktionsprozess zwei Funktionen. Dies kann beispielsweise ein Roboter sein, der eine Maschine (Module e), die eine Bearbeitung (Funktion 2) durchführt, be- und entlädt (Funktion 1 und Funktion 3). Module können also verschiedene Funktionen in einer Produktionsanlage erfüllen und damit auch zugeordnet werden.

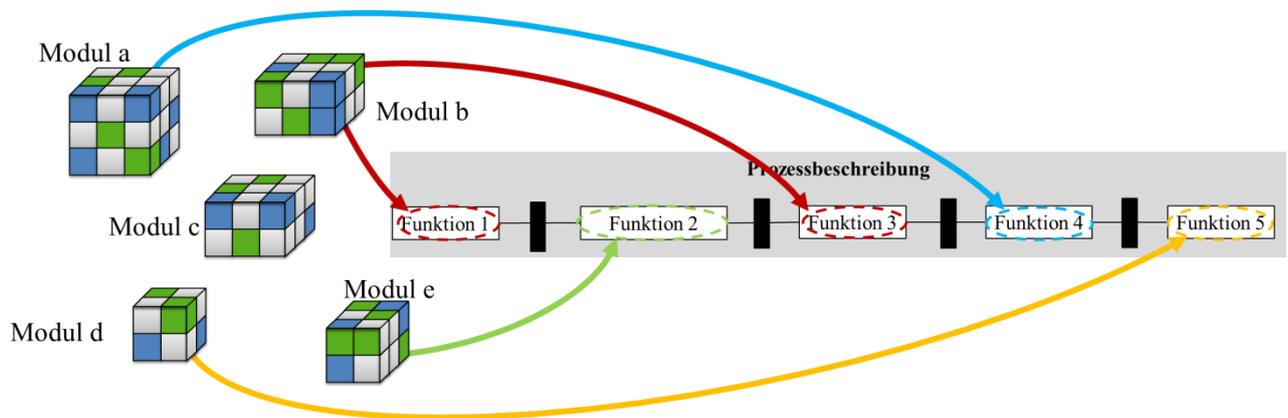


Abbildung 49: Module werden einer oder mehreren Funktionen zugeordnet

Bei der Vorgehensbeschreibung der Identifikation der Module wurde bereits beschrieben, dass Module in Produktionsanlagen existieren, die keine direkte Funktion im Produktionsprozess übernehmen. Diese Module (im dargestellten Beispiel „Modul c“) erfüllen übergeordnete Aufgaben in der Produktionsanlage, wie z.B. Sicherheits- und Steuerungsfunktionen. Über die Verknüpfungen können diese Module empfohlen und damit im Engineering einer neuen Produktionsanlage verwendet werden.

Um Probleme mit der eindeutigen Zuordnung zu Funktionen und der Redundanz von Funktionen zu vermeiden, wird empfohlen, einen standardisierten Katalog an Funktionen zu verwenden. Dieser kann beispielsweise auf bestehende Normen im Bereich der Fertigungsverfahren oder der Montage- und Handhabungstechnik aufbauen. Diese Kataloge sollten, mit Blick auf ihre Anwendbarkeit im Unternehmen, um typische Funktionen ergänzt und spezifiziert werden. Die eindeutige Zuordnung ist allerdings eine wichtige Anforderung, um die Austauschbarkeit zwischen den Modulen, die dieselbe Funktion erfüllen, zu ermöglichen. Die Austauschbarkeit ermöglicht es, die Kombination an Modulen, die unter gegebenen Voraussetzungen den Produktionsprozess am besten erfüllt, zu verändern und zu optimieren.

Die Funktionsbeschreibungen sollen möglichst lösungsneutral sein, um das Spektrum der zuordenbaren Funktionen nicht einzuschränken und somit die Austauschbarkeit der Module zu unterstützen. Des Weiteren soll eine hierarchische Struktur der Funktionen, wie sie in Abbildung 50 dargestellt ist, eine abstrakte Beschreibung des Produktionsprozesses ermöglichen. Im dargestellten Fall muss der Prozess im Engineering einer neuen Produktionsanlage nicht durch Unterfunktionen (z.B. Fräsen, Drehen, Bohren) beschrieben werden, sondern es können auch

weiter gefasste Nebenfunktionen (z.B. Trennen, Umformen) oder Hauptfunktionen (z.B. Bearbeiten, Prüfen, Handhaben) gewählt werden. Daraus resultieren zwar einerseits eine Vielzahl möglicher Lösungskombinationen, andererseits kann der Anwender der Methode auch Konzepte für Produktionsanlagen erstellen, wenn der Prozess noch nicht im Detail festgelegt ist. Die Methode dient somit auch als eine Art Kreativitätstechnik, die den Anwender bei neuen Modulkombinationen, bestehend aus den vorhandenen Modulen, unterstützen kann.

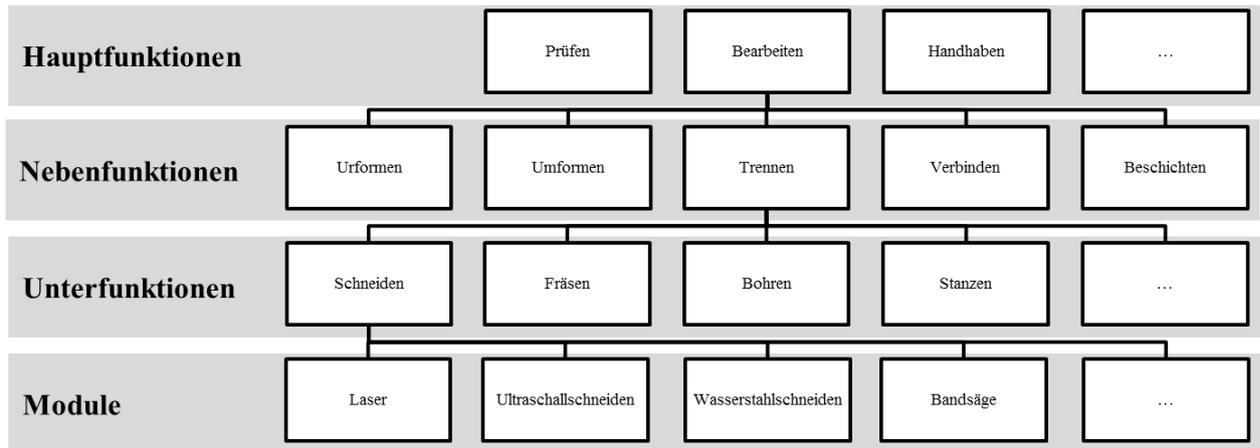


Abbildung 50: Hierarchische Struktur der Funktionen

Fehlerhafte Modulkombinationen können basierend auf einer Funktionsbeschreibung nicht automatisch ausgeschlossen werden. Als Beispiel können Metalle nicht mit allen Schweißverfahren gefügt werden. Wählt man im Engineering einer neuen Produktionsanlage als Prozessschritt bspw. Schweißen muss ergänzend noch das zu bearbeitende Material festgelegt werden, um ein geeignetes Verfahren auswählen zu können. Daher werden die Module nachfolgend Eigenschaften zugeordnet.

Zuordnung von Modulen zu Eigenschaften

Nachdem die Module identifiziert und Funktionen zugeordnet wurden, werden sie nachfolgend verschiedenen Eigenschaften zugeordnet. Die Eigenschaften können zu verschiedenen Klassen zusammengefasst werden. Die in Tabelle 3 dargestellten Klassen und Eigenschaften dienen einer ersten Orientierung bei der Zuordnung der Eigenschaften.

Klasse	Eigenschaften
Produktbezogene Eigenschaften	Bearbeitbare Materialien; Abmessungen und Form des Bauteils
Produktionsbezogene Eigenschaften	Bearbeitungsgeschwindigkeit; Genauigkeit; bearbeitbare Stückzahl
Umfeldbezogene Eigenschaften	Schutzart; anwendbarer Temperaturbereich; Reinraumklasse
Technologische Eigenschaften	Art der Datenschnittstelle; Kompatibilität zu bestimmter Software (z.B. Labview)
Organisatorische Eigenschaften	Kosten; Eigenfertigung; Zulieferer

Tabelle 3: Klassen und beispielhafte Eigenschaften von Modulen

Die Klassen und Eigenschaften sollten aber, ebenso wie der Funktionskatalog, an die Produktionsanlagen des Unternehmens angepasst und weiterentwickelt werden. Um Redundanz und nicht vergleichbare Daten zu vermeiden, sollte auch bei den Ausprägungen der Eigenschaften Vorgaben in Form von Abstufungen oder Beispieldaten zur Orientierung angegeben werden. Diese helfen auch bei der Einordnung des Moduls, sollten exakte Daten nicht vorhanden sein. Die Zuordnung der Module zu Eigenschaften wird ebenfalls durch ein Softwaretool unterstützt, das in Kapitel 6 vorgestellt wird.

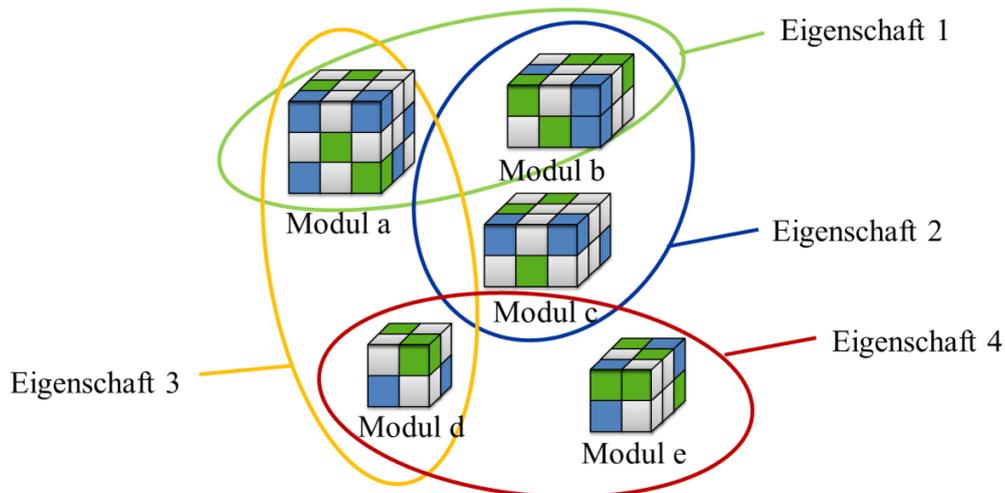


Abbildung 51: Module werden einer oder mehreren Eigenschaften zugeordnet

Das Beispiel in [Abbildung 51](#) zeigt die Zuordnung von Modulen zu Eigenschaften. Module können einer Vielzahl an Eigenschaften aus unterschiedlichen Klassen zugeordnet werden. Ein Modul kann auch mehrere Ausprägungen einer Eigenschaft zugeordnet werden. Für das bereits angesprochene Beispiel des Schweißens können somit verschiedene Metalle zugeordnet werden, die eine fehlerhafte Auswahl eingrenzen. So würde beispielsweise dem Metall-Inert-Gas Schweißen Aluminium, nicht aber Stahl zugeordnet, da mit diesem Schweißverfahren Aluminium gefügt werden kann. Gleichzeitig könnte eine andere Eigenschaft eine realisierbare Genauigkeit sein.

5.4 Engineering neuer Anlagen

Beim Engineering einer neuen Produktionsanlage wird mittels der Funktionen, die den Modulen zugeordnet wurden, der Produktionsprozess beschreiben. Module, die diese Funktionen erfüllen, werden daraufhin zu einem Lösungskonzept für die Produktionsanlage kombiniert. Module, die keiner Funktion zugeordnet werden, werden über Schnittstellen in die Modulkombination integriert. Dies ermöglicht es, übergreifende Funktionen zu berücksichtigen. Aus den resultierenden Modulkombinationen kann der Anwender eine auswählen und basierend auf den dazu abgespeicherten Daten und Informationen die Produktionsanlage ausgestalten.

5.4.1 Auswahl von Modulkombinationen durch Funktionen und Eigenschaften

In Kapitel 6 wird ein Softwaretool vorgestellt, das den Entwickler bei der Prozessmodellierung unterstützt. Basierend auf der Prozessbeschreibung werden passende Module aus der Wissensbasis ausgewählt. Dieses Tool berücksichtigt dabei auch, dass Module mehrere Funktionen erfüllen können. [Abbildung 55](#) zeigt das Vorgehen zur Auswahl der Module beim

Engineering neuer Produktionsanlagen. Im Engineering neuer Produktionsanlagen wird mit den Funktionen der Wissensbasis der Produktionsprozess beschrieben. Zudem werden die gewünschten Eigenschaften festgelegt. Ist keine passende Modulkombination vorhanden, müssen die Eigenschaften angepasst werden.

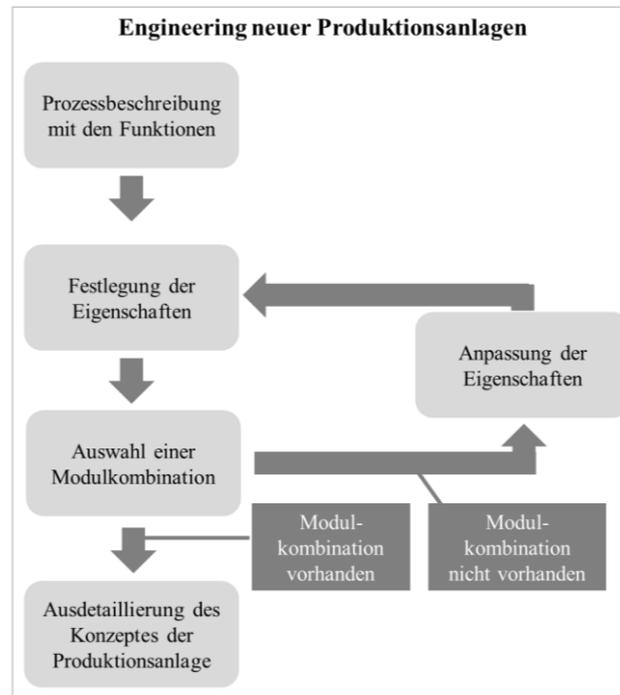


Abbildung 52: Vorgehen beim Engineering neuer Produktionsanlagen

Ausgehend von einer hinreichend großen Wissensbasis an Modulen bzw. einer Modularisierung in Hauptkategorien ergibt sich aus der Kombination der Module schnelle eine große Anzahl an theoretisch möglichen Lösungsalternativen. Abbildung 53 zeigt beispielhaft die resultierenden Kombinationsmöglichkeiten für den Produktionsprozess. „Funktion fa“ wird von n Modulen erfüllt, „Funktion fb“ von drei Modulen und „Funktion fc“ von 2 Modulen. In diesem einfachen Beispiel ergeben sich also für jedes Modul n, das die „Funktion fa“ erfüllt, sechs Kombinationsmöglichkeiten.

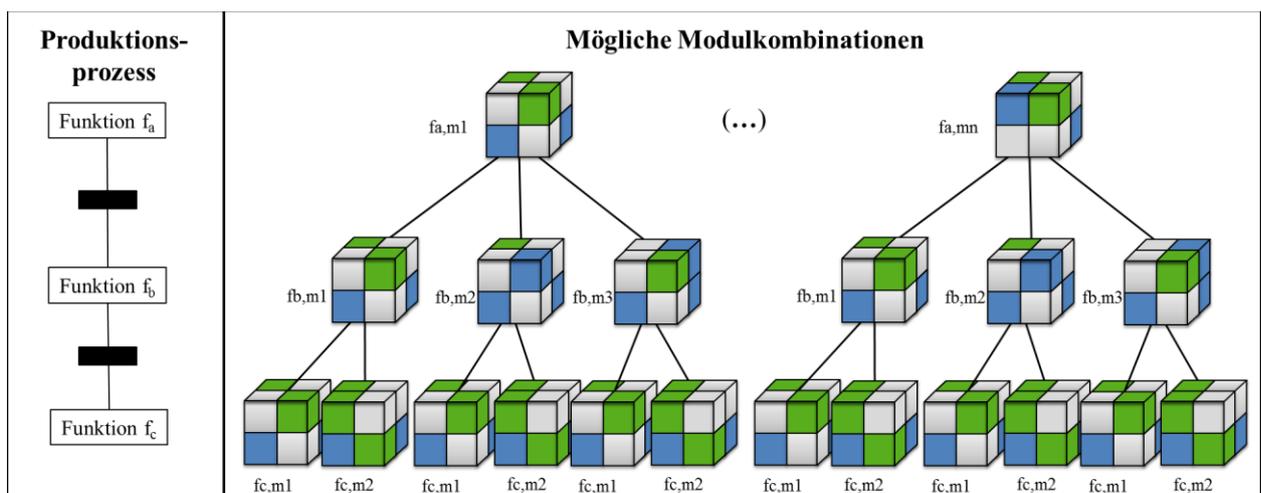


Abbildung 53: Resultierende Modulkombinationen auf Basis der Funktionszuordnung

Um den Anwender bei der Auswahl der Lösungsmöglichkeit zu unterstützen, werden nachfolgend Möglichkeiten aufgezeigt, um die Anzahl der infrage kommenden Kombinationen einzuschränken. Im Engineering neuer Produktionsanlagen können nach der Prozessbeschreibung verschiedene Eigenschaften ausgewählt werden. Dadurch wird die Anzahl der Modulkombinationen, die durch die Auswahl der Module, basierend auf der Prozessbeschreibung, möglich ist, eingegrenzt. Die Zuordnung der Module zu Eigenschaften ermöglicht beispielsweise die Auswahl aller bearbeitenden Module, die eine gewisse Schutzart erfüllen oder ein bestimmtes Material bearbeiten können. Abbildung 54 visualisiert die daraus resultierenden Modulkombinationen nach der Eingrenzung der Auswahl durch Eigenschaften. Im Vergleich mit der Modulauswahl über Funktionen fällt auf, dass die Anzahl der möglichen Modulkombinationen reduziert werden konnte. Um aus den verbleibenden Kombinationen, das Modul zu identifizieren, dass die Funktion auf Basis bestimmter Kriterien am besten erfüllt, wird nachfolgend auf Möglichkeiten zur Bewertung von Modulkombinationen eingegangen.

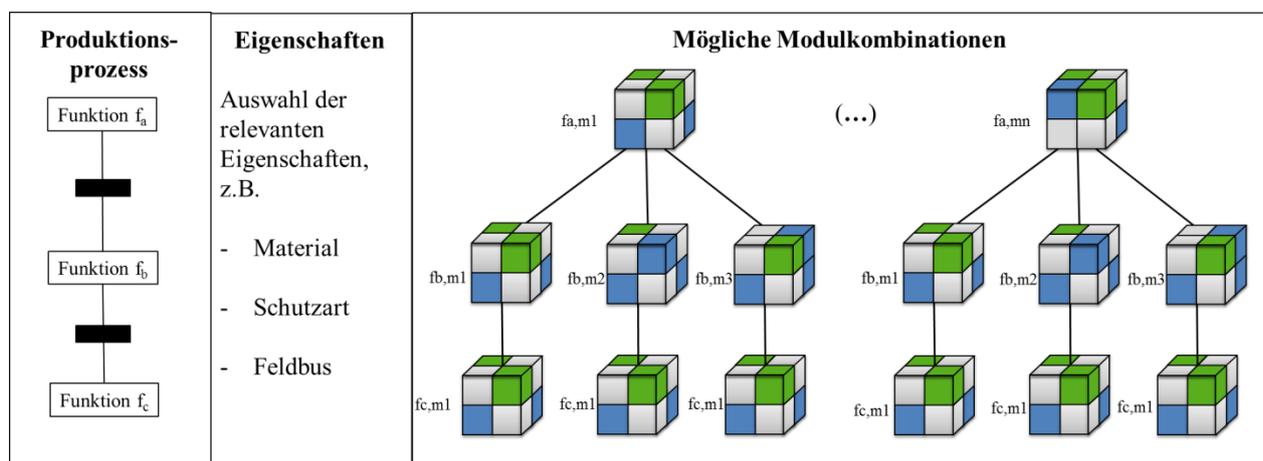


Abbildung 54: Resultierende Modulkombinationen nach der Eingrenzung durch Eigenschaften

5.4.2 Technisch-wirtschaftliche Bewertung der Modulkombinationen

Die dritte Stufe der Methode zum Engineering von Produktionsanlagen durch Wiederverwendung von Modulen ermöglicht eine technisch-wirtschaftliche Bewertung der Konzeptvarianten. Diese Bewertung dient einerseits dazu, die Anzahl der möglichen Modulkombinationen zu priorisieren und damit die beste Variante auszuwählen, andererseits können die Ergebnisse auch bei folgenden wirtschaftlichen Prozessen, wie z.B. der Angebotserstellung, genutzt werden.

Das Vorgehen zur Bewertung der Modulkombinationen bzw. der Konzeptvarianten ist in Abbildung 55 dargestellt. Im Aufbau der Wissensbasis müssen nach der Identifikation der Module neben den Funktionen und Eigenschaften einige wirtschaftliche Kenngrößen gespeichert werden. Im Engineering neuer Produktionsanlagen werden aus der Vorgabe der Eigenschaften und dieser Kenngrößen wirtschaftliche und technische Bewertungen des Moduls ermittelt. Diese können gewichtet und zu einer Bewertung der Modulkombination aggregiert werden. Basierend auf dieser Bewertung kann eine Modulkombination zur Ausdetaillierung ausgewählt werden. Ist die Auswahl aufgrund geringer Unterschiede in der Bewertung nicht möglich, kann die Entscheidung auch durch eine nachgelagerte Simulation abgesichert werden.

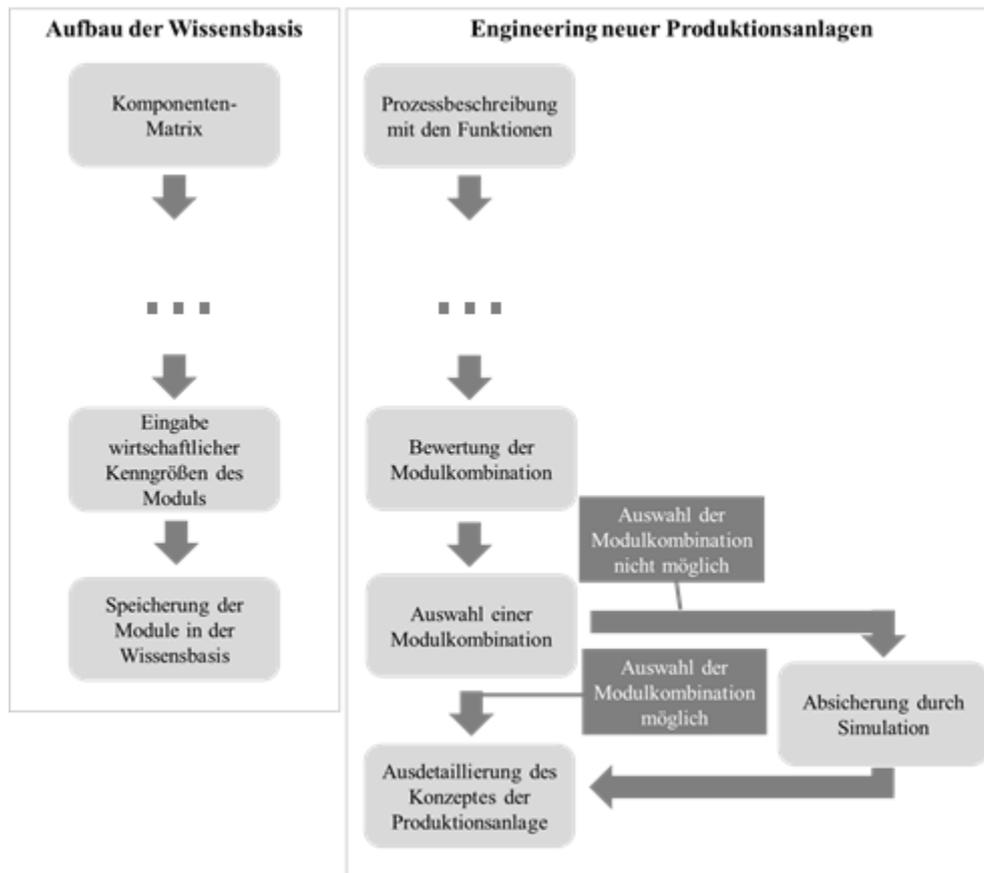


Abbildung 55: Ergänzendes Vorgehen beim Aufbau der Wissensbasis und beim Engineering neuer Produktionsanlagen zur technisch-wirtschaftlichen Bewertung der Konzeptvarianten

Das beschriebene Vorgehen integriert die Bewertung der Modulkombination in den Auswahlprozess. Das heißt, die Modulkombinationen werden priorisiert und damit die Entscheidung der Anwender, welche Modulkombination ausdetailliert werden soll, unterstützt. Die alternative Möglichkeit zur Bewertung von Modulen und Modulkombinationen ist durch eine nachgelagerte Simulation. Beide Varianten werden in den nachfolgenden Kapiteln 5.4.2.1 und 5.4.2.2 erläutert. Während die prozessintegrierte Variante schnell zu groben Ergebnissen bzw. Abschätzungen führt, ist die Simulation sehr viel genauer, aber auch aufwendiger.

Der aggregierte Nutzwert einer Produktionsanlage kann sich aus verschiedenen Teilbewertungen zusammensetzen. Qualitative Bewertungen der Module werden bereits durch die Eigenschaften des Moduls (vgl. Kapitel 5.3.3) vorgenommen bzw. im Engineering neuer Produktionsanlagen berücksichtigt. Daher soll im nachfolgenden Kapitel die quantitative Bewertung der Module bzw. der Modulkombination betrachtet werden. Mögliche Kriterien sind in diesem Zusammenhang:

- Produktivität – Bewertung der realisierbaren Produktionsmenge pro Zeiteinheit
- Kosten – Bewertung der Kosten der Produktionsanlage
- Energieverbrauch – Bewertung des Energieverbrauchs

Die Bewertung beruht dabei auf der Vorgabe einiger Angaben zur Produktionsanlage (z.B. die zu produzierende Stückzahl) während der Auswahl der Module. Die Informationen bzgl. des

Moduls werden bereits im Anschluss an die Identifikation der Module in der Wissensbasis gespeichert.

5.4.2.1 Bewertung der Modulkombination auf Basis der Aggregation von Nutzwerten

Für die Bewertung der Module werden verschiedene Bewertungsmethoden eingesetzt. Diese stehen in Relation zu der zu produzierenden Stückzahl. Abbildung 56 zeigt die für die Bewertung eingesetzten Verfahren. Beim Aufbau der Wissensbasis werden nach Zuordnung der identifizierten Module zu Funktionen und Eigenschaften folgende Bewertungskriterien in der Wissensbasis eingegeben:

- Wiederbeschaffungswert [€]
- Abmessungen bzw. Flächenbedarf [m²]
- Energieverbrauch pro Stunde [kWh]
- Anteil Instandhaltungszeit für reguläre Wartung, Verschleiß und Reparaturen an der Betriebszeit [%]
- Kosten für Verschleißteile pro Jahr [€]
- Kapazitätsgrenze [Stück]
- Bearbeitungszeit [s]
- Arbeitsdauer für Mitarbeiter [s]
- Dauer Maschinenbelegung [s]
- Nutzungsdauer der Anlage [a]
- Jährliche Nutzungszeit [h]

Die hier eingegebenen Werte dienen der anschließenden Bewertung von Modulkombinationen und Konzeptvarianten und nicht einer exakten Kalkulation. Daher können unvollständige Daten auch mit einer hinreichenden Genauigkeit angegeben werden.

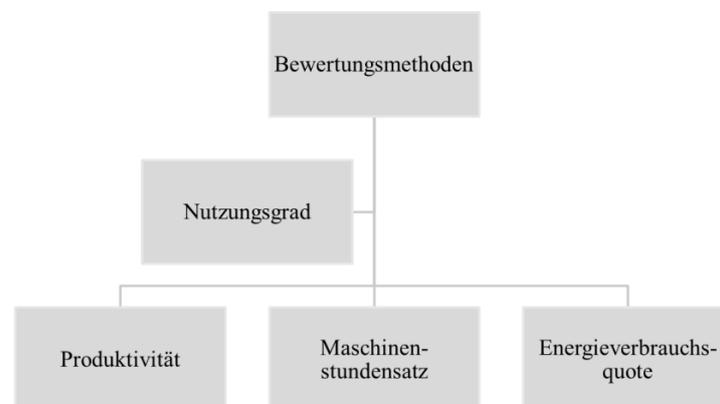


Abbildung 56: Übersicht der eingesetzten Bewertungsmethoden

Im Engineering einer neuen Produktionsanlage müssen produktionsbezogene Rahmenbedingungen in Form der zu produzierenden Stückzahlen etc. angegeben werden. Aus den in der Wissensbasis gespeicherten Kenngrößen und diesen Rahmenbedingungen werden die einzelnen Teilbewertungen für die Modulkombination erstellt. Diese stehen also über dem Nutzungsgrad in direkter Relation zur zu produzierenden Stückzahl. Sind Module in mehreren Ausführungen und damit für unterschiedliche Eigenschaften verfügbar, werden sie in mehreren Versionen in der Wissensbasis gespeichert. Industrieroboter werden also in mehreren Ausführungen als Modul in

der Wissensbasis gespeichert, um unterschiedliche Rahmenbedingungen des Produkts (Stückzahl, Gewicht etc.) realisieren zu können. Da in einigen Fällen keine Module vorhanden sind, die der vorgegebenen Leistung entsprechen, erfolgt eine Anpassung der Eigenschaften über den *Six-Tenth-Factor*¹¹. Dieser Faktor erlaubt die degressive Anpassung, da Kosten und Energieverbrauch nicht im selben Maße steigen wie die zu produzierende Stückzahl.

Die Bewertungen der Module werden normiert und anschließend zu einem Nutzwert für eine Funktion aggregiert. Für die Normierung werden die Mittelwerte der in Frage kommenden Module gebildet und das Verhältnis der einzelnen Bewertung zu diesem Mittelwert berechnet (s. Tabelle 4). Dabei ist zu beachten, dass das größere Verhältnis zum Mittelwert für manche Bewertungen positiv (mehr Produktivität) und für manche negativ (mehr Kosten) ist.

Verhältnis zu Mittelwert		Normierung	Normierung
Von	bis	(positiv)	(negativ)
150%	∞	5	1
110%	150%	4	2
90%	110%	3	3
50%	90%	2	4
0%	50%	1	5

Tabelle 4: Normierung der Bewertungskriterien im Verhältnis zum Mittelwert

Bei Nutzungsgrad ist die Normierung schlechter, je stärker dieser von der zu produzierenden Menge abweicht. Hier wird also auch kein Mittelwert gebildet. Die Normierungen finden sich in Tabelle 5.

Verhältnis zu Mittelwert		Normierung
Von	Bis	
170%	∞	1
150%	170%	2
130%	150%	3
110%	130%	4
90%	110%	5
70%	90%	4
50%	70%	3
30%	50%	2
0%	30%	1

Tabelle 5: Normierung des Nutzungsgrades im Verhältnis zum Mittelwert

Für die Aggregation wird die Bedeutung der Bewertungskriterien für die Produktionsanlage gewichtet (z.B. „1“ nicht wichtig – „3“ sehr wichtig). Die Summe der Produkte aus Normierung und Gewichtung ergibt den Nutzwert. Abbildung 57 zeigt beispielhaft die Aggregation der Bewertungen zu einem funktionsbezogenen Nutzwert. Aus den Gewichtungen und der Normierung der Bewertung lassen sich für die vier dargestellten Module Nutzwerte berechnen.

¹¹ Vgl. Kapitel 3.2.1.2

Berechnung Nutzwert bei Modulvergleich		Einheit Bewertung	Gewichtung	Bewertung Modul a	Normierung	Normierung x Gewichtung	Bewertung Modul b	Normierung	Normierung x Gewichtung	Bewertung Modul c	Normierung	Normierung x Gewichtung	Bewertung Modul d	Normierung	Normierung x Gewichtung	Maximalwerte
Maschinenstundensatz	[€/h]	3	5,23	1	3	1,51	5	15	2,34	4	12	3,84	2	6	15	
Nutzungsgrad	[%]	1	42	2	2	177	2	2	111	4	4	68	3	3	5	
Produktivität	[Stck./h]	3	42	2	6	73	4	12	52	2	6	77	4	12	15	
Energieverbrauchsquote	[kW]	1	1	4	4	1	4	4	1	2	2	1	2	2	5	
Nutzwert				15			33			24			23			40
Nutzwert in Prozent				38			83			60			58			100
Rang				4			1			2			3			

Abbildung 57: Aggregation zu einem Nutzwert für eine Funktion

Durch die Maximierung der Nutzwerte über die verschiedenen Funktionen kann eine Reihenfolge der Modulkombinationen erstellt werden. Diese erlaubt es dem Anwender des Systems, beim Engineering einer neuen Produktionsanlage zwischen wenigen Modulkombinationen auszuwählen und somit schneller die Entscheidung zu treffen, welche Kombination ausdetailliert wird.

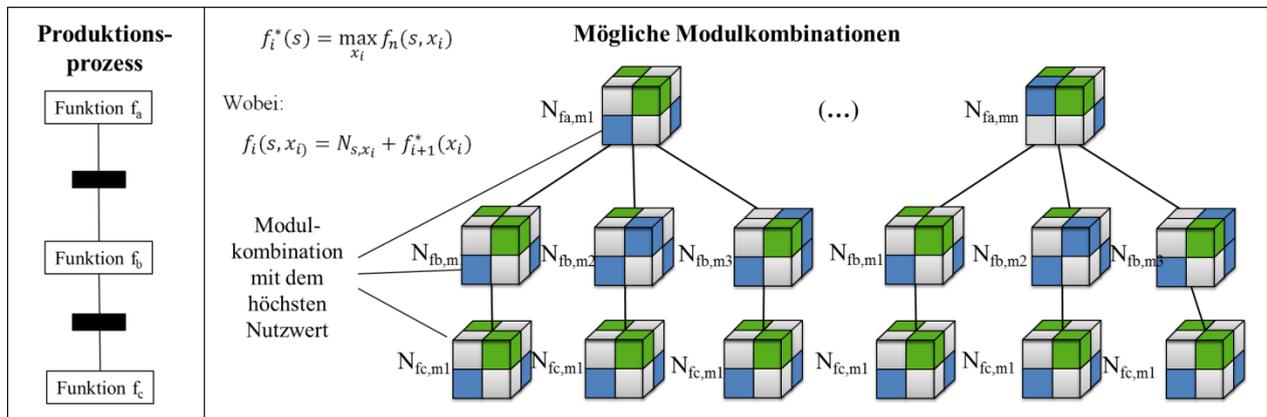


Abbildung 58: Resultierende Modulkombinationen nach der technisch-wirtschaftlichen Bewertung

Abbildung 58 zeigt die möglichen Modulkombinationen und die jeweiligen Nutzwerte der Module. Das Maximum der Summe der Nutzwerte stellt die theoretisch optimale Modulkombination dar. Durch die Nutzwerte der Modulkombinationen kann eine hinreichend genaue Bewertung vorgenommen werden. Gerade für den Fall, dass die Nutzwerte der Modulkombinationen eng beieinander liegen, kann es daher sinnvoll sein, die Bewertung durch Simulation abzusichern.

5.4.2.2 Ergänzende Absicherung der Modulauswahl durch Simulation

Zur Absicherung der Bewertung der Modulkombinationen können verschiedene Simulationswerkzeuge eingesetzt werden. Die Produktivität der Anlage kann durch kinematische Ablaufsimulationen oder Materialflusssimulationen bestimmt werden. Der Energieverbrauch kann

durch eine *System Dynamics* Software bestimmt werden. Abbildung 59 zeigt eine Übersicht möglicher Simulationswerkzeuge.

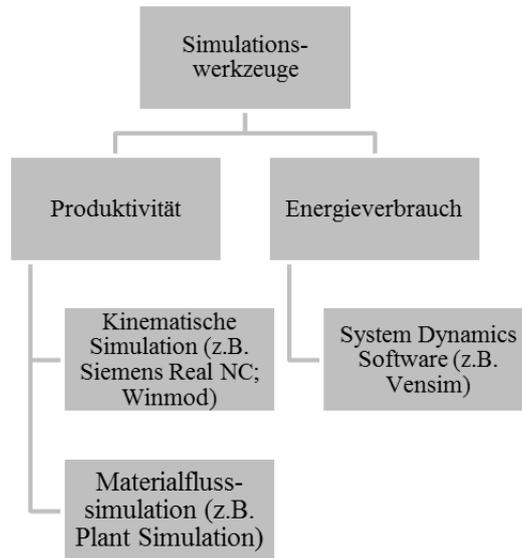


Abbildung 59: Mögliche Simulationswerkzeuge zur Absicherung der Bewertung

Um den Aufwand zur Durchführung der Simulation zu reduzieren, sollten die Daten der Module, die wiederverwendet werden sollen, um Daten zur Simulation, wie Funktionsmodelle oder das Steuerungsprogramm, ergänzt werden (s. Abbildung 60). Diese Modelle müssen an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden, bevor die Simulation durchgeführt werden kann.

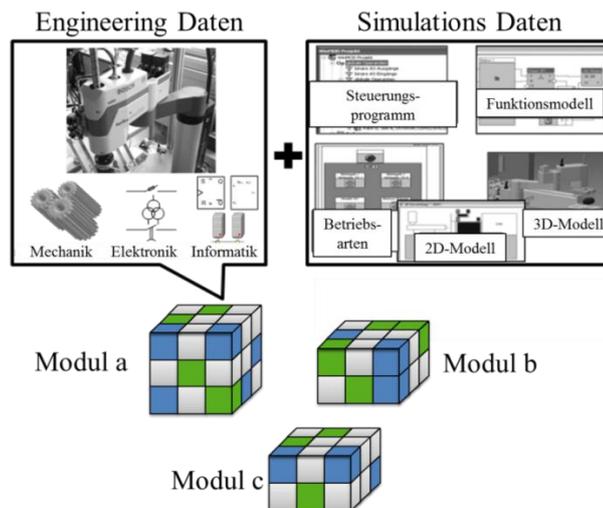


Abbildung 60: Ergänzung der wiederzuverwendenden Daten um Simulationsmodelle etc.

Durch die Simulation werden die Modulkombinationen verglichen und abgesichert. Der Anwender der Methode zum Engineering von Produktionsanlagen durch die Wiederverwendung von Modulen hat dadurch genauere Bewertungen der Modulkombination, muss allerdings auch den Simulationsaufwand investieren.

Ist eine Modulkombination ausgewählt, wird diese in den weiteren Phasen des Engineering ausdetailliert, hergestellt, in Betrieb genommen, genutzt und entsorgt. Die wiederverwendenden Engineering- und Simulations-Daten können in den verschiedenen Phasen eingesetzt werden.

5.5 Zusammenfassung Methode

Die vorgestellte Methode zeigt das Vorgehen zum Engineering von Produktionsanlagen durch Wiederverwendung von Modulen auf. Notwendige Teilaspekte dabei sind der Aufbau einer Wissensbasis sowie das Engineering der Produktionsanlagen auf Basis der Module. Für den Aufbau der Wissensbasis wurde ein Modularisierungsverfahren auf Basis der *Design Structure Matrix* vorgestellt. Dieses ermöglicht die Modularisierung bestehender Anlagen auf Basis einer Komponentenliste (bspw. Stückliste) und ergänzenden Informationen zu den Beziehungen der Komponenten untereinander, die in einer Matrix dargestellt werden. Die Methode wurde einerseits um neue Sortieralgorithmen andererseits durch Bewertungskriterien des Modularisierungsergebnisses ergänzt. In einem weiteren Schritt wurden verschiedene Ansätze zur Erhöhung der Wiederverwendbarkeit der Module dargestellt. Diese beziehen sich sowohl auf eine Änderung der Sortierung als auch auf eine Analyse des Modularisierungsergebnisses, um Komponenten zu identifizieren, die nicht zum Modul passen. Zur Systematisierung der Module in der Wissensbasis werden diese Funktionen und Eigenschaften zugeordnet. Zudem werden Informationen (Kosten, Energieverbrauch etc.) und Daten (CAD Entwurf, Steuerungsprogramm, Dokumentation, etc.) ergänzt.

Neue Produktionsanlagen werden ausgehend von einer Beschreibung des zu realisierenden Produktionsprozesses konzipiert. Dazu wird aus den Funktionen, denen die Module zugeordnet wurden, der Prozess modelliert. Die resultierenden Modulkombinationen werden durch die Vorgabe von Eigenschaften eingegrenzt. Zur Auswahl einer Modulkombination, die den Produktionsprozess auf Basis technischer und wirtschaftlicher Kriterien möglichst optimal erfüllt, wird ein Vorgehen zur Bewertung der Modulkombinationen vorgestellt. Hier werden basierend auf vorgegebenen Werten aus der Wissensbasis aggregierte und gewichtete Nutzwerte für die Modulkombinationen ermittelt. Die Auswahl der Modulkombination kann durch Simulation abgesichert werden, um eine belastbare Entscheidung für ein Angebot oder die Ausgestaltung einer Modulkombination treffen zu können.

Im Folgenden wird ein Softwarewerkzeug vorgestellt, das den Entwickler beim Aufbau der Wissensbasis und dem Engineering von Produktionsanlagen durch die Wiederverwendung von Modulen unterstützt. Anschließend werden Anwendungen der Methode und des Softwarewerkzeuges vorgestellt.

6 Implementierung der Methode als Softwarewerkzeug

Analog zur Methodenbeschreibung wird auch bei der Implementierung zwischen einem Softwarewerkzeug zum Aufbau der Wissensbasis und einem Werkzeug zum Engineering neuer Produktionsanlagen unterschieden. Als Benutzerschnittstelle wurde eine gemeinsame Weboberfläche implementiert, die die einfache Anwendung beider Werkzeuge ermöglichen soll.

Abbildung 61 stellt die Einordnung der entwickelten Softwarewerkzeuge in das Engineering-Konzept dar. Das Softwarewerkzeug zum Aufbau der Wissensbasis sollte initial im Rahmen eines Projektes, in dem bestehende Anlagen modularisiert werden, eingesetzt werden. Dabei wird es von erfahrenen Entwicklern eingesetzt, um deren Wissen über die bestehenden Anlagen zu externalisieren und für die Wiederverwendung in neuen Anlagen zur Verfügung zu stellen. Ist die Wissensbasis hinreichend groß, wird das Softwarewerkzeug zum Aufbau der Wissensbasis nach dem Engineering neuer Anlagen eingesetzt, um zu prüfen, ob neue Module ergänzt oder bestehende Module in der Wissensbasis geändert werden müssen.

Das Softwarewerkzeug zum Engineering neuer Produktionsanlagen wird in den frühen Engineering Phasen – also dem *Conceptual Design* und dem *Basic Engineering* – zur Konzeption neuer Anlagen eingesetzt. Dabei kann das Softwarewerkzeug sowohl im Rahmen des Systementwurfs im Engineering als auch zur Grobkalkulation im Vertrieb eingesetzt werden. Das Softwarewerkzeug wird eingesetzt, um in den frühen Engineering Phasen schneller eine Entscheidung über ein Lösungskonzept treffen zu können. Im Anschluss an diese Entscheidung erfolgt die Ausgestaltung der Anlage auf Basis der Dokumente aus der Wissensbasis mit den üblichen Engineering-Tools (CAD, SPS-Programmierung etc.).

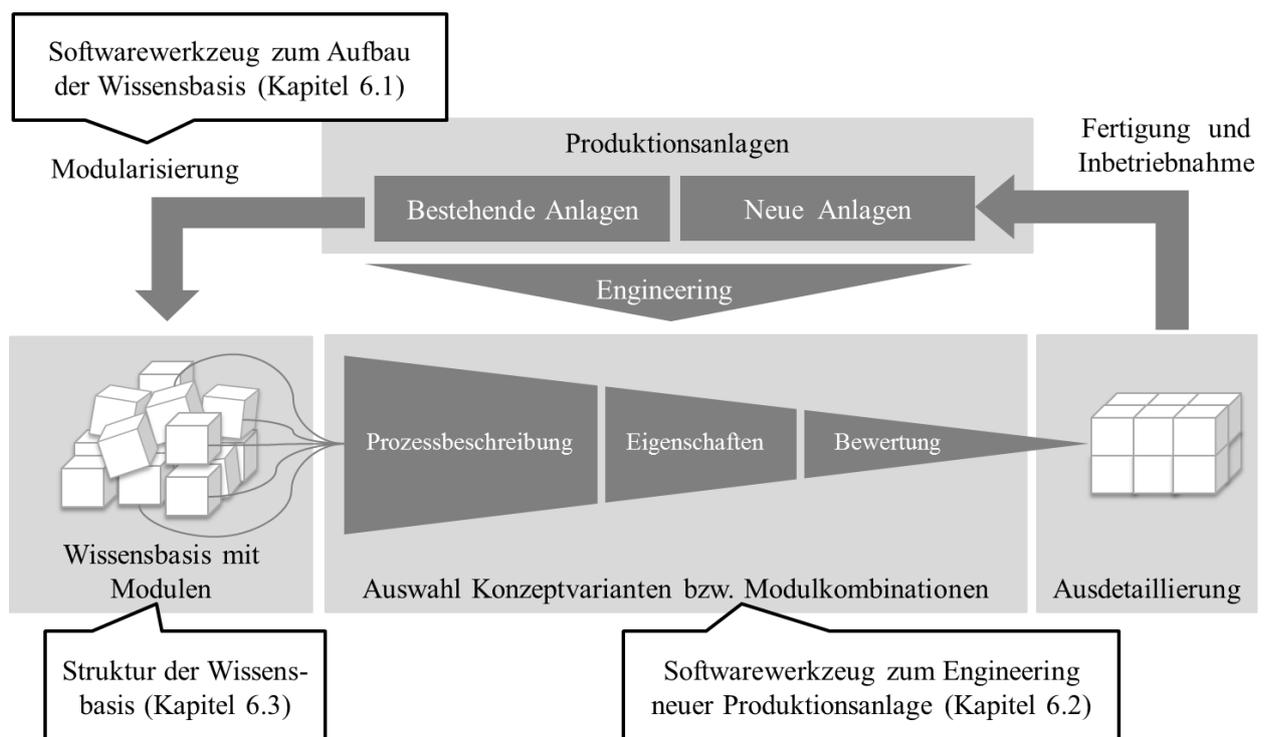


Abbildung 61: Integration des Softwarewerkzeuges in das Engineering-Konzept

Die Struktur der Wissensbasis wird in Kapitel 6.3 vorgestellt. Sie wird in Form einer relationalen Datenbank realisiert.

6.1 Softwarewerkzeug zum Aufbau der Wissensbasis

Ausgangspunkt des Aufbaus der Wissensbasis ist die Modularisierung mittels der beschriebenen *Design Structure Matrix*¹². Um die Modulbildung zu unterstützen, wurde die Sortierung der Matrix bzw. die Definition in einem Java-basierten Werkzeug abgebildet, wobei zur Lösung der Algorithmen ein mathematischer *Solver*¹³ verwendet wurde. Abbildung 62 zeigt die Benutzeroberfläche des Modularisierungstools. Die *Design Structure Matrix* kann als Tabelle¹⁴ eingelesen werden, wobei für die Modularisierung von multiplen Matrizen mehrere Blätter genutzt werden. Die Ausschlussmatrix, also die Matrix, in der der Anwender vorgeben kann, dass Komponenten definitiv unterschiedlichen Modulen zugeordnet werden sollen, ist stets das letzte Blatt der Tabelle. Die Blätter müssen stets symmetrisch aufgebaut sein.

Die in Kapitel 5.3.2 beschriebenen Maßnahmen zur Erhöhung der Wiederverwendbarkeit von Modulen können teilweise direkt in der Software verändert werden. Durch eine Veränderung des Sortieralgorithmus und des Ähnlichkeitskoeffizienten sowie durch eine Anpassung der Modulanzahl und der Modulgröße kann das Ergebnis der Modularisierung beeinflusst werden. Werden multiple Matrizen modularisiert, also übergreifende Module in verschiedenen Anlagen identifiziert, muss die Modulanzahl entsprechend angepasst werden.

Die modularisierte Matrize wird nach der Berechnung in folgenden drei Ansichten dargestellt:

- Gruppierungsmatrix
- Komponentenmatrix
- Ähnlichkeitsmatrix

Für die Auswertung besonders relevant sind die Komponenten- und die Gruppierungsmatrix. In der Gruppierungsmatrix, die auch in Abbildung 62 dargestellt ist, werden nur die Zusammenhänge zwischen den Komponenten dargestellt, die zu einem Modul zusammengefasst werden.

¹² vgl. Kapitel 5.1

¹³ IBM ILOG CPLEX Optimizer

¹⁴ bspw. Microsoft Excel

The image shows a software interface for modularization, titled 'Modularisierung von Fertigungssystemen'. The interface includes several control panels and a large data grid.

- Auswahl Matrix:** A panel on the left with tabs for 'Gruppierungsmatrix', 'Komponentenmatrix', and 'Ähnlichkeitsmatrix'. It features a slider from 1 to 1.7.
- Auswahl Ähnlichkeitskoeffizient:** A callout box pointing to the 'Ähnlichkeitsmatrix' tab.
- Auswahl Sortieralgorithmus:** A callout box pointing to the 'Auswahl Matrix' panel.
- Vorgabe Anzahl Fertigungsanlagen:** A callout box pointing to the 'Anzahl der Maschinen: 2' field.
- Vorgabe Anzahl Module:** A callout box pointing to the 'Gruppierungsmatrix' tab.
- Vorgabe Modulgröße:** A callout box pointing to the 'Modulgröße' field.

The main data grid displays a matrix of components (rows) and modules (columns). The components listed include Camera-Interface, Image sensor, Illumination, Camera body, Screen-processor, Control lifting-turn-unit, Drive turning, Drive lifting, Control Rotary indexing table, Control testing part rotation, Drive for Rotary indexing table, Image analysis software, Control illumination, HMI, Control centrifugal feeder, Drive testing part rotation, Pneumatics testing system, Lifting-turning-unit, Adaptor testing part, Rotary indexing table, Guidance for sorting of testing p..., Maschine frame, Separation, Robot, Drive Robot, Control Robot, PCC, Digital I/O, Electronic units, Control software, Safety equipment, DC motor centrifugal feeder, Frame of centrifugal feeder, Drum, and Drivehaft of centrifugal feeder. The columns are numbered 1 through 32.

Abbildung 62: Modularisierungstool des Anlagenkonfigurators

Ein Beispiel für die Komponentenmatrix, also die sortierte DSM, ist in Abbildung 63 dargestellt. Die Module sind im dargestellten Beispiel zu erkennen, da wenige Schnittstellen zwischen den Modulen vorhanden sind. Die Ähnlichkeitsmatrix vervollständigt die Ansichten des Softwarewerkzeuges. Sie visualisiert die berechneten Ähnlichkeitskoeffizienten zwischen den Komponenten.

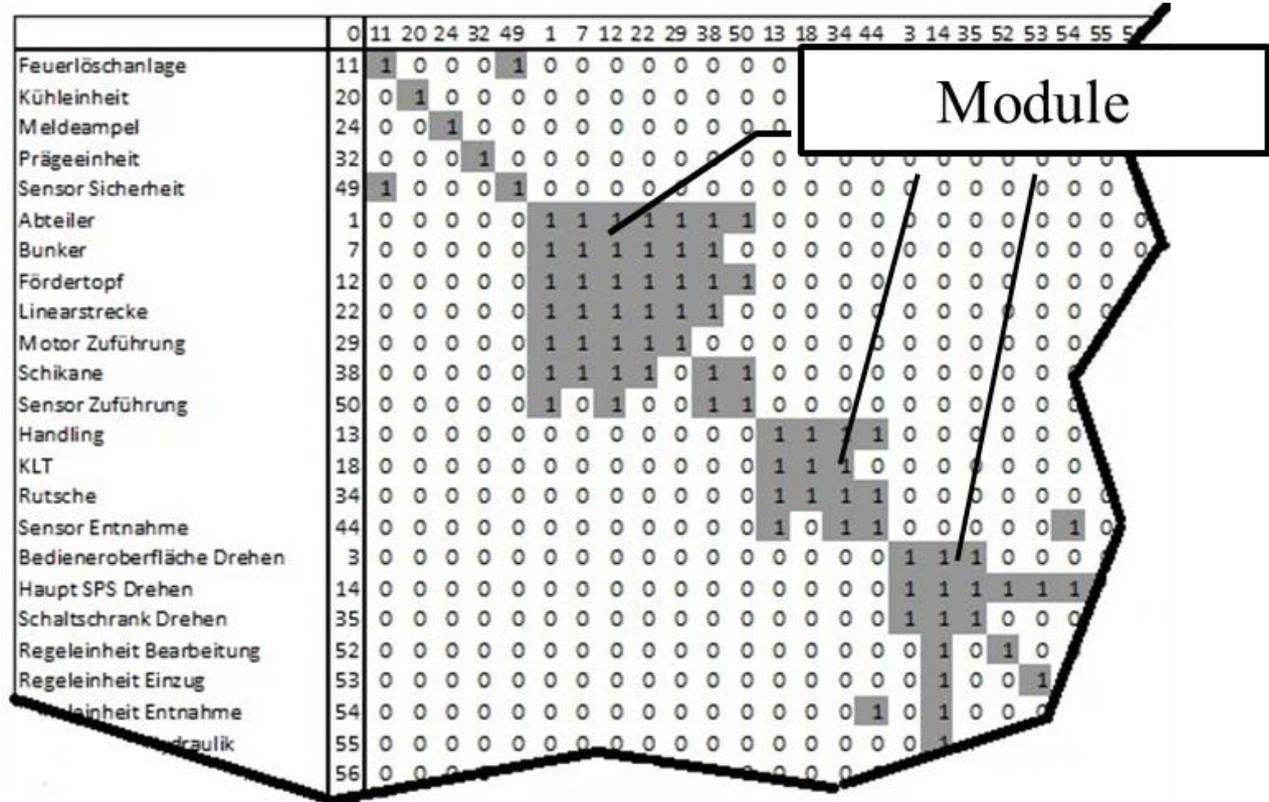


Abbildung 63: Modularisierte Komponentenmatrix

Die Ergebnisse der Modularisierung können exportiert und zur Weiterverarbeitung eingelesen werden. Zusätzliche Informationen wie die Zuordnung von Funktionen, Eigenschaften und Bewertungen des Moduls können über die in Abbildung 64 dargestellte Eingabemaske eingegeben werden. Dabei werden bestehende Daten aus der Datenbank zur Auswahl gestellt und können bei Bedarf erweitert werden. Zudem können Verlinkungen zwischen den Modulen angegeben werden. Die Auswahl der Eigenschaften, Bewertungskriterien und Funktionen kann an unternehmensspezifische Anforderungen angepasst werden. Zudem könnten Daten als Engineering-Objekte oder als einzelne Daten (CAD, Montageanleitung etc.) bereitgestellt und zum Modul ergänzt werden.

6.2 Softwarewerkzeug zum Engineering neuer Produktionsanlagen

Nach dem Aufbau der Wissensbasis können Konzepte für neue Produktionsanlagen erstellt werden. Ausgangspunkt dafür ist das Programm *Open Model Sphere*¹⁵.

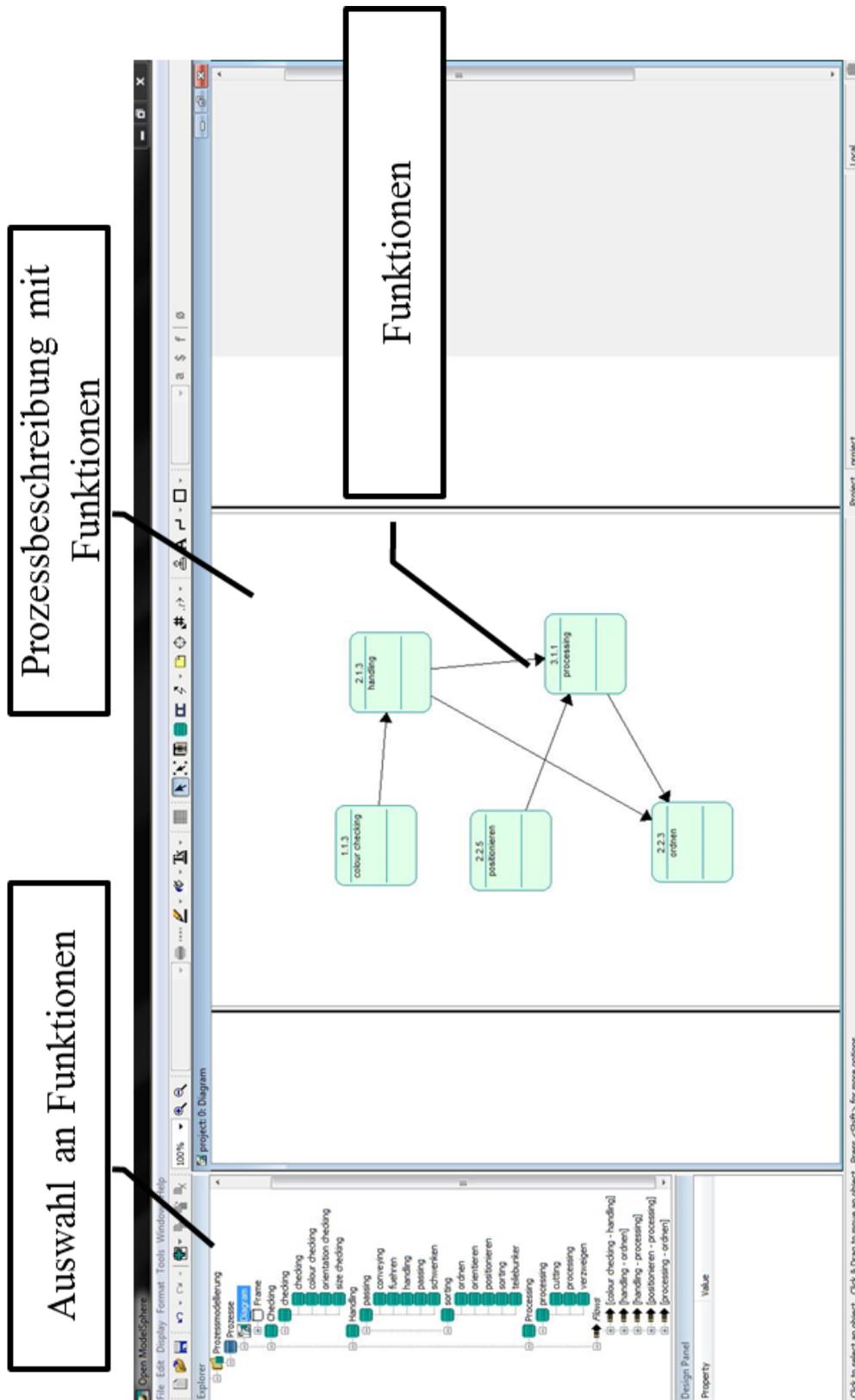


Abbildung 65: Modellierung eines Produktionsprozesses

¹⁵ Open Model Sphere Version 2.3 - <http://www.modelsphere.org/>

Abbildung 65 zeigt die Prozessmodellierung mit *Open Model Sphere*. Die Funktionen aus der Datenbank können genutzt und verbunden werden, um neue Produktionsprozesse zu beschreiben. Der beschriebene Prozess wird exportiert und kann über die Weboberfläche eingelesen werden.

Basierend auf dieser Prozessbeschreibung können Module bereits ausgewählt werden, die die verwendeten Funktionen erfüllen. Wie bereits in Kapitel 5.4 beschrieben sollte die Modulauswahl durch die Vorgabe von Eigenschaften weiter eingeschränkt werden. Für die Berechnung des Nutzwertes müssen dafür die geplante jährliche Produktionszeit und die geplante Stückzahl vorgegeben werden. Zudem können die Bewertungskriterien durch eine Skala (0 = unwichtig; 100 = sehr wichtig) gewichtet und Eigenschaften vorgegeben werden. Abbildung 66 zeigt die Benutzeroberfläche zur Vorgabe dieser Werte, Gewichtungen und Eigenschaften.

Anlagenkonfigurator



geplante jährliche Nutzungszeit der Anlage: h/a
 geplante Herstellungsmenge pro Stunde: St/h

Maschinenstundensatz	0	25	50	75	100
Auslastung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Produktivität	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Energieverbrauchsquote	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>

Die Module wurden bewertet

Eigenschaften auswählen:

Material: Stahl Leichtmetall Holz Kunststoff

Schutzart: IP55 antistatisch IP67 IP69k

Gewicht: leicht schwer

Abmessungen: klein groß

Abbildung 66: Bewertung der Module und Auswahl der nötigen Eigenschaften

Basierend auf der Bewertung der Module wird die optimale Modulkombination ermittelt. In einem ersten Schritt werden dafür die funktionserfüllenden Module ermittelt. Dabei wird versucht, die Anzahl der Module zu reduzieren, also möglichst Funktionen zu verwenden, die mehrere aufeinander folgende Funktionen erfüllen. Für die verbleibenden Module wird durch Enumeration der Nutzwert für die Kombinationen ermittelt.

Dem Anwender werden anschließend die Modulkombinationen, wie in Abbildung 67 dargestellt, zur Auswahl gestellt. In einem ersten Schritt werden dazu die fünf am besten bewerteten

Kombinationen als Optionen dargestellt. In weiteren Schritten können aber auch alle theoretisch möglichen Alternativen dargestellt bzw. die Modulauswahl individuell angepasst werden. Zu den Kombinationen werden dem Anwender Komponenten und Eigenschaften der funktionserfüllenden und verlinkten Module angezeigt.

In weiteren Schritten kann die ausgewählte Modulkombination exportiert und weiterverarbeitet werden. Dazu können bereitgestellte Daten des Moduls als Basis für eine detaillierte Ausgestaltung oder auch in einem ersten Schritt im Rahmen der Angebotserstellung genutzt werden. Eine Alternative wäre die Anbindung an ein weiterführendes Engineering-Tool.

Für Ihren modellierten Prozess ist die Verwendung folgender Module optimal:

Option1 Aktualisieren Diese Kombination ist mit 0,6 bewertet Info

	image processing module1	mechanical module1	parts feeding module2	parts handling module1	Cutting module	motion module	Supporting and safety module
colour checking1	x						
processing1		x					
handling1		x					
ordnen1			x				
positionieren1				x			

+ Komponenten
+ Eigenschaften
Selbst Auswerten
Ausgewählte Daten exportieren

Abbildung 67: Ergebnisdarstellung der optimalen Module für den modellierten Prozess

6.3 Struktur der Wissensbasis

Die Grundlage des Engineering ist die Wissensbasis, die als MySQL-Datenbank implementiert wurde. Ausschlaggebende Gründe hierfür sind die geringere Komplexität bei Pflege und Erstellung und die breite Anwendung in Wissenschaft und Praxis. Zudem können die beschriebenen Zusammenhänge zwischen Modulen, Komponenten und Eigenschaften in einer relationalen Datenbank abgebildet werden. Für eine Erweiterung der Wissensrepräsentation mittels einer Ontologie kann die Datenbank als Grundlage genutzt werden.

Die Struktur der Datenbank ist, abgesehen von den Hilfstabellen zur Auswertung und Darstellung des Prozesses im Browser, in Abbildung 68 in Form des *Entity-Relationship* Modells dargestellt. Die Komponenten werden Modulen zugeordnet und über Funktionen systematisiert. Daneben besteht die Möglichkeit, Verknüpfungen zwischen Modulen als Link zu speichern und den Modulen Eigenschaften zuzuordnen.

6.4 Implementierung

Die beschriebenen Softwarewerkzeuge wurden in Form einer Weboberfläche implementiert. Dadurch soll gewährleistet werden, dass die Methode von einem breiten Anwenderkreis eingesetzt werden kann. Die Client-Server-Architektur der Implementierung ist in Abbildung 69 visualisiert. Die in Kapitel 6.3 beschriebene Wissensbasis wurde als MySQL Datenbank eines virtuellen LAMP Servers¹⁶ ausgeführt. Die Inhalte werden während der Modularisierung oder der Konfiguration dazu dynamisch durch die verwendeten Skript-Sprachen (PHP) angepasst und mittels Webserver bereitgestellt. Dieser greift teilweise auf statische Daten aus dem Dateisystem zu, um diese dem Anwender für die Weiterverarbeitung bereit zu stellen. Die hier eingesetzte Software basiert auf dem frei verfügbaren *XAMPP-Paket*¹⁷. Die Struktur der Datenbank sowie die Skripte wurden im Rahmen dieser Arbeit erstellt.

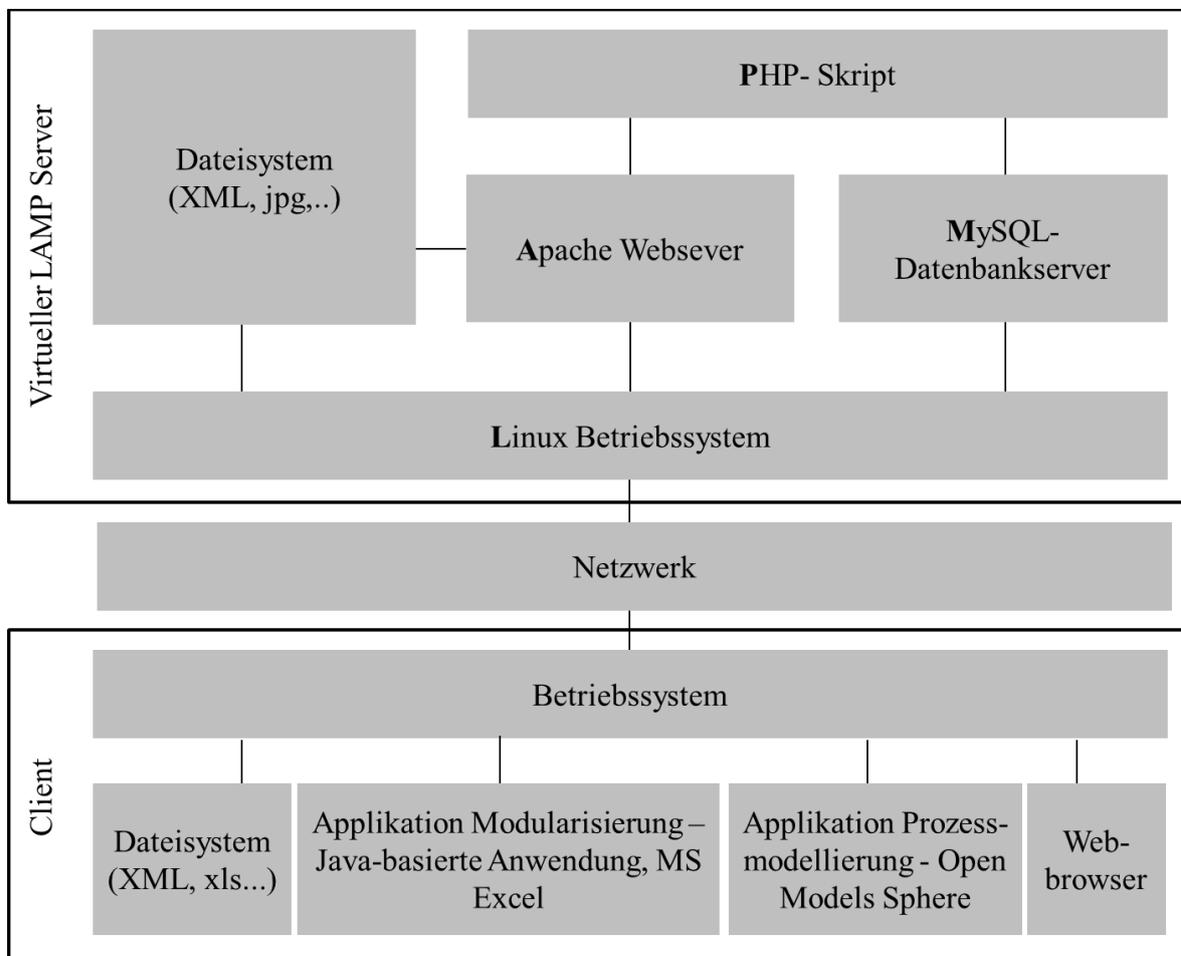


Abbildung 69: Client-Server Architektur nach [Hi (2005)]

Die Modularisierung im Rahmen des Aufbaus der Wissensbasis sowie die Prozessmodellierung im Rahmen des Engineering neuer Produktionsanlagen werden mit Anwendungen auf dem Client ausgeführt. Die Eingabe der Funktionen zu den resultierenden Modulen sowie die Auswahl und Bewertung der Module auf Basis der Prozessmodellierung erfolgt auf dem Server.

¹⁶ LAMP („Linux“, „Apache“, „MySQL“, „PHP“)

¹⁷ XAMPP Version 1.7.7 - <http://www.apachefriends.org>

Ausgangspunkt für den Anwender ist sowohl für den Aufbau der Wissensbasis als auch für das Engineering neuer Produktionsanlagen eine Web-Oberfläche.

Zum Aufbau der Wissensbasis wird die Anwendung zur Modularisierung durch den *Java Web Start* von *Sun Microsystems*® im Zwischenspeicher des Clients gespeichert und gestartet. Diese in Abbildung 62 dargestellte Anwendung ermöglicht die Sortierung der in Kapitel 5.3 beschriebenen Matrizen, die in einem Tabellenkalkulationsprogramm (z.B. Microsoft Excel®) abgebildet werden. In diesem Softwarewerkzeug wurden alle in Kapitel 3.1.1.2 aufgeführten Sortieralgorithmen zur Lösung des P-Median-Problems implementiert, um die resultierenden Modularisierungsergebnisse vergleichen zu können. Das Modularisierungsergebnis kann als xls-Datei gespeichert und so weiterverarbeitet werden. Das Softwarewerkzeug wurde auf Basis der Entwicklungsumgebung *Eclipse*¹⁸ in der objektorientierten Sprache *Java* von *Sun Microsystems*® entwickelt. Die in Kapitel 5.3.2.2 beschriebenen Schritte zur Prüfung der Wiederverwendung wurden als VBA-Skript in Microsoft Excel® implementiert. Das Modularisierungsergebnis wird durch ein *Matlab*®-Skript so aufbereitet, dass es in der Datenbank gespeichert werden kann. Ergänzend können die Funktionen und Bewertungen durch die in Abbildung 64 dargestellte, PHP-basierte Weboberflächen ergänzt werden.

Für das Engineering neuer Produktionsanlagen werden muss in einem ersten Schritt der abzubildende Produktionsprozess modelliert werden. Dazu wird wie bereits in Kapitel 6.2 beschrieben die frei verfügbare Software *Open Model Sphere* verwendet. Die in der Datenbasis verfügbaren Funktionen werden über den Import einer XML-Datei realisiert, in der die Funktionen aus der Datenbank abgebildet sind. Auf dieser Datenbasis lässt sich der Produktionsprozess wie in Abbildung 65 gezeigt modellieren und anschließend wiederum als XML-Datei exportieren. Diese Datei wird nach dem Upload auf den Server automatisch eingelesen und kann weiterverarbeitet werden. Alle weiteren Schritte der Modulauswahl und –bewertung werden auf dem Server durch PHP-Skripte ausgeführt.

¹⁸ Eclipse Version 4.2 - <https://www.eclipse.org/>

7 Anwendung der Methode

Die Methode zum Engineering von Produktionsanlagen durch Wiederverwendung von Modulen soll nachfolgend anhand zweier Beispiele von Produktionsanlagen exemplarisch veranschaulicht werden. Dabei wird an einem ersten, durchgängigen Beispiel die Modularisierung einer bestehenden Anlage zum Aufbau der Wissensbasis und anschließend eine Überarbeitung des Anlagenkonzeptes derselben Anlage vorgestellt. Dieses Beispiel soll die Optimierung bestehender Anlagen bzw. bekannter Anlagenkonzepte zeigen. Das zweite Beispiel zeigt die Modularisierung von Prüfanlagen, wobei hier insbesondere der Vergleich zwischen den Modularisierungsergebnissen gezeigt werden soll.

Die in Kapitel 6 vorgestellte Software zur Identifikation wiederverwendbarer Module und zur Einbindung in den Engineering-Prozess wurde dabei eingesetzt. Nach dieser beispielhaften Anwendung der Methode sollen ergänzend dazu erste Erfahrungen aus der Anwendung in der Industrie vorgestellt werden.

7.1 Aufbau der Wissensbasis

Bei der Anwendung der in Kapitel 5.3 vorgestellten Methode wird der Nutzer durch die in Kapitel 6.1 präsentierten Softwarewerkzeuge unterstützt. Zum Aufbau der Wissensbasis müssen folgende Schritte durchgeführt werden:

1. Komponentenliste bestehender Produktionsanlagen
2. Modularisierung
3. Systematisierung der resultierenden Module
4. Speicherung in einer Wissensbasis

Diese Schritte werden nachfolgend für das Beispiel einer Bearbeitungsanlage erläutert.

7.1.1 Komponentenliste einer bestehenden Anlage

Als Beispiel für die notwendigen Schritte zum Aufbau der Wissensbasis dient die in Abbildung 70 dargestellte Beispielanlage. Diese detektiert und bearbeitet Fehlstellen in der Lebensmittelproduktion gezielt. Die Erkennung der Fehlstellen wird durch ein Bildverarbeitungssystem realisiert. Die Lebensmittel werden auf einem Förderband zu einem Wasserstrahlschneidsystem transportiert, auf dem erkannte Fehlstellen des Lebensmittels durch einen von einer Lineareinheit positionierten Schneidkopf abgeschnitten werden.¹⁹

Die Produktionsanlage zeichnet sich durch viele Komponenten wie Aktoren, Steuerung und Sensoren aus, die sich ebenso in verschiedenen anderen Produktionsanlagen wiederverwenden lassen. Diese Komponenten und das dazugehörige Wissen soll so zu Modulen zusammenfasst werden, dass sie für spätere Entwicklungsprozesse zur Verfügung stehen. Wird das Wissen über die Produktionsanlage nicht durch die Modularisierung und Speicherung in der Wissensbasis systematisiert zur Verfügung gestellt, würde der Entwickler die Informationen zu den

¹⁹ Eine detailliertere Beschreibung der Beispielanlage wurde von Weyrich et al. veröffentlicht [WWWK (2012)].

Komponenten in der Dokumentation der bestehenden Anlage suchen und aufbauend darauf Konzepte entwickeln und diese bewerten.

Ausgangspunkt für den Aufbau der Wissensbasis ist eine Auflistung der Komponenten einer bestehenden Anlage. Für das beschriebene Beispiel der Bearbeitungsanlage in der Lebensmittel-industrie sind die Komponenten sowie eine Prozessbeschreibung in [Abbildung 70](#) dargestellt. Neben den Informationen zur Beziehung der Komponenten untereinander und zur Bewertung die Produktionsanlage und den Daten über die Komponenten (CAD-Zeichnungen etc.) reichen diese Informationen für den Aufbau der Wissensbasis aus.

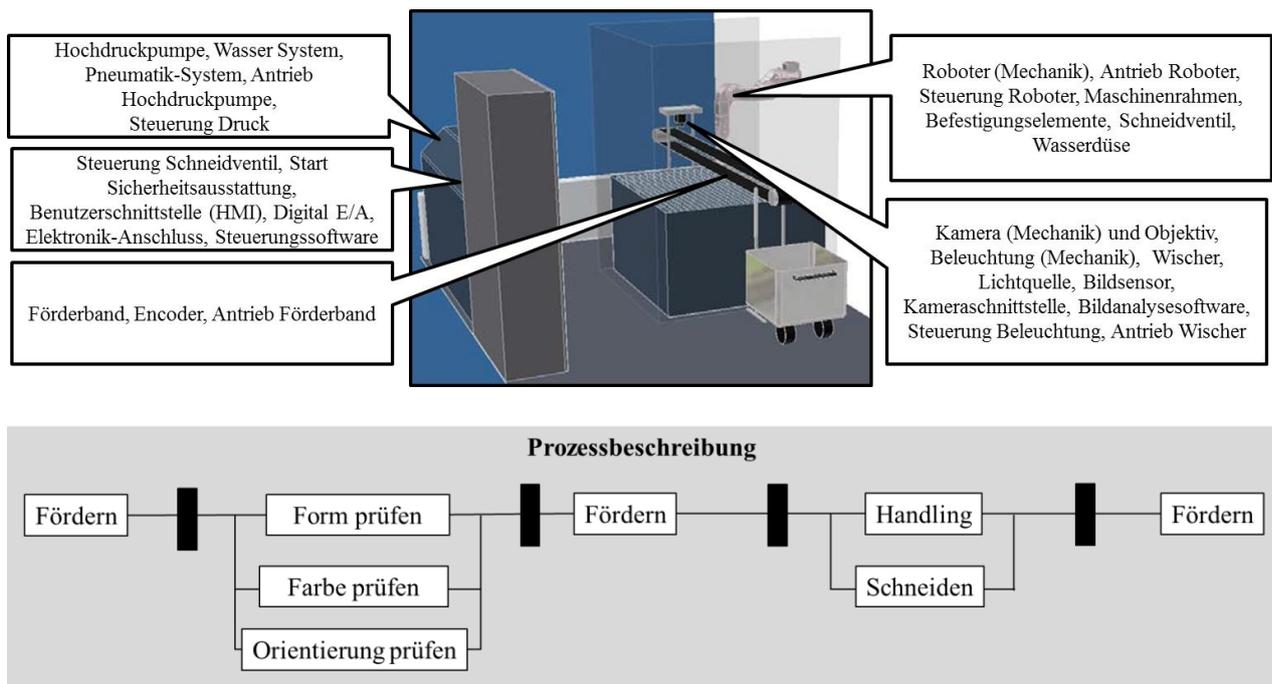


Abbildung 70: Beispielhafte Produktionsanlagen aus der Lebensmittel verarbeitenden Industrie

7.1.2 Modularisierung

Die Komponenten der Produktionsanlage wurden in einer Komponentenmatrix einander gegenübergestellt und die Abhängigkeiten zwischen den Modulen bewertet. Diese Matrix kann, wie in [Abbildung 71](#) dargestellt eingelesen und sortiert werden. Durch eine Veränderung der Parameter (Modulanzahl, Größe, Ausschlussmatrix, etc.) lässt sich das Modularisierungsergebnis dahingehend verändern, dass die resultierenden Module so gestaltet werden, dass sie im Engineering neuer Produktionsanlagen wiederverwendet werden können. Die Komponentenmatrix, die resultierende, sortierte Matrix sowie die sortierte Matrix nach Überarbeitung durch die in Kapitel 5.3.2 beschriebenen Daten zur Erhöhung der Wiederverwendbarkeit sind in [Anhang C](#) dargestellt.

Modularisierung von Fertigungssystemen

Datei Ansicht Modell

Bitte Pfad der Exceldatei eingeben: golproket_einlesbar.xls

Auswahl des Ähnlichkeitskoeffizienten: Kusiak

Dateiauswahl

Gruppierungsmatrix

Anzahl der Maschinen: 1

Anzahl Gruppen: 4

Gruppengröße: 0 bis 100

Zielfunktionswert: 621,0

Maximieren

Minimieren

Optimieren

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Water Nozzle	1	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	0	0
Water system	2	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	0	0
Wiper	5	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	0	0
Conveyor belt	6	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	0	0
Machine frame	8	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	0	0
Pneumatic system	11	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	0	0
Fasteners	13	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	0	0
Robot	14	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	0	0
Start Button	15	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	0	0
Encoder	16	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	0	0
Camera body and lens	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lighting	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Light sources (LEDs)	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Imaging sensor	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Camera inter face	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Image analysis	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Conveyor belt drive	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Power system	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Robot drive	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Wiper motor	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Control Software	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Robot control	31	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	1	0	0	0
Cutting valve	4	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	0	0
Water Pump	7	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	0	0
Safety equipment	10	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	0	0
HMI	12	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	0	0
Digital I/O	20	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	0	0
Water pump drive	22	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	0	0
Lighting control	27	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	0	0
Pressure control	28	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	0	0
Valve control	30	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	0	0

Abbildung 71: Anwendung des Softwarewerkzeuges zur Modularisierung der Anlage

Ob die Wiederverwendbarkeit der Module durch eine Maßnahme erhöht wurde, kann der Anwender an einer Veränderung der Bewertung ablesen. Abbildung 72 zeigt die Bewertung für die Modularisierung der Komponentenmatrix, die nicht überarbeitet wurde.

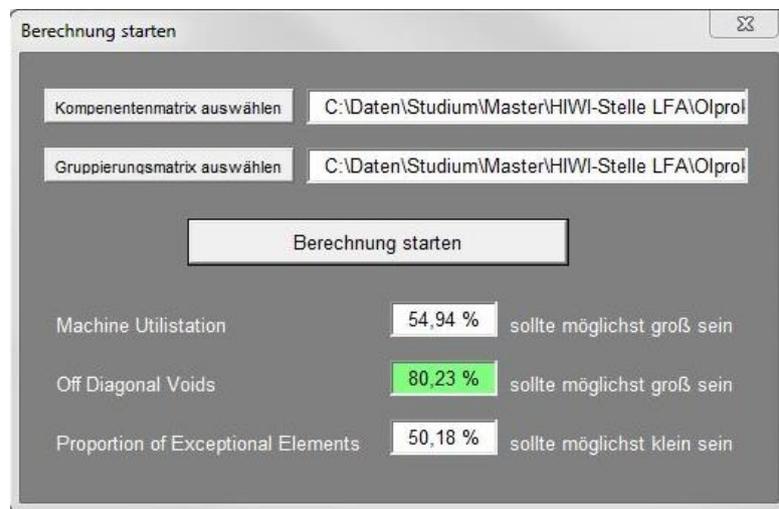


Abbildung 72: Bewertung des Modularisierungsergebnisses

Nach der Sortierung der Module durch den vorgestellten Algorithmus resultieren für die Komponenten der Beispielanlage die in der folgenden Tabelle 6 dargestellten vier Module:

Modul a	Modul b	Modul c	Modul d
Düse	Kameragehäuse Objektiv	und Förderband Antrieb	Schneidventil
Wasseranschluss	Beleuchtung	Elektroanschluss	Wasserpumpe
Wiper	Lichtquelle (LEDs)	Roboter Antrieb	Sicherheitsausstattung
Förderband	Bildsensor	Wischermotor	HMI
Maschinenrahmen	Kameraschnittstelle	Steuerungssoftware	Digital E/A
Druckluftanschluss	Bildanalysesoftware	Roboter Steuerung	Wasserpumpe Antrieb
Befestigungselemente			Beleuchtung Steuerung
Roboter			Druck Steuerung
Start			Ventil Steuerung
Encoder			

Tabelle 6: Resultierende Module der Modularisierung ohne Maßnahmen zur Erhöhung der Wiederverwendbarkeit

Die Module, die aus der Modularisierung ohne Maßnahmen zur Erhöhung der Wiederverwendbarkeit resultieren, erfüllen nicht die Anforderung der Wiederverwendbarkeit und der Funktionserfüllung. So werden beispielsweise in „Modul a“ die Komponenten „Förderband“, „Roboter“ und „Wasserdüse“ zusammengefasst. Diese Komponenten erfüllen keine gemeinsame Funktion in der Produktionsanlage und sollten daher nicht zu einem Modul zusammengefasst werden. Die Komponenten von „Modul b“ sind zwar alle Bestandteile der Bildverarbeitung und erfüllen somit die Funktion „Prüfen“, allerdings fehlt die Komponente „Ansteuerung

Beleuchtung“. Bei der modularisierten Produktionsanlage handelt es sich um ein zentral gesteuertes System. Das heißt, dass die Module zu viele übergreifende Komponenten enthalten. Bei der Betrachtung der resultierenden Matrix²⁰ können also viele Komponenten nicht mehr klar als 2 Modulen zugeordnet werden.

Eine geeignete Maßnahme zur Erhöhung der Wiederverwendbarkeit der Module stellt die Aufteilung dieser verknüpfenden Komponenten dar. So wird beispielsweise die übergreifende zentrale Steuerungssoftware für die verschiedenen Funktionen aufgeteilt. Die aufgeteilten Module können eindeutig einem Modul zugeordnet werden. Als weitere Maßnahmen wurden bei der Modularisierung der Beispielanlage einzelne Komponenten, die nicht richtig zugeordnet wurden, durch die Matrix A aus Modulen ausgeschlossen. Im Ergebnis resultieren aus der Modularisierung die vier in der nachfolgenden Tabelle 7 aufgeführten Module. Es zeigt sich, dass die Komponenten zu funktionserfüllenden Modulen zusammengefasst werden konnten.

Modul a	Modul b	Modul c	Modul d
Maschinenrahmen	Kameragehäuse Objektiv	und Förderband	Düse
Sicherheitsausstattung Roboter	Wiper	Encoder Förderband	Wasseranschluss
HMI Roboter	Beleuchtung	Förderband Antrieb	Schneidventil
Befestigungselemente	Encoder Bildverarbeitung	Steuerungssoftware Förderband	Wasserpumpe
Roboter	Lichtquelle (LEDs)	Digital E/A Förderband	Druckluftanschluss
Start	Bildsensor	Elektroanschluss Förderband	Wasserpumpe Antrieb
Digital E/A Roboter	Kameraschnittstelle	HMI Förderband	Druck Steuerung
Elektroanschluss Roboter	Wischermotor	Sicherheitsausstattung Förderband	Ventil Steuerung
Roboter Antrieb	Bildanalysesoftware		Steuerungssoftware Wasserstrahl-schneiden
Steuerungssoftware Roboter	Beleuchtung Steuerung		Digital E/A Wasserstrahl-schneiden
Roboter Steuerung	Steuerungssoftware Bildverarbeitung		Elektroanschluss Wasserpumpe
	Digital E/A Bildverarbeitung		HMI Wasserstrahl- schneiden
	Elektroanschluss Bildverarbeitung		Sicherheitsausstattung Wasserstrahl-schneiden
	HMI Bildverarbeitung		
	Sicherheitsausstattung Bildverarbeitung		

Tabelle 7: Resultierende Module der Modularisierung nach Überarbeitung durch Maßnahmen zur Erhöhung der Wiederverwendbarkeit

²⁰ Vgl. Anhang C

Die resultierenden Module erfüllen die Anforderung dadurch, dass sie dezentral sind und nur wenige Abhängigkeiten zu anderen Modul oder Komponenten haben. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Module nach einer entsprechenden Anpassung an den jeweiligen Prozess auch im Engineering neuer Produktionsanlagen wiederverwendet werden können. Dies belegen auch die Kriterien zur Bewertung der Module in Tabelle 8. Der Anteil der abhängigen Komponenten in den Modulen konnte von 54,9% auf 63,7% erhöht werden. Das heißt, die Abhängigkeiten der Komponenten in den Modulen untereinander wurden verbessert. Nach der Überarbeitung besteht bei 95,3% (vorher 80,2%) der Abhängigkeiten außerhalb der Module keine Abhängigkeit zwischen den Komponenten. Vor der Überarbeitung wurde mehr als die Hälfte der Abhängigkeiten (50,2 %) nicht in Modulen zusammengefasst – nach der Überarbeitung sind es nur noch 16,3 %. Diese Ergebnisse zeigen deutlich, dass durch die beschriebenen Maßnahmen die Abgeschlossenheit der Module, und damit auch die Wiederverwendbarkeit, verbessert werden konnten.

Kriterium	Sortierung ohne Überarbeitung	Sortierung nach Überarbeitung
Geschlossenheit der Module	54,9 %	63,7 %
Dezentralität der Module	80,2 %	95,3 %
Schnittstellen zwischen den Modulen	50,2 %	16,3 %

Tabelle 8: Kriterien zur Bewertung der resultierenden Module

Durch eine Anwendung der Methode zum Aufbau der Wissensbasis wird das Vorgehen des Anwenders bei der Modularisierung strukturiert und die Entscheidung über die Wiederverwendbarkeit resultierender Module durch Kriterien objektiv bewertet. Der Anwender wird bei der Durchführung und Anpassung der Modularisierung durch das Softwarewerkzeug unterstützt. Die Vorgehensbeschreibung der Maßnahmen erlaubt es die Wiederverwendbarkeit der resultierenden Module zu erhöhen.

7.1.3 Systematisierung der resultierenden Module und Speicherung in einer Wissensbasis

Um geeignete Module im Engineering neuer Produktionsanlagen identifizieren zu können, werden die identifizierten Module im nächsten Schritt den Funktionen der Prozessbeschreibung und den Eigenschaften der Beispielanlage zugeordnet (s. Abbildung 73 und Abbildung 74).

Die Module werden dabei Unterfunktionen zugeordnet. So erfüllt „Modul d“ die Funktion „Schneiden“ und gehört damit zur Nebenfunktion „Trennen“ und zur Hauptfunktion „Bearbeiten“. Zudem können den Modulen Eigenschaften über die Funktionserfüllung (Genauigkeit, Geschwindigkeit, etc.) das zu bearbeitende Produkt (Material, Masse etc.) und Rahmenbedingungen (Schutzart, Schnittstellen) zugeordnet werden. Sowohl bei der Identifikation der Module, als auch bei der Zuordnung von Funktionen und Eigenschaften wird der Anwender durch das in Kapitel 6 vorgestellte Werkzeug unterstützt, um eine eindeutige Zuordnung nach Möglichkeit zu bestehenden Funktionen und Eigenschaften zu ermöglichen.

Die eindeutige Zuordnung und die Vermeidung redundanter Funktionen ist eine wichtige Voraussetzung für die Austauschbarkeit von Modulen. Diese ermöglicht es, Konzepte für neue

oder bestehende Anlagen durch einen Vergleich der Modulkombinationen zu optimieren. Dies kann im Engineering einer neuen Produktionsanlage, aber auch bei der Modernisierung bestehender Anlagen nötig sein.

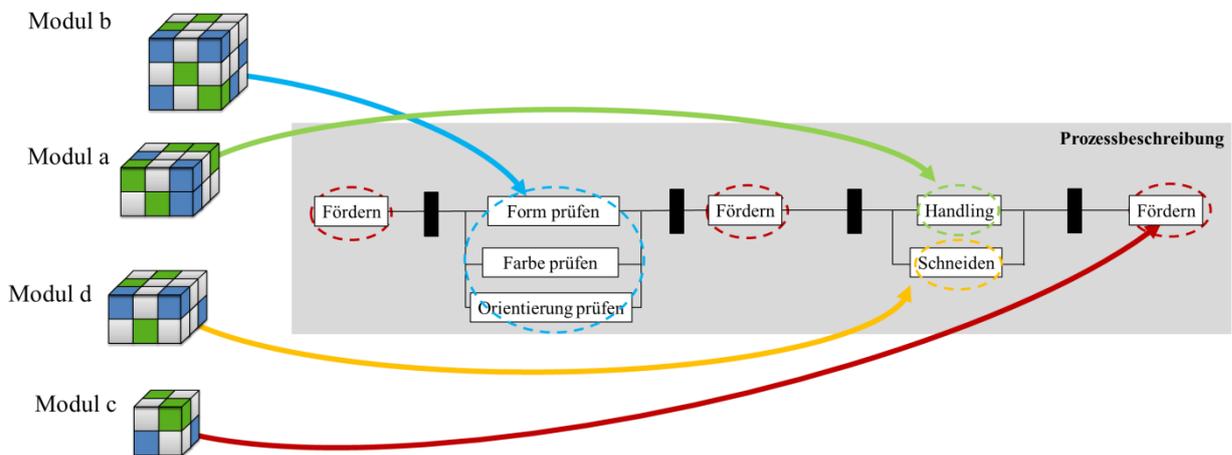


Abbildung 73: Zuordnung der Module zu den Funktionen der Prozessbeschreibung

Die Speicherung der Module und der dazugehörigen Funktionen, Eigenschaften und Daten in der Wissensbasis erfolgt über die Eingabemaske in [Abbildung 75](#). Dabei werden bestehende Funktionen und Eigenschaften aus der Datenbank abgerufen, so dass die Module diesen zugeordnet werden können. „Modul d“ wird der Unterfunktion Schneiden und damit der Nebenfunktion Trennen und der Hauptfunktion Bearbeiten zugeordnet. Zudem können Eigenschaften, Bewertungen und in einer weiteren Eingabemaske Daten dem Module zugeordnet werden. Durch die Hierarchie der Funktionen und die Eigenschaften können so passende Module über Abfragen in der Datenbank identifiziert werden.

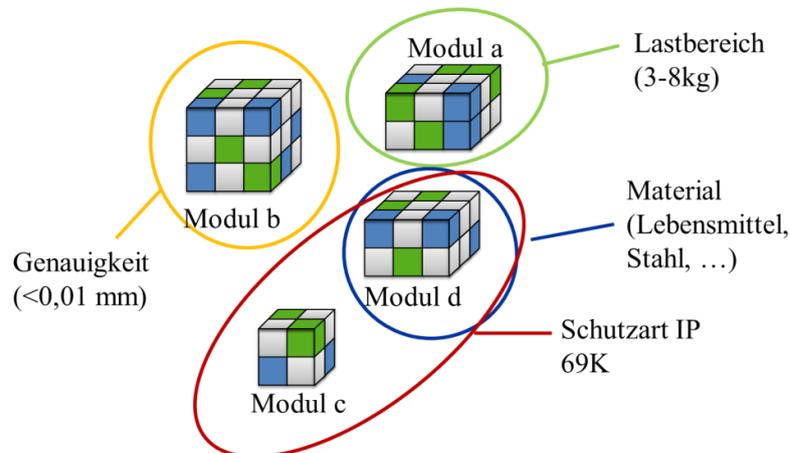


Abbildung 74: Zuordnung der Module zu den Eigenschaften der Produktionsanlage

Die Systematisierung der Module durch Funktionen und Eigenschaften stellt eine praxisnahe und dadurch für den Nutzer intuitive Möglichkeit der Auswahl passender Funktionen dar. Die hierarchische Struktur der Funktionen ermöglicht einerseits die Austauschbarkeit einer Vielzahl von Funktionen bei Auswahl einer Haupt- oder Nebenfunktion, andererseits aber auch eine eindeutige Eingrenzung des Anwenders durch die Unterfunktionen. Zur Auswahl der Funktionen und Eigenschaften und zur Eingabe der Bewertungen steht dem Nutzer die in [Abbildung 75](#) dargestellte Eingabemaske zur Verfügung.

Datensätze bearbeiten

INPUT

Modul ist verlinkt zu:

Bildverarbeitung

Modul hat die Eigenschaften:

zugehörige Komponenten:

Wassersystem
 Wasserdüse
 Drucksteuerung
 Wasserpumpe
 Wasserpumpenantrieb
 Schneidventil
 Ventilsteuerung
 HMI

zugehörige Funktionen:

bearbeiten

Wiederbeschaffungswert (€):

Nutzungsdauer (Jahr):

Länge (mm): Breite (mm):

Energieverbrauch pro Stunde (kWh): Kapazitätsgrenze (Stück/h):

Instandhaltungszeit an Betriebszeit (%): Modulname:

Wiederbeschaffungswert (€): Kalkulatorischer Zinssatz (%) *

Kosten Fläche im Monat (€/m²) *

Kosten Mitarbeiter (€/h) *

Energiekosten (€/h) *

Kosten Verschleißteile pro Jahr (€)

Link auswählen: Yes No

Eigenschaften zuordnen:

Scheibe
Kugel
Kegel
Zylinder
Quader
Sonstiges
Holz
Stahl
Aluminium
Kunststoff
<1kg

Eigenschaftsgruppe zuordnen:

Geometrie
Werkstoff
Gewicht
Abmessung/Durchmesser
Schutzart

Unterfunktionen auswählen:

fräsen
sägen
schlitzen
bohren
schrauben
sortieren
bearbeiten
handhaben
schneid
positionieren
prüfen

Nebenfunktionen auswählen:

Trennen
Messen
Prüfen
Positionieren
Erfassen
Verteilen
Speichern
Fügen
Formgeben
retten
Temperatur anzeigen

neue Eigenschaften anlegen:

neue Gruppe anlegen:

neue Unterfunktionen anlegen:

oder Hauptfunktionen anlegen:

oder Hauptfunktionen auswählen:

Linktyp: distributed intersectional

* diese Werte werden zentral abgelegt und gelten für alle Module gleichermaßen

Abbildung 75: Speicherung der Module in der Datenbank

7.2 Engineering neuer Anlagen

Der Nutzer wird bei der Anwendung der in Kapitel 5.4 vorgestellten Methode durch das Softwarewerkzeuge, das in Kapitel 6.2 präsentiert wird, unterstützt. Um eine neue Produktionsanlage zu konzipieren, müssen folgende Schritte durchgeführt werden:

1. Beschreibung des Produktionsprozesses und der Eigenschaften
2. Auswahl der funktionserfüllenden Module
3. Technisch-wirtschaftliche Bewertung der Modulkombinationen
4. Absicherung der Konzepte durch Simulation

Für die bereits beschriebene Bearbeitungsanlage soll geprüft werden, ob diese durch den Austausch mit Blick auf die Bearbeitungszeit und den Energieverbrauch etc. optimiert werden kann. Anschließend wird ein weiteres Beispiel der Konzeption einer Prüfanlage gezeigt.

7.2.1 Beschreibung des Produktionsprozesses und der Eigenschaften und Auswahl der funktionserfüllenden Module

Das Konzept der vorgestellten Beispielanlage soll geprüft und überarbeitet werden, um sicherzustellen, dass die beschriebene Modulkombination den Prozess am besten erfüllt. Dazu wird in einem ersten Schritt der Produktionsprozess mit den Funktionen beschrieben. Diese Prozessschritte des vorgestellten beispielhaften Produktionsprozesses können durch eine Vielzahl an Modulen realisiert werden.

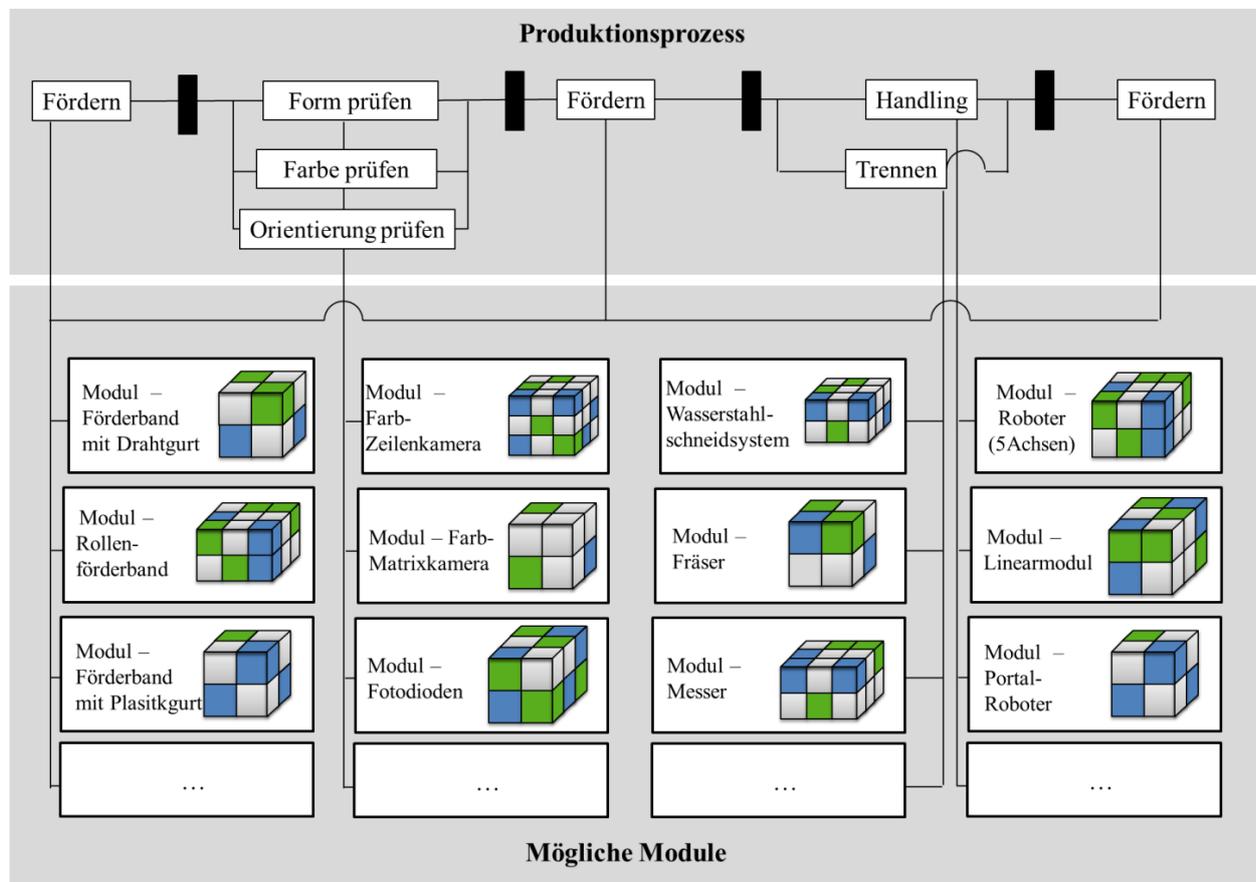


Abbildung 76: Alternative Module für den Beispielprozess

Eine Auswahl der Module für die Funktionen ist in Abbildung 76 visualisiert. Alle resultierenden Modulkombinationen oder Konzeptvarianten erfüllen die Funktionen des Produktionsprozesses. Die theoretisch möglichen Modulkombinationen können durch die Vorgabe von Eigenschaften eingegrenzt oder durch die nachfolgend technisch-wirtschaftliche Bewertung der Konzeptvarianten priorisiert werden.

Der Anwender wird bei der Modellierung des Produktionsprozesses durch das in Kapitel 6.2 präsentierte Softwarewerkzeug unterstützt. Funktionen, die in der Wissensbasis vorhanden sind, stehen im Softwarewerkzeug zur Verfügung. Durch die Prozessmodellierung werden die funktionserfüllenden Module ausgewählt. In einem nächsten Schritt werden vom Softwarewerkzeug daraus die theoretisch möglichen Modulkombinationen entwickelt. Durch die Eingabemaske kann der Anwender Eigenschaften und die Gewichtung der Bewertungskriterien vorgeben, um die Anzahl der Modulkombinationen einzugrenzen.

7.2.2 Technisch wirtschaftliche Bewertung der Modulkombinationen und Absicherung der Konzepte durch Simulation

Basierend auf der eingegrenzten Auswahl an Modulkombinationen errechnet das Softwarewerkzeug nun Nutzwerte zur Bewertung der Modulkombination, die dem Anwender eine Orientierung bei der Auswahl geben sollen. Bei der technisch-wirtschaftlichen Bewertung der Modulkombinationen werden die Module, die eine Prozessstufe erfüllen, miteinander verglichen, um aus der Abweichung der Bewertungskriterien von dem Mittelwert eine gewichtete und normierte Bewertung vornehmen zu können. Abbildung 77 zeigt die Bewertung für den Prozessschritt „Handling“ in der vorgestellten Beispielanlage. Die Grundlage der Berechnung findet sich in Anhang E.

Berechnung Nutzwert bei Modulvergleich		Einheit Bewertung	Gewichtung	Bewertung Linear modul	Normierung	Normierung x Gewichtung	Bewertung Industrieroboter	Normierung	Normierung x Gewichtung	Bewertung Portalroboter	Normierung	Normierung x Gewichtung	Maximalwerte
Maschinenstundensatz	[€/h]	3	1,29	4	12	1,57	3	9	1,91	2	6	15	
Nutzungsgrad	[%]	1	75	3	3	100	5	5	125	3	3	5	
Produktivität	[Stck./h]	3	1440	4	12	1080	3	9	720	2	6	15	
Energieverbrauchsquote	[kW]	1	2,7	2	2	2,0	4	4	2,3	3	3	5	
Nutzwert			29			27			18			40	
Nutzwert in Prozent			73%			68%			45%			100%	
Rang			1			2			3				

Abbildung 77: Bewertung der Module für die Funktion Handling

Im weiteren Vorgehen wird durch die dynamische Optimierung²¹ eine aggregierte Bewertung der Modulkombinationen durchgeführt und somit eine Priorisierung der Modulkombinationen vorgenommen. Dies ermöglicht dem Anwender des Systems aus den Kombinationen, die einen hohen aggregierten Nutzwert haben, eine erfolgsversprechende Kombination auszuwählen. Ist die Auswahl nicht eindeutig, kann der Nutzer die Auswahl über eine Simulation absichern²².

7.2.3 Auswahl des Moduls und Ausgestaltung der Anlage

Durch die Austauschbarkeit der Module können die Modulkombinationen bzw. Konzeptvarianten optimiert werden. Abbildung 78 stellt eine Übersicht zur Auswahl passender Module im Engineering der Beispielanlage für die Bearbeitung der Fehlstellen dar. Als Funktion wurde „Trennen“ gewählt, weshalb andere Bearbeitungsverfahren nicht berücksichtigt wurden. Die Abbildung stellt den Zusammenhang zwischen den Auswahlkriterien des Entwicklers für eine Funktion dar.

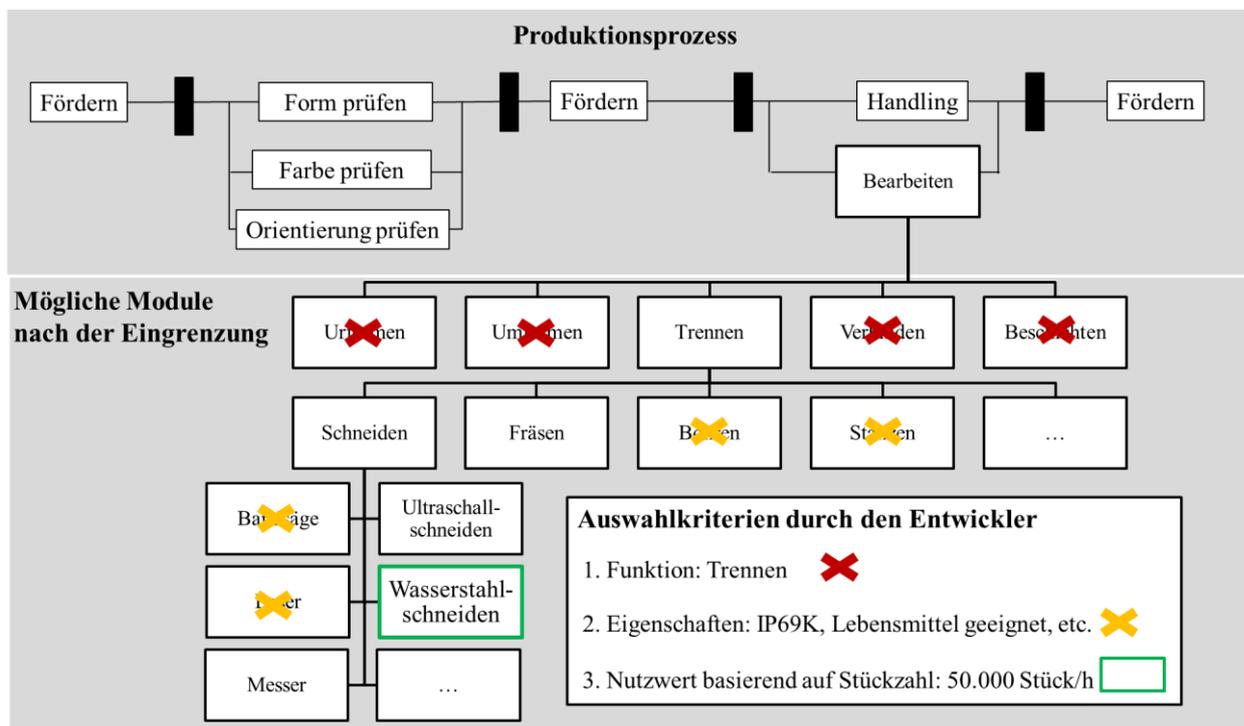
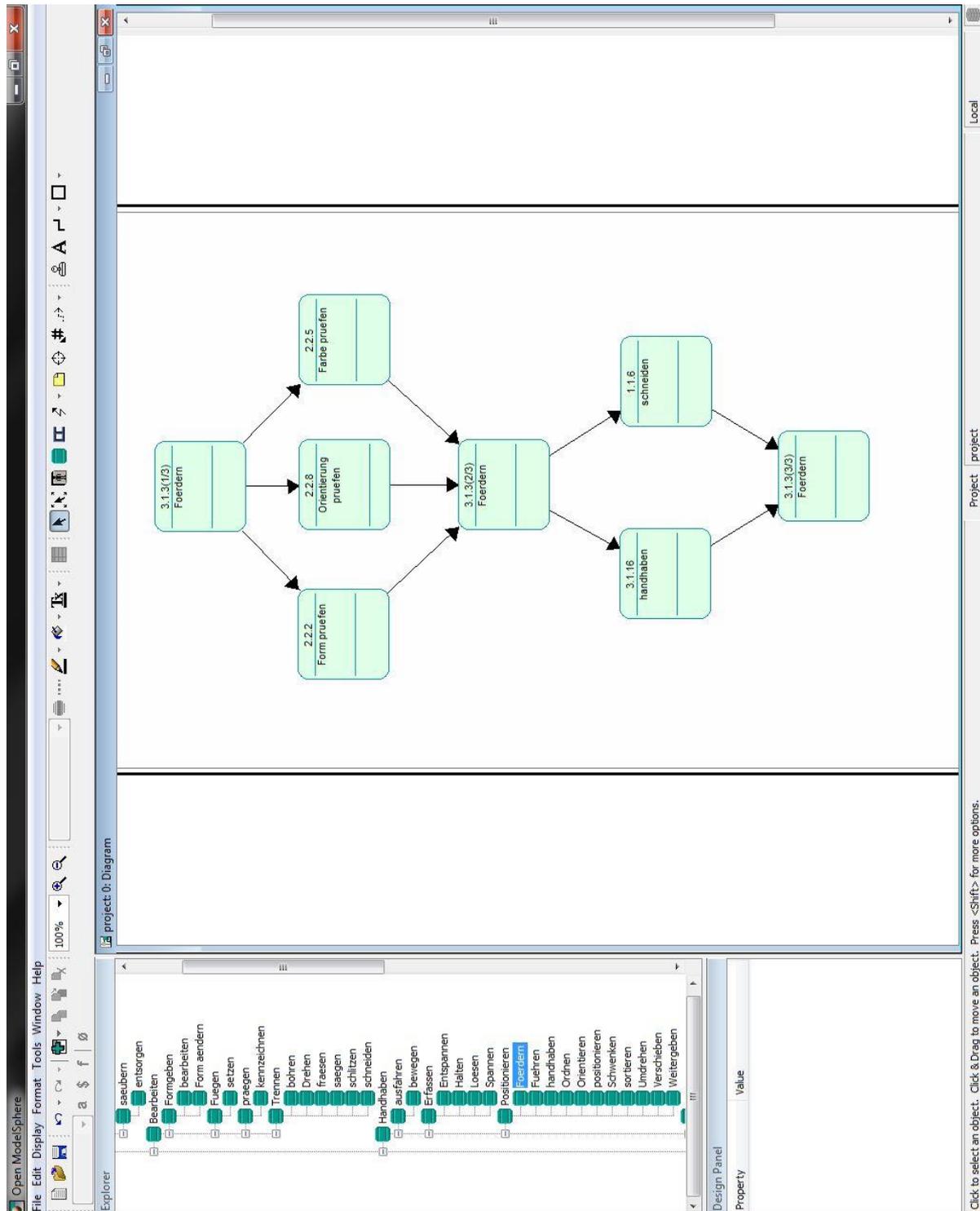


Abbildung 78: Auswahl eines passenden Moduls zu Bearbeitung der Fehlstellen an der Beispielanlage

Abbildung 79 zeigt den ersten Schritt der Auswahl einer Modulkombination im Softwarewerkzeug - die Prozessbeschreibung. Die Funktionen aus der Wissensbasis stehen zur Verfügung und können kombiniert werden

²¹ Vgl. Kapitel 3.2.1.2

²² Vgl. Kapitel 5.4.2.2



Click to select an object. Click & Drag to move an object. Press <Shift> for more options.

Project project

Abbildung 79: Prozessbeschreibung der Produktionsanlage

In Abbildung 80 wird die Auswahl einer Modulkombination visualisiert. Über die Optionen können verschiedene Modulkombinationen ausgewählt werden. Des Weiteren können Komponenten eines Moduls und dessen Eigenschaften angezeigt werden. Hat sich der Nutzer für eine Modulauswahl entschieden, kann er die dazugehörigen Daten exportieren und ausgestalten.

Für Ihren modellierten Prozess ist die Verwendung folgender Module optimal:

Option1 ▾ Aktualisieren Diese Kombination ist mit **0.48** bewertet [Info](#) [Alle Optionen](#)

	image processing module4	image processing module2	image processing module3	Cutting module1	Cutting module2	parts feeding module1	parts handling module1	motion module2	motion module3	motion module4
sorting1										
size checking1	x							x		
orientation checking1		x								
colour checking1			x							
passing1										
handling1										
cutting1				x						
cutting2					x					
fuehren1						x				
schwenken1							x			
checking1										

+ Komponenten
 + Eigenschaften
 Selbst Auswerten
 Ausgewählte Daten exportieren

Abbildung 80: Auswahl der Module

Nach Eingrenzung der Eigenschaften (z.B. Material: Natürliches Material - Holz/Lebensmittel; Schutzart: IP69K) wurde für die verbleibenden Alternativen der Nutzwert berechnet. Da das Modul „Wasserstrahlschneiden“ bezogen auf die vorgegebene Stückzahl den höchsten Nutzwert hat, wurde das System, wie in Abbildung 81 dargestellt, ausdetailliert und aufgebaut.

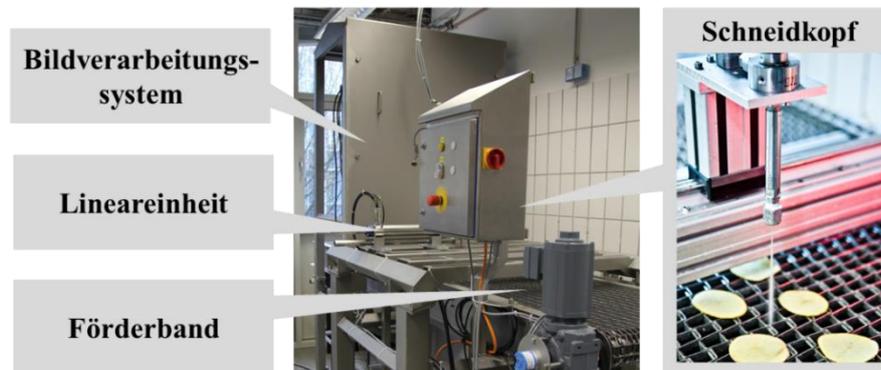


Abbildung 81: Prototypischer Aufbau der Beispielanlage

Die Unterschiede in der Überarbeitung der Bearbeitungsanlage durch die hier vorgestellte Methode sind in Abbildung 82 dargestellt. Durch die Modularisierung wird das Anlagenkonzept dezentral gestaltet, um die Abhängigkeiten zwischen den Modulen zu reduzieren. Dadurch wird die Wiederverwendbarkeit der Module deutlich gesteigert. Zudem wurde durch die Bewertung der Module deutlich, dass eine Lineareinheit zur Handhabung des Wasserstrahlschneidkopfes eingesetzt werden sollte, da diese die geforderte Funktion deutlich effizienter durchführt.

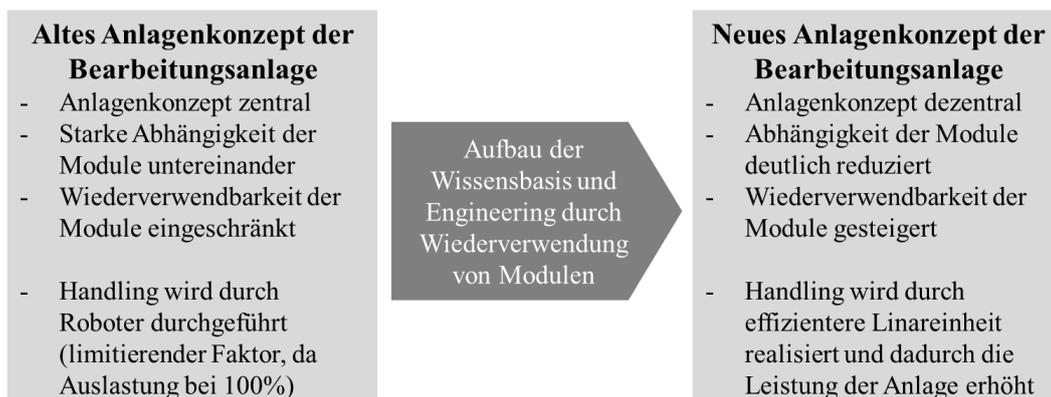


Abbildung 82: Veränderungen durch die Methode zum Aufbau der Wissensbasis und zum Engineering neuer Produktionsanlagen

7.3 Modularisierung einer bestehenden Prüfanlage und der Vergleich mit bestehenden Modulen

Eine weitere Methode zur Erhöhung der Wiederverwendbarkeit der Module ist die Betrachtung mehrerer Produktionsanlagen in multiplen Matrizen. Dabei wird geprüft, ob Module in den verschiedenen Produktionsanlagen häufiger identifiziert werden können, wenn der Umfang der Module reduziert wird.

Abbildung 83 zeigt ein automatisiertes Inspektionssystem zur Qualitätsprüfung von rotationssymmetrischen Bauteilen (z.B. Schrauben, Passstifte). Das Beispielsystem besteht aus

einer automatischen Zuführung in Form eines Zentrifugalförderers, einer Hub-Dreh-Einheit und einem Rundschtisch zur Handhabung der Bauteile, einer Zeilenkamera, die durch Rotation der Bauteile eine Abwicklungsdarstellung erstellt, und einer Sortiereinrichtung für verschiedene Qualitätsstufen der Bauteile. In einer alternativen Ausführung werden die Handhabung der Bauteile, die Rotation vor der Zeilenkamera sowie die Sortierung durch einen Roboter durchgeführt.

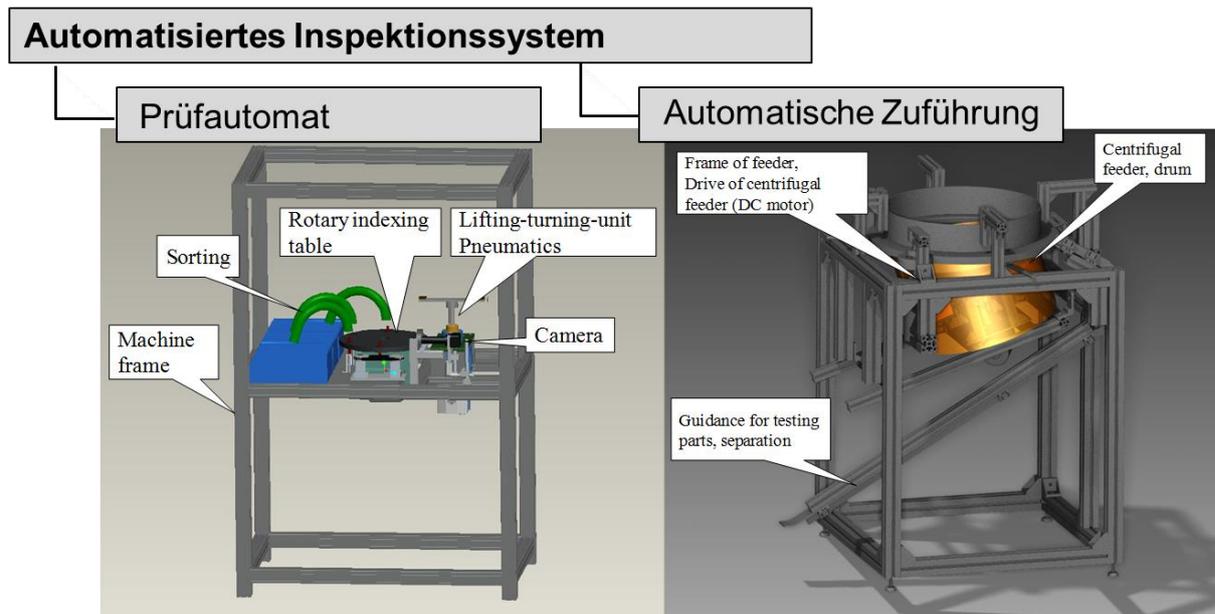


Abbildung 83: Beispielanlage zur Inspektion rotationssymmetrischer Bauteile

Bei der Modularisierung der Beispielanlage mit Hub-Dreh-Einheit und Rundschtisch wurden die notwendigen Komponenten für die Rotation des Bauteils vor der Kamera demselben Modul wie die Zeilenkamera zugeordnet. Nach der Modularisierung beider Ausführungen mit multiplen Matrizen ergibt sich ein eigenständiges Modul für diese Komponenten. Das Modul „Bildverarbeitung mit Zeilenkamera“ kann so in beiden Anlagen verwandt werden. Im Engineering neuer Produktionsanlagen kann es als verknüpftes Element zum Modul „Bildverarbeitung mit Zeilenkamera“ berücksichtigt werden.

Die Modularisierung wurde mit dem vorgestellten Softwarewerkzeug durchgeführt²³. Durch den Vergleich mit anderen Modularisierungsergebnissen ergibt sich, dass das Modul zur Inspektion der rotationssymmetrischen Prüfteile in zwei Module aufgeteilt werden sollte, um die Wiederverwendbarkeit zu erhöhen. Dieser Vergleich kann vom Softwarewerkzeug automatisch ausgeführt werden, so dass das Modularisierungsergebnis abgesichert wird. Durch den Vergleich mit bestehenden Modulen aus der Wissensbasis wird deren Wiederverwendbarkeit sichergestellt, da geprüft wird, ob Module bereits in anderen Anlagen verwendet wurden.

7.4 Erfahrungen aus der Anwendung der Methode im industriellen Umfeld

Die Methode wurde und wird im industriellen Umfeld erprobt und eingesetzt. Die Produktionsanlagen, bestehend aus mehrstufigen, verketteten Produktionsanlagen und auch Handarbeitsplätzen konnten modularisiert und im Engineering neuer Anlagen – beispielsweise bei der

²³ Vgl. Anhang D

Umstellung auf neue Produkte – wiederverwendet werden. Die beschriebenen Erfahrungen beziehen sich hauptsächlich auf die Entwicklung von Produktionsanlagen für die Serienfertigung von Elektronik.

7.4.1 Aufbau der Wissensbasis

Beim Aufbau der Wissensbasis mit dem entwickelten Softwaretool (s. [Abbildung 84](#)) zeigt sich, dass durch die beschriebene Methode wiederverwendbare Module in bestehenden Produktionsanlagen identifiziert werden konnten. Diese Einschätzung aus der industriellen Anwendung wird durch die in Tabelle 9 aufgeführten Kriterien aus der Modularisierung einer industriellen Beispielanlage gestützt. Durch die Unterstützung durch die beschriebenen Maßnahmen lässt sich ein geeigneter Detaillierungsgrad der Module intuitiv definieren. Die Erkennung von Problemen, die durch zu große Module verursacht werden, wird durch die Darstellung in der Komponentenmatrix visuell unterstützt.

Kriterium	Sortierung nach Überarbeitung
Geschlossenheit der Module	70,6%
Dezentralität der Module	98,7%
Schnittstellen zwischen den Modulen	16%

Tabelle 9: Kriterien zur Bewertung der resultierenden Module bei einer industriellen Beispielanlage

Der Aufwand zur Erstellung der DSM, zur nachträglichen Veränderung durch Einfügen oder Streichen einer Komponente und zur Auswertung der Modularisierungsergebnisse wird derzeit noch als hoch eingeschätzt. Geeignete Eingabemasken könnten den Anwender bei der Erstellung der DSM unterstützen. Für die Auswertung der DSM könnten die bereits angeführten Kriterien noch in das Softwarewerkzeug integriert werden. Durch eine relative Veränderung dieser Kriterien kann der Erfolg einer Maßnahme zur Erhöhung der Wiederverwendbarkeit bewertet werden. Dem Problem mangelnder Objektivität der Erstellung der DSM kann dadurch begegnet werden, die Matrix im Team zu erstellen oder mehrere Entwickler mit einzubeziehen. Dem Problem, dass durch die Wiederverwendung bekannter Module keine neuen Technologien ins Unternehmen eingebracht werden, kann dadurch begegnet werden, dass solche Module auch ohne das dazugehörige Wissen manuell eingepflegt werden können.

Neben der methodischen Unterstützung bei der Definition wiederverwendbarer Module liegt ein zusätzlicher Nutzen für die industrielle Anwendung in der Sensibilisierung der Entwickler für die Fragestellungen der Optimierung der Produktarchitektur. Zudem wird das implizite Erfahrungswissen der Entwickler externalisiert und damit auch für unerfahrene Mitarbeiter nutzbar gemacht. Ferner wird durch die Maßnahmen der Erhöhung der Wiederverwendbarkeit eine praxisnahe und nachvollziehbare Möglichkeit zur Anpassung der Module bereitgestellt. Ein weiterer Nutzen ist die Anpassbarkeit der Struktur der Eigenschaften und der Moduldokumentation in der Datenbank. Der Anwender hat die Freiheit, eigene Strukturen in der Datenbank und damit einer bekannten Umgebung aufzubauen und die Wissensbasis somit an die Anforderungen des Unternehmens anzupassen. Dies eröffnet darüber hinaus die Möglichkeit, umfassendes und systematisches Wissen für die Wiederverwendung zu archivieren.

Funktionen und Eigenschaften eignen sich aufgrund der industriellen Anwendung für die Systematisierung von Modulen. Die Flexibilität, die die Methode und das Softwarewerkzeug bei der Strukturierung von Eigenschaften und Funktionen und bei der Zuordnung von Modulen bietet, erlaubt es, die Methode an die unternehmensspezifischen Anforderungen anzupassen und gleichzeitig das Wissen in Form von Modulen und ihrer Dokumentation wiederzuverwenden.

7.4.2 Engineering neuer Produktionsanlagen

Die Methode zum Engineering durch die Wiederverwendung von Modulen lässt sich in Entwicklungsprozesse in die Entwurfs- oder Konzeptionsphase einbinden. Das Vorgehen des industriellen Unternehmens sieht in einem ersten Schritt die Konzeption eines neuen Produktionsprozesses vor. Aufbauend darauf werden Anforderungen abgeleitet, die Planung der Anlage vorgenommen und abschließend realisiert und in Betrieb genommen. Das Vorgehen entspricht in etwa den Phasen der VDI-Richtlinie 2222. Die Wiederverwendung von Modulen kann also auch hier in der frühen Konzeptionsphase stattfinden und das Wissen damit die Grundlage für die Planung etc. sein. Durch die Bereitstellung von Engineering-Objekten oder die Anbindung an übergreifende Engineering-Systeme ist es möglich, bestehende Systeme zu nutzen. Im einfachsten Fall wird auf einen Pfad zu den Daten eines Moduls verwiesen. Eine Einschränkung des Entwicklers findet also nicht statt.

Das Softwarewerkzeug (s. [Abbildung 85](#)) ist zwar durch die Weboberfläche intuitiv zu bedienen, jedoch (bislang) nicht als ein durchgängiges Tool implementiert. Dadurch ist die Nutzbarkeit des Systems nicht optimal. Ein weiterer Nachteil, der sich aus der industriellen Anwendung ergab, ist die Anbindung an unterschiedliche weiterführende Engineering-Systeme. Diese ist bislang nur über den Umweg des Verweises auf Dateipfade implementiert. Die Wiederverwendung von Wissen birgt allgemein das Risiko in sich, das damit auch Fehlerhafte Module wiederverwandt werden. Allerdings werden die Module durch die Externalisierung von mehreren Entwicklern verwendet, wodurch die Wahrscheinlichkeit, dass Fehler entdeckt werden, steigt.

Aus der industriellen Anwendung der Methode und des Softwarewerkzeuges ergeben sich neben der schnelleren und effizienteren Konzeption von Produktionsanlage weitere Vorteile, wie die Sensibilisierung der Mitarbeiter für die Problematik der Diskrepanz zwischen Kostenfestlegung und -verursachung. Zudem stehen die externalisierten Informationen allen Entwicklern zur Verfügung. Die Abstraktion, den Produktionsprozess durch lösungsneutrale Funktionen modellieren zu können, wurde in der industriellen Anwendung positiv bewertet. Durch die

Austauschbarkeit der Module und die Hierarchie der Funktionen wurden neue, kreative Lösungsvarianten entwickelt, die bislang nicht berücksichtigt wurden, obwohl alle Module im Unternehmen verwandt werden.

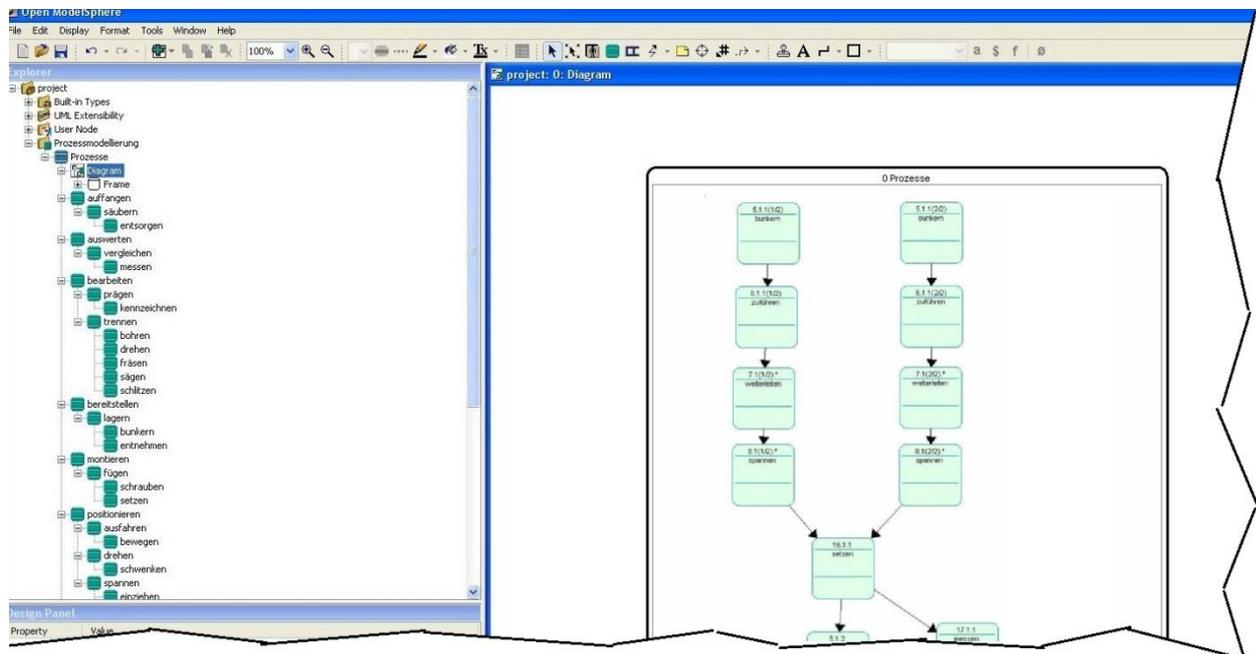


Abbildung 85: Prozessmodellierung einer industriellen Beispielanlage

Für die Bewertung der Module können verschiedene Kriterien genutzt werden. Die im Rahmen der Methode vorgeschlagenen Kriterien eignen sich zur Bewertung in den frühen Engineering-Phasen und finden auch in der Industrie Anwendung. Durch die Aggregation zu einem Nutzwert können verschiedene Module, aber auch unterschiedliche Modulkombinationen verglichen werden. Die Bewertung erfolgt dabei mit einer hinreichenden Genauigkeit und einem entsprechend geringen Aufwand. Die Genauigkeit der Bewertung kann bspw. durch die Nutzung von Simulationen erhöht werden, wodurch jedoch auch der Aufwand bspw. für die Modellierung steigt. Allerdings ermöglicht die Simulation auch Rückschlüsse, auf die Leistung und das Verhalten der Produktionsanlage bei unterschiedlichen Belastungen zu ziehen. Alternative Ansätze hierzu, die bspw. auf einer Interpolation bzw. auf statistischen Erfahrungswerten beruhen, dienen eher einer ersten Orientierung. Sie können allerdings auch eingesetzt werden, um unvollständige Daten abzuschätzen.

Die Bewertungskriterien der Module müssen entweder aufwendig ermittelt oder mindestens durch mehrere erfahrene Entwickler abgeschätzt werden, um eine objektive Bewertung und damit eine belastbare Bewertungsgrundlage zu erhalten. Dieser Prozess führt in der industriellen Anwendung jedoch auch zu objektiveren Bewertungen von Konzepten und dient somit gerade unerfahrenen Entwickler als Grundlage für Konzeptentscheidungen.

8 Fazit und Ausblick

8.1 Problem und Ergebnisse

Die Wiederverwendung von Modulen ist ein wichtiger Ansatzpunkt, um die Komplexität in der Entwicklung und Fertigung zu beherrschen. Die Modularisierung findet bislang meist in variantenreichen Serienprodukten Einsatz, in denen Schnittstellen zwischen den Modulen definiert und standardisiert werden können. Als Modul wird im Rahmen dieser Arbeit eine Einheit aus mehreren Komponenten verstanden, die eine Funktion im Produktionsprozess erfüllt. In Abgrenzung zu den standardisierten Modulen, die in der Entwicklung variantenreicher Serienprodukten breiten Einsatz finden, zielt diese Arbeit auf die Wiederverwendung von Modulen in unikal, prozessspezifischen Produktionsanlagen ab. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit auch vom Engineering solcher Anlagen und nicht von der Entwicklung von Serienprodukten gesprochen.

Bei Produktionsanlagen ist der Aufwand der Standardisierung von Modulschnittstellen sehr hoch, da diese Anlagen spezifisch für die Anforderungen, die sich aus dem Produktionsprozess des Kunden ergeben, entwickelt und gefertigt werden. Um die Potentiale der Modularisierung auch für solche Anlagen nutzen zu können, wird in Kapitel 6 der vorliegenden Arbeit eine Methode beschrieben, die die Wiederverwendung von Modulen in den frühen Engineering-Phasen – also bei der Konzeption einer Anlage im *Conceptual Design* bzw. im *Basic Engineering* – ermöglicht. Die Methode hat zum Fokus die Planer prozessspezifischer Anlagen durch eine systematisierte Speicherung und Bereitstellung von Wissen in Form von Modulen zu unterstützen. Diese Unterstützung kann einerseits für die Planer bei einem Anlagenbauer oder aber auch für eine entsprechende Produktionsprozessplanung beim Anlagenbetreiber relevant sein.

Um wiederverwendbare Module zu identifizieren und in das Engineering einzubinden, wird, basierend auf dem Stand der Technik, eine Methode entwickelt, als Software implementiert und an Praxisbeispielen erprobt. Der erste Teil der Methode zielt auf den Aufbau einer Wissensbasis ab, in der die Module systematisiert werden. Es wird gezeigt, dass die nach dem beschriebenen Vorgehen definierten Module den Anforderungen an die Wiederverwendbarkeit entsprechen. Der zweite Teil der Methode ermöglicht es, Modulkombinationen in frühen Engineering-Phasen auf Basis einer Prozessbeschreibung zu erstellen. Zudem können die relevanten Modulkombinationen auf Basis einer aggregierten Bewertung der Module eingegrenzt werden. Neben der Unterstützung bei der technisch-wirtschaftlichen Bewertung von Konzeptvarianten kann der aggregierte Nutzwert auch eine erste Orientierung bei der Angebotserstellung sein.

Die Wiederverwendung von Modulen kann sich sowohl auf neue als auch auf die Überarbeitung bestehender Produktionsanlagen beziehen. Die Effizienzsteigerung des Engineering wird zum einen durch die schnellere Generierung von Konzepten für Produktionsanlagen, zum anderen durch die Wiederverwendung von Daten zu den Modulen erreicht. Die offene Struktur der Wissensbasis in Form einer Datenbank ermöglicht es, diese Daten flexibel an die Bedürfnisse eines anwendenden Unternehmens anzupassen. Zudem bietet die Datenbankstruktur die Grundlage für Wissensrepräsentation, beispielsweise durch Ontologien. Durch den Aufbau der Wissensbasis wird das implizite Wissen der Entwickler externalisiert und strukturiert.

Eine Erweiterung der Methode von den frühen Engineering-Phasen auf die Ausgestaltung ist möglich, so dass in diesem Fall die vorgestellte Methode als analog zu Konfiguratoren von Produkten angesehen werden kann. Der daraus resultierende Aufwand durch die Standardisierung (bspw. bei der Definition von Schnittstellen), vor allem im Engineering von prozessspezifischen Produktionsanlagen, wurde im Rahmen dieser Arbeit erläutert. Die Methode kann in Ergänzung zu den hier vorgestellten diskreten Anlagen auch auf Anlagen für kontinuierliche Produktionsprozesse übertragen werden.

8.2 Fazit

Bei der Definition wiederverwendbarer Module eignet sich die vorgestellte Methode insbesondere, um den Umfang der Module, also das richtige Maß zwischen Komplexität und Nutzen der Wiederverwendung der Module, zu identifizieren. Dabei ist vor allem auch auf die einheitliche Granularität der Komponenten zu achten, um einen Austausch und eine Vergleichbarkeit zwischen den Modulen zu ermöglichen. Die objektiven Bewertungskriterien unterstützen den Entwickler bei der Modularisierung, auch wenn diese nur eine relative und keine absolute Aussagekraft haben. Im Gegensatz zur schnelleren, subjektiven Entscheidung eines erfahrenen Entwicklers, welche Komponenten zu einem Modul zusammengefasst werden, wird durch die vorgestellte Methode die Entscheidung objektiviert. Des Weiteren wird ein Vergleich zwischen mehreren, verschiedenen Produktionsanlagen ermöglicht. Die Methode zielt auf die Modularisierung bestehender Anlagen ab, um das Wissen aus diesen Anlagen wiederzuverwenden. Die Integration neuer Module bspw. für neue, noch nicht in bestehenden Anlagen verwandte Technologien, wird nicht gesondert betrachtet. Hier ist die Kreativität der Entwickler – auch bei der Moduldefinition – gefragt, für die aufgrund der Effizienzsteigerung im Engineering mehr Kapazität zur Verfügung steht. In der Integration neuer Module liegt ein wichtiger, langfristiger Erfolgsfaktor für das Engineering durch die Wiederverwendung von Modulen. Werden Anlagen nur noch aus Modulen von bestehenden Anlagen aufgebaut, besteht die Gefahr technologische Entwicklungen nicht zu berücksichtigen und damit am Markt nicht mehr erfolgreich zu sein. Zudem müssen in der Phase des Aufbaus der Wissensbasis zeitliche und finanzielle Ressourcen in die Modularisierung und Aufbereitung der Daten investiert werden. In der Bereitschaft diese zu investieren und erfahrene Entwickler von der Externalisierung ihres Wissens zu überzeugen liegen zwei wichtige Erfolgsfaktoren beim Aufbau der Wissensbasis.

Die Optimierung der Konzepte – also der Modulkombinationen – wird durch die Austauschbarkeit der Module ermöglicht. Lösungsneutrale Funktionen und Eigenschaften sowie deren Hierarchie zur Systematisierung der Module erlauben den Austausch der Module, die einer Funktion zugeordnet wurden. Zudem werden für diese Systematisierung bestehende Daten genutzt, so dass keine zusätzliche Komplexität geschaffen wird. Dies unterstützt die intuitive Nutzung der Systematisierung und des Werkzeuges zum Engineering neuer Produktionsanlagen. Fehlerhafte Modulkombinationen basierend auf fehlerhaften oder unzureichenden Angaben beim Aufbau der Wissensbasis oder bei Vorgaben im Engineering werden derzeit nicht identifiziert. Regelwerke, wie sie im Rahmen der Produktkonfiguratoren eingesetzt werden, könnten dieses Problem beheben, müssten aber auch gepflegt werden. Die Methode lässt sich in verschiedene Engineering-Prozesse und bestehende Softwarewerkzeuge einbinden. Gerade bei der Einbindung in bestehende Engineering Werkzeuge ist eine durchgängige Nutzung allerdings nicht realisiert.

Die Bewertung der Module ermöglicht es, die Komplexität der theoretisch möglichen Modulkombinationen zu beherrschen bzw. einzuschränken. Dabei wird im Rahmen der vorgestellten Methode eine Bewertung der Module mit hinreichender Genauigkeit und vor allem auch geringem Aufwand vorgestellt. Eine Steigerung der Aussagegenauigkeit ist mit einer Steigerung des Aufwandes bspw. durch Simulation möglich. Die Belastung der Produktionsanlagen kann mit geringem Aufwand über statistische Verfahren und mit höherem Aufwand durch Simulation in die Bewertung mit einbezogen werden. Welcher Aufwand vor allem auch bei der Bereitstellung der Informationen sinnvoll ist, hängt von der erwarteten Aussagegenauigkeit der Bewertung ab.

Der Einsatz der vorgestellten Methode ist in der Produktionsprozessentwicklung eines anwendenden Unternehmens, aber auch bei Anlagenbauern und Entwicklungsdienstleistern, die das Engineering für verschiedene Unternehmen oder auch Branchen übernehmen, möglich. Die Erprobung im industriellen Umfeld ergab, dass eine quantitative Aussage zur Effizienzsteigerung in den Praxisbeispielen nur bedingt möglich ist, da die Entwicklung neuer Produktionsprozesse bzw. die Überarbeitung bestehender Produktionsprozesse teilweise länger als ein Jahr dauert. Gerade bei Unternehmen bspw. aus der Automobilzulieferindustrie stellt sich immer wieder die Anforderung, schnell ein Angebot für die Serienproduktion eines Zulieferbauteils zu erstellen. Diese Produkte werden dann in großer Stückzahl produziert, wobei nur ein geringer Prozentsatz der Angebote zu einem Auftrag über die Serienproduktion des Zulieferteils führt. Die Kosten für die Produktionsanlage werden heute bei diesen Angeboten meist nicht systematisch bestimmt, was gerade bei unerfahrenen Entwicklern zu Fehleinschätzungen oder auch zu übertriebenen Sicherheiten führen kann. Dementsprechend groß ist der Bedarf, das Engineering von Produktionsanlagen durch das Wissen aus bestehenden Anlagen zu unterstützen.

8.3 Ausblick

Aus der industriellen Erprobung der Methode und des Softwarewerkzeuges ergeben sich einige Anknüpfungspunkte für die Weiterentwicklung. Bestehenden Problemen bei der anwenderfreundlichen Gestaltung des Werkzeuges müssen noch behoben werden. Die durchgängige Implementierung des Softwarewerkzeuges ist dabei ein erster Schritt, die direkte Anbindung an bestehende Engineering-Tools ein weiterer.

Konkrete Weiterentwicklungen sollten beispielsweise auf einen automatischen Abgleich mit Modulen, die bereits in der Wissensbasis vorhanden sind, oder auf die Implementierung der Änderung der Ausschlussmatrix im Softwarewerkzeug abzielen. Zudem sollten die Bewertungskriterien in den Modularisierungsprozess des Softwarewerkzeuges integriert werden. Durch eine automatische Berechnung der alternativen Modularisierungsoptionen und eine Unterstützung durch die Bewertungskriterien können die optimalen Modularisierungsparameter schneller identifiziert werden. Weitere Arbeiten sind die Unterstützung des Anwenders bei der Aufbereitung der Moduldaten in der Komponentenmatrix und Übersichtlichkeit der Darstellung der Matrizen im Softwarewerkzeug

Interessant aus Sicht der Anwendung des Werkzeuges ist zudem die Erweiterung der verwendeten Bewertungskriterien. Im Bereich der Leistungsbewertung von Modulkombinationen kann durch die Anbindung von Simulation die Aussagegenauigkeit erhöht werden. Die systematische Wiederverwendung von Simulationsmodellen kann den Modellierungsaufwand

der Simulation dabei deutlich reduzieren. Weitere Bewertungskriterien könnten die Lieferzeit/Fertigungszeit bzw. im Falle der Überarbeitung einer Anlage die Verfügbarkeit von Austauschmodulen sein. Die Anbindung an die unternehmensinternen Systeme zur Steuerung der Produktion erlaubt es nicht, nur eine Abschätzung zu Leistung und Kosten der neuen Produktionsanlage zu machen, sondern auch die Angabe eines möglichen Lieferzeitpunktes zu ermitteln. Weitere Ansätze zur Verbesserung der Aussagegenauigkeit der Bewertung wäre die Nutzung von Engineering-Datenbanken, die Ermittlung von Daten durch *Data-Mining* Tools und die Erweiterung der Analyse der statistischen Methoden zur Anpassung der Module an unterschiedliche Belastungen.

Die Methode bzw. das Softwarewerkzeug kann als abgeschlossenes System eines Unternehmens, aber auch als bei einem Anlagenbauer unternehmens- oder sogar branchenübergreifend eingesetzt werden. Wird ein solches Tool von zentraler Stelle aus vertrieben, kann auch die Pflege der Daten zu Modulen und Komponenten als Dienstleistung angeboten werden. Dadurch wird nicht nur die Aktualität der Daten, sondern auch ein branchenübergreifender Austausch gewährleistet. In diesem Sinne muss sichergestellt werden, dass die Module keine unternehmensspezifischen, geheimen Details enthalten, wenn sie für den Austausch freigegeben werden.

Aufbauend auf der hier vorgestellten Methode kann die (teil-)automatisierte Ausgestaltung einer Modulkombination durch die Beschreibung der Module und Schnittstellen durch Modellierungssprachen unterstützt werden. Dadurch wird der Austausch zwischen den Modulen und damit deren Anpassung aneinander möglich. Im Engineering kann dies bedeuten, dass Parameter, wie beispielsweise die Zykluszeit eines Moduls, automatisch beim Engineering eines weiteren Moduls berücksichtigt werden. Analog könnte auch eine parametrisierte Konstruktion eines Moduls angepasst werden. Diese automatischen Anpassungen lassen sich durch die Einbindung von Simulationen absichern. Konsequenterweise weitergedacht, werden so in einigen Jahren Routineaufgaben im Engineering durch die Wiederverwendung des Wissens von früheren Anlagen ersetzt. Auf dem Weg zu dieser Vision des Engineering auf Knopfdruck (vgl. Abbildung 86) sind die Fragen der Modularisierung sowie der Auswahl einer Modulkombination in den frühen Phasen im Rahmen dieser Arbeit behandelt worden.



Abbildung 86: Vision des Engineering auf Knopfdruck

9 Quellenangaben

9.1 Literaturverzeichnis

- ABH (2009) Abele, E.; Brungs, F.; Hueske, B.: Produktionsgerecht modularisieren - Eine Weiterentwicklung des Modular Function Deployment. wt Werkstattstechnik online Jahrgang 99 (2009) H. 9, S.598-605.
- ADDG (2011) Anacker, H.; Dorociak, R.; Dumitrescu, R.; Gausemeier, J.: Integrated Tool-Based Approach for the Conceptual Design of Advanced Mechatronic Systems"; IEEE International Systems Conference (SysCon), Montreal; 04.2011 ; S. 506 – 511.
- AgKu (2004) Agard B.; Kusiak, A.: Data-mining-based methodology for the design of product families, International Journal of Production Research, 42:15, 2004, S. 2955-2969.
- Ak (1992) Akao, Yōji: Quality function deployment . - Landsberg : Verl. Moderne Industrie , 1992.
- AkKr (1998) Akright, W.T; Kroll, D.E.: Cell formation performance measures Determining when to change an existing layout. In: Computers & Industrial Engineering 34 (1), 1998, S. 159–171.
- AlMa (2002) Albers, Albert ; Matthiesen, Sven: Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme - Das Elementmodell "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zur Analyse und Synthese technischer Systeme. In: Konstruktion - Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe/ Band 54 (2002), Nr. 7/8 – 2002, S.55 – 60.
- ANO+ (2002) Adolfsson, J.; Ng, A.; Olofsgard, P.; Moore, P.; Pu, J.; Wong, C.B.: "Design and simulation of component-based manufacturing machine systems"; Mechatronics 12, Pergamon-Verlag, 2012, S.1239–1258.
- Ar (2011) Arnoscht, J.: Beherrschung von Komplexität bei der Gestaltung von Baukastensystemen. Berichte aus der Produktionstechnik 11/2011, Hrsg.: Brecher, C.; Klocke, F.; Schmitt, R.; Schuh, G., Apprimus Verlag Aachen 2011.
- ASS (2012) Abele, E.; Schrems, S.; Schraml, P.: Energieeffizienz in der Fertigungsplanung - Frühzeitige Abschätzung des Energieverbrauchs von Produktionsmaschinen in der Mittel- und Großserienfertigung. wt Werkstattstechnik online Jahrgang 102 (2012) H. 1/2, S. 38-42.
- At (2002) Atkinson, Colin: Component-based product line engineering with UML. London [u.a.] ; Addison-Wesley, 2002.
- Ba (2007) Baumberger, G.: Methoden zur kundenspezifischen Produktdefinition bei individualisierten Produkten. Technische Universität München, Diss., Verlag Dr. Hut, München, 2007.
- BaBr (2009) Baier, Daniel; Bruschi, Michael (Hrsg.): Conjointanalyse - Methoden - Anwendungen – Praxisbeispiele. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- BaCl (2000) Baldwin, C. Y.; Clark, K. B.: Design rules – The power of modularity. Cambridge, MA: MIT Press 2000.
- BaGa (1997) Bakshi, Smita; Gajski, Daniel D.: Hardware/software partitioning and pipelining. Proceedings of the 34th annual Design Automation Conference, ACM, 1997.
- BBSS (2008) Blohm, H., Beer, T., Seidenberg, U., Silber, H.: Produktionswirtschaft. Verlag Neue Wirtschafts-Briefe, Herne, 2008.
- BET (2010) van Beek, T. J.; Erden, M. S.; Tomiyama, T: Modular design of mechatronic systems with function modeling. Mechatronics 20 (2010); Elsevier-Verlag; S.850–863.
- BeVe (2010) Bengel, Matthias; Verl, Alexander (Hauptberichter): Workpiece-centered Approach to Reconfiguration in Manufacturing Engineering. ISW/IPA Forschung und Praxis - Band 175;

- zugl. Diss. Univ. Stuttgart, Jost-Jetter, Heimsheim, 2010
- BFZ (2009) Braglia, M.; Frosolini, M.; Zammori, F. Overall equipment effectiveness of a manufacturing line (OEEML): An integrated approach to assess systems performance. *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 20 Iss: 1, 2009, pp.8 – 29
- BGK+ (2012) Böhm, B.;Gewald, N.;Köhlein, A.; Elger, J.;Stallinger, F.;Neumann, R.; Plösch, R.;Hehenberger, P.: Roadmap für die Entwicklung Mechatronischer Objekte - Ergebnisse einer Expertenurfrage. *Automation 2012 : Kongresshaus Baden-Baden*, 13. und 14. Juni 2012, Düsseldorf : VDI-Verl.2012.
- BGKE (2011) Böhm, B.; Gewald, N.; Kohlein, A.; Elger, J.; , "Mechatronic models as a driver for digital plant engineering," 2011 IEEE 16th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), 5-9 Sept. 2011, S.1-8,
- BGL+ (2011) Behncke, F.G.H.; Gabriel, F.; Langer, S.; Hepperle, C.; Lindemann, U.; Karl, F.; Pohl, J.; Schindler, S.; Reinhart, G.; Zaeh, M.F.; Analysis of information flows at interfaces between strategic product planning, product development and production planning to support process management - A literature based approach. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 2011.
- BGS (2009) Bluntzer, J. B.;Gomes, S.; Sagot, J. C.:From Customer Needs to Design Parameters: Description of a Knowledge based and Functional CAD Model. *The Fifth International Conference on Axiomatic Design Campus de Caparica – March 25-27, 2009*.
- BHL (2007) Braun, S. C., Hellenbrand, D., Lindemann, U.: *Kostentransparenz in der Mechatronik*. Technische Universität München, 2007.
- BiGr (2011) Biedermann, H.; Gram, M.: *Anlageneffizienz als wesentlicher Baustein von wandlungsfähigen Produktionssystemen*. *Industrie Management 27 (2011) 3*, GITO Verlag, S. 16-20
- Bl (2011) Blees, C.: *Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien*. TuTech-Verlag, Hamburg, 2011.
- BLS (2009) Bender, D., Lenders, M., Schöning, S.: *Kundenorientierte Variantenoptimierung bei einem Werkzeugmaschinenkonzern*. *ZWF, Jahrg. 104 11 (2009)*, S. 971-975
- BMU (2011) Blumöhr, U.; Münch, M.; Ukalovic, M.: *Variantenkonfiguration mit SAP*. 2.Auflage Bonn, Boston: Galileo Press, 2011..
- Bö (2013) Böckermann, F.: *Customer Knowledge Management in der Konzeptphase der Neuproduktentwicklung*. Zugl.: Münster, Univ., Diss., 2011. Wiesbaden : Springer Gabler, 2013.
- BöAm (2010) Bönicke, Holger; Ament, Christoph: *Development of an Automation Library for the Mechatronics*. *International Conference on Control, Automation and Systems 2010; Oct. 27-30, 2010 in KINTEX, Gyeonggi-do, Korea*
- Bosch (2012) N.N.: *Baukastensystem macht Maschinenbau schneller*. Bosch Rexroth, x-technik IT & Medien GmbH - *Automation 03/2012*, S.56.
- Br (2001) Browning, Tyson R.: *Applying the Design Structure Matrix to System Decomposition and Integration Problems: A Review and New Directions*. *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol. 48, No. 3, August 2001.
- Br (2002) Browning, T. R. , *Process integration using the design structure matrix*. *Syst. Engin.*, 5 (2002),S. 180–193.
- BrEp (2002) Browning, T.R.; Eppinger, S.D.: *Modeling impacts of process architecture on cost and schedule risk in product development*. *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol.49, no.4, pp.428-442, Nov 2002.
- BrSc Bramsiepe, C.; Schembecker, G.: *Die 50%-Idee: Modularisierung im Planungsprozess*.

- (2012) Chemie Ingenieur Technik 84.5, 2012, S.581-587.
- ChEm Chhabra, R.; Emanmi M.R.: Holistic system modeling in mechatronics. Mechatronics 21 (2011); Elsevier-Verlag; S.166–175.
- CLP Cao, Y.; Liu, Y.; Paredis, C.J.J.: System-level model integration of design and simulation for mechatronic systems based on SysML. Mechatronics 21 (2011); Elsevier-Verlag; S.1063–1075
- CuMc Cuthill, E.; McKee, J.: Reducing the bandwidth of sparse symmetric matrices. In Proc. 24th Nat. Conf. ACM, 1969, S. 157–172.
- DEEL Daniilidis, C.; Enßlin, V.; Eben, K.; Lindemann, U.: A classification framework for product modularization methods. 18th International Conference on Engineering Design Copenhagen, Denmark 2011.
- DeWa Dencovski, K.; Wagner, T.: Customer-oriented Innovation of Engineering Tools – a Holistic Methodology to Close the Gap to Customer Productivity. 13th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Hamburg, 2008.
- DFB Drath, R.; Fay, A., Barth, M.: Interoperabilität von Engineering-Werkzeugen. at - Automatisierungstechnik: Vol. 59, No. 7, 2011, S. 451-460.
- DIN DIN 69901-1: Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 1: Grundlagen. 69901-1 Deutsches Institut für Normung, Ausgabedatum: 2009-01.
- DIN Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): DIN 8580 - Fertigungsverfahren - Begriffe, 8580 Einteilung. 2., veränd. Aufl. Berlin : Beuth, 2003
- DND Dascalu, S.; Ning Hao; Debnath, N.: Design patterns automation with template library. Proceedings of the Fifth IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, 21-21 Dec. 2005, S. 699-705.
- Dr Draht, Rainer: Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML - Integration von CAEX, PLCopen XML und COLLADA. Springer, Berlin 2011.
- DrBa Drath, R.; Barth, M.: Concept for interoperability between independent engineering tools of heterogeneous disciplines. IEEE 16th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFAs), 2011.
- EETM ElMaraghy, W.; ElMaraghy, H.; Tomiyama, T.; Monostori, L.: Complexity in engineering design and manufacturing. CIRP Annals - Manufacturing Technology 61 (2012); S.793–814
- EFH+ Eckert, K.; Frank, T.; Hadlich, T.; Fay, A.; Diedrich, C: Typical Automation Functions and Their Distribution in Automation Systems. In: 16th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation - IEEE ETFAs 2011, Toulouse.
- EFH+ Eckert, K.; Fay, A.; Hadlich, T.; Diedrich, C.; Frank, T.; Vogel-Heuser, B.: Design patterns for distributed automation systems with consideration of non-functional requirements. 2012 IEEE 17th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFAs), 17-21 Sept. 2012, S.1-9.
- Eh Ehrlenspiel, Klaus. Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. Hanser Verlag, 2009.
- Eh Ehnert, F.: Entwicklung einer innovativen Großbrief-Sortieranlage, Vortrag Expertenforum "Effizienz in der Produktentwicklung durch Standardisierung und Modularisierung", 25. Oktober 2011.
- EKL Ehrlenspiel, K., Kiewert, A., Lindemann, U.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren, 6. Auflage, Springer Verlag, 2007.
- El ElMaraghy, H. A.: Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms, Int J Flex Manuf Syst 17, 2006, S. 261-276.

- ElHa (2010) Elger J.; Haußner, C.: Entwicklungen in der Automatisierungstechnik. In: Günthner, W.; ten Hompel, M. (Hrsg.), Internet der Dinge in der Intralogistik, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.
- Ep (2003) Epple U.: Austausch von Anlagenplanungsdaten auf der Grundlage von Metamodellen. atp – Automatisierungstechnische Praxis 45 (2003), Heft 7, S. 2–11 .
- Er (1998) Erixon G.: Modular function deployment: a method for product modularization. KTH Högskolestryckeriet, Stockholm, 1998.
- ErEr (1999) Ericsson, A.; Erixon, G.: Controlling Design Variants. Modular Management AB and Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, 1999.
- Fa (2009) Fay, A.: Effizientes Engineering komplexer Automatisierungssysteme. In: Schnieder (Hrsg.): Wird der Verkehr automatisch sicherer? Beschreibungsmittel, Methoden und Werkzeuge des integrierten Systementwurfs zur Fahrzeug- und Verkehrsautomatisierung. Braunschweig, 2009, S. 43–60.
- FEH+ (2013) Frank T.; Eckert K.; Hadlich T.; Fay A.; Diedrich C.; Vogel-Heuser B.: Erweiterung des V-Modells® für den Entwurf von verteilten Automatisierungssystemen In: at - Automatisierungstechnik, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, Jahrgang 2013, Heft 61, S. 79-91.
- FFB (2010) Fantuzzi, F. Fanfoni, C. S. Bonf, M.: An engineering process for the mechatronic development of industrial automation systems. IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2010.
- FFV (2012a) Feldmann, S.; Fuchs, J.; Vogel-Heuser, B.: Modularity, Variant and Version Management in Plant Automation – Future Challenges and State of the Art. In: Design Conference, Dubrovnik, Kroatien, 2012, S. 1689-1698.
- FFV (2012b) Fuchs, J.; Feldmann, S.; Vogel-Heuser, B.: Modularität im Maschinen- und Anlagenbau – Analyse der Anforderungen und Herausforderungen im industriellen Einsatz. In: Entwurf Komplexer Automatisierungssysteme, Magdeburg, 2012.
- FHHF (2002) Franke, H.-J.; Hesselbach J.; Huch, B.; Firchau, N.L.: Variantenmanagement in der Einzel- und Kleinserienfertigung. Carl Hanser, München 2002.
- Fi (1990) Fingrhut, H.: Projektierung im Anlagekapitalbedarf von Chemieanlagen. Chemie Ingenieur Technik (62), Nr. 12, 1990, S. 1007–1017.
- Fi (2009) Fiege, R.: Axiomatic Design: Eine Methode zur serviceorientierten Modellierung. Wiesbaden 2009.
- FRNL (2007) Fleischer, J.; Rühl, J.; Niggeschmidt, S.; Ladenburger, R.: Leistungskalkulation hybrider Produkte. in: wt - Werkstattstechnik online Jahrgang 97 (2007), Springer VDI Verlag, Heft 7/8.
- FrSc (2012) Friedli, T.; Schuh G.: Wettbewerbsfähigkeit der Produktion an Hochlohnstandorten. 2.Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012.
- FSBW (2007) Fleischer, J.; Schopp, M.; Broos, A.; Wieser, J.: Datenbasis für lastabhängige Prozesseingriffe – Modularisierung und Analyse von Ausfallursachen zur Erhöhung der Verfügbarkeit von Werkzeugmaschinen.in: wt Werkstattstechnik online Jahrgang 97 (2007) H.7/8 S. 491-497.
- FSM (2009) Fay, A.; Schlepen, M.; Mühlhause, M.: Wie kann man den Engineering-Prozess systematisch verbessern?. Automatisierungstechnische Praxis atp 1-2.2009, S.80-85.
- FWS+ (2007) Fleischer, J.; Wieser, J.; Schopp, M.; Oestreicher, T.; Zölfl, M.; Hahn, W.: Modularisierung komplexer Produktionsanlagen – Analyse von Störgrößen und Verfügbarkeitsbestimmung am Beispiel von Getränkeabfüllanlagen. in: wt Werkstattstechnik online Jahrgang 97 (2007) H.9 S. 668-675.
- GBG Gausemeier, J.; von Bohuszewicz, O.; Grafe, M.: Simulation und Visualisierung von

- (1998) Prozessen in einem Virtuellen Modellunternehmen. In: Tagungsband ASIM - Fortschritte in der Simulationstechnik. 12. Symposium, Zürich, 1998
- GDK (2010) Gausemeier, Jürgen; Dorociak, Rafal; Kaiser, Lydia: Computer-Aided Modeling of the Principle Solution of Mechatronic Systems: A Domain-Spanning Methodology for the Conceptual Design of Mechatronic Systems. In: Proceedings of IDETC/CIE 2010 ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, 2010.
- Ge (1981) George, J. Liu; Computer Solution of Large Sparse Positive Definite Systems, Prentice-Hall, 1981.
- GKK+ (2012) Götz, U.; Koriath, H.J.; Kolesnikov, A.; Lindner, R.; Paetzold, J.: Integrated methodology for the evaluation of the energy- and cost-effectiveness of machine tools. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 5 (2012); Elsevier-Verlag; S.151–163
- GKS (2012) Goldengorin, Boris; Krushinsky, Dmitry; Slomp, Jannes: Flexible PMP Approach for Large-Size Cell Formation. In: Operations Research 60 (5), 2012, S. 1157–1166.
- GMS (1992) Gilbert, J.R.; Moler, C.; Schreiber, R.: Sparse Matrices in MATLAB: Design and Implementation. SIAM Journal on Matrix Analysis, 1992.
- Gö (1998) Göpfert, Jan: Modulare Produktentwicklung zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation ; Theorie, Methodik, Praxis. Norderstedt : Books on Demand : 1998.
- GöSt (2000) Gopfert, J., Steinbrecher, M.: Modulare Produktentwicklung leistet mehr. Harvard Business Manager 22.3 (2000): S.20-30.
- GSDK (2009) Gausemeier, Jürgen; Steffen, Daniel; Donoth, Jörg; Kahl, Sascha: Conceptual Design of Modularized Advanced Mechatronic Systems. In: Proceedings 17th International Conference On Engineering, 24-27 August, Stanford, USA, 2009
- GuBa (2005) Guenov, M.; Barker, S.: Application of axiomatic design and design structure matrix to the decomposition of engineering systems. Syst. Engin., 8, 2005, S.29–40
- HaWo (2012) Hady, L., Wozny, G.: Multikriterielle Aspekte der Modularisierung bei der Planung verfahrenstechnischer Anlagen, Chemie Ingenieur Technik 84, No. 5 (2012), S. 597-614
- He (2007) Herfeld, Ulrich: Matrix-basierte Verknüpfung von Komponenten und Funktionen zur Integration von Konstruktion und numerischer Simulation. Zugl. Diss TU München; Verlag Dr. Hut, München, 2007.
- Hi (2005) Hilscher, Michael: Dedizierte Webserver einrichten und administrieren - der eigene Web-, FTP-, Mail- und Nameserver ; LAMP, Linux-VServer, Sicherheit ; komplettes Praxiswissen zum Root-Server. 2. aktualisierte Auflage, Galileo Press, Bonn, 2005.
- Hi (2011) Hillmann: Methoden und Werkzeuge zur Reduzierung der Teilvielfalt, Erhöhung der Wiederverwendung, Klassifizierung, Standardisierung, Expertenforum "Effizienz in der Produktentwicklung durch Standardisierung und Modularisierung"; 25. Oktober 2011
- HiLi (1998) Hillier, F.S.; Liebermann, G.J.: Operations Research. Oldenbourg Verlag, München 1988.
- HLKG (2011) Hundt, L.; Luder, A.; Kohlein, A.; Gewalt, N.; Methodology for the evaluation of tools with respect to its applicability within mechatronical engineering. Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), 2011 IEEE 16th Conference on , pp.1-8, 5-9 Sept. 2011.
- HNFS (2011) ten Hompel, Michael; Nettsträter, Andreas; Feldhorst, Sascha; Schier, Arkadius: Engineering von modularen Förderanlagen im Internet der Dinge. at – Automatisierungstechnik 59 (2011) 4; S. 248-256.
- Ho (2012) Hoffmeister, M.: Modelle zur aufgabengeführten Produktionsausführung in der wandlungsfähigen Produktion; Dissertation; Universität Stuttgart; 2012.
- HöWe Höhne, Günter; Weber, Christian: Function and Design of Mechanical Components in

- (2007) Mechatronic Systems (Invited Paper). 19th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2007), Brasilia 05.-09.11.2007. In: Proceedings of COBEM 2007, Paper no. 1975 (CD-ROM, Full Paper). Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas (ABCM), Rio de Janeiro, 2007.
- HuKu (1998) Huang, Ch., Kusiak, A.: Modularity in Design of Products and Systems, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics- Part A: Systems and Humans, Vol. 28, No. 1, January 1998
- Is (2008a) Isermann, R.: Mechatronic systems - Innovative products with embedded control; Control Engineering Practice 16; Elsevier-Verlag, 2008, S.14–29.
- Is (2008b) Isermann, R.: Mechatronische Systeme. Springer Verlag, Berlin 2008
- It (2013) Itasse, S.: Modularisierung - Siemens baut Windkraftanlagen nach Plattformstrategie. MaschinenMarkt; Vogel Business Media 2013.
- Ja (2006) Jansen, Sebastian: Eine Methodik zur modellbasierten Partitionierung mechatronischer Systeme. Zugl.: Bochum, Univ., Diss., Shaker Verlag, Aachen 2006.
- JMG+ (2010) Jazdi, N.; Maga, C.; Göhner, P.; Ehben, T.; Tetzner, T.; Löwen, U.: Mehr Systematik für den Anlagenbau und das industrielle Lösungsgeschäft — Gesteigerte Effizienz durch Domain Engineering. at - Automatisierungstechnik: Vol. 58, No. 9, 2010, pp. 524-532.
- JWB (2011) Jutzi, P.; Engeln, W.; Blattert, P.: Wissensmanagement in der Produktentwicklung - Ein Beispiel aus der Industrie. Industrie Management 27 (2011) 4 – Gito Verlag 2011, S.43-46.
- Ka (2011) Kaesler, C.: Kosten- und Leistungsrechnung der Bilanzbuchhalter. 4. Auflage, Gabler Verlag | Springer Fachmedien GmbH, Wiesbaden, 2011.
- KaVi (2006) Kamrani, A.; Vijayan, A.: A methodology for integrated product development using design and manufacturing templates. Journal of Manufacturing Technology Management, Vol. 17 Iss: 5, 2006, S. 656 – 672.
- KBGL (2009) Kreimeyer, M; Braun, S; Gürtler, M; Lindemann, U: Extending Multiple Domain Matrices to Allow for the Modeling of Boolean Operators in Process Models Extending Multiple Domain Matrices to Allow for the Modeling of Boolean Operators in Process Models. In: 17th International Conference on Engineering Design, Stanford University, California, USA, Design Society. 2009.
- Ke (2012) Kesper, H.: Gestaltung von Produktvariantenspektren mittels matrixbasierter Methoden. Technische Universität München, Diss., Universitätsbibliothek der TU München, 2012.
- KEB+ (2010) Kissel, M., G.M. Eben, K., Braun, S., Schmidt- Colinet, J., Obermeier, M., Lindemann, U., Vogel-Heuser, B.: A Framework for Evaluating Product Architecture of Automation Production Facilities, 12. International Dependency and Structure Modelling Conference, 22-23 Juli 2010, Cambridge.
- KFG (2007) Frank-Lothar Krause, Hans-Joachim Franke, Jürgen Gausemeier (Hrsg.): Innovationspotenziale in der Produktentwicklung. Carl Hanser Verlag, München Wien, 2007.
- Ki (2012) Kipp T.: Methodische Unterstützung der variantengerechten Produktgestaltung. Hamburger Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Hamburg 2012.
- KKJ+ (2013) Kernschmidt, Konstantin; Klein, Philipp; Jazdi, Nasser; Göhner, Peter; Weyrich, Michael; Vogel-Heuser, Birgit: Methodology for Identification of adaptive Reusable Modules in automated Production Systems. In: Proceedings of the 23rd CIRP Design Conference - Smart Product Engineering. 11-13 March 2013, Bochum Germany, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2013.
- KIP1 (2000) Kleinaltenkamp, M.; Plinke, W. (Hrsg.): Technischer Vertrieb (2. Auflage). Berlin: Springer 2000, S. 171-248.
- Ko Konrad, K.: Verfahren zum semantisch unterstützten Anlagenanlauf von Montagesystemen.

- (2012) Dissertation; Universität Stuttgart; 2012.
- KoTo Komotoa., H.; Tomiyamaa, T.: A framework for computer-aided conceptual design and its application to system architecting of mechatronics products; Computer-Aided Design 44 (2012), Elsevier-Verlag, 2012, S.931–946.
- Kr Krausch, Uwe- Jens: Effizienz in der Produktentwicklun. Vortrag Expertenforum "Effizienz in der Produktentwicklung durch Standardisierung und Modularisierung", 25.Oktober 2011.
- KRBG Kratzer, M.; Rauscher, M.; Binz, H.; Göhner, P.: Konzept eines Wissensintegrationssystems zur benutzerfreundlichen, benutzerspezifischen und selbstständigen Integration von Konstruktionswissen; 22. DfX-Symposium 2011
- KRW Klemm, P.; Rüdele, H.; Weimer, T.: Durchgängiges Engineering von mechatronischen Systemen. Fertigungstechnisches Kolloquium Stuttgart (FTK 2006), Gesellschaft für Fertigungstechnik, Stuttgart, 2006, S. 101–131.
- KRZ Karl, F.; Reinhart, G.; Zäh, M. F.: Rekonfigurationsfähigkeit von Betriebsmitteln. wt Werkstattstechnik online 102 (2012) H. 4, S. 228–233. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag.
- KSP Korajda, I.; Seyfarth, M.; Pritschow, G.: Disziplinübergreifende Baukastensysteme. . wt Werkstattstechnik online 94 (2004) H. 5, S. 215–219. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag..
- Ku Kusiak, Andrew: The generalized group technology concept. In: International Journal of Production Research 25 (4), 1987, S. 561–569.
- La Lang, Bastian: Erstellung eines dynamischen Simulationssystems zur Vorhersage des Energiebedarfs-verlaufs im Produktionsprozess. Zugl.: Kassel, Univ., Diss. 2011, Kassel university press, 2011.
- LBB+ Löwen U., Bertsch R., Böhm B., Prummer S., Tetzner T.: Systematisierung des Engineerings von Industrieanlagen. In: atp 47, Heft 4, 2005, S. 54–61.
- LBP de Lamotte, F.F.; Berruet, P.; Philippe, J.-L.: Evaluation of Reconfigurable Manufacturing Systems configurations using tolerance criteria. IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on, 6-10 Nov. 2006, S.3715-3720.
- LDB+ Lindemann, Udo; Danilovic, Mike; Beubzer, Frank; Maurer, Maik; Kreimeyer, Matthias: Proceedings of the 9th International DSM Conference. Shaker Verlag, Aachen, 2007.
- Le Lenhart, M.: Modulare Inhalte in der Produktentwicklung: individuelle Konfiguration und szenarienabhängige Nutzung. Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2008. Düsseldorf : VDI-Verl., 2008.
- LeSu Leung, Y.-T, Suri, R.: Performance Evaluation of Discrete Manufacturing Systems, IEEE Control Systems Magazine, Juni 1990.
- LFW+ Lüder, A.; Foehr, L.H.M.; Wagner, T.; Zaddach, J.-J.; Holm, T.: Manufacturing System Engineering with Mechatronical Units, IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2010.
- LHK Lüder, L. Hundt, A. Keibel, "Description of manufacturing processes using AutomationML," IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2010.
- Li Litto, M.; et al.: Baukastenbasiertes Engineering mit Föderal - Ein Leitfaden für Maschinen- und Anlagenbauer"; VDMA Verlag GmbH; 2004.
- Li Litto, M.; et al.: Adaptierbares Modellierungswerkzeug und Qualifizierungsprogramm für den Aufbau firmenspezifischer mechatronischer Engineeringprozesse Ein Leitfaden für Maschinen- und Anlagenbauer. VDMA Verlag GmbH; 2010.
- LKV Lechler, A.; Kircher, C.; Verl, A.: Simulationsgestütztes mechatronisches Engineering - Entwurf und Inbetriebnahme mechatronischer Module und flexibler Produktionssysteme. wt

- (2008) Werkstattstechnik online Jahrgang 98 (2008) H. 5; S.377-383.
- LKW Lorenzer, T., Kunz, A., Wegener, K.: Rekonfigurierbare Maschinensysteme-Produktionsmittel der Zukunft, 2007.
- LKW Lechner, A.; Klingebiel, K.; Wagenitz, A.: Evaluation of Product Variant-driven Complexity Costs and Performance Impacts in the Automotive Logistics with Variety-driven Activity-based Costing. IMECS 2011, International MultiConference of Engineers and Computer Scientists. Vol.2 : Hong Kong, 16-18 March 2011.
- LMB Lindemann, U., Maurer, M., & Braun, T.: Structural Complexity Management – An Approach for the Field of Product Design. Berlin: Springer, 2009.
- LRZ Lindemann, U.; Reichwald, R.; Zäh, M. F.: Individualisierte Produkte – Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006.
- Lü Lühe, C.: Modulare Kostenschätzung als Unterstützung der Anlagenplanung für die Angebots- und frühe Basic Engineering Phase. Diss. TU Berlin, 2012.
- LWG Lauven, L.; Wiedenmann, S.; Geldermann, J.: Lebenszykluskosten als Entscheidungshilfe beim Erwerb von Werkzeugmaschinen. Research Paper der Georg-August-Universität Göttingen, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Schwerpunkt Unternehmensführung, Professur für Produktion und Logistik, Nr.10, Göttingen, Oktober 2010.
- LYL Lin, Shih-Wei; Ying, Kuo-Ching; Lee, Zne-Jung: Part-machine cell formation in group technology using a simulated annealing-based meta-heuristic. In: International Journal of Production Research 48 (12), 2010, S. 3579–3591.
- LZE Lentens, J.; Zimmermann, N.; Eckstein, H.: Engineering-Unterstützung der nächsten Generation. wt Werkstattstechnik online 102 (2012) H. 3, S. 109–113. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag.
- Ma Malmqvist, John: A Classification of Matrix-Based Methods for Product Modeling. Proceedings of Design-2002, Conference paper - peer reviewed.
- MaIs Martin M. V.; Ishii, K.: Design for variety: A methodology for developing product platform architectures. Proceedings of DETC2000 - ASME Design Engineering Technical Conferences, September 10 - 13, 2000, Baltimore, MD.
- MaIs Martin M. V.; Ishii, K.: Design for variety: developing standardized and modularized product platform architectures. Research in Engineering Design 13 (2002), Springer-Verlag 2002, S. (2002) 213–235.
- MaJa Maga, C. R.; Jazdi, N.: Interdisciplinary modularization in product line engineering: A case study. Automation Quality and Testing Robotics (AQTR), 2012 IEEE International Conference on, 24-27 May 2012, S.179,184.
- MaKi Mavris, D.; Kirby, M.: Technology Identification, Evaluation, and Selection for Commercial Transport Aircraft. Proceedings of the 58th Annual Conference Of Society of Allied Weight Engineers, San Jose, California, May 24-26, 1999; Georgia Institute of Technology, 1999.
- MDS Maurmaier, Mathias; Dencovski, Kristian; Schmitz; Engelbert: Engineering Challenges – Evaluierungskonzept für Engineering- Werkzeuge. atp - Automatisierungstechnische Praxis, 2008. atp 1.2008
- Me Meier, G.: Prozessintegration des Target Costings in der Fertigungsindustrie am Beispiel Sondermaschinenbau. - Karlsruhe : KIT Scientific Publishing, 2011. Zugl.: Karlsruhe, KIT, Diss., 2011.
- Mi Michel, S.: Ci-Base -Mit simulierter Mechatronik die Markteinführung beschleunigen. Vogel Business Media; 19.07.2012
- MJG Maga, C.; Jazdi, N.; Göhner, P.: Reusable Models in Industrial Automation: Experiences in Defining Appropriate Levels of Granularity. 18th World Congress of the International

- Federation of Automatic Control (IFAC 2011), Mailand, Italien, 2011.
- MMW (2012) Moser, T.; Mordinyi, R.; Winkler, D.: Extending Mechatronic Objects for Automation Systems Engineering in Heterogeneous Engineering Environments. 17th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Cracow, Polen, September 2012.
- MoAl (2003) Morel, B.; Alexander, P.: Automating component adaptation for reuse. Proceedings. 18th IEEE International Conference on Automated Software Engineering, 6-10 Oct. 2003, 2003, S.142- 151.
- MTJ (2004) Michel, R.; Torspecken, H.-D.; Jandt, J.: Neuere Formen der Kostenrechnung mit Prozesskostenrechnung. Kostenrechnung II. Carl Hanser Verlag; 5. Auflage, 2004.
- MUKH (2002) Merhabi, M. G., Ulsoy, A. G., Korben, Y., Heytler, P.: Trends and Perspectives in flexible and Reconfigurable manufacturing systems, Journal of Intelligent Manufacturing, 13 (2002), S.135-146.
- NeVe (2012) Neyrinck, A.; Verl, A.: Optimale Maschinen und Anlagen durch Simulation von Varianten in der Konzeptionsphase. In: Automation 2012: 13. Branchentreff der Mess-und Automatisierungstechnik, 13. und 14. Juni 2012, Kongresshaus Baden-Baden. Düsseldorf : VDI Verlag, 2012.
- Oe (2012) Oestereich, B.: Analyse und Design mit der UML 2.5 - objektorientierte Softwareentwicklung. 10., aktualisierte und erw. Aufl., Oldenbourg München 2012.
- OHB+ (2013) Obst, M.; Holm, T.; Bleuel, S.; Claußnitzer, U.; Evertz, L.; Jäger, T.; Nekolla, T.; Pech, S.; Schmitz, S.; Urbas, L.: Automatisierung im Life Cycle modularer Anlagen - Welche Veränderungen und Chancen sich ergeben? atp edition - Ausgabe 01-02 2013; S.888-895.
- ORK (2009) Oezluek, A. C.; Ryssel, U.; Kabitzsch, K.: Multi-Objective Combinatorial Optimization for Designing Room Automation Systems by Using Evolutionary Algorithms. 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2009. IECON '09; Porto; 11.2009; S. 3335 - 3340
- OUK (2006) Orcun, S.; Uzsoy, R.; Kempf, K.: Using System Dynamics Simulations to Compare Capacity Models for Production Planning.. Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2006. WSC 06, 3-6 Dec. 2006, S.1855-1862.
- PaBa (1984) Pahl G.; Beitz W.: "Engineering Design: A Systematic Approach", Springer-Verlag, Berlin, 1984.
- PBFG (2007) Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-H.: Konstruktionslehre. 7.Auflage –Springer Verlag, Berlin 2007.
- PDW (2012) Politze, D.P.; Dierssen, S.; Wegener, K.: Function module drivers for assessing the similarity between product functions. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 5 (2012); Elsevier-Verlag, 2005, S.33–40.
- PeGö (2012) Pech, S., Göhner, P.: Architektur zur Informationsgewinnung in automatisierten Systemen. Universität Stuttgart; „Automation“ 2012, VDI-Berichte 2171, VDI-Verlag, 2012
- Pi (1988) Pickel, H.: Kostenmodelle als Hilfsmittel zum Kostengünstigen Konstruieren. Dissertation, TU München. München: Hanser.
- Pi (2006) Piller, F. T.: Mass Customization. DUV, Gabler Edition Wissenschaft, Wiesbaden, 2006.
- PiEp (1994) Pimpler T.U. Eppinger S.D. Integration analysis of product decompositions. In Proceedings of the 1994 ASME Design Engineering Technical Conferences—6th International Conference on Design Theory and Methodology, Minneapolis, 1994.
- PMG+ (2008) Pech, S., Mubarak, H., Göhner, P., Scheuren, M., Münnemann, A.: Agentenbasierte Unterstützung bei der Informationsgewinnung in Automatisierungssystemen, 2008.

- Po (2010) Possel- Dölken, Frank: Mechatronische Modularisierung im Sondermaschinenbau, In: Gausemeier, Jürgen; Rammig, Franz-Josef; Schäfer, Wilhelm; Trächtler, Ansgar (Hrsg.) : 7. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, 18. - 19. Mrz. 2010 Heinz Nixdorf Institut, HNI Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 272 (2010), S.358-370.
- Po (2013) Porter, Michael E. Wettbewerbsstrategie: Methoden zur Analyse von Branchen und Konkurrenten. Campus Verlag, 2013.
- Pr (2008) Preißler, P.: Betriebswirtschaftliche Kennzahlen: Formeln, Aussagekraft, Sollwerte, Ermittlungsintervalle. Oldenbourg Wissenschaftsverlag 2008.
- PRR (2003) Probst, G.; Raub, S.; Romhardt, K.: Wissen managen: wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen, Gabler-Verlag, Wiesbaden, 2003.
- Pu (1991) Pugh S: Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering. Prentice Hall, New York, 1991.
- QWD (2011) Qamar, A.; Wikander, J.; During, C.: A mechatronic design infrastructure integrating heterogeneous models. Mechatronics (ICM), 2011 IEEE International Conference on , 13-15 April 2011, S.212-217.
- RaTh (2012) Rahmani, K.; Thomson, V.: Ontology based interface design and control methodology for collaborative product development. Computer-Aided Design 44 (2012); Elsevier-Verlag; S. 432-444.
- RDK (2009) Ryssel, U.; Dibowski, H.; Kabitzsch, K.: Generation of Function Block Based Designs using SemanticWeb Technologies. IEEE Conference on IEEE Emerging Technologies & Factory Automation, 2009. ETFA 2009; Mallorca; 09. 2009; S.1-8
- Re (2011) Reuter, A.: Definition eines mechatronischen Informationsmodells zur Modellierung von Automatisierungskomponenten und Maschinen. Uni Stuttgart 2012 DISS. 2011
- Re (2012) Reuschenbach, D.: Empirische Analyse zu den Erfolgsfaktoren der kostenorientierten Produktplanung. Universität zu Kiel Diss. 2012
- RGFS (2008) Runde, S., Güttel, K., Fay, A., Schmidt, H.: Modellierung mit CAEX in der Fertigungs- und Gebäudeautomatisierungstechnik In: Tagungsband "Automatisierung 2008", Baden-Baden, 3.-4. Juni 2008.
- RiRe (2010) Rimpau, C.; Reinhart, G.: Knowledge-based risk evaluation during the offer calculation of customised products. In: Production Engineering; Volume: 4 Issue: 5; Springer Berlin / Heidelberg, 2010.
- RML (2007) Reinhart, G.; Müller, S.; Lau, C.: Konfiguration und Bewertung von Prozessketten - Integrierte Konfiguration und ganzheitliche Bewertung von Technologieketten in der Produktionsplanung. wt Werkstattstechnik online Jahrgang 97 (2007) H. 4, S.255-261.
- RMV (2010) Reuter, A.; Müller, V.; Verl, A.: Disziplinübergreifendes Engineering - Integration von Simulationsdaten in mechatronische Komponentenmodelle. wt Werkstattstechnik online Jahrgang 100 H. 5, 2010.
- Ro (2012) Roos, E.: Vergleichende Bewertung von Anlagenkonzepten - Werkzeugunterstützte Optimierung von Lebenszykluskosten. Automatisieren!, Ausgabe 01/2012, S.19-30.
- Ru (2011) Runde, Stefan; Wissensbasierte Engineeringunterstützung in der Automatisierungstechnik am Beispiel der Gebäudeautomation. zugl. Diss. Helmut Schmidt Universität Hamburg, 2011.
- Rz (2003) Rzevski, G.: On conceptual design of intelligent mechatronic systems. Mechatronics 13 (2003); Pergamon-Verlag; S.1029-1044.
- Sa (2011) Sauer, O.: Informationstechnik in der Fabrik der Zukunft; Industrie Management 29 (2013) 1.
- SAA (2012) Schuh, G., Arnoscht, J.; Aleksic, S.: Systematische Gestaltung von Kommunalitäten in Produkten und Prozessen. ZWF 107 (2012) 5, Carl-Hanser-Verlag, München 2012; S.322-

- 326.
- SAN (2007) Schuh, G.; Arnoscht, J.; Nußbaum C.; Produktarchitekturen richtig gestalten. Industrie und Management 06/2007.
- SBB+ (2011) Schuh, G.; Behr, M.; Brecher, C.; Bührig-Polaczek, A.; Michaeli, W.; Arnoscht, J.; Bohl, A.; Buchbinder, D.; Bültmann, J.; Diatlov, A.; Elgeti, S.; Herfs, W.; Hinke, C.; Karlberger, A.; Kupke, D.; Lenders, M.; Nußbaum, C.; Probst, M.; Queudeville, Y.; Quick, J.; Schleifenbaum, H.; Vorspel-Rüter, M.; Windeck C.: Individualisierte Produkte. In: Brecher, C. [Hrsg.]: Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, S.83-255
- Sc (2003) Schünemann, Matthias: Ein modulares Baukastensystem für anwendungsspezifische Mikrosysteme. Heimsheim : Jost-Jetter, 2003 (IPA-IAO Forschung und Praxis; 387). Stuttgart, Univ., Fak. Maschinenbau, Inst. für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Diss. 2002
- Sc (2009) Schneider, Michael: Methode zur Bewertung von Produktvarianten auf der Grundlage unscharfer Größen. Zugl.: Hamburg, Helmut-Schmidt-Univ., Diss., Aachen : Shaker, 2009
- ScFr (2007) Scholz-Reiter, B.; Freitag, M.: Autonomous Processes in Assembly Systems. Annals of the CIRP Vol. 56/2/2007; Elsevier-Verlag; S.712-729
- ScVo (2011) Schütz, D.; Vogel-Heuser, B.: Modellintegration von Verhaltens- und energetischen Aspekten für mechatronische Module . In: Automatisierungstechnik (at), 59 (1), Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2011, S. 33-42.
- Se (2010) Sedchaicharn, Korkiat: Eine rechnergestützte Methode zur Festlegung der Produktarchitektur mit integrierter Berücksichtigung von Funktion und Gestalt. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Forschungsberichte. IPEK ; 45; 2010.
- Seid (2005) Seidenschwarz, W.: Marktorientiertes Prozessmanagement. 2. Auflage, Vahlen München 2008.
- ShAb (2009) Shehab, E., Abdalle, H.: An Intelligent Knowledge-Based System for Product Cost Modelling, Int. J Adv Manuf Technol 19 (2009), Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2002, S. 49-65
- ShSh (1997) Shepperd, M.; Schofield, C., "Estimating software project effort using analogies," Software Engineering, IEEE Transactions on , vol.23, no.11, Nov 1997, S.736-743.
- ShSt (2010) Shpitalni, M.; Stiassnie, E.: Design and Modularization in light of selling service (Modular Design), Stuttgart Competence Forum – Intelligent Production Systems of the Future, Nov. 2010.
- ShSt (2011) Shpitalni, M.; Stiassnie, E.: Axiomatic modular system design for service oriented products. Proceedings of ICAD2011 - The Sixth International Conference on Axiomatic Design, Daejeon 2011.
- SLA (2009) Schuh, G., Lenders, M., Arnoscht, J.: Focussing Product Innovation and Fostering Economies of Scale Based on Adaptive Product Platforms. CIRP Annals – Manufacturing Technology 58(1), 2009, S.131–134.
- SLF+ (2008) Schertl, A.; Löwen, U.; Fay, A.; Drath, R.; Gutermuth, G.; Mühlhause, M.; Ebel, M.: Systematische Beurteilung und Verbesserung des Engineerings von automatisierten Anlagen. In: Tagungsband „Automation 2008“, VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 265–268, 2008.
- Sp (2010) Spiegelberger, B.: Anwendergerechte Gestaltung mechatronischer Entwicklungsprozesse für kleine und mittlere Unternehmen im Maschinenbau, TUM Diss. 2010
- St (1965) Steward, D.V.: Partitioning and Tearing Systems of Equations. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics: Series B, Numerical Analysis, 2(2), 1965, S.345-365.
- St Steward, D.V., "The design structure system: A method for managing the design of complex

- (1981) systems," Engineering Management, IEEE Transactions on , vol.EM-28, no.3, Aug. 1981, S.71-74
- St
(2008) Strauch, U. Modulare Kostenschätzung in der chemischen Industrie. Diss. TU Berlin, 2008.
- St(1997
) Stone R. B.: Towards a theory of modular design. University of Texas, Austin, 1997.
- StGa
(2007) Steffen, D., Gausemeier, J.: Modularisierung mechatronischer Systeme. Zeitschrift Industrie Management, 23 (2007) 6, S. 9-12
- StOu
(2011) Straube, F.; Ouyeder, O.: ModuLoSys-Modularisierung logistischer Systeme Entwicklung eines Leitfadens zur Modularisierung logistischer Systeme und Konzeption von Betreibermodellen für kleine und mittelständische Unternehmen ModuLoSys-Modularization of Logistic Systems for small and medium-sized enterprises. Universitätsverlag der TU Berlin, 2011.
- StSt
(2009) Staab, S., Studer, R. : Handbook on Ontologies, Second Edition, Springer Verlag (2009)
- Su
(1990) Suh, N. P.: The principles of Design. Oxford University Press, New York, 1990.
- Su
(2001) Suh, N. P.: Axiomatic Design: Advances and Applications. Oxford University Press, New York 2001.
- Su
(2005) Suh, N. P.: Complexity – Theory and Applications. Oxford University Press, New York, 2005.
- SyMa
(2011) Sy, M.; Mascle, C.: "Product design analysis based on life cycle features"; Journal of Engineering Design, 22:6, 2011; S.387-406.
- TBKS
(2003) Taal, M.; Bulatov, I.; Klemeš, J.; Stehlik, P.: Cost estimation and energy price forecasts for economic evaluation or retrofit projects. Applied Thermal Engineering, Volume 23, Issue 14, October 2003, S. 1819-1835.
- TGJ+
(2009) Tomiyama, T.; Gu, P. ; Jin, Y.; Lutters, D.; Kind, C.; Kimura, F.: Design methodologies: Industrial and educational applications. CIRP Annals - Manufacturing Technology 58 (2009); S. 543–565
- Th
(2008) Thramboulidis, K.: Challenges in the Development of Mechatronic Systems: The Mechatronic Component. IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2008.
- UDKO
(2012) Urbas, L.; Doherr, F.; Krause, A.; Obst, M.: Modularisierung und Prozessführung. Chemie Ingenieur Technik; Special Issue: Die 50 %-Idee: vom Produkt zur Produktionsanlage in der halben Zeit; Volume 84, Issue 5, 05.2012; S.615–623.
- UFE
(2009) Ulrich, A.; Fay, A.; Enste, U.: Formalisierte Prozessbeschreibung in der praktischen Anwendung. atp-edition 10-11 / 2009; S.52-57.
- Ul
(1995) Ulrich, K.: The role of product architecture in the manufacturing firm. Research Policy 24 (1995), Elsevier Science B.V., Amsterdam, S.419-441.
- Ul
(2003) Ullman, D.: The Mechanical Design Process. 3. Auflage, McGraw-Hill, Boston , 2003.
- VDI
2206 N. N.: VDI 2206: Design methodology for mechatronic systems. Beuth Verlag, Berlin, 2004.
- VDI
2221 N.N.: VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Beuth Verlag, Berlin 1993.
- VDI N. N.: VDI 2222: Methodic development of solution principles. Beuth Verlag, Berlin, 1997.

2222

- VDI 2860 N. N.: VDI 2860: Assembly and handling; handling functions, handling units; terminology, definitions and symbols. Beuth Verlag, Berlin, 1990.
- VDI 3423 N.N.: VDI 3423 Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen (Begriffe, Definitionen, Zeiterfassung und Berechnung). Beuth Verlag, Berlin 2002.
- VDI 3695 N.N.: VDI/VDE-Richtlinie 3695 Engineering von Anlagen – evaluieren und optimieren“ (im Entwurf). Blatt 1: Grundlagen und Vorgehensweise. Blatt 2: Themenfeld Prozesse. Blatt 3: Themenfeld Methoden. Blatt 4: Themenfeld Hilfsmittel. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2009.
- VDI 5610 N. N.: VDI Richtlinie 5610 - Blatt 1 - Wissensmanagement im Ingenieurwesen - Grundlagen, Konzepte, Vorgehen. VDI-Verl., Düsseldorf, 2009.
- Ve (2012) Verl, Alexander: Stärker durch gutes Engineering. Magazin für Mechatronik & Engineering : [me] (2012), Nr.6, S.16-18.
- VMH (2009) Verl, A.; Müller, V.; Haubelt, A.: Baukastenbasiertes simulationsgestütztes Engineering. A&D-Kompendium 2009/2010. S.32-34.
- Vo (2009) Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Automation & Embedded Systems. kassel university press GmbH, Kassel 2009.
- Vo (2011) Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Erhöhte Verfügbarkeit und transparente Produktion. kassel university press GmbH, Kassel 2011.
- VWB+ (2009) Vajna, S., Weber, C., Bley, H., Zeman, K., & Hehenberger, P.: CAx für Ingenieure. Eine praxisbezogene Einführung. Berlin et al., 2009.
- WaCh (2005) Wang, Q., Chatwin, C. R.: Key issues and developments in modeling and simulation- based methodologies for manufacturing systems analysis, design and performance evaluation. Int J Flex Manuf Syst 25 (2005), S. 1254-1265
- WaRo (1994) Wang, J.; Roze, C.: Formation of machine cells and part families in cellular manufacturing: a linear integer programming approach. Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology, 5-9 Dec 1994, 1994, S.350-354.
- We (2010) Wegmann, D.: Projektierung von Maschinen und Anlagen mit mechatronischen Modulen. Cluster Mechatronik - Prozessoptimierung und Standardisierung durch mechatronisches Engineering, Eckental/Eschenau, 03/2010.
- We (2011) Wedel, M.: Bewertung der Zuverlässigkeit von Automatisierungssystemen in frühen Entwicklungsphasen. University of Stuttgart 2011.
- We (2012) Weber, R.: Plattformstrategie/Automobillogistik - Beim neuen Golf setzt VW auf Lego und Logistik. Vogel Business Media; 2012.
- WeKe (1971) Weil, R. L., Kettler, P. C.: Rearranging matrices to block-angular form for decomposition (and other) algorithms. Management Science, 18(1), 1971, S. 98-108.
- WeKl (2012a) Weyrich, Michael; Klein, Philipp: Assisted Engineering for mechatronic Manufacturing Systems based on a modularization concept. 17th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2012.
- WeKl (2012b) Weyrich, Michael; Klein, Philipp: Engineering of automated Manufacturing Systems with Mechatronic Objects. 38th IEEE Industrial Electronics Conference IECON 2012.
- WeKl (2012c) Weyrich, Michael; Klein, Philipp: Modulbasiertes Engineering von Produktionsanlagen - Wissensbasierte Konzeption basierend auf funktionsorientierter Modularisierung. In: . wt Werkstattstechnik online 102 (2012) H. 9,. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag.
- WeSt (2013) Weyrich, Michael; Steden, Frank: Produktionssysteme modulbasiert simulieren - Methodische Identifikation wiederverwendbarer Simulationsmodule im Engineering-Prozess.

- wt Werkstattstechnik online, Ausgabe 102 (2013) Heft 2, Düsseldorf, Springer-VDI-Verlag.
- Wi (1947) Williams, R.: Six-tenths factor aids in approximating costs. *Chemical Engineering* 54.12, 1947, S.124-125.
- WKL+ (2012) Weyrich, Michael; Klein, Philipp; Löwen, U.; Schäffler, T.; Vollmar, J.: Knowledge Based Engineering in der Anwendung - Anwendungen und Trends wissensbasierter Engineeringmethoden und Werkzeuge. *Industrie und Management* 03/2012.
- WKLW (2011a) Weyrich, M.; Klein, P.; Laurowski, M.; Wang, Y.: Mechatronic Engineering of Novel Manufacturing Processes Implemented by Modular and Sensor-Guided Machinery. 16th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2011.
- WKLW (2011b) Weyrich, M.; Klein, P.; Laurowski, M.; Wang, Y.: A function-oriented approach for a mechatronic Modularization of a sensor-guided Manufacturing System. In: Proceedings of 56th International Scientific Colloquium IWK 2011, Ilmenau, Germany, 2011.
- WMZB (2010) Waltersdorfer, F.; Moser, T.; Zoitl, A.; Biffel, S.: Version management and conflict detection across heterogeneous engineering data models. 8th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 2010 S.928-935.
- WPLL (2012) Wu, J.C.; Poppa, K.; Leu, M.C.; Liu, X.F.: Integrated function structure and object-oriented design framework. *Computers in Industry* 63 (2012); Elsevier-Verlag; S.58–470
- Wü (2008) Wünsch, G.: Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme. München Herbert Utz Verlag 2008.
- WWW K (2012) Weyrich, M.; J. Winkel, Y. Wang, P. Klein: Qualitätsnachbearbeitung in der Produktion von Lebensmitteln - Gezielte Bearbeitung von Schadstellen am Beispiel der Kartoffelverarbeitung. Kongress für Lebensmitteltechnologie, 27. - 29. September 2012, Dresden.
- ZaOt (1999) Zamirowski, E.J., Otto, K.N.: Identifying Product Portfolio Architecture Modularity Using Function and Variety Heuristics. in: Proceedings of the 1999 ASME Design Engineering Technical Conferences, Las Vegas, 1999, S. 187-197.
- Zi (2010) Zirkler, S.: Transdisziplinäres Zielkostenmanagement komplexer mechatronischer Produkte. Zugl. München: TU, Diss. 2010.
- Zu (2010) Zuehlke, D.: SmartFactory—Towards a factory-of-things. *Annual Reviews in Control* 34; Elsevier-Verlag, 2010, S.129–138.
- ZZWB (2010) ZhaDio Ye-qing, Zhu Dao-fei, Wang Rua, Bi Gui-hong: Modeling and Simulating for the Manufacturing Process of Metallurgy Based on System Dynamics. In 2nd International Asia Conference on Infonnatics in Control, Automation and Robotics (IEEE-Conference), Wuhan, China, 2010.

9.2 Internetquellen

- Automobilwoche (2011) <http://www.automobilwoche.de/article/20111017/NACHRICHTEN/111019959/1130/wir-brauchen-top-leute> (Zugriff am 9.6.2013 um 13:20 Uhr)
- Encoway (2012) http://www.gii.de/doc/upl/201210013_pm_easy_explorer.doc (Zugriff am 5.12.2012 um 16:00 Uhr)
- Marktführer(2011) „Marktführer Produktkonfiguration“, Dr. Axel Brinkop, 15. April 2011, Version 1.17 www.brinkop-consulting.com
- Marktstudie (2012) http://www.marktstudien.org/marktstudien/marktstudie_engineering.html(Zugriff am 3.11.2013 um 15:00 Uhr)
- MCD(2013) http://www.plm.automation.siemens.com/de_de/products/nx/mechatronics_concept_designer/index.shtml (Zugriff am 3.11.2013 um 12:00 Uhr)

- Metus(2013) <http://id-consult.com/metus/metus-software> (Zugriff am 3.11.2013 um 10:00 Uhr)
- OhNe (2012) Ohse, D.; Neuman, K.: Problemlösen in graphischen Strukturen- Optimierung in Graphen. <http://www.fernuni-hagen.de/BWLOR/assets/courses/k00852-5.pdf> (Zugriff am 20.2.2013 um 21:45).
- Perspectix(2013) <http://www.perspectix.com/de/> (Zugriff am 3.11.2013 um 11:00 Uhr)
- ProcessNet – http://processnet.org/processnet_media/XWu/Positionspapier+50+_+Idee+final.pdf
50% Idee (2013) (Zugriff am 17.5.2013 um 13:00 Uhr)
- Teamtechnik http://www.teamtechnik.com/templates/de/produkte/pics/Montageanlagen_dt.pdf
(2013) (Zugriff am 27.4.2013 um 10:00 Uhr)
- VW- https://www.volkswagen-media-services.com/medias_publish/ms/content/de/reden/2012/03/12/Winterkorn-JPK2012-TeilIII.standard.gid-oeffentlichkeit.html
Jahrespresse- (2012) (Zugriff am 9.6.2013 um 13:30 Uhr)

Studentische Arbeiten

Nachfolgend werden relevante studentische Arbeiten, die unter Anleitung des Verfassers oder in Zusammenarbeit mit anderen Arbeitsgruppen an der Universität Siegen durchgeführt wurden, aufgeführt. Zitierte studentische Arbeiten sind an entsprechender Stelle im Text gekennzeichnet.

- He (2013)_Da Hemeke, Matthias: Gruppierung mechatronischer Objekte für multiple Fertigungssysteme. Erstprüfer: Prof. Dr. Erwin Pesch, April 2013.
- Ki (2012)_BA Kipping, Ralph: Entwicklung eines Tools zur Anlagenkonfiguration mittels grafischer Prozessmodellierung. Erstprüfer Prof. Dr.-Ing. Michael Weyrich; August 2012.
- Lü (2013)_SA Lüder, B.: „Integration der Wiederverwendung mechatronischer Module in bestehende Engineering-Systeme“; Seminararbeit Universität Siegen 01.2013; Online verfügbar unter: http://wiki.zimt.uni-siegen.de/fertigungsautomatisierung/index.php/Integration_der_Wiederverwendung_mechatronischer_Module_in_bestehende_Engineering-Systeme
- Me (2012)_BA Meyer, Jannis: Abbildung des dynamischen Verhaltens eines mechanischen Systems mit einer SystemDynamics Software. Prof. Dr.-Ing. Michael Weyrich; April 2012.
- Sa (2013)_SA Sauerburger, V.: Unvollständige Daten in den frühen Phasen des Engineering von Produktionsanlagen: Überblick über Methoden und Ansätze; Seminararbeit Universität Siegen 01.2013; Online verfügbar unter: http://wiki.zimt.uni-siegen.de/fertigungsautomatisierung/index.php/Unvollst%C3%A4ndige_Daten_in_den_fr%C3%BChen_Phasen_des_Engineering_von_Produktionsanlagen:_%C3%9Cberblick_%C3%BCber_Methoden_und_Ans%C3%A4tze
- Sc (2013)_BA Schmick, Torsten: Ermittlung von Produktivitäts- und Kostenkriterien zur Grobbewertung von Modulen eines Anlagenkonfigurators zur Konzeption von Sondermaschinen. Prof. Dr.-Ing. Michael Weyrich; Januar 2013.
- Wa (2013)_BA Wagener, Ann-Kathrin: Untersuchung und Optimierung von Engineering Prozessen durch den Einsatz von Modularisierung anhand von ausgewählten Fertigungsprozessen eines mittelständischen Unternehmens der Elektrotechnikindustrie. Erstprüfer Prof. Dr.-Ing. Michael Weyrich; 03.2013
- Yo (2013)_MA Yokaribas, Volkan: Entwicklung eines Modularisierungskonzeptes zur Optimierung der Produktstruktur im Unternehmen Weber®. Erstprüfer Prof. Dr.-Ing. Michael Weyrich; 03.2013.

Anhang

Anhang A – MATLAB – Modell des Reserve Cuthill McKee-Algorithmus

```
function [ output_args ] = Klein( input_args )

A = xlsread('Eingabematrix.xls')           %original matrix

B = isnan(A);
A(B) = 0;

lang = size(A)
      %lang(1) Zeilen
      %lang(2) Spalten

A=A(2:lang(1),2:lang(2))

p = symrcm(A)                             % Spaltennummern nach Algorithmus
Zeile = p'                                % Zeilennummern nach Algorithmus

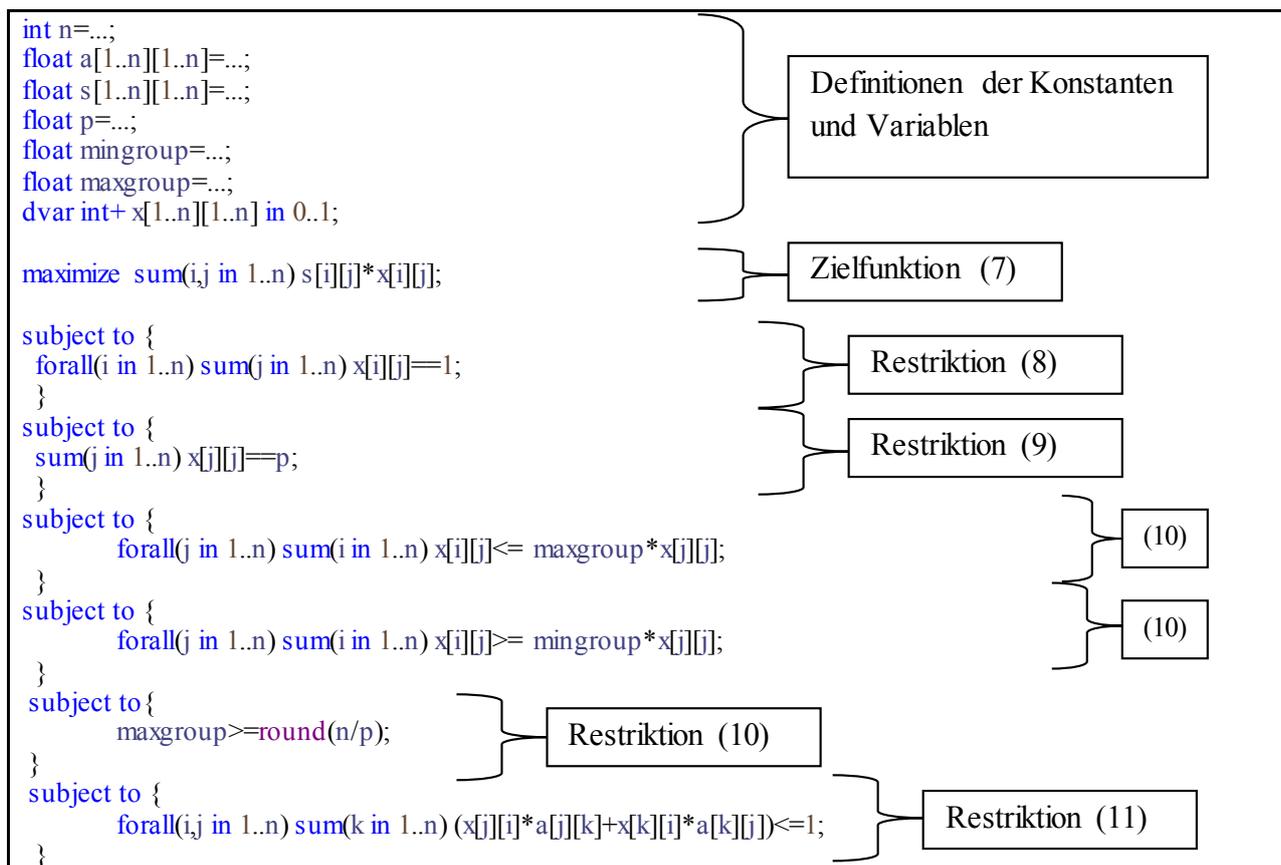
R = A(p,p);                               %matrix after SYMRCM
      % obtaining the original matrix from the matrix after SYMRCM
subplot(1,2,1), spy(A), title('A');
subplot(1,2,2), spy(R), title('R(e,e)');
R

for i=1:(lang(1)-1)
    T(i+1,1)=Zeile(i);
    T(1,i+1)=p(i);
end

T(2:lang(1),2:lang(2))= R

xlswrite('geclustert Matrix.xls', T);
```

Anhang B - CPLEX-Modell des P-Median Modells



Anhang C – Modularisierung der Beispielanlage zur Lebensmittelverarbeitung

Resultierende Module ohne eine Anpassung der Komponentenmatrix

Modularisierung von Fertigungssystemen

Bitte Pfad der Exceldatei eingeben: golproket_einlesbar.xls Dateiauswahl PMM Anzahl der Maschinen: 1 Maximieren Zielfunktionswert: 621.0

Auswahl des Ähnlichkeitskoeffizienten: Kusiak Anzahl Gruppen: 4 Gruppengröße: 0 bis 100 Minimieren

Gruppierungsmatrix	Komponentenmatrix	Ähnlichkeitsmatrix																													
	1	2	5	6	8	11	13	14	15	16	3	9	17	18	19	26	21	23	24	25	29	31	4	7	10	12	20	22	27	28	30
Water Nozzle	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Water system	2	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	0	0	0
Wiper	5	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	0	0	0
Conveyor belt	6	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	0	0	0
Machine frame	8	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	0	0	0
Pneumatic system	11	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	0	0	0
Fasteners	13	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	0	0	0
Robot	14	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	0	0	0
Start Button	15	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	0	0	0
Encoder	16	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	0	0	0
Camera body and lens	3	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	0	0	0
Lighting	9	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	0	0	0
Light sources (LEDs)	17	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	0	0	0
Imaging sensor	18	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	0	0	0
Camera interface	19	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	0	0	0
Image analysis	26	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	0	0	0
Conveyor belt drive	21	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	0	0	0
Power system	23	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	0	0	0
Robot drive	24	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	0	0	0
Wiper motor	25	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	0	0	0
Control Software	29	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	0	0	0
Robot control	31	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	0	0	0
Cutting valve	4	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	0	0	0
Water Pump	7	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	0	0	0
Safety equipment	10	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	0	0	0
HMI	12	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	0	0	0
Digital I/O	20	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	0	0	0
Water pump drive	22	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	0	0	0
Lighting control	27	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	0	0	0
Pressure control	28	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	0	0	0
Valve control	30	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	0	0	0

Modularisierung von Fertigungssystemen

Bitte Pfad der Exceldatei eingeben: golproket_einlesbar.xls Dateiauswahl PMM Anzahl der Maschinen: 1 Maximieren Zielfunktionswert: 621.0

Auswahl des Ähnlichkeitskoeffizienten: Kusiak Anzahl Gruppen: 4 Gruppengröße: 0 bis 100 Minimieren

Gruppierungsmatrix	Komponentenmatrix	Ähnlichkeitsmatrix																														
	1	2	5	6	8	11	13	14	15	16	3	9	17	18	19	26	21	23	24	25	29	31	4	7	10	12	20	22	27	28	30	
Water Nozzle	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Water system	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0
Wiper	5	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	
Conveyor belt	6	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0		
Machine frame	8	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Pneumatic system	11	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Fasteners	13	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Robot	14	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0		
Start Button	15	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0		
Encoder	16	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Camera body and lens	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Lighting	9	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Light sources (LEDs)	17	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	0	0		
Imaging sensor	18	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	0	0		
Camera interface	19	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	0	0	0	
Image analysis	26	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	0	0	0	
Conveyor belt drive	21	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	0	0	0	
Power system	23	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	0	0	0	
Robot drive	24	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	0	0	0	
Wiper motor	25	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	0	0	0	
Control Software	29	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	0	0	0	
Robot control	31	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	0	0	0	
Cutting valve	4	1	1	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	0	
Water Pump	7	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	0	0	0	
Safety equipment	10	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	0	0	0	
HMI	12	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	0	0	0	
Digital I/O	20	0																														

Ausgangskomponentenmatrix

Matrix vor Sortierung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
Water Nozzle	1	1	1	0	1	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	1	0	
Water system	2	1	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Camera body and lens	3	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0		
Cutting valve	4	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	
Wiper	5	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	
Conveyor belt	6	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	
Water Pump	7	0	2	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	1	1	0	0	
Machine frame	8	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Lighting	9	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	2	1	0	1	0	0	0	0	0	1	2	0	1	0	0		
Safety equipment	10	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	2	1	1
Pneumatic system	11	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	
HMI	12	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	2	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	2	1	1	
Fasteners	13	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Robot	14	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	2	0	0	0	0	1	0	2	
Start Button	15	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	
Encoder	16	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
Light sources (LEDs)	17	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	2	0	1	0	0	
Imaging sensor	18	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
Camera interface	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	
Digital I/O	20	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	2	1	1	
Conveyor belt drive	21	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
Water pump drive	22	0	1	0	0	0	0	2	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	
Power system	23	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	
Robot drive	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	2	0	0	1	0	2	
Wiper motor	25	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	
Image analysis	26	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	2	0	0	0	0	2	1	1	2	0	2	0	2	
Lighting control	27	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	2	1	0	2	0	0	
Pressure control	28	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	2	1	0	
Control Software	29	0	0	0	1	1	1	1	0	1	2	1	2	0	1	1	0	1	0	0	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	2
Valve control	30	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	0	
Robot control	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	2	0	0	2	0	1	

Nach der Sortierung

Matrix nach Sortierung	1	2	5	6	8	11	13	14	15	16	3	9	17	18	19	26	21	23	24	25	29	31	4	7	10	12	20	22	27	28	30		
Water Nozzle	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
Water system	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	
Wiper	5	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Conveyor belt	6	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	2	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
Machine frame	8	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Pneumatic system	11	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	
Fasteners	13	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Robot	14	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	1	2	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	
Start Button	15	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	
Encoder	16	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
Camera body and lens	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Lighting	9	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	2	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	2	0	0		
Light sources (LEDs)	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	
Imaging sensor	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Camera interface	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Image analysis	26	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	2	1	0	0	0	2	1	2	2	0	0	0	1	0	0	2	0	0	
Conveyor belt drive	21	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	
Power system	23	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	
Robot drive	24	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	1	1	1	2	0	0	1	1	1	0	0	0	0	
Wiper motor	25	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
Control Software	29	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	2	1	1	1	1	1	2	1	1	2	2	2	2	1	2	2	2
Robot control	31	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	2	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	
Cutting valve	4	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
Water Pump	7	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0	2	0	1	0
Safety equipment	10	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	2	1	1	1	1	2	1	1	0	0	1	
HMI	12	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	2	1	0	1	2	1	1	1	1	1</	

Anhang D – Modularisierung der Beispielanlage zur Qualitätssicherung von Verbindungselementen

Ausgangskomponentenmatrix mit Hub-Dreheinheit

Matrix vor Sortierung	28	25	31	29	5	21	7	6	27	20	32	17	15	3	9	4	26	2	1	24	30	22	18	23	16	19	8	14	12	13	11	10	
Camera-interface	28	1	1	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Image sensor	25	1	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Drive testing part rotation	31	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Image analysis software	29	2	2	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Screw-gripper	5	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	1	2	2	2	2	0	2	1	0	0	2	1	2	2	0	0	0	0	0	0	
Control lifting-turn-unit	21	0	0	0	0	2	1	2	2	0	0	0	1	2	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	2	2	0	0	0	0	0	0	
Drive Turning	7	0	0	0	0	2	1	2	0	0	0	1	2	2	0	0	2	0	0	0	0	0	2	1	2	2	0	0	0	0	0	0	
Drive Lifting	6	0	0	0	0	2	2	1	0	0	0	1	2	2	0	2	0	0	0	0	0	2	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0	
Control illumination	27	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	2	0	0	0	2	0	0	0	0	1	1	2	1	0	0	0	0	0	0	
Control Rotary indexing table	20	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	2	0	0	0	0	2	0	0	1	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0	
Control testing part rotation	32	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	
HMI	17	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	
PLC	15	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	2	2	2	0	0	0	0	0	
Drive for Rotary indexing table	3	0	0	0	0	2	0	2	2	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	
Pneumatics testing system	9	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	1	2	0	1	0	0	0	
Lifting-turning-unit	4	0	0	0	0	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
Illumination	26	0	1	0	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	
Adaptor testing part	2	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	2	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
Rotary indexing table	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	1	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
Camera body	24	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	
Guidance for sorting of testing part	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	
Digital I/O	22	0	0	0	0	2	1	2	2	1	1	1	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	1	0	0	1	0	0	
Electronic units	18	2	2	2	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	2	0	0	0	0	2	1	0	2	1	0	0	1	0	0	
Control software	23	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	0	0	0	0	0	0	2	0	1	2	2	0	0	1	0	0	
Safety equipment	16	0	0	0	0	2	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	2	2	2	1	2	0	0	1	0	0	
Control centrifugal feeder	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2	1	0	0	2	0	0	
Machine frame	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	1	1	2	2	0	0	0	0	0	1	2	0	2	0	0	
Separation	14	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	2	1	0	2	1	0
DC motor centrifugal feeder	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	2	0	0	1	1	0	2
Frame of centrifugal feeder	13	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	2	2	1	1	2	1
Drum	11	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	1	0	2	1	2
Driveshaft of centrifugal feeder	10	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	2	1	2	1	0

Ausgangskomponentenmatrix mit Roboter

Matrix vor Sortierung	4	2	1	16	19	5	3	13	10	12	6	11	9	7	8	17	18	22	21	14	15	20	23		
Control illumination	4	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	2	2	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Image sensor	2	0	1	1	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	
Camera-interface	1	1	1	1	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
DC motor centrifugal feeder	16	0	0	0	1	2	0	0	2	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
Driveshaft of centrifugal feeder	19	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	
HMI	5	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
Image analysis software	3	1	2	2	0	0	1	1	0	0	0	2	2	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
Control centrifugal feeder	13	0	0	0	2	0	1	0	1	1	2	2	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
Electronic units	10	1	2	2	1	0	1	0	1	1	2	1	0	2	2	0	0	0	1	2	0	0	0	0	
Safety equipment	12	1	0	0	1	0	1	0	2	2	1	2	2	2	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	
PLC	6	2	0	0	0	0	2	2	2	1	2	1	2	2	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	
Control software	11	2	0	0	1	0	2	2	2	0	2	2	1	2	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	
Digital I/O	9	1	0	0	1	0	1	0	1	2	2	2	2	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
Illumination	7	2	1	0	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2	0	0	0	
Camera body	8	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2	0	0	0	
Frame of centrifugal feeder	17	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	2	2	0	0	0	
Drum	18	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	1	0	0	0	
Control Robot	22	0	0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	1	0	0	0	0	1	2	0	1	2	0	
Drive Robot	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	1	1	0	0	0	2	1	0	0	2	0	
Machine frame	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	1	2	2	0
Separation	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	0	2	1	1	1	2	
Robot	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	1	1	2	
Screw gripper	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	1	0	

Multiple Matrix nach Sortierung ohne Maßnahmen der Erhöhung der Wiederverwendbarkeit

Matrix nach Sortierung		1	2	17	20	5	6	7	8	10	11	14	4	9	12	26	3	15	16	18	19	21	27	28	33	34	35	13	22	23	24	25	29	30	31	32			
Camera-interface	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Image sensor	2	1	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Illumination	17	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Camera body	20	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Screw-gripper	5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	1	2	2	0	0	0	0			
Control lifting-turn-unit	6	0	0	0	0	0	1	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	0	0			
Drive Turning	7	0	0	0	0	0	0	1	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	0			
Drive Lifting	8	0	0	0	0	0	0	0	1	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			
Control Rotary indexing table	10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	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			
Control testing part rotation	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	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			
Drive for Rotary indexing table	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Image analysis software	4	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	2	0	0	0	0			
Control illumination	9	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	2	1	0	0	0			
HMI	12	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	1	2	1	0	0	0			
Control centrifugal feeder	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	1	2	2	0	0	0			
Drive testing part rotation	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Pneumatics testing system	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Lifting-turning-unit	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Adaptor testing part	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Rotary indexing table	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Guidance for sorting of testing part	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Machine frame	27	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0		
Separation	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Robot	33	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Drive Robot	34	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	2	1	1	2	1	1	0	0	0	0		
Control Robot	35	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	1	2	1	1	2	2	0	0	0	0	
PLC	13	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	2	1	2	2	0	0	0	0	0		
Digital I/O	22	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	1	2	2	1	0	0	0	0	0		
Electronic units	23	2	2	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	2	1	0	2	1	0	0	0	0		
Control software	24	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	0	1	2	1	0	0	0	0	0		
Safety equipment	25	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	2	1	1	0	0	0	0		
DC motor centrifugal feeder	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	2		
Frame of centrifugal feeder	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	1
Drum	31	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	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	2
Driveshaft of centrifugal feeder	32	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	0	0	0	0	0	0	0	2	1	2	1

Anhang E – Ausgangsgrößen für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit für die Funktion „Handling“

	Linearachse	Industrieroboter	Portalroboter
Wiederbeschaffungswert [€]	12000	35000	40000
Abmessungen bzw. Flächenbedarf [m²]	2,4	3	5
Energieverbrauch pro Stunde [kWh]	2,7	2	2,3
Anteil Instandhaltungszeit für reguläre Wartung, Verschleiß und Reparaturen an der Betriebszeit [%]	0,5	0,2	0,4
Kosten für Verschleißteile pro Jahr [€]	0	0	0
Kapazitätsgrenze [Stück/h]	4	3	2
Bearbeitungszeit [s]	0,25	0,33	0,5
Arbeitsdauer für Mitarbeiter [s]	0	0	0
Dauer Maschinenbelegung [s]	0,25	0,33	0,5
Nutzungsdauer der Anlage [a]	3	5	5
Jährliche Nutzungszeit [h]	6000	6000	6000
Kalkulatorische Zinsen [%]	5	5	5
Energiekosten [€/kWh]	0,12	0,12	0,12
Kosten Mitarbeiter [€/h]	50	50	50
Kosten Fläche im Monat [€/m²]	6,25	6,25	6,25
Herstellungsmenge	3	3	3